

DIN EN 1993-1-9



ICS 91.010.30; 91.080.13

EntwurfEinsprüche bis 2023-04-03
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1993-1-9:2010-12**Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-9: Ermüdung;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-9:2023**Eurocode 3: Design of steel structures –
Part 1-9: Fatigue;
German and English version prEN 1993-1-9:2023Eurocode 3: Calcul des structures en acier –
Partie 1-9: Fatigue;
Version allemande et anglaise prEN 1993-1-9:2023**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-02-03 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 Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

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

Gesamtumfang 266 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-9:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ 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 1993-1-9:2010-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) inhaltliche Überarbeitung des Dokuments;
- b) redaktionelle Überarbeitung des Dokuments.

– Entwurf –

März 2023

DIN EN 1993-1-9

Titel de: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —
Teil:1-9: Ermüdung

Titel en: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-9: Fatigue

Titel fr: Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-9: Fatigue

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
0.1 Einleitung zu den Eurocodes	6
0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile)	6
0.3 Einleitung zu EN 1993-1-9	8
0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen	8
0.5 Nationaler Anhang zu EN 1993-1-9	8
1 Anwendungsbereich	10
1.1 Anwendungsbereich	10
1.2 Annahmen	10
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe, Definitionen und Symbole	11
3.1 Begriffe und Definitionen	11
3.1.1 Allgemeines	11
3.1.2 Ermüdungseinwirkungen	15
3.1.3 Ermüdungsbeanspruchung	17
3.1.4 Ermüdungswiderstand	20
3.1.5 Ermüdungsnachweis	24
3.2 Symbole	25
Lateinische Großbuchstaben	25
Lateinische Kleinbuchstaben	26
Griechische Großbuchstaben	27
Griechische Kleinbuchstaben	28
4 Grundlagen der Ermüdungsbemessung	28
5 Bemessungsphilosophien bei Ermüdung	29
6 Bemessungskonzepte bei Ermüdung	30
6.1 Spannungskonzepte	30
6.2 Nachweisverfahren	31
7 Ermüdungsbeanspruchung	31
7.1 Berechnung der Nennspannungen	31
7.2 Maßgebende Nennspannungen	32
7.3 Berechnung der Nennspannungsschwingbreiten	35
7.3.1 Allgemeines	35
7.3.2 Bemessungswert der Nennspannungsschwingbreite	35
7.4 Wirksame Spannungsschwingbreite	36
8 Ermüdungswiderstand	37
8.1 Ermüdungswiderstandskurven	37
8.2 Klassifizierung der Konstruktionsdetails	44
8.3 Modifizierung des Ermüdungswiderstands	45
8.3.1 Größeneinfluss	45
8.3.2 Nachbehandlung	45
9 Ermüdungsnachweis	45
9.1 Nachweis elastischen Verhaltens	45

9.2	Nachweis mittels Bezugswert	46
9.3	Nachweis mittels Dauerfestigkeit	47
9.4	Nachweis bei mehrachsiger Ermüdungsbeanspruchung	47
10	Klassifizierte Konstruktionsdetails für das Nennspannungskonzept	48
Anhang A (normativ) Nachweis mittels linearer Schadenakkumulation		94
A.1	Anwendung dieses Anhangs	94
A.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	94
A.3	Ermüdungsbeanspruchung	94
A.3.1	Spannungen infolge Ermüdungseinwirkungen	94
A.3.2	Berechnung der Spannungsschwingbreiten	94
A.4	Ermüdungswiderstand	95
A.4.1	Ertragbare Schwingspielzahl für das Nennspannungskonzept	95
A.4.2	Ertragbare Schwingspielzahl für das Strukturspannungskonzept	97
A.4.3	Ertragbare Schwingspielzahl für das Kerbspannungskonzept	97
A.4.4	Ertragbare Schwingspielzahl geschweißter Anschlüsse mit HFMI-Behandlung	98
A.5	Ermüdungsnachweis	98
Anhang B (normativ) Strukturspannungskonzept		101
B.1	Anwendung dieses Anhangs	101
B.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	101
B.3	Ermüdungsbeanspruchung	101
B.3.1	Spannungen infolge Ermüdungseinwirkungen	101
B.3.2	Berechnung der Spannungsschwingbreiten	103
B.4	Ermüdungswiderstand	104
B.4.1	Ermüdungswiderstandskurven	104
B.4.2	Kerbfalltabellen für das Strukturspannungskonzept	106
B.4.3	Modifizierung des Ermüdungswiderstands	109
B.5	Ermüdungsnachweis	110
Anhang C (normative) Kerbspannungskonzept		111
C.1	Anwendung dieses Anhangs	111
C.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	111
C.3	Ermüdungsbeanspruchung	111
C.3.1	Spannungen infolge Ermüdungseinwirkungen	111
C.3.2	Berechnung der Spannungsschwingbreiten	112
C.4	Ermüdungswiderstand	113
C.4.1	Ermüdungswiderstandskurven	113
C.4.2	Kerbfalltabellen für das Kerbspannungskonzept	114
C.5	Ermüdungsnachweis	114
Anhang D (informativ) Empfehlungen für Erhöhungsfaktoren k_1 und Spannungskonzentrationsfaktoren k_f		115
D.1	Anwendung dieses Anhangs	115
D.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	115
D.3	Sekundäre Biegemomente in Fachwerkträgern	115
D.4	Flansche von Trägern mit I-Querschnitten und Dicken- oder Breitenübergängen	116
D.5	Dickenübergänge in Blechen	118
D.6	Schalen	118
Anhang E (informativ) Empfehlungen für vorgespannte Schrauben und Gewindestangen mit Zugbeanspruchung		119
E.1	Anwendung dieses Anhangs	119
E.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	119
E.3	Vereinfachte Berechnungsmethode	120
Anhang F (informativ) Ermüdungsbemessung geschweißter Anschlüsse mit Nachbehandlung durch höherfrequente Hämmerverfahren		123

F.1	Anwendung dieses Anhangs	123
F.2	Gültigkeits- und Anwendungsbereich.....	123
F.3	Ermüdungsbeanspruchung.....	124
F.3.1	Spannungen aus Ermüdungseinwirkungen.....	124
F.3.2	Berechnung der Spannungsschwingbreiten.....	124
F.4	Ermüdungswiderstand	125
F.4.1	Ermüdungswiderstandskurven	125
F.4.2	Kerbfalltabellen	126
F.4.3	Alternative Formeln zur Bestimmung des Kerbfalls.....	129
F.4.4	Modifizierung des Ermüdungswiderstands.....	130
F.5	Ermüdungsnachweis	130
F.6	Anforderungen zur Anwendung.....	131
F.6.1	Anforderungen an Schweißnähte vor der HFMI-Behandlung.....	131
F.6.2	Anforderungen an Schweißnähte nach der HFMI-Behandlung.....	131
F.6.3	Qualitätssicherung.....	132
F.7	Anwendung bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung.....	132
Anhang G (informativ) Referenzmethode mit dem Strukturspannungskonzept		134
G.1	Anwendung dieses Anhangs	134
G.2	Gegenstand und Anwendungsbereich	134
G.3	Ermüdungsbeanspruchungen.....	134
G.4	Ermüdungswiderstand	134
G.5	Ermüdungsnachweis	135
Literaturhinweise.....		136

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-9:2023) 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 1993-1-9:2005 und EN 1993-1-9:2005+AC:2009 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 sind derzeit in Erarbeitung, z. B. der Eurocode für die Bemessung von tragenden Konstruktionen aus Glas

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 1993 (alle Teile)

EN 1993 (alle Teile) gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Hochbauten und Ingenieurbauten aus Stahl. EN 1993 (alle Teile) 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 1993 (alle Teile) behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Stahl. Andere Anforderungen, wie z. B. Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht berücksichtigt.

EN 1993 ist in folgende Teile unterteilt:

EN 1993-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten* — Teil 1: *Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken*;

EN 1993-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3: Türme, Maste und Schornsteine*;

EN 1993-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4: Silos und Tankbauwerke*;

EN 1993-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*;

EN 1993-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 6: Kranbahnen*;

EN 1993-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 7: Bemessung von Sandwich-Paneelen*.

EN 1993-1 existiert nicht als ein physikalisches Dokument, sondern besteht aus den folgenden 14 gesonderten Teilen, deren grundlegender Teil EN 1993-1-1 ist:

EN 1993-1-1, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-1-2, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall*;

EN 1993-1-3, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Regeln — Ergänzennde Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*;

ANMERKUNG Kaltgeformte Hohlquerschnitte nach EN 10219 werden in EN 1993-1-1 behandelt.

EN 1993-1-4, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzennde Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*;

EN 1993-1-5, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*;

EN 1993-1-6, *Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*;

EN 1993-1-7, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Aus Blechen zusammengesetzte Bauteile unter Querlasten*;

EN 1993-1-8, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*;

EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung*;

EN 1993-1-10, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*;

EN 1993-1-11, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl*;

EN 1993-1-12, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700*;

EN 1993-1-13, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-13: Regeln für Träger mit großen Stegöffnungen*;

EN 1993-1-14, *Design of Steel Structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*.

Alle Teile von EN 1993-1-2 bis EN 1993-1-14 behandeln allgemeine Themen, die unabhängig von der Art des Bauwerks sind, wie die Tragwerksbemessung für den Brandfall, ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche, ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen, plattenförmige Bauteile usw.

Alle Teile von EN 1993-2 bis EN 1993-7 behandeln Themen, die für eine bestimmte Bauwerksart relevant sind, wie Stahlbrücken; Türme, Maste und Schornsteine; Silos und Tankbauwerke; Pfähle und Spundwände; Kranbahnen usw. EN 1993-2 bis EN 1993-7 beziehen sich auf die allgemeinen Regeln in EN 1993-1 und ergänzen, ändern oder ersetzen diese.

0.3 Einleitung zu EN 1993-1-9

EN 1993-1-9 enthält spezifische Bemessungsregeln für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von Stahlkonstruktionen. Das Dokument ist für die Anwendung mit EN 1990, EN 1991 und EN 1993-1 vorgesehen. Themen, die bereits in diesen Dokumenten behandelt werden, werden nicht wiederholt. Der Schwerpunkt von EN 1993-1-9 liegt auf Bemessungsregeln, die die entsprechenden Bestimmungen in EN 1993-1 ergänzen, modifizieren oder ersetzen.

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 könnten alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch gerechtfertigt 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 zu EN 1993-1-9

Nationale Festlegungen sind in dieser Norm zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festgelegte Parameter (NDP).

Die nationale Ausgabe von EN 1993-1-9 kann durch einen Nationalen Anhang ergänzt werden, der alle nationalen Festlegungen enthält, die für die Bemessung und Konstruktion von Hochbauten und Ingenieurbauten im jeweiligen Land erforderlich sind.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in dieser Norm angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in dieser Norm angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder kann, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien vereinbart werden.

Nationale Festlegungen sind in EN 1993-1-7 zu den folgenden Abschnitten gestattet:

1.1(8)	4(6)	5(4)	5(6)
6.1(3) – 3 choices	7.1(4)	8.2(1) – 2 choices	9.1(1)
9.4(3)	B.2(1)	B.2(1)	C.2(4)

C.2(5)

F.2(2)

F.2(5)

F.2(6)

F.3.2(1)

F.4.2.1(3)

Nationale Festlegungen sind in EN 1993-1-9 zu den folgenden informativen Anhängen gestattet:

Anhang D

Anhang E

Anhang F

Anhang G

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

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich

(1) EN 1993-1-9 stellt Bemessungskonzepte für den Nachweis des Ermüdungswiderstands von Stahlbauten bereit.

ANMERKUNG Stahlbauten bestehen aus Bauteilen und deren Anschlüssen. Jedes Bauteil und Anschluss kann durch ein oder mehrere Konstruktionsdetails repräsentiert werden.

(2) Andere als die spannungsbasierten Bemessungskonzepte, wie z. B. das Kerbdehnungskonzept oder das Bruchmechanikkonzept, sind nicht Gegenstand von EN 1993-1-9.

(3) EN 1993-1-9 ist nur in Übereinstimmung mit den Festlegungen der Kerbfalltabellen oder Anhänge auf Tragwerke anwendbar, die aus Baustahlsorten nach EN 1993-1 (alle Teile) bestehen.

(4) EN 1993-1-9 ist nur auf Tragwerke anwendbar, deren Ausführung EN 1090-2 entspricht.

ANMERKUNG Ergänzende Ausführungsanforderungen sind aus den Kerbfalltabellen ersichtlich.

(5) EN 1993-1-9 ist auf Tragwerke anwendbar, die unter normalen atmosphärischen Bedingungen mit ausreichendem Korrosionsschutz und regelmäßiger Instandhaltung eingesetzt werden. Die Einflüsse aus Meerwasserkorrosion werden nicht erfasst.

(6) EN 1993-1-9 ist auf Tragwerke mit Feuerverzinkung nach den Festlegungen in den Kerbfalltabellen und Anhängen anwendbar.

(7) Mikrostrukturelle Schäden durch hohe Temperaturen ($> 150\text{ °C}$), die während der geplanten Nutzungsdauer auftreten, werden nicht erfasst.

(8) EN 1993-1-9 gibt Leitlinien zur Berücksichtigung von Nachbehandlungen, die auf eine Verbesserung des Ermüdungswiderstands von Konstruktionsdetails abzielen.

1.2 Annahmen

(1) Sofern nicht ausdrücklich angegeben, gelten EN 1990, EN 1991 (alle Teile) und die anderen relevanten Teile von EN 1993-1 (alle Teile).

(2) Die in EN 1993-1-9 bereitgestellten Bemessungskonzepte sind unter folgenden Bedingungen anwendbar:

- die Ausführungsqualität entspricht den Vorgaben aus EN 1090-2 und
- die verwendeten Werkstoffen und Bauprodukte entsprechen den Vorgaben der relevanten Teile von EN 1993 (alle Teile) oder den relevanten Werkstoff- und Produktspezifikationen.

(3) Die Bemessungskonzepte von EN 1993-1-9 wurden im Allgemeinen aus Ermüdungsversuchen an Konstruktionsdetails großmaßstäblicher Prüfkörper abgeleitet, die die Auswirkungen geometrischer und struktureller Imperfektionen aus Werkstoffherstellung und Ausführung (z. B. Auswirkungen von Toleranzen und Schweißeigenspannungen) berücksichtigen.

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).

ANMERKUNG In den Literaturhinweisen sind zitierte Dokumente aufgeführt, die keine normativen Verweisungen sind, einschließlich solcher Dokumente, die als Empfehlungen (d. h. durch „sollte“-Sätze) und Erlaubnisse (d. h. durch „darf“-Sätze) in Bezug genommen werden.

EN 1090-2, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

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

EN 1993-1 (alle Teile), *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

3 Begriffe, Definitionen und Symbole

3.1 Begriffe und Definitionen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe und Definitionen aus EN 1990, EN 1991 (alle Teile), EN 1993-1-1, EN 1993-1-5, EN 1993-1-8 sowie die folgenden.

3.1.1 Allgemeines

3.1.1.1

Ermüdung

allmählich fortschreitender lokaler Schädigungsprozess eines Konstruktionsdetails innerhalb eines Tragwerks infolge Ermüdungsbeanspruchung (siehe 3.1.2.1), der zu einem Versagen durch Rissbildung und Rissfortschritt führen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Versagensart hängt von der Definition des Ermüdungswiderstands ab, siehe 3.1.4.1.

3.1.1.2

geplante Nutzungsdauer

Bezugszeitraum, der von der Art des Tragwerks abhängt, für den die Konstruktionsdetails eines Tragwerks mit einem angemessenen Zuverlässigkeitsniveau sicher funktionieren müssen, so dass ein Versagen durch Ermüdungsrissbildung ausgeschlossen ist

Anmerkung 1 zum Begriff: EN 1990 enthält Bestimmungen zur geplanten Nutzungsdauer.

3.1.1.3

schwingbruchsichere Konstruktionen (safe life)

Bemessungsphilosophie, bei der ein angemessenes Zuverlässigkeitsniveau in der Bemessungssituation mit Ermüdung ohne die Notwendigkeit planmäßiger Inspektionen oder Überwachung während der geplanten Nutzungsdauer erreicht wird

3.1.1.4

schadenstolerante Konstruktionen (damage tolerance)

Bemessungsphilosophie, bei der ein angemessenes Zuverlässigkeitsniveau in der Bemessungssituation mit Ermüdung durch vorgeschriebene Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen zur Entdeckung und Beseitigung von Ermüdungsschäden erreicht wird

3.1.1.5

Konstruktionsdetail

Teil eines Bauteils oder Anschlusses, das mit einem spannungserhöhenden Einfluss behaftet ist

3.1.1.6

Hohlprofilanschluss

Anschluss, der aus kreisrunden oder rechteckigen Hohlprofilen oder aus deren Kombination besteht und der in ebenen oder räumlichen Fachwerken oder Trägern zum Beispiel als T-, Y-, X-, K-, XX- und KK-Knoten eingesetzt wird

3.1.1.7

Gewindestab

kreisrundes massives Bauteil mit Gewinde, das aus Baustahl einschließlich nichtrostendem Stahl besteht

3.1.1.8

spannungserhöhender Einfluss

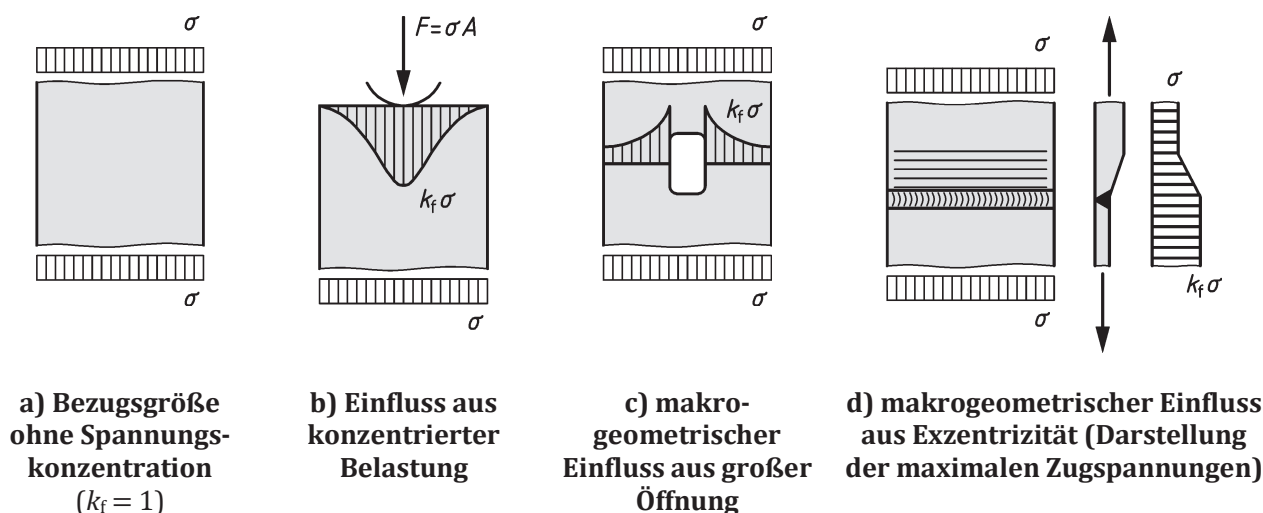
lokaler Anstieg der Spannungen, der durch eine Unstetigkeit (Diskontinuität) in der Belastung und/oder der Geometrie und/oder den Werkstoffeigenschaften hervorgerufen wird

3.1.1.9

Spannungskonzentration

berechenbarer Anteil des spannungserhöhenden Einflusses, der durch den Spannungskonzentrationsfaktor k_f ausgedrückt wird, siehe Bild 3.1

Anmerkung 1 zum Begriff: Spannungskonzentrationsfaktoren sind üblicherweise nur für die Auswirkungen konzentrierter Belastung und geometrischer Einflüsse verfügbar.



Legende

σ Nennspannung
 k_f Spannungskonzentrationsfaktor
 A Querschnittsfläche
 F konzentrierte Einzellast

Bild 3.1 — Beispiele für Spannungskonzentrationsfaktoren k_f

3.1.1.10

Einfluss aus konzentrierter Belastung

Spannungserhöhung, die durch eine Unstetigkeit in der Belastung entsteht und durch Einzellasten hervorgerufen wird und für gewöhnlich nicht in den Kerbfalltabellen berücksichtigt wird, siehe z. B. Bild 3.1 b)

3.1.1.11

makrogeometrischer Einfluss

Spannungserhöhung, die durch Unstetigkeit in der globalen Bauteilgeometrie hervorgerufen, siehe z. B. Bild 3.1 c) und Bild 3.1 d), und die für gewöhnlich nicht in den Kerbfalltabellen berücksichtigt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für Unstetigkeiten in der globalen Bauteilgeometrie sind Aussparungen, einspringende Ecken, große Öffnungen, Schubweichheit, gekrümmte Bauteile, sekundäre Biegung hervorgerufen durch Exzentrizitäten und Versätze jenseits der Grenzwerte, die in den Kerbfalltabellen berücksichtigt werden

3.1.1.12

Versatz

unbeabsichtigte gegenseitige Verschiebung oder Winkelabweichung (Winkelversatz) infolge der Anordnung oder Lage der verbundenen Bauteile, die durch den Herstellungsprozess hervorgerufen wird

3.1.1.13

Exzentrizität

beabsichtigte gegenseitige Verschiebung verbundener Bauteile

3.1.1.14

Einfluss aus Verbindungs- und Anschlussgeometrie

Spannungserhöhung, die durch Unstetigkeit in der lokalen Bauteilgeometrie als Folge von Anschlüssen oder Verbindungen hervorgerufen wird, z. B. Bild 3.2 c)

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für Unstetigkeiten in der lokalen Bauteilgeometrie sind Biegespannungen in Überlagerung mit den Membranspannungen in Platten im Bereich einseitiger Anschlüsse.

3.1.1.15

Kerbwirkung

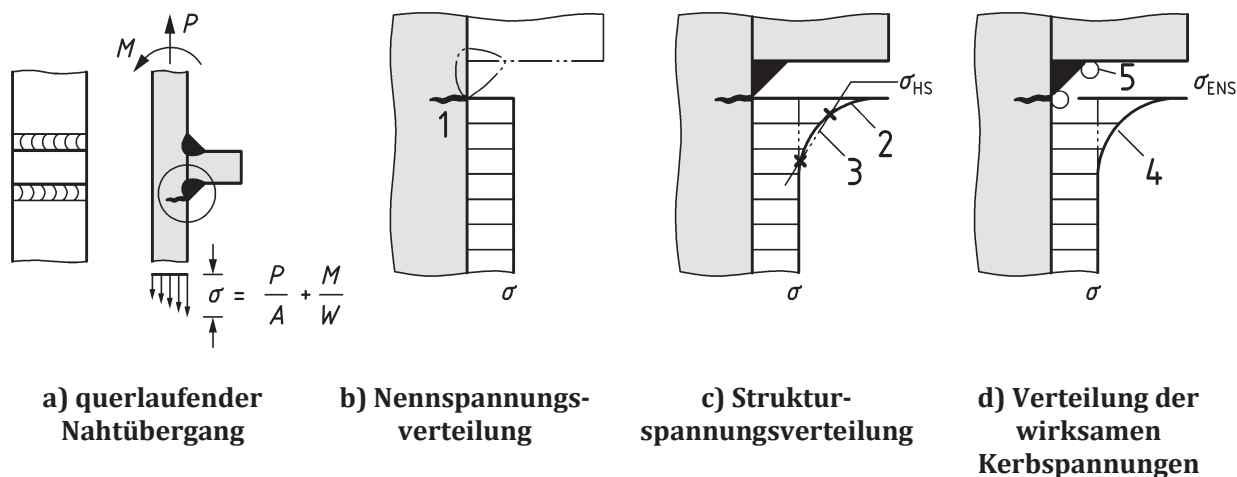
Spannungserhöhung, die durch Unstetigkeit in der lokalen Bauteilgeometrie im mikroskopischen Maßstab von einer Formkerbe (Kerbradius) hervorgerufen wird, siehe z. B. Bild 3.2 d)

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für nicht geschweißte Bauteile sind Kratzer, Rostnarben und Walzspuren. Beispiele für geschweißte Bauteile sind das Schweißnahtprofil, Nahtübergänge, Nahtwurzelpunkte, Bindefehler, Nahteinschlüsse, ungenügende Durchschweißung, Schweißgutüberlauf und Porosität.

3.1.1.16

Werkstoffeinfluss

Spannungserhöhung, die durch Unstetigkeit in den Werkstoffeigenschaften hervorgerufen wird, wie z. B. Regionen mit unterschiedlicher Fließgrenze in der Wärmeeinflusszone von Schweißnähten, und die durch die Kerbfalltabellen berücksichtigt wird



Legende

- 1 potentieller Riss
- 2 Spannungsverteilung auf der Oberfläche bei Berücksichtigung der Schweißnaht mit scharfkantigen Nahtübergängen
- 3 lineare Spannungsextrapolation
- 4 Spannungsverteilung an der Oberfläche bei Berücksichtigung der Schweißnaht mit ausgerundeten Nahtübergängen
- 5 fiktiver Kerbradius am Nahtübergang
- σ Nennspannung an der potentiellen Rissstelle (hier: Nahtübergang)
- σ_{HS} Hot-Spot-Spannung an der potentiellen Rissstelle (siehe 3.1.1.20)
- σ_{ENS} wirksame Kerbspannung an der potentiellen Rissstelle (siehe 3.1.1.22)

Bild 3.2 — Beispiele für unterschiedliche Arten der Normalspannungsverteilungen in der Nähe eines querlaufenden Nahtübergangs

3.1.1.17

Nennspannung

σ oder τ

elastische Spannung in einem Konstruktionsdetail am Ort des potentiellen Risses, wenn alle spannungserhöhenden Einflüsse vernachlässigt werden, Bild 3.2 b)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nennspannung nach EN 1993-1-9 kann eine Normal-, Schub- oder Hauptspannung sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einflüsse aus Verbindungs- und Anschlusgeometrie (siehe 3.1.1.14), die Kerbwirkung (siehe 3.1.1.15) und der Werkstoffeinfluss (siehe 3.1.1.16) werden durch die auf Nennspannungen basierenden Kerbfälle berücksichtigt. Siehe 3.1.1.18 für den Fall vorhandener makrogeometrischer Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung.

Anmerkung 3 zum Begriff: Für balkenartige Bauteilstrukturen mit gleichförmiger Belastung können die Nennspannungen mit der Balkentheorie ermittelt werden.

3.1.1.18

modifizierte Nennspannung

Nennspannung, die mit einem geeigneten Spannungskonzentrationsfaktor k_t multipliziert wurde, um geometrische Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung zu berücksichtigen, siehe Bild 3.1 b) bis Bild 3.1 d)

Anmerkung 1 zum Begriff: Anstelle von Spannungskonzentrationsfaktoren können auch Faktoren k_t verwendet werden. Beispiele werden in EN 1999-1-3 gegeben.

3.1.1.19

geometrische Spannung Strukturspannung

elastische Spannung innerhalb eines geschweißten Konstruktionsdetails, die Einflüsse aus der Verbindungs- und Anschlussgeometrie (und gegebenenfalls auch makrogeometrische Einflüsse und Einflüsse aus konzentrierter Belastung) berücksichtigt und die Kerbwirkung und den Werkstoffeinfluss vernachlässigt, siehe Bild 3.2 c)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Kerbwirkung (siehe 3.1.1.13) und der Werkstoffeinfluss (siehe 3.1.1.14) werden durch Tabelle B.1 erfasst.

3.1.1.20

Hot-Spot-Spannung

σ_{HS}

Spannung am Schweißnahtübergang eines betrachteten Konstruktionsdetails, die aus den geometrischen Spannungen (siehe 3.1.1.19) durch Spannungsextrapolation abgeleitet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe EN 1993-1-14 zur Ermittlung der Hot-Spot-Spannung.

3.1.1.21

Kerbspannung

elastische Spannung in einem Konstruktionsdetail, durch die alle Spannungskonzentrationen berücksichtigt werden, Bild 3.2 d)

3.1.1.22

wirksame Kerbspannung

σ_{ENS}

Spitzenwert der Kerbspannung am Ort des potentiellen Risses bei einer Modellierung mit vorgegebenem fiktiven Kerbradius, Bild 3.2 d)

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe EN 1993-1-14 zur Ermittlung der wirksamen Kerbspannungen.

3.1.1.23

Eigenspannungen

dauerhaft vorhandene Spannungen in einem Bauteil oder Tragwerk in Abwesenheit äußerer Einwirkungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Eigenspannungen können durch Walz-, Schneid- oder Umformprozesse, Wärmebehandlung, Schweißnahtschrumpfen oder Passungenauigkeiten zwischen Bauteilen hervorgerufen werden. Aufgrund des Fehlens einer äußeren Einwirkung befinden sich die Eigenspannungen eines Bauteils im Gleichgewicht.

3.1.1.24

Inspektion

Untersuchung der Konformität durch Messung, Beobachtung oder Prüfung relevanter Eigenschaften

3.1.2 Ermüdungseinwirkungen

3.1.2.1

Ermüdungseinwirkung

Einwirkung auf ein Tragwerk, die sich aus Belastungsereignissen zusammensetzt, deren Häufigkeit bei der Bemessung nicht vernachlässigt werden kann, da ihre Auswirkung für das Konstruktionsdetail Ermüdung hervorrufen könnte

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für Ermüdungseinwirkungen:

- Achslasten des Schwerlastverkehrs auf Straßenbrücken;
- quergerichtete Kräfte durch alternierende Wirbelablösung an Masten, Türmen und Kaminen;

- Radlasten von Kranen auf Kranbahnträgern.

Anmerkung 2 zum Begriff: EN 1990 stellt repräsentative Werte für Einwirkungen auf Tragwerke für die Bemessungssituation mit Ermüdung bereit.

3.1.2.2

Belastungsereignis

Lastzyklus

Zeitabschnitt mit einer definierten Veränderung des Betrags und/oder des Lastangriffspunkts einer Ermüdungseinwirkung, von dem ausgegangen wird, dass er sich mehrmals wiederholt

Anmerkung 1 zum Begriff: Beispiele für Belastungsereignisse sind:

- Abfolge aus Annäherung, Überfahrt und Verlassen eines LKW oder Zuges bei Betrachtung einer Brücke;
- einzelne Wirbelablösung bei Betrachtung eines Masts, Turms oder Kamines;
- Abfolge von Kranoperationen, die mit dem Anheben einer Nutzlast beginnen und enden, wenn der Kran bereit ist die nächste Nutzlast anzuheben, bei Betrachtung eines Kranbahnträgers.

3.1.2.3

Belastungsverlauf

Darstellung der erwarteten Ermüdungseinwirkung auf ein Tragwerk (unter Berücksichtigung der Vorhersageungenauigkeit) während der geplanten Nutzungsdauer durch Anordnung der Belastungsereignisse in chronologischer Abfolge

3.1.2.4

Einwirkungskollektiv

Lastkollektiv

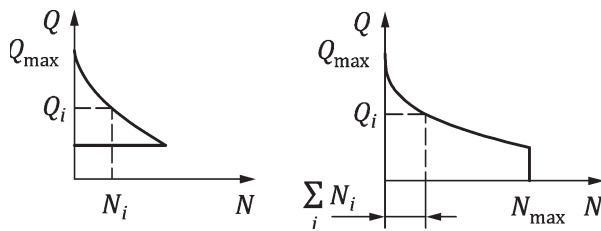
Auswertung des Belastungsverlaufs eines Tragwerks, bei der die unterschiedlichen Belastungsstufen mit ihrer zugehörigen relativen Häufigkeit in absteigender Abfolge unter Vernachlässigung von Reihenfolgeeffekten dargestellt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ermüdungseinwirkung kann durch eine Einzelhäufigkeitsdarstellung (Verhältnis der Laststufen Q_i und der zugehörigen Lastzyklenanzahl N_i) oder durch eine Summenhäufigkeitsdarstellung (Verhältnis der Laststufen Q_i und der zugehörigen aufsummierten Anzahl $\sum N_i$ der Lastzyklen, für die diese Laststufe erreicht oder überschritten wird) beschrieben werden. Bild 3.3 zeigt ausgewählte Typen von Lastkollektiven, die gewöhnlich genutzt werden:

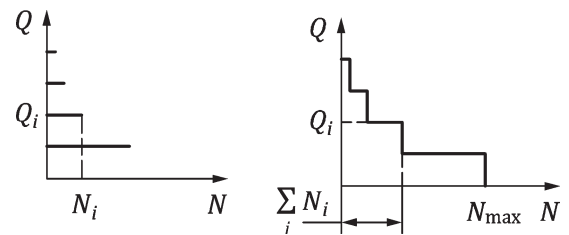
- diskretes Lastkollektiv mit unterschiedlichen Laststufen Q_i , Bild 3.3 a);
- kontinuierliches Lastkollektiv, das durch die Parameter $Q_{\max}$, $N_{\max}$ und eine standardisierte Kollektivform charakterisiert wird, Bild 3.3 b);
- äquivalentes konstantes Lastkollektiv, das durch die Parameter Q_e und $N_{\max}$ charakterisiert wird, Bild 3.3 c);
- äquivalentes konstantes Lastkollektiv, das durch den Parameter $Q_{e,2}$ und 2×10^6 Lastzyklen charakterisiert wird und ein vereinfachtes Ermüdungslastmodell in EN 1991 repräsentiert, Bild 3.3 d).

Anmerkung 2 zum Begriff: EN 1990 enthält allgemeine Festlegungen für Tragwerke, für welche EN 1991 keine Lastmodelle bereit hält.

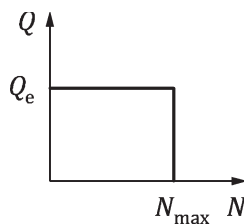
Anmerkung 3 zum Begriff: Das äquivalente konstante Lastkollektiv, das durch die Parameter $Q_{e,2}$ und 2×10^6 Lastzyklen charakterisiert wird, ersetzt ein reales diskretes oder kontinuierliches Lastkollektiv.



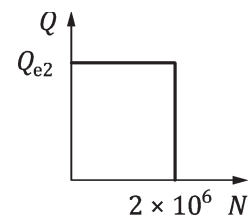
a) diskretes mehrstufiges Lastkollektiv in Einzelhäufigkeits- und korrespondierender Summenhäufigkeitsdarstellung



b) kontinuierliches mehrstufiges Lastkollektiv in Einzelhäufigkeits- und korrespondierender Summenhäufigkeitsdarstellung



c) äquivalentes einstufiges Lastkollektiv



d) äquivalentes einstufiges Lastkollektiv mit 2×10^6 Lastzyklen

Legende

N_i	Anzahl der Lastzyklen auf der Laststufe Q_i
ΣN_i	Anzahl der Lastzyklen, für welche die Laststufe Q_i erreicht oder überschritten wird
$N_{\max}$	Gesamtanzahl der Lastzyklen
Q_i	Laststufe
Q_e	Laststufe eines äquivalenten konstanten Lastkollektivs
$Q_{e,2}$	Laststufe eines äquivalenten konstanten Lastkollektivs mit 2×10^6 Lastzyklen
$Q_{\max}$	Höchstwert des Lastkollektivs

Bild 3.3 — Allgemein übliche Darstellungen von Lastkollektiven

3.1.3 Ermüdungsbeanspruchung

3.1.3.1

Ermüdungsbeanspruchung

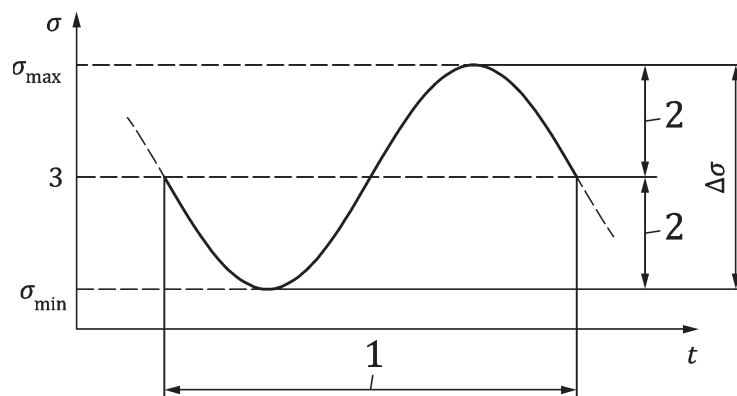
aus der Ermüdungseinwirkung resultierende Auswirkung auf ein Konstruktionsdetail in Form von Spannungen, die sich aus Spannungszyklen zusammensetzt

3.1.3.2

Spannungszyklus

Spannungsschwingspiel

Zeitraum (in Bild 3.4 mit ,1' bezeichnet) mit einer definierten Spannungsänderung zwischen einer minimalen und maximalen Spannung, der auf demselben Spannungsniveau beginnt und endet



Legende

$\sigma_{\min}$	minimale Spannung	1	Spannungszyklus (Spannungsschwingspiel)
$\sigma_{\max}$	maximale Spannung	2	Spannungsamplitude
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite	3	Mittelspannung
t	Zeit		

Bild 3.4 — Parameter eines Spannungszyklus (auch auf Schubspannungen anwendbar)

3.1.3.3

Spannungsverlauf

Darstellung der erwarteten Ermüdungsbeanspruchung durch Anordnung der Spannungszyklen in chronologischer Reihenfolge

3.1.3.4

Spannungsschwingbreite

Differenz zwischen dem größten und kleinsten Spannungswert eines Spannungszyklus, siehe Bild 3.4

3.1.3.5

Spannungsverhältnis

Verhältnis zwischen dem kleinsten und größten Spannungswert eines bestimmten Spannungszyklus, wobei die Spannungen für die häufige Einwirkungskombination ermittelt werden und statische Lastanteile enthalten

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Einfluss des Spannungsverhältnisses besteht nur für nichtgeschweißte Konstruktionsdetails und geschweißte Konstruktionsdetails mit Spannungsarmglühen oder mit einer Schweißnahtnachbehandlung nach Anhang F.

3.1.3.6

Spannungsarmglühen

Reduzierung der Eigenspannungen als Ergebnis einer thermischen Behandlung (z. B. Wärmebehandlung nach dem Schweißen)

3.1.3.7

Spannungsamplitude

halbe Spannungsschwingbreite eines bestimmten Spannungszyklus, in Bild 3.4 mit '2' bezeichnet

3.1.3.8

einstufige Ermüdungsbeanspruchung

Ermüdungsbeanspruchung, bei der alle Spannungszyklen dieselbe Spannungsschwingbreite aufweisen

3.1.3.9

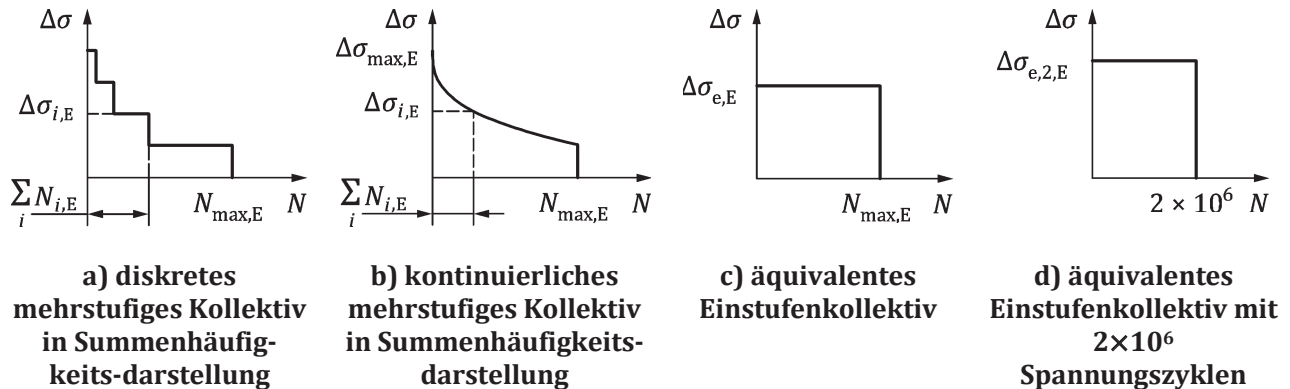
mehrstufige Ermüdungsbeanspruchung

Ermüdungsbeanspruchung, bei der die Spannungsschwingbreiten zwischen den Spannungszyklen variieren

3.1.3.10

Spannungsschwingbreitenkollektiv

Auswertung des erwarteten Spannungsverlaufs zur Darstellung der unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten mit ihrer zugehörigen relativen Häufigkeit durch Zählverfahren, wie z. B. Rainflow- oder Reservoir-Methode, die üblicherweise in absteigender Abfolge unter Vernachlässigung von Reihenfolgeeffekten dargestellt wird



Legende

- $\Delta\sigma_{i,E}$ Schwingbreite der Spannungsstufe i
- $\Delta\sigma_{\max,E}$ größte Spannungsschwingbreite
- $N_{i,E}$ Anzahl der Spannungszyklen auf der Stufe $\Delta\sigma_{i,E}$
- $\Sigma N_{i,E}$ Anzahl der Spannungszyklen, für welche die Stufe $\Delta\sigma_{i,E}$ erreicht oder übertroffen wird
- $N_{\max,E}$ Gesamtanzahl der Spannungszyklen
- $\Delta\sigma_{e,E}$ schadensäquivalente Spannungsschwingbreite
- $\Delta\sigma_{e,2,E}$ schadensäquivalente Spannungsschwingbreite mit 2×10^6 Spannungszyklen

Bild 3.5 — Allgemein übliche Darstellungen von Spannungsschwingbreitenkollektiven

Anmerkung 1 zum Begriff: Wie für die Lastkollektive in Bild 3.3 kann auch die Ermüdungsbeanspruchung durch eine Einzelhäufigkeitsdarstellung (Verhältnis der einwirkenden Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{i,E}$ oder $\Delta\tau_{i,E}$ und deren zugeordnete Anzahl $N_{i,E}$ an Spannungszyklen) oder durch eine Summenhäufigkeitsdarstellung (Verhältnis der einwirkenden Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{i,E}$ oder $\Delta\tau_{i,E}$ und deren zugeordnete Anzahl an Spannungszyklen $\Sigma N_{i,E}$, für die diese Schwingbreite erreicht bzw. überschritten wird) beschrieben werden. Die folgenden Arten von Spannungsschwingbreitenkollektiven werden für gewöhnlich genutzt:

- diskretes Kollektiv mit unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{i,E}$ oder $\Delta\tau_{i,E}$ und deren zugeordnete Anzahl an Spannungszyklen $N_{i,E}$, siehe Bild 3.5 a);
- kontinuierliches Kollektiv, das durch die größte Schwingbreite $\Delta\sigma_{\max,E}$ oder $\Delta\tau_{\max,E}$, die Gesamtanzahl an Spannungszyklen $N_{\max,E}$ und durch eine standardisierte Kollektivform charakterisiert wird, siehe Bild 3.5 b);
- äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv mit $\Delta\sigma_{e,E}$ oder $\Delta\tau_{e,E}$ und einer Gesamtanzahl an Spannungszyklen $N_{\max,E}$, siehe Bild 3.5 c);
- äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv mit $\Delta\sigma_{e,2,E}$ oder $\Delta\tau_{e,2,E}$ und 2×10^6 Spannungszyklen, siehe Bild 3.5 d).

Anmerkung 2 zum Begriff: Das äquivalente einstufige Spannungsschwingbreitenkollektiv mit $\Delta\sigma_{e,2,E}$ und 2×10^6 Spannungszyklen ist die Auswirkung eines vereinfachten Ermüdungslastmodells aus EN 1991, das durch ein äquivalentes Lastkollektiv mit $Q_{e,2}$ und 2×10^6 Lastzyklen repräsentiert wird (siehe 3.1.2.4). Das Ermüdungslastmodell verursacht eine Spannungsschwingbreite, die durch sog. λ -Beiwerte entsprechend angepasst wird, um $\Delta\sigma_{e,2,E}$ zu erhalten. Die λ -Beiwerte erfassen die Einflüsse aus dem realen Lastkollektiv und sind abhängig vom Tragwerkstyp (Brücke, Mast, Kranbahn etc.) und der Spannungsart.

Anmerkung 3 zum Begriff: Für einige Anwendungsfälle kann ein Lastzyklus mehrere Spannungszyklen für das betrachtete Konstruktionsdetail verursachen. Entscheidend für die Bemessungssituation mit Ermüdung ist immer die Anzahl der Spannungszyklen (N_E) anstelle der Anzahl der Lastzyklen (N).

3.1.3.11

Zählverfahren

Vorgehensweise zur Umwandlung eines Spannungsverlaufs in ein Spannungsschwingbreitenkollektiv, wie z. B. Rainflow- und Reservoirmethode

3.1.3.12

Rainflow-Methode

besonderes Zählverfahren zur Erzeugung eines Spannungsschwingbreitenkollektivs aus einem gegebenen Spannungsverlauf

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe prEN 1990:2021 Anhang F für die mathematische Vorgehensweise.

3.1.3.13

Reservoir-Methode

besonderes Zählverfahren zur Erzeugung eines Spannungsschwingbreitenkollektivs aus einem gegebenen Spannungsverlauf

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe prEN 1990:2021 Anhang F für die mathematische Vorgehensweise.

3.1.4 Ermüdungswiderstand

3.1.4.1

Ermüdungswiderstand

Vermögen eines Konstruktionsdetails, einer Ermüdungseinwirkung ohne Ermüdungsversagen mit einem angemessenen Zuverlässigkeitsniveau zu widerstehen

3.1.4.2

Lebensdauer

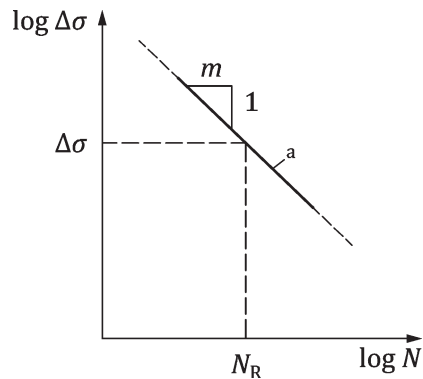
Anzahl an Spannungszyklen, denen ein Konstruktionsdetail ohne Ermüdungsversagen widerstehen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Lebensdauer hängt vom Spannungsschwingbreitenkollektiv ab. Für ein bestimmtes Tragwerk kann die Lebensdauer auch in Form eines Zeitraums ausgedrückt werden.

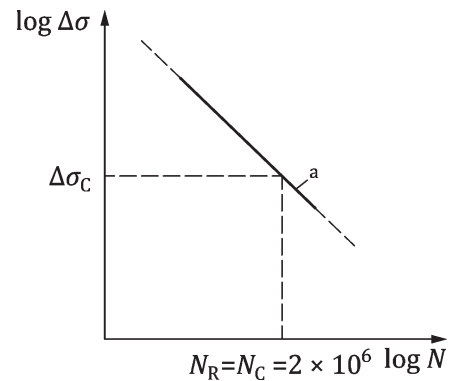
3.1.4.3

Ermüdungswiderstandskurve

Berechnungsmodell für den Ermüdungswiderstand eines Konstruktionsdetails, das einen quantitativen Zusammenhang zwischen der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ und der zugehörigen ertragbaren Schwingspielzahl N_R herstellt, siehe Bild 3.6 a)



a) ertragbare Schwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve für eine beliebige Spannungsschwingbreite



b) Bezugswert bei 2×10^6 Spannungszyklen

Legende

- a Ermüdungswiderstandskurve
- m Neigungsparameter der Ermüdungswiderstandskurve
- $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite
- N Anzahl der Spannungszyklen (Schwingspiele)
- N_R zu $\Delta\sigma$ gehörige ertragbare Schwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve
- $\Delta\sigma_C$ Bezugswert bei 2×10^6 Spannungszyklen

Bild 3.6 — Definition der ertragbaren Schwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve und des Bezugswerts der Ermüdungswiderstandskurve (auch auf Schubspannungen anwendbar)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die in EN 1993-1-9 angegebenen charakteristischen Ermüdungswiderstandskurven stellen untere Grenzwerte dar, die auf einer Auswertung von Ermüdungsversuchen an großmaßstäblichen Prüfkörpern basieren.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die charakteristischen Ermüdungswiderstandskurven sind auch als S-N-Kurven oder Wöhlerkurven bekannt.

Anmerkung 3 zum Begriff: Zur Vereinfachung werden in diesem Dokument die charakteristischen Ermüdungswiderstandskurven der Konstruktionsdetails entsprechenden Kerbfällen zugeordnet.

3.1.4.4

ertragbare Schwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve

N_R

Lebensdauer eines Konstruktionsdetails unter einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ oder $\Delta\tau$, die der zugehörigen Ermüdungswiderstandskurve entnommen wird, siehe Bild 3.6 a)

3.1.4.5

charakteristischer Bezugswert des Ermüdungswiderstands

$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$

mechanische Eigenschaft eines Konstruktionsdetails, das dessen charakteristischen Ermüdungswiderstand als Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ bei einer ertragbaren Schwingspielanzahl von $N_R = N_C = 2 \times 10^6$ ausdrückt, siehe Bild 3.6 b)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der „Bezugswert des Ermüdungswiderstands“ wird häufig als Ermüdungsfestigkeit bezeichnet.

3.1.4.6

Kerbfall

charakteristischer Bezugswert $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ des Ermüdungswiderstands in N/mm^2 , der eine bestimmte Ermüdungswiderstandskurve kennzeichnet

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Kerbfall, der einem bestimmten Konstruktionsdetail zugewiesen ist, kann aus der ersten Spalte der Kerbfalltabellen des jeweils ausgewählten Spannungskonzepts entnommen werden (siehe 6.1).

3.1.4.7

Neigungsparameter

m

Parameter der Ermüdungswiderstandskurve, der die Intensität der Ermüdungsschädigung ausdrückt, siehe Bild 3.6 a)

Anmerkung 1 zum Begriff: Mathematisch gesehen ist der Neigungsparameter mit dem negativen Kehrwert der Neigung der Ermüdungswiderstandskurve identisch.

3.1.4.8

Dauerfestigkeit bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung

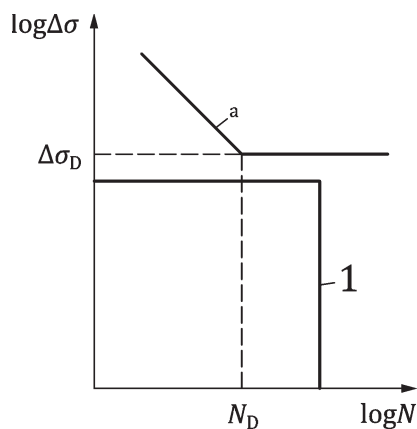
CAFL, en: constant amplitude fatigue limit

$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$

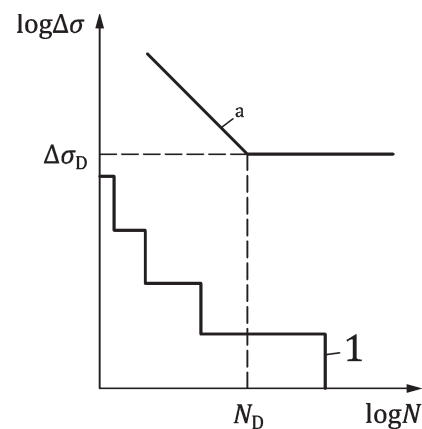
charakteristische maximale Spannungsschwingbreite bei ein- oder mehrstufigem Spannungsschwingbreitenkollektiv, für die ein Konstruktionsdetails eine unendliche Anzahl von Spannungszyklen ohne Ermüdungsversagen erträgt, siehe Bild 3.7

Anmerkung 1 zum Begriff: Bild 3.7 ist eine Vereinfachung. Der Nachweis mit Bezug auf CAFL, der Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt, wird in 9.3 beschrieben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Nachweis mit Bezug auf CAFL für Bemessungssituationen mit mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung ist nur dort möglich, wo die reale maximale Spannungsschwingbreite bekannt ist und unterhalb $\Delta\sigma_D$ oder $\Delta\tau_D$ bleibt, Bild 3.7 b). Die Ermüdungslastmodelle in EN 1991 geben keine Hinweise zur Ermittlung der realen maximalen Spannungsschwingbreiten. Siehe Hinweise in 9.3.



a) einstufige Ermüdungsbeanspruchung



b) mehrstufige Ermüdungsbeanspruchung mit bekannter größter Spannungsschwingbreite

Legende

- 1 Spannungsschwingbreitenkollektiv, das nicht zur Ermüdungsschädigung beiträgt
- a Ermüdungswiderstandskurve
- $\Delta\sigma_D$ CAFL
- N_D zu CAFL gehörige Anzahl der Spannungszyklen

Bild 3.7 — Kollektive mit Spannungsschwingbreiten unterhalb von CAFL (auch auf Schubspannungen anwendbar)

3.1.4.9

Dauerfestigkeit bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung

VAFL, en: variable amplitude fatigue limit

$\Delta\sigma_L$

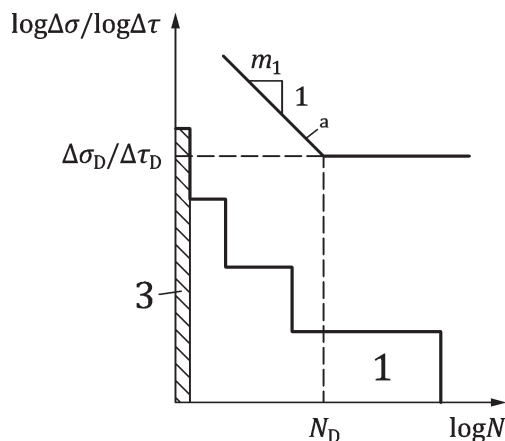
charakteristische maximale Spannungsschwingbreite für ein mehrstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv, unterhalb derer die Spannungsschwingbreiten als nicht mehr schädigend bei der Ermittlung der Ermüdungsschädigung betrachtet werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Für Konstruktionsdetails mit einer Ermüdungswiderstandskurve, die nur über einen Neigungsparameter m_1 verfügt, ist die Größe von CAFL und VAFL identisch. Hierzu zählen:

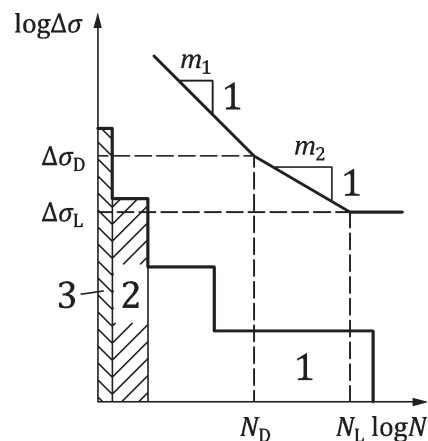
- Knoten von Fachwerkträger aus Hohlprofilen mit einer Schwingbeanspruchung durch Normalspannungen;
- alle Konstruktionsdetails mit einer Schwingbeanspruchung durch Schubspannungen.

Alle Spannungsschwingbreiten unterhalb $\Delta\sigma_D$ oder $\Delta\tau_D$ werden somit nicht bei der Ermittlung der Ermüdungsschädigung für der genannten Konstruktionsdetails betrachtet. Bild 3.8 ist eine Vereinfachung, die Teilsicherheitsfaktoren vernachlässigt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für Konstruktionsdetails mit einer Ermüdungswiderstandskurve, die über zwei Neigungsparameter m_1 und m_2 verfügt, tragen die Spannungsschwingbreiten zwischen $\Delta\sigma_D$ und $\Delta\sigma_L$ zur Ermüdungsschädigung bei, wenn das Spannungsschwingbreitenkollektiv auch über Spannungsschwingbreiten oberhalb von $\Delta\sigma_D$ verfügt.



a) Ermüdungswiderstandskurve mit identischem CAFL und VAFL



b) Ermüdungswiderstandskurve mit unterschiedlichem CAFL und VAFL

Legende

- 1 Spannungsschwingbreite ohne Beitrag zur Ermüdungsschädigung
- 2 Spannungsschwingbreite, die zur Ermüdungsschädigung mit dem Neigungsparameter m_2 beiträgt
- 3 Spannungsschwingbreite, die zur Ermüdungsschädigung mit dem Neigungsparameter m_1 beiträgt
- a Ermüdungswiderstandskurve
- $\Delta\sigma_D$ CAFL für Konstruktionsdetails mit Beanspruchung durch Normalspannungen
- $\Delta\tau_D$ CAFL für Konstruktionsdetails mit Beanspruchung durch Schubspannungen
- $\Delta\sigma_L$ VAFL für Konstruktionsdetails mit Beanspruchung durch Normalspannungen und einer Ermüdungswiderstandskurve mit zwei Neigungsparametern
- N_D zu CAFL gehörige Anzahl von Spannungszyklen
- N_L zu VAFL gehörige Anzahl von Spannungszyklen

Bild 3.8 — Kollektive mit Spannungsschwingbreiten unter- und oberhalb von CAFL

3.1.4.10

Handschweißen

Schweißen, bei dem alle Vorgänge von Hand ausgeführt werden (der Elektrodenhalter, die Schweißpistole, der Schweißbrenner wird manuell bedient)

3.1.4.11

vollmechanisches Schweißen

Schweißen, bei dem alle wichtigen Vorgänge (außer der Handhabung der Werkstücke) selbsttätig ablaufen

Anmerkung 1 zum Begriff: Nachstellen der Schweißparameter während des Schweißvorgangs von Hand ist möglich.

3.1.4.12

automatisches Schweißen

Schweißen, bei dem alle Vorgänge mechanisch ablaufen

Anmerkung 1 zum Begriff: Manuelles Nachstellen der Schweißparameter während des Schweißens ist nicht möglich.

3.1.4.13

höherfrequentes Hämmerverfahren

HFMI, en: high frequency mechanical impact treatment

kontinuierlicher Hämmerprozess, bei dem ein gehärtetes Werkzeug mit abgerundeter Kuppe entlang einer Oberfläche geführt wird, während hochfrequente Hammerschläge durch eine Maschine erzeugt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Qualifizierung wird ein vorab genehmigtes Verfahren auf eine bestimmte Schweißnahtgeometrie angewandt, die dann einer Ermüdungsprüfung unterzogen wird.

Anmerkung 2 zum Begriff: Untersuchungen in [1] zeigten, dass die folgenden HFMI-Technologien vergleichbar sind:

- HiFIT (High Frequency Impact Treatment);
- PIT (Pneumatic Impact Treatment);
- UIT (Ultrasonic Impact Treatment).

3.1.4.14

Bediener

angemessen geschulte Fachkraft, die in der Lage ist, das HFMI-Gerät sicher zu bedienen

3.1.4.15

Gerätehersteller

Unternehmen, das das HFMI-Gerät herstellt

3.1.5 Ermüdungsnachweis

3.1.5.1

Schädigung

D_i

Ermüdungsschädigung infolge einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{i,E}$ mit $N_{i,E}$ Spannungszyklen ($D_i = N_{i,E} / N_{i,R}$); das Verhältnis aus Zyklusanzahl $N_{i,E}$ einer ein Konstruktionsdetail beanspruchenden Spannungsschwingbreite und der ertragbaren Schwingspielzahl $N_{i,R}$ des Konstruktionsdetails nach Ermüdungswiderstandskurve unter derselben Spannungsschwingbreite

3.1.5.2

Schädigungssumme

D

Summe der Schädigungen aller Spannungsschwingbreiten eines Kollektivs

3.1.5.3

Miner-Regel

lineare Akkumulation der Schädigungen aller Spannungszyklen eines Spannungsschwing-breitenkollektivs, basierend auf der Palmgren-Miner-Regel

3.2 Symbole

Lateinische Großbuchstaben

A	Querschnittsfläche
A_s	Spannungsquerschnitt der Schraube oder Gewindestange
CAFL	Dauerfestigkeit bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung
CHS	Kreishohlprofile
D	Schädigungssumme infolge unterschiedlicher Spannungsschwingbreiten ($D = \sum D_i$)
D_i	Schädigung infolge der Schwingbreite $\Delta\sigma_{i,E}$ mit $N_{i,E}$ Spannungszyklen ($D_i = N_{i,E} / N_{i,R}$)
EVM	zur Vergleichsspannung nach von Mises gehörig
F	Einzellast
F_B	Kraft in der Schraube oder Gewindestange
F_C	Reduzierung der Druckkraft im Vorspannkörper infolge F_T
F_T	äußere auf eine vorgespannte Schraube oder Gewindestange aufgebrachte Zugkraft
FEM	Finite-Element-Methode
FLM	Ermüdungslastmodell
HFMI	Zustand nach einer Behandlung mit einem höherfrequenten Hämmerverfahren
I	Trägheitsmoment
N	Anzahl der Zyklen
N_C	zum charakteristischen Bezugswert des Ermüdungswiderstands gehörende Anzahl von Spannungszyklen
N_D	zur charakteristischen Dauerfestigkeit bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung gehörende Anzahl von Spannungszyklen
NDT	zerstörungsfreie Prüfung
NDP	national festgelegte Parameter
N_i	Anzahl der Lastzyklen einer Ermüdungseinwirkung Q_i
$N_{i,E}$	Anzahl der Spannungszyklen einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{i,E}$

$N_{i,R}$	Anzahl der Spannungszyklen, denen ein Konstruktionsdetail unter einer aufgetragenen Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{i,E}$ bis zum Bruch widerstehen kann (ertragbare Spannungsschwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve)
N_L	die zur Dauerfestigkeit bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung gehörende Anzahl von Spannungszyklen
$N_{\max}$	Gesamtanzahl von Lastzyklen
$N_{\max,E}$	Gesamtanzahl von Spannungszyklen
N_R	ertragbare Spannungsschwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve
N_{Rd}	Bemessungswert der ertragbaren Spannungsschwingspielzahl nach Ermüdungswiderstandskurve
PS	Hauptspannung
Q_{fat}	Ermüdungseinwirkung
Q_e	äquivalente Einwirkung, die mit $N_{\max}$ Lastzyklen einwirkt
$Q_{e,2}$	äquivalente Einwirkung, die mit 2×10^6 Lastzyklen einwirkt
Q_i	Einwirkungsniveau, das mit N_i Lastzyklen einwirkt
$Q_{\max}$	maximales Einwirkungsniveau
R	Spannungsverhältnis ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)
RHS	Rechteckhohlprofil
$S(t)$	statisches Flächenmoment
V	Querkraft in einem Querschnitt
VAFL	Dauerfestigkeit bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung
V_B	in der Schraube oder Gewindestange wirkende Querkraft pro Scherfuge
VM	nach von Mises

Lateinische Kleinbuchstaben

aw	dem Schweißzustand zugehörig
k_1	Erhöhungsfaktor für die Nennspannungsschwingbreite zur Berücksichtigung der sekundären Biegung in Fachwerken
k_f	Spannungskonzentrationsfaktoren
k_s	Abminderungsbeiwert für den Ermüdungswiderstand (in Bezug auf Spannungen) zur Berücksichtigung des Größeneinflusses

m	Neigungsparameter der Ermüdungswiderstandskurve
m_{aw}	Neigungsparameter der Ermüdungswiderstandskurve für den Schweißzustand
m_{HFMI}	Neigungsparameter der Ermüdungswiderstandskurve für den Zustand bei HFMI
t	Blechdicke

Griechische Großbuchstaben

$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	charakteristischer Bezugswert des Ermüdungswiderstands bei $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen
$\Delta\sigma_{C,HFMI}$	charakteristischer Bezugswert des Ermüdungswiderstands bei $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen für den Zustand bei HFMI
$\Delta\sigma_{C,red}$	reduzierter charakteristischer Bezugswert des Ermüdungswiderstands
$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$	charakteristische Dauerfestigkeit bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung bei N_D Spannungszyklen
$\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$	Ermüdungsbeanspruchung (Spannungsschwingbreite)
$\Delta\sigma_{e,2,E}, \Delta\tau_{e,2,E}$	äquivalente Spannungsschwingbreite, die mit 2×10^6 Spannungszyklen einwirkt
$\Delta\sigma_{e,E}, \Delta\tau_{e,E}$	äquivalente Spannungsschwingbreite, die mit $N_{max,E}$ Spannungszyklen einwirkt
$\Delta\sigma_{e,2,HFMI,E}$	äquivalente Spannungsschwingbreite für HFMI-nachbehandelte Anschlüsse, d. h. zur Berücksichtigung von λ_{HFMI}
$\Delta\sigma_{eq,E}$	äquivalente Spannungsschwingbreite für Verbindungen in Stegen orthotroper Fahrbahnen
$\Delta\sigma_{i,E}, \Delta\tau_{i,E}$	Spannungsschwingbreite, die mit $N_{i,E}$ Spannungszyklen einwirkt
$\Delta\sigma_L$	charakteristische Dauerfestigkeit bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung bei N_L Spannungszyklen
$\Delta\sigma_{max,Ed}, \Delta\tau_{max,Ed}$	korrespondiert mit $\max\Delta\sigma_{i,Ed}$ und $\max\Delta\tau_{i,Ed}$
$\Delta\sigma_s$	charakteristische Spannungsschwingbreite des Schnittpunkts der Ermüdungswiderstandskurven für den Schweißzustand und bei Zustand bei HFMI
ΣN_i	Summe der Lastzyklenanzahl, für die eine Ermüdungseinwirkung Q_i erreicht oder überschritten wird
$\Sigma N_{i,E}$	Summe der Spannungszyklenanzahl, für die eine Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{i,E}$ oder $\Delta\tau_{i,E}$ erreicht oder überschritten wird

Griechische Kleinbuchstaben

γ_{FF}	Teilsicherheitsbeiwert der aufgetragenen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$
γ_{Mf}	Teilsicherheitsbeiwert des Ermüdungswiderstands
λ_{HFMI}	ergänzender Schadensäquivalenzfaktor zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses eines Kollektivs im Falle einer HFMI-Behandlung
λ_i	Schadensäquivalenzfaktor, der z. B. von der Lastsituation und den Tragwerkeigenschaften abhängt
σ	Nenn-Normalspannungen
σ_{ENS}	wirksame Kerbspannungen
σ_{HS}	Hot-Spot-Spannung
τ	Nenn-Schubspannung

4 Grundlagen der Ermüdungsbemessung

(1) Die Ermüdungsbemessung von Stahltragwerken muss entsprechend den allgemeinen Regeln von EN 1990 und EN 1991 (alle Teile) und den besonderen Bemessungsregeln für Stahltragwerke der anderen relevanten Teile von EN 1993-1 (alle Teile) erfolgen.

ANMERKUNG EN 1991 (alle Teile) trifft Festlegungen zu den Ermüdungseinwirkungen besonderer Tragwerkstypen wie Brücken, Maste, Türme, Kamine und Kranunterstützungen, die diese Anforderungen erfüllen. Siehe Definitionen in 3.1.2.

(2) Stahltragwerke, die nach diesem Dokument bemessen werden, müssen nach EN 1090-2 ausgeführt werden.

(3) Die Nachweisverfahren für die Bemessungssituation mit Ermüdung in Abschnitt 6 sollten den Grundsätzen für eine Nachweisführung mit Teilsicherheitsbeiwerten durch einen Vergleich von Ermüdungsbeanspruchungen und Ermüdungswiderständen entsprechen.

(4) Ermüdungsrisse sollten entweder durch ein besonderes Inspektionsprogramm überwacht oder mit besonderer Sorgfalt repariert werden, damit sich keine ungünstigeren Spannungserhöhungen einstellen.

ANMERKUNG Die zu treffenden Maßnahmen richten sich nach den zu erwartenden Schadensfolgen, siehe Abschnitt 5.

(5) Ermüdungsversuche an Prüfkörpern dürfen durchgeführt werden, um folgende Kenngrößen zu bestimmen:

- den Ermüdungswiderstand von Konstruktionsdetails, die nicht in diesem Dokument enthalten sind;
- die Lebensdauer von Prototypen einer Serienproduktion.

ANMERKUNG Die Prüfung von Prototypen durch die Betrachtung des geplanten Lastkollektivs in Verbindung mit einer statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse nach prEN 1990:2021, Anhang D kann für die Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer der geprüften Bauteile genutzt werden. Der tatsächliche charakteristische Ermüdungswiderstand ($\Delta\sigma_c$) der Konstruktionsdetails der getesteten Bauteile bleibt dabei unbekannt.

(6) Die statistische Auswertung der Ermüdungsversuche sollte nach EN 1990 erfolgen.

ANMERKUNG 1 Anmerkung 2 zu 8.2 (1) enthält detaillierte Informationen zur Auswertung von Ermüdungsversuchen.

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang kann Anforderungen an die Ermittlung des Ermüdungswiderstands aus Versuchen stellen.

5 Bemessungsphilosophien bei Ermüdung

(1) Die Bemessungssituation mit Ermüdung sollte unter Verwendung einer der folgenden Bemessungsphilosophien nachgewiesen werden:

- a) schwingbruchsichere Konstruktionsweise (safe life);
- b) schadenstolerante Konstruktionsweise (damage tolerance).

(2) Die schwingbruchsichere Konstruktionsweise sollte mit einem angemessenen Zuverlässigkeitsniveau sicherstellen, dass das Verhalten eines Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht beeinträchtigt wird, ohne dass es hierfür regelmäßige Inspektions- oder Überwachungsmaßnahmen mit Blick auf Ermüdungsschäden bedarf.

(3) Die schwingbruchsichere Konstruktionsweise sollte in Fällen angewendet werden, bei denen die lokale Schädigung durch Rissbildung in einem Bauteilbereich schnell zu einem Versagen des Bauteils oder Tragwerk führen könnte.

(4) Die schadenstolerante Konstruktionsweise sollte mit einem angemessenen Zuverlässigkeitsniveau sicherstellen, dass das Verhalten eines Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht beeinträchtigt wird, unter der Voraussetzung, dass leicht inspizierbare Konstruktionsdetails vorgesehen und vorgeschriebene Inspektion- und Instandhaltungsmaßnahmen zur Entdeckung und Vorbeugung von Ermüdungsrissen durchgeführt werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann Festlegungen hinsichtlich der Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen treffen. Die Inspektionsintervalle und -methoden können auf Grundlage von Rissfortschrittsberechnungen, durch Erfahrung, durch Überwachung oder aufgrund früherer Inspektionsergebnisse festgelegt werden und können sich am Ausmaß der Schadensfolgen orientieren. Die Instandhaltungsmaßnahmen können den Austausch von Bauteilkomponenten in vorgegebenen Zeitabständen beinhalten. Der Nationale Anhang kann außerdem Festlegungen für eine Anpassung der Inspektionsintervalle und -methoden treffen, für den Fall, dass bereits entdeckte Ermüdungsrisse zu überwachen sind oder nach der Reparatur solcher Risse.

(5) Konstruktionsdetails, Werkstoffe und Beanspruchungsniveau sollten die Auswahl der entsprechenden Bemessungsphilosophie bestimmen, damit ein angemessenes Zuverlässigkeitsniveau nach EN 1990, mindestens in der Höhe der Zuverlässigkeit, die für den Grenzzustand der Tragfähigkeit gefordert wird, zu folgenden Zeitpunkten erreicht wird:

- a) schwingbruchsichere Konstruktionsweise:
 - am Ende der geplanten Nutzungsdauer;
- b) schadenstolerante Konstruktionsweise:
 - am Ende eines jeden Inspektionsintervalls innerhalb der geplanten Nutzungsdauer, unter der Voraussetzung, dass im Falle der Rissbildung einer oder alle der folgenden Sicherheitsmechanismen greifen:
 - geringe Risswachstumsrate und leicht auffindbare Risse, bevor es zum Versagen kommt;

- Möglichkeit zur Lastumlagerung;
- rissstoppende Konstruktionsdetails, die ein Fortschreiten der Schädigung verhindern.

ANMERKUNG Der Nachweis in der Bemessungssituation mit Ermüdung beinhaltet langfristige Unsicherheiten in Bezug auf die Ermüdungseinwirkungen und die Ermüdungswiderstände, so dass das Auftreten eines Ermüdungsrissses nicht komplett ausgeschlossen, sondern nur auf eine akzeptable Auftretenswahrscheinlichkeit reduziert werden kann.

(6) Für einen Nachweis der Bemessungssituation mit Ermüdung nach diesem Dokument sollte durch Anpassung des Teilsicherheitsbeiwerts für den Ermüdungswiderstand γ_{Mf} unter Berücksichtigung der Schadensfolgen und der genutzten Bemessungsphilosophie ein angemessenes Zuverlässigkeitsniveau erreicht werden.

ANMERKUNG 1 Die Höhe der Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} wird durch Tabelle 5.1 (NDP) festgelegt, solange der Nationale Anhang keine abweichenden Werte vorgibt.

ANMERKUNG 2 Die Teilsicherheitsbeiwerte in Tabelle 5.1 (NDP) für geringe Schadensfolgen genügen der Zuverlässigkeitsanforderung der Klasse CC1 nach EN 1990, die für mittlere Schadensfolgen der Klasse CC2 und die für hohe Schadensfolgen der Klasse CC3.

ANMERKUNG 3 Die Teilsicherheitsbeiwerte in Tabelle 5.1 (NDP) setzen die Möglichkeit zur Durchführung von Sichtprüfungen voraus.

Tabelle 5.1 (NDP) — Empfohlene Werte des Teilsicherheitsbeiwerts für den Ermüdungswiderstand γ_{Mf}

Bemessungsphilosophie	Schadensfolgen		
	gering	mittel	hoch
Schwingbruchsichere Konstruktionsweise	1,15	1,25	1,35
Schadenstolerante Konstruktionsweise	1,00	1,15	1,25

6 Bemessungskonzepte bei Ermüdung

6.1 Spannungskonzepte

(1) Alle relevanten spannungserhöhenden Einflüsse müssen beim Nachweis der Bemessungssituation mit Ermüdung unabhängig vom gewählten Spannungskonzept berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Zu den Spannungskonzepten zählen das Nennspannungskonzept, das Strukturspannungskonzept und das Kerbspannungskonzept.

(2) Die spannungserhöhenden Einflüsse sollten bei den Ermüdungswiderständen berücksichtigt werden, wenn sie nicht in den Ermüdungsbeanspruchungen des gewählten Spannungskonzepts enthalten sind.

ANMERKUNG Die unterschiedlichen Arten der spannungserhöhenden Einflüsse werden in 3.1.1.7 erläutert.

(3) Die durch (1) und (2) formulierten Anforderungen dürfen für den Nachweis der Bemessungssituation mit Ermüdung nach Abschnitt 9 als erfüllt betrachtet werden, bei dem die Ermüdungsbeanspruchungen auf Nennspannungen bzw. modifizierten Nennspannungen nach Abschnitt 7 basieren und die Ermüdungswiderstände nach Abschnitt 8 genutzt werden.

ANMERKUNG 1 Anhang B enthält Festlegungen zur Bestimmung der entsprechenden Ermüdungsbeanspruchungen und korrespondierender Ermüdungswiderstände für das Strukturspannungskonzept, solange der Nationale Anhang nichts anderes festlegt.

ANMERKUNG 2 Anhang C enthält Festlegungen zur Bestimmung der entsprechender Ermüdungsbeanspruchungen und korrespondierender Ermüdungswiderstände für das Kerbspannungskonzept, solange der Nationale Anhang nichts anderes festlegt.

ANMERKUNG 3 Anhang F enthält Leitlinien für die Bestimmung der entsprechender Ermüdungsbeanspruchungen und korrespondierender Ermüdungswiderstände für Konstruktionsdetails, die mit HFM nachbehandelt werden, solange der Nationale Anhang nichts anderes festlegt.

6.2 Nachweisverfahren

(1) Das Nachweisverfahren muss auf Berechnungsmodellen basieren, die für die Bemessungssituation mit Ermüdung geeignet sind.

(2) Das Nachweisverfahren nach Abschnitt 9 sollte für Bemessungssituationen mit Ermüdung verwendet werden, in denen die Ermüdungsbeanspruchung als äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv mit $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ und 2×10^6 Spannungszyklen definiert ist.

ANMERKUNG Siehe 3.1.3.9 zum äquivalenten einstufigen Spannungsschwingbreitenkollektiv. Ein äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv basiert für gewöhnlich auf einem vereinfachten Ermüdungslastmodell aus EN 1991 mit entsprechenden λ_i -Beiwerten.

(3) Für Bemessungssituationen mit jeder anderen Art von Spannungsschwingbreitenkollektiv sollte das Nachweisverfahren in Anhang A verwendet werden.

ANMERKUNG Beispiele für solche Kollektive sind einstufige Kollektive mit mehr oder weniger als 2×10^6 Spannungszyklen, siehe Bild 3.5 a) and Bild 3.5 b).

7 Ermüdungsbeanspruchung

7.1 Berechnung der Nennspannungen

(1) Die Nennspannungen infolge der Ermüdungseinwirkungen sollten mittels einer linear-elastischen Berechnung nach EN 1993-1-1 bestimmt werden.

ANMERKUNG EN 1993-1-1:2022 enthält Regeln für:

- Querschnittswerte des Nettoquerschnitts in 8.2.2.2;
- Einflüsse aus Schubverformungen in 8.2.2.3;
- elastische Spannungen infolge Querkraftschub in 8.2.6(4);
- elastische Spannungen infolge Torsion in 8.2.7(3).

(2) Für Konstruktionsdetails von Stahlbauteilen, die Teil einer Verbundkonstruktion sind, sollten die Nennspannungen unter Berücksichtigung aller Effekte berechnet werden, die durch die anderen Werkstoffe in der Bemessungssituation mit Ermüdung hervorgerufen werden.

ANMERKUNG Für Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen kann die Rissbildung des Betons unter üblichen Nutzungsbedingungen die Nennspannungen der Stahlbauteile beeinflussen. In diesen Fällen können Einwirkungen wie die ständigen Einwirkungen, veränderliche Einwirkungen, Schwinden oder Kriechen einen Einfluss auf die Nennspannungen haben.

(3) Modifizierte Nennspannungen sollten im Nachweis dort verwendet werden, wo Spannungskonzentrationen infolge makrogeometrischer Einflüsse und/oder infolge von Einflüssen aus konzentrierter Belastung in der Nähe der potentiellen Rissstelle in den Zeichnungen der Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12

auftreten und wo diese Einflüsse nicht in den Kerbfällen des betrachteten Konstruktionsdetails nach der Detailbeschreibung in den Tabellen enthalten sind.

(4) Querschnitte der Klasse 4 dürfen bei Ermüdung als Querschnitte der Klasse 3 behandelt werden, wenn deren Breiten-Dicken-Verhältnis geringer ist als das Grenzverhältnis der Klasse 3 nach EN 1993-1-1, wenn ε mit $\sqrt{f_{y,k} \cdot \gamma_{m0} / \sigma_{com,f}}$ multipliziert wird, wobei $\sigma_{com,f}$ die maximale Bemessungsdruckspannung im betrachteten Querschnittsteil unter der Einwirkungskombination mit Ermüdung nach EN 1990 ist.

(5) Die Nennspannungen in Querschnitten, die bei Ermüdung als Klasse 4 eingestuft werden, sollten durch den Abminderungsbeiwert für Beulen nach der Methode der reduzierten Spannungen nach EN 1993-1-5 geteilt werden, wobei die Plattenschlankheit mit der maximalen Bemessungsdruckspannung im betrachteten Querschnittsteil am effektiven Querschnitt bestimmt werden darf.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann Grenzen für Querschnitt der Klasse 4, die durch Ermüdungseinwirkungen beansprucht werden, festlegen.

7.2 Maßgebende Nennspannungen

(1) Alle Nennspannungen, die für das Konstruktionsdetail maßgebend sind, müssen im Nachweis der Bemessungssituation mit Ermüdung berücksichtigt werden.

(2) Für jede maßgebende Nennspannung sollte der entsprechende Kerbfall mittels Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 unter Berücksichtigung des Konstruktionsdetails, der Spannungsart (σ oder τ) und der Spannungskomponente bestimmt werden. Die ergänzenden Anforderungen des Kerbfalls hinsichtlich der Spannungsberechnung sollten zusätzlich zu den Festlegungen von 7.1 berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Beispielsweise kann der Kerbfall die Spannungsberechnung an einem bestimmten Standort des Konstruktionsdetails erfordern oder er kann in EN 1993-1-1 erlaubte Vereinfachungen untersagen.

(3) Für ungeschweißte Konstruktionsdetails und für geschweißte Konstruktionsdetails mit Nahtübergangsversagen sollten folgende Nennspannungen maßgebend sein:

- Nenn-Normalspannungen σ im Grundwerkstoff und
- Nenn-Schubspannungen τ im Grundwerkstoff.

(4) Für Nahtwurzelsversagen lasttragender nicht durchgeschweißter Stumpfnähte oder Kehlnähte, sollten die pro Längeneinheit der Naht übertragenen Kräfte in Komponenten zerlegt werden, die quer und parallel zur Längsachse der Naht gerichtet sind.

(5) Als maßgebende Nennspannungen in der Naht sollten betrachtet werden, siehe Bild 7.1:

- Normalspannungen σ_{wf} quer zur Längsachse der Naht und
- Schubspannungen τ_{wf} parallel zur Längsachse der Naht.

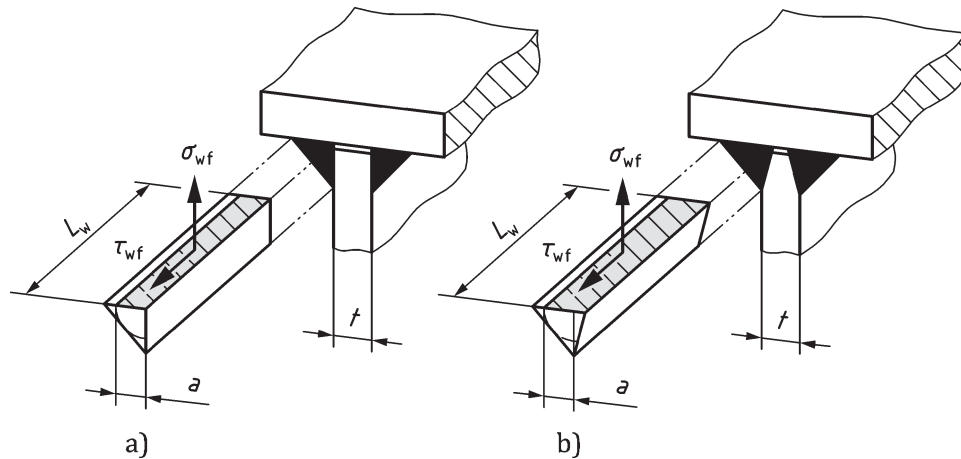


Bild 7.1 — Maßgebende Spannungen in (a) Kehlnähten und (b) nicht durchgeschweißten Stumpfnähten

(6) Zur Ermittlung der Nennspannungen σ_{wf} und τ_{wf} sollten die pro Längeneinheit der Naht zu übertragenden maßgebenden Kraftkomponenten durch die Nahtdicke a geteilt werden, siehe Bild 7.1.

(7) Die Spannungskomponenten $\sigma_{\perp}$ und $\tau_{\perp}$ im Nahtquerschnitt (siehe Bild 7.2), die nach des richtungsbezogenen Verfahrens nach EN 1993-1-8 infolge einer Kraft F quer zur Längsachse der Naht bestimmt werden, dürfen wie folgt in die Nennspannungskomponente σ_{wf} der Schweißnaht überführt werden:

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2} \quad (7.1)$$

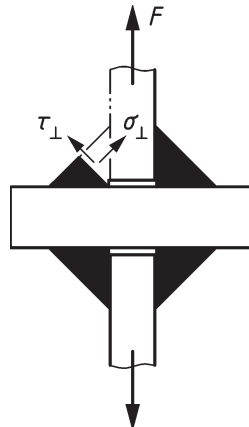


Bild 7.2 — Spannung im Nahtquerschnitt einer Doppelnaht nach EN 1993-1-8

(8) Die Spannungskomponente $\tau_{\parallel}$ im Nahtquerschnitt, die mit dem richtungsbezogenen Verfahren nach EN 1993-1-8 als Folge einer Schubkraft parallel zur Längsachse der Naht bestimmt wird, sollte als Nennspannungskomponente τ_{wf} der Schweißnaht betrachtet werden.

(9) Die Spannungskomponente $\sigma_{\parallel}$ parallel zur Längsachse der Naht darf bei Nahtwurzelsversagen vernachlässigt werden.

(10) Die maßgebende Schweißnahtspannung einer Doppelkehlnaht infolge Querbiegung des angeschlossenen Blechs darf wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{wf} = \frac{M}{a L_w (a + t)} \quad (7.2)$$

Dabei ist

- t die Dicke der angeschlossenen Blechs mit Biegung;
- a die wirksame Nahtdicke;
- M das Biegemoment;
- L_w die Nahtlänge nach Bild 7.3.

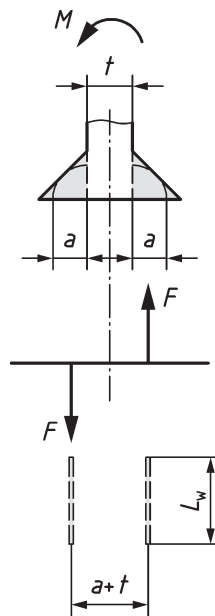


Bild 7.3 — Maßgebende Spannungen einer Doppelkehlnaht infolge Blechbiegung

(11) Für geschraubte Anschlüsse und für Anschlüsse mit Gewindestangen und gerolltem oder geschnittenem Gewinde sollten folgende Nennspannungen maßgebend sein:

- Nenn-Normalspannung $\sigma = \frac{F_B}{A_s} \quad (7.3)$

- Nenn-Schubspannung im Schaft $\tau = \frac{V_B}{A} \quad (7.4)$

Dabei ist

- A die Fläche des Schaftquerschnitts der Schraube oder Gewindestange;
- A_s die Fläche des Spannungsquerschnitts der Schraube oder Gewindestange;
- F_B die in der Schraube oder Gewindestange wirkende Kraft;
- V_B die Querkraft je Scherfläche in der Schraube oder Gewindestange.

ANMERKUNG Für Anschlüsse mit vorgespannten Schrauben oder Gewindestangen:

- F_B kann nach Anhang E bestimmt werden;

— V_B kann unberücksichtigt bleiben.

(12) Auswirkungen aus Abstützkräften und/oder Biegung in geschraubten Anschlüssen oder Anschlüssen mit Gewindestangen sollten bei der Bestimmung der Kraft F_B berücksichtigt werden. Einflüsse aus Imperfektionen der Schraube oder Gewindestange dürfen vernachlässigt werden.

(13) Auswirkungen aus Abstützkräften und/oder Biegung auf die Spannungen in der Schraube dürfen bei einfachen und symmetrischen Anschlüssen mit vorgespannten Schrauben wie dem T-Stummel in prEN 1993-1-8:2021, Tabelle 6.2 vernachlässigt werden, wenn entweder die verbundenen Bleche vollen Kontakt und ausreichende Steifigkeit aufweisen oder keine Abstützwirkung nach der Montage auftritt.

7.3 Berechnung der Nennspannungsschwingbreiten

7.3.1 Allgemeines

(1) Die Nennspannungsschwingbreiten in den maßgebenden Teilen der Konstruktionsdetails sollten für die in Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 gekennzeichneten potentiellen Rissstellen bestimmt werden.

(2) Wirksame Nennspannungsschwingbreiten dürfen beim Nachweis nicht geschweißter oder spannungsarmgeglühter geschweißter Konstruktionsdetails, deren Schwingbeanspruchung teilweise oder ganz im Druckbereich liegt, und für andere Konstruktionsdetails mit einer Beanspruchung teilweise oder ganz im Druckbereich bei entsprechender Bestätigung durch Berechnungen oder Messungen, betrachtet werden.

ANMERKUNG Siehe 7.4 zu wirksamen Nennspannungsschwingbreiten.

7.3.2 Bemessungswert der Nennspannungsschwingbreite

(1) Für Bemessungssituationen mit Ermüdung, in denen die Ermüdungsbeanspruchung als äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv definiert ist, sollte der Bemessungswert der Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ und $\Delta\tau_{e,2,Ed}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{e,2,Ed} &= \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \Delta\sigma_E(\gamma_{Ff} Q_{fat}) \\ \Delta\tau_{e,2,Ed} &= \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \Delta\tau_E(\gamma_{Ff} Q_{fat})\end{aligned}\tag{7.5}$$

Dabei sind

λ_i die Schadensäquivalenzbeiwerte, die vom betrachteten Bauteil und seiner Beanspruchung abhängig sind.

(2) Für Bemessungssituationen mit Ermüdung, in denen die Ermüdungsbeanspruchung als äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv definiert ist und makrogeometrische Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung auftreten, sollte der Bemessungswert der modifizierten Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ und $\Delta\tau_{e,2,Ed}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{e,2,Ed} &= k_f \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \Delta\sigma_E(\gamma_{Ff} Q_{fat}) \\ \Delta\tau_{e,2,Ed} &= k_f \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \Delta\tau_E(\gamma_{Ff} Q_{fat})\end{aligned}\tag{7.6}$$

Dabei ist

k_f der Spannungskonzentrationsfaktor, um makrogeometrische Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung zu berücksichtigen, die nicht im Kerbfall enthalten sind.

ANMERKUNG 1 Siehe Bild 3.1 zu Beispielen für Spannungskonzentrationen.

ANMERKUNG 2 Spannungskonzentrationsfaktoren k_f können aus Handbüchern oder aus Finite-Element-Berechnungen bezogen werden. Anhang D stellt Spannungskonzentrationsfaktoren k_f für bestimmte Anwendungsfälle bereit.

(3) Für geschweißte Hohlprofilanschlüsse in Fachwerkträgern sollte der Bemessungswert der modifizierten Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ mittels des vereinfachten Modells nach D.3 wie folgt bestimmt werden, wenn keine genauere Berechnung durchgeführt wird:

$$\Delta\sigma_{e,2,Ed} = k_1 \Delta\sigma_{e,2,Ed}^{**} \quad (7.7)$$

Dabei ist

k_1 der Spannungskonzentrationsfaktor nach Tabelle D.1 und Tabelle D.2;

$\Delta\sigma_{e,2,Ed}^{**}$ der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite, der als Folge eines Ermüdungslastmodells nach EN 1991 an einem vereinfachten Fachwerkmodell mit durchlaufenden Gurten und gelenkig angeschlossenen Streben berechnet wird.

(4) Für andere Ermüdungslastmodelle, die nicht ein äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv ergeben, sollte der Bemessungswert der Schwingbreiten $\Delta\sigma_{i,E}$ und $\Delta\tau_{i,E}$ mit Hilfe von Anhang A ermittelt werden.

7.4 Wirksame Spannungsschwingbreite

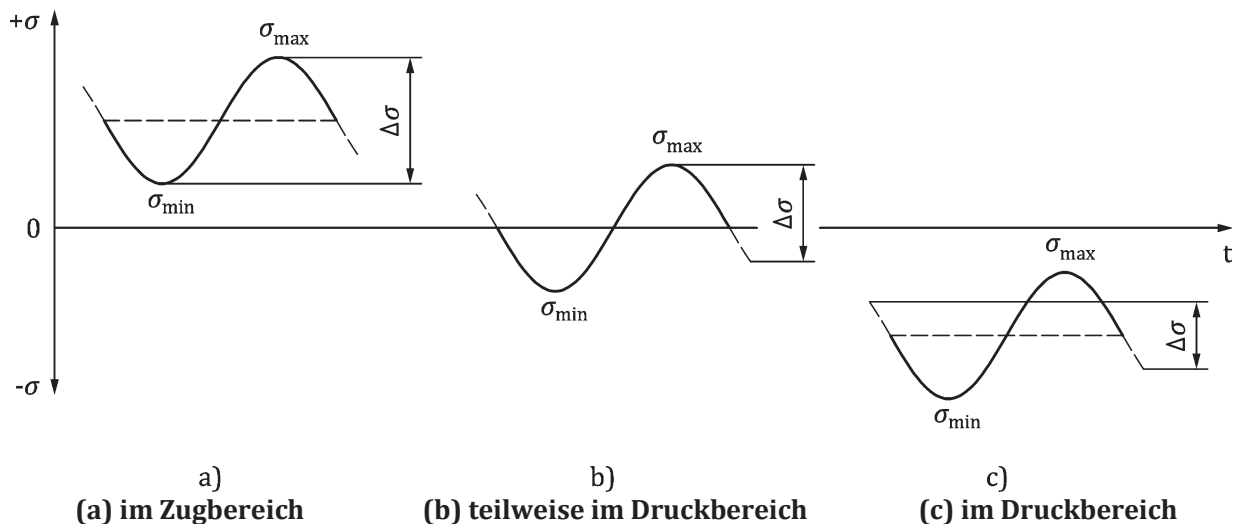
(1) Bei nicht geschweißten Konstruktionsdetails oder bei geschweißten Konstruktionsdetails, die nach Abschluss aller Schweißarbeiten spannungsarmgeglüht werden, darf der Mittelspannungseinfluss auf die Lebensdauer durch eine Reduzierung der Spannungsschwingbreite aller Spannungszyklen berücksichtigt werden, die ganz oder teilweise im Druckbereich liegen.

(2) Das Mittelspannungsniveau nach (1) sollte durch Berechnung oder Messung unter Einbeziehung der Spannungen infolge ständiger Einwirkungen (ohne Teilsicherheitsfaktoren) und der größten Zugspannungen infolge der Ermüdungseinwirkung bestätigt werden.

(3) Die wirksame Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ darf berechnet werden, indem der ggf. vorhandene Zuganteil der Spannungsschwingbreite und 60 % des ggf. vorhandenen Druckanteils der Spannungsschwingbreite betragsmäßig wie folgt addiert werden, siehe Bild 7.4:

- wenn die gesamte Spannungsschwingbreite im Zugbereich wie in Bild 7.4 a) liegt: $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
- wenn ein Teil der Spannungsschwingbreite wie in Bild 7.4 b) im Druckbereich liegt: $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0,6 \sigma_{\min}$
- wenn die gesamte Spannungsschwingbreite wie in Bild 7.4 c) im Druckbereich liegt: $\Delta\sigma = 0,6 \sigma_{\max} - 0,6 \sigma_{\min}$

(7.9)



ANMERKUNG Zugspannungen sind positiv.

Bild 7.4 — Wirksame Spannungsschwingbreiten nicht geschweißter oder spannungsarmgeglühter Konstruktionsdetails

8 Ermüdungswiderstand

8.1 Ermüdungswiderstandskurven

(1) Der Ermüdungswiderstand der Konstruktionsdetails sollte auf der Grundlage geeigneter Ermüdungswiderstandskurven berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Der charakteristische Ermüdungswiderstand wird durch eine Reihe paralleler und äquidistanter Ermüdungswiderstandskurven repräsentiert, die die Anzahl N_R ertragbaren Spannungsschwingspiele definiert, denen eine Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ oder $\Delta\tau$ standgehalten werden kann, bis es zum Versagen kommt, wie in Bild 8.1 bis Bild 8.4 gezeigt.

ANMERKUNG 2 Den Ermüdungswiderstandskurven sind Kerbfälle zugeordnet. Jeder Kerbfall ist durch einen Zahlenwert gekennzeichnet, der den charakteristischen Bezugswert $\Delta\sigma_c$ oder $\Delta\tau_c$ in N/mm^2 für den Ermüdungswiderstand bei $N_c = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen repräsentiert.

ANMERKUNG 3 Bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung besitzt die Ermüdungswiderstandskurve bei logarithmischer Achsenteilung einen Zeitfestigkeitsbereich, der durch eine lineare Beziehung mit Neigungsparameter m_1 ausgedrückt wird, und einen Dauerfestigkeitsbereich, der durch eine konstante Beziehung ausgedrückt wird. Der Übergang zwischen beiden Bereichen ist als Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ oder $\Delta\tau_D$ bei einstufiger Ermüdungsbeanspruchung definiert.

ANMERKUNG 4 Bei mehrstufiger Ermüdungsbeanspruchung durch Normalspannungen wird der Zeitfestigkeitsbereich der Ermüdungswiderstandskurven bei logarithmischer Achsenteilung unterhalb von $\Delta\sigma_D$ bis zur Dauerfestigkeit bei mehrstufiger Belastung $\Delta\sigma_L$ durch eine lineare Beziehung mit Neigungsparameter m_2 verlängert.

(2) Die Ermüdungswiderstandskurven nach Bild 8.1a sollten für nicht geschweißte Konstruktionsdetails mit geringer Kerbschärfe Anwendung finden, die durch $\Delta\sigma$ beansprucht werden, einschließlich:

- ungeschweißte Bauteile in Tabelle 10.1;
- geschraubtes Konstruktionsdetail in Tabelle 10.2 mit gebohrten oder aufgeriebenen Löchern.

ANMERKUNG Siehe auch Tabelle 8.1.

(3) Die Ermüdungswiderstandskurven nach Bild 8.1 b(sollten für nicht geschweißte Konstruktionsdetails mit hoher Kerbschärfe Anwendung finden, die durch $\Delta\sigma$ beansprucht werden, einschließlich:

- geschraubtes Konstruktionsdetail in Tabelle 10.2 mit thermisch geschnittenen oder gestanzten Löchern ohne nachfolgendes Aufreiben;
- Schraubendetail ⑥ in Tabelle 10.2.

ANMERKUNG Siehe auch Tabelle 8.1.

(4) Die Ermüdungswiderstandskurven nach Bild 8.2 sollten für geschweißte Konstruktionsdetails mit hoher Kerbschärfe Anwendung finden, die durch $\Delta\sigma$ beansprucht werden, einschließlich Tabelle 10.3 bis Tabelle 10.11 mit Ausnahme von Tabelle 10.8.

ANMERKUNG Siehe auch Tabelle 8.1.

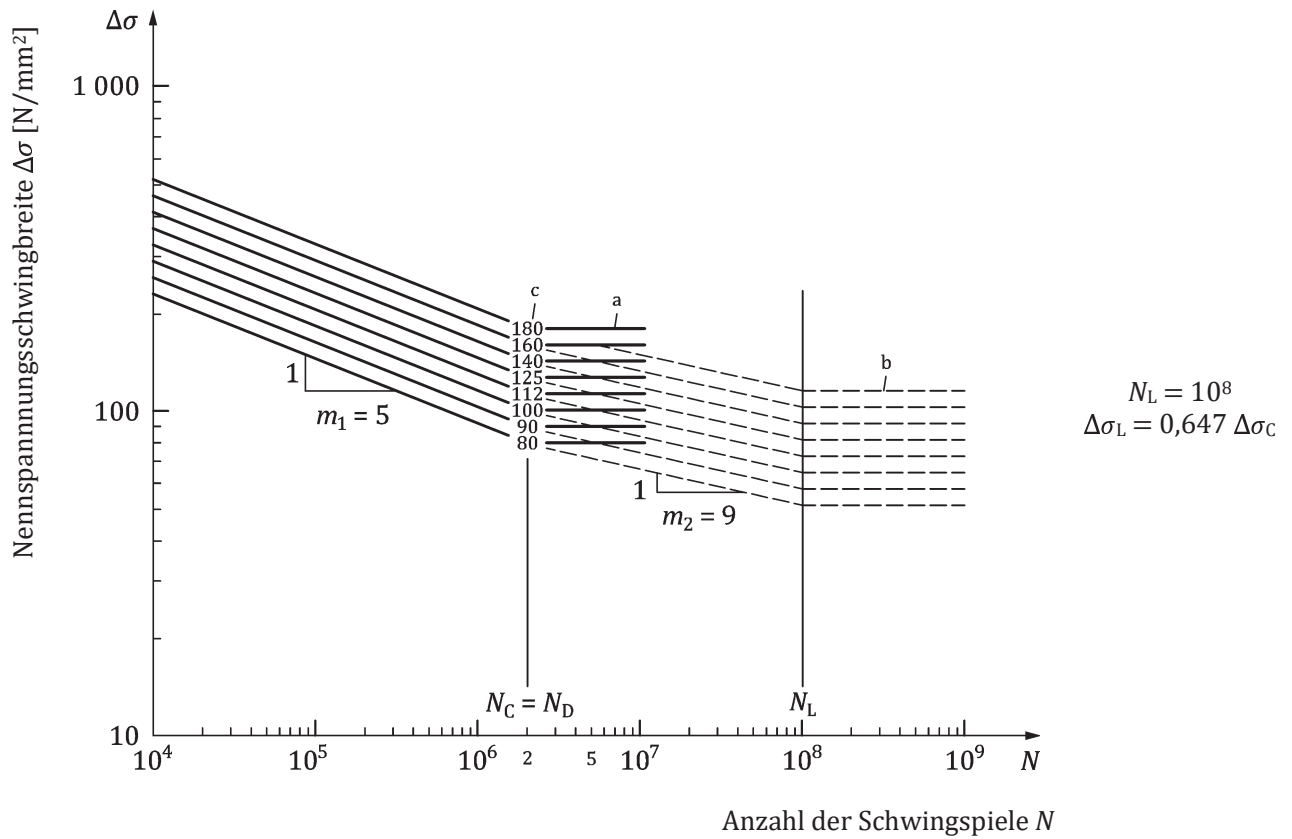
(5) Die Ermüdungswiderstandskurven nach Bild 8.3 sollten für Konstruktionsdetails in Hohlprofilanschlüssen nach Tabelle 10.8 Anwendung finden, die durch $\Delta\sigma$ beansprucht werden.

ANMERKUNG Siehe auch Tabelle 8.1.

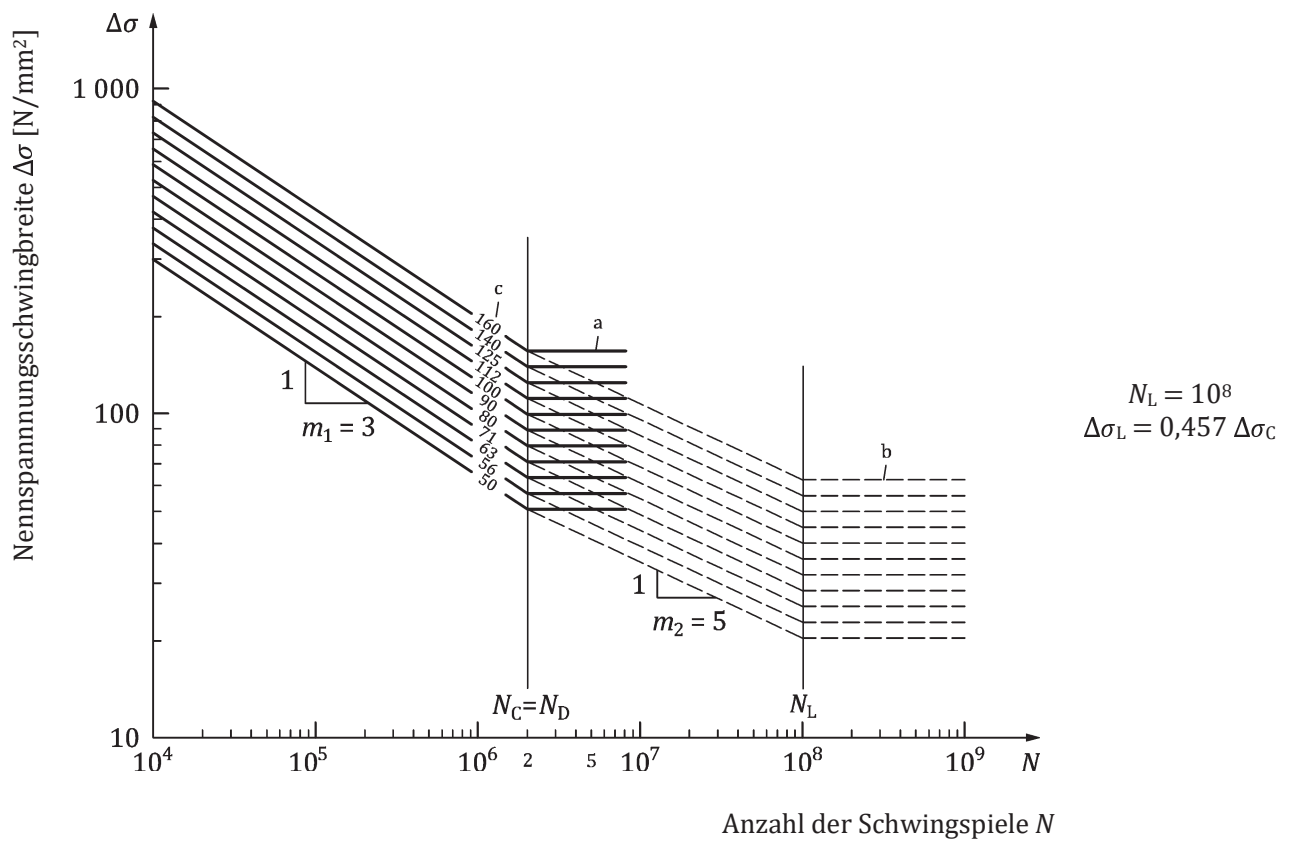
(6) Die Ermüdungswiderstandskurven nach Bild 8.4 sollten für Konstruktionsdetails Anwendung finden, die durch $\Delta\tau$ beansprucht werden, einschließlich:

- nicht geschweißte Konstruktionsdetails ⑥, ⑦, ⑧ in Tabelle 10.1;
- Schraubendetail ⑦ in Tabelle 10.2;
- geschweißtes Konstruktionsdetail ⑩ in Tabelle 10.6.

ANMERKUNG Siehe auch Tabelle 8.2.



(a) geringe Kerbwirkung

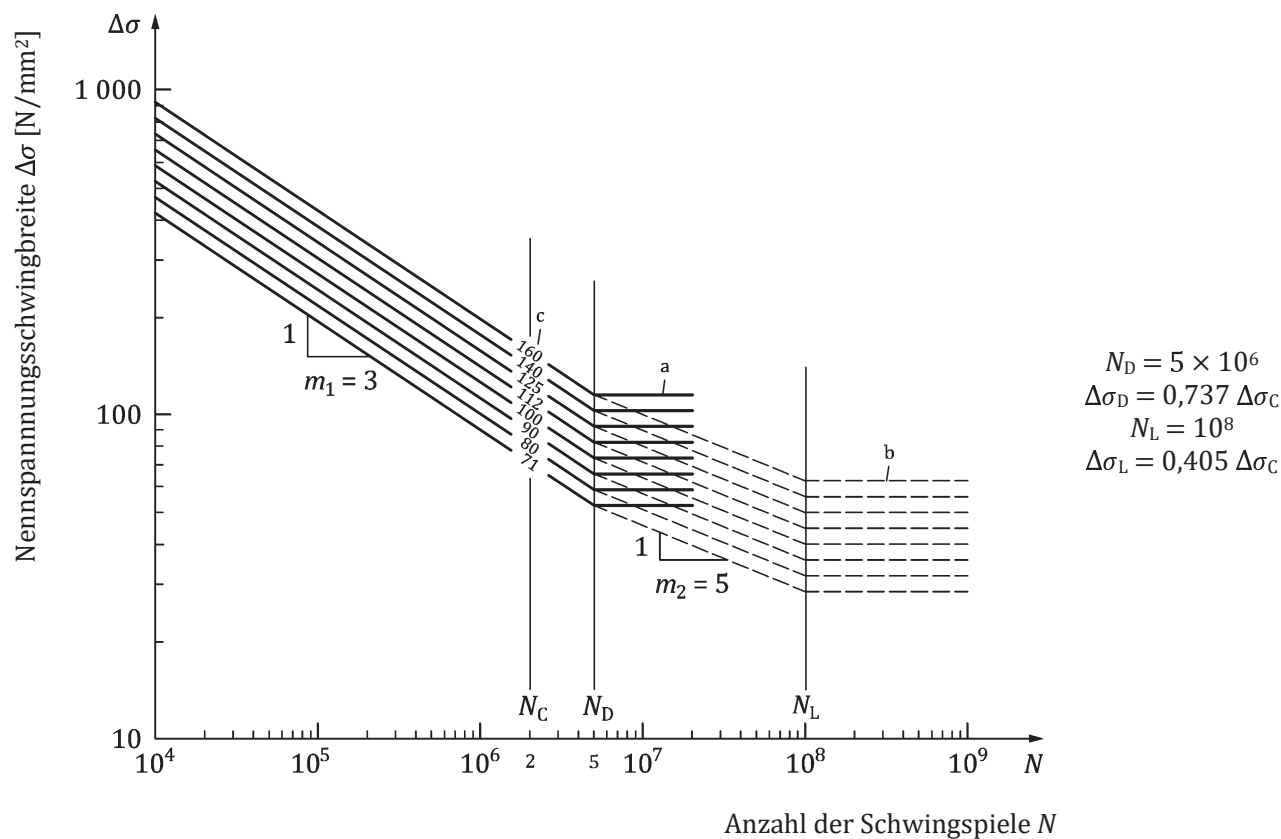


(b) hohe Kerbwirkung

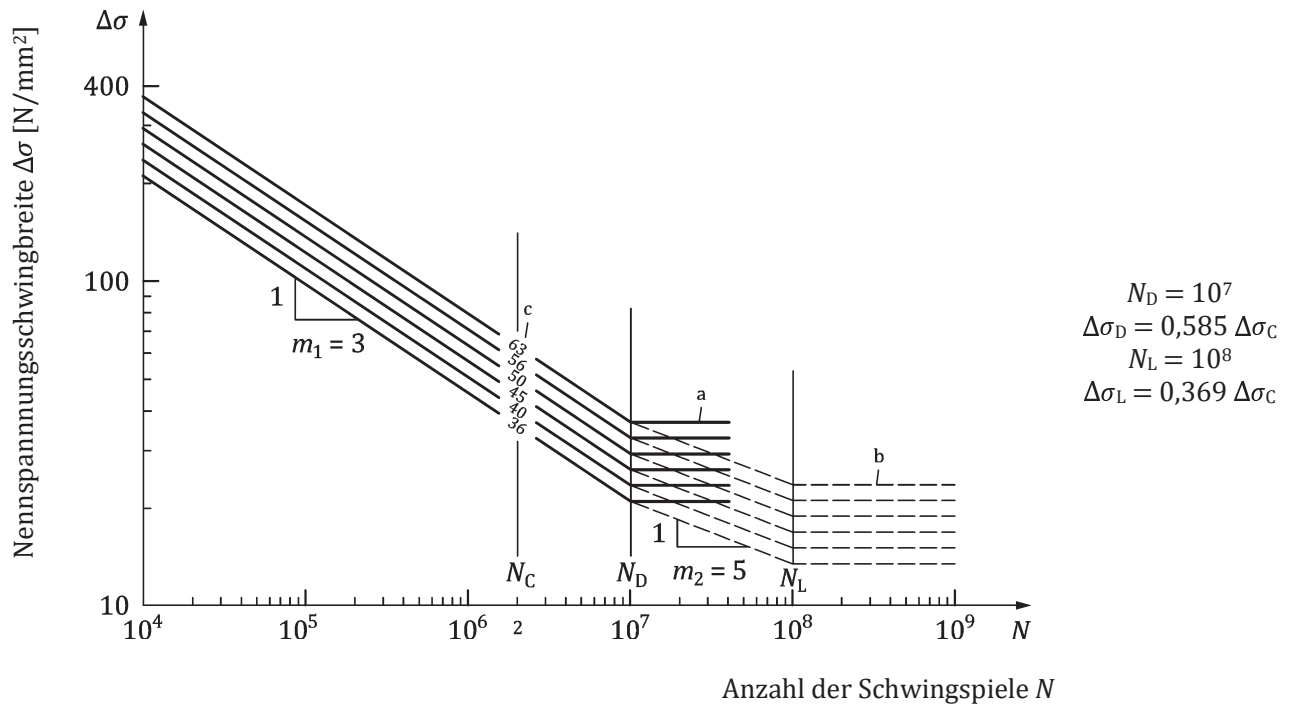
Legende

- a Ermüdungswiderstandskurve für einstufige Ermüdungsbeanspruchung
- b erweiterte Ermüdungswiderstandskurve für mehrstufige Ermüdungsbeanspruchung
- c Kerbfall

Bild 8.1 — Charakteristische Ermüdungswiderstandskurven für nicht geschweißte Konstruktionsdetails mit Schwingbeanspruchung durch Nenn-Normalspannungen



(a) Kerbfall 71 und höher



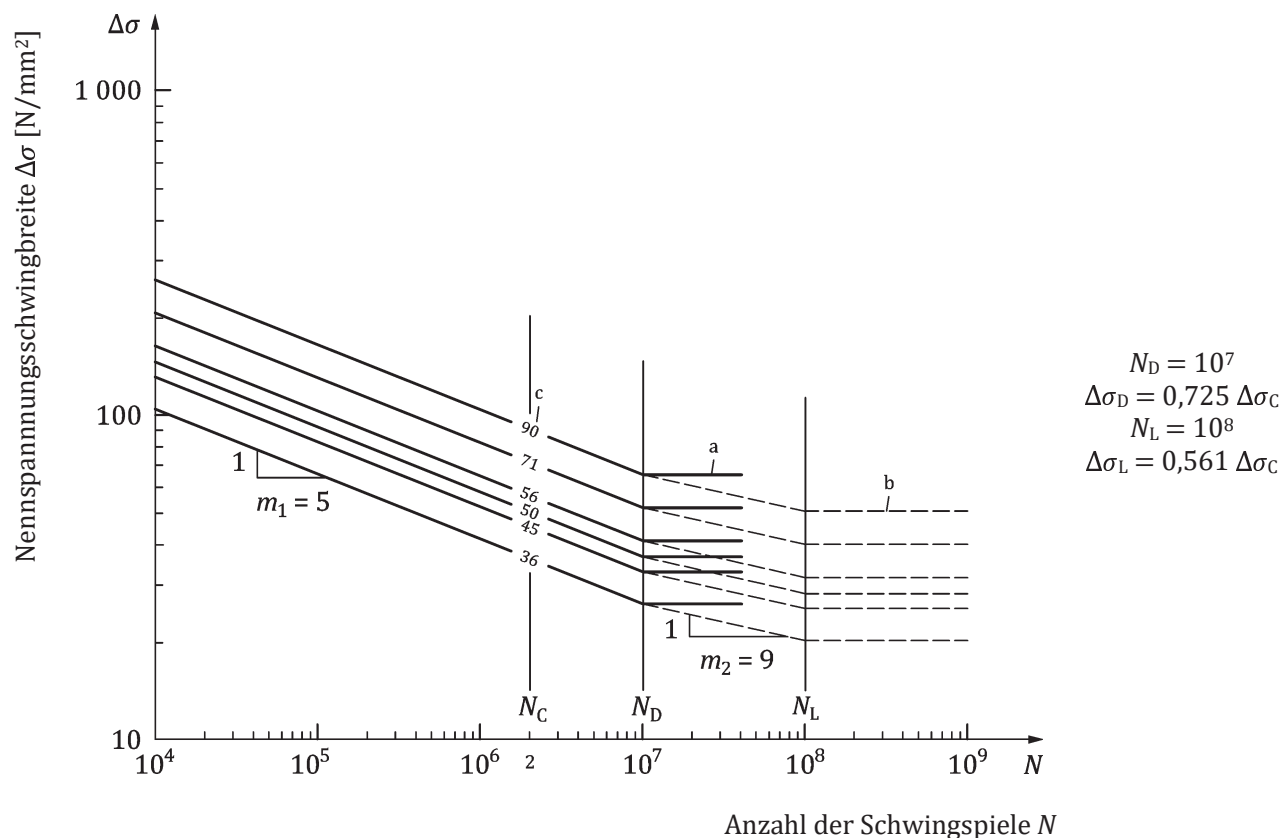
(b) Kerbfall unterhalb 71

Legende

- a Ermüdungswiderstandskurve für einstufige Ermüdungsbeanspruchung
- b erweiterte Ermüdungswiderstandskurve für mehrstufige Ermüdungsbeanspruchung
- c Kerbfall

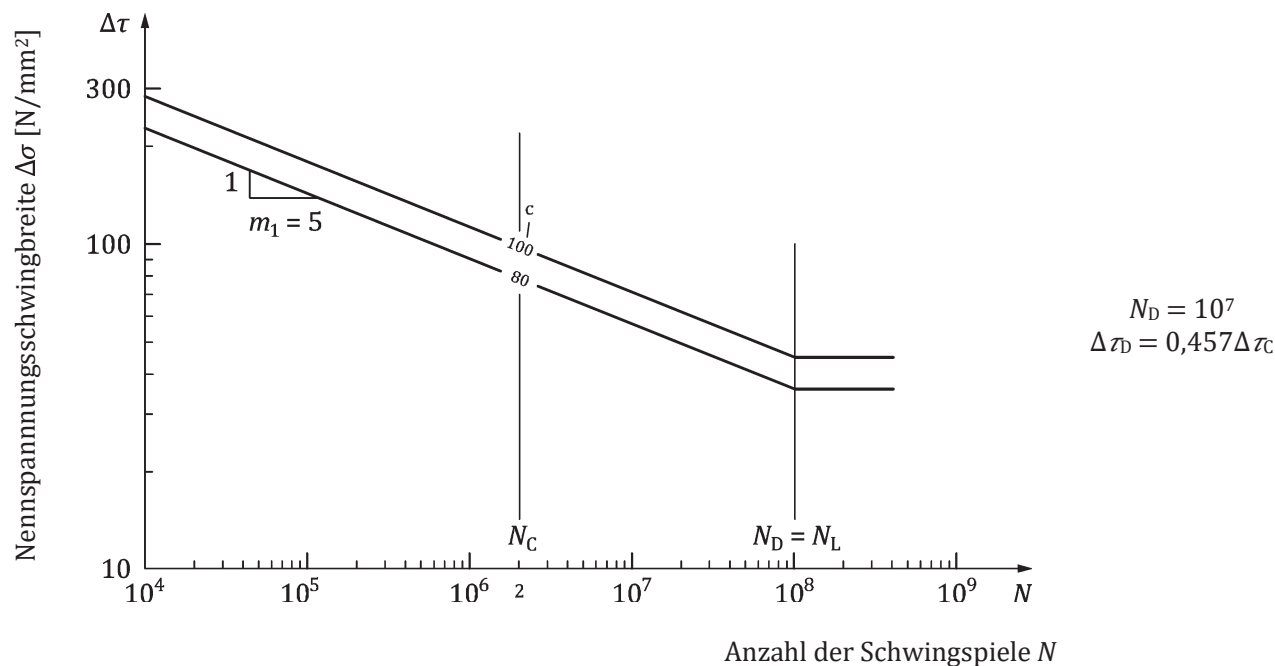
ANMERKUNG Siehe Erläuterungen und Symbole in Bild 8.1.

Bild 8.2 — Charakteristische Ermüdungswiderstandskurven für geschweißte Konstruktionsdetails mit hoher Kerbwirkung und Schwingbeanspruchung durch Nenn-Normalspannungen



ANMERKUNG Siehe Erläuterungen und Symbole in Bild 8.1.

Bild 8.3 — Charakteristische Ermüdungswiderstandskurven für Anschlüsse in Fachwerkträgern aus Hohlprofilen nach Tabelle 10.8 mit Schwingbeanspruchung durch Nenn-Normalspannungen



ANMERKUNG Siehe Erläuterungen und Symbole in Bild 8.1.

Bild 8.4 — Charakteristische Ermüdungswiderstandskurven für Konstruktionsdetails mit Schwingbeanspruchung durch Nenn-Schubspannungen

Tabelle 8.1 — Charakteristische Ermüdungswiderstandswerte in N/mm² der Kurven in Bild 8.1 bis Bild 8.3

Bild	Kerbfall	Neigungsparameter		$\Delta\sigma_D$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_L$ [N/mm ²]
		m_1	m_2		
8.1 a)	180	5	9	180	117
	160			160	104
	140			140	90,6
	125			125	80,9
	112			112	72,5
	100			100	64,7
	90			90,0	58,2
	80			80,0	51,8
8.1 b)	112	3	5	112	51,2
	100			100	45,7
	90			90,0	41,1
	80			80,0	36,6
	71			71,0	32,4
	63			63,0	28,8
	56			56,0	25,6
	50			50,0	22,9
8.2 a)	160	3	5	118	64,8
	140			103	56,7
	125			92,1	50,6
	112			82,5	45,4
	100			73,7	40,5
	90			66,3	36,5
	80			59,0	32,4
	71			52,3	28,8
8.2 b)	63	3	5	36,9	23,2
	56			32,8	20,7
	50			29,3	18,5
	45			26,3	16,6
	40			23,4	14,8
	36			21,1	13,3
8.3	90	5	9	65,3	50,5
	71			51,5	39,8
	56			40,6	31,4
	50			36,3	28,1
	45			32,6	25,2
	36			26,1	20,2

Tabelle 8.2 — Charakteristische Ermüdungswiderstandswerte in N/mm² der Kurven in Bild 8.4

Bild	Kerbfall	Neigungsparameter		$\Delta\tau_D$ [N/mm ²]	$\Delta\tau_L$ [N/mm ²]
8.4	100	5	—	45,7	45,7
	80			36,6	36,6

8.2 Klassifizierung der Konstruktionsdetails

(1) Für das Nennspannungskonzept sollten die Kerbfälle $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ entsprechend Abschnitt 10 verwendet werden:

- Tabelle 10.1 für ungeschweißte Bauteile;
- Tabelle 10.2 für geschraubte Anschlüsse;
- Tabelle 10.3 für geschweißte zusammengesetzte Querschnitte und Längsnähte;
- Tabelle 10.4 für quer laufende Stumpfstöße (voll durchgeschweißt);
- Tabelle 10.5 für angeschweißte Anschlussteile und Steifen;
- Tabelle 10.6 für lasttragende geschweißte Anschlüsse;
- Tabelle 10.7 für Hohlprofilquerschnitte;
- Tabelle 10.8 für Fachwerkknoten aus Hohlprofilquerschnitten;
- Tabelle 10.9 für orthotrope Fahrbahnen – geschlossene Längssteifen;
- Tabelle 10.10 für orthotrope Fahrbahnen – offene Längssteifen;
- Tabelle 10.11 für Konstruktionsdetails von Kranbahnträgern;
- Tabelle 10.12 für Konstruktionsdetails von Türmen, Masten und Schornsteinen.

ANMERKUNG 1 Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 beschreiben die Konstruktionsdetails zusammen mit ihrer Spannungsverteilung in der Umgebung der potentiellen Rissstelle, die mit dem Kerbfall korrespondieren.

ANMERKUNG 2 Falls Versuchsdaten für die Bestimmung des Kerbfalls eines bestimmten Konstruktionsdetails genutzt wurden, wurde die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$, die mit $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen korrespondiert, als untere Vorhersagegrenze bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit für $\log N$ von 95 % unter Berücksichtigung der Standardabweichung und des Stichprobenumfangs ermittelt. Die Anzahl der Versuchsdaten (nicht weniger als 12) wurde durch die statistische Auswertung berücksichtigt. Bei Berücksichtigung von Vorinformationen zum Neigungsparameter der Ermüdungswiderstandskurven ist die beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung von $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ mit der Herangehensweise von prEN 1990:2021, Anhang D bezüglich der statistischen Bestimmung einer einzelnen Eigenschaft identisch.

ANMERKUNG 3 Die Versuchsdaten, die zur Ermittlung des Kerbfalls genutzt wurden, beinhalten detailspezifische Eigenschaften wie zum Beispiel den Einfluss der Eigenspannungen.

ANMERKUNG 4 Der Nationale Anhang kann die Bestimmung eines zutreffenderen Kerbfalls für eine bestimmte Anwendung auf der Grundlage von Versuchen nach 4(5) und (6) erlauben, unter der Voraussetzung dass die Versuchsdaten statistisch in Übereinstimmung mit Anmerkung 2 ausgewertet werden.

ANMERKUNG 5 Der Nationale Anhang kann Kerbfälle $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ für Konstruktionsdetails zur Verfügung stellen, die nicht nach den Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 klassifiziert sind.

(2) Für die Anwendung von Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 und der Anhang B, Anhang C und Anhang F sollte die Bewertungsgruppe B für die Qualität der Schweißnähte nach EN ISO 5817 (unter der Annahme einer Ausführungsklasse EXC3 oder höher), der Einsatz von qualifiziertem Personal und ein Umfang an zerstörungsfreier Prüfung nach EN 1090-2 vorgesehen werden. Darüber hinaus sollten die ergänzenden Anforderungen der Kerbfalltabellen in Abschnitt 10 erfüllt werden.

ANMERKUNG Für Tragwerke und Bauteile der Ausführungsklasse EXC2 kann die Bewertungsgruppe C ausreichend sein.

8.3 Modifizierung des Ermüdungswiderstands

8.3.1 Größeneinfluss

(1) Der Dickeneinfluss oder der Einfluss anderer Abmessungen sollte, wie in den Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 angegeben, berücksichtigt werden. Der Ermüdungswiderstand unter Berücksichtigung des Größeneinflusses sollte wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta\sigma_C = k_s \Delta\sigma_{C,Table} \quad (8.1)$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{C,Table}$ der Wert des betrachteten Kerbfalls wie in der ersten Spalte der Tabellen von Abschnitt 10 ausgewiesen;

k_s der Größeneinflussparameter wie in den Tabellen von Abschnitt 10 angegeben.

ANMERKUNG Für einige Konstruktionsdetails wird der Größeneinfluss bereits durch die Angabe unterschiedlicher Kerbfälle erfasst.

(2) Für den Fall, dass für geschweißte Konstruktionsdetails $\Delta\sigma_C$ nach (1) kleiner als 71 N/mm², aber $\Delta\sigma_{C,Table}$ größer als 71 N/mm² ist, muss $\Delta\sigma_D$ zu 0,585 $\Delta\sigma_C$ gesetzt werden.

8.3.2 Nachbehandlung

(1) Der Einfluss einer Nachbehandlung auf den Ermüdungswiderstand darf berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 1 Der Nationale Anhang kann Festlegungen zu Nachbehandlungen einschließlich Schweißnahtnachbehandlungen wie Beschleifen der Nahtübergänge, WIG-Aufschmelzen der Nahtübergangsbereiche, Hämmerverfahren, HFMI-Behandlung und Kugelstrahlen treffen.

ANMERKUNG 2 Leitlinien werden in Anhang F hinsichtlich der Ermüdungsbemessung von geschweißten Anschlüssen gegeben, die durch höherfrequente Hämmerverfahren (HFMI) behandelt werden.

(2) Der Effekt einer Nachbehandlung mit Ausnahme von Beschleifen sollte nicht mit der günstigen Wirkung des Spannungsarmglühens nach 7.4(3) kombiniert in Ansatz gebracht werden.

9 Ermüdungsnachweis

9.1 Nachweis elastischen Verhaltens

(1) Die Nennspannungen σ_{Ed} und τ_{Ed} , die sich aus der Einwirkungskombination nach EN 1990, 8.3.4.5 ergeben, gegebenenfalls unter Berücksichtigung makrogeometrischer Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung, sollten wie folgt begrenzt werden:

$$\sigma_{Ed} \leq f_y / \gamma_{M,ser} \quad (9.1)$$

und

$$\tau_{Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser} \sqrt{3}} \quad (9.2)$$

ANMERKUNG 1 Elastisches Verhalten ist eine notwendige Voraussetzung für alle spannungsbasierten Nachweisverfahren dieses Dokuments einschließlich Anhang A, Anhang B, Anhang C und Anhang F.

ANMERKUNG 2 Der Wert von $\gamma_{M,ser}$ ist 1,0, solange der Nationale Anhang keinen anderen Wert enthält.

(2) Um Kurzzeitermüdung (low-cycle fatigue) zu vermeiden, sollten die maximalen Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{max,Ed}$ und $\Delta\tau_{max,Ed}$, die nach Abschnitt 7 berechnet werden, gegebenenfalls unter Berücksichtigung makrogeometrischer Einflüsse und/oder Einflüsse aus konzentrierter Belastung, wie folgt begrenzt werden:

$$\Delta\sigma_{max,Ed} \leq 1,5 f_y / \gamma_{Mf} \quad (9.3)$$

und

$$\Delta\tau_{max,Ed} \leq 1,5 \frac{f_y}{\gamma_{Mf} \sqrt{3}} \quad (9.4)$$

ANMERKUNG Hohe Nennspannungsschwingbreiten können zu plastischen Verformungen an den Stellen mit Spannungskonzentration führen. In der Folge können bei Belastungen mit wechselndem Vorzeichen Wechselformierungen hervorgerufen werden, die in ihrer Größe begrenzt werden müssen, um Kurzzeitermüdung zu vermeiden.

(3) Die Anforderung nach (2) darf als erfüllt angenommen werden, wenn das tatsächliche Spannungsschwingbreitenkollektiv durch ein äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ oder $\Delta\tau_{e,2,Ed}$ ersetzt wird, das mittels eines vereinfachten Ermüdungslastmodell nach EN 1991 bestimmt wurde.

9.2 Nachweis mittels Bezugswert

(1) Dieser Nachweis sollte für Bemessungssituationen bei unbekannter maximaler Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{max,Ed}$ oder $\Delta\tau_{max,Ed}$ durchgeführt werden.

ANMERKUNG Bemessungssituationen mit unbekannter maximaler Spannungsschwingbreite können sein:

- Ein mehrstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv wird durch ein äquivalentes einstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ oder $\Delta\tau_{e,2,Ed}$ ersetzt.
- Ein mehrstufiges Spannungsschwingbreitenkollektiv wird mittels eines vereinfachten Ermüdungslastmodells nach EN 1991 ermittelt, das die größten Lastzyklen mit einer geringen Häufigkeit vernachlässigt.

(2) Die Normal- und Schubspannungsschwingbreiten für das Konstruktionsdetail sollten folgende Beziehungen erfüllen:

$$\frac{\Delta\sigma_{e,2,Ed}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (9.5)$$

und

$$\frac{\Delta\tau_{e,2,Ed}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (9.6)$$

ANMERKUNG Die für ein bestimmtes Konstruktionsdetail zu betrachtenden Spannungskomponenten, siehe 7.2, werden in Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 angezeigt. Siehe auch 7.3.

9.3 Nachweis mittels Dauerfestigkeit

(1) Dieser Nachweis darf für Bemessungssituationen bei bekannter maximaler Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\max,Ed}$ oder $\Delta\tau_{\max,Ed}$ durchgeführt werden.

ANMERKUNG Siehe auch Anmerkung zu 9.2(1).

(2) Eine unendliche Lebensdauer für ein Konstruktionsdetail darf angenommen werden, wenn die maximale Spannungsschwingbreite des einwirkenden Normal- oder Schubspannungskollektivs folgende Beziehungen erfüllt:

$$\frac{\Delta\sigma_{\max,Ed}}{\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}} \leq 1,0 \quad (9.7)$$

oder

$$\frac{\Delta\tau_{\max,Ed}}{\Delta\tau_D/\gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (9.8)$$

9.4 Nachweis bei mehrachsiger Ermüdungsbeanspruchung

(1) Wenn die betrachtete Stelle eines Konstruktionsdetails (siehe die in Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 dargestellten Risse) durch eine Kombination aus Normal- und Schubspannungen beansprucht wird, sollte der Ermüdungsnachweis die Wirkung der kombinierten Beanspruchung wie folgt berücksichtigen:

- a) Wenn die Normal- und Schubspannungen gleichzeitig während jedes Belastungsereignisses auftreten, sollten die Hauptspannungen betrachtet und die korrespondierenden Spannungsschwingbreiten mit Gleichung (9.5) nachgewiesen werden;
- c) Wenn die Normal- und Schubspannungen nicht gleichzeitig während jedes Belastungsereignisses auftreten, sollte die Summe der Schädigungen nach der Miner-Regel gebildet werden:

— Für Versagen im Grundwerkstoff (einschließlich Rissbeginn am Schweißnahtübergang) bei Beanspruchung durch Nenn-Normalspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_z$ und Nenn-Schubspannungsschwingbreiten $\Delta\tau_{xy}$, $\Delta\tau_{xz}$, $\Delta\tau_{yz}$:

$$\sum_{j=x,y,z} \left(\frac{\Delta\sigma_{je,2,Ed}}{\Delta\sigma_{jC}/\gamma_{Mf}} \right)^{m_\sigma} + \sum_{k=xy,xz,yz} \left(\frac{\Delta\tau_{ke,2,Ed}}{\Delta\tau_{kC}/\gamma_{Mf}} \right)^{m_\tau} \leq 1,0 \quad (9.9)$$

— für Schweißnahtversagen (Rissbeginn an der Nahtwurzel) infolge der Schweißnahtspannungen nach 7.2(5):

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{wf,e,2,Ed}}{\Delta\sigma_{wf,C}/\gamma_{Mf}} \right)^{m_\sigma} + \left(\frac{\Delta\tau_{wf,e,2,Ed}}{\Delta\tau_{wf,C}/\gamma_{Mf}} \right)^{m_\tau} \leq 1,0 \quad (9.10)$$

Dabei ist

m_σ der erste Neigungsparameter m_1 der Ermüdungswiderstandskurve für das betrachtete Konstruktionsdetail bei Beanspruchung durch Normalspannungen;

m_τ der erste Neigungsparameter m_1 der Ermüdungswiderstandskurve für das betrachtete Konstruktionsdetail bei Beanspruchung durch Schubspannungen.

(2) Wenn die Normal- und Schubspannungen zur Bildung von Ermüdungsrissen an unterschiedlichen Stellen führen, sollten für beide Stellen ein separater Ermüdungsnachweis durchgeführt werden.

(3) Liegen keine Informationen zu $\Delta\sigma_{e,2,Ed}$ oder $\Delta\tau_{e,2,Ed}$ vor, dann darf das Nachweisverfahren nach Anhang A genutzt werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann Informationen zur Anwendung von Anhang A enthalten.

10 Klassifizierte Konstruktionsdetails für das Nennspannungskonzept

(1) Die Klassifizierung in Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.12 sollte nur für das Nennspannungskonzept bzw. bei Verwendung von modifizierten Nennspannungen verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Die Schweißsymbole, die in Tabelle 10.3 bis Tabelle 10.12 genutzt werden, werden in Tabelle 10.13 erläutert.

ANMERKUNG 2 Die letzte Spalte in Tabelle 10.1 bis Tabelle 10.11 kann ergänzende Anforderungen enthalten, die über die Festlegungen von EN 1090-2, EN 1993-1-1 und EN 1993-1-8 hinaus gehen.

(2) In Situationen, in denen eine nicht gleichförmige Spannungsverteilung durch globale und/oder lokale Biegung hervorgerufen wird, sollten die Gesamtspannungen einschließlich der Biegespannungen an der Stelle des potentiellen Risses betrachtet werden.

ANMERKUNG Die Darstellungen der Konstruktionsdetails mit Beanspruchung durch Normalspannungen zeigen im Allgemeinen die Verteilung der Spannung σ in der Mittelebene der Bauteile als Ergebnis von Normalkräften.

(3) Die Klassifizierung von kehlnahtgeschweißten Konstruktionsdetails darf für konvexe, konkave und flache Kehl Nähte angewendet werden, auch wenn die Darstellungen nur beispielhaft ein Nahtprofil zeigen.

(4) Für Bemessungssituationen mit $N < 2 \times 10^6$ sollte der Ermüdungswiderstand des Tragwerks in unmittelbarer Nähe zum betrachteten Konstruktionsdetail zusätzlich überprüft werden.

ANMERKUNG Konstruktionsdetails in ungeschweißten Bauteilen und geschraubten Anschlüssen können einen niedrigeren Ermüdungswiderstand als geschweißte Bauteile für $N < 2 \times 10^6$ als Folge der unterschiedlichen Neigungsparameter aufweisen (Überschneidung der Ermüdungswiderstandskurven).

(5) Für Tragwerke mit Feuerverzinkung sollten die besonderen Festlegungen in den Tabelle 10.1, Tabelle 10.2, Tabelle 10.4, Tabelle 10.6, Tabelle 10.9 und Tabelle 10.11 gelten.

ANMERKUNG 1 Siehe 8.1(2), 8.1(3) and 8.1(6) in Bezug auf den nächst niedrigeren Kerbfall, der in den Fußnoten der Tabelle 10.1 Tabelle 10.2, Tabelle 10.4, Tabelle 10.6, Tabelle 10.9 und Tabelle 10.11 erwähnt wird.

ANMERKUNG 2 Diese Festlegungen gelten nicht für thermisch gespritzte Zinc/Aluminium Konstruktionsdetails.

(6) Für Tragwerke aus wetterfestem Stahl sollten die besonderen Festlegungen in Tabelle 10.1 und Tabelle 10.2 gelten.

ANMERKUNG Siehe 8.1(2) und 8.1(3) in Bezug auf den nächst niedrigeren Kerbfall, der in den Fußnoten der Tabelle 10.1 und Tabelle 10.2 erwähnt wird.