

DIN EN 17149-3



ICS 45.060.01

Einsprüche bis 2021-08-11

Entwurf**Bahnanwendungen –
Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen –
Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17149-3:2021**

Railway applications –
Strength assessment of railway vehicle structures –
Part 3: Fatigue strength assessment based on cumulative damage;
German and English version prEN 17149-3:2021

Applications ferroviaires –
Évaluation de la résistance des structures de véhicule ferroviaire –
Partie 3: Évaluation de la résistance à la fatigue basée sur la méthode des dommages cumulés;
Version allemande et anglaise prEN 17149-3:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-06-11 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 fsf@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 Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) oder Rolandstr. 4, 34131 Kassel.

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 249 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-3:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 087-00-04 AA „Festigkeit/Kollisionssicherheit“ im DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigefügt. 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.

<i>Titel de:</i>	Bahnanwendungen — Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen — Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis
<i>Titel en:</i>	Railway applications — Strength assessment of railway vehicle structures — Part 3: Fatigue strength assessment based on cumulative damage
<i>Titel fr:</i>	Applications ferroviaires — Évaluation de la résistance des structures de véhicule ferroviaire — Partie 3: Évaluation de la résistance à la fatigue basée sur la méthode des dommages cumulés

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Spannungsbestimmungen	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Grundwerkstoff	8
4.3 Schweißverbindung	8
4.3.1 Modifizierte Nennspannungen	8
4.3.2 Strukturspannungen und Kerbspannungen	8
5 Ermüdungsfestigkeit	8
5.1 Grundwerkstoff	8
5.1.1 Allgemeines	8
5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$	9
5.1.3 Werkstoffeigenschaften	9
5.1.4 Konstruktionsparameter	11
5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für normale und Schubspannungen $f_{R,\sigma}$ und $f_{R,\tau}$	13
5.1.6 Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Güsse $f_{R,C}$	13
5.1.7 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel	15
5.2 Schweißverbindungen	17
5.2.1 Allgemeines	17
5.2.2 Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$	18
5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$	18
5.2.4 Einfluss der Dicke f_{thick} und Biegung	18
5.2.5 Eigenspannungsfaktor $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$	19
5.2.6 Bonusfaktor für Schweißnachbehandlung f_{post}	20
5.2.7 Qualitätsstufenfaktor f_{QL}	20
5.2.8 Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{QL}	21
5.2.9 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel	21
5.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Grundwerkstoff und Schweißverbindungen durch Laborversuche	24
6 Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten	24
6.1 Allgemeines	24
6.2 Teilbeiwert für Lasten γ_L	25
6.3 Teilbeiwert für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit γ_M	26
6.3.1 Allgemeines	26
6.3.2 Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$	26
6.3.3 Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung $\gamma_{M,I}$	27
6.3.4 Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$	28

7	Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage von Schadensakkumulationsberechnung.....	29
7.1	Allgemeines	29
7.2	Spannungsermittlung	29
7.3	Bestimmung des Spannungskollektivs.....	30
7.3.1	Konditionierung.....	30
7.3.2	Anpassung der Spannungshistorie	30
7.3.3	Zählung.....	30
7.3.4	Mittelspannungsanpassung.....	31
7.3.5	Auslassung	31
7.4	Schädigungsberechnung für jede einzelne Spannungskomponente.....	32
7.4.1	Allgemeines	32
7.4.2	Bestimmung des Formfaktors des Spannungskollektivs A_{eq}	33
7.4.3	Bestimmung der zulässigen Miner-Summe D_m	33
7.4.4	Bestimmung der akkumulierten Miner-Summe D_{it} und des Skalierungsfaktors x_{it} zum Erreichen der zulässigen Miner-Summe.....	33
7.5	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit.....	35
Anhang A (informativ)	Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen.....	37
A.1	Allgemeines	37
A.2	Mittelspannungsempfindlichkeit.....	37
A.2.1	Grundwerkstoff.....	37
A.2.2	Schweißverbindungen.....	38
A.3	Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren	38
Anhang B (informativ)	Spezifikationsbeispiel für zulässige volumetrische Fehler in Gussstücken aus Stahl, Eisen und Aluminium	42
B.1	Allgemeines	42
Anhang C (informativ)	Werkstofffaktoren für Grundwerkstoff.....	44
Anhang D (normativ)	Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Schweißverbindungen nach dem Nennspannungsansatz.....	45
D.1	Erläuterung der Tabellen für Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit	45
D.1.1	Allgemeines	45
D.1.2	Schweißnahttyp nach EN 15085-3:2007, Tabelle B.1	45
D.1.3	Skizze des Schweißstoßes	45
D.1.4	Schweißstoßspezifische Anforderungen.....	46
D.1.5	Potenzieller Rissinitiiierungspunkt	46
D.1.6	Durchführbarkeit der Prüfung.....	46
D.1.7	Relevante Dicke für die Beurteilung einer Schweißnaht	46
D.1.8	Werkstoff.....	46
D.1.9	Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$.....	46
D.1.10	Exponent m und Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D	46
D.1.11	Dickenkorrektorexponenten $n_{\sigma, \perp}$, $n_{\sigma, }$ und n_{τ}.....	47
D.1.12	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Strukturspannungen f_{struc} ($\Omega = 0$)	47
D.1.13	Untere Grenze der Plattendicke für die Dickenkorrektur t_{min}	47
D.1.14	Parameter α_{bend}, der für die Bestimmung von f_{bend} verwendet wird.....	47
D.2	Tabellen mit Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit für Schweißverbindungen	48
D.3	Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit anhand von vergleichenden Kerbfallmodellen	83
Anhang E (informativ)	Dickeneinfluss und Berücksichtigung der Biegung bei Schweißverbindungen für Nenn- und Strukturspannungsansatz.....	84
E.1	Allgemein.....	84
E.2	Einflussgrößen	84

E.2.1	Effektive Plattendicke t_{eff}	84
E.2.2	Dicken-Korrekturfaktor f_{thick}	85
E.2.3	Verstärkungsfaktor für Biegung f_{bend}	86
E.3	Methoden zur Berücksichtigung.....	87
Anhang F (informativ) Spannungsausgleich aufgrund der Schweißstoßgeometrie für		
	Schweißverbindungen bei Nennspannungsansatz	89
F.1	Allgemeines	89
F.2	Methoden zum Spannungsausgleich	89
F.2.1	Im Berechnungsmodell implementierter Ausgleich	89
F.2.2	Ausgleich in der Spannungsauswertung.....	90
Anhang G (informativ) Erhöhung des Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ für tragende		
	T- und Doppel-T-Stößen mit doppelter Kehlnaht	93
G.1	Allgemein.....	93
G.2	Beispiele für die Bestimmung des Anhebungsfaktors für Doppel-T-Stöße	93
Anhang H (informativ) Anwendung des Strukturspannungsansatzes für Schweißverbindungen		
	von Stahl und Aluminium	97
H.1	Allgemeines zur Ermittlung der Ermüdungsspannung an der Schweißnaht.....	97
H.2	Ermüdungsspannungsermittlung mit der Finite-Elemente-Methode	98
H.2.1	Ermüdungsspannungsermittlung am Nahtübergang.....	98
H.2.2	Ermüdungsspannungsermittlung an der Nahtwurzel	99
H.3	Betriebsfestigkeitsnachweis mit Strukturspannungen.....	99
Anhang I (informativ) Anwendung des Kerbspannungsansatzes für Schweißverbindungen aus		
	Stahl und Aluminium.....	101
I.1	Allgemeines	101
I.2	Berechnung der Kerbspannungen	101
I.2.1	Allgemeines	101
I.2.2	Bezugs-Kerbradius r_{ref} für die Modellierung von Schweißkerben.....	102
I.2.3	Modellierung von Schweißnaht-Nennquerschnitten	102
I.2.4	Methoden zur Kerbspannungsberechnung	105
I.3	Wöhlerlinien	106
I.3.1	Normalspannung quer zur Schweißnaht.....	106
I.3.2	Normalspannung längs zur Schweißnaht.....	107
I.3.3	Schubspannung	107
I.3.4	Kennwerte in Abhängigkeit von der Dickenwirkung.....	108
Anhang J (informativ) Beispiel für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit.....		
J.1	Beschreibung.....	109
J.2	Aufgabe.....	110
J.3	Bewertung.....	110
Anhang K (informativ) Flussdiagramme von Verfahren zum Betriebsfestigkeitsnachweis		
Literaturhinweise.....		122

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-3:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument ist Teil der Normenreihe EN 17149 „Bahnanwendungen — Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen“, welche aus den folgenden Teilen besteht:

- Teil 1: Allgemeine Anforderungen für Festigkeitsnachweise (Statik und Ermüdung)
- Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis

Der folgende Teil befindet sich in der Vorbereitung:

- Teil 2: Statischer Festigkeitsnachweis

Einleitung

Falls ein Betriebsfestigkeitsnachweis für Schienenfahrzeugstrukturen notwendig ist, darf dieser Nachweis mit einem Dauerfestigkeitsverfahren oder einem Schädigungsakkumulationsverfahren erbracht werden.

Ein Dauerfestigkeitsverfahren beruht auf der Bewertung der Spannungsamplituden (z. B. abgeleitet aus Auslegungslastfällen oder Messungen) gegen die anwendbare Dauerfestigkeit. Ein solches Verfahren wird in Kombination mit normativen Lasten wie in der Normenreihe EN 12663 oder EN 13749 festgelegt.

Ein Betriebsfestigkeitsnachweis auf Basis von Schädigungsakkumulation bezieht Spannungsspektren mit verschiedenen Amplituden und Zyklenzahlen oder Spannungszeitverläufen ein. Diese Europäische Norm stellt das grundlegende Verfahren sowie Kriterien für eine pragmatische Methode bereit, die bei Betriebsfestigkeitsnachweisen auf Grundlage des Schädigungsakkumulationsverfahrens angewendet werden.

Der Hauptteil der Norm verwendet als Grundlage das Nennspannungsverfahren, wobei die Berücksichtigung variabler Amplituden und Zyklenzahlen nach den in dieser Norm beschriebenen Methoden ebenso mit dem Strukturspannungsansatz und dem Kerbspannungsansatz angewendet werden darf (zusätzliche Informationen sind in den informativen Anhängen hinterlegt).

In diesem Dokument bezieht sich der Begriff Betriebsfestigkeitsnachweis in allen Fällen auf das Schädigungsakkumulationsverfahren sofern es nicht abweichend vermerkt ist.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt ein Verfahren für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen auf Grundlage von Schädigungsakkumulation fest.

Sie ist Teil einer Normenreihe, die Verfahren für Festigkeitsnachweise bei Schienenfahrzeugstrukturen festlegt, welche nach Normen für Bahnanwendungen hergestellt, betrieben und instandgehalten werden.

Dieses Dokument findet Anwendung bei Lastdaten mit variabler Amplitude für Zyklenzahlen über 10 000 Zyklen.

Dieses Dokument ist nicht anzuwenden für Dauerfestigkeitsverfahren.

Das Nachweisverfahren der Normenreihe beschränkt sich auf eisenhaltige Werkstoffe und Aluminium.

Diese Dokumentenreihe legt keine Bemessungslastfälle fest.

Diese Dokumentenreihe ist nicht anzuwenden für Korrosionszustände oder Betrieb bei erhöhter Temperatur im Kriechbereich.

Diese Normenreihe ist für alle Arten von Schienenfahrzeugen anwendbar; sie legt jedoch nicht fest, in welchen Fällen ein Betriebsfestigkeitsnachweis mittels Schädigungsakkumulation anzuwenden ist.

2 Normative Verweisungen

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

EN 15085-3:2007¹, *Bahnanwendungen — Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen — Teil 3: Konstruktionsvorgaben*

prEN 17149-1:202X², *Bahnanwendungen — Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen für Festigkeitsnachweise (Statik und Ermüdung)*

ISO/TR 25901-1:2016, *Welding and allied processes — Vocabulary — Part 1: General terms*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe, Symbole und Abkürzungen nach ISO/TR 25901-1:2016 und prEN 17149-1:202X und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

1 Dokument beeinflusst von AC:2009.

2 In Erarbeitung.

4 Spannungsbestimmungen

4.1 Allgemeines

Das für die Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage des Schädigungsakkumulationsverfahrens verwendete Spannungskollektiv muss in Form von Spannungsamplituden, Mittelspannungen und Zyklenzahlen angegeben werden, um die Konstruktionslebensdauer zu repräsentieren.

Das Bemessungsspannungskollektiv muss alle notwendigen Toleranzen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in ihren Werten enthalten. Falls relevant, darf dies durch die Anwendung eines Teilbeiwerts γ_L bei dem repräsentativen Spannungskollektiv erreicht werden, wie im Anwendungscode festgelegt. Empfehlungen und Anforderungen für den Teilbeiwert γ_L sind in 6.2 zu finden.

ANMERKUNG Die Normenreihe EN 12663, EN 15827 und EN 13749 enthalten Informationen, die zur Bestimmung von Bemessungslasten für Schädigungsakkumulationsnachweise von Schienenfahrzeugen dienen.

Die Überlagerung der Einzelkomponenten für Normalspannung und Schubspannung ist in 7.5 berücksichtigt.

4.2 Grundwerkstoff

Die Spannungen für den Grundwerkstoff müssen durch das Nennspannungsverfahren, wie in prEN 17149-1:202X beschrieben, bestimmt werden.

4.3 Schweißverbindung

4.3.1 Modifizierte Nennspannungen

Die modifizierten Nennspannungen für Schweißverbindungen müssen nach prEN 17149-1:202X, 5.3, bestimmt werden.

4.3.2 Strukturspannungen und Kerbspannungen

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen dürfen Strukturspannungs- und Kerbspannungsverfahren angewendet werden. Für die Anwendung dieser Verfahren werden die Anforderungen für die Berechnung der relevanten Spannungen und Ermüdungsfestigkeit in den folgenden informativen Anhängen beschrieben:

- Anhang H für das Strukturspannungsverfahren; und
- Anhang I für das Kerbspannungsverfahren.

5 Ermüdungsfestigkeit

5.1 Grundwerkstoff

5.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt die Methode für die Herleitung der Ermüdungsfestigkeit des Grundwerkstoffs unter den folgenden Bedingungen:

- verwendete Werkstoffe wie Baustahl, schweißbarer Stahlguss, Gusseisen (GJS und ADI), Schmiedestahl, Aluminiumguss und Aluminiumknetlegierung;
- Anwendungstemperatur bis zu 100° C für Aluminium und bis zu 200° C für Stahl;

- ebener Spannungstensor auf der Komponentenoberfläche (keine signifikante Spannungskomponente rechtwinklig zur Oberfläche, z. B. Presspassung).

Die oben definierten Einschränkungen sind bei den meisten Anwendungen von Grundwerkstoff für Schienenfahrzeuge erfüllt, in diesem Fall ist ein vereinfachtes Bewertungsverfahren angemessen. Wird der Anwendungsbereich überschritten, ist eine Bewertungsmethode zu wählen, die den spezifischen Anwendungsfall (z. B. hohe Temperaturen und 3-dimensionale Spannungszustände) berücksichtigt.

Anhang C gibt einen Überblick über die anwendbaren Materialfaktoren.

5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien bestimmt, welche die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ (in N/mm², sofern nicht anders angegeben) festlegen in Bezug auf:

- $N_C = 10^6$;
- Spannungsverhältnis $R_\sigma = R_\tau = -1$;
- Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,5 \%$;
- Membranspannungen.

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit werden mithilfe der folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\Delta\sigma_R(N_C = 10^6, R_\sigma = -1) = R_m \cdot f_{R,\sigma} \cdot f_{SR,\sigma} \cdot f_{R,C} \quad (1)$$

$$\Delta\tau_R(N_C = 10^6, R_\tau = -1) = R_m \cdot f_{R,\tau} \cdot f_{R,\sigma} \cdot f_{SR,\tau} \cdot f_{R,C} \quad (2)$$

5.1.3 Werkstoffeigenschaften

5.1.3.1 Zugfestigkeit nach Werkstoffnormen $R_{m,N}$

$R_{m,N}$ ist die Nennzugfestigkeit nach den Werkstoffnormen unter Einbeziehung der tatsächlichen Blechdicke. Für gefräste Bauteile muss die Dicke vor dem Fräsen (halbfertiges Produkt) betrachtet werden.

Für gewalzte Bleche und Strangpressprofile muss ein Anisotropiefaktor f_A senkrecht zur Walzrichtung nach Tabelle 1 berücksichtigt werden, außer dies wird bereits in der Werkstoffnorm oder in der Bauteilspezifikation berücksichtigt oder explizit ausgeschlossen. Für sonstige Werkstoffanwendungen ist $f_A = 1,0$.

$$R_m = f_A \cdot R_{m,N} \quad (3)$$

Tabelle 1 — Anisotropiefaktor f_A für Stahl und Aluminium

Werkstoff	$R_{m,N}$ N/mm ²	f_A
Gewalzter Stahl	≤ 600	0,9
	> 600 ≤ 900	0,86
Gewalzte Bleche und Strangpressprofile aus Aluminium	≤ 200	1,0
	> 200 ≤ 400	0,95
	> 400 ≤ 600	0,9
Alle sonstigen Werkstoffanwendungen		1,0

Für Wärmeeinflusszonen in der Nähe von Schweißverbindungen muss die Nennzugfestigkeit für die Wärmeeinflusszone $R_{m,HAZ}$ anstelle von R_m verwendet werden. Der Wert für $R_{m,HAZ}$ muss aus der Fachliteratur hergeleitet werden (z. B. [2], [5]).

5.1.3.2 Zugfestigkeit festgelegt durch Zeichnung oder Spezifikation $R_{m,S}$

Als Alternative zu einer Werkstoffnorm dürfen die mechanischen Eigenschaften durch die Zeichnung oder die Spezifikation festgelegt werden.

$R_{m,S}$ ist die Zugfestigkeit nach einer Zeichnung oder einer Bauteilspezifikation. Falls höhere Werte als die in den Werkstoffnormen festgelegten für $R_{m,S}$ festgelegt sind und die Werte nur durch Stichproben geprüft werden, sind die festgelegten Werte nicht hinreichend zuverlässig und wären daher nichtkonservativ für die Verwendung in einem Betriebsfestigkeitsnachweis. Zur Durchführung eines Betriebsfestigkeitsnachweises mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,5 \%$ muss die durch Zeichnung oder Bauteilspezifikation definierte Zugfestigkeit $R_{m,S}$ wie im Folgenden vermindert werden:

$$R_m = 0,94 \times R_{m,S} \quad (4)$$

Der Wert 0,94 ist anwendbar, falls der Festigkeitswert durch drei Stichproben (z. B. Festigkeitsprüfung oder Zugprüfung). Für eine andere Anzahl von Prüfungen muss dieser Wert der Fachliteratur angepasst werden (z. B. [2]).

Falls ein bestätigter Wert $P_S = 97,5 \%$ innerhalb des Bauteils verfügbar ist, darf dieser Wert ohne Minderung verwendet werden.

Die in Werkstoffnormen definierten Werte für $R_{m,N}$ für eine gegebene Wanddicke dürfen für den Zweck des Betriebsfestigkeitsnachweises mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,5 \%$ verwendet werden.

5.1.3.3 Einfluss der Technologiegröße

Die Nachweismethode, die in dieser Norm beschrieben wird, sieht keine Anpassung der Wanddicke des Bauteils vor. Die verwendeten Festigkeitseigenschaften müssen die entsprechende Wanddicke berücksichtigen.

Für Bauteile, die aus halbfertigen Produkten hergestellt wurden, müssen die Festigkeitseigenschaften die Wanddicke des ursprünglichen halbfertigen Produkts berücksichtigen.

5.1.3.4 Einfluss der Anwendungstemperatur

Falls die Betriebstemperatur des Bauteils innerhalb des in dieser Norm definierten Anwendungsbereichs bleibt, ist keine weitere Anpassung zur Einbeziehung der Anwendungstemperatur für den Betriebsfestigkeitsnachweis nötig.

5.1.4 Konstruktionsparameter

5.1.4.1 Rauheitsfaktor f_{SR}

Der Rauheitsfaktor f_{SR} ist von der Nennzugfestigkeit R_m , der Rauheit R_z und dem Herstellungsprozess abhängig und wird durch Gleichung (5) und Gleichung (6) festgelegt.

$$f_{SR,\sigma} = 1 - a_{R,\sigma} \cdot \log \frac{R_z}{[\mu m]} \cdot \log \frac{2 \times R_m}{b_R} \quad (5)$$

$$f_{SR,\tau} = 1 - f_{R,\tau} \cdot a_{R,\sigma} \cdot \log \frac{R_z}{[\mu m]} \cdot \log \frac{2 \times R_m}{b_R} \quad (6)$$

$a_{R,\sigma}$ und b_R sind in Tabelle 2 angegeben. $f_{R,\tau}$ ist in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 2 — Faktoren $a_{R,\sigma}$ und b_R für Stahl und Aluminium

Werkstoff	$a_{R,\sigma}$	b_R N/mm²
Stahl (gewalzt oder geschmiedet)	0,22	400
Stahlguss	0,20	400
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	0,16	400
Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)	0,16	400
Aluminium	0,22	133
Aluminiumguss	0,20	133

Übliche Werte der Rauheit R_z sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 — Übliche Werte für R_z

R_z µm	Beispiel
20	Bearbeitete Oberfläche
25	Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Stahl, vor dem Kugelstrahlen
50	Brennschneiden von Stahl
80	Grob bearbeitete Oberfläche; Kugelgestrahlte gewalzte Blechoberfläche; Gewalzte Bleche und Strangpressprofile aus Aluminium
200	Rolled sheet surface of steel, not shot blasted; Forging steel; Casting surface; Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Aluminium

Sind Werte für die Rauheit explizit in der Zeichnung oder in der Bauteilspezifikation angegeben, müssen diese Werte für den Betriebsfestigkeitsnachweis verwendet werden. Bei der Anwendung auf Gussteile ist der Vorteil von bearbeiteten Oberflächen nur anwendbar, wenn die bearbeitete Oberfläche frei von Oberflächenbruchfehlern ist.

Für Blechkanten bei gewalzten Blechen müssen die folgenden Anforderungen Anwendung finden:

- scharfe Kanten und Oberflächenwalzfehler müssen durch Längsschleifen entfernt werden;
- Risse oder sichtbare Ausbrüche sind nicht zulässig;
- Schweißreparaturen sind nicht zulässig (sollte wie eine Schweißnaht behandelt werden)
- Kerbwirkungen durch die Form der Kanten müssen berücksichtigt werden;
- minimaler Eckenradius oder Fase 1 mm;
- alle Grate müssen entfernt werden.

Für plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Stahl muss der Rauheitsfaktor $f_{S,R}$ um den Faktor 0,94 und für Thermoschnitt um den Faktor 0,81 verringert werden.

Für plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Aluminium muss eine Rauheit von $R_z = 200 \mu\text{m}$ unabhängig von der tatsächlichen Rauheit angewendet werden, um lokale metallurgische Effekte zu berücksichtigen. Eine Verbesserung des Rauheitsfaktors ist nur anwendbar, falls der betroffene Werkstoff (üblicherweise 2 mm) vollständig durch Bearbeitung nach dem Schneiden entfernt wird.

Diese Werte gelten für Nennspannungen ohne Berücksichtigung von Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche. Im Falle eines Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche (z. B. Spannungskonzentration) darf der Einfluss der Rauheit laut Fachliteratur vermindert werden, z. B. [2].

5.1.4.2 Einfluss des Spannungsgradienten

Bei dem in dieser Norm beschriebenen Nachweisverfahren wird der mit dem Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche am Bewertungsort verbundene Nutzen für die Ermüdungsfestigkeit nicht in die Ermüdungsfestigkeitswerte einbezogen.

Die positiven Auswirkungen von Spannungsgradienten dürfen laut Fachliteratur berücksichtigt werden, z. B. [2].

5.1.4.3 Einfluss der Oberflächenbehandlung

Als konservativer Ansatz wird in diesem vereinfachten Nachweisverfahren der mit der Oberflächenbehandlung (z. B. Hämmern) verbundene Nutzen für die Ermüdungsfestigkeit nicht berücksichtigt.

Die vorteilhaften Wirkungen der Oberflächenbehandlung können gemäß der Fachliteratur, z. B. [2], berücksichtigt werden.

5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für normale und Schubspannungen $f_{R,\sigma}$ und $f_{R,\tau}$

Für die Ermittlung der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit (Spannungsbereich) für den Grundwerkstoff sind die in Tabelle 4 angegebenen Ermüdungsfestigkeitsfaktoren zu verwenden. Diese Ermüdungsfestigkeitsfaktoren sind auf $N_C = 10^6$ Zyklen und ein Spannungsverhältnis von $R = -1$ bezogen und entsprechen einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,5 \%$.

Tabelle 4 — Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für normale und Schubspannungen bezogen auf $N_C = 10^6$ Zyklen

Werkstoff	$f_{R,\sigma}$	$f_{R,\tau}^a$
Stahl (gewalzt oder geschmiedet)	0,75	0,577
Stahlguss	0,57	0,577
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	$0,42 + \frac{117 \text{ N/mm}^2}{R_m}$	0,65
Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)	$\frac{295 \text{ N/mm}^2}{R_m}$	0,7
Aluminium	0,6	0,577
Aluminiumguss	0,6	0,75
^a Verhältnis zwischen der Ermüdungsfestigkeit von Schubspannung und der von Normalspannung.		

ANMERKUNG Für Stahlguss und Gusseisen mit Kugelgraphit werden die in Tabelle 4 angegebenen Ermüdungsfestigkeitsfaktoren $f_{R,\sigma}$ nach [2] abgeleitet (Ermüdungsfestigkeitsfaktor für wechselnde Gleichspannungen $f_{w,\sigma}$). Die Ermüdungsfestigkeitsfaktoren stellen das Ermüdungsfestigkeitsverhältnis in Bezug auf den Spannungsbereich dar, diese Faktoren enthalten eine Marge von 1,2 wie in [2] angegeben, um Unsicherheiten abzudecken. Für Aluminium werden die in Tabelle 4 angegebenen Ermüdungsfestigkeitsfaktoren anhand von Versuchsergebnissen ermittelt.

5.1.6 Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Güsse $f_{R,C}$

Die für Gussteile angewandte ZfP-Stufe und die entsprechende Gussqualitätsstufe haben einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeitswerte für den lokalen Nachweispunkt innerhalb des Gussteils. Der

Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussteile $f_{R,C}$ berücksichtigt die Auswirkungen der verbleibenden Fehler auf die Ermüdungsfestigkeit innerhalb des Gussteils. Für alle nicht gegossenen Bauteile gilt $f_{R,C} = 1,0$.

Bei Struktur Gussteilen ist es erforderlich, die Qualitätsanforderungen hinsichtlich der zulässigen Volumen- und Oberflächenfehler zu spezifizieren, um die zu erreichenden mechanischen Eigenschaften in hoch beanspruchten Bereichen zu gewährleisten. Die relevanten mechanischen Eigenschaften und Qualitätsanforderungen müssen entsprechend der Bauteilspezifikation nachgewiesen werden.

Der Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussstücke $f_{R,C}$ muss entsprechend der erreichten Gussqualität des Gussteils zu wählen. Wenn keine spezifischen Daten vorliegen, zeigt Tabelle 5 Werte, die für örtliche Auswertungspunkte des Gussstücks in Abhängigkeit von der ZfP-Stufe bei der Herstellung und der verifizierten Qualitätsstufe nach Anhang B verwendet werden dürfen.

Tabelle 5 darf für Stahlguss und Gusseisen mit Kugelgraphit verwendet werden. Für Teile aus Aluminiumguss darf ein ähnliches Vorgehen gewählt werden.

Tabelle 5 — Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Güsse $f_{R,C}$ (informativ)

Volumetrische Prüfung durch ZfP		Prüfung des Oberflächenzustands		Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Stahlguss $f_{R,C}$	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS, ADI) ^a $f_{R,C}$
Relevante Norm	Qualitätsstufe nach ASTM	Relevante Norm	Qualitätsstufe		
EN 12680 (UT) EN 12681 (RT)	Stufe 3	EN 1369	LM3, AM3, SM4	0,8	0,9
		EN 1370	4S1/5S2, VC2		
		EN 1371-1	LP3, AP3 SP3/CP3		
	Stufe 2	EN 1369	LM2, AM2 SM2	0,9	1,0
		EN 1370	3S1/3S2, VC2		
		EN 1371-1	LP2, AP2 SP2/CP2		

^a Güsse mit Bruchdehnung > 6 %.

Die Spezifikation von Gussteilen muss eine angemessene Gussqualität sicherstellen, um die Anwendbarkeit der in diesem Dokument definierten Bewertungsmethode zu gewährleisten. Der informative Anhang B enthält ein Beispiel für die Spezifikation der volumetrischen Qualitätsstufen.

Eine Erhöhung des Ermüdungsfestigkeitsfaktors $f_{R,C}$ auf bis zu 1,0 ist zulässig, wenn die Ermüdungsfestigkeitswerte innerhalb des Bauteils durch entsprechende Versuche mit Prüfkörpern aus diesen Bereichen des Bauteils und entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen für den Fertigungsprozess nachgewiesen werden. Ein Festigkeitsnachweisverfahren, das die inneren Gussfehler (z. B. Lunker) in Bauteilen bei der Spannungsermittlung nicht berücksichtigt (z. B. ein FEM-Modell, das die

Nenngeometrie darstellt), sollte auf Gussteile der Qualitätsstufe 3 oder besser beschränkt werden. Für Bauteile oder Teile von Bauteilen, die nicht beansprucht werden, dürfen auch deutlich schlechtere Qualitätsstufen angewendet werden. Bei der Beurteilung solcher Gussteile ist zu berücksichtigen, dass größere Defekte die tatsächlichen Spannungsverteilungen erheblich beeinflussen können (z. B. durch lokal reduzierte Querschnitte) und der Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussteile entsprechend reduziert werden sollte.

5.1.7 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel

Für Wöhlerlinien des Grundwerkstoffs sind alle relevanten Informationen in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 6 — Exponent jenseits des Wöhlerlinien-Knickpunktes, Cut-Off-Limit und Miner-Summengrenze

Schadens- akkumulationsregel	Exponent jenseits des Knickpunktes N_D	Cut-off-Limit $\Delta\sigma_L$	Miner-Summengrenze $D_{m,min}$
Verfahren Miner elementar mit Cut-Off- Limit	-	50 % der Festigkeit bei $N_D = 10^6$ Zyklen	1,0
Verfahren Miner modifiziert	$2 \times m - 1$	50% der Festigkeit bei $N_D = 10^6$ Zyklen	1,0 für Gusseisen mit Kugelgraphit, (GJS, ADI), 0,3 für alle sonstigen Werkstoffe
Verfahren Miner konsequent	m_2 für Austenitischer Stahl und Aluminium	-	1,0 für Gusseisen mit Kugelgraphit, (GJS, ADI), 0,3 für alle sonstigen Werkstoffe

In Bild 1 ist die prinzipielle Darstellung der Wöhlerlinien für den Grundwerkstoff bei Normalspannung angegeben. Für Wöhlerlinien von Schubspannungen wird das Symbol σ durch das Symbol τ ersetzt.

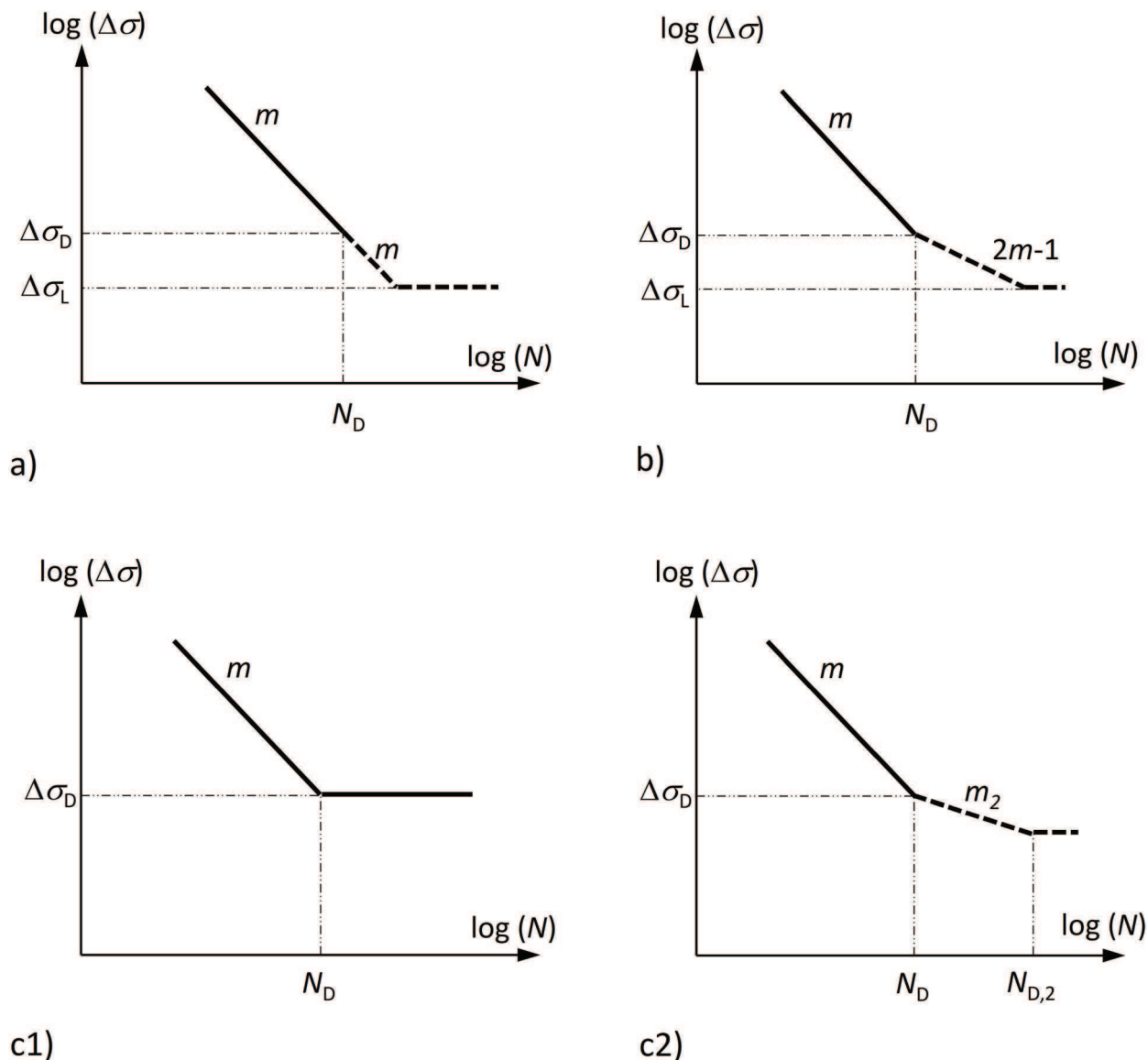


Bild 1 — Wöhlerlinien für Grundwerkstoff für Normalspannungen: a) Verfahren Miner elementar mit Cut-Off-Limit; b) Verfahren Miner modifiziert; c1) Verfahren Miner konsequent für ferritischen Stahl, Stahlguss und Gusseisen mit Kugelgraphit; c2) Verfahren Miner konsequent für austenitischen Stahl und Aluminium

Für Grundwerkstoffe liegt Knickpunktposition N_D bei 10^6 Zyklen.

ANMERKUNG 1 Für alle Grundwerkstoffe, außer für austenitischen Stahl und Aluminium, ist die Spannung an der Knickpunktposition N_D die Dauerfestigkeit.

Da $N_D = N_C$ ist, gelten folgende Gleichungen:

$$\Delta\sigma_D(R = -1) = \Delta\sigma_R \quad (7)$$

$$\Delta\tau_D(R = -1) = \Delta\tau_R \quad (8)$$

Für die Grundwerkstoffe austenitischer Stahl und Aluminium wird der Exponent über den Knickpunkt hinaus bis zu einem zweiten Knickpunkt bei $N_{D,2} = 10^8$ Zyklen angegeben. Dies ist nur für die Anwendung des Verfahrens Miner konsequent notwendig.

ANMERKUNG 2 Für die Grundwerkstoffe austenitischer Stahl und Aluminium ist die Spannung an der Knickpunktposition $N_{D,2}$ die Dauerfestigkeit.

Tabelle 7 — Wöhlerlinien für Grundwerkstoffe

Werkstoff	Spannungsart	Exponent der Wöhlerlinie m	Exponent der Wöhlerlinie m_2 für Verfahren Miner konsequent	Zweiter Knickpunkt $N_{D,2}$ für Verfahren Miner konsequent
Ferritischer Stahl	Normalspannung	5	-	-
	Schubspannung	8	-	-
Austenitischer Stahl	Normalspannung	5	15	10^8
	Schubspannung	8	25	10^8
Stahlguss	Normalspannung	7	-	-
	Schubspannung	8	-	-
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS, ADI)	Normalspannung	7	-	-
	Schubspannung	8	-	-
Aluminium und Aluminiumguss	Normalspannung	5	15	10^8
	Schubspannung	8	25	10^8

5.2 Schweißverbindungen

5.2.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten wird die Ermittlung von Ermüdungsfestigkeitswerten beschrieben, die für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium bezogen auf das Nennspannungsverfahren anwendbar sind.

Für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen nach dem Strukturspannungsverfahren und dem Kerbspannungsverfahren ist die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit in den informativen Anhängen beschrieben:

- Anhang H für das Strukturspannungsverfahren; und
- Anhang I für das Kerbspannungsverfahren.

ANMERKUNG Die Bewertung von wärmebeeinflussten Zonen erfolgt nach 5.1.3.1.

5.2.2 Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien angegeben. Die Wöhlerlinien der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen und Bauteilen sind durch die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ gekennzeichnet (in MPa, wenn nicht anders angegeben) bezogen auf:

- $N_C = 2 \times 10^6$ Zyklen;
- Spannungsverhältnis $R = 0,5$;
- Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,5 \%$;
- Membranspannungen.

Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ gelten für die Blechdicke

- $t_{ref} = 25$ mm bei Schweißverbindungen aus Stahl; und
- $t_{ref} = 10$ mm bei Schweißverbindungen aus Aluminium.

Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ ist für Kerbfälle, die verschiedene Schweißnahttypen und Schweißnahtdetails von geschweißten Eisenbahnkonstruktionen aus Stahl und Aluminium darstellen, in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe nach EN 15085-3 (z. B. CP A, CP B, CP C1 usw.) und den Spannungsrichtungen relativ zur Schweißnaht in den Tabellen in Anhang D dargestellt.

5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit in Bezug auf den Spannungsbereich $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ bezogen auf $N_C = 2 \times 10^6$ Zyklen und auf das Spannungsverhältnis $R_\sigma = -1$ bzw. $R_\tau = -1$ werden mit den folgenden Gleichungen beschrieben:

$$\Delta\sigma_R(N_C = 2 \times 10^6, R_\sigma = -1) = \Delta\sigma_C \cdot f_{thick} \cdot f_{res,\sigma} \cdot f_{post} \cdot f_{QL} \cdot f_{CT} \quad (9)$$

$$\Delta\tau_R(N_C = 2 \times 10^6, R_\tau = -1) = \Delta\tau_C \cdot f_{thick} \cdot f_{res,\tau} \cdot f_{post} \cdot f_{QL} \cdot f_{CT} \quad (10)$$

5.2.4 Einfluss der Dicke f_{thick} und Biegung

Der Einfluss der Dicke wird durch den Dickenkorrekturfaktor f_{thick} berücksichtigt. Dieser Faktor ist abhängig von der effektiven Blechdicke t , der Bezugsdicke t_{ref} und dem Dickenkorrektorexponenten für die Dicke n .

ANMERKUNG 1 $f_{thick} = 1,0$ für $t \leq t_{ref}$ ist im Allgemeinen ein konservativer Ansatz.

Der Dickenkorrekturfaktor muss nach Gleichung (11) angewendet werden.

$$\begin{aligned} f_{thick} &= 1,0 \text{ für } t \leq t_{ref} \\ f_{thick} &= \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \text{ für } t > t_{ref} \end{aligned} \quad (11)$$

Dabei ist

$n = \min(n_\sigma, \perp; 0,2)$ für Normalspannungen quer zur Schweißnaht, falls f_{post} wird durch Schleifen, WIG-Abrichten oder bündig geschliffene Schweißnähte aufgebracht;

$n = n_{\sigma, \perp}$ für Normalspannungen quer zur Schweißnaht in allen anderen Fällen;

$n = n_{\sigma, ||}$ für Normalspannungen längs zur Schweißnaht;

$n = n_{\tau}$ für Schubspannungen.

Werte für $n_{\sigma, \perp}$, $n_{\sigma, ||}$ und n_{τ} sind in Anhang D angegeben.

ANMERKUNG 2 An potenziellen Rissinitiierungspunkten mit hoher Kerbwirkung (z. B. Nahtwurzeln oder Nahtübergänge mit kleinem Nahtübergangswinkel) ist der Einfluss einer verminderten Blechdicke anders als an Rissinitiierungspunkten mit geringer Kerbwirkung (z. B. Übergänge an Stumpfnähten oder an Übergängen asymmetrischer Kehlschweißnähten mit höherem Nahtübergangswinkel). Dies wird durch den Dickenkorrektorexponenten n abgedeckt.

Ein detailliertes Verfahren nach Anhang E darf für den Einfluss der Dicke und die Berücksichtigung der Biegung angewendet werden.

5.2.5 Eigenspannungsfaktor $f_{\text{res},\sigma}$ und $f_{\text{res},\tau}$

Bei Schweißverbindungen wird der Eigenspannungseinfluss durch die Anwendung von Korrekturfaktoren für Eigenspannung $f_{\text{res},\sigma}$ und $f_{\text{res},\tau}$ berücksichtigt.

Für Schweißverbindungen werden die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ auf $R_{\sigma} = 0,5$ bzw. $R_{\tau} = 0,5$ und die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit auf $R_{\sigma} = -1$ und $R_{\tau} = -1$ bezogen. Die Spannungsdifferenz zwischen dem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ und $R = -1$ hängt vom Eigenspannungszustand ab und wird durch die Eigenspannungsfaktoren $f_{\text{res},\sigma}$ und $f_{\text{res},\tau}$ beschrieben, siehe Tabelle 8.

Die Eigenspannungsfaktoren sind abhängig von der Mittelspannungsempfindlichkeit (siehe Anhang A). In geschweißten Strukturen darf ein niedriger Eigenspannungszustand angenommen werden, wenn nach dem Schweißen eine Spannungsarmglühung durchgeführt wird. Werden nach dem Spannungsarmglühen Schweißreparaturen oder Richtarbeiten (z. B. zur Beseitigung von Verformung) durchgeführt, können neue Eigenspannungen eingebracht werden. In solchen Fällen muss für den betroffenen Bereich der Eigenspannungsfaktor für den geschweißten Zustand angesetzt werden. Wenn jedoch nachgewiesen werden kann, dass sich die Eigenspannungen im Vergleich zum spannungsarmgeglühten Zustand nicht wesentlich erhöht haben, dürfen alternative Werte für die Eigenspannungsfaktoren in Betracht gezogen werden, sofern sie begründet werden können.

Tabelle 8 — Eigenspannungsfaktoren $f_{\text{res},\sigma}$ und $f_{\text{res},\tau}$

Eigenspannungszustand	$f_{\text{res},\sigma}$	$f_{\text{res},\tau}$
niedrige Zug- und Druckeigenspannungen für Aluminiumstrukturen und kleinmaßstäbliche Prüfkörper	1,54	1,30
geringe Eigenspannungen in spannungsarmen Strukturen	1,35	1,18
anderer Eigenspannungszustand	1,26	1,15

„Andere Eigenspannungszustände“ dürfen für Fertigungsprozesse von nach der Normenreihe EN 15085 geschweißten Schienenfahrzeugstrukturen angenommen werden.

ANMERKUNG Die Eigenspannungsfaktoren $f_{\text{res},\sigma}$ und $f_{\text{res},\tau}$ sind die Kehrwerte der Mittelspannungsfaktoren $f_{\text{m},\sigma}$ und $f_{\text{m},\tau}$ für das Spannungsverhältnis $R = 0,5$.

5.2.6 Bonusfaktor für Schweißnachbehandlung f_{post}

Schweißnahtnachbehandlung kann die Ermüdungsfestigkeit am Nahtübergang quer zur Schweißnaht erhöhen, im Allgemeinen aufgrund einer Verbesserung der Schweißnahtgeometrie, der Beseitigung der anfänglichen Fehler an der Schweißnaht oder durch Einbringen von Druckeigenspannungen an der Schweißnaht.

Der folgende Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung f_{post} darf je nach Verbesserungsverfahren angewendet werden:

- Nahtschleifen oder TIG-Abrichten $f_{\text{post}} = 1,3$;
- Stumpfnahht bündig geschliffen mit der Oberfläche des quer zur Schweißnaht geschliffenen Blechs $f_{\text{post}} = 1,3$;
- Hammer- oder Nadelhämmern $f_{\text{post}} = 1,3$ (nur für geschweißte Strukturen aus Stahl).

Ein Bonusfaktor für längs zur Schweißnaht beanspruchte Verbindungen und für andere Verbesserungsverfahren (z. B. kontrolliertes Kugelstrahlen, Ultraschall-Schlagbehandlung usw.) darf in Betracht gezogen werden, sofern ein Nachweis zur Rechtfertigung des Bonusfaktors vorliegt.

Für Schweißverbindungen, die einer Nachbesserung unterzogen werden, ist die Obergrenze für den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit multipliziert mit dem Verbesserungsfaktor

- $f_{\text{post}} \cdot \Delta\sigma_C = 140 \text{ N/mm}^2$ für Stahl und
- $f_{\text{post}} \cdot \Delta\sigma_C = 56 \text{ N/mm}^2$ für Aluminium.

Für Aluminiumstrukturen, die einer Schweißnahtnachbehandlung unterzogen werden, sind die Ermüdungsfestigkeitswerte durch die Festigkeit der Wärmeeinflusszone begrenzt (siehe z. B. EN 755-2:2016, EN 485-2:2016+A1:2018, EN 586-2:1994, EN 1706:2020).

Eine Kombination von Bonusfaktoren für verschiedene Schweißnahtnachbehandlungsverfahren ist nicht zulässig.

Prinzipiell ist es möglich, einen höheren Bonusfaktor für die Verbesserung nach dem Schweißen zu verwenden, vorausgesetzt, dass die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens durch geeignete Ermüdungsversuche nachgewiesen wird. Die Auswertung solcher Ermüdungsversuche ist in der Fachliteratur bzw. in internationalen Normen oder Richtlinien festgelegt (z. B. in [1] oder [48]).

Weitere Informationen, die die Vorteile von Verbesserungsmaßnahmen nach dem Schweißen in Bezug auf die Ermüdungsauslegung von Schweißverbindungen beschreiben, sind in [6], [1], [48] und [26] dargestellt.

Die Anwendung eines Bonusfaktors in Bezug auf eine Nachbesserung nach dem Schweißen muss mit den Fertigungszeichnungen und Bauteilspezifikationen übereinstimmen.

5.2.7 Qualitätsstufenfaktor f_{QL}

Die Bezugswerte in Anhang D sind für eine Qualitätsstufe C nach EN ISO 5817 bzw. EN ISO 10024 angegeben.

Für andere Qualitätsstufen ist der Qualitätsstufenfaktor f_{QL} in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9 — Qualitätsstufenfaktor f_{QL}

Schweißnahtgüteklasse nach EN 15085-3	Qualitätsstufe	f_{QL}
CP A, CP B	B	$\sqrt{1,12}$
CP C1, CP C2, CP C3	C	1,0
CP D	D	$1/1,2$

5.2.8 Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{QL}

Die Bezugswerte in Anhang D sind für die Schweißnahtprüfklassen CT 3 und CT 4 nach EN 15085-3 angegeben.

Für andere Schweißnahtprüfklassen ist der Bonusfaktor f_{CT} in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10 — Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{CT}

Schweißnahtprüfklasse EN 15085-3	f_{CT}	f_{CT}
		für Schweißstöße mit Schweißnahtgüteklasse CP A, CP B und CP C1, die während der Produktion geprüft werden können, aber in der Instandhaltung nicht geprüft und repariert werden können (nach EN 15085-3:2007, 4.6)
CT 1	1,12	$\sqrt{1,12}$
CT 2	$\sqrt{1,12}$	1,0
CT 3	1,0	k.A.
CT 4	1,0	k.A.

ANMERKUNG Qualitätsstufenfaktor f_{QL} und Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{CT} werden unabhängig voneinander angewendet.

5.2.9 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel

Jede Wöhlerlinie wird durch den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ (siehe Anhang D).

Der Exponent m vor dem Knickpunkt und die Lage des Knickpunktes N_D für die Wöhlerlinien sind für Normalspannungen quer und längs zur Schweißnaht und Schubspannungen von Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium in Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 11 — Exponent m Zyklenzahlen am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D für Schweißverbindungen

Werkstoff	Spannungsart		Exponent der Wöhlerlinie m	Knickpunkt N_D [10 ⁶]
Stahl	Normalspannung	Quer zur Schweißnaht	Anhang D.2	Anhang D.2 nach Gleichung (12)
		Längs zur Schweißnaht	4,0	2
	Schubspannung		5,0	100
Aluminium	Normalspannung	Quer zur Schweißnaht	Anhang D.2	10
		Längs zur Schweißnaht	6,0	10
	Schubspannung		5,0	100

Bei Normalspannung quer zur Schweißnaht von Schweißverbindungen aus Stahl ist die Lage des Knickpunktes abhängig von den Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ ($N_C = 2 \times 10^6$):

- bei $\Delta\sigma_C \geq 112$ MPa ist die Knickpunktposition $N_D = 2 \times 10^6$ Zyklen;
- bei $\Delta\sigma_C \leq 50$ MPa ist die Knickpunktposition $N_D = 10^7$ Zyklen;
- bei $112 \text{ MPa} > \Delta\sigma_C > 50 \text{ MPa}$ ist die Knickpunktposition gegeben durch:

$$N_D = 10^{(4,0895 - 1,9956 \log(\Delta\sigma_C))} \times N_C \quad (12)$$

Für Nahtwurzeln von nicht durchgeschweißten Nähten mit Normalspannungen senkrecht zum Stegabstand ist der Knickpunkt unabhängig von den Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit bei $N_D = 10^7$ Zyklen.

ANMERKUNG Die Spannung an der Knickpunktposition N_D wird auch als Dauerfestigkeit bezeichnet.

Der Spannungsbereich für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie ist

$$\Delta\sigma_D(R = -1) = \Delta\sigma_R \cdot \left(\frac{N_C}{N_D}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

Für Wöhlerlinien von Schweißverbindungen sind alle relevanten Informationen in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12 — Exponent jenseits des Wöhlerlinien-Knickpunktes, Cut-Off-Limit und Grenze der Miner-Summe

Schadens- akkumulationsregel	Exponent jenseits des Knickpunktes N_D	Cut-Off-Limit $\Delta\sigma_L$	Grenze der Miner- Summe $D_{m,min}$
Verfahren Miner elementar mit Cut-Off-Limit	-	50 % der Festigkeit bei N_D	1,0
Verfahren Miner modifiziert	$2 \times m - 1$	50 % der Festigkeit bei N_D	0,5
Verfahren Miner konsequent	-	-	0,5

In Bild 2 sind die prinzipiellen Darstellungen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen für Normalspannung angegeben. Für Wöhlerlinien von Schubspannungen wird das Symbol σ durch das Symbol τ ersetzt.

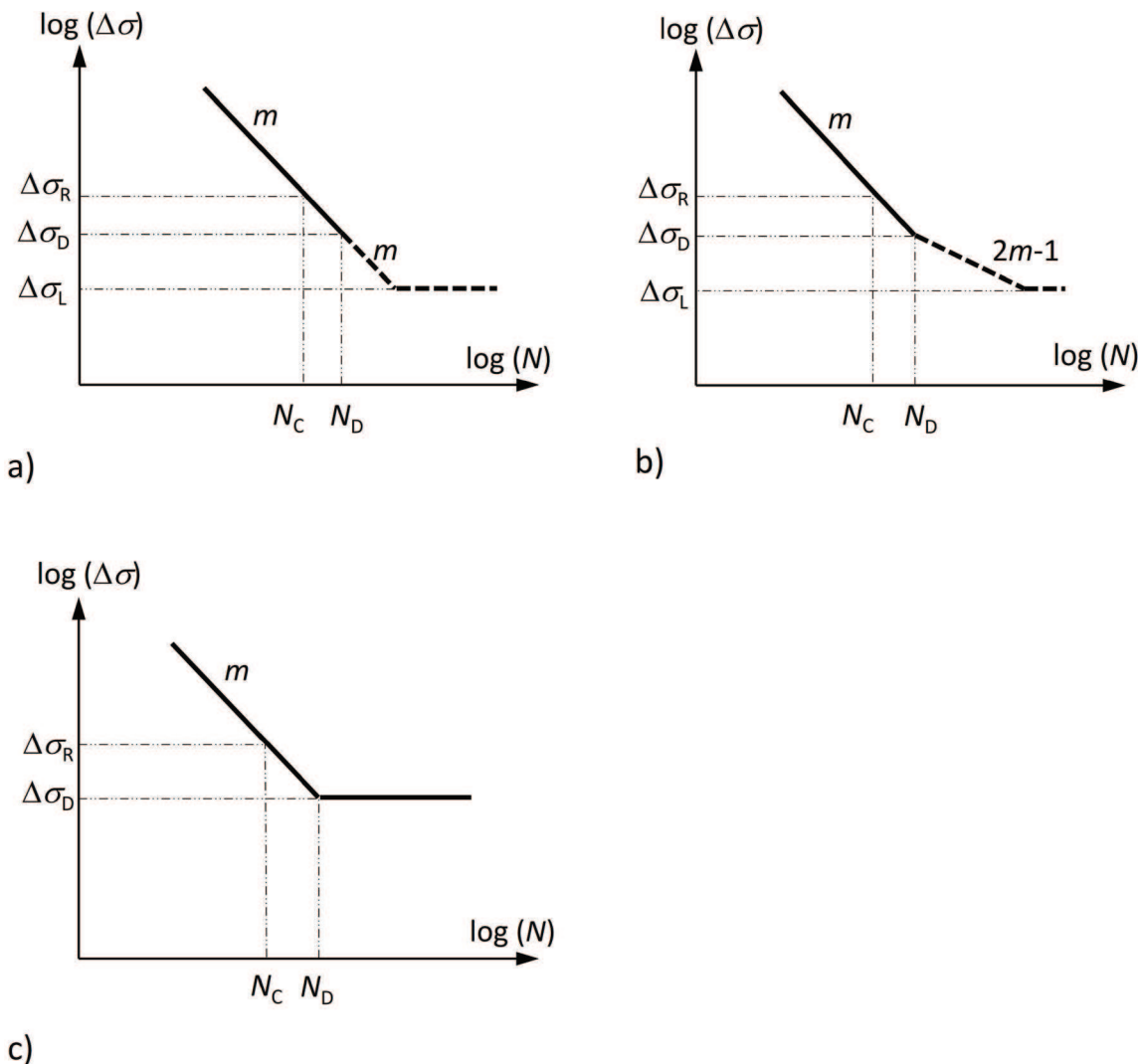


Bild 2 — Wöhlerlinien für Schweißverbindungen für Normalspannungen: a) Verfahren Miner elementar mit Cut-Off-Limit; b) Verfahren Miner modifiziert; c) Verfahren Miner konsequent

5.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Grundwerkstoff und Schweißverbindungen durch Laborversuche

Andere Ermüdungsfestigkeitsstufen (Wöhlerlinie) dürfen für Schweißverbindungen und Grundwerkstoff verwendet werden, sofern das Ermüdungsverhalten durch entsprechende Ermüdungsversuche nachgewiesen wird. Die Auswertung solcher Ermüdungsversuche ist in der Fachliteratur bzw. in internationalen Normen oder Richtlinien festgelegt (z. B. in [1] oder [48]).

6 Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten

6.1 Allgemeines

Für die Herleitung des Spannungskollektivs und in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit werden Teilbeiwerte verwendet.

Die Anwendung dieser Teilbeiwerte in Bezug auf den in dieser Norm angegebenen Betriebsfestigkeitsnachweis ersetzt die in EN 15085-3 angegebenen Definitionen zu Sicherheitskategorie und Spannungsfaktor.

6.2 Teilbeiwert für Lasten γ_L

Die Bemessungslast enthält alle notwendigen Toleranzen, um Unsicherheiten in ihrem Wert zu berücksichtigen. Sie ist die repräsentative Last multipliziert mit dem Teilbeiwert γ_L .

Das repräsentative Spannungskollektiv darf aus normativen Belastungen, Simulationen oder Prüfungen hergeleitet werden, die normale Betriebs- und Wartungsbedingungen darstellen.

Für Spannungen, die aus normativen Lasten nach EN 12663 für Wagenkastenstrukturen, EN 13749 und EN 15827 für Drehgestellstrukturen abgeleitet werden, ist die repräsentative Last gleich der Bemessungslast. In diesem Fall gilt ein Teilbeiwert von $\gamma_L = 1,0$.

Wird das Spannungskollektiv aus Simulationen hergeleitet, ist ein geeigneter Teilbeiwert γ_L in Abhängigkeit von den Simulationsparametern und den Unsicherheiten der Simulation zu berücksichtigen.

Wird das Spannungskollektiv aus Streckenprüfungen hergeleitet, ist ein geeigneter Teilbeiwert γ_L in Abhängigkeit von den Simulationsparametern und den Unsicherheiten der Simulation zu berücksichtigen. Werden die Prüfungen

- auf repräsentativer Strecke gemacht,
- unter normalen Betriebsbedingungen durchgeführt,
- mit einer repräsentativen Nutzlast gemacht und
- mit ausreichender Länge durchgeführt,

ist ein Teilbeiwert $\gamma_L = 1,1$ ausreichend, um alle verbleibenden Unsicherheiten des Prüf- und Fahrzeugstandes zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Repräsentatives Gleis wird für eine übliche Gleisqualität angegeben. Prüfungen auf neuen Gleisen decken nicht alle Unsicherheiten ab.

ANMERKUNG 2 Betriebsbedingungen sind gegeben, wenn Geschwindigkeitsprofil, Anzahl der Halte, aufgepumpte Federung usw. dem vorgesehenen Einsatz entsprechen.

ANMERKUNG 3 Wenn der Nutzlastzustand während des On-Track-Tests die normale Auslegungsnutzlast (MND) ist, wie in EN 15663 definiert und in EN 12663 und EN 13749 verwiesen, wird dies als konservativer Ansatz für die Nutzlast betrachtet. Dies deckt auch Einflüsse von Nutzlaständerungen insbesondere bei Pendlerdienstleistern ab. Wenn nachgewiesene Nutzlastspektren vorliegen, werden Kombinationen von Prüfungen mit unterschiedlichen Nutzlaststufen als repräsentativ angesehen, wenn zusätzlich Einflüsse von Nutzlaständerungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 4 Ausreichende Länge der Prüfungen ist gegeben, wenn:

- die Gesamtlänge der Prüfungen mindestens 1/10 000 der Lebensdauerkilometerleistung beträgt, oder
- das gesamte Netz des betreffenden Dienstleisters dreimal gemessen wird (was bei geschlossenen Netzen angemessen wäre).

6.3 Teilbeiwert für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit γ_M

6.3.1 Allgemeines

Der Teilbeiwert γ_M für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit ist gegeben durch

$$\gamma_M = \gamma_{M,S} \cdot \gamma_{M,I} \cdot \gamma_{M,V} \quad (14)$$

Diese Teilbeiwerte werden in den folgenden Absätzen erläutert

Der Teilbeiwert γ_M für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit ist auf einen Mindestwert von 1,0 begrenzt. Ein Wert kleiner als 1,0 ist ohne zusätzliche technische Begründung nicht zulässig.

Tabelle 13 zeigt die aus Gleichung (14) hergeleiteten Werte für den Teilbeiwert γ_M , gerundet auf das nächste Hundertstel.

Tabelle 13 — Teilbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit γ_M

	Teilbeiwert $\gamma_{M,V}$ für Validierungs- grad	Teilbeiwert γ_M		
		Sicherheits- kategorie „hoch“ $\gamma_{M,S} = 1,2$	Sicherheitskategorie „mittel“ $\gamma_{M,S} = 1,1$	Sicherheitskategorie „niedrig“ $\gamma_{M,S} = 1,0$
Regel-mäßige Prüfung $\gamma_{M,I} = 0,9$	1,3	1,40	1,29	1,17
	1,2	1,30	1,19	1,08
	1,1	1,19	1,09	1,00
	1,0	1,08	1,00	1,00
Keine regel- mäßige Prüfung $\gamma_{M,I} = 1,0$	1,3	1,56	1,43	1,30
	1,2	1,44	1,32	1,20
	1,1	1,32	1,21	1,10
	1,0	1,20	1,10	1,00

6.3.2 Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$

Der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ berücksichtigt die Schadensfolge im Allgemeinen in Anlehnung an die Definition der Sicherheitskategorien in EN 15085-3:2007 (4.5 und Anhang G) mit Anpassungen.

a) Sicherheitskategorie „niedrig“

Ein Versagen des strukturellen Details führt nicht zu einer direkten Beeinträchtigung der Gesamtfunktion. Folgeereignisse mit Personenschäden sind unwahrscheinlich.

b) Sicherheitskategorie „mittel“

Ein Versagen des strukturellen Details führt zu einer Beeinträchtigung der Gesamtfunktion oder kann zu Folgeereignissen mit Personenschäden führen, aber:

- 1) eine Warnung wird vor dem Ausfall der Struktur gegeben oder
 - 2) die Konstruktion des Bauteils einen alternativen Lastpfad vorsieht (nicht statisch bestimmtes System oder redundante Bauteile) oder
 - 3) die Konstruktion der Bauteile eine Funktion zum Aufhalten eines sich ausbreitenden Risses enthält.
- c) Sicherheitskategorie „hoch“

Ein Versagen des strukturellen Details führt zu Folgeereignissen mit Personenschäden und Ausfall der Gesamtfunktion und keines der Kriterien für die Sicherheitskategorie „mittel“ trifft zu (siehe Liste).

ANMERKUNG Abweichend von der Definition der EN 15085-3 ist der Einfluss, der mit der Möglichkeit zusammenhängt, einen Riss bei der regelmäßigen Prüfung zu erkennen, von der Einstufung der Sicherheit ausgeschlossen, jedoch ist in dieser Norm ein separater Teilbeiwert $\gamma_{M,I}$ enthalten, der diesen Effekt berücksichtigt.

In Abhängigkeit vom Sicherheitsbedürfnis sind der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ und die Mindestschweißnahtgüteklasse nach EN 15085-3 in Tabelle 14 angegeben. Der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ ist sowohl für den Grundwerkstoff als auch für Schweißverbindungen anwendbar.

Tabelle 14 — Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$

Sicherheitsbedürfnis	Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$	Mindestschweißnahtgüteklasse
Niedrig	1,0	CP D
Mittel	1,1	CP C3
Hoch	1,2	CP C1

6.3.3 Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung $\gamma_{M,I}$

Wartungsverfahren für Bahnprodukte stellen normalerweise sicher, dass Ermüdungsrisse erkannt werden, bevor sie zu einem katastrophalen strukturellen Versagen führen. Daher kann für den Festigkeitsnachweis, außer unter bestimmten Umständen, von einer regelmäßigen Prüfung ausgegangen werden.

Tabelle 15 zeigt den anwendbaren Teilbeiwert $\gamma_{M,I}$ in Abhängigkeit von der Anwendbarkeit der „regelmäßigen Prüfung“. Der Teilbeiwert $\gamma_{M,I}$ ist sowohl für Schweißverbindungen als auch für den Grundwerkstoff anwendbar.

Es wird keine regelmäßige Prüfung für ein strukturelles Detail angenommen, wenn der tragende Teil bei der Prüfung nicht zugänglich ist.

Ist jedoch eine Schweißnaht oder ein strukturelles Detail von einer Seite aus zugänglich, kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung der zugänglichen Fläche ausreicht, um lokale Defekte zu erkennen, bevor strukturelles Versagen des Bauteils auftritt.

Für Strukturen im Anwendungsbereich dieser Norm ist folgender Prüfungsfaktor anwendbar, wenn das Prüfintervall nicht höher als ein Drittel der Auslegungslbensdauer ist und das strukturelle Detail in der Instandhaltung repariert werden kann. Die Anwendung des Teilbeiwerts $\gamma_{M,I} = 0,9$ ist nur für die spezifischen Bereiche zulässig, die im Wartungsprogramm zur Prüfung vorgesehen sind.

Tabelle 15 — Teilbeiwert für die Prüfung bei der Wartung $\gamma_{M,I}$

	Teilbeiwert für die Prüfung $\gamma_{M,I}$
Regelmäßige Prüfung	0,9
Keine regelmäßige Prüfung	1,0

6.3.4 Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$

Wenn der strukturelle Prüfplan aus der vollständigen Validierung besteht, wie er in der entsprechenden Norm z. B. in EN 15827, EN 13749 und EN 12663-1 definiert ist, ist der Teilbeiwert $\gamma_{M,I} = 1,0$.

Sieht der Prüfplan ein reduziertes Verfahren vor, ist der Teilbeiwert $\gamma_{M,V}$ nach folgender Gleichung mit den Werten in Tabelle 16 zu ermitteln:

$$\gamma_{M,V} = \gamma_{M,V,ST} \cdot \gamma_{M,V,FT} \quad (15)$$

Der Wert von $\gamma_{M,V}$ wird auf die nächste Zehntelstelle gerundet.

Tabelle 16 — Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$

	Teilbeiwert für eine vollständige Validierung nach der entsprechenden Norm	Teilbeiwert bei reduzierte Validierung
$\gamma_{M,V,ST}^a$	1,0	1,1
$\gamma_{M,V,FT}^b$	1,0	1,2
^a $\gamma_{M,V,ST} = 1,0$ darf angewendet werden, wenn die Spannungsermittlung (z. B. die FEA) durch einen statischen Labortest nachgewiesen wird sowie zur Beurteilung von gemessenen Spannungsdaten. ^b $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ darf angewendet werden, wenn der berechnete Ermüdungsfestigkeitsnachweis durch einen Labor-Ermüdungsversuch nachgewiesen wird oder wenn ein Ermüdungsversuch für das zu bewertende Merkmal nicht zwingend erforderlich ist.		

Für Konstruktionsmerkmale an Wagenkästen, bei denen die in EN 12663-1 und EN 12663-2 angegebenen Bemessungslastfälle für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis ausreichend sind, ist üblicherweise die Fußnote b anwendbar und es darf $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ angewendet werden.

Wenn für Bauteile, die an Drehgestellrahmen und Wagenkästen befestigt sind, in den entsprechenden Normen keine Laborprüfungen vorgeschrieben sind, darf für den Nachweis dieser Bauteile $\gamma_{M,V,ST} = 1,0$ und $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ angewendet werden.

Handelt es sich bei der Konstruktion um eine Weiterentwicklung eines früheren Produkts, können alle früheren Prüfdaten, die noch gültig sind, zur Validierung des überarbeiteten Produkts und der entsprechende Teilbeiwert ist $\gamma_{M,V} = 1,0$.

7 Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage von Schadensakkumulationsberechnung

7.1 Allgemeines

Abschnitt 7 beschreibt das Verfahren zur Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage der Schadensakkumulationsberechnung. Für eine vollständige Strukturbewertung muss zusätzlich zum Betriebsfestigkeitsnachweis eine statische Bewertung durchgeführt werden.

Im folgenden Nachweisverfahren werden die Gleichungen für den Normalspannungsanteil definiert. Bei Schubspannungen sind diese Gleichungen durch Ersetzen von σ durch τ anzuwenden.

Das Nachweisverfahren für den Grundwerkstoff und die Schweißverbindungen besteht aus den folgenden Schritten:

- a) Ermittlung von transienten Spannungsdaten (durch Berechnung oder Messung);
- b) Vorverarbeitung der Daten für jede einzelne Spannungskomponente:
 - 1) Konditionierung (z. B. Fehlerkorrektur (Spikes), Offset-Korrektur usw.);
 - 2) Rainflowklassierung (Ergebnis: Matrix-Spannungsbereich über Mittelspannung mit Zyklenzählung);
 - 3) Mittelspannungskorrektur nach Anhang A (Ergebnis: Spannungskollektiv der Spannungsbereiche mit konstantem Spannungsverhältnis $R = -1$, absteigend sortiert, also $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{i+1}$);
 - 4) Anwendung der Omissionsgrenze;
 - 5) Extrapolation auf die Auslegungslebensdauer (Ergebnis: für die gesamte Auslegungslebensdauer relevantes Spannungskollektiv).
- c) Schadensberechnung für jede Spannungskomponente:
 - 1) Bestimmung des Formfaktors des Spannungskollektivs A_{eq} ;
 - 2) Bestimmung der zulässigen Miner-Summe D_m ;
 - 3) Bestimmung der Auslastung für einzelne Spannungskomponenten U_c durch iteratives Verfahren.
- d) Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für den mehrachsigen Spannungszustand (kombinierte Auslastung für den mehrachsigen Spannungszustand U_F).

Anhang J enthält ein Beispiel für einen Betriebsfestigkeitsnachweis auf Grundlage einer Schadensakkumulation.

7.2 Spannungsermittlung

Die Spannungsermittlung muss nach Abschnitt 4 und prEN 17149-1:202X, Abschnitt 5, durchgeführt werden.

7.3 Bestimmung des Spannungskollektivs

7.3.1 Konditionierung

Insbesondere bei gemessenen Spannungsdaten müssen die Rohdaten auf Plausibilität und mögliche Messfehler überprüft werden. Spannungsspitzen und Abweichungen von der Mittelspannung müssen korrigiert werden.

Bei Spannungsdaten, die durch Berechnungsdaten ermittelt wurden, ist eine Konditionierung üblicherweise nicht erforderlich. Allerdings sollten unrealistische Spannungsspitzen von der Bewertung ausgeschlossen werden.

BEISPIEL Spannungsspitzen durch numerische Singularitäten an Maschenübergängen, Kontaktdefinitionen, konzentrierte Lasteinleitung usw.

7.3.2 Anpassung der Spannungshistorie

Die zum Nachweis herangezogene Spannungshistorie kann normalerweise direkt aus der Dehnungsmessstreifen-Messung oder der Berechnung am Auswertungspunkt entnommen werden. In einigen Fällen, wie unten beschrieben, ist eine Anpassung der für den Auswertungspunkt ermittelten Spannungen notwendig:

- wenn der Auswertungspunkt für die Bewertung des Grundwerkstoffs nicht alle Spannungskonzentrationseffekte zur Ermittlung der anwendbaren modifizierten Nennspannung berücksichtigt;
- wenn die Spannungen im Auswertungspunkt an Schweißverbindungen angepasst werden müssen, um anwendbare Spannungen für die Beurteilung von potenziellen Rissinitiierungspunkten abzuleiten, einschließlich der Auswirkungen von Blech- und Kehlnahtdicken, Widerstandsmoment, Exzentrizität oder Biegestützung der Verbindung;
- wenn ein Bonusfaktor für Biegung für Spannungskomponenten quer zur Schweißnaht angewendet wird.

Jede Spannungskomponente muss mit geeigneten Faktoren oder Techniken angepasst werden.

Anhang E und Anhang F geben Auskunft über solche Anpassungen für Schweißverbindungen.

7.3.3 Zählung

Der transiente Spannungsverlauf jeder Spannungskomponente muss nach der Rainflowklassierung gezählt werden, wie sie in internationalen Normen oder in der Fachliteratur festgelegt ist.

BEISPIEL 1 ISO 12110-2 [51] oder ASTM E1049 [50] legen Methoden für die Rainflowklassierung fest.

Der bei der Rainflowklassierung anfallende Rückstand muss mit einem geeigneten Verfahren behandelt werden.

BEISPIEL 2 Rückstand wird vermieden, indem der Beginn und das Ende der Zählung auf das globale Maximum oder Minimum der Reihe gelegt werden, die Behandlung der offenen Zyklusfolge nach ISO 12110-2 [51] oder die Zählung mit halber Frequenz nach ASTM E1049 [50] sind dazu geeignete Methoden.

Das Ergebnis dieses Vorgangs ist ein Kollektiv von Spannungsbereichen $\Delta\sigma_{k,RF}$ bezogen auf einzelne Mittelspannungen $\sigma_{m,k,RF}$ und die Zyklenzahl n_k .

7.3.4 Mittelspannungsanpassung

Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ berücksichtigen den Einfluss der Mittelspannung auf den Normal- und Schubspannungsbereich und umfassen bei geschweißten Strukturen auch den Einfluss von Eigenspannungen infolge der Fertigungsprozesse von Schienenfahrzeugstrukturen (siehe 5.2.5).

Bei diesem Verfahren werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ als Multiplikationsfaktoren definiert, die auf Spannungsbereiche bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ angewendet werden, folglich müssen für Spannungsbereiche bei einem Spannungsverhältnis $R = -1$ die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ den Wert 1,0 haben.

Die Mittelspannungsfaktoren können für jeden Lastzyklus eines Lastkollektivs in Abhängigkeit von der aktuellen Mittelspannung und dem Spannungsbereich variieren. Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$, die sich auf das Spannungsverhältnis von $R = -1$ beziehen, werden bei der Ermittlung der Bauteilermüdungsfestigkeit nicht berücksichtigt. Stattdessen werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ bei der Ermittlung des Spannungskollektivs im Rahmen des Betriebsfestigkeitsnachweises berücksichtigt (siehe 7.2). Daher wird das Ergebnis der Rainflowklassierung (Spannungsbereichszyklen mit variierenden Mittelspannungen) mit Hilfe der Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ in ein Spannungskollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis von $R = -1$ transformiert.

Die angepassten Spannungsbereiche werden nach der folgenden Gleichung ermittelt:

$$\Delta\sigma_k = \frac{\Delta\sigma_{k,RF}}{f_{m,\sigma,k}} \quad (16)$$

Der Index k gibt an, dass die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ für jedes Element der Rainflow-Matrix berechnet werden müssen.

Der informative Anhang A definiert eine Möglichkeit zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ nach der Fachliteratur.

Andere validierte Methoden (z. B. in der Fachliteratur oder in nationalen Normen [1], [2], [42] oder [43]) zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses dürfen ebenfalls angewendet werden.

Werden die Spannungsbereiche entsprechend ihrer Spannungsbereichswerte nach der Mittelspannungsanpassung umgeordnet, wird der Index i zum Index j ($\Delta\sigma_k \rightarrow \Delta\sigma_j$).

7.3.5 Auslassung

Nach Zählung und Mittelwertkorrektur des Spannungskollektivs werden alle Zyklen mit einem Spannungsbereich $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_{OM}$ ausgelassen. Der Auslassungsgrad $\Delta\sigma_{OM}$ ist durch die folgende Gleichung definiert:

$$\Delta\sigma_{OM} = 0,1 \times \Delta\sigma_D \quad (17)$$

ANMERKUNG Diese Zyklen mit kleinen Spannungsbereichen tragen nicht wesentlich zur Schädigung bei.

Die Datenvorverarbeitung ergibt ein Spannungskollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis, das in einer Darstellung in Bild 3 visualisiert werden kann.

Alle Spannungen unterhalb der Omissionsgrenze brauchen für weitere Berechnungen und Iterationen nicht berücksichtigt werden. Für Spannungskollektive, bei denen der maximale Spannungsbereich unterhalb der

Omissionsgrenze liegt, kann das folgende Verfahren nicht angewendet werden. In diesem Fall ist eine Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente $U_c = 0$ zu verwenden.

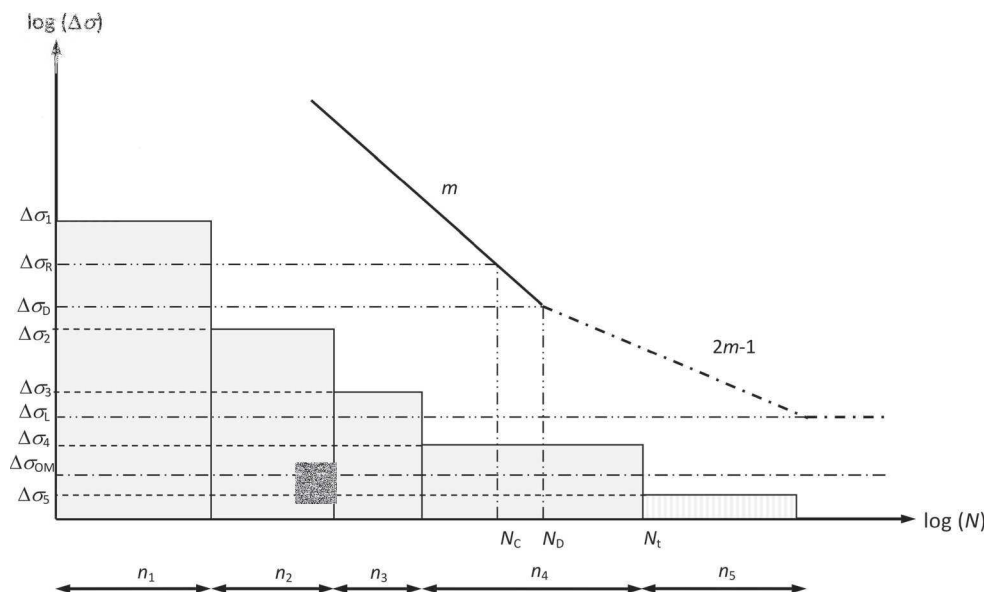


Bild 3 — Beispiel eines Spannungskollektivs zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit und Wohlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert

7.4 Schädigungsberechnung für jede einzelne Spannungskomponente

7.4.1 Allgemeines

Für den Betriebfestigkeitsnachweis muss eine der folgenden drei kumulativen Schädigungsregeln (Schadensakkumulationshypothesen oder Miner-Regeln) unter Verwendung der in 5.1.7 und 5.2.9 definierten Parameter angewendet werden:

- Verfahren Miner elementar mit Cut-Off-Limit;
- Verfahren Miner modifiziert;
- Verfahren Miner konsequent.

Die Verwendung von detaillierteren Informationen oder anderen validierten Methoden ist unter Voraussetzung einer validen Begründung zulässig.

Die Gleichungen in 7.4 definieren die Schadensberechnung für das Miner-Verfahren modifiziert. Diese Version der Miner-Regel ist eine vereinfachte Annäherung an das Miner Verfahren konsequent.

Für die Anwendung des Verfahrens Miner elementar mit Cut-Off-Limit oder des Verfahrens Miner konsequent werden in der Fachliteratur die Gleichungen der Schadensberechnung angegeben.

BEISPIEL 1 In [2] wird ein Verfahren zur Anwendung des Verfahrens Miner konsequent angegeben.

Das in 7.4.2 und 7.4.3 definierte Verfahren kann durch den konservativen Ansatz vereinfacht werden, die zulässige Miner-Summe D_m auf $D_{m,min}$ zu setzen, ohne den Formfaktor A_{eq} des Spannungskollektivs zu berechnen.

7.4.2 Bestimmung des Formfaktors des Spannungskollektivs A_{eq}

Der Spannungskollektiv-Formfaktor A_{eq} berücksichtigt, dass das Spannungskollektiv kein Spannungskollektiv mit konstanter Amplitude ist. Er wird für die Ermittlung der zulässigen Miner-Summe verwendet.

Der Formfaktor des Spannungskollektivs ist eine Funktion der Spannungsbereiche und der Zyklenzahl jedes Spannungsschwingbreitenklasse in Bezug auf den maximalen Spannungsbereich $\Delta\sigma_1$ und die Gesamtzyklenzahl im gegebenen Spannungskollektiv. Er ist daher unabhängig von den Absolutwerten des Spannungskollektivs.

ANMERKUNG Nach 7.3.5 werden Lastzyklen mit einem Spannungsniveau unterhalb der Omissionsgrenze $\Delta\sigma_{OM}$ hier nicht berücksichtigt. Nach 7.3.4 werden die Spannungsbereiche $\Delta\sigma_i$ zu einem Verhältnis von $R = -1$ umgerechnet.

$$A_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^m \cdot \frac{n_i}{N_t}} \quad (18)$$

7.4.3 Bestimmung der zulässigen Miner-Summe D_m

Die hier definierte zulässige Miner-Summe D_m mit der Obergrenze 1 und der Untergrenze $D_{m,min}$ ist nur in Verbindung mit der anschließenden Ermittlung der akkumulierten Miner-Summe D_{it} nach 7.4.4 anwendbar.

Die zulässige Miner-Summe D_m ist nach den folgenden Gleichungen definiert:

$$D_m = \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} \text{ für } D_{m,min} \leq \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} \leq 1 \quad (19)$$

$$D_m = D_{m,min} \text{ für } \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} < D_{m,min} \quad (20)$$

$$D_m = 1 \text{ für } \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} > 1 \quad (21)$$

7.4.4 Bestimmung der akkumulierten Miner-Summe D_{it} und des Skalierungsfaktors x_{it} zum Erreichen der zulässigen Miner-Summe

Die akkumulierte Miner-Summe D_{it} für ein Spannungskollektiv wird nach Gleichung (22) ermittelt.

Um den Spielraum des Spannungskollektivs zum Erreichen der zulässigen Miner-Summe zu bewerten, ist das folgende iterative Verfahren anzuwenden:

- Die Spannungsbereiche $\Delta\sigma_i$ des Spannungskollektivs werden mit dem Skalierungsfaktor x_{it} skaliert (siehe Bild 2).
- Die akkumulierte Miner-Summe D_{it} wird mit den skalierten Spannungsbereichen $x_{it} \cdot \Delta\sigma_i$ ermittelt.

- Durch Variation des Skalierungsfaktors x_{it} muss die akkumulierte Miner-Summe D_{it} gegen die zulässige Miner-Summe D_m konvergieren. Die Differenz von $(D_{it} - D_m)$ muss also unter der Bedingung $D_{it} \leq D_m$ gegen Null konvergieren.

Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Methode existiert in manchen Fällen keine exakte Lösung, da D_{it} (x_{it}) eine unstetige Funktion ist. In solchen Fällen muss x_{Dm} berechnet werden, indem der minimale Wert von x_{it} für $D_{it} - D_m \leq 0$ gefunden wird.

$$D_{it} = \sum_{i=1}^{\delta-1} \left(\frac{x_{it} \cdot \Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^m \cdot \frac{n_i}{N_D} + \sum_{i=\delta}^{j_{it}} \left(\frac{x_{it} \cdot \Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^{2m-1} \cdot \frac{n_i}{N_D} \quad (22)$$

ANMERKUNG Mit einem Skalierungsfaktor $x_{it} = 1$ ergibt Gleichung (22) die akkumulierte Miner-Summe des gegebenen Kollektivs.

Die Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente U_c entspricht dem Kehrwert des konvergierten Skalierungsfaktors (x_{it} nähert sich x_{Dm}) für die untersuchte Spannungskomponente unter Berücksichtigung der Teilbeiwerte γ_M und γ_L :

$$U_c = \gamma_M \cdot \gamma_L \cdot \frac{1}{x_{Dm}} \quad (23)$$

Die Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente U_c ist für jede Spannungskomponente zu ermitteln.

BEISPIEL 1 Für den Grundwerkstoff ergibt dieses Verfahren Gleichung (24) bis Gleichung (26).

$$U_{c,\sigma_x} = \gamma_M \cdot \gamma_L \cdot \frac{1}{x_{Dm,\sigma_x}} \quad (24)$$

$$U_{c,\sigma_y} = \gamma_M \cdot \gamma_L \cdot \frac{1}{x_{Dm,\sigma_y}} \quad (25)$$

$$U_{c,\tau_{xy}} = \gamma_M \cdot \gamma_L \cdot \frac{1}{x_{Dm,\tau_{xy}}} \quad (26)$$

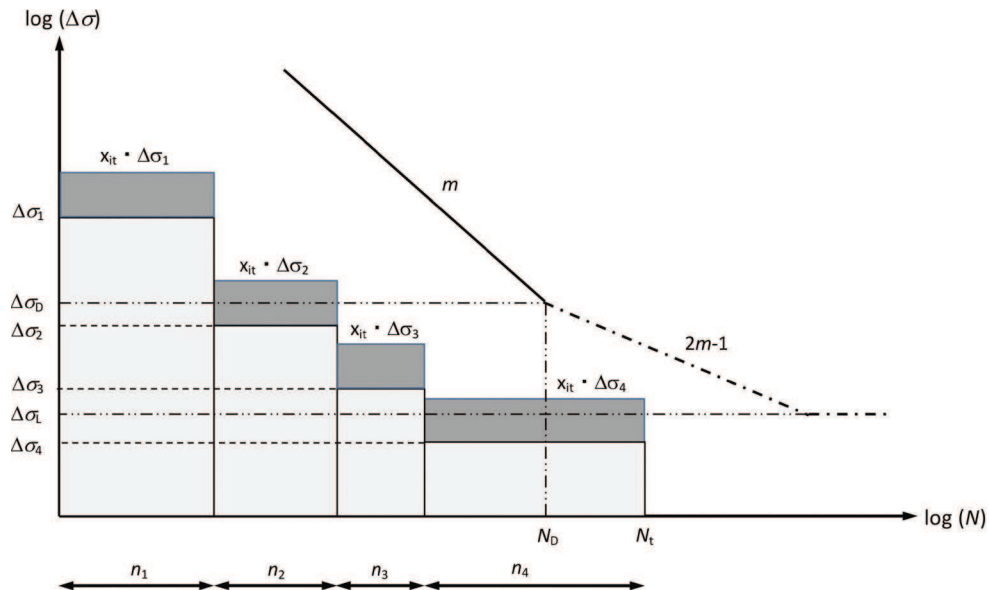


Bild 4 — Beispiel für den ursprünglichen und skalierten Zustand des Spannungskollektivs für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit und der Wöhlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert

Dieses iterative Verfahren ist auf alle Spannungskomponenten anzuwenden, um die jeweiligen Skalierungsfaktoren x_{Dm} für jede Spannungskomponente zu ermitteln.

ANMERKUNG 2 Die schädigungsgleichen Spannungsbereiche für die Zyklenzahlen N_D und N_C werden nach Gleichung (27) und Gleichung (28) ermittelt.

$$\Delta\sigma_{eq,N_D} = \frac{\Delta\sigma_D}{x_{Dm}}; \quad \Delta\tau_{eq,N_D} = \frac{\Delta\tau_D}{x_{Dm}} \quad (27)$$

$$\Delta\sigma_{eq,N_C} = \frac{\Delta\sigma_D}{x_{Dm}} \cdot \left(\frac{N_D}{N_C}\right)^{\frac{1}{m}}; \quad \Delta\tau_{eq,N_C} = \frac{\Delta\tau_D}{x_{Dm}} \cdot \left(\frac{N_D}{N_C}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (28)$$

7.5 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Für alle Varianten der Miner-Regel ist die Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionsdetails durch die kombinierte Auslastung für den mehrachsigen Spannungszustand U_f zu bewerten. Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ist gegeben, wenn $U_f \leq 1$ unter Berücksichtigung der Teilbeiwerte γ_M und γ_L nach Abschnitt 6.

Für den Grundwerkstoff gibt Gleichung (29) das allgemeine Verfahren zur Berechnung des Auslastungsgrades an.

$$U_f = \sqrt{(U_{c,\sigma_x})^2 + (U_{c,\sigma_y})^2 + (U_{c,\sigma_x}) \cdot (U_{c,\sigma_y}) + (U_{c,\tau_{xy}})^2} \quad (29)$$

Gleichung (30) darf für den Grundwerkstoff angewendet werden, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

- proportionaler Spannungszustand mit Normalspannungskomponenten gleichen Vorzeichens; oder
- wenn das gesamte Nachweisverfahren einem Schnittebenenverfahren unterzogen wird.

$$U_f = \sqrt{(U_{c,\sigma_x})^2 + (U_{c,\sigma_y})^2 - (U_{c,\sigma_x}) \cdot (U_{c,\sigma_y}) + (U_{c,\tau_{xy}})^2} \quad (30)$$

ANMERKUNG In Anhang K sind weitere Informationen zum Verfahren der Schnittebene in Bild K.1 zu finden.

Für Schweißverbindungen gibt Gleichung (31) das Verfahren zur Berechnung des Auslastungsgrades an.

$$U_f = \sqrt{(\max(U_{c,\sigma_{\perp}}; U_{c,\sigma_{\parallel}}))^2 + (U_{c,\tau})^2} \quad (31)$$

Anhang A (informativ)

Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang definiert die Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ mit Hilfe eines Haigh-Diagramms.

Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ werden verwendet zur:

- Betrachtung des tatsächlichen Spannungsverhältnisses einzelner Spannungsbereiche im gegebenen zu beurteilenden Spannungskollektiv. Die Mittelspannungsfaktoren werden verwendet, um ein Kollektiv von Spannungsbereichen mit unterschiedlicher Mittelspannung in ein Kollektiv von Spannungsbereichen mit konstantem Spannungsverhältnis von $R = -1$ umzurechnen (siehe 7.3.4, Mittelspannungsanpassung).
- Betrachtung des Eigenspannungszustandes von geschweißten Konstruktionen. Aus den Mittelspannungsfaktoren werden die Eigenspannungsfaktoren $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ nach 5.2.5 ermittelt.

Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ sind Funktionen von:

- die Mittelspannungsempfindlichkeiten M_σ und M_τ . Für den Grundwerkstoff ist die Mittelspannungsempfindlichkeit vom Werkstoff abhängig (siehe A.2.1). Bei Schweißverbindungen ist die Mittelspannungsempfindlichkeit abhängig vom Eigenspannungszustand (siehe A.2.2).
- das Spannungsverhältnis des gegebenen Spannungsbereichs, ausgedrückt durch die Mittelspannung σ_m und die Spannungsamplitude σ_a .

Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ sind auf die Spannungsverhältnisse $R_\sigma = -1$ und $R_\tau = -1$ bezogen. Daher sind die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma} = 1,0$ für das Spannungsverhältnis $R_\sigma = -1$ und $f_{m,\tau} = 1,0$ für $R_\tau = -1$.

Die Mittelspannungsfaktoren werden unter der Annahme konstanter Spannungsverhältnisse ermittelt.

ANMERKUNG Gleichung (A.5) bis Gleichung (A.11) bestimmen den Schnittpunkt der in Bild A.1 und Bild A.2 dargestellten Definitionslinie (dargestellt durch vier Geraden, eine für jedes Feld des Diagramms) und einer Geraden, die das Spannungsverhältnis darstellt, das durch den Ursprung des Diagramms und die Mittelspannung σ_m und die Spannungsamplitude σ_a definiert ist.

A.2 Mittelspannungsempfindlichkeit

A.2.1 Grundwerkstoff

Für den Grundwerkstoff ist die Mittelspannungsempfindlichkeit für die Direktspannung M_σ und für die Schubspannung M_τ , abhängig von der Zugfestigkeit R_m des Grundwerkstoffs und den Werkstoffparametern

a_m und b_m . Sie werden nach Gleichung (A.1) und Gleichung (A.2) berechnet. Für diese Gleichungen sind die Werkstoffparameter a_m und b_m in Tabelle A.1 angegeben.

$$M_\sigma = \frac{a_m}{1\,000} R_m + b_m \quad (\text{A.1})$$

$$M_\tau = M_\sigma \cdot f_{R,\tau} \quad (\text{A.2})$$

Tabelle A.1 — Mittelspannungsempfindlichkeitsparameter a_m und b_m

Werkstoff	a_m [MPa ⁻¹]	b_m [-]
Stahl (gewalzt oder geschmiedet, einschließlich Edelstahl)	0,35	-0,1
Stahlguss (GS)	0,35	0,05
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS, ADI)	0	0,4
Aluminium (alle Typen, außer Gussaluminium)	1,0	-0,04
Aluminiumguss	1,0	0,2

A.2.2 Schweißverbindungen

Bei Schweißverbindungen ist die Mittelspannungsempfindlichkeit abhängig vom Eigenspannungszustand. Tabelle A.2 definiert die Werte für M_σ und M_τ .

Tabelle A.2 — Mittelspannungsempfindlichkeit für Schweißnähte

Eigenspannungszustand	M_σ	M_τ
niedrige Zug- und Druckeigenspannungen für Aluminiumstrukturen und kleinmaßstäbliche Prüfkörper	0,3	0,17
geringe Eigenspannungen in spannungsarmen Strukturen	0,2	0,12
anderer Eigenspannungszustand	0,15	0,09

A.3 Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren

Das Spannungsverhältnis eines gegebenen Lastzyklus wird durch die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (\text{A.3})$$

$$R_\tau = \frac{\tau_m - \tau_a}{\tau_m + \tau_a} \quad (\text{A.4})$$

Für Normalspannungen werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ in Abhängigkeit von der Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ nach folgenden Gleichungen bestimmt (siehe auch Bild A.1).

Feld I: Schwankende Druckspannung

$$\sigma_m < -\sigma_a : f_{m,\sigma} = \frac{1}{1 - M_\sigma} \quad (\text{A.5})$$

Feld II: Wechselnde Druckspannung ($\sigma_m < 0$), vollständig umgekehrte Spannung ($\sigma_m = 0$) und wechselnde Zugspannung ($\sigma_m > 0$)

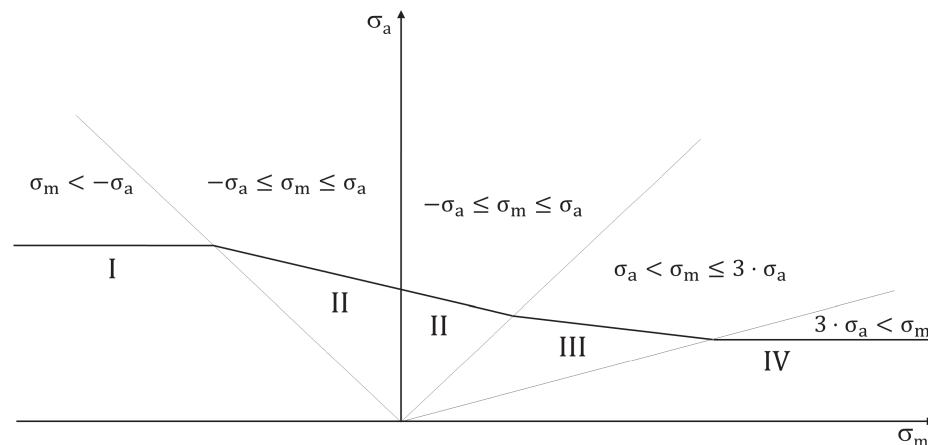
$$-\sigma_a \leq \sigma_m \leq \sigma_a : f_{m,\sigma} = \frac{1}{1 + M_\sigma \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_a}} \quad (\text{A.6})$$

Feld III: Geringe schwankende Zugspannung

$$\sigma_a < \sigma_m \leq 3 \sigma_a : f_{m,\sigma} = \frac{3 + M_\sigma}{(1 + M_\sigma) \cdot (3 + M_\sigma \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_a})} \quad (\text{A.7})$$

Feld IV: Stark schwankende Zugspannung

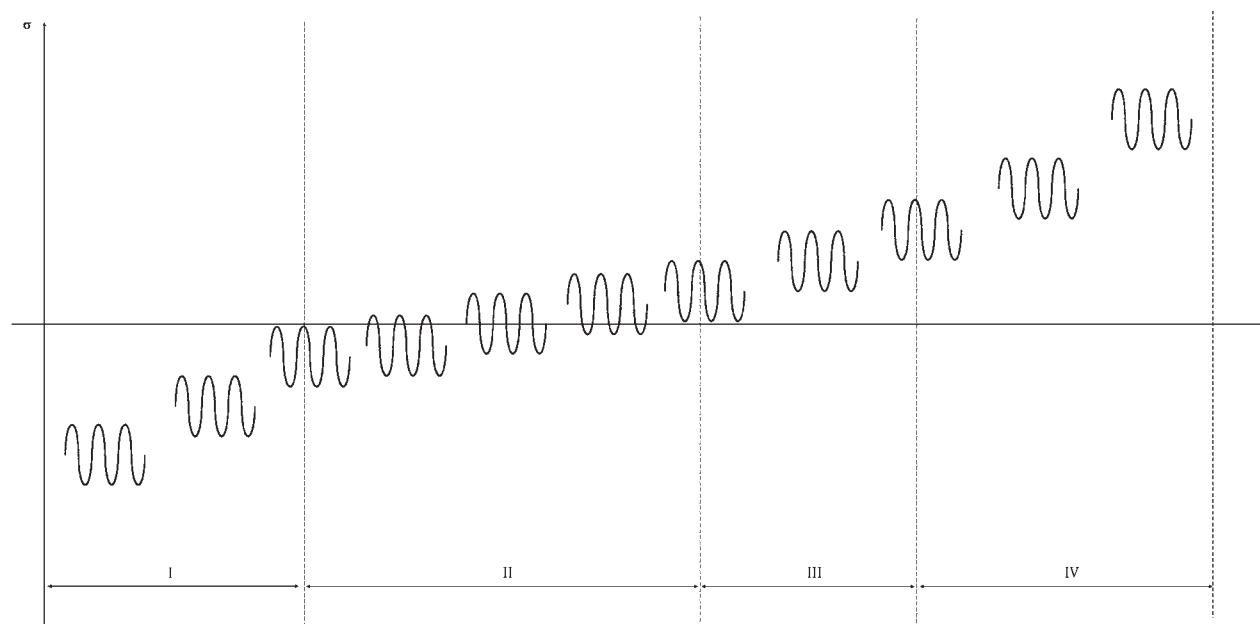
$$3 \sigma_a < \sigma_m : f_{m,\sigma} = \frac{3 + M_\sigma}{3 \cdot (1 + M_\sigma)^2} \quad (\text{A.8})$$



Legende

- I Feld I: Schwankende Druckspannung
- II Feld II: Wechselnde Druckspannung ($\sigma_m < 0$), vollständig umgekehrte Spannung ($\sigma_m = 0$) und wechselnde Zugspannung ($\sigma_m > 0$)
- III Feld III: Geringe schwankende Zugspannung
- IV Feld IV: Stark schwankende Zugspannung

Bild A.1 — Haigh-Diagramm für Normalspannungen



Legende

- I Feld I: Schwankende Druckspannung
- II Feld II: Wechselnde Druckspannung ($\sigma_m < 0$), vollständig umgekehrte Spannung ($\sigma_m = 0$) und wechselnde Zugspannung ($\sigma_m > 0$)
- III Feld III: Gering schwankende Zugspannung
- IV Feld IV: Stark schwankende Zugspannung

Bild A.2 — Beispiel eines Spannungsdiagramms für Normalspannungen

Gleichung (A.5) bis Gleichung (A.8) gelten nur unter der Annahme, dass der statische Festigkeitsnachweis für die Extremspannungen erfüllt werden kann.

ANMERKUNG EN 17149-2 gibt ein Verfahren für eine statische Festigkeitsbewertung an.

Für Schubspannungen wird das Haigh-Diagramm analog zum Haigh-Diagramm für Normalspannungen definiert, jedoch gilt nur der Teil des Diagramms der positiven Abszisse, da es keine negative Schubspannung gibt. Daher sind im Haigh-Diagramm für Schubspannungen drei Felder definiert, die den Mittelspannungsfaktor $f_{m,\tau}$ in Abhängigkeit von der Mittelspannungsempfindlichkeit M_τ bestimmen (siehe auch Bild A.3).

Feld II: Wechselnde Schubspannung

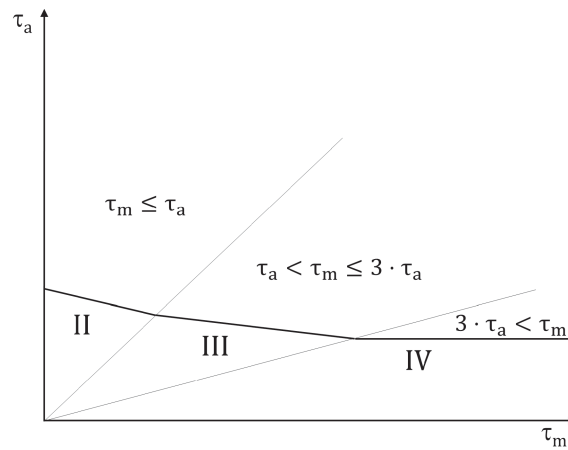
$$\tau_m \leq \tau_a : f_{m,\tau} = \frac{1}{1 + M_\tau \cdot \frac{\tau_m}{\tau_a}} \quad (\text{A.9})$$

Feld III: Gering schwankende Schubspannung

$$\tau_a < \tau_m \leq 3 \tau_a : f_{m,\tau} = \frac{3 + M_\tau}{(1 + M_\tau) \cdot (3 + M_\tau \cdot \frac{\tau_m}{\tau_a})} \quad (\text{A.10})$$

Feld IV: Stark schwankende Schubspannung

$$3 \tau_a < \tau_m : f_{m,\tau} = \frac{3 + M_\tau}{3 \cdot (1 + M_\tau)^2} \quad (\text{A.11})$$



Legende

- II Feld II: Wechselnde Schubspannung
- III Feld III: Gering schwankende Schubspannung
- IV Feld IV: Stark schwankende Schubspannung

Bild A.3 — Haigh-Diagramm für Schubspannungen

Anhang B (informativ)

Spezifikationsbeispiel für zulässige volumetrische Fehler in Gussstücken aus Stahl, Eisen und Aluminium

B.1 Allgemeines

Volumetrische Fehler für Gussteile können durch ASTM-Dokumente in Abhängigkeit von der Wanddicke festgelegt werden, die in Tabelle B.1 angegeben ist.

Tabelle B.1 — Relevante ASTM-Dokumente

	Wanddickenbereich
ASTM E446	$0 < t \leq 50 \text{ mm}$
ASTM E186	$50 \text{ mm} < t \leq 115 \text{ mm}$
ASTM E280	$115 \text{ mm} < t$
ASTM E155	alle

Die folgende Tabelle B.2 definiert die zulässigen Qualitätsklassen für jede Fehlerart (Fehlerkategorie) nach den in Tabelle B.1 referenzierten ASTM-Dokumenten. Die Fehlergrenzen sind für die normale Qualität (Qualitätsstufe 3) und für eine höhere Gussqualität (Qualitätsstufe 2) angegeben.

Tabelle B.2 — Definition von Qualitätsklassenstufen auf der Grundlage von Fehlerkategorien nach den in Tabelle B.1 referenzierten ASTM-Dokumenten

Fehlerkategorie	Zugewiesen von ASTM	Qualitätsstufe 2	Qualitätsstufe 3
Gaslöcher	A	A3	A3
Fremdkörper	B	B3	B3
Schrumpfung	C	Ca2, Cb2, Cc2, Cd2	Ca3, Cb3, Cc3, Cd3
Risse (einschließlich heißer Risse und fehlender Verschmelzung bei Schweißreparaturen)	D + E	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt
Kränze und Kokille	F	Nicht erlaubt	Nicht erlaubt

Anmerkungen zur Klassifizierung:

- A, B: Diese Fehler haben in der Regel keine große Kerbwirkung, daher ist ASTM Stufe 3 auch für hochwertige Gussteile akzeptabel.
- C: Die Größe und Dichte von Lunkern (Hohlräumen) hat einen Einfluss auf die Kerbwirkung von Innenfehlern; daher ist für diese Fehlerkategorien eine höhere Qualitätsstufe in Bezug auf das Ermüdungsverhalten vorteilhaft.
- D, E, F: Diese Fehlerkategorien sind nicht zulässig, da sie hohe Kerbwirkungen hervorrufen können, die schwer zu quantifizieren sind.

Anhang C (informativ)

Werkstofffaktoren für Grundwerkstoff

Tabelle C.1 — Übersicht über die Werkstofffaktoren für den Grundwerkstoff

Werkstoff	Anisotropiefaktor f_A				Faktor f_{SR}		Faktoren für Normal- und Schubspannungen $f_{R,\sigma}$ und $f_{R,\tau}$		Faktor für Gussteile $f_{R,C}$		Wöhlerlinien für Grundwerkstoff			
	$R_{m,N}$ [N/mm ²]				$a_{R,S}$	b_R [N/mm ²]	$f_{R,\sigma}$	$f_{R,\tau}$	ASTM-Qualitätsstufe 2	ASTM-Qualitätsstufe 3	Spannungsart	Exponent der Wöhlerlinie m	Exponent der Wöhlerlinie m_2 für Verfahren Miner konsequent	Zweiter Knickpunkt $N_{D,2}$ für Verfahren Miner konsequent
	≤ 200	> 200 ≤ 400	> 400 ≤ 600	> 600 ≤ 900										
Stahl (gewalzt oder geschmiedet)	0,9			0,86	0,22	400	0,75	0,577	1,0	1,0	Normalspannung	5	15 ^a	10 ^{8a}
											Schubspannung	8	25 ^a	10 ^{8a}
Stahlgussteile	1,0				0,20	400	0,57	0,577	0,9	0,8	Normalspannung	7	-	-
											Schubspannung	8	-	-
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	1,0				0,16	400	$0,42 + \frac{117 \text{ N/mm}^2}{R_m}$	0,65	1,0	0,9	Normalspannung	7	-	-
											Schubspannung	8	-	-
Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)	1,0				0,16	400	$\frac{295 \text{ N/mm}^2}{R_m}$	0,7	1,0	0,9	Normalspannung	7	-	-
											Schubspannung	8	-	-
Aluminium	1,0	0,95	0,9	-	0,22	133	0,6	0,577	1,0	1,0	Normalspannung	5	15	10 ^{8a}
											Schubspannung	8	25	10 ^{8a}
Aluminiumguss	1,0			-	0,20	133	0,6	0,75	1,0	1,0	Normalspannung	5	15	108
											Schubspannung	8	25	108

^a Nur anwendbar für austenitischen Stahl.

Anhang D (normativ)

Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Schweißverbindungen nach dem Nennspannungsansatz

D.1 Erläuterung der Tabellen für Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit

D.1.1 Allgemeines

Für Schweißverbindungen, die üblicherweise an Schienenfahrzeugen verwendet werden, enthalten die folgenden Tabellen die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ bezogen auf die Blechdicken $t_{\text{ref}} = 25 \text{ mm}$ für Stahl und $t_{\text{ref}} = 10 \text{ mm}$ für Aluminium (siehe 5.2.2 und 5.2.4). Für die Anwendung der Tabellen dieses Anhangs sollte die folgende Erklärung berücksichtigt werden.

D.1.2 Schweißnahttyp nach EN 15085-3:2007, Tabelle B.1

Angegeben sind der oder die entsprechenden Schweißnahttyp(en) nach EN 15085-3:2007, Tabelle B.1.

D.1.3 Skizze des Schweißstoßes

In diesen Tabellen gibt die Skizze der Verbindung (entweder ein Querschnitt durch die Schweißnaht, eine Seitenansicht oder eine isometrische Ansicht der Verbindung) Folgendes an:

- Nummer für jedes Anbauteil an der Verbindung (eingekreist);
- Dicke t_k für das Anbauteil mit dem Index k . Beachten Sie, dass sich die Dicke eines Anbauteils innerhalb der Verbindung ändern kann. Für jedes Anschlussteil, das separat zu beurteilen ist, werden Werte angegeben. Für Schweißverbindungen mit gleichen Blechdicken ist in den Tabellen nur ein Dickenwert angegeben. Ist in der Tabelle kein Index k angegeben, so ist die Blechdicke der Nachweisstelle zu verwenden;
- relevante Dicke der Schweißnahtkehle (a);
- Abmessung eines Teils (l , w) oder Radius (r), die für die Beurteilung notwendig sind;
- die Orte aller zu beurteilenden potenziellen Rissinitiierungspunkte werden mit einem Rissymbol gekennzeichnet und mit einer Zahl und einem alphanumerischen Zeichen bezeichnet (z. B. 1A). Das Rissymbol zeigt den typischen Rissverlauf für Belastungen quer zur Schweißnaht an. Die Zahl kennzeichnet das Anbauteil, dessen Nennspannungen für die Bewertung herangezogen werden müssen. Je nach Art der Verbindung können für ein Anbauteil mehrere potenzielle Rissinitiierungspunkte an Nahtübergängen und -wurzeln vorhanden sein;
- bei symmetrischer Schweißstoßausführung sind nicht alle potenziellen Rissinitiierungspunkte in der Skizze und Tabelle angegeben. Fehlende Punkte an symmetrischen Teilen müssen ebenfalls konsequent bewertet werden;
- im Falle einer asymmetrischen Fugenausführung müssen die Angaben in den Tabellen entsprechend angepasst werden;
- bei asymmetrischen nicht durchgeschweißten Nähten an beiden Seiten eines Anbauteils sind die Nennspannungen im Anbauteil in entsprechende Spannungen für die Bewertung jeder Schweißnahtkehle umzurechnen.

D.1.4 Schweißstoßspezifische Anforderungen

Zusätzliche Informationen und Regeln, die bei der Beurteilung bestimmter Schweißstoßtypen zu berücksichtigen sind, werden in den schweißstoßspezifischen Anforderungen genannt.

D.1.5 Potenzieller Rissinitiierungspunkt

Nach der Skizze des Schweißstoßes zeigt dies den Punkt an, an dem ein potenzieller Riss beginnen kann.

D.1.6 Durchführbarkeit der Prüfung

Die Prüfbarkeit eines Rissbildungspunktes während der Fertigung wird mit einem "y" gekennzeichnet. In diesem Fall ist ein Erweiterungsfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{CT} nach 5.2.8 anzuwenden.

D.1.7 Relevante Dicke für die Beurteilung einer Schweißnaht

Für die Beurteilung eines Nahtüberganges ist der relevante Querschnitt in den meisten Fällen der angeschlossene Plattenabschnitt (Plattendicke t). Für die Beurteilung einer Nahtwurzel ist der relevante Querschnitt der Einschnürungsquerschnitt (effektive Einschnürungsdicke a).

ANMERKUNG Bei Schweißstößen mit beidseitigen nicht durchgeschweißten Nähten kann der relevante Querschnitt eine Kombination aus mehreren Kehlschnitten sein.

D.1.8 Werkstoff

Der Werkstoff der Schweißverbindung wird mit "St" für Stahl und "Al" für Aluminium angegeben.

D.1.9 Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$

Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ ($R = 0,5$) für Direktspannungen nach 5.2.2 werden für Direktspannungen quer zur Schweißnaht ($\Delta\sigma_{C,\perp}$) und Direktspannungen längs zur Schweißnaht ($\Delta\sigma_{C,\parallel}$) angegeben.

Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit für Schubspannungen $\Delta\tau_C$ werden entsprechend der Definition in 5.2.2 angegeben.

Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ beziehen sich auf die Anforderungen der EN 15085-3 für den Schweißnahttyp und sind für eine Qualitätsstufe C nach EN ISO 5817 bzw. EN ISO 10024 angegeben (siehe 5.2.7).

ANMERKUNG Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien dargestellt, die den Kerbfällen von Schweißverbindungen entsprechen. Jeder Kerbfall wird durch den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ bezeichnet (siehe Anhang D). Für die Abstufung der Wöhlerlinien in Anhang D wird ein konstantes Verhältnis von $\sqrt{1,12}$ zwischen zwei Klassen verwendet, die Bezugswerte sind 100 N/mm^2 für Stahl und $46,5 \text{ N/mm}^2$ für Aluminium. Die genauen Werte der Ermüdungsfestigkeits-Bezugswerte für jede Wöhlerlinie können durch eine Multiplikation der Bezugswerte mit dem Verhältnis von $\sqrt{1,12}$ mit einem ganzzahligen Exponenten.

D.1.10 Exponent m und Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D

Für Normalspannungen quer zur Schweißnaht sind der Exponent m und die Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D in den Tabellen in D.2 angegeben.

Für Normalspannungen in Längsrichtung der Schweißnaht und Schubspannungen sind der Exponent m und die Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D in 5.2.9 angegeben.

D.1.11 Dickenkorrektorexponenten $n_{\sigma,+}$, $n_{\sigma,||}$ und n_{τ}

Die in Anhang E beschriebenen Dickenkorrektorexponenten zur Berechnung des Dickeneinflusses und der Biegeeffekte sowie der in Anhang H beschriebene Strukturspannungsfaktor sind angegeben.

D.1.12 Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Strukturspannungen f_{struc} ($\Omega = 0$)

Nach Abschnitt H.3 wird der Ermüdungsfestigkeitsfaktor für die Strukturspannungen f_{struc} ($\Omega = 0$) für reine Membranbelastung nur informativ angegeben. In Fällen, in denen die Anwendung von f_{struc} nicht zulässig ist, wird dies mit "k.A." angegeben.

D.1.13 Untere Grenze der Plattendicke für die Dickenkorrektur t_{min}

Die unterste Grenze für die Blechdicke zur Anwendung eines Dickenkorrekturfaktors nach E.2 ist gegeben.

D.1.14 Parameter α_{bend} , der für die Bestimmung von f_{bend} verwendet wird

Gegebenenfalls wird der Parameter α_{bend} angegeben, der für die Bestimmung von f_{bend} am potenziellen Rissinitiierungspunkt nach E.2 verwendet wird. Wenn der Parameter α_{bend} durch eine Gleichung hergeleitet werden muss, wird diese in einer Fußnote angegeben.

D.2 Tabellen mit Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit für Schweißverbindungen

Tabelle D.1 — Übersicht über Schweißstoßtypen und zugehörige Schweißnahttypen nach EN 15085-3:2007, Tabelle B.1

Schweiß- stoßtyp	Name	Schweißnahttyp nach EN 15085-3:2007, Tabelle B.1																																		
		1			2				3				4	5		6	7	8	9	10					11			12	13							
		a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	a	b						a	b	c	d	e	a	b	c		a	b	c	d	e	
11	Stumpfstoß mit beidseitig durchgeschweißter Naht oder einseitig durchgeschweißter Naht mit Dichtungslauf			x			x				x					x	x																			
12	Stumpfstoß mit einseitig durchgeschweißter Naht mit temporärer Schweißbadsicherung		x				x			x		x																								
13	Stumpfstoß mit einseitig durchgeschweißter Naht mit dauerhafter Schweißbadsicherung		x				x			x		x																								
14	Stumpfstoß mit einseitig durchgeschweißter Naht ohne Schweißbadsicherung	x					x			x																										
15	Stumpfstoß mit beidseitiger partieller durchgeschweißter Naht oder mit Dichtungslauf												x		x				x	x																
17	Stumpfstoß mit partieller durchgeschweißter Naht auf einer Seite											x		x																						
18	Stumpfstoß von Platten unterschiedlicher Dicke mit einer Neigung von 1 : 1	x	x	x			x	x	x	x	x					x	x																			
21	Doppel-T-Stoß mit beidseitig durchgeschweißter Naht oder mit Dichtungslauf																x					x	x													
24	Doppel-T-Stoß mit einseitig durchgeschweißter Naht																				x	x	x													
25	Doppel-T-Stoß mit beidseitiger nicht durchgeschweißter Naht																		x							x										
26	Doppel-T-Stoß mit doppelter Kehlnaht																																	x		
28	Doppel-T-Stoß mit einseitiger nicht durchgeschweißter Naht																				x	x				x	x									
29	Doppel-T-Stoß mit einseitiger Kehlnaht																																	x		
31	T-Stoß mit beidseitig durchgeschweißter Naht oder mit Dichtungslauf																x					x	x													
34	T-Stoß mit Durchgeschweißter Naht auf einer Seite																				x	x	x													
35	T-Stoß mit beidseitiger nicht durchgeschweißter Naht																		x								x									
36	T-Stoß mit doppelter Kehlnaht																																			