

DIN EN 17149



ICS 45.060.20

Einsprüche bis 2017-11-15

Entwurf**Bahnanwendungen –
Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17149:2017**

Railway Applications –

Fatigue strength assessment of railway vehicle structures based on cumulative damage;
German and English version prEN 17149:2017

Applications ferroviaires –

Évaluation de la résistance à la fatigue des structures de véhicule ferroviaire basée sur la
méthode des dommages cumulés;

Version allemande et anglaise prEN 17149:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-09-15 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), Panoramaweg 1, 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 272 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149:2017) wurde unter der Federführung der WG 2 „Festigkeitsanforderungen“ (Sekretariat: DIN, Deutschland) des SC 2 „Schienenfahrzeuge — Komponenten“ (Sekretariat: NEN, Niederlande) innerhalb des Technischen Komitees CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

Dieses Dokument beruht auf der Grundlage einer englischen Referenzfassung.

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.

Bahnanwendungen — Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen

Applications ferroviaires — Évaluation de la résistance à la fatigue des structures de véhicule ferroviaire basée sur la méthode des dommages cumulés

Railway applications — Fatigue strength assessment of railway vehicle structures based on cumulative damage

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8l

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	8
3.1 Begriffe	8
3.2 Symbole und Abkürzungen	12
4 Spannungsbestimmung	16
4.1 Allgemeines	16
4.2 Bestimmung von Nennspannungen für nicht geschweißte Strukturen	17
4.3 Bestimmung der Nennspannungen in geschweißten Strukturen	17
4.3.1 Allgemeines	17
4.3.2 Spannungsbewertungsstellen	18
4.4 Bestimmung der Strukturspannungen und Kerbspannungen von geschweißten Strukturen	21
5 Ermüdungswiderstand	22
5.1 Ermüdungsfestigkeit nicht geschweißter Strukturen	22
5.1.1 Allgemeines	22
5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit	22
5.1.3 Werkstoffeigenschaften	23
5.1.4 Konstruktionsparameter	24
5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normal- und Schubspannungen	26
5.1.6 Mittelspannungsfaktor	27
5.1.7 Ermüdungsfestigkeit für Gussteile	28
5.1.8 Allgemeines zu Wöhlerlinien und Verfahren der Schädigungsregel	29
5.2 Ermüdungsfestigkeit geschweißter Strukturen	34
5.2.1 Allgemeines	34
5.2.2 Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit	34
5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit	35
5.2.4 Einfluss von Dicke und Biegung	35
5.2.5 Mittelspannungsfaktor und Eigenspannungsfaktor	36
5.2.6 Erhöhungsfaktor für Schweißnahtnachbehandlung f_{post}	37
5.2.7 Erhöhungsfaktor für ZfP-Niveau während der Fertigung $f_{M,NDT}$	38
5.2.8 Wöhlerlinien und Verfahren der Schädigungsregel	38
5.2.9 Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch separate, experimentelle Prüfungen	40
6 Konzept der Teilbeiwerte	40
6.1 Allgemeines	40
6.2 Teilbeiwert für Spannungskollektiv γ_L	40
6.3 Teilbeiwerte für Ermüdungsfestigkeit	41
6.3.1 Teilbeiwert für Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit γ_M	41
6.3.2 Teilbeiwert für Sicherheitsbedürfnis $\gamma_{M,S}$	42
6.3.3 Teilbeiwert für die Inspektion während der Instandhaltung $\gamma_{M,I}$	43
6.3.4 Teilbeiwert für den Grad des Validierungsprozesses $\gamma_{M,V}$	43

7	Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises.....	44
7.1	Allgemeines	44
7.2	Nachweisverfahren.....	45
7.3	Spannungsermittlung	45
7.4	Daten-Vorbereitung.....	46
7.4.1	Aufbereitung	46
7.4.2	Anwendung eines Teilbeiwertes für das Spannungskollektiv γ_L.....	46
7.4.3	Zählung.....	46
7.4.4	Mittelspannungsanpassung.....	46
7.4.5	Auslassung	46
7.5	Schadensberechnung für jede einzelne Spannungskomponente	47
7.5.1	Allgemeines	47
7.5.2	Bestimmung für den Formfaktor des Spannungskollektivs.....	47
7.5.3	Bestimmung der zulässigen Schädigungssumme	48
7.5.4	Bestimmung der Schädigungssumme und des Skalierungsfaktors zum Erreichen einer zulässigen Schädigungssumme	48
7.6	Betriebsfestigkeitsnachweis	50
Anhang A (informativ) Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für nicht geschweißte und geschweißte Strukturen		52
Anhang B (informativ) Beispielspezifikation für zulässige volumetrische Defekte in Gussteilen aus Stahl, Eisen und Aluminium.....		55
Anhang C (normativ) Oberflächenrauigkeitsfaktor für Stahl-Schnittkanten		56
Anhang D (normativ) Referenzwerte für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Kerbfälle geschweißter Stahlstrukturen.....		57
D.1	Erläuterungen der Tabellen für Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit	57
D.1.1	Allgemeines	57
D.1.2	Bezug zu Anforderung der EN 15085-3	57
D.1.3	Skizze der Verbindung.....	57
D.1.4	Relevante Bauteildicke für den Nachweis der Schweißverbindung.....	58
D.1.5	Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$	58
D.1.6	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_C$	58
D.1.7	Übersicht über berücksichtigte Strukturdetails.....	58
D.1.8	Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit mittels Referenzdetail	59
D.2	Tabelle der Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit für Details geschweißter Strukturen.....	60
Anhang E (normativ) Referenzwerte für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Kerbfälle geschweißter Aluminiumstrukturen		83
E.1	Erläuterungen der Tabellen für Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit	83
E.1.1	Allgemeines	83
E.1.2	Bezug zu Anforderungen der EN 15085-3	83
E.1.3	Skizze der Verbindung.....	83
E.1.4	Relevante Dicke für den Nachweis der Schweißverbindung.....	84
E.1.5	Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$	84
E.1.6	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_C$	84
E.1.7	Übersicht über berücksichtigte Strukturdetails.....	84
E.1.8	Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit mittels Referenzdetail	84
E.2	Tabelle der Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit für Details geschweißter Strukturen.....	86
Anhang F (normativ) Einfluss der Dicke für geschweißte Strukturen aus Stahl und Berücksichtigung der Biegung für gschweißte Strukturen aus Stahl und Aluminium.....		100
F.1	Allgemeines	100

F.2	Dickenkorrekturfaktor nach IIW-Empfehlungen [1] für geschweißte Strukturen aus Stahl mit Membranspannungen.....	101
F.3	Dickenkorrektur unter Berücksichtigung der Biegung nach BS 7608 für Stahl- und Aluminiumverbindungen	102
Anhang G (informativ) Erhöhung des Referenzwerts für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ für lasttragende T- und Kreuzstöße mit Doppelkehlnaht mit oder ohne vollständige Durchschweißung		
G.1	Allgemeines	105
G.2	Beispiele für die Bestimmung des Erhöhungsfaktors für Kreuzstöße	106
Anhang H (informativ) Anwendungen des Strukturspannungsnachweises für Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium		
H.1	Allgemeines zur Bestimmung der Ermüdungsspannung am Nahtübergang.....	108
H.2	Bestimmung der Ermüdungsspannung mit der Finite-Elemente-Methode.....	109
H.2.1	Bestimmung der Ermüdungsspannung am Nahtübergang	109
H.2.2	Bestimmung der Ermüdungsspannung an der Nahtwurzel.....	110
H.3	Betriebsfestigkeitsnachweis mit Strukturspannungen.....	111
Anhang I (informativ) Anwendung des Kerbspannungsnachweises für Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium.....		
I.1	Allgemeines	112
I.2	Berechnung der Kerbspannungen	112
I.2.1	Kerb- bzw. Referenzradius zur Modellierung von Schweißnahtkerben.....	113
I.2.2	Modellierung idealisierter Nahtprofile	114
I.2.3	Verfahren zur Berechnung von Kerbspannungen.....	117
I.2.4	Kerbspannungsberechnung von Schweißnähten mit geringer Kerbwirkung	121
I.3	Ermüdungswiderstand	122
I.3.1	Ermüdungsfestigkeitswerte	122
I.3.2	Modifizierung des Ermüdungswiderstands.....	126
I.4	Berücksichtigung von Schweißnaht-Qualitätsanforderungen	126
I.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	126
Anhang J (informativ) Beispiel für Betriebsfestigkeitsnachweis		
J.1	Beschreibung.....	127
J.2	Aufgabe.....	128
J.3	Beispiellösung.....	128
Anhang K (informativ) Bestimmung der Nennspannung in der Nahtwurzel einseitig nicht vollständig durchgeschweißter Nähte.....		
K.1	Allgemeines	133
K.2	Unterstützte geschweißte Verbindungen.....	133
K.3	Nicht unterstützte, geschweißte Verbindungen	133
Literaturhinweise.....		136

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Einleitung

Für Schienenfahrzeugstrukturen ist die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit erforderlich. In einigen Fällen ist es ausreichend, einen Dauerfestigkeits-Ansatz zu verfolgen, d. h. nur die Spannungsspitzen zu bewerten und die Anzahl der Spannungszyklen und die Kollektivformen des Beanspruchungsverlaufs nicht zu berücksichtigen. Traditionell wird dieser Dauerfestigkeits-Ansatz in Kombination mit den normativen Belastungen verwendet, wie diese in der Reihe EN 12663 oder der EN 13749 definiert sind.

Eine genauere Bewertung darf erhalten werden, wenn ein Betriebsfestigkeitsnachweis genutzt wird, bei den Beanspruchungskollektiven mit unterschiedlichen Amplituden und Schwingspiellanzahlen oder Beanspruchungs-Zeitverläufe berücksichtigt werden.

Diese Europäische Norm stellt grundlegende Verfahren und Kriterien zur Anwendung im Betriebsfestigkeitsnachweis bereit.

In den Literaturhinweisen sind relevante Dokumente verzeichnet, die zu Referenzzwecken verwendet werden können.

Der Hauptteil der Norm basiert auf dem Nennspannungskonzept, aber die Berücksichtigung variabler Amplituden und der Spannungszyklenzählung nach den in dieser Norm beschriebenen Verfahren darf gleichermaßen mit dem Strukturspannungskonzept und dem Kerbspannungskonzept angewandt werden (zusätzliche Informationen sind als informative Anhänge enthalten). Eine Kombination dieser Ansätze darf zweckmäßig sein.

Diese Norm definiert eine pragmatische Methodik zur Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises. In der Anwendung dieser Norm ist die Nutzung detaillierterer Informationen oder anderer geprüfter Verfahren unter der Voraussetzung einer stichhaltigen Begründung zulässig.

1 Anwendungsbereich

Der Zweck dieser Europäischen Norm ist, ein Verfahren zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeitsnachweis als Betriebsfestigkeitsnachweis für Schienenfahrzeug-Strukturen festzulegen.

Dieses Dokument ist für alle Schienenfahrzeug-Strukturen anwendbar, die durch die Reihe EN 12663 (Wagenkasten) und EN 13749 (Drehgestellrahmen) abgedeckt sind.

Es berücksichtigt Werkstoffe für die Konstruktion der Wagenkästen und Drehgestellrahmen (Stahl, Aluminium, Guss- und Schmiedeteile) sowie die Fertigung nach für Schienenfahrzeuganwendungen gültigen Normen.

ANMERKUNG Als Fertigungsnorm deckt die Reihe EN 15085 das Schweißen von Schienenfahrzeug-Strukturen ab.

Sie ist für Daten variabler Belastungsamplituden mit einer Gesamtzahl von mehr als 10 000 Spannungszyklen anwendbar.

Dieses Dokument ist nicht anwendbar für:

- Korrosive Bedingungen oder
- Betrieb bei erhöhten Temperaturen im Kriechbereich.

Ein statischer Festigkeitsnachweis liegt außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Europäischen Norm.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 15085-3:2007/AC:2009, *Bahnanwendungen — Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen — Teil 3: Konstruktionsvorgaben*

BS 7608:2014+A1:2015, *Guide to fatigue design and assessment of steel products*

EN 755-2:2016, *Aluminium und Aluminiumlegierungen — Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile — Teil 2: Mechanische Eigenschaften*

EN 485-2:2016, *Aluminium und Aluminiumlegierungen — Bänder, Bleche und Platten — Teil 2: Mechanische Eigenschaften*

EN 586-2:1994, *Aluminium und Aluminiumlegierungen — Schmiedestücke — Teil 2: Mechanische Eigenschaften und zusätzliche Eigenschaftsanforderungen*

EN 1706:2010, *Aluminium und Aluminiumlegierungen — Gussstücke — Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe

3.1.1

Ermüdung

Schädigung eines Bauteils durch Rissbildung und Rissfortschritt, hervorgerufen und wiederholte Spannungsschwankungen

3.1.2

Ermüdungseinwirkung

zeitlich veränderte, wiederkehrende Belastung, die eine Spannung in einer Strukturkomponente verursacht

3.1.3

Ermüdungsspannung

Spannung, die durch eine Ermüdungseinwirkung verursacht wird

3.1.4

Ermüdungswiderstand

Widerstand eines Bauteils gegen Ermüdungseinwirkungen, ausgedrückt in einer Wöhlerlinie

3.1.5

Ermüdungsfestigkeit

Größe der Spannungsschwingbreite, die zu einer bestimmten Ermüdungslebensdauer führt

3.1.6

Bauteil-Ermüdungsfestigkeit

Ermüdungsfestigkeit bezogen auf ein spezielles Konstruktionsdetail

3.1.7

Auslegungslasten

durch eine Ermüdungseinwirkung verursachte Last unter Berücksichtigung des Teilbeiwertes der Belastungen

3.1.8

Spannungskollektiv

Ermüdungsspannungen einschließlich der Teilbeiwerte für Einwirkungen (z. B. Belastungen) und maßgeblich für den Betriebsfestigkeitsnachweis

3.1.9

Auslegungswert der Ermüdungsfestigkeit

Ermüdungsfestigkeit eines Strukturdetails unter Berücksichtigung von Teilbeiwerten für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit und maßgeblich für den Betriebsfestigkeitsnachweis

3.1.10

Dauerfestigkeit

konstante Spannungsamplitude, unterhalb derer eine Ermüdungsschädigung auftritt

3.1.11

Nennspannung

Spannung in einem Bauteil unmittelbar an einer potentiellen Rissstelle, berechnet nach der elastischen Spannungstheorie ohne Berücksichtigung örtlicher Kerbwirkung (z. B. infolge Schweißverbindungen, Ausschnitte, Dickenänderungen)

3.1.12

modifizierte Nennspannung

Nennspannung unter Einbeziehung von makrogeometrischen Effekten

Anmerkung 1 zum Begriff: Makrogeometrische Effekte sind spannungserhöhende Effekte, die durch die Makro-Geometrie in der Nähe von Schweißverbindungen verursacht werden (z. B. Auswirkungen von Lastkonzentrationen, Versatz, Exzentrizität), aber Spannungserhöhungen durch die Schweißnaht selbst nicht berücksichtigen.

3.1.13

Strukturspannung

Oberflächenwert der linear verteilten Spannung über den an ein Schweißnahtdetail angrenzenden Querschnitt unter Berücksichtigung der Auswirkung von geometrischen Bauteilveränderungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Strukturspannung wird auch als geometrische Spannung bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die linear verteilte Spannung berücksichtigt den Effekt von bauteilbedingten Strukturveränderungen (z. B. Vorhandensein einer Befestigung, Öffnung, Querschnittsänderung, Versatz, Bauteilkreuzung) und von durch Verzug verursachte Biegemomenten. Jedoch werden Kerbwirkungen infolge lokaler Strukturveränderungen ausgeschlossen, die nichtlineare Spannungserhöhungen über die Dicke des Querschnitts ergeben, (z.B. am Schweißnahtübergang, an der Schweißnahtwurzel).

3.1.14

Kerbspannung

berechnete Spannung an der Kerbe einer Schweißverbindung mit einem angenommenen Kerbradius

3.1.15

Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit

Ermüdungsfestigkeit für ein geschweißtes Strukturdetail bezogen auf $N_c = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen und auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_s = 97,5\%$

3.1.16

Mittelspannung

Mittelwert der algebraischen Summe aus Maximum und Minimum der sich ändernden Spannung in einem Zyklus

3.1.17

Eigenspannung

dauerhafte Spannung in einer Struktur, die durch den Fertigungsprozess (z. B. Walzen, Schneiden oder Schweißen) verursacht wird und die mit sich selbst im statischen Gleichgewicht ist

3.1.18

Membranspannung

mittlere Normalspannung, die über die Dicke eines ebenen oder gekrümmten Blechs konstant ist

3.1.19

Biegespannung

Spannung in einem ebenen oder gekrümmten Blech mit linearer Verteilung über der Dicke

3.1.20

Spannungsschwingbreite

algebraische Differenz zwischen Maximal- und Minimalspannung in einem Spannungszyklus

3.1.21

konstante Spannungsschwingbreite

Spannungsschwankung mit konstanter Amplitude zwischen einem Maximal- und Minimalwert in einem Spannungszyklus

3.1.22

wechselnde Spannungsschwingbreite

Schwankung der Spannungsschwingbreite zwischen einem Maximal- und Minimalwert in einem Spannungszyklus, hervorgerufen durch einen unregelmäßigen Last-Zeit-Verlauf

3.1.23

Spannungsverhältnis

Verhältnis von Minimum zu Maximum des algebraischen Werts der Spannung in einem bestimmten Spannungszyklus

3.1.24

Teilbeiwert

Beiwert, der die Unsicherheit von Lasten (Kräften), des Materials, des Berechnungsmodells und der Geometrie berücksichtigt

Anmerkung 1 zum Begriff: In einigen referierten Dokumenten wird der Teilbeiwert auch mit Begriffen wie „Sicherheitsfaktor“ in der Reihe EN 12663 und in der EN 13749 oder Teilbeiwert für veränderte Einwirkungen (z. B. Lasten oder Kräfte) und für Material, Berechnungsmodell und geometrische Unsicherheiten wie in ISO 2394 bezeichnet.

3.1.25

Spannungszyklus

Spannungsveränderung an einem durch das Zyklenzählverfahren definierten Punkt und bestehend aus einem Spannungswechsel zwischen einem minimalen (Senke) und einem maximalen (Spitze) Wert und wieder zurück

3.1.26

Wöhlerlinie

quantitative Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Anzahl der Spannungszyklen entsprechend der zugehörigen, aus Testdaten abgeleiteten Überlebenswahrscheinlichkeit gegen Versagen eines Details

3.1.27

Spannungs(schwingbreiten)kollektiv

tabellarische oder grafische Darstellung der Anzahl von verschiedenen Spannungsschwingbreiten (Summenhäufigkeit), die durch das Lastkollektiv während der Auslegungslbensdauer eines Strukturdetails erzeugt wird

3.1.28

Spannungs(schwingbreiten)stufe

Teil eines Spannungs-kollektivs mit konstanter Spannungsschwingbreite

3.1.29

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit (cut-off-limit)

Ermüdungsfestigkeit bei wechselnden Spannungsschwingbreiten, unter der die Spannungszyklen nicht ermüdungsschädigend berücksichtigt werden

3.1.30

schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite

konstante Spannungsschwingbreite, die eine äquivalente Ermüdungsschädigung zu einem Spannungs-kollektivs mit wechselnden Amplituden erzeugt

3.1.31

Schädigungssumme

Summe der Ermüdungsschädigungen, die durch ein Spannungs-kollektiv mit wechselnden Amplituden erzeugt wird

3.1.32

kumulierte Schädigungssumme

lineare Schädigungssummierung basierend auf einer durch Palmgren und Miner aufgestellten Regel der Ermüdungsschädigung, die durch alle Zyklen eines Spannungswechsel-kollektivs hervorgerufen werden

3.1.33

Schädigungsregel

Methode zur Lebensdauerabschätzung bei wechselnden Lastamplituden ausgehend von einer Wöhlerlinie

Anmerkung 1 zum Begriff: Oft als Schädigungsakkumulationshypothese, Miner-Regel oder Palmgren-Miner-Regel bezeichnet.

3.1.34

proportionale Spannungen

Hauptspannungen oder Spannungskomponenten mit konstanten Richtungen und konstanten Verhältnissen ihrer Werte für zeitlich sich verändernde Lasten

3.1.35

nichtproportionale Spannungen

Hauptspannungen oder Spannungskomponenten mit nicht konstanten Richtungen und nicht konstanten Verhältnissen ihrer Werte für zeitlich sich verändernde Lasten

3.1.36

Auslastungsgrad

Verhältnis der Auslegungswerte von Ermüdungsspannung und Bauteil-Ermüdungsfestigkeit ausgedrückt als das Verhältnis aus vorhandener Spannung und Bauteil-Ermüdungsfestigkeit

3.1.37

schädigungsäquivalenter Auslastungsgrad

Verhältnis der Auslegungswerte von Ermüdungsspannung und Bauteil-Ermüdungsfestigkeit für eine Extrapolation des Spannungskollektivs mit Erfüllung des Nachweiskriteriums

3.1.38

Kantenversatz

axiale Abweichung und Winkelabweichung (Versatz) bei Schweißverbindungen, die durch Detailkonstruktion oder durch den Fertigungsprozess verursacht wird

3.1.39

ZfP

zerstörungsfreie Prüfung

3.1.40

Sicherheitsbedürfnis

Auswirkungen eines Versagens einer einzelnen Schweißnaht im Hinblick auf die Folgen für Personen, Einrichtungen und die Umwelt nach EN 15085-3

3.1.41

Schweißnahtgüteklasse

Güteanforderungen an eine Schweißverbindung bezüglich Schweißnahtqualitätsanforderungen und Schweißnahtprüfanforderungen entsprechend der Definition in DIN EN 15085-3

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schweißnahtgüteklasse wird abgekürzt durch „CP“ (en: Class of Performance)

3.1.42

Schweißnahtprüfklasse

durchzuführende Prüfungen für eine Schweißnaht bezüglich des Umfangs und der Art der Prüfungen (z.B. volumetrisch, Oberflächen- oder Sichtprüfung) entsprechend der Definition in DIN EN 15085-3

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schweißnahtprüfklasse wird abgekürzt durch „CT“ (en: Class of Testing)

3.2 Symbole und Abkürzungen

A	Bruchdehnung nach Werkstoffnormen
A_{eq}	Formfaktor des Spannungskollektivs
a	Nahtdicke der Kehlnaht
a_c	Auslastungsgrad einer Spannungskomponente
a_f	Auslastungsgrad eines ebenen Spannungszustands nach von Mises Kriterium
a_m	Parameter für Mittelspannungsempfindlichkeit
b	Exponent im Korrekturterm für die Dicke im Fall von Membran- und Biegespannung (z. B. in F.3)
b_{EP}	Abstand von Schweißnahtübergang oder -wurzel zur Bewertungsstelle (Auswertepunkt) für den Nachweis mit Nennspannungen, modifizierten Nennspannungen oder Strukturspannungen
b_m	Parameter für Mittelspannungsempfindlichkeit
C_σ	Konstante in der Wöhlerliniengleichung für Normalspannungen
C_τ	Konstante in der Wöhlerliniengleichung für Schubspannungen
c	Länge des Wurzelspalts
D_{it}	kumulierte Schädigungssumme des Spannungskollektivs
D_m	zulässige Schädigungssumme
$D_{m,min}$	Schädigungssummengrenze
e	Exzentrizität zwischen dem Mittelpunkt von Schweißnahtquerschnitt und angeschlossenem Blechquerschnitts (Größe des Versatzes zwischen beiden Querschnitten)
f_A	Anisotropiefaktor für Walzbleche und Profile mit unterschiedlicher Festigkeit in Walz- bzw. Extrusionsrichtung und Querrichtung
f_{bend}	Erhöhungsfaktor für Biegung
f_C	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Guss
$f_{M,NDT}$	Erhöhungsfaktor für ZfP-Stufe während der Fertigung
$f_{m,\sigma}$	Mittelspannungsfaktor für Normalspannung
$f_{m,\tau}$	Mittelspannungsfaktor für Schubspannung
f_{post}	Erhöhungsfaktor für Schweißnahtnachbehandlung
$f_{R,\sigma}$	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Normalspannungen
$f_{R,\tau}$	Verhältnis zwischen den Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Schubspannung und Normalspannung
$f_{res,\sigma}$	Eigen Spannungsfaktor bei Normalspannungen für den Spannungsunterschied zwischen $R_\sigma = -1$ und $R_\sigma = 0,5$ unter Berücksichtigung des Eigen Spannungszustands
$f_{res,\tau}$	Eigen Spannungsfaktor bei Schubspannungen für den Spannungsunterschied zwischen $R_\tau = -1$ und $R_\tau = 0,5$ unter Berücksichtigung des Eigen Spannungszustands
f_{SR}	Oberflächenrauheitsfaktor

$f_{SR,\sigma}$	Oberflächenrauigkeitsfaktor für Normalspannungsnachweis
$f_{SR,\tau}$	Oberflächenrauigkeitsfaktor für Schubspannungsnachweis
f_{struc}	Ermüdungsfestigkeitsfaktor in Bezug auf Strukturspannung definiert in Anhang H
f_{thick}	Dickenkorrekturfaktor
h	Tiefe des teilweisen Einbrands einer Stumpfnah
i	Nummer der Stufen eines Spannungskollektivs
j	Gesamtzahl der Stufen eines Spannungskollektivs für die zusätzlich gilt: $x_{it} \times \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_L$
j_D	Grundteilbeiwert entsprechend [2]
K_f	Kerbwirkungszahl
K_t	Kerbformzahl
K_w	Nahtformzahl
L	Abstand zwischen Schweißnahtübergängen oder Summe der Dicke des Anschweißteils und der Schweißnahtschenkellängen
l	Länge des Anschweißteils oder einer angeschweißten, nichtbelasteten rechteckigen oder runden Verstärkung oder Blechs
l_{SG}	Länge der Dehnungsmessstreifen-Messgitterlänge
$l_{SG,tot}$	Gesamtlänge des Dehnungsmessstreifens inklusive der Trägerfolie
M_σ	Mittelspannungsempfindlichkeit für Normalspannungen
M_τ	Mittelspannungsempfindlichkeit für Schubspannungen
m	Wöhlerlinienexponent
m_1	Wöhlerlinienexponent vor dem Knickpunkt
m_2	Wöhlerlinienexponent nach dem Knickpunkt
N	Anzahl der Zyklen
N_C	Anzahl der Spannungszyklen des Referenzwertes der Ermüdungsfestigkeit
N_D	Anzahl der Spannungszyklen des Wöhlerlinienknickpunkts
N_{eq}	Anzahl der Zyklen des schädigungsäquivalenten Spannungskollektivs
N_L	Anzahl der Spannungszyklen des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit
N_t	Gesamtzahl der Zyklen in einem gegebenen Spannungskollektiv mit $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{OM}$
n	Exponent im Korrekturterm für Dicke im Fall von Membranbelastung
n_i	Anzahl der Zyklen der Spannungsschwingbreitenstufe i des Spannungskollektivs
P_s	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis

R_{eH}	obere Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit relevant für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von nichtgeschweißten Strukturen
$R_{m,N}$	normative Zugfestigkeit entsprechend Werkstoffnormen
$R_{m,S}$	nominelle Zugfestigkeit entsprechend Zeichnung oder Bauteilspezifikation
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze
R_z	Oberflächenrauigkeit
R_σ	Spannungsverhältnis für Normalspannungen
R_τ	Spannungsverhältnis für Schubspannungen
r	tatsächlicher Kerbradius eines Schweißnahtübergangs oder einer Schweißnahtwurzel
r_{ref}	Referenz- Kerbradius eines Schweißnahtübergangs oder einer Schweißnahtwurzel
t	Bauteildicke
t_{eff}	effektive Blechdicke im Korrekturterm für den Dickeneinfluss
t_{ref}	Referenz-Blechdicke relevant für die Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit für Kerbfälle in Anhang D und Anhang E
w	Breite von belasteten Blechen mit angeschweißten Längssteifen
x_{Dm}	Skalierungsfaktor für die Spannungsschwingbreite mit dem Iterationsergebnis $D_{it}(x_{Dm}) \equiv D_m$
x_{it}	Skalierungsfaktor für die Spannungsschwingbreite während der Iteration zur Ermittlung der kumulierten Schädigungssumme
γ_L	Teilbeiwert für das Spannungskollektiv basierend auf Auslegungslasten
γ_M	Teilbeiwert für Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit
$\gamma_{M,I}$	Teilbeiwert für Prüfung während der Instandhaltung
$\gamma_{M,S}$	Teilbeiwert für das Sicherheitsbedürfnis
$\gamma_{M,V}$	Teilbeiwert für den Grad der Validierung
$\gamma_{M,V,FT}$	Teilbeiwert zur Berücksichtigung der Validierung des Ermüdungsverhaltens durch Ermüdungsprüfung
$\gamma_{M,V,ST}$	Teilbeiwert zur Berücksichtigung der Validierung von berechneten Spannungsdaten durch gemessene Spannungsdaten
$\Delta\sigma$	Normalspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_b$	Biegespannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_C$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit der Normalspannungsschwingbreite für $N_c = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen, $R = 0,5$, $P_s = 97,5\%$
$\Delta\sigma_{C,e}$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit für den Kerbspannungsnachweis mit Normalspannungen
$\Delta\sigma_{C,S}$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit für Strukturspannungsnachweis mit Normal-spannungen

$\Delta\sigma_D$	Normalspannungsschwingbreite für Bauteil-Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie N_D
$\Delta\sigma_{D,C}$	Normalspannungsschwingbreite für den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie N_D
$\Delta\sigma_e$	Normal-Kerbspannungsschwingbreite quer zur Schweißnaht
$\Delta\sigma_{eq}$	Normalspannungsschwingbreite des schädigungsäquivalenten Spannungskollektivs
$\Delta\sigma_i$	Normalspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i bezogen auf ein Spannungsverhältnis $R = -1$
$\Delta\sigma_{i,RF}$	Normalspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i als Ergebnis der Rainflow-Zählung
$\Delta\sigma_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit für Normalspannung bei N_L
$\Delta\sigma_{O,M}$	Auslassungsgrenze für Normalspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_{mem}$	Membranspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_R$	Bauteil-Ermüdungsfestigkeit für Normalspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_{R,e}$	Bauteil-Ermüdungsfestigkeit für Normal-Kerbspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_1$	größte Normalspannungsschwingbreite des Spannungskollektivs
$\Delta\tau$	Schubspannungsschwingbreite
$\Delta\tau_C$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit der Schubspannungsschwingbreite für $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen, $R = 0,5$, $P_s = 97,5\%$
$\Delta\tau_{C,e}$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit für den Kerbspannungsnachweis mit Schubspannungen
$\Delta\tau_D$	Schubspannungsschwingbreite für Bauteil-Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie N_D
$\Delta\tau_{D,C}$	Schubspannungsschwingbreite für den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie N_D
$\Delta\tau_e$	Schub-Kerbspannungsschwingbreite
$\Delta\tau_{eq}$	Schubspannungsschwingbreite des schädigungsäquivalenten Spannungskollektivs
$\Delta\tau_i$	Schubspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i bezogen auf ein Spannungsverhältnis $R = -1$
$\Delta\tau_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit für Schubspannung bei N_L
$\Delta\tau_{OM}$	Auslassungsgrenze für Schubspannungsschwingbreite
$\Delta\tau_R$	Bauteil-Ermüdungsfestigkeit für Schubspannungsschwingbreite
$\Delta\tau_{R,e}$	Bauteil-Ermüdungsfestigkeit für Schub-Kerbspannungsschwingbreite
$\Delta\tau_1$	größte Schubspannungsschwingbreite des Spannungskollektivs
δ	erste Nummer der Spannungskollektivstufe mit $x_{it} \times \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_D$
θ	Schweißflanschwinkel

ν	Querkontraktionszahl
ρ	fiktiver Kerbradius von Schweißnahtübergang oder Schweißnahtwurzel in Anhang G
σ_a	Normalspannungsamplitude
σ_b	Biegespannung
$\sigma_e, \sigma_{e,L}$	linearelastisch berechnete Normal-Kerbspannung quer zur Schweißnaht
σ_{hs}	Strukturspannung am kritischen Punkt nach Anhang H und Anhang I
σ_m	Mittelspannung
$\sigma_{m,i,R,F}$	Mittelspannung bezogen auf $\Delta\sigma_{i,R,F}$
σ_{mem}	Membranspannung
$\sigma_{n,II}$	Nennnormalspannung längs der Schweißnaht
σ_{SG}	gemessene Strukturspannung nach der Definition in Anhang H
$\sigma_{w,b}$	Nennbiegespannung bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt
$\sigma_{w,mem}$	Nennmembranspannung bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt
$\sigma_{w,root}$	Nennspannung bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt infolge Membran- und Biegespannung
τ_a	Schubspannungsamplitude
$\tau_e, \tau_{e,II}$	linearelastisch berechnete Schub-Kerbspannung längs der Schweißnaht
τ_m	Mittelspannung der Schubspannung
Ω	Grad der Biegung
ω	Schweißnahtübergangswinkel

4 Spannungsbestimmung

4.1 Allgemeines

Das Spannungskollektiv, das für die Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises verwendet wird, muss in Form von Spannungsamplituden, Mittelspannungen und Anzahl der Zyklen, welche die Lebensdauer repräsentieren, angegeben werden.

Das Spannungskollektiv muss alle notwendigen Zuschläge zur Berücksichtigung von Unsicherheiten enthalten. Falls nötig, darf dies durch Anwendung eines Teilbeiwerts γ_L auf das charakteristische, in Anwendungsrichtlinien festgelegte Spannungskollektiv erreicht werden. In 6.2 sind Empfehlungen und Anforderungen für die Teilbeiwerte γ_L angegeben.

ANMERKUNG Die Reihe EN 12663, die EN 15827 und die EN 13749 enthalten Informationen zur Bestimmung von Auslegungslasten für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugen. Für Belastungen konstanter Amplitude, wie in EN 12663 und EN 13749 angegeben, ist ein Nachweis mit Schadensakkumulationshypothese nicht zwingend erforderlich.

4.2 Bestimmung von Nennspannungen für nicht geschweißte Strukturen

Die Bauteilspannungen müssen als ebener Spannungstensor in einem festen Koordinatensystem tangential zur Bauteiloberfläche bestimmt werden.

Die Bauteilspannungen müssen für die drei Komponenten des ebenen Spannungstensors (d. h. σ_x , σ_y , τ_{xy}) durch Amplitude und Mittelwerte sowie durch Anzahl der Zyklen für die Spannungsschwingbreitenstufe des Bauteils bestimmt werden.

Die Bauteilspannungen für die Bewertung nicht geschweißter Strukturen müssen die lokalen Spannungskonzentrationen berücksichtigen.

4.3 Bestimmung der Nennspannungen in geschweißten Strukturen

4.3.1 Allgemeines

Die Definition von Nennspannungen im geschweißten Blech oder in der Schweißnaht schließt die Spannungskonzentrationswirkungen durch die Schweißverbindung (z. B. Nahtform, Dickenänderung) und jegliche sekundäre Biegeeffekte aufgrund lokaler Details (z. B. Exzentrizität oder Kantenversatz) aus. Dieses muss bei der Bestimmung der Nennspannungen durch Berechnung oder Messungen berücksichtigt werden.

Die in Anhang D und Anhang E definierten Ermüdungsfestigkeitswerte für Kerbfälle geschweißter Strukturen erfüllen diese allgemeinen Anforderungen. In Fällen, in denen Exzentrizitätseffekte oder sekundäre Biegeeffekte berücksichtigt werden müssen, wird das in diesen beiden Anhängen explizit beschrieben.

Die Bestimmung von Nennspannungen während der Berechnung oder der Messung mit Dehnungsmessstreifen muss außerhalb des Spannungskonzentrationsbereichs der Schweißverbindung durchgeführt werden. Angemessene Abstände zwischen dem Ort der Spannungsbewertung und dem Nahtübergang oder der Nahtwurzel sind in 4.3.2 definiert.

Für die Bewertung des Nahtübergangs ist der relevante Querschnitt des Blechquerschnitts, sofern das nicht in Anhang D und Anhang E anders festgelegt ist. Für die Bewertung der Nahtwurzel ist der relevante Querschnitt der Querschnitt der Schweißnaht. In Fällen von Schweißnähten mit

- nicht vollständiger Durchschweißung oder;
- Exzentrizität des Schweißnahtdicken-Mittelpunkts zum Blechmittelpunkt oder;
- einer von der Blechdicke abweichenden Nahtdicke;

müssen die Spannungen am Ort der Spannungsbewertung mit geeigneten Verfahren in Spannungen am Schweißnahtquerschnitt überführt werden. Membranspannungen sollten überführt werden, um Exzentrizitätseffekte zu berücksichtigen. Biegespannungen sollten überführt werden, um das maßgebliche Biege-Widerstandsmoment für die Nahtwurzel zu berücksichtigen. Für die Bestimmung der Nennspannungen in Nähten mit einseitig nicht vollständiger Durchschweißung, enthält Anhang K detaillierte Informationen.

ANMERKUNG Analytische Ansätze oder FE-Modellertechniken, die die tatsächliche Nahtdicke und Exzentrizität der Schweißnähte abbilden, sind solche geeigneten Verfahren.

4.3.2 Spannungsbewertungsstellen

Um die Position für die Spannungsbewertungsstelle (Bewertungspunkt) zu bestimmen, werden die folgenden Empfehlungen gegeben:

- Der Abstand b_{EP} der Bewertungsstelle muss sein

$$b_{EP} = 10\text{mm} \pm 5\text{mm} \quad (1)$$

- Im Fall asymmetrischer Nahtübergangs-Positionen auf einem Blech wird der Nahtübergang mit dem größeren Abstand zur Naht oder Blech-Mittellinie verwendet, um den Abstand und die Position auf der anderen, direkt gegenüberliegenden Oberfläche zu bestimmen.
- Im Fall von Nähten an T-Stößen, die von einer Seite geschweißt wurden, wird der Abstand b_{EP} auf der Wurzelseite von der angrenzenden Blechoberfläche gemessen.

ANMERKUNG Für Messungen entspricht der definierte Wert für b_{EP} von 10 mm mit der allgemein anerkannten Praxis für die Applikation von Dehnungsmessstreifen an Schweißnähten.

Zur Bewertung der Nennspannungen in Berechnungen muss der Bewertungspunkt der oben stehenden Definition entsprechen.

Für die Bewertung der Nennspannungen in Messungen haben die Abmessungen des Dehnungsmessstreifens, besonders die Länge des Dehnungsmessstreifen-Gitters l_{SG} und der Applikationsabstand vom Nahtübergang erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. Die maximale Länge des verwendeten Dehnungsmessstreifens beträgt höchstens

- $l_{SG} \leq 6\text{ mm}$ für Messungen an Drehgestellrahmen;
- $l_{SG} \leq 10\text{ mm}$ für Messungen an Wagenkastenstrukturen.

ANMERKUNG Der Grund für die Definition unterschiedlicher maximaler Dehnungsmessstreifen-Längen ist, dass in Drehgestellrahmen normalerweise über höhere Spannungsgradienten als in Wagenkasten-Strukturen auftreten.

Für typische Schweißverbindungen ist der Ort des Spannungsnachweises für den Nennspannungsnachweis in Bild 1, Bild 2 und Bild 3 angegeben.

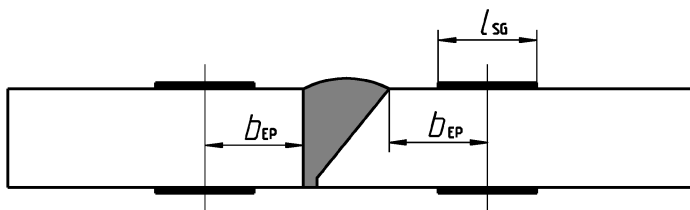


Bild 1 — Spannungsbewertungsstellen für einen Stumpfstoß

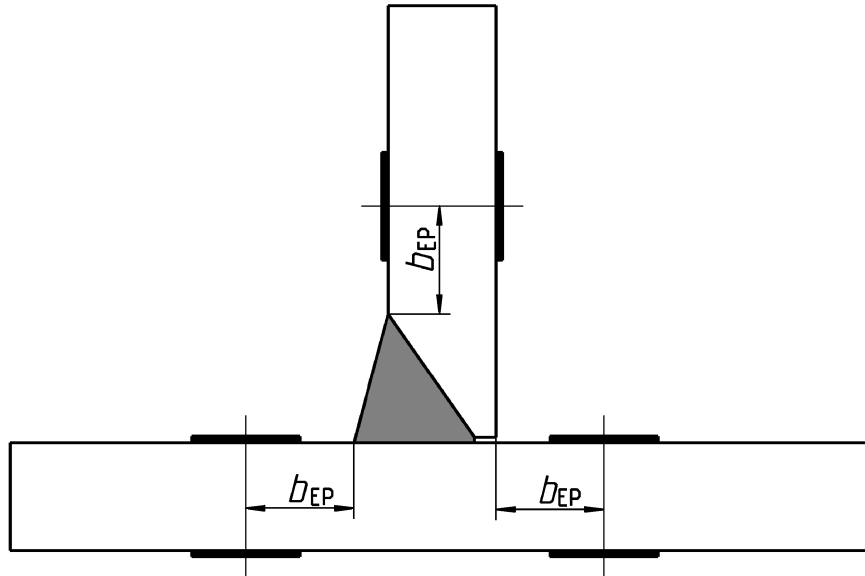


Bild 2 — Spannungsbewertungsstelle für einen T-Stoß

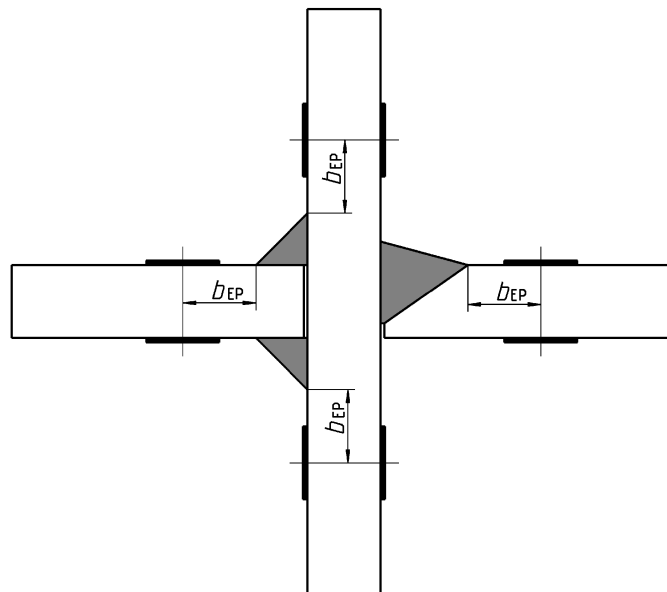


Bild 3 — Spannungsbewertungsstelle für einen Kreuzstoß

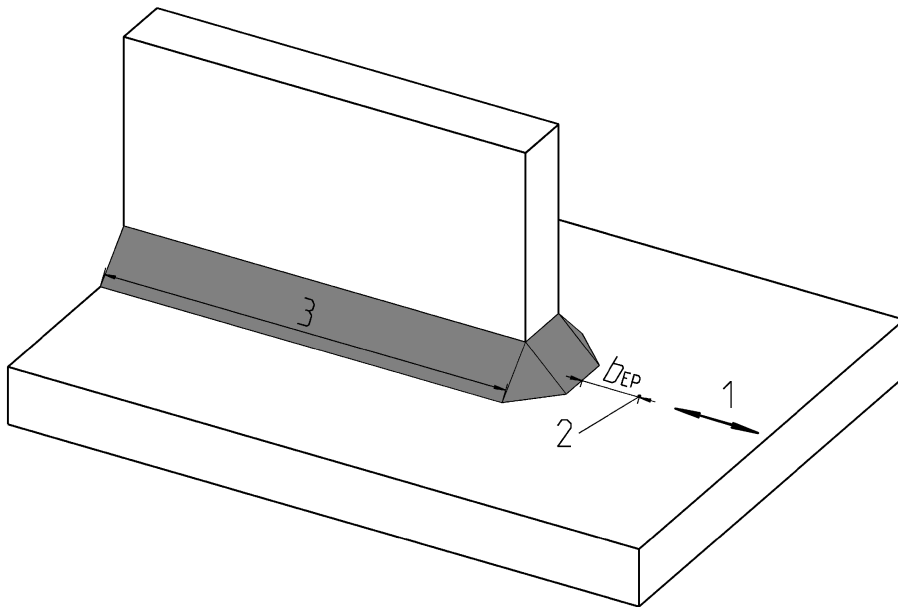
Im Fall der Bewertung von Schweißnahtausläufen darf die Spannung als einzelner axialer Spannungszustand am empfohlenen Abstand b_{EP} zum Nahtübergang in Richtung der Schweißnahtlinie angenommen werden. Solche Schweißnahtausläufe sind beispielsweise:

- Schweißnahtausläufe von Längssteifen oder Anschweißteilen (siehe Bild 4 und Tabelle D.16, Tabelle D.20, Tabelle D.21 und Tabelle E.10);
- Schweißnahtausläufe von unterbrochenen Schweißungen in T- oder Kreuzstößen (siehe Bild 5 und Tabelle D.15);
- Schweißnahtausläufe im Fall eines Übergangs von einer beidseitigen Naht in einen einseitigen Nahttyp in T- oder Kreuzstößen (siehe Bild 5).

Für die Bewertungsstelle dieser Schweißnahtausläufe ist eine Kombination der Spannungskomponenten nach 7.6 nicht erforderlich.

Spannungen in der verbleibenden Schweißnaht müssen separat mit den Kerbfällen, die für die entsprechenden Kerbfälle einer durchgehenden Schweißnaht anwendbar sind, bewertet werden.

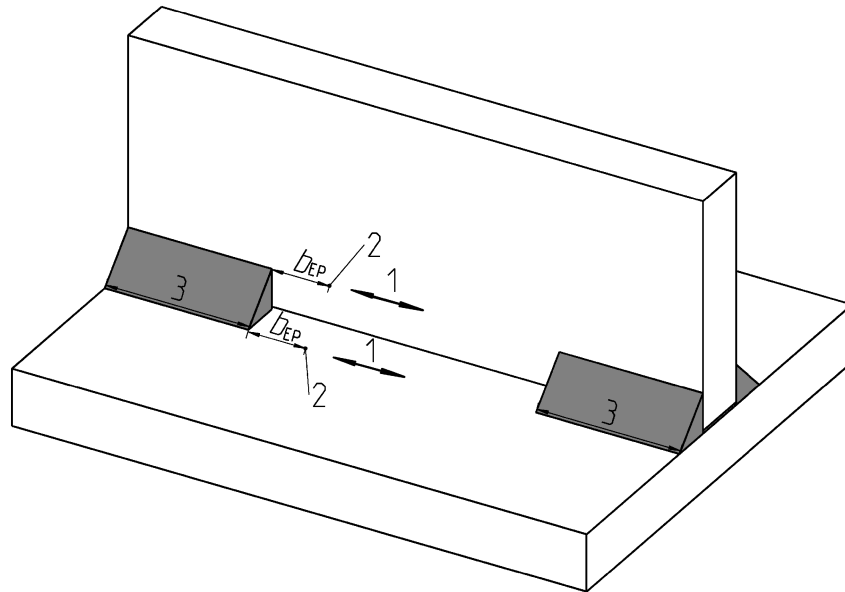
ANMERKUNG An flachen aufgeschweißten Bauteilen oder verschweißten Blehdopplungen wird der Spannungszustand an den Nähten nicht als einachsiger, axialer Spannungszustand angesehen. Für diese Fälle ist eine Bewertung aller Richtungen und eine Kombination der Spannungskomponenten erforderlich (siehe zur Normalspannungsnachweis quer zur Schweißnaht in Tabelle D.16 und längs zur Schweißnaht in Tabelle D.13)



Legende

- 1 Spannungen zur Verwendung für die Bewertung von Schweißnahtausläufen
- 2 Bewertungsstelle für Schweißnahtausläufe von Längssteifen oder Knotenbleche
- 3 Schweißnahtbereich, der wie eine durchgehende Schweißnaht bewertet werden muss

Bild 4 — Spannungsbewertungsstellen für ein Strukturdetail mit nicht belasteten Anschweißbauteilen



Legende

- 1 Spannungen zur Verwendung für den Nachweis von Schweißnahtausläufen
- 2 Bewertungsstelle für Schweißnahtende
- 3 Schweißnahtbereich, der wie eine durchgehende Schweißnaht bewertet werden muss

Bild 5 — Spannungsbewertungsstellen für T- oder Kreuzstöße mit unterbrochener Kehlnaht

Die entsprechend in diesem Abschnitt bestimmten Spannungen sind üblicherweise größer als die Nennspannungen. Daher darf eine Bewertung unter Verwendung dieser Spannungen mit den zulässigen Spannungswerten nach Definition in Anhang D und Anhang E als ausreichend konservativ angenommen werden.

4.4 Bestimmung der Strukturspannungen und Kerbspannungen von geschweißten Strukturen

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen dürfen das Strukturspannungskonzept und das Kerbspannungskonzept angewandt werden. Für die Anwendung dieser Konzepte sind die Anforderungen an die Berechnung der relevanten Spannungen und der Ermüdungswiderstand in den folgenden informativen Anhängen beschrieben:

- Anhang H für das Strukturspannungskonzept und
- Anhang I für das Kerbspannungskonzept.

5 Ermüdungswiderstand

5.1 Ermüdungsfestigkeit nicht geschweißter Strukturen

5.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt das Verfahren für einen Betriebsfestigkeitsnachweis nicht geschweißter Strukturen unter den folgenden Bedingungen:

- Konstruktionswerkstoffe wie Konstruktionsstahl, schweißbarer Gussstahl, duktiles Gusseisen, gegossenes und geschmiedetes Aluminium;
- Einsatztemperatur bis 100 °C für Aluminium und bis 200 °C für Stahl;
- ebener Spannungszustand an der Bauteiloberfläche (keine signifikante Spannungskomponente senkrecht zur Oberfläche, z. B. Pressanschluss).

Die oben definierten Einschränkungen werden von den meisten Anwendungen nicht geschweißter Strukturen für Schienenfahrzeuge erfüllt, und in solchen Fällen ist ein vereinfachtes Nachweisverfahren geeignet. Wenn der Anwendungsbereich überschritten wird, muss ein Nachweisverfahren gewählt werden, das der speziellen Anwendung (z. B. hohe Temperaturen und dreidimensionale Spannungszustände) Rechnung trägt.

5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien angegeben, die die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ definieren in Bezug auf

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

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit werden durch die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\Delta\sigma_R (N_C = 10^6, R_\sigma = -1) = R_m \times f_{R,\sigma} \times f_{SR,\sigma} \times f_C \quad (2)$$

$$\Delta\tau_R (N_C = 10^6, R_\tau = -1) = R_m \times f_{R,\tau} \times f_{R,\sigma} \times f_{SR,\tau} \times f_C \quad (3)$$

Dabei ist

R_m	Zugfestigkeit relevant für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von nichtgeschweißten Strukturen (siehe 5.1.3)
$f_{R,\sigma}$	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Normalspannungen (siehe 5.1.5)
$f_{SR,\sigma}$	Oberflächenrauigkeitsfaktor für Normalspannungsnachweis (siehe 5.1.4)
$f_{R,\tau}$	Verhältnis zwischen den Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Schubspannung und Normalspannung (siehe 5.1.5)
$f_{SR,\tau}$	Oberflächenrauigkeitsfaktor für Schubspannungsnachweis (siehe 5.1.4)
f_C	Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Guss (siehe 5.1.7).

5.1.3 Werkstoffeigenschaften**5.1.3.1 Zugfestigkeit nach Werkstoffnormen**

$R_{m,N}$ ist die Nennzugfestigkeit nach den Werkstoffnormen unter Berücksichtigung der tatsächlichen Blechdicken. Für gefräste Bauteile muss die Dicke des halbfertigen Produkts berücksichtigt werden.

Für gewalzte Bleche und Strangpressteile muss ein Anisotropiefaktor f_A in der Richtung quer zur Walz-Hauptrichtung in Übereinstimmung mit Tabelle 1 berücksichtigt werden, es sei denn, dieser wurde bereits in der Werkstoffnorm oder der Bauteil-Spezifikation berücksichtigt oder explizit ausgeschlossen. Für andere Werkstoffanwendungen ist $f_A = 1,0$.

$$R_m = f_A \times R_{m,N} \quad (4)$$

Tabelle 1 — Anisotropiefaktor f_A für Stahl und Aluminium

	Gewalzter Stahl		Aluminium		
$R_{m,N}$	< 600 MPa	≥ 600 MPa ≤ 900 MPa	< 200 MPa	≥ 200 MPa ≤ 400 MPa	> 400 MPa ≤ 600 MPa
f_A	0,9	0,86	1,0	0,95	0,9

5.1.3.2 Durch Zeichnung oder Spezifikation angegebene Zugfestigkeit

Alternativ zur Werkstoffnorm können die mechanischen Eigenschaften durch die Zeichnung oder Spezifikation angegeben werden.

$R_{m,S}$ ist die Zugfestigkeit nach einer Zeichnung oder Bauteil-Spezifikation. Wenn höhere Werte spezifiziert sind als in den Werkstoffnormen für $R_{m,S}$ definiert und die Werte nur durch Stichproben kontrolliert werden, dürfen die spezifizierten Werte nicht garantiert werden, und sie wären damit für die Verwendung zu Zwecken eines Betriebsfestigkeitsnachweises nicht konservativ. Um einen Betriebsfestigkeitsnachweis mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,5$ % durchzuführen, muss die Zugfestigkeit $R_{m,S}$, wie sie in der Zeichnung oder Bauteil-Spezifikation definiert ist, folgendermaßen verringert werden:

$$R_m = 0,94 \times R_{m,S} \quad (5)$$

Wenn ein überprüfter Wert $P_S = 97,5$ % im Bauteil vorliegt, darf dieser Wert ohne weitere Verringerung verwendet werden.

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

5.1.3.3 Einfluss der technologischen Größe

Das in dieser Norm beschriebene Nachweisverfahren gilt für einen begrenzten Anwendungsbereich hinsichtlich der Wanddicken an den Bewertungstellen.

Wenn für die Festigkeitseigenschaften des halbfertigen Produkts die Wanddicke berücksichtigt wird, ist der Einfluss der Bauteilgröße ausreichend berücksichtigt.

5.1.3.4 Einfluss der Anwendungstemperatur

Wenn die Bauteil-Betriebstemperatur innerhalb des in dieser Norm definierten Anwendungsbereichs bleibt, sind keine weiteren Anpassungen zur Berücksichtigung der Anwendungstemperatur für den Betriebsfestigkeitsnachweis erforderlich.

5.1.4 Konstruktionsparameter

5.1.4.1 Oberflächenrauigkeitsfaktor f_{SR}

Der Oberflächenrauigkeitsfaktor f_{SR} ist in den folgenden Tabellen für typische Werte der Oberflächenrauheit R_z definiert. Die Werte in den Tabellen 2 bis 5 dürfen linear interpoliert werden. Für Werkstoffe mit anderen Zugfestigkeiten oder anderen Oberflächenrauheitswerten darf der Oberflächenrauigkeitsfaktor f_{SR} aus der technischen Literatur bestimmt werden.

Wenn in der Zeichnung oder in der Bauteil-Spezifikation explizite Werte für die Oberflächenrauheit definiert sind, müssen diese Werte für den Betriebsfestigkeitsnachweis verwendet werden.

Die Werte für $R_z = 200 \mu\text{m}$ müssen für Walzblechoberflächen aus Stahl (Tabelle 2) und für raue Oberflächen aus Gussstahl (Tabelle 3) und aus Gussaluminium (Tabelle 5) verwendet werden. Niedrigere Werte für R_z können verwendet werden, vorausgesetzt, sie erfüllen die Fertigungsanforderungen. Für Gussteile sind die Zuschläge bearbeiteter Oberflächen nur anwendbar, wenn die bearbeitete Oberfläche frei von Oberflächenfehlern ist.

Die in Tabelle 2 angegebenen Werte müssen für bearbeitete Kanten von gewalztem Stahlblech angewandt werden. Scharfe Ecken und vom Walzen herrührende Oberflächenmängel müssen durch Längsschleifen entfernt werden, Risse oder sichtbare Kerben sind nicht zulässig.

Für Plattenkanten aus Stahl, die mit Plasma, Laser oder Brennschneiden hergestellt wurden, ist der Oberflächenrauigkeitsfaktor in Anhang C angegeben.

Die in Tabelle 4 angegebenen Werte müssen für Kanten von gewalzten Aluminiumblechen, die bearbeitet, extrudiert, plasma- oder lasergeschnitten sind, angewandt werden. Für plasma- oder lasergeschnittene Kanten von Aluminiumblechen muss unabhängig von der tatsächlichen Oberflächenrauheit eine Oberflächenrauheit von $R_z = 200 \mu\text{m}$ angewandt werden, um die lokalen metallurgischen Effekte zu berücksichtigen. Eine Verbesserung des Oberflächenrauigkeitsfaktors ist nur anwendbar, wenn der betroffene Werkstoff (typischerweise 2 mm) nach dem Schneiden vollständig durch Spanabheben entfernt wird.

Die Werte in den Tabellen 2 bis 5 sind für eine Nennspannung ohne Berücksichtigung jeglicher Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche gültig. Im Fall lokaler Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche (z. B. lokale Spannungskonzentration) darf der Einfluss der Oberflächenrauheit entsprechend der technischen Literatur, z. B. [2], reduziert werden.

Tabelle 2 — Oberflächenrauigkeitsfaktor für Walzstahl und Schmiedestahl

R_z μm	R_m MPa	$f_{SR,\sigma}$	$f_{SR,\tau}$	Beispiel
20	400	0,91	0,95	bearbeitete Oberfläche
	800	0,83	0,90	
80	400	0,87	0,93	grob bearbeitete Oberfläche oder kugelgestrahlte Walzstahloberfläche
	800	0,75	0,85	
200	400	0,85	0,91	nicht kugelgestrahlte Walzstahloberfläche
	800	0,70	0,82	

Tabelle 3 — Oberflächenrauigkeitsfaktor für Gussstahl

R_z μm	R_m MPa	$f_{SR,\sigma}$	$f_{SR,\tau}$	Beispiel
20	400	0,92	0,95	bearbeitete Oberfläche
	800	0,84	0,91	
80	400	0,89	0,93	grob bearbeitete Oberfläche
	800	0,77	0,87	
200	400	0,86	0,92	Gussoberfläche
	800	0,72	0,84	

**Tabelle 4 — Oberflächenrauigkeitsfaktor für Walzstahl, stranggezogenes und geschmiedetes
Aluminium mit $R_m < 350$ MPa**

R_z μm	R_m MPa	$f_{SR,\sigma}$	$f_{SR,\tau}$	Beispiel
20	190	0,870	0,925	bearbeitete Oberfläche
	350	0,794	0,881	
80	190	0,809	0,890	gewalztes Blech, Strangpressteile oder grob bearbeitete Oberfläche
	350	0,698	0,826	
200	190	0,769	0,867	plasma- oder lasergeschnittene Oberfläche
	350	0,635	0,789	

Tabelle 5 — Oberflächenrauheitsfaktor für Aluminiumguss mit $R_m < 350$ MPa

R_z µm	R_m MPa	$f_{SR,\sigma}$	$f_{SR,\tau}$	Beispiel
20	190	0,881	0,911	bearbeitete Oberfläche
	350	0,812	0,859	
80	190	0,826	0,870	grob bearbeitete Oberfläche
	350	0,725	0,794	
200	190	0,790	0,843	Gussoberfläche
	350	0,668	0,751	

5.1.4.2 Einfluss des Spannungsgradienten

In dem in dieser Norm beschriebenen Nachweisverfahren ist die Erhöhung für die Ermüdungsfestigkeit, die aus dem Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche an der Bewertungsstelle stammt, nicht in den Ermüdungsfestigkeitswerten enthalten.

Die erhöhenden Effekte der lokalen Spannungsgradienten dürfen entsprechend der technischen Literatur, z. B. [2], berücksichtigt werden.

5.1.4.3 Einfluss der Oberflächenbehandlung

Bei diesem vereinfachten Nachweisverfahren werden die mit der Oberflächenbehandlung (z. B. Kugelstrahlen) verbundenen Vorzüge für die Ermüdungsfestigkeit nicht einbezogen. Die Vernachlässigung der erhöhenden Effekte der Oberflächenbehandlung ist ein konservativer Ansatz.

Falls erforderlich, dürfen die erhöhenden Effekte der Oberflächenbehandlung entsprechend der technischen Literatur, z. B. [2] berücksichtigt werden.

5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normal- und Schubspannungen

Für die Bestimmung der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit (Spannungsschwingbreite) für nicht geschweißte Bauteile müssen die Ermüdungsfestigkeitsfaktoren aus Tabelle 6 verwendet werden. Diese Ermüdungsfestigkeitsfaktoren beziehen sich auf $N_C = 10^6$ Spannungszyklen und ein Spannungsverhältnis von $R = -1$ und korrespondieren mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,5$ %.

Tabelle 6 — Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normal- und Schubspannungen bezogen auf $N_C = 10^6$ Spannungszyklen

Werkstoff	$f_{R,\sigma}$	$f_{R,\tau}^b$
Stahl (gewalzt und geschmiedet)	0,75	0,577
Gussstahl (GS)	0,57	0,577
Gusseisen (GJS)	0,57	0,65
Geschmiedetes Aluminium	0,6 ^a	0,577
Gussaluminium	0,6 ^a	0,75
^a Der Ermüdungsfestigkeitsfaktor repräsentiert nicht die Dauerfestigkeit von Aluminium. ^b Der Schubspannungsfaktor ist das Verhältnis aus Ermüdungsfestigkeit der Schubspannung zu Ermüdungsfestigkeit der Normalspannung.		

ANMERKUNG Für Gussstahl und duktilen Gusseisen werden die Ermüdungsfestigkeitsfaktoren $f_{R,\sigma}$ nach Tabelle 6 aus [2] abgeleitet (Ermüdungsfestigkeitsfaktor für vollständig umgekehrte Normalspannungen $f_{w,\sigma}$). Sie werden aus Amplituden in zulässige Spannungsschwingbreiten transformiert und beinhalten bereits den grundlegenden Teilbeiwert $j_D = 1,2$. Für Aluminium wird der in Tabelle 6 angegebene Ermüdungsfestigkeitsfaktor entsprechend der Prüfergebnisse bestimmt.

5.1.6 Mittelspannungsfaktor

Die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ berücksichtigen den Spannungseinfluss auf die Normal- und Schubspannungsschwingbreite und decken auch den Einfluss von Eigenspannungen aufgrund von Fertigungsverfahren von Schienenfahrzeug-Strukturen ab.

Der Mittelspannungsfaktor darf für jedes Belastungsschwingpiel eines Belastungskollektivs in Abhängigkeit von der aktuellen Mittelspannung und von der Spannungsschwingbreite variieren. Daher werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ nicht für die Bestimmung der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit in Bezug auf das Spannungsverhältnis von $R = -1$, sondern während der Daten-Vorverarbeitung im Betriebsfestigkeitsnachweis berücksichtigt (siehe 7.2 und 7.4). Das bedeutet, dass das Ergebnis der Rainflow-Zählung (Spannungszyklen mit variierenden Mittelspannungen) in ein Spannungsschwingbreitenkollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis von $R = -1$ übertragen wird, indem die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ verwendet werden.

Diese Mittelspannungsfaktoren hängen von der Mittelspannungsempfindlichkeit für Normalspannung M_σ und für Schubspannung M_τ , ab, die durch die Formeln (6) und (7) berechnet werden. Für diese Formeln werden die Werkstoffparameter a_m und b_m in Tabelle 7 angegeben.

$$M_\sigma = \frac{a_m}{1000} \times \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_m \quad (6)$$

$$M_\tau = M_\sigma \times f_{R,\tau} \quad (7)$$

Der Einfluss der Mittelspannung wird unter Verwendung eines Haigh-Diagramms bestimmt, das die Abhängigkeit der zulässigen Grenzspannung auf die Mittelspannung beschreibt. Die wesentlichen Parameter dieser Abhängigkeit sind die Mittelspannungsempfindlichkeiten M_σ und M_τ .

Zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ für die Normalspannungs-Schwingbreite und $f_{m,\tau}$ für die Schubspannungs-Schwingbreite sind die Formeln für konstante Spannungsverhältnisse in Anhang A angegeben. Dieser Anhang enthält auch das entsprechende Haigh-Diagramm für Normal- und Schubspannung der Ermüdungsfestigkeit als eine Funktion der Mittelspannung und der Spannungsschwingbreite.

Andere zugelassene Verfahren zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses dürfen ebenfalls berücksichtigt werden.

Tabelle 7 — Parameter für Mittelspannungsempfindlichkeit a_m und b_m

Werkstoff	a_m	b_m
Stahl (gewalzt und geschmiedet)	0,35	-0,1
Gussstahl (GS)	0,35	0,05
Gusseisen (GJS)	0,35	0,08
Geschmiedetes Aluminium	1,0	-0,04
Gussaluminium	1,0	0,2

5.1.7 Ermüdungsfestigkeit für Gussteile

Das ZfP-Niveau und das zugehörige Gussqualitätsniveau für Gussteile haben einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeitswerte für den lokalen Nachweispoint innerhalb des Gussbauteils. Der Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussteile f_c berücksichtigt die Auswirkungen der übrigen Defekte auf die Ermüdungsfestigkeit innerhalb des Gussbauteils. Für alle nicht gegossenen Bauteile ist $f_c = 1,0$.

Im Fall von strukturellen Gussteilen ist es erforderlich, die Qualitätsanforderungen bezüglich der zulässigen Niveaus von Volumen- oder Oberflächenfehlern zu spezifizieren, um die mechanischen Eigenschaften in Bereichen sicherzustellen, die hohen Spannungen ausgesetzt sind. Die zugehörigen mechanischen Eigenschaften müssen durch Prüfung entsprechend der Bauteil-Spezifikation kontrolliert werden.

Der Teilbeiwert für Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit muss in Übereinstimmung mit der Gussqualität gewählt werden, die im Gussbauteil erreicht wurde. Falls keine spezifischen Daten verfügbar sind, zeigt Tabelle 8 die empfohlenen Werte für lokale Bewertungsstellen des Gussteils in Abhängigkeit vom ZfP-Niveau während der Fertigung und dem nachgewiesenen Qualitätsniveau nach Anhang B.

Die Tabelle 8 gilt für Gussstahl und duktiles Gusseisen. Für Gussaluminiumteile darf ein ähnliches Verfahren angewandt werden, jedoch erfordert der Oberflächenzustand besondere Aufmerksamkeit.

Tabelle 8 — Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussteile f_C (informativ)

Volumetrische Prüfung mit ZfP		Inspektion des Oberflächenzustands		Ermüdungs- festigkeits- faktor für Stahl-Gussteile f_c	Ermüdungs- festigkeits- faktor für duktiler Formteile ^a f_c
Relevante Norm	Qualitäts- niveau nach ASTM	Relevante Norm	Qualitätsklasse		
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 Gussteile mit Bruchdehnung > 6 %

Die Spezifikation von Gussteilen erfordert die Sicherstellung entsprechender Gussqualität, um die Anwendbarkeit des in diesem Dokument definierten Nachweisverfahrens sicherzustellen. Der informative Anhang B gibt ein Beispiel für die Spezifikation eines volumetrischen Qualitätsniveaus.

Eine Erhöhung des Ermüdungsfestigkeitsfaktors f_C bis auf 1,0 ist anwendbar, wenn die Ermüdungsfestigkeitswerte innerhalb des Bauteils entsprechend zugehörigen Prüfungen mit Prüfkörpern aus diesen Bauteilbereichen und entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen für das Fertigungsverfahren nachgewiesen sind. Eine Erhöhung des Ermüdungsfestigkeitsfaktors f_C bis auf 1,0 ist ebenfalls anwendbar, wenn das höchste Qualitätsniveau des Oberflächen- und Volumenzustands erreicht ist.

Ein Nachweisverfahren, das die inneren Gussteildefekte (z. B. Hohlräume) in Bauteilen während der Spannungsbestimmung (z. B. ein FEA-Modell, das die Nenngeometrie repräsentiert) nicht berücksichtigt, sollte auf Gussteile mit Qualitätsniveau 3 oder besser beschränkt sein. Für Bauteile oder Teile von Bauteilen, die nicht nennenswert beansprucht werden, dürfen auch minderwertige Qualitätsniveaus angewandt werden. Für einen Nachweis solcher Gussteile sollte berücksichtigt werden, dass größere Defekte die tatsächlichen Spannungsverteilungen wesentlich beeinflussen dürfen (z. B. aufgrund lokal verkleinerter Querschnitte), und der Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Gussteile sollte entsprechend verkleinert werden.

5.1.8 Allgemeines zu Wöhlerlinien und Verfahren der Schädigungsregel

Für Wöhlerlinien nicht geschweißter Bauteile enthalten die Tabellen 9 bis 16 alle relevanten Informationen für die folgenden drei Ermüdungs-Schädigungsregeln (Schadensakkumulationshypothese oder Miner-Regeln):

- Elementare Version der Miner-Regel (Miner elementar mit Schwellenwert);
- modifizierte Version der Miner-Regel (Miner modifiziert);
- konsequente Version der Miner-Regel (Miner konsequent).

Bild 6 zeigt eine grundsätzliche Darstellung einer Wöhlerlinie für nicht geschweißte Bauteile für Normalspannung. Für Wöhlerlinien von Schubspannungen wird das Symbol σ durch das Symbol τ ersetzt.

Tabelle 9 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für geschmiedeten ferritischen und austenitischen Stahl für Normalspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	5	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	5	10^6 Spannungszyklen	9	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	5	10^6 Spannungszyklen	..a	..a	0,3
^a Für austenitischen Stahl beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 15. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 74 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.					

Tabelle 10 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für ferritischen und austenitischen Schmiedestahl, für Stahl- und Eisengussteile für Schubspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	8	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	8	10^6 Spannungszyklen	15	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	8	10^6 Spannungszyklen	..a	..a	0,3
^a Für austenitischen Stahl beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 25. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 83 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.					

Tabelle 11 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Stahlgussteile für Normalspannungen

Schadigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungs- summen- grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	7	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	7	10^6 Spannungs- zyklen	13	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	7	10^6 Spannungs- zyklen	„a	„a	0,3

^a Für austenitische Stahlgussteile beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 25. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 74 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.

Tabelle 12 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Eisen-Sphärogussteile für Normalspannungen

Schadigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungs- summen- grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	7	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	7	10^6 Spannungs- zyklen	13	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Konsequente Version der Miner-Regel	7	10^6 Spannungs- zyklen	„a	„a	1,0

^a Für austenitische Stahlgussteile beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 25. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 74 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.

Tabelle 13 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Stahlgussteile für Schubspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	8	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	8	10^6 Spannungs-zyklen	15	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	8	10^6 Spannungs-zyklen	-a	-a	0,3

^a Für austenitischen Stahl beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 25. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 83 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.

Tabelle 14 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Eisen-Sphärogussteile für Schubspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	8	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	8	10^6 Spannungs-zyklen	15	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Konsequente Version der Miner-Regel	8	10^6 Spannungs-zyklen	-a	-a	1,0

^a Für austenitischen Stahl beträgt die Neigung bis zum zweiten Knickpunkt bei 10^8 Spannungszyklen 25. Der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit beträgt 83 % der Festigkeit am ersten Knickpunkt.

Tabelle 15 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Aluminium und Gussaluminium für Normalspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	5	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	5	10^6 Spannungszyklen	9	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	5	10^6 Spannungszyklen	15	74 % der Festigkeit am Knickpunkt) ^a	0,3
^a Dies entspricht 10^8 Spannungszyklen.					

Tabelle 16 — Neigung und Knickpunkt von Wöhlerlinien für Aluminium und Gussaluminium für Schubspannungen

Schädigungsregel	Neigung vor dem Knickpunkt m_1	Knickpunkt-Position N_D	Neigung jenseits des Knickpunkts m_2	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummen-grenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Schwellenwert	8	-	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	8	10^6 Spannungszyklen	15	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,3
Konsequente Version der Miner-Regel	8	10^6 Spannungszyklen	25	83 % der Festigkeit am Knickpunkt) ^a	0,3
^a Dies entspricht 10^8 Spannungszyklen.					

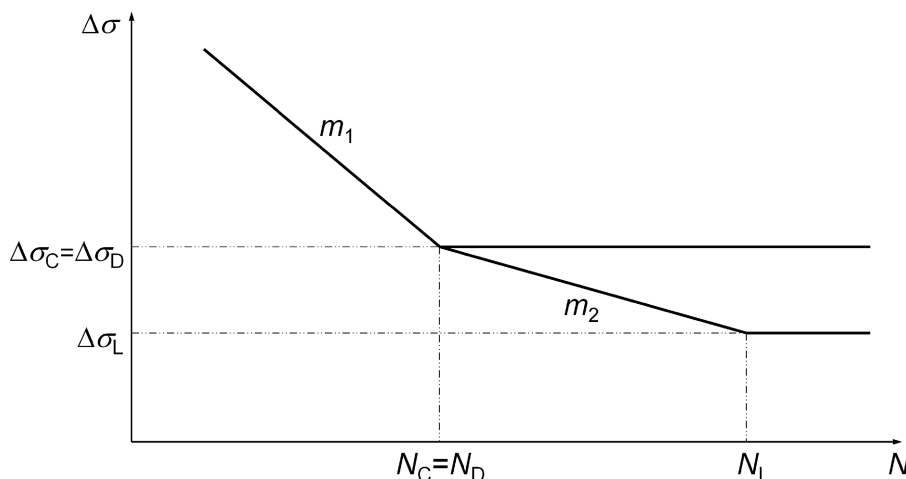


Bild 6 — Wöhlerlinie für nicht geschweißte Bauteile für Normalspannungen

5.2 Ermüdungsfestigkeit geschweißter Strukturen

5.2.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten wird die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeitswerte beschrieben, die für den Betriebsfestigkeitsnachweis geschweißter Strukturen aus Stahl und Aluminium bezüglich des Nennspannungskonzepts anwendbar ist.

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis (Ermüdungsnachweis) geschweißter Verbindungen nach dem Strukturspannungskonzept und dem Kerbspannungskonzept wird die Bestimmung des Ermüdungswiderstandes in den folgenden informativen Anhängen beschrieben:

- Anhang H für das Strukturspannungskonzept und
- Anhang I für das Kerbspannungskonzept.

5.2.2 Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien angegeben. Nach der Definition der internationalen Normen (z. B. EN 1993-1-9 und EN 1999-1-3) werden die Wöhlerlinien der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile durch die Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ bestimmt, bezogen auf:

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

Die Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ sind gültig bis zur Blechdicke

- $t_{ref} = 25$ mm für geschweißte Strukturen aus Stahl und
- $t_{ref} = 10$ mm für geschweißte Strukturen aus Aluminium.

Der Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ wird für Kerbfälle, die verschiedene Nahttypen repräsentieren, und für Verbindungsdetails geschweißter Strukturen an Schienenfahrzeugen aus Stahl und Aluminium in Abhängigkeit vom Qualitätsniveau nach EN 15085-3 (z. B. CP A, CP B, CP C1 usw.) und nach Belastungsrichtungen relativ zur Naht in den Tabellen in Anhang D und Anhang E angegeben.

Der Anstieg zwischen den verschiedenen Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_C$ beträgt für geschweißte Strukturen aus Stahl und Aluminium etwa 6 %.

5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit bezüglich der Spannungs-Schwingbreite $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ bezogen auf $N_C = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen bzw. auf das Spannungsverhältnis $R_\sigma = -1$ $R_\tau = -1$ werden mittels der folgenden Formeln beschrieben:

$$\Delta\sigma_R (N_C=2 \times 10^6, R_\sigma = -1) = \Delta\sigma_C \times f_{\text{thick}} \times f_{\text{res},\sigma} \times f_{\text{post}} \times f_{\text{M,NDT}} \quad (8)$$

$$\Delta\tau_R (N_C=2 \times 10^6, R_\tau = -1) = \Delta\tau_C \times f_{\text{res},\tau} \times f_{\text{M,NDT}} \quad (9)$$

Dabei ist

f_{thick}	Dickenkorrekturfaktor (siehe 5.2.4)
$f_{\text{res},\sigma}$	Eigenspannungsfaktor bei Normalspannungen für den Spannungsunterschied zwischen $R_\sigma = -1$ und $R_\sigma = 0,5$ unter Berücksichtigung des Eigenspannungszustands (siehe 5.2.5, Tabelle 17)
$f_{\text{res},\tau}$	Eigenspannungsfaktor bei Schubspannungen für den Spannungsunterschied zwischen $R_\tau = -1$ und $R_\tau = 0,5$ unter Berücksichtigung des Eigenspannungszustands (siehe 5.2.5, Tabelle 17)
f_{post}	Erhöhungsfaktor für Schweißnahtnachbehandlung (siehe 5.2.6)
$f_{\text{M,NDT}}$	Erhöhungsfaktor für ZfP-Stufe während der Fertigung (siehe 5.2.7)

5.2.4 Einfluss von Dicke und Biegung

Für geschweißte Strukturen aus Stahl mit der Dicke $t > 25$ mm und für geschweißte Strukturen aus Aluminium mit der Dicke $t > 10$ mm müssen die Werte der Ermüdungsfestigkeit mit einem Dickenkorrekturfaktor f_{thick} reduziert werden, wobei einer der folgenden Ansätze genutzt wird:

- Für geschweißte Strukturen aus Stahl mit Membranspannungen wird der Dickenkorrekturfaktor f_{thick} nach F.2 oder F.3 bestimmt.
- Für geschweißte Strukturen aus Aluminium mit Membranspannungen wird der Dickenkorrekturfaktor f_{thick} nach (10) und Bild 7 oder F.3 bestimmt.

$$f_{\text{thick}} = \left(\frac{10\text{mm}}{t} \right)^{0,1} \quad (10)$$

- Für geschweißte Strukturen aus Stahl und Aluminium mit Membran- und Biegespannung wird der Dickenkorrekturfaktor f_{thick} nach F.3 bestimmt.

- Für geschweißte Strukturen aus Stahl und Aluminium mit Membran- und/oder Biegespannung wird der Einfluss der Dicke auf Grundlage der Kerbspannungsberechnungen nach F.1 und Anhang I bestimmt.

Diese Verfahren dürfen nicht kombiniert werden.

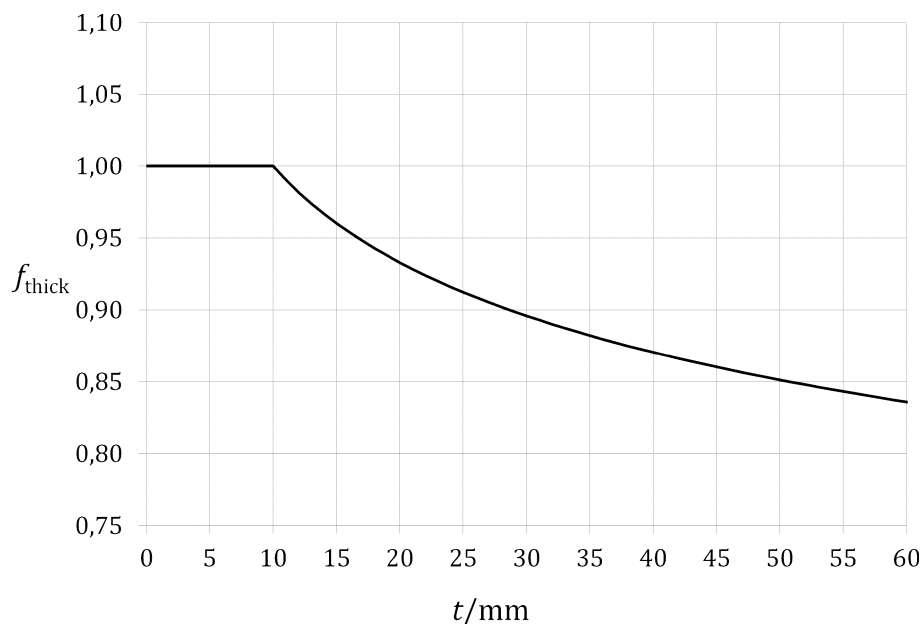


Bild 7 — Dickenkorrekturfaktor f_{thick} für geschweißte Strukturen aus Aluminium

5.2.5 Mittelspannungsfaktor und Eigenspannungsfaktor

Für geschweißte Strukturen werden die Einflüsse der Mittelspannung und der Eigenspannung durch die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ und die Eigenspannungsfaktoren $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ berücksichtigt.

Die Mittelspannungsfaktoren können für jedes Belastungsschwingpiel eines Belastungskollektivs in Abhängigkeit von der aktuellen Mittelspannung und von der Spannungsschwingbreite variieren. Daher werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ nicht für die Bestimmung der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit, sondern bei der Daten-Vorbereitung im Betriebsfestigkeitsnachweis berücksichtigt (siehe 7.2 und 7.4). Das bedeutet, dass das Ergebnis der Rainflow-Zählung (Zyklen der Spannungsschwingbreiten mit variierenden Mittelspannungen) in ein Spannungsschwingbreitenkollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis von $R = -1$ übertragen wird, indem die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ verwendet werden.

Für geschweißte Strukturen beziehen sich die Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ bzw. $\Delta\tau_C$ auf $R_\sigma = 0,5$ bzw. $R_\tau = 0,5$, und die Bauteil-Ermüdungsfestigkeiten beziehen sich auf $R_\sigma = -1$ bzw. $R_\tau = -1$. Der Spannungsunterschied zwischen dem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ und $R = -1$ hängt vom Eigenspannungszustand ab und wird durch die Eigenspannungsfaktoren $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ beschrieben, siehe Tabelle 17.

Die Faktoren für Mittel- und Eigenspannung hängen von der Mittelspannungsempfindlichkeit ab. Im Allgemeinen dürfen für alle geschweißten Bauteile in Schienenfahrzeug-Strukturen die Mittelspannungsempfindlichkeit der Normalspannung $M_\sigma = 0,15$ und die Mittelspannungsempfindlichkeit der Schubspannung $M_\tau = 0,09$ angewandt werden.

Wenn für die gesamte Serienproduktion ein niedriger Zugeigenspannungszustand oder ein Druckeigenspannungszustand in der Schweißung festgestellt wird, dürfen die Mittelspannungsempfindlichkeit der Normalspannung $M_\sigma = 0,3$ und die Mittelspannungsempfindlichkeit der Schubspannung $M_\tau = 0,17$ angewandt werden. Ein solch niedriger Eigenspannungszustand darf angenommen werden, wenn nach dem Schweißen ein Spannungsarmglühen durchgeführt wird.

Für die Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses werden die Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ für Normalspannung bzw. $f_{m,\tau}$ für Schubspannung entsprechend des angewandten Spannungsverhältnisses R_σ bzw. R_τ und der Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ bzw. M_τ entsprechend Anhang A bestimmt.

Andere zugelassene Verfahren zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses dürfen ebenfalls berücksichtigt werden.

Tabelle 17 — Mittelspannungsempfindlichkeit M_σ und M_τ und Eigenspannungsfaktor $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$

Eigenspannungszustand	M_σ	$f_{res,\sigma}$	M_τ	$f_{res,\tau}$
niedrige Zugeigenspannung, Druckeigenspannung	0,3	1,54	0,17	1,30
anderer Eigenspannungszustand	0,15	1,26	0,09	1,15

ANMERKUNG Die Eigenspannungsfaktoren $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ sind die inversen Werte der Mittelspannungsfaktoren $f_{m,\sigma}$ und $f_{m,\tau}$ für das Spannungsverhältnis $R = 0,5$ (siehe in (A.6) und (A.9)).

5.2.6 Erhöhungsfaktor für Schweißnahtnachbehandlung f_{post}

Techniken zur Schweißnahtnachbehandlung können den Ermüdungswiderstand am Nahtübergang als Folge einer Verbesserung in der Nahtübergangsgeometrie und des Eigenspannungszustands in der Schweißverbindung, erhöhen.

Der folgende Erhöhungsfaktor für die Schweißnahtnachbehandlung f_{post} kann je nach Verbesserungstechnik angewandt werden:

- Entgraten und WIG-Nachbehandlung $f_{post} = 1,3$
- mit der Blechoberfläche bündig geschliffene
Stumpfstoßverbindung $f_{post} = 1,3$
- Hämmern und Nadelstrahlen $f_{post} = 1,3$
(nur für geschweißte Stahlstrukturen)

Für geschweißte Verbindungen, auf die Behandlungstechniken zur Schweißnahtnachbehandlung angewandt wurden, ist die Obergrenze der Ermüdungsfestigkeit für geschweißte Stahlstrukturen 140 MPa.

Für Aluminiumstrukturen, auf die Behandlungstechniken zur Schweißnahtnachbehandlung angewandt wurden, sind die Ermüdungsfestigkeitswerte durch die Festigkeit der Wärmeeinflusszone begrenzt (siehe z. B. EN 755-2:2016, EN 485-2:2016, EN 586-2:1994, EN 1706:2013).

Eine Kombination aus Erhöhungsfaktoren für verschiedene Behandlungstechniken zur Schweißnahtnachbehandlung ist nicht zulässig.

Unter der Voraussetzung, dass die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens durch geeignete Ermüdungsprüfungen nachgewiesen wird, kann grundsätzlich ein größerer Erhöhungsfaktor für die Schweißnahtnachbehandlung verwendet werden. Die Auswertung solcher Ermüdungsprüfungen ist in der technischen Literatur oder in internationalen Normen oder Richtlinien (z.B. in [1] oder der BS 7608) angegeben.

Weitere Informationen zum Nutzen der Behandlungstechniken zur Schweißnahtnachbehandlung für die Ermüdungsfestigkeitsauslegung geschweißter Verbindungen finden sich in [6], [1], BS 7608 und [26].

Die Anwendung eines Erhöhungsfaktors in Bezug auf jegliche Schweißnahtnachbehandlung muss mit den Fertigungszeichnungen und Bauteilspezifikationen im Einklang stehen.

5.2.7 Erhöhungsfaktor für ZfP-Niveau während der Fertigung $f_{M,NDT}$

Ein Erhöhungsfaktor $f_{M,NDT}$ darf für Schweißnähte je nach ZfP-Niveau und Schweißnahtprüfklasse während der Fertigung berücksichtigt werden. Die für jede Schweißverbindung je nach definierter Schweißnahtgüteklasse anwendbaren Schweißnahtprüfklassen müssen den Anforderungen der EN 15085-3 folgen. In diesem Fall muss der Erhöhungsfaktor $f_{M,NDT} = 1$ verwendet werden.

Wenn während der Fertigung eine höhere als in der EN 15085-3 geforderte Schweißnahtprüfklasse angewandt wird, darf der Erhöhungsfaktor $f_{M,NDT}$ hinsichtlich der ZfP für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit um 6 % erhöht werden. Tabelle 18 zeigt den anwendbaren Erhöhungsfaktor $f_{M,NDT}$ in Abhängigkeit von der während der Fertigung angewandten Schweißnahtgüteklasse und Schweißnahtprüfklasse.

Tabelle 18 — Erhöhungsfaktor für ZfP-Niveau während der Fertigung $f_{M,NDT}$

Schweißnahtgüteklasse	Erforderliche Schweißnahtprüfklasse nach EN 15085-3	Während der Fertigung angewandte Schweißnahtprüfklasse	Erhöhungsfaktor $f_{M,NDT}$
CP B	CT 2	CT 1	1,06
		CT 2	1,0
CP C1	CT 2	CT 1	1,06
		CT 2	1,0
CP C2	CT 3	CT 2	1,06
		CT 3	1,0

5.2.8 Wöhlerlinien und Verfahren der Schädigungsregel

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch eine Reihe von $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ -Kurven und $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$ -Kurven (Wöhlerlinien) dargestellt, die den Kerbfällen der geschweißten Strukturen entsprechen. Jeder Kerbfall geschweißter Strukturen wird durch den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ (siehe Anhang D und Anhang E) gekennzeichnet.

Die Neigung m vor dem Knickpunkt und die Position des Knickpunkts für die Wöhlerlinien ist angegeben für Normal- und Schubspannungen

- geschweißter Strukturen aus Stahl in Anhang D und
- geschweißter Strukturen aus Aluminium in Anhang E.

Für geschweißte Strukturen aus Stahl hängt die Position des Knickpunkts vom Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C(N_C=2 \times 10^6)$ ab:

- Falls $\Delta\sigma_C \geq 112$ MPa, ist die Knickpunkt-Position bei $N_D = 2 \times 10^6$ Spannungszyklen.
- Falls $\Delta\sigma_C \leq 50$ MPa, ist die Knickpunkt-Position bei $N_D = 10^7$ Spannungszyklen.
- Für $112 \text{ MPa} > \Delta\sigma_C > 50 \text{ MPa}$ wird die Position des Knickpunkts durch folgende Gleichungen angegeben:

$$\Delta\sigma_{D,C} (R = 0,5) = \left(\frac{(\Delta\sigma_C / \text{MPa})^m}{285,6568} \right)^{1/(m-1,19843)} \text{ MPa} \quad (11)$$

$$N_D = N_C \times \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_{D,C}} \right)^m \quad (12)$$

$$\Delta\sigma_D (R = -1) = \Delta\sigma_R \times (\Delta\sigma_{D,C} / \Delta\sigma_C) \quad (13)$$

Für Normalspannung in geschweißten Aluminiumstrukturen ist die Knickpunkt-Position generell $N_D = 10^7$ Spannungszyklen.

Bild 8 enthält allgemeine Informationen über die Wöhlerlinie für die Normalspannungs-Schwingbreite mit der Spannungsschwingbreite am Knickpunkt für die Referenzwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{D,C}$ (Kurve B) und für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (Kurve A).

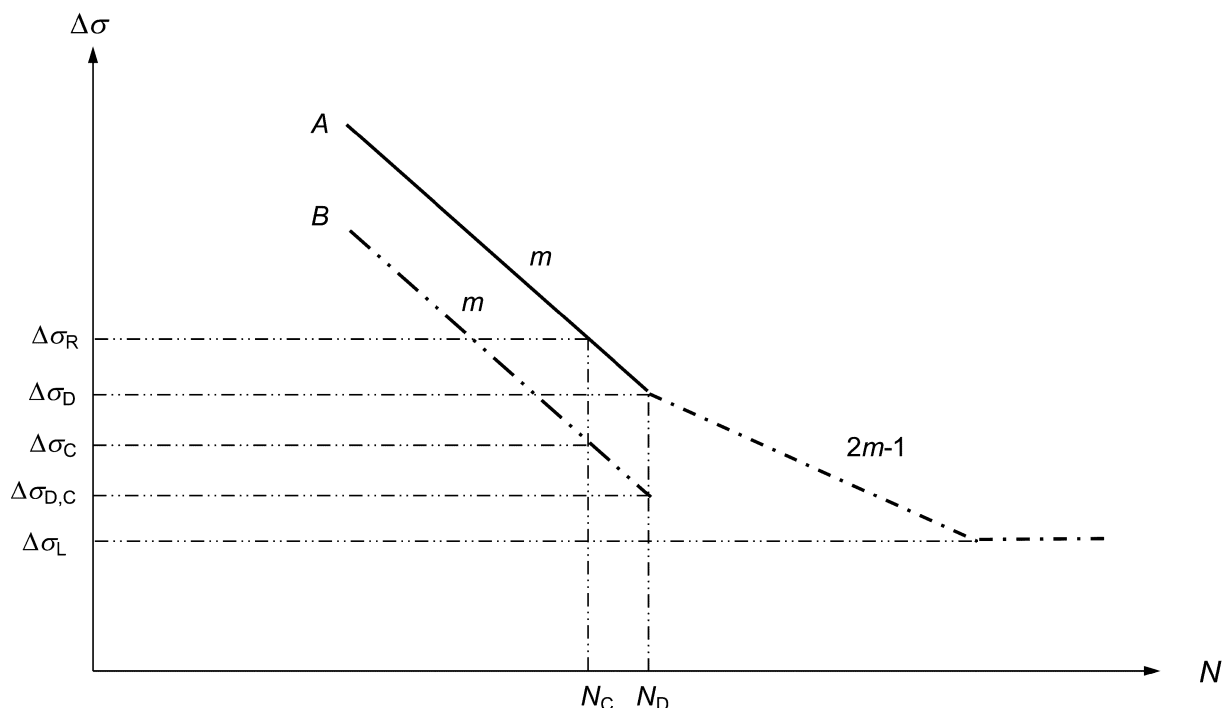


Bild 8 — Wöhlerlinie für den Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ und für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ mit Neigung jenseits des Knickpunkts und Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ nach der modifizierten Version der Miner-Regel

Für Schubspannung für alle Typen von Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium ist die Neigung vor dem Knickpunkt $m = 5$, und die Position des Knickpunkts tritt bei $N_D = 10^8$ Spannungszyklen auf.

Für die Zwecke der Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises muss eine Miner-Regel (Schädigungsregel) für geschweißte Strukturen aus Stahl und Aluminium angewandt werden. Es gibt drei alternative Versionen der Miner-Regel, und die relevanten Parameter jeder Version bezüglich des Betriebsfestigkeitsnachweises (Neigung jenseits des Knickpunkts, Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit für Spannungs-Schwingbreite und Schädigungssummengrenze) sind in Tabelle 19 angegeben.

Tabelle 19 — Neigung jenseits des Knickpunkts der Wöhlerlinie, Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit und Schädigungssummengrenze

Schädigungsregel	Neigung jenseits des Knickpunkts	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$	Schädigungssummengrenze $D_{m,min}$
Elementare Version der Miner-Regel mit Ermüdungsfestigkeit	-	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	1,0
Modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel)	$2 \times m - 1$	50 % der Festigkeit am Knickpunkt	0,5
Konsequente Version der Miner-Regel	-	-	0,5

5.2.9 Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch separate, experimentelle Prüfungen

Unter der Voraussetzung, dass die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens durch geeignete experimentelle Prüfungen nachgewiesen wird, kann ein größeres Ermüdungsfestigkeitsniveau verwendet werden. Die Bewertung solcher Ermüdungsprüfungen ist in der technischen Literatur und in internationalen Normen oder Richtlinien (z. B. [1], BS 7608) angegeben.

6 Konzept der Teilbeiwerte

6.1 Allgemeines

Um eine angemessene Überlebenswahrscheinlichkeit für die Anwendungen von Schienenfahrzeug-Produkten zu erreichen, müssen Teilbeiwerte verwendet werden, um Unsicherheiten während des Validierungsverfahrens abzudecken und Folgen aus Bauteilversagen sowie der Zugänglichkeit für Inspektionen während der Wartung zu berücksichtigen. Teilbeiwerte werden für die Ableitung des Spannungskollektivs und in Bezug auf die Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit angewandt.

Die in dieser Norm angegebene Anwendung des Teilbeiwerte-Konzepts für den Betriebsfestigkeitsnachweis ersetzt die Definitionen bezüglich der Sicherheit in EN 15085-3.

6.2 Teilbeiwert für Spannungskollektiv γ_L

Das Spannungskollektiv darf aus den normativen Belastungen, aus Simulationen oder aus Messungen abgeleitet werden. Es muss jegliche notwendigen Zuschläge enthalten, um Unsicherheiten in diesen Werten zu berücksichtigen. Der Zuschlag wird berücksichtigt, indem der folgende Teilbeiwert γ_L angewandt wird.

Für Spannungen, die aus normativen Belastungen nach Definition in der EN 12663 für Wagenkasten-Strukturen und in der EN 13749 für Drehgestellrahmen-Strukturen abgeleitet werden, ist ein Teilbeiwert $\gamma_L = 1,0$ anwendbar. Wenn das Spannungskollektiv von den normativen Lasten konstanter Amplitude (z. B. wie in EN 12663 und EN 13749 angegeben) abgeleitet wird, müssen die Kombinationen dieser Belastungen und die angenommene Anzahl der Spannungszyklen für die Auslegungsdauer repräsentativ sein.

Falls das Spannungskollektiv aus Simulationen abgeleitet wird, muss ein angemessener Teilbeiwert γ_L in Abhängigkeit von den Unsicherheiten der Simulation, z. B. Mehrkörper-Simulation, berücksichtigt werden.

Falls das Spannungskollektiv aus Steckenmessungen abgeleitet wird, muss ein angemessener Teilbeiwert γ_{LA} definiert werden, um die Unsicherheiten aus diesen Messungen abzudecken. Falls diese Prüfungen:

- auf repräsentativen Strecken durchgeführt werden,
- unter normalen Betriebsbedingungen durchgeführt werden,
- mit repräsentativer Zuladung durchgeführt werden und
- von ausreichender Länge sind,

ist ein Teilbeiwert $\gamma_{LA} = 1,05$ zur Berücksichtigung aller übrigen Unsicherheiten der Messungen ausreichend.

ANMERKUNG 1 Falls der Zuladungszustand während der Streckenmessung die normale Zuladung im Auslegungsfall entsprechend der Definition in EN 15663 und dem Verweis in EN 12663 und EN 13749 ist, wird das als konservativer Ansatz für die Nutzlast angesehen. Dies deckt auch die Einflüsse von Nutzlaständerungen, insbesondere bei Pendlerzügen ab. Falls validierte Zuladungskollektive verfügbar sind, wird eine Kombination aus Messungen mit verschiedenen Zuladungen als repräsentativ angesehen, wenn zusätzliche Einflüssen von Zuladungsänderungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 2 Eine ausreichende Länge der Messung ist gegeben, wenn

- die Gesamtlänge der Messungen mindestens 0,01 % der Lebensdauer-Kilometerleistung beträgt oder
- das gesamte Streckennetz des betreffenden Betreibers 3 Mal gemessen wird, (was für geschlossene Schienennetze sinnvoll wäre).

6.3 Teilbeiwerte für Ermüdungsfestigkeit

6.3.1 Teilbeiwert für Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit γ_M

Der Teilbeiwert γ_M für den Auslegungswert der Ermüdungsfestigkeit ist gegeben durch

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

Dabei ist

$\gamma_{M,S}$	Teilbeiwert für das Sicherheitsbedürfnis (siehe 6.3.2)
$\gamma_{M,I}$	Teilbeiwert für Prüfung während der Fertigung (siehe 6.3.3)
$\gamma_{M,V}$	Teilbeiwert für den Grad der Validierung (siehe 6.3.4)

Diese Teilbeiwerte werden in den folgenden Abschnitten erklärt.

Der Teilbeiwert für die Auslegungswerte der Ermüdungsfestigkeit γ_M ist auf einem Minimalwert von 1,0 begrenzt. Ein niedrigerer Wert als 1,0 ist ohne zusätzliche technische Begründung nicht zulässig. Der Wert von γ_M wird auf das nächste Zehntel gerundet.

Alternativ zur Gleichung (8) können die Werte für den Teilbeiwert γ_M , die in Tabelle 20 angegeben sind, angewandt werden.

Tabelle 20 — Teilbeiwert für Auslegungswert der Ermüdungsfestigkeit γ_M

	Teilbeiwert $\gamma_{M,v}$ für Grad des Validierungsprozesses	Teilbeiwert γ_M		
		Sicherheits- bedürfnis „hoch“ $\gamma_{M,S} = 1,2$	Sicherheits- bedürfnis „mittel“ $\gamma_{M,S} = 1,1$	Sicherheits- bedürfnis „gering“ $\gamma_{M,S} = 1,0$
Regelmäßige Inspektion $\gamma_{M,I} = 0,9$	1,3	1,4	1,3	1,2
	1,2	1,3	1,2	1,1
	1,1	1,2	1,1	1,0
	1,0	1,1	1,0	1,0
Keine regelmäßige Inspektion $\gamma_{M,I} = 1,0$	1,3	1,5	1,4	1,3
	1,2	1,4	1,3	1,2
	1,1	1,3	1,2	1,1
	1,0	1,2	1,1	1,0

6.3.2 Teilbeiwert für Sicherheitsbedürfnis $\gamma_{M,S}$

Der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ hängt von den Sicherheitsbedürfnissen ab, die allgemein den Definitionen der EN 15085-3 (Abschnitt 4.5 und Anhang G) mit den folgenden Modifikationen entsprechen.

Die Sicherheitsbedürfnisse werden wie folgt nach EN 15085-3 unterschieden:

- a) Sicherheitsbedürfnis niedrig
Versagen der Schweißverbindung führt nicht zu irgendeiner direkten Beeinträchtigung der Gesamtfunktion. Folgeereignisse mit Personenverletzungen sind unwahrscheinlich.
- b) Sicherheitsbedürfnis mittel
Versagen der Schweißverbindung führt zu einer Beeinträchtigung der Gesamtfunktion oder darf zu Folgeereignissen mit Personenverletzungen führen, aber:
 - vor dem Versagen der Struktur wird ein Hinweis gegeben, oder
 - die Konstruktion des Bauteils bietet einen alternativen Lastpfad (nicht statisch bestimmtes System oder redundante Bauteile) oder
 - die Konstruktion der Bauteile enthält ein Konstruktionsdetail, das die Ausbreitung eines Risses verhindert.
- c) Sicherheitsbedürfnis hoch
Versagen der Schweißverbindung führt zu Folgeereignissen mit Personenverletzungen und Ausfall der Gesamtfunktion, und keines der Kriterien des mittleren Sicherheitsbedürfnisses trifft zu (siehe Aufzählung).

ANMERKUNG Als eine Abweichung von der EN 15085-3 wird der Einfluss der Möglichkeit, einen Riss bei der regulären Inspektion zu erkennen, von der Sicherheits-Kategorisierung ausgeschlossen, jedoch wird ein Teilbeiwert $\gamma_{M,I}$, der diesen Effekt berücksichtigt, in diese Norm eingeschlossen.

Abhängig vom Sicherheitsbedürfnis wird der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ in Tabelle 21 angegeben. Dieser Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ gilt für Grundmaterial und für Schweißungen.

Tabelle 21 — Teilbeiwert für Sicherheitsbedürfnis $\gamma_{M,S}$

Sicherheitsbedürfnis	Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$
Gering	1,0
Mittel	1,1
Hoch	1,2

6.3.3 Teilbeiwert für die Inspektion während der Instandhaltung $\gamma_{M,I}$

Instandhaltungsverfahren für Schienenfahrzeug-Produkte stellen üblicherweise sicher, dass Ermüdungsrisse erkannt werden, bevor diese zu einem katastrophalen Strukturversagen führen. Außer in bestimmten Fällen kann daher die regelmäßige Inspektion in den Festigkeitsnachweis eingehen.

Tabelle 22 zeigt den anwendbaren Inspektionsfaktor $\gamma_{M,I}$, abhängig von der Anwendbarkeit „regelmäßige Inspektion“. Der Inspektionsfaktor $\gamma_{M,I}$ ist sowohl für Schweißungen wie auch für Grundmaterial anwendbar.

Keine regelmäßige Inspektion darf für ein Strukturdetail angesetzt werden, bei dem der Lastpfad während der Inspektion unzugänglich ist.

Ist eine Schweißverbindung oder ein Strukturdetail jedoch von einer Seite zugänglich, kann die Inspektion der zugänglichen Oberfläche zur Erkennung lokaler Schäden als ausreichend angesehen werden, bevor Strukturversagen des Bauteils eintritt.

Für Strukturen innerhalb des Anwendungsbereichs dieser Norm ist der folgende Inspektionsfaktor gültig, wenn das Inspektionsintervall nicht länger als ein Drittel der Auslegungslbensdauer ist und das Strukturdetail bei der Instandhaltung repariert werden kann. Wenn dieser Inspektionsfaktor für spezielle Bereiche verwendet wird, müssen die Inspektionsanforderungen für diese Bereiche in der entsprechenden Instandhaltungsdokumentation spezifiziert werden.

Tabelle 22 — Teilbeiwert für die Inspektion während der Instandhaltung $\gamma_{M,I}$

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

6.3.4 Teilbeiwert für den Grad des Validierungsprozesses $\gamma_{M,V}$

Der Grad des Validierungsprozesses hat einen Einfluss auf den Teilbeiwert für den Auslegungswert.

Wenn der Validierungsplan der Struktur aus dem vollständigen Validierungsprozess nach Definition in der relevanten Norm besteht, z. B. in EN 15827, EN 13749 und EN 12663-1, dann ist der Teilbeiwert $\gamma_{M,V} = 1,0$.

Wenn der Validierungsplan ein eingeschränktes Verfahren beinhaltet, muss der Teilbeiwert $\gamma_{M,V}$ mittels der folgenden Formel mit den Werten in Tabelle 23 bestimmt werden:

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

Dabei ist

$\gamma_{M,V,ST}$ Teilbeiwert zur Berücksichtigung der Validierung von berechneten Spannungsdaten durch gemessene Spannungsdaten

$\gamma_{M,V,FT}$ Teilbeiwert zur Berücksichtigung der Validierung des Ermüdungsverhaltens durch Ermüdungsprüfung

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

Tabelle 23 — Teilbeiwert für Grad des Validierungsprozesses

	Teilbeiwert mit vollständigem Validierungsprozess nach relevanter Norm	Teilbeiwert im Fall eines eingeschränkten Validierungsprozesses
$\gamma_{M,V,ST}^a$	1,0	1,1
$\gamma_{M,V,FT}^b$	1,0	1,2
^a $\gamma_{M,V,ST} = 1,0$ darf, wenn die Spannungsbestimmung (z. B. die FEA) durch eine statische Laborprüfung validiert wird, und für die Bewertung der gemessenen lokalen Spannungsdaten angewandt werden. ^b $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ darf angewandt werden, wenn der berechnete Betriebsfestigkeitsnachweis durch eine Labor-Ermüdungsfestigkeitsprüfung validiert wird, oder wenn eine Ermüdungsfestigkeitsprüfung für den zu prüfenden Bestandteil nicht zwingend vorgeschrieben ist.		

Für Konstruktionsmerkmale an Wagenkästen, bei denen die in EN 12663-1 und EN 12663-2 angegebenen Auslegungslastfälle für den Betriebsfestigkeitsnachweis ausreichend sind, gilt üblicherweise die Fußnote^b, und $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ darf angewandt werden.

Wenn für Anbauteile an Drehgestellrahmen und Wagenkästen von der anwendbaren Norm keine Laborprüfungen gefordert werden, gelten für den Nachweis dieser Bauteile üblicherweise die Fußnoten^a und ^b, und $\gamma_{M,V,ST} = 1,0$ und $\gamma_{M,V,FT} = 1,0$ dürfen angewandt werden.

Wo die Konstruktion eine Weiterentwicklung eines früheren Produkts ist, dürfen jegliche Prüfdaten, die noch anwendbar sind, als Validierung des überarbeiteten Produkts verwendet werden, und der zugehörige Teilbeiwert ist $\gamma_{M,V} = 1,0$.

7 Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises

7.1 Allgemeines

Das folgende Kapitel beschreibt das Verfahren zur Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises. Für eine vollständige Festigkeitsbewertung muss zusätzlich zum Betriebsfestigkeitsnachweis ein statischer Festigkeitsnachweis durchgeführt werden.

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis muss eine der folgenden drei Schädigungsregeln (Schadensakkumulationshypothese der Miner-Regeln) unter Verwendung der in 5.1.8 und 5.2.8 definierten Parameter angewandt werden:

- elementare Version der Miner-Regel mit Dauerfestigkeit (Miner elementar mit Schwellenwert),
- modifizierte Version der Miner-Regel (Haibach-Methode der Miner-Regel oder Miner modifiziert),
- konsequente Version der Miner-Regel (Miner konsequent).

Im folgenden Nachweisverfahren sind die Formeln für die Normalspannungskomponente definiert. Diese Formeln müssen auch auf die Schubspannungskomponenten angewandt werden, indem σ durch τ ersetzt wird.

7.2 Nachweisverfahren

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis nicht geschweißter und geschweißter Strukturen wird die Anwendung des folgenden Verfahrens empfohlen.

Das Nachweisverfahren umfasst die folgenden Schritte:

- Bestimmung der transienten Spannungsverläufe (durch Berechnung oder Messung);
- Daten-Vorbehandlung für jede einzelne Spannungskomponente:
 - Aufbereitung (z. B. Fehlerkorrektur (Spitzen), Versatzkorrektur, usw.);
 - Anwendung eines Teilbeiwerts für das Spannungskollektiv γ_L ;
 - Rainflow-Zählung (Ergebnis: Matrix-Spannungsschwingbreite über Mittelspannung mit Zyklenzählung);
 - Korrektur der Mittelspannung nach Anhang A. (Ergebnis: Spannungsschwingbreitenkollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis $R = -1$, sortiert in absteigender Reihenfolge, somit $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{i+1}$);
 - Extrapolation auf die Auslegungslbensdauer (Ergebnis: Spannungsschwingbreitenkollektiv, das für die gesamte Auslegungslbensdauer relevant ist).
- Schädigungsberechnung für jede Spannungskomponente:
 - Bestimmung des Formfaktors des Spannungskollektivs A_{eq}
 - Bestimmung der zulässigen Schädigungssumme D_m
 - Bestimmung des Auslastungsgrads für die Spannungskomponente a_c
- Betriebsfestigkeitsnachweis für jede vorhandene Spannungskomponente und für den mehrachsigen Spannungszustand (kombinierter Auslastungsgrad der Spannungskomponente).

7.3 Spannungsermittlung

Im Allgemeinen müssen die Spannungszustände durch orientierte Spannungskomponenten (σ_x , σ_y , τ_{xy}) angegeben werden.

Für den Nachweis von Schweißnähten muss die Orientierung an der Schweißnaht ausgerichtet sein. σ_x und σ_y müssen senkrecht bzw. parallel zur Schweißnaht orientiert sein.

Für den Nachweis des Grundmaterials muss die Orientierung an der Hauptspannungsrichtung ausgerichtet werden. Allerdings ist das in den folgenden Abschnitten definierte Nachweisverfahren nicht invariant gegenüber der Orientierung. Wenn keine bevorzugte Nachweisrichtung ermittelt werden darf, wird das Verfahren der kritischen Schnittebenen empfohlen, um die ungünstigste Orientierung zu bestimmen.

7.4 Daten-Vorbereitung

7.4.1 Aufbereitung

Besonders im Fall von gemessenen Spannungsdaten müssen die Rohdaten auf Plausibilität und mögliche Messfehler kontrolliert werden. Spitzen oder Versätze der Mittelspannung müssen korrigiert werden.

Im Fall von Spannungsdaten, die durch Berechnung bestimmt wurden, ist eine Datenaufbereitung üblicherweise nicht erforderlich. Allerdings sollten unrealistische Spitzen (z. B. aufgrund numerischer Singularitäten und Gitternetz-Übergängen, Kontaktdefinitionen, konzentrierte Belastungen, usw.) aus dem Nachweis ausgenommen werden.

7.4.2 Anwendung eines Teilbeiwertes für das Spannungskollektiv γ_L

Die aufbereiteten Daten Spannungsverläufe werden mit dem anwendbaren Teilbeiwert für das Spannungskollektiv γ_L multipliziert.

7.4.3 Zählung

Der transiente Spannungsverlauf jeder Spannungskomponente wird einem Zählverfahren wie der Rainflow-Zählung unterworfen.

Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein Spannungsschwingbreitenkollektiv $\Delta\sigma_{i,RF}$, bezogen auf die jeweiligen Mittelspannungen $\sigma_{m,i,RF}$ und Zyklenzahlen.

ANMERKUNG Es ist üblich, dieses als Rainflow-Matrix darzustellen.

7.4.4 Mittelspannungsanpassung

Jedes Element des Zählungsergebnisses muss an ein Spannungsverhältnis von $R = -1$ angepasst werden. Die angepassten Spannungsschwingbreiten werden nach folgender Formel bestimmt:

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{i,RF} / f_{m,\sigma} \quad (16)$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_i$	Normalspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i bezogen auf ein Spannungsverhältnis $R = -1$
$\Delta\sigma_{i,RF}$	Normalspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i als Ergebnis der Rainflow-Zählung
$f_{m,\sigma}$	Mittelspannungsfaktor für Normalspannung definiert in 5.1.6 und 5.2.6; Bestimmung nach Anhang A mit Spannungsamplitude $\sigma_{a,i,RF}$ und Mittelspannung $\sigma_{m,i,RF}$ des Zählelements

7.4.5 Auslassung

Nach der Zählung und der Korrektur der Mittelspannung des Spannungskollektivs werden alle Zyklen mit einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_{OM}$ ausgelassen. Die Auslassungsgrenze $\Delta\sigma_{OM}$ ist durch die folgende Formel definiert:

$$\Delta\sigma_{OM} = 0,2 \times \Delta\sigma_D \quad (17)$$

ANMERKUNG Diese Spannungszyklen mit kleinen Spannungsschwingbreiten tragen nicht maßgeblich zur Schädigung bei.

Spannungsspektren, bei denen die maximale Spannungsschwingbreite unter der Auslassungsgrenze liegt, müssen nicht bewertet werden. Die Daten-Vorbereitung ergibt ein Spannungskollektiv mit konstantem Spannungsverhältnis, das in einer Darstellung wie in Bild 9 aufgezeigt werden kann.

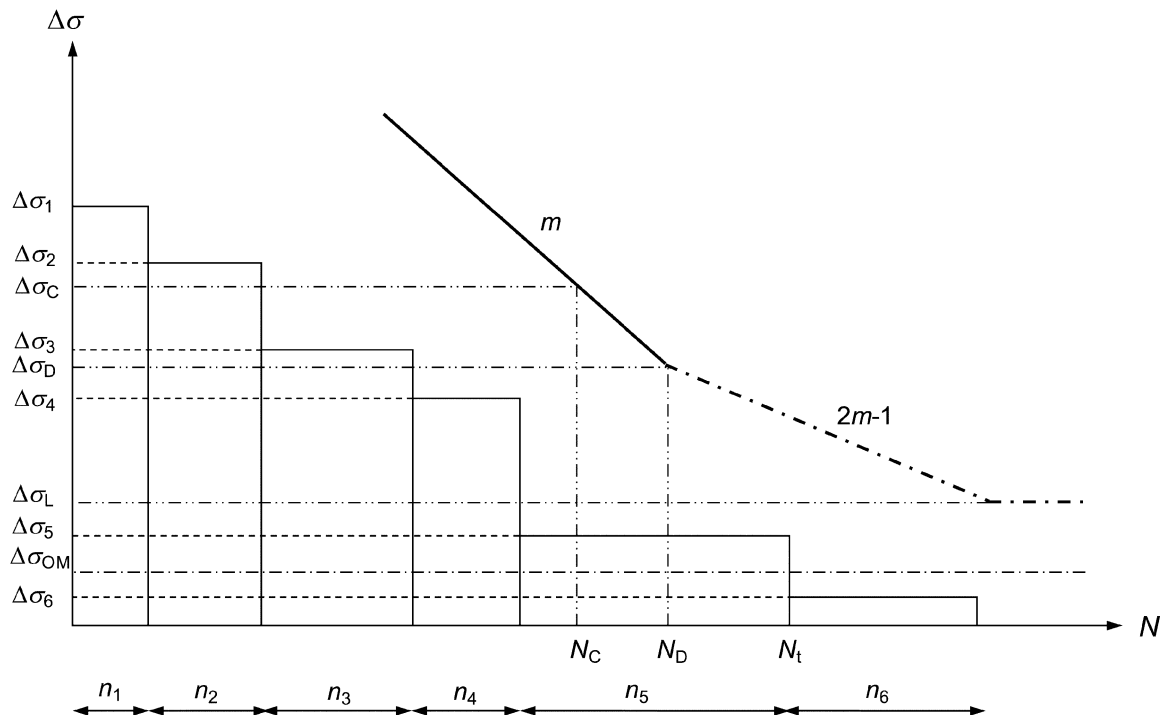


Bild 9 — Beispiel eines Spannungskollektivs für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit und Wöhlerlinie bezogen auf die modifizierte Version der Miner-Regel

7.5 Schadensberechnung für jede einzelne Spannungskomponente

7.5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Formeln der Schädigungsrechnung für die modifizierte Version der Miner-Regel (Miner modifiziert) definiert. Diese Version der Miner-Regel ist eine vereinfachte Näherung der konsequenten Version der Miner-Regel (Miner konsequent).

Für die Anwendung der konsequenten Miner-Regel und der elementaren Miner-Regel ohne Ermüdungsfestigkeit sind die Gleichungen für die Schädigungsrechnung in der technischen Literatur (z. B. in [2]) angegeben.

7.5.2 Bestimmung für den Formfaktor des Spannungskollektivs

Der Formfaktor des Spannungskollektivs A_{eq} berücksichtigt, dass das Spannungskollektiv kein Kollektiv einer konstanten Spannungsschwingbreite ist. Er wird für die Bestimmung der zulässigen Schädigungssummes verwendet.

Der Formfaktor des Spannungskollektivs ist eine Funktion der Spannungsschwingbreite und der Zyklenzählung jeder Spannungsschwingbreitenstufe im Verhältnis zur maximalen Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_1$ und der Gesamtzahl der Zyklen im gegebenen Spannungskollektiv. Daher ist er unabhängig von den Absolutwerten des Spannungskollektivs:

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

Dabei ist

$\Delta\sigma_i$ Normalspannungsschwingbreite der Spannungskollektivstufe i , bezogen auf ein Spannungsverhältnis $R = -1$

$\Delta\sigma_1$ größte Normalspannungsschwingbreite des Spannungskollektivs

N_t Gesamtzahl der Zyklen im gegebenen Spannungskollektiv mit $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{OM}$

j Gesamtzahl der Stufen des Spannungskollektivs, für die zusätzlich gilt:
 $x_{it} \times \Delta\sigma_i > \Delta\sigma_L$

i Nummer der Stufen eines Spannungskollektivs

m Wöhlerlinienexponent

n_i Anzahl der Zyklen der Spannungsschwingbreitenstufe i des Spannungskollektivs

7.5.3 Bestimmung der zulässigen Schädigungssumme

Die zulässige Schädigungssumme D_m , hier definiert mit einer Obergrenze von 1 und einer Untergrenze von $D_{m,min}$, ist nur zusammen mit der nachfolgenden Ermittlung der Schädigungssumme des Spannungskollektivs D_{it} nach Definition in 7.5.4 anwendbar.

Die zulässige Schädigungssumme D_m ist nach folgenden Formeln definiert:

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

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

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

7.5.4 Bestimmung der Schädigungssumme und des Skalierungsfaktors zum Erreichen einer zulässigen Schädigungssumme

Die Schädigungssumme des Spannungskollektivs D_{it} für ein Spannungskollektiv wird nach der Formel (22) bestimmt.

Mit einem Skalierungsfaktor $x_{it} = 1$ ergibt diese Formel die Schädigungssumme des gegebenen Kollektivs.

Um die Erweiterung des Spannungskollektivs bis zum Erreichen der zulässigen Schädigungssumme zu ermitteln, muss das folgende, iterative Verfahren angewandt werden:

- Die Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ des Spannungskollektivs werden mit dem Skalierungsfaktor x_{it} skaliert (siehe Bild 10).
- Die Schädigungssumme des Spannungskollektivs D_{it} wird mit den skalierten Spannungsschwingbreiten $x_{it} \times \Delta\sigma_i$ bestimmt.
- Wenn die Schädigungssumme des Spannungskollektivs D_{it} mit der zulässigen Schädigungssumme D_m ($D_{it} \equiv D_m$) identisch ist, dann ist der zugehörige Skalierungsfaktor x_{it} identisch mit x_{Dm} ($x_{it} \equiv x_{Dm}$).