DIN EN 17149-3:2025-05 (D)

Bahnanwendungen - Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen - Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis; Deutsche Fassung EN 17149-3:2025

Inhalt

Seite

Europäisches Vorwort ... 12

Einleitung ... 13

1 Anwendungsbereich ... 14

2 Normative Verweisungen ... 14

3 Begriffe ... 14

4 Ermittlung der Spannung ... 14
4.1 Allgemeines ... 14
4.2 Grundwerkstoff ... 15
4.3 Schweißverbindung ... 15
4.3.1 Modifizierte Nennspannungen ... 15
4.3.2 Strukturspannungen und Kerbspannungen ... 15

5 Ermüdungsfestigkeit ... 15
5.1 Grundwerkstoff ... 15
5.1.1 Allgemeines ... 15
5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ ... 16
5.1.3 Werkstoffeigenschaften ... 16
5.1.4 Konstruktionsparameter ... 18
5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normalspannungen $f_{R,\sigma}$ und für Schubspannungen $f_{R,\tau}$ ... 20
5.1.6 Korrekturfaktor für Gussteile $f_{R,C}$ ... 21
5.1.7 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel ... 22
5.2 Schweißverbindungen ... 24
5.2.1 Allgemeines ... 24
5.2.2 Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ ... 24
5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ ... 25
5.2.4 Einfluss der Dicke f_{thick} und Biegung ... 25
5.2.5 Eigenspannungsfaktor $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ ... 26
5.2.6 Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung f_{post} ... 26
5.2.7 Bewertungsgruppenfaktor f_{QL} ... 28
5.2.8 Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{CT} ... 28
5.2.9 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel ... 29
5.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Grundwerkstoff und Schweißverbindungen durch Laborversuche ... 30

6 Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten ... 31
6.1 Allgemeines ... 31
6.2 Teilbeiwert für Lasten γ_L ... 32
6.3 Teilbeiwert für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit γ_M ... 32
6.3.1 Allgemeines ... 32
6.3.2 Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$ ... 33
6.3.3 Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung $\gamma_{M,I}$ ... 34
6.3.4 Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$ ... 35

7 Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises ... 35
7.1 Allgemeines ... 35
7.2 Spannungsermittlung ... 36
7.3 Bestimmung des Bemessungsspannungskollektivs ... 36

7.3.1 Konditionierung ... 36
7.3.2 Anpassung der Spannungshistorie ... 37
7.3.3 Zählung ... 37
7.3.4 Mittelspannungsanpassung ... 37
7.3.5 Omission ... 38
7.4 Schädigungsberechnung für jede einzelne Spannungskomponente ... 39
7.4.1 Allgemeines ... 39
7.4.2 Bestimmung des Spannungskollektiv-Formfaktors A_{eq} ... 40
7.4.3 Bestimmung der zulässigen Miner-Summe D_m ... 40
7.4.4 Bestimmung der Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente U_c ... 40
7.5 Betriebsfestigkeitsnachweis ... 42
7.6 Verfahren der kritischen Schnittebene ... 43

Anhang A (informativ) Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen ... 45
A.1 Allgemeines ... 45
A.2 Mittelspannungsempfindlichkeit ... 45
A.2.1 Grundwerkstoff ... 45
A.2.2 Schweißverbindungen ... 46
A.3 Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren ... 46

Anhang B (informativ) Spezifikationsbeispiel für zulässige volumetrische Fehler in Gussteilen aus Stahl, Eisen und Aluminium ... 50
B.1 Allgemeines ... 50

Anhang C (informativ) Werkstofffaktoren für Grundwerkstoff ... 52

Anhang D (normativ) Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Schweißverbindungen nach dem Nennspannungsverfahren ... 54
D.1 Erläuterung der Tabellen für Fat-Klassen ... 54
D.1.1 Allgemeines ... 54
D.1.2 Nummer und Kennzeichnung nach EN 15085-3:2022+A1:2023, Tabelle B.1 ... 54
D.1.3 Skizze des Schweißstoßes ... 54
D.1.4 Schweißstoßspezifische Anforderungen ... 55
D.1.5 Potenzieller Rissausgangspunkt ... 55
D.1.6 Durchführbarkeit der Prüfung ... 55
D.1.7 Relevante Dicke für die Beurteilung einer Schweißnaht ... 55
D.1.8 Werkstoff ... 56
D.1.9 Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ ... 56
D.1.10 Exponent m und Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D ... 56
D.1.11 Dickenkorrekturexponenten $n_{\sigma,\perp}$, $n_{\sigma,||}$ und n_τ ... 56
D.1.12 Untere Grenze der Blechdicke für die Dickenkorrektur t_{min} ... 56
D.1.13 Parameter α_{bend}, der für die Bestimmung von f_{bend} verwendet wird ... 56
D.2 Tabellen mit Fat-Klassen für Schweißverbindungen ... 57
D.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit anhand von vergleichenden Kerbfallmodellen ... 101

Anhang E (informativ) Dicke und Einfluss der Biegung auf Nenn- und Strukturspannungsansätze bei Schweißverbindungen ... 102
E.1 Allgemeines ... 102
E.2 Einflussgrößen ... 102
E.2.1 Dicken-Korrekturfaktor f_{thick} ... 102
E.2.2 Bonusfaktor für Biegung f_{bend} ... 104
E.3 Methoden zur Anwendung von f_{bend} im Nachweisvorgang ... 105
E.3.1 Allgemeines ... 105
E.3.2 Methode für allgemeines Verhältnis ... 105
E.3.3 Methode für konstantes Verhältnis ... 105
E.3.4 Methode für vergleichendes Kerbfallmodell ... 106

Anhang F (informativ) Spannungsanpassung aufgrund der Schweißstoßgeometrie für Schweißverbindungen beim Nennspannungsverfahren ... 107
F.1 Allgemeines ... 107

F.2 Methoden zur Spannungsanpassung 107
F.2.1 Allgemeines 107
F.2.2 Modellierungstechniken für Schweißverbindungen 108
F.2.3 Anpassung bei der Spannungsbewertung 109

Anhang G (informativ) Anwendung des Strukturspannungsansatzes für Schweißverbindungen von Stahl und Aluminium 114
G.1 Allgemeines zur Ermittlung der Ermüdungsspannung am Nahtübergang 114
G.2 Ermüdungsspannungsermittlung mit der Finite-Elemente-Methode 115
G.2.1 Ermüdungsspannungsermittlung am Nahtübergang 115
G.2.2 Ermüdungsspannungsermittlung an der Nahtwurzel 116
G.3 Betriebsfestigkeitsnachweis mit Strukturspannungen 116

Anhang H (informativ) Anwendung des Kerbspannungsansatzes für Schweißverbindungen aus Stahl und Aluminium 119
H.1 Allgemein 119
H.2 Berechnung der Kerbspannungen 119
H.2.1 Allgemeines 119
H.2.2 Bezugskerbradius r_{ref} für die Modellierung von Schweißkerben 120
H.2.3 Modellierung von Schweißnaht-Nennquerschnitten 120
H.2.4 Methoden zur Kerbspannungsberechnung 122
H.3 Wöhlerlinien 123
H.3.1 Normalspannung senkrecht zur Schweißnaht 123
H.3.2 Normalspannung längs der Schweißnaht 124
H.3.3 Schubspannung 125
H.3.4 Kennwerte in Abhängigkeit von der Dickenwirkung 125

Anhang I (informativ) Beispiel für den Betriebsfestigkeitsnachweis 126
I.1 Beschreibung 126
I.2 Aufgabe 127
I.3 Bewertung 127

Anhang J (informativ) Flussdiagramme des Verfahrens zum Betriebsfestigkeitsnachweis 133

Literaturhinweise 139

Bilder

Bild 1 — Wöhlerlinien für Grundwerkstoff für Normalspannungen: a) Verfahren Miner modifiziert; b) Verfahren Miner konsequent für ferritischen Stahl, Stahlguss und Gusseisen mit Kugelgraphit; c) Verfahren Miner konsequent für austenitischen Stahl und Aluminium 23

Bild 2 — Wöhlerlinien für Schweißverbindungen für Normalspannungen: a) Verfahren Miner modifiziert; b) Verfahren Miner konsequent 30

Bild 3 — Beispiel eines Spannungskollektivs zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit und Wöhlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert 39

Bild 4 — Beispiel für den ursprünglichen und skalierten Zustand des Spannungskollektivs für den Betriebsfestigkeitsnachweis und die Wöhlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert 42

Bild A.1 — Haigh-Diagramm für Normalspannungen 48

Bild A.2 — Beispiel eines Spannungsdiagramms für Normalspannungen 48

Bild A.3 — Haigh-Diagramm für Schubspannungen 49

Bild E.1 — Dickenkorrekturfaktor in Bezug auf *t* für Stahl 103

Bild E.2 — Dickenkorrekturfaktor in Bezug auf *t* für Aluminium 104

Bild F.1 — Optionen für Modellierungstechniken für Schweißverbindungen 108

Bild G.1 — Definition der Strukturspannungen für T-Stoß 114

Bild G.2 — Lage des Auswertungspunktes bei Stumpfstößen 115

Bild G.3 — Lage des Auswertungspunktes bei T- oder Doppel-T-Stößen 115

Bild G.4 — Spannungsverteilung auf der Blechoberfläche und über die Blechdicke am Nahtübergang 116

Bild G.5 — Spannungsverteilung im Schweißschenkelbereich und innere Kraft und Moment in Schweißverbindungen 116

Bild H.1 — Fiktive Abrundung von Nahtübergängen und Nahtwurzeln 119

Bild H.2 — Empfehlungen für Bezugsradien zur fiktiven Abrundung von Kerben für die Kerbspannungsberechnung 120

Bild H.3 — Querschnittsbeispiele 121

Bild H.4 — Idealisierung von Schweißverbindungen 122

Bild H.5 — Abrundung von Nahtwurzeln 122

Bild J.1 — Legende der Flussdiagrammkästen 133

Bild J.2 — Überblick über den Betriebsfestigkeitsnachweis 134

Bild J.3 — Betriebsfestigkeitsnachweis einer Spannungskomponente 135

Bild J.4 — Bestimmung der Bauteil-Festigkeit 136

Bild J.5 — Vorverarbeitung der Daten 137

Bild J.6 — Schadens- und Auslastungsberechnung 138

Tabellen

Tabelle 1 — Anisotropiefaktor f_A für Stahl und Aluminium 17

Tabelle 2 — Faktoren $a_{R\sigma}$ und b_R für Stahl und Aluminium 18

Tabelle 3 — Übliche Werte für R_Z, R_a, $f_{SR,edge}$ 19

Tabelle 4 — Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normal- und Schubspannungen bezogen auf $N_C = 10^6$ Zyklen 20

Tabelle 5 — Korrekturfaktor für Guss $f_{R,C}$ 21

Tabelle 6 — Parameter für Wöhlerlinien 22

Tabelle 7 — Werkstoffbezogene Werte für Wöhlerlinienparameter **24**

Tabelle 8 — Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung f_{post} **27**

Tabelle 9 — Bewertungsgruppenfaktor f_{QL} **28**

Tabelle 10 — Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse f_{CT} **28**

Tabelle 11 — Exponent m und Zyklenzahlen am Wöhlerlinien-Knickpunkt N_D für Schweißverbindungen **29**

Tabelle 12 — Exponent jenseits des Wöhlerlinien-Knickpunktes, Cut-Off-Limit und Grenze der Miner-Summe **30**

Tabelle 13 — Teilbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit γ_M **33**

Tabelle 14 — Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$ **34**

Tabelle 15 — Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung $\gamma_{M,I}$ **34**

Tabelle 16 — Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$ **35**

Tabelle A.1 — Mittelspannungsempfindlichkeitsparameter a_m und b_m **46**

Tabelle A.2 — Mittelspannungsempfindlichkeit für Schweißnähte **46**

Tabelle B.1 — Relevante ASTM-Dokumente **50**

Tabelle B.2 — Definition von Qualitätsklassenstufen auf der Grundlage von Fehlerkategorien nach den in Tabelle B.1 referenzierten ASTM-Dokumenten **50**

Tabelle C.1 — Zusammenfassung der Werkstofffaktoren für den Grundwerkstoff **52**

Tabelle D.1 — Übersicht über Schweißstoßtypen und zugehörige Nummern nach EN 15085-3:2022+A1:2023, Tabelle B.1 ..... **57**

Tabelle D.2 — Schweißstoßtyp 11 ..... **61**

Tabelle D.3 — Schweißstoßtyp 12 ..... **62**

Tabelle D.4 — Schweißstoßtyp 13 ..... **63**

Tabelle D.5 — Schweißstoßtyp 14 ..... **64**

Tabelle D.6 — Schweißstoßtyp 15 ..... **65**

Tabelle D.7 — Schweißstoßtyp 17 ..... **66**

Tabelle D.8 — Schweißstoßtyp 18 ..... **67**

Tabelle D.9 — Schweißstoßtyp 21 ..... **69**

Tabelle D.10 — Schweißstoßtyp 24 ..... **70**

Tabelle D.11 — Schweißstoßtyp 25 ..... **71**

Tabelle D.12 — Schweißstoßtyp 26 ..... **73**

Tabelle D.13 — Schweißstoßtyp 28 ..... **75**

Tabelle D.14 — Schweißstoßtyp 29 ..... **76**

Tabelle D.15 — Schweißstoßtyp 31 ..... **77**

Tabelle D.16 — Schweißstoßtyp 34 ..... **78**

Tabelle D.17 — Schweißstoßtyp 35 ..... **79**

Tabelle D.18 — Schweißstoßtyp 36 ..... **80**

Tabelle D.19 — Schweißstoßtyp 38 ..... **81**

Tabelle D.20 — Schweißstoßtyp 39 ..... **82**

Tabelle D.21 — Schweißstoßtyp 41 ..... **83**

Tabelle D.22 — Schweißstoßtyp 46 ..... **84**

Tabelle D.23 — Schweißstoßtyp 47 ..... **85**

Tabelle D.24 — Schweißstoßtyp 48 ..... **86**

Tabelle D.25 — Schweißstoßtyp 51 ..... **87**

Tabelle D.26 — Schweißstoßtyp 56 ..... **88**

Tabelle D.27 — Schweißstoßtyp 57 ..... **89**

Tabelle D.28 — Schweißstoßtyp 61 ..... **90**

Tabelle D.29 — Schweißstoßtyp 62 ..... **92**

Tabelle D.30 — Schweißstoßtyp 63 ..... **94**

Tabelle D.31 — Schweißstoßtyp 64 ..... **96**

Tabelle D.32 — Schweißstoßtyp 65 ..... **97**

Tabelle D.33 — Schweißstoßtyp 71 ..... **99**

Tabelle D.34 — Schweißstoßtyp 72 ..... **100**

Tabelle F.1 — Werte für den Exzentrizitätsfaktor für Membranspannungen f_e **109**

Tabelle F.2 — Parameter für den Nachweis von Option A **111**

Tabelle F.3 — Parameter für den Nachweis von Option B **112**

Tabelle H.1 — Empfohlene Elementlängen (entlang und normal zur Kerbfläche) **123**

Tabelle H.2 —Fat-Klasse $\Delta\sigma_{C,e}$ und $\Delta\tau_{C,e}$ für Stahl — bezogen auf das Spannungsverhältnis R = 0,5 ..... **124**

Tabelle H.3 —Fat-Klasse $\Delta\sigma_{C,e}$ und $\Delta\tau_{C,e}$ für Aluminium — bezogen auf das Spannungsverhältnis R = 0,5 ..... **124**

Tabelle I.1 — Parameter **126**

Tabelle I.2 — Spannungskollektiv 127

Tabelle I.3 — Mittelspannungskorrektur 128

Tabelle I.4 — Spannungskollektiv für die Schadensakkumulation 129

Tabelle I.5 — Berechnung der akkumulierten Miner-Summe mit x_{it} = 1,0 130

Tabelle I.6 — Akkumulierte Miner-Summenberechnung mit x_{it} = x_{Dm} = 2,129 131