

## DIN EN 17149-3



ICS 45.060.01

Einsprüche bis 2023-05-31

**Entwurf**

**Bahnanwendungen –  
Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen –  
Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis;  
Deutsche und Englische Fassung prEN 17149-3:2023**

Railway applications –  
Strength assessment of rail vehicle structures –  
Part 3: Fatigue strength assessment based on cumulative damage;  
German and English version prEN 17149-3:2023

Applications ferroviaires –  
Évaluation de la résistance des structures de véhicule ferroviaire –  
Partie 3: Évaluation de la résistance à la fatigue basée sur la méthode des dommages cumulés;  
Version allemande et anglaise prEN 17149-3:2023

**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-03-31 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](http://www.din.de/go/entwuerfe) bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter [www.entwuerfe.normenbibliothek.de](http://www.entwuerfe.normenbibliothek.de), sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an [fsf@din.de](mailto:fsf@din.de) möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter [www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe](http://www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe) oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter [www.dke.de/stellungnahme](http://www.dke.de/stellungnahme) abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF), Rolandstr. 4, 34131 Kassel.

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

Gesamtumfang 251 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

## Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-3:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

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

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO/TR 25901-1:2016 siehe DIN ISO/TR 25901-1:2022-03

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

## Nationaler Anhang NA (informativ)

### Literaturhinweise

DIN ISO/TR 25901-1:2022-03, *Schweißen und verwandte Verfahren — Terminologie — Teil 1: Allgemeine Begriffe (ISO/TR 25901-1:2016); Dreisprachige Fassung*

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

## Inhalt

|                                                                                                                          | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Europäisches Vorwort .....                                                                                               | 5     |
| Einleitung .....                                                                                                         | 6     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                                                | 7     |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                                                           | 7     |
| 3 Begriffe .....                                                                                                         | 7     |
| 4 Spannungsbestimmungen .....                                                                                            | 8     |
| 4.1 Allgemeines .....                                                                                                    | 8     |
| 4.2 Grundwerkstoff .....                                                                                                 | 8     |
| 4.3 Schweißverbindung .....                                                                                              | 8     |
| 4.3.1 Modifizierte Nennspannungen .....                                                                                  | 8     |
| 4.3.2 Strukturspannungen und Kerbspannungen .....                                                                        | 8     |
| 5 Ermüdungsfestigkeit .....                                                                                              | 9     |
| 5.1 Grundwerkstoff .....                                                                                                 | 9     |
| 5.1.1 Allgemeines .....                                                                                                  | 9     |
| 5.1.2 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ .....                                              | 9     |
| 5.1.3 Werkstoffeigenschaften .....                                                                                       | 9     |
| 5.1.4 Konstruktionsparameter .....                                                                                       | 11    |
| 5.1.5 Ermüdungsfestigkeitsfaktoren für Normalspannungen $f_{R,\sigma}$ und für Schubspannungen<br>und $f_{R,\tau}$ ..... | 13    |
| 5.1.6 Berichtigungsfaktor für Gussteile $f_{R,C}$ .....                                                                  | 14    |
| 5.1.7 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel .....                                                     | 15    |
| 5.2 Schweißverbindungen .....                                                                                            | 17    |
| 5.2.1 Allgemeines .....                                                                                                  | 17    |
| 5.2.2 Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ .....                                                              | 18    |
| 5.2.3 Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ und $\Delta\tau_R$ .....                                              | 18    |
| 5.2.4 Einfluss der Dicke $f_{thick}$ und Biegung .....                                                                   | 18    |
| 5.2.5 Eigenspannungsfaktor $f_{res,\sigma}$ und $f_{res,\tau}$ .....                                                     | 19    |
| 5.2.6 Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung $f_{post}$ .....                                                         | 20    |
| 5.2.7 Bewertungsgruppenfaktor $f_{QL}$ .....                                                                             | 21    |
| 5.2.8 Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse $f_{CT}$ .....                                                           | 21    |
| 5.2.9 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel .....                                                     | 22    |
| 5.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Grundwerkstoff und Schweißverbindungen<br>durch Laborversuche .....           | 24    |
| 6 Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten .....                                                                    | 25    |
| 6.1 Allgemeines .....                                                                                                    | 25    |
| 6.2 Teilbeiwert für Lasten $\gamma_L$ .....                                                                              | 25    |
| 6.3 Teilbeiwert für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\gamma_M$ .....                                                     | 26    |
| 6.3.1 Allgemeines .....                                                                                                  | 26    |
| 6.3.2 Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$ .....                                                             | 27    |
| 6.3.3 Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung $\gamma_{M,I}$ .....                                               | 28    |
| 6.3.4 Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$ .....                                                          | 29    |

|                                                                                                                                   |                                                                                                                    |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b>                                                                                                                          | <b>Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage von Schadensakkumulation .....</b>                    | <b>29</b> |
| <b>7.1</b>                                                                                                                        | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>29</b> |
| <b>7.2</b>                                                                                                                        | <b>Spannungsermittlung .....</b>                                                                                   | <b>30</b> |
| <b>7.3</b>                                                                                                                        | <b>Bestimmung des Bemessungsspannungskollektivs .....</b>                                                          | <b>30</b> |
| <b>7.3.1</b>                                                                                                                      | <b>Konditionierung .....</b>                                                                                       | <b>30</b> |
| <b>7.3.2</b>                                                                                                                      | <b>Anpassung der Spannungshistorie .....</b>                                                                       | <b>31</b> |
| <b>7.3.3</b>                                                                                                                      | <b>Zählung .....</b>                                                                                               | <b>31</b> |
| <b>7.3.4</b>                                                                                                                      | <b>Mittelspannungsanpassung .....</b>                                                                              | <b>31</b> |
| <b>7.3.5</b>                                                                                                                      | <b>Omission .....</b>                                                                                              | <b>32</b> |
| <b>7.4</b>                                                                                                                        | <b>Schädigungsberechnung für jede einzelne Spannungskomponente .....</b>                                           | <b>33</b> |
| <b>7.4.1</b>                                                                                                                      | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>33</b> |
| <b>7.4.2</b>                                                                                                                      | <b>Bestimmung des Spannungskollektiv-Formfaktors <math>A_{eq}</math> .....</b>                                     | <b>33</b> |
| <b>7.4.3</b>                                                                                                                      | <b>Bestimmung der zulässigen Miner-Summe <math>D_m</math> .....</b>                                                | <b>34</b> |
| <b>7.4.4</b>                                                                                                                      | <b>Bestimmung der Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente .....</b>                                       | <b>34</b> |
| <b>7.5</b>                                                                                                                        | <b>Betriebsfestigkeitsnachweis .....</b>                                                                           | <b>36</b> |
| <b>7.6</b>                                                                                                                        | <b>Verfahren der kritischen Schnittebenen .....</b>                                                                | <b>37</b> |
| <b>Anhang A (informativ) Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für</b>                                             |                                                                                                                    |           |
|                                                                                                                                   | <b>Grundwerkstoff und Schweißverbindungen .....</b>                                                                | <b>38</b> |
| <b>A.1</b>                                                                                                                        | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>38</b> |
| <b>A.2</b>                                                                                                                        | <b>Mittelspannungsempfindlichkeit .....</b>                                                                        | <b>39</b> |
| <b>A.2.1</b>                                                                                                                      | <b>Grundwerkstoff .....</b>                                                                                        | <b>39</b> |
| <b>A.2.2</b>                                                                                                                      | <b>Schweißverbindungen .....</b>                                                                                   | <b>39</b> |
| <b>A.3</b>                                                                                                                        | <b>Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren .....</b>                                                                | <b>40</b> |
| <b>Anhang B (informativ) Spezifikationsbeispiel für zulässige volumetrische Fehler in Gussteilen</b>                              |                                                                                                                    |           |
|                                                                                                                                   | <b>aus Stahl, Eisen und Aluminium .....</b>                                                                        | <b>43</b> |
| <b>B.1</b>                                                                                                                        | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>43</b> |
| <b>Anhang C (informativ) Werkstofffaktoren für Grundwerkstoff .....</b>                                                           |                                                                                                                    |           |
|                                                                                                                                   |                                                                                                                    | <b>45</b> |
| <b>Anhang D (normativ) Fat-Klassen <math>\Delta\sigma_C</math> und <math>\Delta\tau_C</math> für Schweißverbindungen nach dem</b> |                                                                                                                    |           |
|                                                                                                                                   | <b>Nennspannungsansatz .....</b>                                                                                   | <b>47</b> |
| <b>D.1</b>                                                                                                                        | <b>Erläuterung der Tabellen für Fat-Klassen .....</b>                                                              | <b>47</b> |
| <b>D.1.1</b>                                                                                                                      | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>47</b> |
| <b>D.1.2</b>                                                                                                                      | <b>Schweißnaht nach EN 15085-3:2022, Tabelle B.1 .....</b>                                                         | <b>47</b> |
| <b>D.1.3</b>                                                                                                                      | <b>Skizze des Schweißstoßes .....</b>                                                                              | <b>47</b> |
| <b>D.1.4</b>                                                                                                                      | <b>Schweißstoßspezifische Anforderungen .....</b>                                                                  | <b>48</b> |
| <b>D.1.5</b>                                                                                                                      | <b>Potenzieller Anrisspunkt .....</b>                                                                              | <b>48</b> |
| <b>D.1.6</b>                                                                                                                      | <b>Durchführbarkeit der Prüfung .....</b>                                                                          | <b>48</b> |
| <b>D.1.7</b>                                                                                                                      | <b>Relevante Dicke für die Beurteilung einer Schweißnaht .....</b>                                                 | <b>48</b> |
| <b>D.1.8</b>                                                                                                                      | <b>Werkstoff .....</b>                                                                                             | <b>48</b> |
| <b>D.1.9</b>                                                                                                                      | <b>Fat-Klassen <math>\Delta\sigma_C</math> und <math>\Delta\tau_C</math> .....</b>                                 | <b>49</b> |
| <b>D.1.10</b>                                                                                                                     | <b>Exponent <math>m</math> und Zyklenzahl am Wöhlerlinien-Knickpunkt <math>N_D</math> .....</b>                    | <b>49</b> |
| <b>D.1.11</b>                                                                                                                     | <b>Dickenkorrektorexponenten <math>n_{\sigma, \perp}, n_{\sigma,   }</math> und <math>n_{\tau}</math> .....</b>    | <b>49</b> |
| <b>D.1.12</b>                                                                                                                     | <b>Untere Grenze der Blechdicke für die Dickenkorrektur <math>t_{min}</math> .....</b>                             | <b>49</b> |
| <b>D.1.13</b>                                                                                                                     | <b>Parameter <math>\alpha_{bend}</math>, der für die Bestimmung von <math>f_{bend}</math> verwendet wird .....</b> | <b>49</b> |
| <b>D.2</b>                                                                                                                        | <b>Tabellen mit Fat-Klassen für Schweißverbindungen .....</b>                                                      | <b>50</b> |
| <b>D.3</b>                                                                                                                        | <b>Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit anhand von vergleichenden Kerbfallmodellen .....</b>                         | <b>86</b> |
| <b>Anhang E (informativ) Dicke und Einfluss der Biegung auf Nenn- und</b>                                                         |                                                                                                                    |           |
|                                                                                                                                   | <b>Strukturspannungsansätze bei Schweißverbindungen .....</b>                                                      | <b>87</b> |
| <b>E.1</b>                                                                                                                        | <b>Allgemeines .....</b>                                                                                           | <b>87</b> |
| <b>E.2</b>                                                                                                                        | <b>Einflussgrößen .....</b>                                                                                        | <b>87</b> |
| <b>E.2.1</b>                                                                                                                      | <b>Dicken-Korrekturfaktor <math>f_{thick}</math> .....</b>                                                         | <b>87</b> |

|                                                                                                                                       |                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| E.2.2                                                                                                                                 | Bonusfaktor für Biegung $f_{\text{bend}}$ .....                               | 89  |
| E.3                                                                                                                                   | Methoden zur Anwendung von $f_{\text{bend}}$ im Nachweisvorgang .....         | 90  |
| E.3.1                                                                                                                                 | Allgemeines .....                                                             | 90  |
| E.3.2                                                                                                                                 | Methode für allgemeines Verhältnis .....                                      | 90  |
| E.3.3                                                                                                                                 | Methode für konstantes Verhältnis .....                                       | 90  |
| E.3.4                                                                                                                                 | Methode für vergleichendes Kerbfallmodell.....                                | 90  |
| Anhang F (informativ) Spannungsanpassung aufgrund der Schweißstoßgeometrie für<br>Schweißverbindungen bei Nennspannungsnachweis ..... |                                                                               | 91  |
| F.1                                                                                                                                   | Allgemeines .....                                                             | 91  |
| F.2                                                                                                                                   | Methoden zur Spannungsanpassung.....                                          | 91  |
| F.2.1                                                                                                                                 | Allgemeines .....                                                             | 91  |
| F.2.2                                                                                                                                 | Modellierungstechniken für Schweißverbindungen.....                           | 92  |
| F.2.3                                                                                                                                 | Anpassung bei der Spannungsbewertung .....                                    | 93  |
| Anhang G (informativ) Anwendung des Strukturspannungsansatzes für Schweißverbindungen<br>von Stahl und Aluminium .....                |                                                                               | 98  |
| G.1                                                                                                                                   | Allgemeines zur Ermittlung der Ermüdungsspannung am Nahtübergang .....        | 98  |
| G.2                                                                                                                                   | Ermüdungsspannungsermittlung mit der Finite-Elemente-Methode .....            | 99  |
| G.2.1                                                                                                                                 | Ermüdungsspannungsermittlung am Nahtübergang.....                             | 99  |
| G.2.2                                                                                                                                 | Ermüdungsspannungsermittlung an der Nahtwurzel.....                           | 100 |
| G.3                                                                                                                                   | Betriebsfestigkeitsnachweis mit Strukturspannungen.....                       | 100 |
| Anhang H (informativ) Anwendung des Kerbspannungsansatzes für Schweißverbindungen aus<br>Stahl und Aluminium.....                     |                                                                               | 103 |
| H.1                                                                                                                                   | Allgemein.....                                                                | 103 |
| H.2                                                                                                                                   | Berechnung der Kerbspannungen .....                                           | 103 |
| H.2.1                                                                                                                                 | Allgemeines .....                                                             | 103 |
| H.2.2                                                                                                                                 | Bezugskerbradius $r_{\text{ref}}$ für die Modellierung von Schweißkerben..... | 104 |
| H.2.3                                                                                                                                 | Modellierung von Schweißnaht-Nennquerschnitten .....                          | 104 |
| H.2.4                                                                                                                                 | Methoden zur Kerbspannungsberechnung .....                                    | 107 |
| H.3                                                                                                                                   | Wöhlerlinien .....                                                            | 108 |
| H.3.1                                                                                                                                 | Normalspannung senkrecht zur Schweißnaht .....                                | 108 |
| H.3.2                                                                                                                                 | Normalspannung längs der Schweißnaht.....                                     | 109 |
| H.3.3                                                                                                                                 | Schubspannung .....                                                           | 109 |
| H.3.4                                                                                                                                 | Kennwerte in Abhängigkeit von der Dickenwirkung.....                          | 110 |
| Anhang I (informativ) Beispiel für den Betriebsfestigkeitsnachweis.....                                                               |                                                                               | 111 |
| I.1                                                                                                                                   | Beschreibung.....                                                             | 111 |
| I.2                                                                                                                                   | Aufgabe.....                                                                  | 112 |
| I.3                                                                                                                                   | Bewertung.....                                                                | 112 |
| Anhang J (informativ) Flussdiagramme des Verfahrens zum Betriebsfestigkeitsnachweis .....                                             |                                                                               | 118 |
| Literaturhinweise.....                                                                                                                |                                                                               | 124 |

## Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-3:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

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

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

Der folgende Teil befindet sich in der Vorbereitung:

- Teil 2: Statischer Festigkeitsnachweis

## Einleitung

Falls ein Betriebsfestigkeitsnachweis für Schienenfahrzeugstrukturen notwendig ist, darf dieser Nachweis als Dauerfestigkeitsnachweis oder als Betriebsfestigkeitsnachweis nach dem Schadensakkumulationsverfahren erbracht werden.

Ein Dauerfestigkeitsnachweis beruht auf der Bewertung der Spannungsschwingbreiten (z. B. abgeleitet aus Auslegungslastfällen oder Messungen) gegen die anwendbare Dauerfestigkeit. Ein solches Verfahren in Kombination mit Lasten wie in der Normenreihe EN 12663 oder EN 13749 angegeben anwendbar.

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

Dieses Dokument stellt keine Daten zur Betriebsfestigkeit oder Kriterien für eine Annäherung der Dauerfestigkeitsgrenze bereit. Der Hauptteil der Norm verwendet als Grundlage das Nennspannungsverfahren, wobei die Berücksichtigung variabler Amplituden und Zyklenzahlen unter Verwendung der dieser Norm beschriebenen Verfahren ebenso mit dem Strukturspannungsansatz und dem Kerbspannungsansatz angewendet werden kann (zusätzliche Informationen zu den genannten Verfahren sind in den informativen Anhängen hinterlegt).

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

## 1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt ein Verfahren auf Grundlage von Schadensakkumulation für den Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen, welche nach Normen für Bahnanwendungen hergestellt, betrieben und instandgehalten werden.

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

Dieses Dokument ist nicht anzuwenden für den Dauerfestigkeitsnachweis.

Das Nachweisverfahren beschränkt sich auf eisenhaltige Werkstoffe und Aluminium.

Dieses Dokument legt keine Bemessungslastfälle fest.

Dieses Dokument ist nicht anzuwenden für Korrosionszustände oder Betrieb bei erhöhter Temperatur im Kriechbereich.

Dieses Dokument ist für alle Arten von Schienenfahrzeugen anwendbar; sie legt jedoch nicht fest, in welchen Fällen ein Betriebsfestigkeitsnachweis mittels Schadensakkumulation anzuwenden ist.

## 2 Normative Verweisungen

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

EN 15085-3:2022, *Bahnanwendungen — Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen — Teil 3: Konstruktionsvorgaben*

prEN 17149-1:2021<sup>1</sup>, *Bahnanwendungen — Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen für Festigkeitsnachweise (Statik und Ermüdung)*

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

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe, Symbole und Abkürzungen nach ISO/TR 25901-1:2016 und prEN 17149-1:2021.

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

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

---

<sup>1</sup> In der Entwurfsphase.

## 4 Spannungsbestimmungen

### 4.1 Allgemeines

Ermüdungslasten, die auf ein Bauteil einwirken, verursachen Ermüdungsspannungen, die als Spannungskollektiv ausgedrückt werden können. Das für die Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage des Schädigungsakkumulationsverfahrens verwendete Spannungskollektiv muss in Form von Spannungsschwingbreiten, Mittelspannungen und Zyklenzahlen angegeben werden, um die Auslegungslbensdauer abzubilden.

Das Bemessungsspannungskollektiv muss alle notwendigen Toleranzen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in ihren Werten enthalten (siehe 6.2).

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

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

### 4.2 Grundwerkstoff

Die Spannungen für den Grundwerkstoff müssen wie in prEN 17149-1:2021, 5.2, beschrieben, bestimmt werden.

### 4.3 Schweißverbindung

#### 4.3.1 Modifizierte Nennspannungen

Die modifizierten Nennspannungen für Schweißverbindungen müssen nach prEN 17149-1:2021, 5.3, bestimmt werden.

#### 4.3.2 Strukturspannungen und Kerbspannungen

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

- Anhang G für das Strukturspannungsverfahren;
- Anhang H für das Kerbspannungsverfahren.

## 5 Ermüdungsfestigkeit

### 5.1 Grundwerkstoff

#### 5.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt das Verfahren zur Herleitung der Grundwerkstoff-Ermüdungsfestigkeit unter den folgenden Bedingungen:

- verwendete Werkstoffe wie Baustahl, schweißbarer Stahlguss, Gusseisen (GJS und ADI), Schmiedestahl, Aluminiumguss und Aluminiumknetlegierung;
- Anwendungstemperatur bis zu 100° C für Aluminium und bis zu 200° C für Stahl;
- ebener Spannungstensor auf der Bauteiloberfläche (keine signifikante Spannungskomponente senkrecht zur Oberfläche, z. B. Presspassung).

Die oben definierten Einschränkungen sind bei den meisten Anwendungen von Grundwerkstoffen für Schienenfahrzeuge erfüllt, so dass in diesem Fall ein vereinfachtes Bewertungsverfahren angemessen ist. Wird der Anwendungsbereich überschritten, muss eine Bewertungsmethode gewählt werden, die der spezifischen Anwendung Rechnung trägt (z. B. hohe Temperaturen und dreidimensionale Spannungszustände).

Anhang C bietet einen Überblick über die anwendbaren Werkstofffaktoren.

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

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien bestimmt, welche die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit, ausgedrückt als Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_R$  und  $\Delta\tau_R$  (in N/mm<sup>2</sup>, sofern nicht anders angegeben), festlegen bezogen auf:

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

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit werden mithilfe von Gleichung (1) und Gleichung (2) bestimmt:

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

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

#### 5.1.3 Werkstoffeigenschaften

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

$R_{m,N}$  ist die Nennzugfestigkeit nach den Werkstoffnormen unter Einbeziehung der tatsächlichen Blechdicke. Für bearbeitete Bauteile muss die Dicke vor der Bearbeitung (Halbzeug) betrachtet werden.

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

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

**Tabelle 1 — Anisotropiefaktor  $f_A$  für Stahl und Aluminium**

| Werkstoff                                       | $R_{m,N}$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_A$ |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|-------|
| Walzstahl                                       | $\leq 600$                     | 0,9   |
|                                                 | $> 600$<br>$\leq 900$          | 0,86  |
|                                                 |                                |       |
| Walzbleche und Strangpressprofile aus Aluminium | $\leq 200$                     | 1,0   |
|                                                 | $> 200$<br>$\leq 400$          | 0,95  |
|                                                 | $> 400$<br>$\leq 600$          | 0,9   |
|                                                 |                                |       |
| Alle sonstigen Werkstoffanwendungen             | Beliebiger Wert                | 1,0   |
| Wärmeeinflusszone                               | Beliebiger Wert                | 1,0   |

Für Wärmeeinflusszonen in der Nähe von Schweißverbindungen muss die Nennzugfestigkeit für die Wärmeeinflusszone  $R_{m,HAZ}$  anstelle von  $R_m$  verwendet werden. Der Wert für  $R_{m,HAZ}$  muss aus der Fachliteratur hergeleitet werden (z. B. [2], [5], [57], [58]).

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

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

$R_{m,S}$  ist die Zugfestigkeit nach einer Zeichnung oder einer Bauteilspezifikation. Falls für  $R_{m,S}$  höhere Werte als in den Werkstoffnormen festgelegt sind und die Werte nur durch Stichproben geprüft werden, sind die festgelegten Werte nicht hinreichend zuverlässig und wären daher nichtkonservativ für die Verwendung in einem Betriebsfestigkeitsnachweis. Zur Durchführung eines Betriebsfestigkeitsnachweises mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_S = 97,5 \%$  muss die durch Zeichnung oder Bauteilspezifikation definierte Zugfestigkeit  $R_{m,S}$  nach Gleichung (4) vermindert werden:

$$R_m = f_{Rm,S} \cdot R_{m,S} \quad (4)$$

Falls der Festigkeitswert durch drei Stichproben (z. B. Festigkeitsprüfung oder Zugprüfung) geprüft wird, ist ein Wert von  $f_{Rm,S} = 0,94$  anwendbar. Für eine andere Anzahl von Prüfungen muss dieser Wert der Fachliteratur angepasst werden (z. B. [2]).

Falls ein bestätigter Wert  $P_S = 97,5 \%$  für das Bauteils verfügbar ist, darf  $f_{Rm,S} = 1,0$  gesetzt werden.

ANMERKUNG Festigkeitswerte, die mit dem 3.1-Zertifikat nach EN 10204 nachgewiesen wurden, sind Beispiele für solche Werte.

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

### 5.1.3.3 Technologischer Größeneinfluss

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

Für Bauteile, die aus Halbzeugen hergestellt wurden, müssen die Festigkeitseigenschaften die Wanddicke des ursprünglichen Halbzeugs berücksichtigen.

### 5.1.3.4 Einfluss der Anwendungstemperatur

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

## 5.1.4 Konstruktionsparameter

### 5.1.4.1 Rauheitsfaktor $f_{SR}$

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

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

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

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

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

| Werkstoff                                        | $a_{R,\sigma}$ | $b_R$<br>N/mm <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------|----------------|----------------------------|
| Stahl (gewalzt oder geschmiedet)                 | 0,22           | 400                        |
| Stahlguss                                        | 0,20           | 400                        |
| Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)                 | 0,16           | 400                        |
| Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) | 0,16           | 400                        |
| Aluminium                                        | 0,22           | 133                        |
| Aluminiumguss                                    | 0,20           | 133                        |

Übliche Werte der Rauheit  $R_z$  sind in Tabelle 3 angegeben. Der Faktor  $f_{SR,edge}$  berücksichtigt die Auswirkung der thermischen Schnittkanten von Stahl.

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

| $R_z$<br>μm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $R_a$<br>μm       | $f_{SR,edge}$ | Beispiel                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | a                 | 1,0           | Blechoberfläche oder bearbeitete Kante aus Stahl                                                                                                                                                                                                                                  |
| 80 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 25 <sup>a</sup>   | 1,0           | Grob bearbeitete Oberfläche;<br><br>Kugelgestrahlte Walzblechoberfläche;<br><br>Walzbleche und Strangpressprofile aus Aluminium                                                                                                                                                   |
| 200 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50 <sup>a</sup>   | 1,0           | Walzstahloberfläche, nicht kugelgestrahlt;<br><br>Schmiedestahl;<br><br>Gussoberfläche;<br><br>Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Aluminium                                                                                                                           |
| 50 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 12,5 <sup>a</sup> | 0,81          | thermisches Brennschneiden von Stahl, kugelgestrahlt                                                                                                                                                                                                                              |
| 200 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50 <sup>a</sup>   | 0,81          | thermisches Brennschneiden von Stahl, nicht kugelgestrahlt                                                                                                                                                                                                                        |
| 25 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 6,3 <sup>a</sup>  | 0,94          | Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Stahl, kugelgestrahlt                                                                                                                                                                                                              |
| 200 <sup>a</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 50 <sup>a</sup>   | 0,94          | Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Stahl, nicht kugelgestrahlt                                                                                                                                                                                                        |
| 200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 50                | 1,0           | Plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Aluminium, nicht kugelgestrahlt. (Eine Verbesserung des Oberflächenrauheitsfaktors ist nur anwendbar, wenn das betroffene Material (typischerweise 2 mm) nach dem Schneiden durch spanende Bearbeitung vollständig entfernt wird). |
| <sup>a</sup> Sind Werte für die Rauheit explizit in der Zeichnung oder in der Bauteilspezifikation angegeben, müssen diese Werte für den Betriebsfestigkeitsnachweis verwendet werden. Bei der Anwendung auf Gussteile ist der Bonus von bearbeiteten Oberflächen nur anwendbar, wenn die bearbeitete Oberfläche frei von Oberflächenfehlern ist. |                   |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Für Blechkanten bei Walzblechen müssen die folgenden Anforderungen Anwendung finden:

- scharfe Kanten und oberflächige Walzfehler müssen durch Längsschleifen oder während der nachfolgenden Herstellungsprozesse, z. B. Kugelstrahlen, entfernt werden;
- Risse oder sichtbare Ausbrüche sind nicht zulässig;
- Schweißreparaturen müssen wie eine Schweißnaht behandelt werden;
- Kerbwirkungen durch die Form der Kanten müssen berücksichtigt werden;
- minimaler Eckenradius oder Fase 1 mm;
- alle Grate müssen entfernt werden.

Für plasma- oder lasergeschnittene Blechkanten aus Stahl muss der Oberflächenrauheitsfaktor für Schnittkanten  $f_{SR, edge}$  nach Tabelle 3 angewendet werden.

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

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

#### 5.1.4.2 Einfluss des Spannungsgradienten

Bei dem in dieser Norm beschriebenen Nachweisverfahren wird die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit, die durch den Spannungsgradienten senkrecht zur Oberfläche verbunden ist, nicht in die Ermüdungsfestigkeitswerte einbezogen.

Die positiven Effekte von Spannungsgradienten dürfen entsprechend der Fachliteratur berücksichtigt werden, z. B. [2].

#### 5.1.4.3 Einfluss der Oberflächenbehandlung

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

Die positiven Effekte der Oberflächenbehandlung dürfen entsprechend der Fachliteratur berücksichtigt werden, z. B. [2].

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

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

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

| Werkstoff                                        | $f_{R,\sigma}$                          | $f_{R,\tau}^a$ |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|
| Stahl (gewalzt oder geschmiedet)                 | 0,75                                    | 0,577          |
| Stahlguss                                        | 0,57                                    | 0,577          |
| Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)                 | $0,42 + \frac{117 \text{ N/mm}^2}{R_m}$ | 0,65           |
| Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) | $\frac{492 \text{ N/mm}^2}{R_m}$        | 0,7            |
| Aluminium                                        | 0,6                                     | 0,577          |
| Aluminiumguss                                    | 0,6                                     | 0,75           |

<sup>a</sup> Verhältnis zwischen der Ermüdungsfestigkeit von Schubspannung und der von Normalspannung.

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

#### 5.1.6 Berichtungsfaktor für Gussteile $f_{R,C}$

Die für Gussteile angewandte ZfP-Stufe und die entsprechende Gussqualitätsstufe haben einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeitswerte des Gussteils. Der Berichtungsfaktor für Guss  $f_{R,C}$  berücksichtigt die Auswirkungen der verbleibenden Fehler auf die Ermüdungsfestigkeit innerhalb des Gussteils. Für alle nicht gegossenen Bauteile gilt  $f_{R,C} = 1,0$ .

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

Der Berichtungsfaktor für Guss  $f_{R,C}$  muss entsprechend der erreichten Gussqualität des Gussteils gewählt werden. Die in Tabelle 5 angegebenen Werte dürfen für des Gusses in Abhängigkeit von der ZfP-Stufe bei der Herstellung und der verifizierten Qualitätsstufe nach Anhang B verwendet werden.

**Tabelle 5 — Berichtigungsfaktor für Guss  $f_{R,C}$**

| Volumetrische Prüfung durch ZfP |                          | Prüfung des Oberflächenzustands |                     | Berichtigungsfaktor für Guss $f_{R,C}$ |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| Relevante Norm                  | Qualitätsstufe nach ASTM | Relevante Norm                  | Qualitätsstufe      |                                        |
| EN 12680 (UT)<br>EN 12681 (RT)  | Stufe 3                  | EN 1369                         | LM3, AM3, SM4       | 0,8                                    |
|                                 |                          | EN 1370                         | 4S1/5S2, VC3        |                                        |
|                                 |                          | EN 1371-1                       | LP3, AP3<br>SP3/CP3 |                                        |
|                                 | Stufe 2                  | EN 1369                         | LM2, AM2<br>SM2     | 0,9                                    |
|                                 |                          | EN 1370                         | 3S1/3S2, VC2        |                                        |
|                                 |                          | EN 1371-1                       | LP2, AP2<br>SP2/CP2 |                                        |

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

Eine Verbesserung des Berichtigungsfaktors  $f_{R,C}$  auf bis zu 1,0 ist zulässig, wenn die Ermüdungsfestigkeitswerte innerhalb des Bauteils durch entsprechende Versuche mit Prüfkörpern aus diesen Bereichen des Bauteils und entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen für den Fertigungsprozess nachgewiesen werden.

Ein Festigkeitsnachweisverfahren, das die inneren Gussfehler (z. B. Lunker) in Bauteilen bei der Spannungsermittlung nicht berücksichtigt (z. B. ein FEM-Modell, das die Nenngeometrie abbildet), sollte auf Gussteile der Qualitätsstufe 3 oder besser beschränkt werden. Für Bauteile oder Teile von Bauteilen, die nicht beansprucht werden, dürfen auch deutlich schlechtere Qualitätsstufen angewendet werden.

Bei der Beurteilung solcher Gussteile ist zu berücksichtigen, dass größere Defekte die tatsächlichen Spannungsverteilungen erheblich beeinflussen können (z. B. durch lokal reduzierte Querschnitte). Daher sollten diese Effekte entweder für die Festlegung der Spannungsverteilung berücksichtigt werden oder der Berichtigungsfaktor für Gussteile sollte entsprechend reduziert werden.

#### 5.1.7 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel

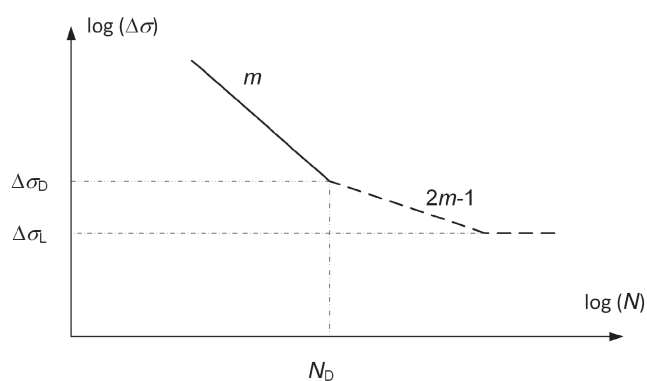
Für Wöhlerlinien des Grundwerkstoffs sind alle relevanten Informationen in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 6 — Parameter für Wöhlerlinien

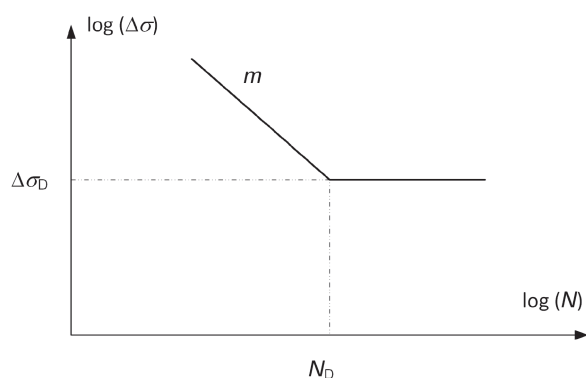
| Schadens-<br>akkumulationsregel | Exponent<br>jenseits des<br>Knickpunktes<br>$N_D$     | Cut-off-Limit<br>$\Delta\sigma_L$ | Miner-Summengrenze<br>$D_{m,min}$                                                       |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Verfahren Miner modifiziert     | $2m-1^a$                                              | $0,5 \Delta\sigma_D$              | 1,0 für Gusseisen mit Kugelgraphit,<br>(GJS, ADI),<br>0,3 für alle sonstigen Werkstoffe |
| Verfahren Miner<br>konsequent   | $m_2$ für<br>Austenitischer<br>Stahl und<br>Aluminium | -                                 | 1,0 für Gusseisen mit Kugelgraphit,<br>(GJS, ADI),<br>0,3 für alle sonstigen Werkstoffe |

<sup>a</sup> Dem Exponenten jenseits des Knickpunktes  $N_D$  ist kein spezifisches Symbol zugeordnet, die Steigung wird nur durch die obige Formel definiert.

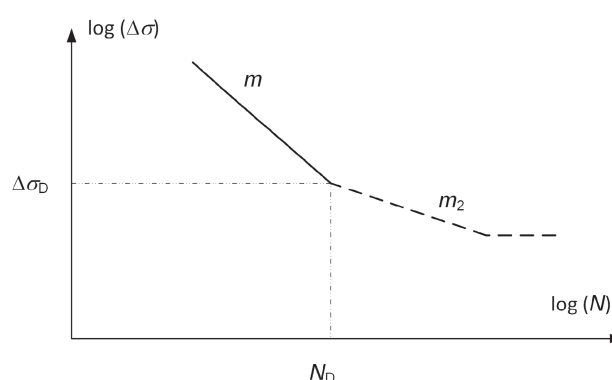
In Bild 1 ist die prinzipielle Darstellung der Wöhlerlinien für den Grundwerkstoff bei Normalspannung angegeben. Für Wöhlerlinien von Schubspannungen wird das Symbol  $\sigma$  durch das Symbol  $\tau$  ersetzt.



a)



b)



c)

**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**

Für Grundwerkstoffe liegt die Zyklenzahl am Knickpunkt  $N_D$  bei  $10^6$ .

Da  $N_D = N_C$  ist, gelten Gleichung (7) und Gleichung (8):

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

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

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

**Tabelle 7 — Werkstoffbezogene Werte für Wöhlerlinienparameter**

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

## 5.2 Schweißverbindungen

### 5.2.1 Allgemeines

5.2 beschreibt die Ermittlung von Ermüdungsfestigkeitswerten im Zusammenhang mit dem Nennspannungsverfahren. Bei anderen Spannungsansätzen wird die Ermittlung von Ermüdungsfestigkeitswerten nach dem Strukturspannungsverfahren in Anhang G und nach dem Kerbspannungsverfahren in Anhang H beschrieben.

ANMERKUNG Wärmebeeinflusste Zonen werden nach 5.1.3.1 bewertet.

### 5.2.2 Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch Wöhlerlinien angegeben. Die Wöhlerlinien der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen und Bauteilen werden durch die Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  (in N/mm<sup>2</sup>, wenn nicht anders angegeben) bezogen auf:

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

dargestellt.

Die Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  gelten für die Blechdicke

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

Die Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  werden in den Tabellen in Anhang D dargestellt für Kerbfälle, vertreten durch verschiedene Schweißnahttypen und Schweißnahtdetails von geschweißten Schienenfahrzeugstrukturen aus Stahl und Aluminium für Qualitätsstufen nach EN 15085-3:2022. 5.2.7, enthält Informationen zur Anpassung der zulässigen Werte für andere Qualitätsstufen.

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

Die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit in Bezug auf die Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_R$  und  $\Delta\tau_R$  bezogen auf  $N_C = 2 \times 10^6$  Zyklen und auf das Spannungsverhältnis  $R_\sigma = -1$  bzw.  $R_\tau = -1$  werden mit Gleichung (9) und Gleichung (10) beschrieben:

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

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

### 5.2.4 Einfluss der Dicke $f_{thick}$ und Biegung

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

Für Blechdicke  $t \geq t_{ref}$  muss der Dickenkorrekturfaktor nach Gleichung (11) angewendet werden.

$$f_{thick} = \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^n \text{ für } t \geq t_{ref} \quad (11)$$

Dabei ist

$n = \min(n_{\sigma,\perp}; 0,2)$  für Normalspannungen senkrecht zur Schweißnaht, falls  $f_{\text{post}}$  aufgrund von Schleifen, WIG-Nachbehandlung oder bündig geschliffene Schweißnähte angewendet wird;

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

$n = n_{\sigma,\parallel}$  für Normalspannungen längs der Schweißnaht;

$n = n_{\tau}$  für Schubspannungen.

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

Als konservativer Ansatz für die Blechdicke  $t < t_{\text{ref}}$  darf der Dickenkorrekturfaktor durch Verwendung von Gleichung (12) angewendet werden. Ein detaillierter Ansatz darf angewendet werden. Anhang E enthält ein Beispiel für einen solchen Ansatz.

$$f_{\text{thick}} = 1,0 \text{ für } t < t_{\text{ref}} \quad (12)$$

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

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

Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird durch die Mittelspannungsfaktoren  $f_{\text{m},\sigma}$  und  $f_{\text{m},\tau}$ , wie in 7.3.4 erklärt und festgelegt, berücksichtigt.

Für Schweißverbindungen nehmen die Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$ , wie in Anhang D definiert, Bezug auf das Spannungsverhältnis  $R_\sigma = 0,5$  und  $R_\tau = 0,5$ , wohingegen die Werte der Bauteil-Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_R$  und  $\Delta\tau_R$ , nach Gleichung (9) und Gleichung (10) hergeleitet, auf das Spannungsverhältnis  $R_\sigma = -1$  und  $R_\tau = -1$  Bezug nehmen. Der Einfluss auf die Festigkeitswerte aufgrund der unterschiedlichen Spannungsverhältnisse wird durch die Faktoren  $f_{\text{res},\sigma}$  und  $f_{\text{res},\tau}$  berücksichtigt.

Die Faktoren  $f_{\text{res},\sigma}$  und  $f_{\text{res},\tau}$  müssen als Kehrwerte der Mittelspannungsfaktoren  $f_{\text{m},\sigma}$  und  $f_{\text{m},\tau}$  für das Spannungsverhältnis  $R = 0,5$  bestimmt werden.

Obwohl keine normativen Anforderungen für die Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren  $f_{\text{m},\sigma}$  und  $f_{\text{m},\tau}$  festgelegt sind, ist vorgeschrieben, das gleiche Verfahren für die Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren  $f_{\text{m},\sigma}$  und  $f_{\text{m},\tau}$  sowohl in der Herleitung der Faktoren  $f_{\text{res},\sigma}$  und  $f_{\text{res},\tau}$  als auch in der Anwendung der Mittelspannungsanpassung, wie in 7.3.4 und Gleichung (16) festgelegt, anzuwenden.

In geschweißten Strukturen lösen der Fertigungsverfahren und der Schweißvorgang Eigenspannungen in der Struktur aus. Die Mittelspannungsempfindlichkeit berücksichtigt die Effekte des Eigenspannungszustands der fertiggestellten Struktur. Eine höhere Mittelspannungsempfindlichkeit, die aus höheren Werten für  $f_{\text{res},\sigma}$  und  $f_{\text{res},\tau}$  folgt, darf angenommen werden, wenn nach dem Schweißen eine Spannungsarmglühung durchgeführt wird.

Neue Eigenspannungen können auftreten, wenn nach dem Spannungsarmglühen Schweißreparaturen oder Richtarbeiten (z. B. zur Beseitigung von Verformung) durchgeführt werden. In solchen Fällen muss für den betroffenen Bereich der Eigenspannungsfaktor für den geschweißten Zustand angesetzt werden. Wenn jedoch nachgewiesen werden kann, dass sich die Eigenspannungen im Vergleich zum spannungsarmgeglühten Zustand nicht wesentlich erhöht haben, dürfen alternative Werte für die Eigenspannungsfaktoren in Betracht gezogen werden, sofern sie begründet werden können.

Anhang A enthält ein informatives Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren  $f_{m,\sigma}$  und  $f_{m,\tau}$ . Es dürfen jedoch auch andere Methoden nach der Fachliteratur angewandt werden.

### 5.2.6 Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung $f_{post}$

Schweißnahtnachbehandlungsverfahren können die Ermüdungsfestigkeit am Nahtübergang senkrecht zur Schweißnaht erhöhen. Die höhere Ermüdungsfestigkeit folgt im Allgemeinen aus einer Verbesserung der Schweißnahtgeometrie, der Beseitigung der anfänglichen Schweißnahtfehler oder durch Einbringen von Druckeigenspannungen an der Schweißnaht.

Die Bonusfaktoren für Schweißnahtnachbehandlung  $f_{post}$  in Tabelle 8 dürfen je nach Verbesserungsverfahren angewendet werden.

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

| Verfahren zur Schweißnahtnachbehandlung                                  | Bonusfaktor für Schweißnahtnachbehandlung $f_{post}$ |                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                                                          | Normalspannungen quer zur Schweißnaht                | Normalspannungen längs der Schweißnaht und Schubspannungen |
| Kein Verbesserungsverfahren angewendet                                   | 1,0                                                  | 1,0                                                        |
| Nahtübergangsschleifen oder WIG-Nachbehandlung                           | 1,3                                                  | 1,15                                                       |
| Stumpfnahht bündig bearbeitet mit der Oberfläche der angrenzenden Bleche | 1,3                                                  | 1,15                                                       |

Andere Werte für Bonusfaktoren dürfen angewendet werden, sofern ein Nachweis zur Begründung der Verbesserung vorliegt.

Der Bonusfaktor für mechanische Schlagbehandlungsverfahren (z.B. Hammer- oder Nadelpeening) oder andere Verbesserungsverfahren dürfen nach der Fachliteratur [26] bestimmt werden. Für Schweißverbindungen, die einem Schweißnahtnachbehandlungsverfahren unterzogen werden, ist der Wertebereich des Bonusfaktors durch Gleichung (13) und Gleichung (14) festgelegt.

$$1,0 \leq f_{post} \leq \frac{140 \frac{N}{mm^2}}{\Delta\sigma_C} \text{ für Stahl und} \quad (13)$$

$$1,0 \leq f_{post} \leq \frac{65,3 \frac{N}{mm^2}}{\Delta\sigma_C} \text{ für Aluminium.} \quad (14)$$

ANMERKUNG 1 Die Obergrenze ist durch den Höchstwert von  $\Delta\sigma_C$ , wie in diesem Dokument festgelegt, gegeben.

ANMERKUNG 2 Die Untergrenze  $f_{\text{post}} \geq 1,0$  ist anwendbar für Fälle, in denen Werte für  $\Delta\sigma_C > 140 \text{ N/mm}^2$  für Stahl und  $\Delta\sigma_C > 65,3 \text{ N/mm}^2$  für Aluminium auf Grundlage von Versuchsdaten bestimmt werden (siehe 5.3).

Die Bewertung von Wärmeeinflusszonen muss unabhängig von Nachbehandlungsverfahren nach 5.1.3.1 durchgeführt werden.

Eine Kombination von Bonusfaktoren für verschiedene Schweißnahtnachbehandlungsverfahren darf nicht verwendet werden.

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

Weitere Informationen der Vorteile der Schweißnahtnachbehandlung in Bezug auf die Ermüdungsauslegung von Schweißverbindungen sind in [6], [1], [48] und [26] dargestellt.

Die Anwendung eines Bonusfaktors bezüglich einer Schweißnahtnachbehandlung muss mit den Fertigungszeichnungen und Bauteilspezifikationen übereinstimmen.

#### 5.2.7 Bewertungsgruppenfaktor $f_{\text{QL}}$

Die Fat-Klassen in Anhang D sind für eine Bewertungsgruppe C nach EN ISO 5817 bzw. EN ISO 10024 angegeben.

Für andere Bewertungsgruppen ist der Bewertungsgruppenfaktor  $f_{\text{QL}}$  in Tabelle 9 angegeben.

**Tabelle 9 — Bewertungsgruppenfaktor  $f_{\text{QL}}$**

| Schweißnahtgüteklasse nach EN 15085-3:2022 | Bewertungsgruppe | $f_{\text{QL}}$ |
|--------------------------------------------|------------------|-----------------|
| CP A, CP B                                 | B                | $\sqrt{1,12}$   |
| CP C1, CP C2, CP C3                        | C                | 1,0             |
| CP D                                       | D                | $1/1,2$         |

Die anwendbare Mindestschweißnahtgüteklasse in Abhängigkeit von einer in 6.3.2 angewandten Sicherheitskategorie ist in EN 15085-3:2022 festgelegt.

#### 5.2.8 Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse $f_{\text{CT}}$

Den Fat-Klassen in Anhang D liegen die Schweißnahtprüfklassen CT 3 und CT 4 nach EN 15085-3:2022 zu Grunde. Für Anrisspunkte, die während der Fertigung geprüft werden können (siehe D.1.6) und die anderen Schweißnahtprüfklassen unterliegen, darf der Verstärkungsfaktor  $f_{\text{CT}}$  nach Tabelle 10 angewendet werden.

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

| Schweißnahtprüfklasse<br>nach EN 15085-3:2022 | $f_{CT}$      | $f_{CT}$<br>für Schweißstöße mit Schweißnahtgüteklasse CP A, CP B und CP C1, die während der Produktion geprüft werden können, aber in der Wartung nicht geprüft und repariert werden können (nach EN 15085-3:2022, 4.6) |
|-----------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CT 1                                          | 1,12          | $\sqrt{1,12}$                                                                                                                                                                                                            |
| CT 2                                          | $\sqrt{1,12}$ | 1,0                                                                                                                                                                                                                      |
| CT 3                                          | 1,0           | k.A.                                                                                                                                                                                                                     |
| CT 4                                          | 1,0           | k.A.                                                                                                                                                                                                                     |

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

BEISPIEL Nach EN 15085-3:2022 erfordert die Schweißnahtgüteklasse CP B eine Schweißnahtprüfklasse von CT 2. Für CP B beträgt der Bewertungsfaktor  $f_{QL} = \sqrt{1,12}$ . Für CT 2 beträgt der Bonusfaktor für die Schweißnahtprüfklasse  $f_{CT} = \sqrt{1,12}$ . Der kombinierte Faktor ist  $f_{QL} \cdot f_{CT} = 1,12$ .

## 5.2.9 Wöhlerlinien und Methoden der Schadensakkumulationsregel

Jede Wöhlerlinie ist gekennzeichnet durch die Fat-Klasse  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  (siehe Anhang D).

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

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

| Werkstoff | Spannungsart   |                           | Wöhlerlinienexponent<br>$m$ | Knickpunkt $N_D$<br>$10^6$        |
|-----------|----------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Stahl     | Normalspannung | Senkrecht zur Schweißnaht | Abschnitt D.2               | Abschnitt D.2 nach Gleichung (15) |
|           |                | Längs der Schweißnaht     | 4,0                         | 2                                 |
|           | Schubspannung  |                           | 5,0                         | 100                               |
| Aluminium | Normalspannung | Senkrecht zur Schweißnaht | Abschnitt D.2               | 10                                |
|           |                | Längs der Schweißnaht     | 6,0                         | 10                                |
|           | Schubspannung  |                           | 5,0                         | 100                               |

Bei Normalspannung senkrecht zur Schweißnaht an Schweißverbindungen aus Stahl ist die Lage des Knickpunktes abhängig von den Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  ( $N_C = 2 \times 10^6$ ):

- bei  $\Delta\sigma_C \geq 112 \text{ N/mm}^2$  ist die Knickpunktposition  $N_D = 2 \times 10^6$  Zyklen;
- bei  $\Delta\sigma_C \leq 50 \text{ N/mm}^2$  ist die Knickpunktposition  $N_D = 10^7$  Zyklen;
- bei  $112 \text{ N/mm}^2 > \Delta\sigma_C > 50 \text{ N/mm}^2$  ist die Knickpunktposition durch Gleichung (15) als:

$$N_D = 10^{(4,0895 - 1,9956 \log(\Delta\sigma_C))} \times N_C \quad (15)$$

gegeben.

Für Nahtwurzeln von nicht durchgeschweißten Nähten mit Normalspannungen senkrecht zur Naht ist der Knickpunkt unabhängig von den Fat-Klassen bei  $N_D = 10^7$  Zyklen.

Die Spannungsschwingbreite für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit am Knickpunkt der Wöhlerlinie ist durch Gleichung (16) als:

$$\Delta\sigma_D(R = -1) = \Delta\sigma_R \cdot \left(\frac{N_C}{N_D}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

gegeben.

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

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

| Schadens-<br>akkumulationsregel                               | Exponent jenseits<br>des Knickpunktes $N_D$ | Cut-Off-Limit<br>$\Delta\sigma_L$ | Grenze der Miner-<br>Summe<br>$D_{m,min}$ |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Verfahren<br>Miner modifiziert                                | $2m-1^a$                                    | 50 % der Festigkeit<br>bei $N_D$  | 0,5                                       |
| Verfahren<br>Miner konsequent                                 | -                                           | -                                 | 0,5                                       |
| <sup>a</sup> Anhang D stellt anwendbare Werte für $m$ bereit. |                                             |                                   |                                           |

In Bild 2 sind die prinzipiellen Darstellungen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen für Normalspannung angegeben. Für Wöhlerlinien auf Grundlage von Schubspannungen wird das Symbol  $\sigma$  durch das Symbol  $\tau$  ersetzt.

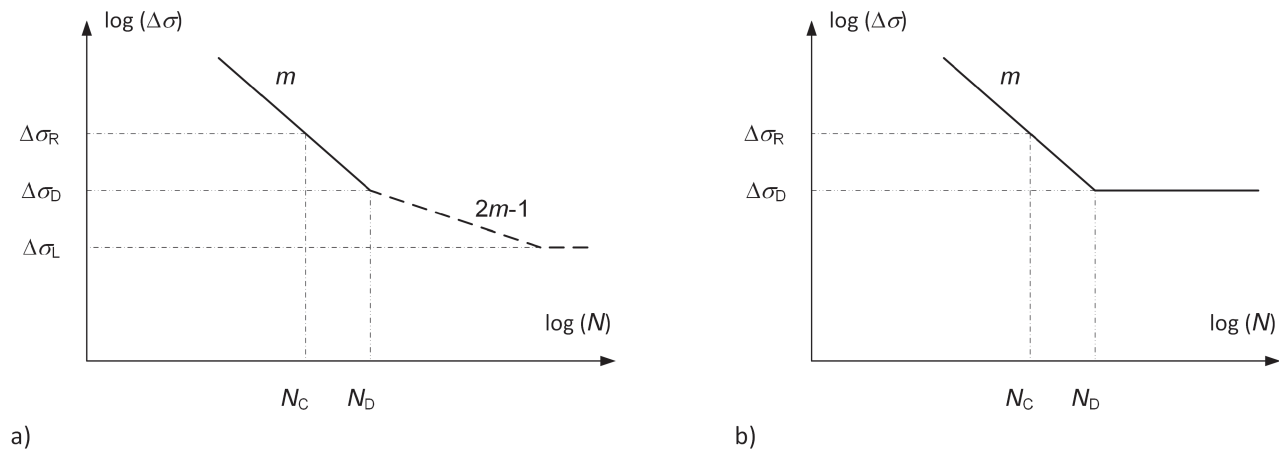


**Bild 2 — Wöhlerlinien für Schweißverbindungen für Normalspannungen: a) Verfahren Miner modifiziert; b) Verfahren Miner konsequent**

### 5.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Grundwerkstoff und Schweißverbindungen durch Laborversuche

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

Bei der Ableitung der Ermüdungsfestigkeit aus Ermüdungsversuchen mit Kleinproben sollte der statistische Umrechnungsfaktor, der zur Anpassung der Versuchsdaten von der 50-%igen Überlebenswahrscheinlichkeit auf eine 97,5-%ige Überlebenswahrscheinlichkeit verwendet wird, auf Fachliteratur beruhen.

**ANMERKUNG** Statistische Umrechnungsfaktoren, die aus einzelnen Versuchskampagnen abgeleitet wurden, sind höchstwahrscheinlich nicht konservativ, wenn man sie mit statistischen Umrechnungsfaktoren vergleicht, die aus mehreren unabhängigen Versuchen abgeleitet wurden, und wenn man sie mit statistischen Schwankungen bei Bauteilen aus der eigentlichen Fertigung vergleicht.

Für die Ableitung von Festigkeitswerten aus Ermüdungsversuchen sind die tatsächlichen Bedingungen des Prüfkörpers relevant, nicht die Mindestanforderungen, die durch Zeichnungen oder Spezifikationen festgelegt sind.

Die folgenden Auswirkungen müssen mindestens berücksichtigt werden:

- Art der Belastung (Zug-Druck, Biegung, Umlaufbiegung, Scherung);
- Spannungsverhältnis: die Mittelspannungsempfindlichkeit führt zu unterschiedlichen Dauerfestigkeitsamplituden bei Ermüdungsversuchen mit einem Spannungsverhältnis  $R < 0,5$  im Vergleich zu denen von  $\Delta\sigma_C$  bei  $R = 0,5$ ;
- Streuung der Versuchsergebnisse (Ermittlung des Festigkeitswertes mit 97,5-%iger Überlebenswahrscheinlichkeit aus dem Mittelwert der Festigkeitsverteilung);
- Oberflächenbeschaffenheit;
- Gussqualität;
- tatsächliche Schweißnahtqualität des Prüfkörpers im Vergleich zur geforderten Bewertungsgruppe;

- tatsächliche Bemessung der Schweißnahtkehle des Prüfkörpers;
- Eigenspannungszustand im Prüfkörper für Schweißverbindungen [um einen konservativen Wert von  $\Delta\sigma_C$  aus kleinen Prüfkörpern zu gewährleisten, muss bei der Ableitung von  $\Delta\sigma_C$  bei  $R = 0,5$  aus Versuchen mit Spannungsverhältnissen  $R < 0,5$  eine hohe Mittelspannungsempfindlichkeit berücksichtigt werden (siehe A.2.2)].

Wird die Wöhlerlinie auf der Grundlage von Versuchsdaten bestimmt, müssen alle Verfahren zur Schweißnahtnachbehandlung in die Prüfung einbezogen und der Bonusfaktor für die Schweißnahtnachbehandlung ist auf  $f_{\text{post}} = 1,0$  gesetzt werden.

## 6 Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten

### 6.1 Allgemeines

Für die Herleitung des Spannungskollektivs und in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit werden Teilbeiwerte zur Abdeckung von Unsicherheiten im Ermüdungsnachweisverfahren verwendet, wobei die Schadensfolge, das während der Wartung angewendete Prüfniveau und der Umfang des Validierungsvorgangs berücksichtigt werden.

Die Anwendung dieser Teilbeiwerte in Bezug auf den in dieser Norm angegebenen Betriebsfestigkeitsnachweis ersetzt die in EN 15085-3:2022 angegebenen Definitionen zu Sicherheitsbedürfnis und Ausnutzung der Beanspruchbarkeit.

### 6.2 Teilbeiwert für Lasten $\gamma_L$

Die Bemessungslast enthält alle notwendigen Zuschläge, um Unsicherheiten in ihrem Wert zu berücksichtigen. Sie ist die repräsentative Last multipliziert mit dem Teilbeiwert  $\gamma_L$ .

Lasten, die nach EN 12663 für Wagenkastenstrukturen, EN 13749 und EN 15827 für Drehgestellstrukturen bestimmt werden, dürfen als Bemessungslasten angesehen werden.

Wird das Spannungskollektiv aus physischen oder virtuellen Streckenversuchen hergeleitet, so muss ein geeigneter Teilbeiwert  $\gamma_L$  für die Abdeckung von Unsicherheiten bei diesen Ergebnissen festgelegt werden. Sofern nicht anders in der Anwendungsnorm angegeben, ist ein Teilbeiwert  $\gamma_L = 1,1$  ausreichend, um alle verbleibenden Unsicherheiten des Versuchs- und Fahrzeugstandes zu berücksichtigen, vorausgesetzt, die Prüfungen werden:

- auf repräsentativer Strecke;
- unter normalen Betriebsbedingungen;
- mit einer repräsentativen Nutzlast; und
- mit ausreichender Länge

durchgeführt.

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

ANMERKUNG 2 Normale Betriebsbedingungen sind gegeben, wenn Geschwindigkeitsprofil, Anzahl der Halte, Zustand der Aufhängung usw. dem vorgesehenen Einsatz entsprechen.

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

ANMERKUNG 4 Ausreichende Länge der Prüfungen ist gegeben, wenn:

- die Gesamtlänge der Prüfungen mindestens 1/10 000 der Lebenslaufleistung beträgt; oder
- das gesamte Netz, welches für den Fahrzeugeinsatz vorgesehen ist, dreimal gemessen wird (was bei geschlossenen Netzen angemessen wäre).

### 6.3 Teilbeiwert für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit $\gamma_M$

#### 6.3.1 Allgemeines

Der Teilbeiwert  $\gamma_M$  für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit ist gegeben durch:

$$\gamma_M = \gamma_{M,S} \cdot \gamma_{M,I} \cdot \gamma_{M,V} \quad (17)$$

Dabei ist

- $\gamma_{M,S}$  Teilbeiwert für die Schadensfolge (siehe 6.3.2);
- $\gamma_{M,I}$  Teilbeiwert für die Prüfung während der Wartung (siehe 6.3.3);
- $\gamma_{M,V}$  Teilbeiwert für den Validierungsgrad (siehe 6.3.4).

Der Teilbeiwert  $\gamma_M$  für die Bauteil-Ermüdungsfestigkeit ist auf einen Mindestwert von 1,0 begrenzt. Ein Wert kleiner als 1,0 darf nicht ohne zusätzliche technische Begründung verwendet werden.

Tabelle 13 zeigt die aus Gleichung (17) hergeleiteten Werte für den Teilbeiwert  $\gamma_M$ , gerundet auf das nächste Hundertstel.

**Tabelle 13 — Teilbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit  $\gamma_M$**

|                                                                    | Teilbeiwert $\gamma_{M,V}$<br>für Validierungs-<br>grad | Teilbeiwert $\gamma_M$                                              |                                                                  |                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                                                                    |                                                         | Sicherheits-<br>bedürfnis<br><br>„hoch“<br><br>$\gamma_{M,S} = 1,2$ | Sicherheitsbedürfnis<br><br>„mittel“<br><br>$\gamma_{M,S} = 1,1$ | Sicherheitsbedürfnis<br><br>„niedrig“<br><br>$\gamma_{M,S} = 1,0$ |
| <b>Regelmäßige<br/>Prüfung</b><br>$\gamma_{M,I} = 0,9$             | 1,3                                                     | 1,40                                                                | 1,29                                                             | 1,17                                                              |
|                                                                    | 1,2                                                     | 1,30                                                                | 1,19                                                             | 1,08                                                              |
|                                                                    | 1,1                                                     | 1,19                                                                | 1,09                                                             | 1,00                                                              |
|                                                                    | 1,0                                                     | 1,08                                                                | 1,00                                                             | 1,00                                                              |
| <b>Keine regel-<br/>mäßige<br/>Prüfung</b><br>$\gamma_{M,I} = 1,0$ | 1,3                                                     | 1,56                                                                | 1,43                                                             | 1,30                                                              |
|                                                                    | 1,2                                                     | 1,44                                                                | 1,32                                                             | 1,20                                                              |
|                                                                    | 1,1                                                     | 1,32                                                                | 1,21                                                             | 1,10                                                              |
|                                                                    | 1,0                                                     | 1,20                                                                | 1,10                                                             | 1,00                                                              |

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

Der Teilbeiwert  $\gamma_{M,S}$  berücksichtigt die Schadensfolge im Allgemeinen in Anlehnung an die Definition der Sicherheitskategorien in FprEN 15085-3:2022 (4.5 und Anhang G) mit Anpassungen.

a) Sicherheitsbedürfnis „niedrig“

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

b) Sicherheitsbedürfnis „mittel“

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

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

c) Sicherheitsbedürfnis „hoch“

Ein Versagen des Strukturdetails führt zu Folgeereignissen mit Personenschäden und Ausfall der Gesamtfunktion und keines der Kriterien für das Sicherheitsbedürfnis „mittel“ trifft zu (siehe Liste).

ANMERKUNG Abweichend von der Definition der EN 15085-3:2022 ist der Einfluss, einen Riss bei der regelmäßigen Prüfung zu erkennen zu können, von der Einstufung der Sicherheit ausgeschlossen, jedoch ist in dieser Norm ein separater Teilbeiwert  $\gamma_{M,I}$  enthalten, der diesen Effekt berücksichtigt.

In Abhängigkeit vom Sicherheitsbedürfnis ist der Teilbeiwert  $\gamma_{M,S}$  in Tabelle 14 angegeben. Der Teilbeiwert  $\gamma_{M,S}$  ist sowohl für den Grundwerkstoff als auch für Schweißverbindungen anwendbar.

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

| Sicherheitsbedürfnis | Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ |
|----------------------|----------------------------|
| Niedrig              | 1,0                        |
| Mittel               | 1,1                        |
| Hoch                 | 1,2                        |

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

Wartungsverfahren für Schienenfahrzeugprodukte stellen normalerweise sicher, dass Ermüdungsrisse erkannt werden, bevor sie zu einem katastrophalen Strukturversagen führen. Außer unter bestimmten Umständen darf daher für den Festigkeitsnachweis von einer regelmäßigen Prüfung ausgegangen werden.

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

Es darf keine regelmäßige Prüfung für ein Strukturdetail angenommen werden, wenn der lasttragende Teil bei der Prüfung nicht zugänglich ist.

Ist jedoch eine Schweißnaht oder ein Strukturdetail von einer Seite aus zugänglich, darf die Prüfung der zugänglichen Fläche als ausreichend angesehen werden, um lokale Defekte vor einem Bauteil-Strukturversagen zu erkennen.

Für Strukturen im Anwendungsbereich dieser Norm, deren Prüfung im Wartungsprogramm vorgesehen ist, darf eine regelmäßige Prüfung angenommen werden, wenn das Prüfintervall nicht höher als ein Drittel der Auslegungslbensdauer ist und das Strukturdetail repariert oder in der Wartung ausgetauscht werden kann.

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

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

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

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

Sieht der Prüfplan einen Ersatz von Laborversuchen durch erhöhte Teilbeiwerte vor, muss der Teilbeiwert  $\gamma_{M,I}$  nach Gleichung (18) mit den Werten für die verminderte Validierung in der passenden Zeile in Tabelle 16 ermittelt werden:

$$\gamma_{M,V} = \gamma_{M,V,ST} \cdot \gamma_{M,V,FT} \quad (18)$$

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

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

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

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

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

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

## 7 Verfahren des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage von Schadensakkumulation

### 7.1 Allgemeines

Abschnitt 7 beschreibt das Verfahren zur Durchführung des Betriebsfestigkeitsnachweises auf Grundlage von Schadensakkumulation.

Im folgenden Nachweisverfahren werden die Gleichungen für die Normalspannungskomponenten definiert. Bei Schubspannungen müssen diese Gleichungen durch Ersetzen von  $\sigma$  durch  $\tau$  angewendet werden.

Dem folgenden Nachweisverfahren liegen Bemessungsspannungen zu Grunde, bei denen der Teilbeiwert für Lasten während der Bestimmung der Bemessungsspannungskollektive angewendet wird.

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

- a) Ermittlung von transienten Spannungsdaten (durch Berechnung oder Messung);
- b) Vorverarbeitung der Daten für jede einzelne Spannungskomponente:
  - 1) Konditionierung (z. B. Fehlerkorrektur (Spikes), Offset-Korrektur usw.);
  - 2) Anpassung der Spannungshistorie nach 7.3.2;
  - 3) Rainflowklassierung (Ergebnis: Matrix inklusive Bemessungsspannungskollektive mit entsprechender Mittelspannung und Zyklenzahlen);
  - 4) Mittelspannungsanpassung nach 7.3.4 (Ergebnis: Bemessungsspannungskollektiv, das Spannungsschwingbreiten mit konstantem Spannungsverhältnis  $R = -1$  darstellt, absteigend sortiert, also  $\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{i+1}$ );
  - 5) Anwendung der Omissionsgrenze;
  - 6) Extrapolation auf die Auslegungslebensdauer (Ergebnis: Das für die gesamte Auslegungslebensdauer relevante Bemessungsspannungskollektiv).
- c) Schadensberechnung nach 7.4 für jede Spannungskomponente:
  - 1) Bestimmung des Formfaktors des Spannungskollektivs  $A_{eq}$ ;
  - 2) Bestimmung der zulässigen Miner-Summe  $D_m$ ;
  - 3) Bestimmung der Auslastung für einzelne Spannungskomponenten  $U_c$  durch iteratives Verfahren.
- d) Betriebsfestigkeitsnachweis für den mehrachsigen Spannungszustand nach 7.5 (Gesamt-Auslastung für den mehrachsigen Spannungszustand  $U_p$ ).

Anhang I enthält ein Beispiel für einen Betriebsfestigkeitsnachweis auf Grundlage von Schadensakkumulation.

## 7.2 Spannungsermittlung

Die Bemessungsspannungsermittlung muss nach Abschnitt 4 und prEN 17149-1:2023, Abschnitt 5, durchgeführt werden.

## 7.3 Bestimmung des Bemessungsspannungskollektivs

### 7.3.1 Konditionierung

Insbesondere bei gemessenen Spannungsdaten müssen die Rohdaten auf Plausibilität und mögliche Messfehler überprüft werden. Spikes oder Offsets der Mittelspannung müssen korrigiert werden.

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

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

### 7.3.2 Anpassung der Spannungshistorie

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

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

Jede Spannungskomponente muss mit geeigneten Faktoren oder Techniken angepasst werden.

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

### 7.3.3 Zählung

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

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

Das bei der Rainflowklassierung anfallende Residuum muss mit einem geeigneten Verfahren behandelt werden.

BEISPIEL 1 Das Residuum kann vermieden werden, indem der Beginn und das Ende der Zählung auf das globale Maximum oder Minimum der Reihe gelegt werden.

BEISPIEL 2 Die offene Zyklenfolge kann nach ISO 12110-2 [51] behandelt werden.

BEISPIEL 3 Das Residuum kann mit halber Frequenz nach ASTM E1049 [50] gezählt werden.

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

### 7.3.4 Mittelspannungsanpassung

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

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

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

Die angepassten Spannungsschwingbreiten werden unter Verwendung von Gleichung (19) ermittelt:

$$\Delta\sigma_k = \frac{\Delta\sigma_{k,RF}}{f_{m,\sigma,k}} \quad (19)$$

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

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

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

Werden die Spannungsschwingbreiten entsprechend ihren Spannungsschwingbreitenwerten nach der Mittelspannungsanpassung umgeordnet, wird der Index  $k$  zum Index  $i$  ( $\Delta\sigma_k \rightarrow \Delta\sigma_i$ ).

Ein vereinfachter konservativer Nachweis darf vorgenommen werden, ohne dass der Mittelspannungsfaktor für jeden Spannungszyklus berechnet werden muss, indem die Annahme verwendet wird, dass alle Spannungszyklen hohe schwankende Spannungen sind.

ANMERKUNG Bei der Anwendung von Anhang A ist dies der Fall, wenn alle Spannungszyklen in das Feld IV fallen.

### 7.3.5 Omission

Nach Zählung und Anpassung der Mittelspannung des Spannungskollektivs werden alle Zyklen mit einer Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_{OM}$  ausgelassen. Die Omissionsgrenze  $\Delta\sigma_{OM}$  ist durch Gleichung (20) definiert:

$$\Delta\sigma_{OM} = 0,1 \times \Delta\sigma_D \quad (20)$$

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

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

Alle Spannungen unterhalb der Omissionsgrenze brauchen für weitere Berechnungen und Iterationen nicht berücksichtigt werden. Für Spannungskollektive, bei denen die maximale Spannungsschwingbreite unterhalb der Omissionsgrenze liegt, kann das folgende Verfahren nicht angewendet werden. In diesem Fall muss eine Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente  $U_c = 0$  verwendet werden.

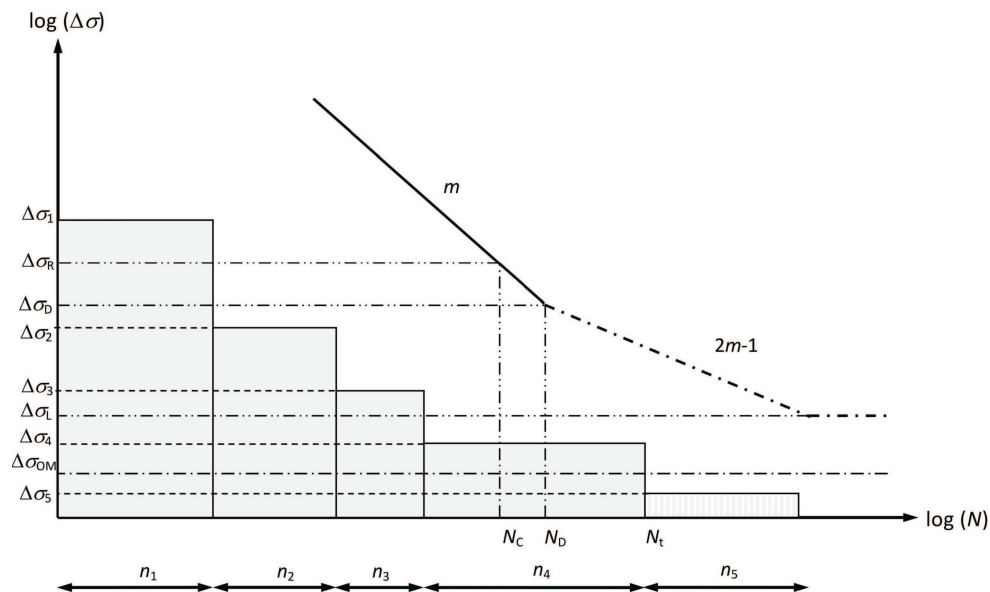


**Bild 3 — Beispiel eines Spannungskollektivs zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit und Wöhlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert**

## 7.4 Schädigungsberechnung für jede einzelne Spannungskomponente

### 7.4.1 Allgemeines

Für den Betriebsfestigkeitsnachweis muss eine der folgenden Schadensakkumulationsregeln (Schadensakkumulationshypothesen oder Miner-Regeln) unter Verwendung der in 5.1.7 und 5.2.9 festgelegten Parameter angewendet werden:

- Verfahren Miner modifiziert;
- Verfahren Miner konsequent.

Die Verwendung von anderen Methoden ist unter Voraussetzung einer stichhaltigen Begründung zulässig.

**ANMERKUNG 1** Ein Vergleich der Schadensakkumulation mit Verfahren Miner konsequent ist ein Beispiel für eine stichhaltige Begründung.

Die Gleichungen in 7.4 definieren die Schadensberechnung für das Verfahren Miner modifiziert.

**ANMERKUNG 2** Die modifizierte Version der Miner-Regel ist eine Annäherung an das Verfahren Miner konsequent.

Für die Anwendung des Verfahrens Miner konsequent werden in der Fachliteratur die Gleichungen der Schadensberechnung angegeben.

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

Das in 7.4.2 und 7.4.3 definierte Verfahren darf durch den konservativen Ansatz vereinfacht werden, die zulässige Miner-Summe  $D_m$  auf  $D_{m,min}$  zu setzen (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7), ohne den Formfaktor  $A_{eq}$  des Spannungskollektivs zu berechnen.

### 7.4.2 Bestimmung des Spannungskollektiv-Formfaktors $A_{eq}$

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

Der Spannungskollektiv-Formfaktor ist eine Funktion der Spannungsschwingbreiten und der Zyklenzahl jeder Spannungsschwingbreitenklasse in Bezug auf die maximale Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_1$  und die Gesamtzyklenzahl im gegebenen Spannungskollektiv [siehe Gleichung (21)]. Er ist daher unabhängig von den Absolutwerten des Spannungskollektivs.

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

$$A_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1}\right)^m \cdot \frac{n_i}{N_t}} \quad (21)$$

#### 7.4.3 Bestimmung der zulässigen Miner-Summe $D_m$

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

Die zulässige Miner-Summe  $D_m$  wird unter Verwendung von Gleichung (22), Gleichung (23) und Gleichung (24) bestimmt:

$$D_m = \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} \text{ für } D_{m,min} \leq \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} \leq 1 \quad (22)$$

$$D_m = D_{m,min} \text{ für } \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} < D_{m,min} \quad (23)$$

$$D_m = 1 \text{ für } \frac{2}{\sqrt[4]{A_{eq}}} > 1 \quad (24)$$

#### 7.4.4 Bestimmung der Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente

Die akkumulierte Miner-Summe  $D_{it}$  für ein Spannungskollektiv wird nach Gleichung (25) ermittelt.

Um die Auslastung in Bezug auf das Spannungskollektiv für eine einzelne Spannungskomponente zu bewerten, muss das folgende iterative Verfahren angewendet werden, um den Skalierungsfaktor des Spannungskollektivs, welcher bei Anwendung auf die Ergebnisse des Spannungskollektivs eine akkumulierte Miner-Summe  $D_{it} - D_m = 0$  ergibt, zu bestimmen:

- Die Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_i$  des Spannungskollektivs werden mit dem Skalierungsfaktor  $x_{it}$  skaliert (siehe Bild 4).
- Die akkumulierte Miner-Summe  $D_{it}$  wird mit den skalierten Spannungsschwingbreiten  $x_{it} \cdot \Delta\sigma_i$  ermittelt.
- Mittels Variation des Skalierungsfaktors  $x_{it}$  muss die akkumulierte Miner-Summe  $D_{it}$  gegen die zulässige Miner-Summe  $D_m$  konvergiert werden. Die Differenz von  $(D_{it} - D_m)$  muss also unter der Bedingung  $D_{it} \leq D_m$  gegen Null konvergieren ( $x_{it}$  nähert sich  $x_{Dm}$  an).

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

$$D_{it} = \sum_{i=1}^{\delta-1} \left( \frac{x_{it} \cdot \Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^m \cdot \frac{n_i}{N_D} + \sum_{i=\delta}^{j_{it}} \left( \frac{x_{it} \cdot \Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^{2m-1} \cdot \frac{n_i}{N_D} \quad (25)$$

ANMERKUNG 1 Mit einem Skalierungsfaktor  $x_{it} = 1$  ergibt Gleichung (25) die akkumulierte Miner-Summe des gegebenen Kollektivs.

Die Auslastung für eine einzelne Spannungskomponente  $U_c$  entspricht dem Kehrwert des konvergierten Skalierungsfaktors ( $x_{it}$  nähert sich  $x_{Dm}$ ) für die untersuchte Spannungskomponente unter Berücksichtigung des Teilbeiwerts  $\gamma_M$ :

$$U_c = \gamma_M \cdot \gamma_L \cdot \frac{1}{x_{Dm}} \quad (26)$$

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

BEISPIEL 1 Für den Grundwerkstoff ergibt dieses Verfahren die Gleichung (27) bis Gleichung (29).

$$U_{c,\sigma_x} = \gamma_M \cdot \frac{1}{x_{Dm,\sigma_x}} \quad (27)$$

$$U_{c,\sigma_y} = \gamma_M \cdot \frac{1}{x_{Dm,\sigma_y}} \quad (28)$$

$$U_{c,\tau_{xy}} = \gamma_M \cdot \frac{1}{x_{Dm,\tau_{xy}}} \quad (29)$$

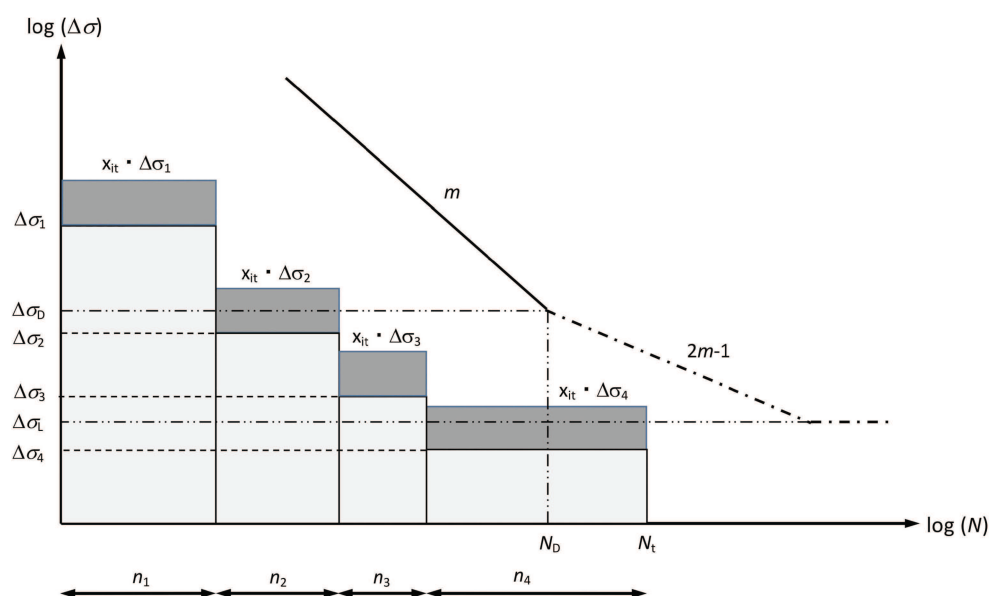


**Bild 4 — Beispiel für den ursprünglichen und skalierten Zustand des Spannungskollektivs für den Betriebsfestigkeitsnachweis und die Wöhlerlinie bezogen auf das Verfahren Miner modifiziert**

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

ANMERKUNG 2 Die Äquivalentspannungsschwingbreiten für die Zyklenzahlen  $N_D$  und  $N_C$  können durch Gleichung (30) und Gleichung (31) ermittelt werden.

$$\Delta\sigma_{eq,N_D} = \frac{\Delta\sigma_D}{x_{Dm}}; \quad \Delta\tau_{eq,N_D} = \frac{\Delta\tau_D}{x_{Dm}} \quad (30)$$

$$\Delta\sigma_{eq,N_C} = \frac{\Delta\sigma_D}{x_{Dm}} \cdot \left(\frac{N_D}{N_C}\right)^{\frac{1}{m}}; \quad \Delta\tau_{eq,N_C} = \frac{\Delta\tau_D}{x_{Dm}} \cdot \left(\frac{N_D}{N_C}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (31)$$

## 7.5 Betriebsfestigkeitsnachweis

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

Für die Bewertung des Grundwerkstoffs kann eine feste Bewertungsrichtung nicht unabhängig von den Spannungsdaten definiert werden.

Für die Bewertung von Schweißverbindungen ist die Richtung fest und ist geometrisch in Bezug auf die Richtung der Schweißnaht festgelegt. Demzufolge darf das Verfahren der kritischen Schnittebenen (siehe 7.6) nicht für Schweißnähte verwendet werden.

Für den Grundwerkstoff gibt Gleichung (32) das allgemeine Verfahren zur Berechnung der kombinierten Auslastung an.

$$U_f = \sqrt{(U_{c,\sigma_x})^2 + (U_{c,\sigma_y})^2 + (U_{c,\sigma_x}) \cdot (U_{c,\sigma_y}) + (U_{c,\tau_{xy}})^2} \quad (32)$$

Gleichung (33) darf für den Grundwerkstoff angewendet werden, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

- proportionaler Spannungszustand mit Normalspannungskomponenten gleichen Vorzeichens; oder
- wenn das gesamte Nachweisverfahren einem Verfahren der kritischen Schnittebenen unterzogen wird.

$$U_f = \sqrt{(U_{c,\sigma_x})^2 + (U_{c,\sigma_y})^2 - (U_{c,\sigma_x}) \cdot (U_{c,\sigma_y}) + (U_{c,\tau_{xy}})^2} \quad (33)$$

ANMERKUNG 1 In Anhang J sind weitere Angaben zum Verfahren der kritischen Schnittebenen zu finden.

Für Schweißverbindungen gibt Gleichung (34) das Verfahren zur Berechnung der kombinierten Auslastung an.

$$U_f = \sqrt{(\max(U_{c,\sigma_\perp}; U_{c,\sigma_\parallel}))^2 + (U_{c,\tau})^2} \quad (34)$$

ANMERKUNG 2 Wird der Spannungszustand als einachsige Spannung betrachtet, werden die anderen Komponenten auf Null gesetzt (siehe 7.3.5 und prEN 17149-1:2021, 5.1).

## 7.6 Verfahren der kritischen Schnittebenen

Das Verfahren der kritischen Schnittebenen bietet eine Möglichkeit, die Auswirkung unterschiedlicher Ergebnisse der Spannungshistorie in Abhängigkeit von der Richtung der für die Bewertung verwendeten Spannungen (Bewertungsrichtung) zu berücksichtigen. Durch die Anwendung des Ansatzes der kritischen Schnittebene soll diejenige Richtung identifiziert werden, in der die einwirkenden Spannungskomponenten die höchste Auslastung erzeugen.

**ANMERKUNG** Im Allgemeinen ist die Ausrichtung der Hauptspannungen über die Spannungshistorie nicht konstant. Bei Anwendung des Ansatzes der kritischen Schnittebenen erfolgt der Betriebsfestigkeitsnachweis auf der Grundlage von Spannungsdaten, die in einem festen, über die gesamte Spannungshistorie konstanten Koordinatensystem tangential zur Bauteiloberfläche ermittelt werden. Das Ergebnis der kombinierten Auslastung ist abhängig von der Bewertungsrichtung.

Bei einer gegebenen Historie der Spannungstensenoren führt eine bestimmte Bewertungsrichtung zu einer höchstmöglichen kombinierten Auslastung. Die Richtung, die zu diesem höchstmöglichen Ergebnis führt, wird als kritische Ebene bezeichnet.

Das im Folgenden definierte Verfahren der kritischen Schnittebenen ist eine vereinfachte Methode zur Annäherung an eine Richtung nahe der kritischen Schnittebenen, wobei die kritische Ebene selbst jedoch nicht genau bestimmt wird.

Das Verfahren des Ansatzes der kritischen Schnittebenen besteht aus den folgenden Schritten:

- Bestimmung der Spannungskomponenten  $\sigma_{x,0}(t)$ ,  $\sigma_{y,0}(t)$ ,  $\tau_{xy,0}(t)$  in einer beliebigen Anfangsbewertungsrichtung.
- Betriebsfestigkeitsnachweis mit diesen Spannungskomponenten nach dem vollständigen Verfahren wie in 7.3, 7.4 und 7.5 festgelegt, was zu einer kombinierten Auslastung  $U_{f,0}$  führt.
- Die Bewertungsrichtung wird schrittweise um einen Winkel  $\Delta\psi$  gedreht. Die Spannungskomponenten  $\sigma_{x,1}(t)$ ,  $\sigma_{y,1}(t)$ ,  $\tau_{xy,1}(t)$  werden durch eine Drehtransformation aller Spannungstensenoren der Spannungshistorie bestimmt.
- Die Ermüdungsbewertung wird mit den geänderten Spannungskomponenten  $\sigma_{x,1}(t)$ ,  $\sigma_{y,1}(t)$ ,  $\tau_{xy,1}(t)$  wiederholt, wobei im Verfahrensschritt „Zählen“ (siehe 7.3.3) neu begonnen wird und sich die kombinierte Auslastung  $U_{f,1}$  ergibt.
- Die Bewertung mit wechselnden Richtungswinkeln wird wiederholt, um den gesamten Bereich der Bewertungsrichtungen abzudecken.
- Die endgültige kombinierte Auslastung  $U_f$  wird als das Maximum aller kombinierten Auslastungen  $U_{f,i}$  aus jedem Inkrement ermittelt.

Die Genauigkeit der Annäherung an die kritische Ebene hängt vom Inkrement  $\Delta\psi$  zwischen den untersuchten Richtungen ab. Es wird ein Schritttintervall von  $\Delta\psi \leq 10^\circ$  empfohlen.

**ANMERKUNG 1** Im Allgemeinen ist es ausreichend, die Spannungsdaten, die das Ergebnis der ersten Verfahrensschritte Konditionierung (7.3.1) und Anpassung der Spannungshistorie (7.3.2) sind, als Eingabe für das Verfahren der kritischen Schnittebenen zu verwenden.

**ANMERKUNG 2** Es ist ausreichend, die Bewertungsrichtung in einem Bereich von  $0^\circ \leq \psi < 90^\circ$  zu variieren, da eine Transformation von  $90^\circ$  zu identischen kombinierten Auslastungen  $U_f$  führt, bei denen die Ergebnisse der Spannungskomponenten zwischen der x- und y-Komponente vertauscht sind.

## Anhang A (informativ)

### Verfahren zur Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren für Grundwerkstoff und Schweißverbindungen

#### A.1 Allgemeines

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

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

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

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

- Den Mittelspannungsempfindlichkeiten  $M_\sigma$  und  $M_\tau$ . Für den Grundwerkstoff ist die Mittelspannungsempfindlichkeit vom Werkstoff abhängig (siehe A.2.1). Bei Schweißverbindungen ist die Mittelspannungsempfindlichkeit abhängig vom Eigenspannungszustand (siehe A.2.2).
- Dem Spannungsverhältnis der gegebenen Spannungsschwingbreite, ausgedrückt durch die Mittelspannung  $\sigma_m$  und die Spannungsamplitude  $\sigma_a$ .

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

Die Mittelspannungsfaktoren werden unter der Annahme konstanter Spannungsverhältnisse ermittelt.

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

## A.2 Mittelspannungsempfindlichkeit

### A.2.1 Grundwerkstoff

Für den Grundwerkstoff sind die Mittelspannungsempfindlichkeiten für die Normalspannung  $M_\sigma$  und für die Schubspannung  $M_\tau$  abhängig von der Zugfestigkeit  $R_m$  des Grundwerkstoffs und den Werkstoffparametern  $a_m$  und  $b_m$ . Sie werden nach Gleichung (A.1) und Gleichung (A.2) berechnet. Für diese Gleichungen sind die Werkstoffparameter  $a_m$  und  $b_m$  in Tabelle A.1 angegeben.

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

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

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

| Werkstoff                                                  | $a_m$<br>mm <sup>2</sup> /N | $b_m$ [-]  |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------|
| Stahl (gewalzt oder geschmiedet, einschließlich Edelstahl) | 0,35                        | -0,1       |
| Stahlguss (GS)                                             | 0,35                        | 0,05       |
| Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS, ADI)                      | 0                           | 0,4        |
| Aluminium (alle Typen, außer Aluminiumguss)                | 1,0                         | -0,04      |
| <b>Aluminiumguss</b>                                       | <b>1,0</b>                  | <b>0,2</b> |

### A.2.2 Schweißverbindungen

Bei Schweißverbindungen ist die Mittelspannungsempfindlichkeit abhängig vom Eigenspannungszustand. Tabelle A.2 definiert die Werte für  $M_\sigma$  und  $M_\tau$ .

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

| Eigenspannungszustand                                                                                        | $M_\sigma$  | $M_\tau$    | $f_{\text{res},\sigma}$ | $f_{\text{res},\tau}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------------------|
| Ableitung von Festigkeitswerten aus kleinmaßstäblichen Prüfkörpern                                           | 0,3         | 0,17        | -                       | -                     |
| Bewertung von Strukturen, die spannungsarm gegläht wurden                                                    | 0,2         | 0,12        | 1,35                    | <b>1,18</b>           |
| <b>Bewertung von Strukturen, die keiner Spannungsarmglühung unterzogen wurden, „im geschweißten Zustand“</b> | <b>0,15</b> | <b>0,09</b> | <b>1,26</b>             | <b>1,15</b>           |

### A.3 Bestimmung der Mittelspannungsfaktoren

Das Spannungsverhältnis eines gegebenen Lastzyklus wird durch Gleichung (A.3) und Gleichung (A.4) bestimmt:

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

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

Für Normalspannungen wird der Mittelspannungsfaktor  $f_{m,\sigma}$  in Abhängigkeit von der Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_{\sigma}$  nach Gleichung (A.5), Gleichung (A.6), Gleichung (A.7) und Gleichung (A.8) bestimmt (siehe auch Bild A.1).

Bereich I: Druckschwellbereich

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

Bereich II: Druckwechselbereich ( $\sigma_m < 0$ ), reine Wechsellastspannung ( $\sigma_m = 0$ ) und Zugwechselbereich ( $\sigma_m > 0$ )

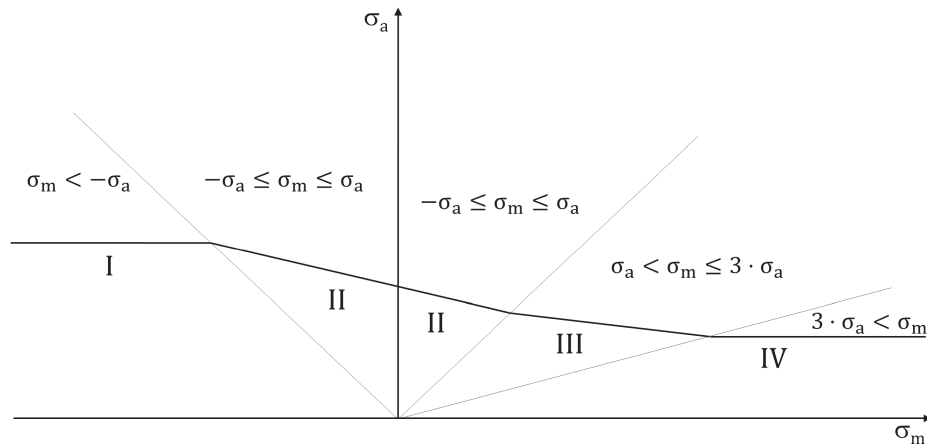
$$-\sigma_a \leq \sigma_m \leq \sigma_a : f_{m,\sigma} = \frac{1}{1 + M_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_a}} \quad (\text{A.6})$$

Bereich III: Niedriger Zugschwellbereich

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

Bereich IV: Hoher Zugschwellbereich

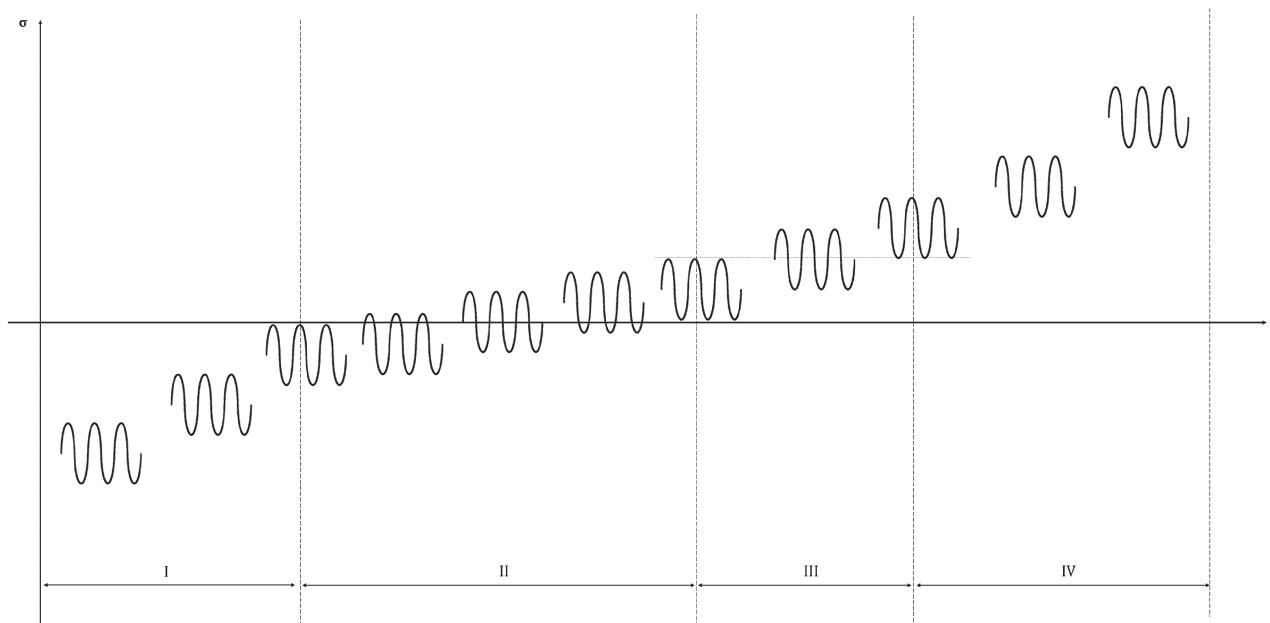
$$3 \sigma_a < \sigma_m : f_{m,\sigma} = \frac{3 + M_{\sigma}}{3 \cdot (1 + M_{\sigma})^2} \quad (\text{A.8})$$



#### Legende

- I Bereich I: Druckschwellbereich
- II Bereich II: Druckwechselbereich ( $\sigma_m < 0$ ), reine Wechsellspannung ( $\sigma_m = 0$ ) und Zugwechselbereich ( $\sigma_m > 0$ )
- III Bereich III: Niedriger Zugschwellbereich
- IV Bereich IV: Hoher Zugschwellbereich

**Bild A.1 — Haigh-Diagramm für Normalspannungen**



#### Legende

- I Bereich I: Druckschwellbereich
- II Bereich II: Druckwechselbereich ( $\sigma_m < 0$ ), reine Wechsellspannung ( $\sigma_m = 0$ ) und Zugwechselbereich ( $\sigma_m > 0$ )
- III Bereich III: Niedriger Zugschwellbereich
- IV Bereich IV: Hoher Zugschwellbereich

**Bild A.2 — Beispiel eines Spannungsdiagramms für Normalspannungen**

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

Bereich II: Schubwechselbereich

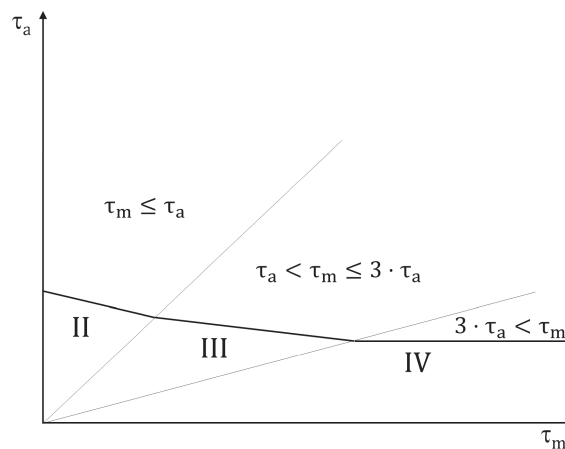
$$\tau_m \leq \tau_a : f_{m,\tau} = \frac{1}{1 + M_\tau \cdot \frac{\tau_m}{\tau_a}} \quad (\text{A.9})$$

Bereich III: Niedriger Schubschwellbereich

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

Bereich IV: Hoher Schubschwellbereich

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



#### Legende

- II Bereich II: Schubwechselbereich
- III Bereich III: Niedriger Schubschwellbereich
- IV Bereich IV: Hoher Schubschwellbereich

**Bild A.3 — Haigh-Diagramm für Schubspannungen**

## Anhang B (informativ)

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

#### B.1 Allgemeines

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

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

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

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

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

| Fehlerkategorie                                                            | Zugewiesen von ASTM | Qualitätsstufe 2   | Qualitätsstufe 3   |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Gaseinschlüsse                                                             | A                   | A3                 | A3                 |
| Fremdkörper                                                                | B                   | B3                 | B3                 |
| Schrumpfung                                                                | C                   | Ca2, Cb2, Cc2, Cd2 | Ca3, Cb3, Cc3, Cd3 |
| Risse (einschließlich Heißrisse und Bindefehler bei Reparaturschweißungen) | D + E               | Nicht erlaubt      | Nicht erlaubt      |
| Kernstützen und Kokillen                                                   | F                   | Nicht erlaubt      | Nicht erlaubt      |

Anmerkungen zur Klassifizierung:

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

## Anhang C (informativ)

### Werkstofffaktoren für Grundwerkstoff

Tabelle C.1 enthält eine informative Zusammenfassung und zusätzliche Informationen zu den Werkstofffaktoren für die in Tabelle 2 und Tabelle 4 definierten Grundwerkstoffe.

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

| Werkstoff                                      | Anisotropiefaktor $f_A$        |             |             |             | Faktor $f_{SR}$ |                            | Faktoren für Normalspannungen $f_{R,\sigma}$ und Schubspannungen $f_{R,\tau}$ |              | Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Guss $f_{R,C}$ |                                | Wöhlerlinien für Grundwerkstoff |                                    |                                                                      |                                                                            |
|------------------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                                | $R_{m,N}$<br>N/mm <sup>2</sup> |             |             |             | $a_{R,s}$       | $b_R$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_{R,\sigma}$                                                                | $f_{R,\tau}$ | ASTM-<br>Qualitäts-<br>stufe 2                | ASTM-<br>Qualitäts-<br>stufe 3 | Spannungsart                    | Wöhlerli-<br>nien-<br>exponent $m$ | Wöhlerlinien-<br>exponent $m_2$ für<br>Verfahren Miner<br>konsequent | Zweiter<br>Knickpunkt<br>$N_{D,2}$ für<br>Verfahren<br>Miner<br>konsequent |
|                                                | ≤ 200                          | > 200 ≤ 400 | > 400 ≤ 600 | > 600 ≤ 900 |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                                |                                 |                                    |                                                                      |                                                                            |
| Stahl<br>(gewalzt<br>oder<br>geschmie-<br>det) | 0,9                            |             |             | 0,86        | 0,22            | 400                        | 0,75                                                                          | 0,577        | 1,0                                           | 1,0                            | Normalspannung                  | 5                                  | 15 <sup>a</sup>                                                      | 10 <sup>8 a</sup>                                                          |
|                                                |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                                | Schubspannung                   | 8                                  | 25 <sup>a</sup>                                                      | 10 <sup>8 a</sup>                                                          |
| Stahlguss-<br>teile                            | 1,0                            |             |             |             | 0,20            | 400                        | 0,57                                                                          | 0,577        | 0,9                                           | 0,8                            | Normalspannung                  | 7                                  | -                                                                    | -                                                                          |
|                                                |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                                | Schubspannung                   | 8                                  | -                                                                    | -                                                                          |
| Gusseisen<br>mit Kugel-<br>graphit<br>(GJS)    | 1,0                            |             |             |             | 0,16            | 400                        | $0,42 + \frac{117 \text{ N/mm}^2}{R_m}$                                       | 0,65         | 0,9                                           | 0,8                            | Normalspannung                  | 7                                  | -                                                                    | -                                                                          |
|                                                |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                                | Schubspannung                   | 8                                  | -                                                                    | -                                                                          |

| Werkstoff                                        | Anisotropiefaktor $f_A$        |             |             |             | Faktor $f_{SR}$ |                            | Faktoren für Normalspannungen $f_{R,\sigma}$ und Schubspannungen $f_{R,\tau}$ |              | Ermüdungsfestigkeitsfaktor für Guss $f_{R,C}$ |                       | Wöhlerlinien für Grundwerkstoff |                           |                                                            |                                                             |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                  | $R_{m,N}$<br>N/mm <sup>2</sup> |             |             |             | $a_{R,s}$       | $b_R$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_{R,\sigma}$                                                                | $f_{R,\tau}$ | ASTM-Qualitätsstufe 2                         | ASTM-Qualitätsstufe 3 | Spannungsart                    | Wöhlerlinien-exponent $m$ | Wöhlerlinien-exponent $m_2$ für Verfahren Miner konsequent | Zweiter Knickpunkt $N_{D,2}$ für Verfahren Miner konsequent |
|                                                  | ≤ 200                          | > 200 ≤ 400 | > 400 ≤ 600 | > 600 ≤ 900 |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                       |                                 |                           |                                                            |                                                             |
| Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) | 1,0                            |             |             |             | 0,16            | 400                        | $\frac{492 \text{ N/mm}^2}{R_m}$                                              | 0,7          | 0,9                                           | 0,8                   | Normalspannung                  | 7                         | -                                                          | -                                                           |
|                                                  |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                       | Schubspannung                   | 8                         | -                                                          | -                                                           |
| Aluminium                                        | 1,0                            | 0,95        | 0,9         | -           | 0,22            | 133                        | 0,6                                                                           | 0,577        | 1,0                                           | 1,0                   | Normalspannung                  | 5                         | 15                                                         | 10 <sup>8</sup>                                             |
|                                                  |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                       | Schubspannung                   | 8                         | 25                                                         | 10 <sup>8</sup>                                             |
| Aluminiumguss                                    | 1,0                            |             |             | -           | 0,20            | 133                        | 0,6                                                                           | 0,75         | 0,9                                           | 0,8                   | Normalspannung                  | 5                         | 15                                                         | 10 <sup>8</sup>                                             |
|                                                  |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                       | Schubspannung                   | 8                         | 25                                                         | 10 <sup>8</sup>                                             |
| a Nur anwendbar für austenitischen Stahl.        |                                |             |             |             |                 |                            |                                                                               |              |                                               |                       |                                 |                           |                                                            |                                                             |

## Anhang D (normativ)

### Fat-Klassen $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Schweißverbindungen nach dem Nennspannungsansatz

#### D.1 Erläuterung der Tabellen für Fat-Klassen

##### D.1.1 Allgemeines

Für Schweißverbindungen, die üblicherweise an Schienenfahrzeugen verwendet werden, enthalten die Tabellen in Anhang D die Fat-Klassen  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  bezogen auf die Blechdicken  $t_{\text{ref}} = 25$  mm für Stahl und  $t_{\text{ref}} = 10$  mm für Aluminium (siehe 5.2.2 und 5.2.4) und alle Parameter, die für die Bestimmung von Wöhlerlinien benötigt werden.

Die Fat-Klassen und Parameter für Wöhlerlinien sind aus

- Fachliteratur wie im Literaturverzeichnis (z. B., [1], [5], [8], [16], [42], [43], [48]),
- Ermüdungsprüfungsdaten von Schienenfahrzeugherstellern und Eisenbahnbetreibern für Prüfmuster, die nach den Herstellungs- und Qualitätsanforderungen der Reihe EN 15085 hergestellt wurden,

abgeleitet.

Aus diesen Daten werden charakteristische Werte für einige Schweißnahttypen (z. B. Stumpfstöße, Doppel-T-Stöße, Überlappstöße, Nahtenden an Anschweißteilen) ermittelt. Dabei werden die Empfehlungen aus 5.3 berücksichtigt. Für andere Stoßtypen werden die Werte und Parameter anhand von

- vergleichenden Kerbfallmodellen nach Abschnitt D.3, oder
- Analogiebetrachtung auf der Grundlage von Ingenieurwissen

bestimmt.

Die Zuordnung der Fat-Klassen von Schweißnahtdetails zu den Wöhlerlinien ist für Stahl und Aluminium im Allgemeinen ähnlich. Gegebenenfalls werden die folgenden werkstoffspezifischen Einflüsse berücksichtigt:

- unterschiedliche Bezugsdicken und Dickenkorrekturfaktor;
- Exponent und Lage des Knickpunktes der Wöhlerlinie.

##### D.1.2 Schweißnaht nach EN 15085-3:2022, Tabelle B.1

Angegeben ist die bzw. sind die entsprechende(n) Nummer(n) nach EN 15085-3:2022, Tabelle B.1.

##### D.1.3 Skizze des Schweißstoßes

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

- Nummer für jedes Anbauteil an der Verbindung (eingekreist);

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

#### D.1.4 Schweißstoßspezifische Anforderungen

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

#### D.1.5 Potenzieller Anrisspunkt

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

#### D.1.6 Durchführbarkeit der Prüfung

Die Prüfbarkeit eines Anrisspunktes während der Fertigung wird mit einem „j“ gekennzeichnet. In diesem Fall ist ein Erweiterungsfaktor für die Schweißnahtprüfklasse  $f_{CT}$  nach 5.2.8 anwendbar.

#### D.1.7 Relevante Dicke für die Beurteilung einer Schweißnaht

Sofern nicht anders angegeben, ist für die Beurteilung eines Nahtüberganges der relevante Querschnitt für die Spannungsbestimmung am Anrisspunkt der angeschlossene Blechabschnitt (Blechdicke  $t$ ). Sofern nicht anders angegeben, ist für die Beurteilung einer Nahtwurzel der relevante Querschnitt für die Spannungsbestimmung der Kehlnahtquerschnitt (wirksame Nahtdicke  $a$ ).

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

#### D.1.8 Werkstoff

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