

# Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749

## Inhalt

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Zielsetzung .....   | 3  |
| 2     | Vorgaben aus der DIN EN 13749 zur Validierung und Konstruktionsfreigabe ..... | 3  |
| 3     | Parameter für Betriebsfestigkeitsmessungen bzw. -bewertungen: .....           | 4  |
| 3.1   | Referenzstrecken.....   | 4  |
| 3.2   | Massebelegung.....  | 5  |
| 3.3   | Berücksichtigung der Fahrzeugmasse .....                                      | 5  |
| 3.4   | Messspezifikation.....  | 5  |
| 3.5   | Bedingungen für Streckenmessungen mit Lokomotiven.....                        | 6  |
| 3.5.1 | Grundsätze .....  | 6  |
| 3.5.2 | Vertikale Belastung .....   | 7  |
| 3.5.3 | Belastung in Längsrichtung.....   | 7  |
| 4     | Analyse der Messdaten.....  | 8  |
| 4.1   | Signalbearbeitung.....  | 8  |
| 4.2   | Umrechnung von Dehnungen in Spannungen.....                                   | 8  |
| 4.3   | Rainflowzählung.....  | 9  |
| 4.4   | Maßnahmen beim Ausfall von Messkanälen bei der Messung .....                  | 9  |
| 5     | Bewertung der Ermüdungsfestigkeit.....  | 11 |
| 5.1   | Anzuwendende Regelwerke.....  | 11 |
| 5.2   | Berücksichtigung von Mittelspannungen .....                                   | 12 |
| 5.3   | Präzisierungen zur Anwendung der FKM-Richtlinie .....                         | 12 |
| 5.4   | Präzisierungen zur Anwendung der IIW-Empfehlungen .....                       | 12 |
| 5.4.1 | Bewertung der Schweißverbindungen nach dem Nennspannungskonzept .....         | 12 |
| 5.4.2 | Bewertung der Schweißnähte nach dem Kerbspannungskonzept.....                 | 13 |
| 5.5   | Schwingversuche zum Nachweis erhöhter Schwingfestigkeit.....                  | 14 |
| 5.6   | Sicherheitsfaktoren .....   | 14 |
| 5.7   | Schädigungsberechnungsmethodik und zulässige Schädigungssumme.....            | 15 |
| 5.8   | Ermüdungsfestigkeitsnachweis für gemessene Dehnungen .....                    | 15 |
| 5.8.1 | Auslastungsgrad beim Dauerfestigkeitsnachweis.....                            | 15 |
| 5.8.2 | Auslastungsgrad beim Betriebsfestigkeitsnachweis .....                        | 16 |
| 5.8.3 | Einzelne Spannungskomponenten.....  | 17 |
| 5.8.4 | Zusammengesetzte Spannungskomponenten .....                                   | 17 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 5.9    | Erforderliche Dokumentation.....   | 18 |
| 6      | Literatur.....   | 18 |
|        | Anhang A1: Referenzstrecken .....  | 21 |
| A1.1   | Referenzstrecken für Deutschland.....  | 21 |
| A1.1.1 | Streckenverlauf für S-Bahn und Regionalverkehr (ca. 900 km).....   | 21 |
| A1.1.2 | Messstrecke für Fernverkehr (konventionell):.....  | 22 |
| A1.1.3 | Messstrecke für Fernverkehr (HGV): .....   | 23 |
| A1.1.4 | Messstrecke für Güterlokomotiven:.....   | 24 |
| A1.1.5 | Streckenverlauf für Neigetechnik Fahrzeuge (ca. 1922 km).....  | 25 |
| A1.2   | Referenzstrecken für das Schweizer Eisenbahnnetz:.....   | 26 |
| A1.2.1 | Referenzstrecken für S-Bahn und Regionalverkehr .....  | 26 |
| A1.2.2 | Referenzstrecken für Fernverkehr (konventionell).....  | 26 |
| A1.2.3 | Referenzstrecken für Fernverkehr (HGV):.....   | 26 |
| A1.2.4 | Referenzstrecken für Güterlokomotiven: .....   | 26 |
| A1.2.5 | Referenzstrecken für Neigetechnik Fahrzeuge .....  | 26 |
| A1.3   | Referenzstrecken für das österreichische Eisenbahnnetz: .....  | 27 |
| A1.3.1 | Referenzstrecken für S-Bahn und Regionalverkehr .....  | 27 |
| A1.3.2 | Referenzstrecken für Fernverkehr (konventionell).....  | 27 |
| A1.3.3 | Referenzstrecken für Fernverkehr (HGV):.....   | 27 |
| A1.3.4 | Referenzstrecken für Güterlokomotiven: .....   | 27 |
|        | Anhang A2: Veränderte Schwingfestigkeitswerte für Schweißverbindungen gegenüber IIW-Empfehlungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis im Schienenfahrzeugbau..... | 28 |
|        | Anhang A3: Begründung für veränderte Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen aus Stahl gegenüber den Angaben in den IIW-Empfehlungen.....                    | 34 |
| A3.1   | Quer beanspruchte Stumpfstoßverbindungen .....   | 34 |
| A3.2   | Quer beanspruchte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen.....  | 35 |
| A3.2.1 | Maximale Beanspruchung an der Nahtwurzel .....   | 35 |
| A3.2.2 | Maximale Beanspruchung am Nahtübergang .....   | 38 |
| A3.3   | Quer- und Längssteife bzw. indirekt beanspruchte Schweißnähte.....   | 39 |
| A3.4   | Längs beanspruchte Stumpf- und Kehlnähte.....  | 39 |
| A3.5   | Mittel- und Eigenspannungen .....  | 40 |
| A3.6   | Wöhlerlinienneigung .....  | 40 |
|        | Anhang A4: Kraftmessungen .....  | 41 |
|        | Anhang A5: Rainflowzählung (informativ).....   | 42 |

## 1 Zielsetzung

Das Ziel der ‚Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749‘ ist, ein einheitliches übergreifendes Vorgehen bei der Durchführung der Streckenversuche und der nachfolgenden Lebensdauerabschätzung im Rahmen des Freigabeprozesses von Fahrwerkrahmen nach DIN EN 13749 [1] zu empfehlen. Der Ansatz der Nachweisführung dieser Empfehlung ist, die Untersuchung und Bewertung auf Basis der in Kapitel 3.1 genannten, repräsentativen Referenzstrecken für verschiedene Verkehre zu führen und damit zu ermöglichen das Nachweisverfahren im Rahmen der EG-Konformitätsbewertung bzw. der Konformitätsbewertung der nationalen Anforderungen (NNTR) abzuschließen. Die Nachweisführung auf Basis dieser Empfehlungen kann als «Code of Practice» angesehen werden, da er bereits mehrfach im Rahmen von Zulassungsprozessen bei den nationalen Sicherheitsbehörden in D, AT und CH (EBA, BMK, BAV) einheitlich herangezogen wurde.

Die hier gemachten Empfehlungen können sinngemäß auch für die Durchführung von Streckenversuchen für Wagenkästen nach EN 12663-1 [2], Abschnitt 9.2.3.4, angewendet werden.

## 2 Vorgaben aus der DIN EN 13749 zur Validierung und Konstruktionsfreigabe

In der DIN EN 13749 sind 4 Phasen für das Validierungsverfahren für die mechanische Festigkeit eines Fahrwerkrahmens vorgegeben:

- Rechnerischer Nachweis
- Statische Laborversuche
- Ermüdungsversuche im Labor
- Streckenversuche.

Die Streckenversuche sind laut DIN EN 13749 notwendig, um

- die Betriebsbelastungen zu messen und die Gebrauchstauglichkeit zu prüfen,
- die Konstruktionsvoraussetzungen zu prüfen.

Die Spezifikation für die Streckenversuche muss laut DIN EN 13749 folgende Angaben enthalten:

- das zu verwendende Fahrzeug
- Beschreibung der auszuführenden Testfahrten
- Belastungsbedingung des Fahrzeugs
- Durchzuführende Messpositionen und –arten
- Bewertungs- und Interpretationsverfahren der gemessenen Belastungen und Beanspruchungen
- Zulässige Belastungsgrenzwerte
- Alle weiteren Freigabekriterien.

Die Streckenversuche müssen mit Testfahrzeugen, Nutzlasten, Gleisqualität und Geschwindigkeitsprofil durchgeführt werden, die alle typisch für die vorgesehenen Betriebsbedingungen sind.

Für das Validierungsverfahren zur Festigkeit der zu berücksichtigenden Baugruppen (Fahrwerkrahmen, Traverse, Achslagergehäuse) sind Dehnmessstellen oder Kraftmessstellen

heranzuziehen. Falls Versuchsergebnisse von Streckenversuchen zu gleichen Einsatzzwecken von Referenzfahrzeugen (strukturmechanisch gleich oder ähnlich) vorliegen, können diese herangezogen werden.

### **3 Parameter für Betriebsfestigkeitsmessungen bzw. -bewertungen:**

#### **3.1 Referenzstrecken**

Je nach vorgesehenem Einsatzbereich sind in dieser Anwendungsrichtlinie charakteristische Referenzstrecken definiert (siehe Anhang A1 für die genaue Definition der Referenzstrecken):

- S-Bahn/Regionalverkehr
- Fernverkehr konventionell
- Fernverkehr Hochgeschwindigkeit
- Güterverkehr
- Neigetechnikfahrzeuge.

Die hier definierten Referenzstrecken (Deutschland, Schweiz, Österreich) sind charakteristisch für den Betrieb in Mitteleuropa und sind als gleichwertig anzusehen. Validierungsergebnisse dürfen daher von einem Land zum anderen übertragen werden. Die Gesamtzulassung bezieht sich auf die Referenzstreckenmessungen, die mit einem Lastsicherheitsfaktor nach Kapitel 5.3 beaufschlagt werden, um ‚sichere Lasten‘ im Sinne dieser Anwendungsrichtlinie zu erreichen. Es ist ausreichend, die Referenzstrecken in einer Richtung zu befahren. Bei Befahren von mind. 80% der Referenzstreckenlänge sind die Charakteristika für das vorgesehene Einsatzprofil (S-Bahn, Fernverkehr, HGV, ...) ausreichend erfasst.

Die Mindestlänge der zu befahrenden Messstrecken ergibt sich gemäß der Referenzstrecke und muss mindestens einem Zehntausendstel der geforderten Lebensdauerkilometerleistung entsprechen. Falls Teile der Referenzstrecke nicht befahren werden können, weil z.B. für diese Streckenabschnitte das Einschränkungsprofil vom Fahrzeug nicht eingehalten wird, dürfen die fehlenden Abschnitte durch Messungen auf den vorgesehenen Einsatzstrecken des Fahrzeugs ergänzt werden, damit sichergestellt ist, dass ein Zehntausendstel der geforderten Lebensdauerkilometerleistung als Messstreckenlänge erreicht wird.

Im Falle von Fahrzeugen im Inselbetrieb (i.e., streckenbezogene Inbetriebnahmegenehmigung bzw. Betriebsbewilligung bei Vollbahn-Fahrzeugen oder isolierte Netze wie bei Straßenbahnfahrzeugen und U-Bahnen) wird empfohlen, das komplette Liniennetz einmal leer und einmal beladen abzufahren. Die Summe der Messstrecken aus Beladezustand leer und aus Beladezustand beladen muss mehr als 1 Zehntausendstel der geforderten Lebensdauerkilometerleistung betragen.

Falls dann die geforderte Messstreckenlänge kleiner als die Länge des kompletten Liniennetzes ist, ist ein repräsentativer Abschnitt des Liniennetzes zu messen. Falls die geforderte Messstreckenlänge größer als die Länge des kompletten Liniennetzes ist, soll das Liniennetz mehrmals abgefahren werden (maximal 3-mal).

Mindestens 50% der Messstreckenlänge muss bei trockener Schiene gemessen werden.

Die Strecken sind fahrplanmäßig zu befahren (Geschwindigkeitsprofil gemäß Einsatzplan, Haltestellen, Depotfahrten, etc.). Langsamfahrstellen und Baustellenabschnitte werden in das Gesamtkollektiv entsprechend eingeordnet.

Nur wenn von den Referenzstrecken komplett abgewichen wird, müssen die Streckendaten der Messstrecken in Relation zu den Referenzstrecken qualitativ bewertet werden.

### 3.2 Massebelegung

Die hier definierten Referenzstrecken sind bei der Messung im Zustand ‚leer (Auslegungsmasse im betriebsbereiten Zustand nach DIN EN 15663 [3]) und beladen (Zuladung nach DIN EN 15663 - Auslegungsmasse bei normaler Zuladung)‘ zu befahren (ohne zusätzliche Zuschlagsfaktoren von 1,2 nach DIN EN 13749 für die Beladung). Die daraus resultierenden Beanspruchungen sind separat zu bewerten. Damit sind auch die Einflüsse des Fahrgastwechsels im Nahverkehr abgedeckt, da die Beladung wesentlich höher als jene ist, die in verschiedenen Fahrgastzählungen als typische Passagierbelastung für den Nahverkehr ermittelt wurden.

Falls abgesicherte Zuladungsspektren zur Verfügung stehen, können die Messresultate alternativ entsprechend den Zuladungsspektren kombiniert werden. In diesem Fall sind die Schädigungsanteile aus Beladungswechseln mit zu berücksichtigen.

Falls abgesicherte Zuladungsniveaus abweichend von den Angaben der DIN EN 15663 zur Verfügung stehen, dürfen diese alternativ verwendet werden.

Für Lokomotiven gelten die Masseangaben in Kapitel 3.5.2.

### 3.3 Berücksichtigung der Fahrzeugmasse

Die Beanspruchungen aus dem Eigengewicht des Fahrzeugs inklusive Zuladung müssen ermittelt und bei der Auswertung der Streckenversuche berücksichtigt werden: Diese Beanspruchungen aus dem Eigengewicht des Fahrzeugs inklusive Zuladung sind entweder über eine statische Messung oder über die Strukturberechnung zu ermitteln und als Mittelspannungszustand bei der Bewertung der Streckenversuche zu berücksichtigen.

### 3.4 Messspezifikation

Bei der Festlegung der Messstellen wird empfohlen, vom Dehnmessstellenplan des statischen Laborversuchs auszugehen: Die Anzahl der Dehnmessstellen bzw. Rosetten ist aber deutlich gegenüber dem statischen Laborversuch reduziert - Es sind mindestens 30 Stellen pro Fahrwerkstyp zu messen. Dabei müssen auch die höchstbeanspruchten Stellen aus der Berechnung berücksichtigt werden. Pro Fahrwerk sind die Baugruppen Fahrwerkrahmen, Traverse und Achslagergehäuse zu betrachten.

Einachsige Dehnmessstreifen sind anzuwenden, wenn aufgrund der Rechnung die Auslastung am Auswertepunkt durch eine Spannungskomponente dominiert wird, und der Dehnmessstreifen in Richtung dieser Spannungskomponente appliziert wird. In diesem Fall ist es ausreichend, die Auslastung nur für diese Richtung zu bestimmen, die anderen Richtungen bzw. der Mehrachsigkeitseinfluss müssen nicht bewertet werden. In anderen Fällen sind Rosetten zu verwenden.

Der Festigkeitsnachweis (die Validierung ausreichender Festigkeit) von relevanten, aber nicht zugänglichen Stellen, kann mit folgenden Verfahren erfolgen:

- A) Schädigungsvergleich mit Ermüdungsversuch: mit statistisch abgesicherten Festigkeitswerten ermittelte Auslastungsgrade für außen liegende Auswertungsstellen müssen im Laborversuch (Schwingversuch) größer als bei der Streckenmessung sein (i.e., am Fahrwerkrahmen ermittelte Auslastungsgrade bei 100% Lasten aus Stufe 1), oder
- B) Umrechnung auf nicht zugängliche Auswertungsstelle (z.B. im Inneren von Kastenprofilen, etc.) über Übertragungsfaktoren aus Finite Elemente Rechnung. Es

ist von Vorteil, wenn dabei zwischen Membran- und Biegespannung unterschieden wird.

Die nutzbare Frequenz für die DMS-Bewertung soll bei mindestens 95 Hz liegen, die Abtastrate soll mindestens 800 Hz betragen.

Bei der Bewertung der Messdaten ist das Sicherheitskonzept (siehe Kapitel 5.6) anzuwenden. Die Analyse der Messdaten ist in Kapitel 4 und die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit in Kapitel 5 beschrieben.

Als Resultat der Betriebsfestigkeitsermittlung werden nur die Auslastungsgrade berechnet.

**Hinweis:** Auslastungsgrade, die in den einzelnen Freigabephasen (Berechnung, statischer Versuch, Ermüdungsversuch, Streckenversuche) ermittelt wurden, können voneinander abweichen.

Die Schweißnahtgüteklassen (CP nach DIN EN 15085-3 [4]) werden aufgrund der rechnerischen Nachweise (zeichnerischen Ausführung bzw. ausgeführten Qualität) beurteilt.

Falls auch Kräfte gemessen werden, sind die Ausführungen von Anhang A4 zu berücksichtigen.

### 3.5 Bedingungen für Streckenmessungen mit Lokomotiven

#### 3.5.1 Grundsätze

Die Fahrwerkrahmen einer Lokomotive werden außer durch Vertikal- und Querkräfte maßgeblich durch Traktions- und Bremskräfte beansprucht. Deshalb sind die Längskräfte im Streckenversuch so hervorzuheben, wie sie betrieblich auftreten. Auch wenn Lokomotiven primär als Reisezug-, Güterzug oder Rangierlokomotiven eingestuft werden, können sie freizügig in anderen Betriebsarten eingesetzt werden. Zum Beispiel gibt es Schnellzuglokomotiven, die nachts Güterzüge ziehen, und Güterzuglokomotiven, die im S-Bahn-Verkehr eingesetzt werden. Außerdem werden Rangierlokomotiven auch für den Streckendienst eingesetzt.

Der Fahrwerkrahmen einer Lokomotive wird in den jeweiligen Betriebsarten (S-Bahn und Regionalverkehr oder Fernverkehr (konventionell) oder Güterverkehr) unterschiedlich beansprucht. Die Beanspruchung ist im S-Bahn und Regionalverkehr größer als im Güterverkehr und in diesem wiederum größer als im Fernverkehr.

Dies ist folgendermaßen begründet:

- Die Erfahrungen mit fahrtechnischen Versuchen in verschiedenen europäischen Ländern zeigen, dass auf Strecken des konventionellen Fernverkehrs sowohl die Gleislagequalität als auch die berührgeometrischen Bedingungen im Rad/Schiene-Kontakt deutlich ungünstiger sind als auf Strecken des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Daher ist im konventionellen Fernverkehr mit höheren Belastungen aufgrund von Beschleunigungen und den größeren Anforderungen an die Fahrstabilität zu rechnen.
- Da sowohl im konventionellen Fernverkehr als auch im Hochgeschwindigkeitsverkehr im Allgemeinen ein größerer Haltestellenabstand vorliegt, spielt die Belastung durch Anfahrvorgänge hier eine untergeordnete Rolle.
- Der schnelle Regionalverkehr bis 160 km/h kombiniert häufiges Anfahren mit ungünstigeren Gleislagequalitäten.
- Der schnelle Regionalverkehr ist für Lokomotiven daher der Einsatz mit den höchsten Beanspruchungen.

Eine Lokomotive, die in mehr als einer der obigen Betriebsarten eingesetzt werden soll, befährt die Messstrecke, die dem Einsatz mit der höheren Beanspruchung entspricht. Ein dafür getesteter Fahrwerkrahmen kann dann auch in den Streckendiensten, die eine geringere Beanspruchung verursachen, eingesetzt werden.  
Rangierlokomotiven befahren die Messstrecke für Güterlokomotiven.

Die Messung erfolgt an einem Fahrwerkrahmen der Lokomotive, wenn die Rahmen gleich sind oder wenn die Unterschiede aus struktureller Sicht klein sind.

### 3.5.2 Vertikale Belastung

Für die Betriebsstoffe der Lokomotive und insbesondere für den Kraftstoff einer Diesellokomotive wird gefordert:

- Vor Beginn der Streckenversuche sind alle Betriebsstoffe voll aufzufüllen.
- Während der Streckenversuche dürfen die Betriebsstoffe bis minimal 1/3 der größten Füllmenge verbraucht werden. Dann sind die Betriebsstoffe auf 3/3 zu ergänzen.
- Die Betriebsstoffe können schon vor Erreichen der 1/3-Marke ergänzt werden, sie sind auch in diesem Fall voll aufzufüllen.

### 3.5.3 Belastung in Längsrichtung

#### 3.5.3.1 Allgemeine Bedingungen

Die Versuche werden überwiegend mit Streckengeschwindigkeit oder der Höchstgeschwindigkeit des Zuges gefahren. Die Zug- und Bremskräfte der Versuchslokomotive können durch eine Anhängelast oder durch Bremslokomotiven oder durch eine Kombination von beiden Verfahren hervorgerufen werden.

#### 3.5.3.2 Anhängelast

Die Anhängelast soll einen für den Einsatzzweck durchschnittlichen Wagenzug repräsentieren. Die Streckenversuche werden mit folgenden Anhängelasten durchgeführt:

- S-Bahn und Regionalverkehr  $\geq 300$  t
- Güterverkehr  $\geq 480$  t
- Fernverkehr  $\geq 400$  t.

#### 3.5.3.3 Bremslokomotiven

Die Zug- bzw. Bremskräfte des Versuchsfahrzeugs werden durch die Brems- bzw. Zugkräfte von Bremslokomotiven ausgeglichen. Der Einsatz einer Bremslokomotive führt zu einfach zu definierenden und reproduzierbaren Lasten an der Zug- und Stoßeinrichtung. Anhand von Fahrspielrechnungen sind realistische Lastvorgaben zu ermitteln. Unabhängig von der Leistungsübertragung des Versuchsfahrzeuges können elektrische oder Diesel-Lokomotiven als Bremslokomotiven eingesetzt werden. Elektrische Lokomotiven bieten im Allgemeinen die Vorteile, dauerhaft höhere Bremskräfte erzeugen zu können und eine Rückspeisemöglichkeit zu besitzen. Das bedeutet, dass in diesem Fall auch Dieselloks nur auf elektrifizierten Strecken getestet werden.  
Dynamische Belastungen aus der Längsdynamik von Zugverbänden werden in der Fahrspielrechnung nicht abgebildet. Der Einfluss dieser Längsdynamik auf die Drehgestellbelastung kann jedoch aus zwei Gründen vernachlässigt werden:

- 1) Die Drehgestelle sind in der Regel durch die Zugkraftanlenkung in Längsrichtung ausreichend vom Wagenkasten entkoppelt.
- 2) Die Längsdynamik eines realen Zugverbandes hat keinen Einfluss auf die Bildung der schädigungsäquivalenten Zugkräfte.

Bei den Fahrspielrechnungen sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Die Trassierungsdaten der Referenzstrecke sollen in Form von Bogenradien, Steigungsprofilen und den betrieblich zulässigen Fahrgeschwindigkeiten vorliegen.
- Es werden die Anhängelasten nach Kapitel 3.5.3.2 in die Berechnung eingesetzt.
- In den Beschleunigungsphasen ist die größtmögliche Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit entsprechend dem Z-V-Diagramm zu wählen.
- Typische Bremsvorgänge sind zu berücksichtigen.

Die Geschwindigkeit und die Zug- bzw. Bremskraft der Versuchslokomotive sind aufzuzeichnen. Die Schädigung aus dem Kollektiv der gemessenen Zug- / Bremskräfte darf nicht kleiner als die Schädigung aus dem Kollektiv der simulierten Kräfte sein.

## 4 Analyse der Messdaten

Die Auswertung bzw. Validierung ist für alle spezifizierten Dehnmessstellen durchzuführen.

### 4.1 Signalbearbeitung

Falls im Nachweisverfahren die Mittelspannungen berücksichtigt werden, und die Mittelspannungen aufgrund des Eigengewichts nicht in den Messdaten enthalten sind (siehe Kapitel 3.3), sind diese zu den Beanspruchungs-Zeit-Verläufen zu addieren oder in der Bewertung der Mittelspannungsempfindlichkeit zu berücksichtigen.

Alle Messsignale sind vor der Auswertung auf eventuelle Messfehler zu kontrollieren. Im Falle, dass eine sinnvolle Fehlerkorrektur möglich ist, soll diese durchgeführt werden, wie zum Beispiel für:

- Spritzer
- Offset (z.B. Drift durch Temperatur- oder Feuchtigkeitseinfluss,...)
- Andere Offset/Störungseffekte:  
→ EMV Effekte, Störstrom, ...

Die Vorgehensweise bei der Korrektur von Messsignalen ist zu dokumentieren. Signale, welche nicht korrigiert werden können, sind zu verwerfen und separat zu dokumentieren. Sonderereignisse (wie z.B. Kollisionen, Entgleisungen, etc.) sollen gesondert betrachtet werden und müssen nicht mit dem Gesamtkollektiv hoch extrapoliert werden.

### 4.2 Umrechnung von Dehnungen in Spannungen

Mit Einzel-Dehnmesssteifen gemessene Dehnungen sind über das Hooke'sche Gesetz in Spannungen  $\sigma$  umzurechnen:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$



mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und der gemessenen Dehnung  $\varepsilon$ .

Mit Dehnmessstreifen-Rosetten gemessene Dehnungen sind über die Beziehungen des ebenen Spannungszustands umzurechnen. Die zu verwendenden Gleichungen hängen vom Typ der verwendeten Dehnmessstreifen-Rosette ab.

Für die Bewertung von Schweißnähten sind die gemessenen Spannungen einer Koordinatentransformation zu unterziehen, durch welche die folgenden Spannungskomponenten entstehen:

- $\sigma_{\perp}$  Normalspannungskomponente senkrecht zur Schweißnaht,
- $\sigma_{\parallel}$  Normalspannungskomponente parallel zur Schweißnaht und
- $\tau$  Schubspannungskomponente.

### 4.3 Rainflowzählung

Die aufgezeichneten Messdaten der verschiedenen Teilabschnitte und Szenarien sind für die weitere Festigkeitsbeurteilung mit der Methode der Rainflowzählung zu klassieren, da mit diesem Verfahren der Schädigungsinhalt einer Belastungs- bzw. Beanspruchungszeitfolge am besten erfasst wird. Bei der Rainflowzählung werden geschlossene Hysteresen mit Mittelwert und Amplitude erfasst. Dadurch kann in der Lebensdauerberechnung der Einfluss der Mittelspannung auf die Schädigung berücksichtigt werden. Die Residuen sind zu berücksichtigen. Weitere Informationen sind in Anhang A5 angegeben.

### 4.4 Maßnahmen beim Ausfall von Messkanälen bei der Messung

In diesem Abschnitt werden die erforderlichen Maßnahmen definiert, die bei kurzzeitigen oder kompletten Ausfällen von Messkanälen/Sensoren bei den Streckenversuchen zu treffen sind. Da zwischen dem Applizieren der Bauteile und den Messfahrten unter Umständen viel Zeit vergeht, und sich Bauteile mit Messsensoren im Betriebseinsatz befinden, besteht die Gefahr, dass die Sensoren bereits vor den Messfahrten beschädigt sind. Die Zugänglichkeit vieler Dehnmessstellen ist meist erschwert, und die Reparatur dieser Messpunkte ist mitunter nur mehr mit sehr großem Aufwand möglich. Daher wird empfohlen, schon in der Spezifikation für die Streckenversuche redundante Dehnmessstellen bzw. ausreichend viele Dehnmessstellen in den relevanten Bereichen pro Baugruppe vorzusehen.

Der Ausfall von Messtechnik bei den Streckenversuchen erfordert daher nicht unbedingt eine Wiederholung der Versuche. Durch eine hohe Anzahl von gewählten Messpositionen erhält man in vielen Fällen eine gute Aussage über die Größe der dominanten Belastungen am Bauteil. Falls redundante Messdaten vorliegen, decken diese äquivalente Stellen mit ab. Ein kurzzeitiger Ausfall von Messdaten beeinflusst das Ergebnis nicht, wenn eine ausreichend lange Strecke gemessen wird.

Redundanz ist gegeben, wenn mindestens eine zusätzliche äquivalente Dehnmessstellen-Position vorhanden ist (z.B. in anderem Quadrant des Fahrwerkrahmens oder durch eine symmetrisch angeordnete und gleich belastete Dehnmessstellenposition, etc.).

Beim Ausfall von Messstellen ist wie folgt vorzugehen:

- a) Der Ausfall von Messstellen muss eindeutig dokumentiert und nachgewiesen werden: Was (Verstärker, Sensor,...), wie (Ausfall, Störungen, ...) und auf welcher Strecke kam es zum Ausfall. Erfolgte eine Reparatur der Stelle oder nicht?

Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749

- b) Bewertungen, ob die Akzeptanzkriterien auf Grund der gemessenen Streckenlänge, Redundanz oder technischer Bewertung für den Festigkeitsnachweis noch erfüllt sind.
- c) Falls keine redundanten Messstellen vorliegen oder keine technische Bewertung möglich ist, sind die Maßnahmen nach Tabelle 1 zu beachten.

**Technische Bewertung:**

Mittels einer technischen Bewertung soll begründet werden, dass trotz Ausfall der Messstelle eine ausreichende Betriebsfestigkeit für diese Stelle nachgewiesen werden kann. Eine der folgenden Vorgangsweisen kann gewählt werden:

- Bewertung über Krafftfluss: Der Nachweis der betrachteten Stelle basiert auf dem rechnerischen Festigkeitsnachweis mit den an anderer Stelle gemessenen relevanten Belastungen, wenn ein Übertragungsfaktor eindeutig ableitbar ist.
- Bewertung über Vorgängerprojekte: Der Nachweis der betrachteten Stelle basiert auf Relativvergleich der gemessenen Beanspruchungen zwischen den Projekten
- Bewertung über Konvergenz: Der Nachweis der betrachteten Stelle basiert auf den vorhandenen Messdaten und dem Nachweis, dass die vorhandenen Messdaten ausreichend sicher den Betriebseinsatz repräsentieren.

**Tabelle 1: Akzeptanzkriterien beim Ausfall von DMS-Messkanälen, falls keine Redundanz vorhanden oder keine technische Bewertung möglich ist**

| Verhältnis der gemessenen Strecke zur geforderten Messstreckenlänge | Festigkeitsnachweis an der DMS Position wird akzeptiert            |
|---|--|
| > 66%   | Ja   |
| 33% bis 66%   | Ja,<br>falls der Auslastungsgrad dieser Stelle $a_{BK} < 90\%$ ist |
| < 33%   | Nein   |

**5 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit**

**5.1 Anzuwendende Regelwerke**

Geeignete Regelwerke zur Festigkeitsbewertung der gemessenen Beanspruchungskollektive sind für:

- ungeschweißte Konstruktionen, Guss- und Schmiedeteile die
  - FKM-Richtlinie [5],
- Schweißverbindungen die
  - FKM-Richtlinie [5],
  - IIW-Empfehlungen [6].

Ergänzend zu den Vorgaben der obigen Regelwerke dürfen die Angaben aus Abschnitt 5.2 bis **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angewendet werden. Derzeit ist eine europäische Norm zur Ermüdungsfestigkeitsbewertung von Schienenfahrzeugstrukturen in Ausarbeitung: CEN/TC 256 N 3291: „Railway applications – Fatigue strength assessment of railway vehicle structures based on cumulative damage“. Sobald diese europäische Norm veröffentlicht wird, ist diese europäische Norm anzuwenden.

## 5.2 Berücksichtigung von Mittelspannungen

Bei geschweißten Konstruktionen des Schienenfahrzeugbaus kann generell für die Mittelspannungsempfindlichkeit  $M_\sigma=0,15$  für Normalspannungen bzw.  $M_\tau = 0,09$  für Schubspannungen angesetzt werden. Diese Annahme entspricht einer umfangreichen Versuchsnachauswertung unterschiedlicher geschweißter Bauteile (siehe Anhang A3). Soweit andere Erkenntnisse z.B. aus Versuchen vorliegen, können diese herangezogen werden.

Mit diesen Werten der Mittelspannungsempfindlichkeit ist die ertragbare bzw. zulässige Spannungsamplitude in Abhängigkeit von der vorliegenden Mittelspannung unter Berücksichtigung des in der FKM-Richtlinie [5] angegebenen Haigh-Diagramms zu bestimmen.

Für ungeschweißte Bereiche gelten die Vorgaben der FKM-Richtlinie.

## 5.3 Präzisierungen zur Anwendung der FKM-Richtlinie

Für die Wanddickenabhängigkeit bei Schweißnähten darf für Blechdicken zwischen 10 mm und 25 mm der Fall B angesetzt werden.

## 5.4 Präzisierungen zur Anwendung der IIW-Empfehlungen

### 5.4.1 Bewertung der Schweißverbindungen nach dem Nennspannungskonzept

Die in den IIW-Empfehlungen festgelegten Schwingfestigkeitswerte können für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Normalspannungen angehoben werden. In Anhang A2 sind Tabellen mit erhöhten Schwingfestigkeitswerten für wesentliche Kerbfälle bezogen auf die Bauteildicke  $t \leq 10$  mm und in Abhängigkeit von der Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 angegeben.

Weitere Abweichungen von den Vorgaben der IIW-Empfehlungen für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Normalspannungen können entsprechend Abschnitt 5.2 bis 5.8 vorgenommen werden. Diese Abweichungsmöglichkeiten von den IIW-Empfehlungen bzw. die Anwendbarkeit der in den Tabellen aus Anhang A2 enthaltenen erhöhten Schwingfestigkeitswerte sind im Anhang A3 begründet.

Der Ermüdungsnachweis von Schweißverbindungen mit Schubspannungen sowie die Bewertung von mehrachsigen Spannungszuständen sind mit den dazu in den IIW-Empfehlungen enthaltenen Vorgaben, nach der FKM Richtlinie oder nach dem in Abschnitt 5.8 beschriebenen Verfahren vorzunehmen.

#### 5.4.1.1 Wanddickenabhängigkeit

Die in den Tabellen des Anhangs A2 angegebenen erhöhten Schwingfestigkeitswerte sind bei Wanddicken  $t > 10$  mm mit dem in den IIW-Empfehlungen enthaltenen Dickenreduktionsfaktor  $f(t)$  zu multiplizieren, wobei jedoch für die Referenzdicke  $t_{ref} = 10$  mm anzunehmen ist:

$$f(t) = (t_{ref} / t)^{0.1} \quad (1)$$

Bei Blechdicken  $t > 10$  mm ist die Reduzierung der Schwingfestigkeit durch die zugeordneten Schwingfestigkeitswerte der IIW-Empfehlungen zu begrenzen.

#### 5.4.1.2 Wöhlerlinienverlauf

Der Abknickpunkt von Wöhlerlinien für Normalspannungen ist bei 10 Millionen Schwingspielen anzusetzen, der Abknickpunkt von Wöhlerlinien für Schubspannungen ist bei 100 Millionen Schwingspielen anzusetzen, sofern nicht anderweitige Angaben wie z.B. aus Versuchsergebnissen vorliegen.

Falls die ertragbaren Festigkeitswerte aus Anhang A2 verwendet werden, gelten für die Wöhlerlinienneigung vor dem Abknickpunkt die folgenden Werte:

- querbeanspruchte, beschliffene Stumpfnah m = 5,0
- querbeanspruchte Stumpfnah m = 4,3
- querbeanspruchte Schweißnah außer Stumpfnah m = 3,0
- längsbeanspruchte Verbindungen aller Stoß- und Nahformen m = 4,3.

#### 5.4.1.3 Berücksichtigung von erhöhter Schweißnahqualität und zerstörungsfreier Prüfung

Die Schwingfestigkeitsangaben in den IIW-Empfehlungen entsprechen Schweißverbindungen mit Nahqualität der Bewertungsgruppe C nach DIN EN ISO 5817 [7]. Für in Anhang A2 nicht angegebene Kerbfälle der IIW-Empfehlungen mit maximaler Beanspruchung am Nahübergang und mit Schweißnahgüteklasse CP B nach DIN EN 15085 ist daher eine Anhebung um 10% möglich.

Falls während der Fertigung von Schweißverbindungen mit maximaler Beanspruchung am Nahübergang eine zerstörungsfreie Prüfung mit 10% des Fertigungsumfangs erfolgt (volumetrische Prüfung oder Oberflächenrissprüfung), kann eine Anhebung der Schwingfestigkeit um 5% vorgenommen werden. Sofern in den Kerbfalltabellen der IIW-Empfehlungen ohnehin eine zerstörungsfreie Prüfung gefordert ist, entfällt diese Erhöhungsmöglichkeit für die Schwingfestigkeit.

Bei nicht durchgeschweißten Verbindungen mit maximaler Beanspruchung an der Nahwurzel wirken sich eine höhere Nahqualität und/oder zerstörungsfreie Prüfungen nicht erhöhend auf die Schwingfestigkeit aus.

#### 5.4.2 Bewertung der Schweißnähte nach dem Kerbspannungskonzept

Mit dem Kerbspannungskonzept wird die durch die Kerbwirkung der Schweißnah bedingte Spannungserhöhung direkt bei der Beanspruchungsermittlung erfasst.

Für quer beanspruchte Schweißverbindungen (Stumpf- und Kehlnähte) enthalten die IIW-Empfehlungen die notwendigen Vorgaben für die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes, d.h., der Nahübergang und die Nahwurzel sind mit dem Kerbradius  $r = 1\text{ mm}$  für Blechdicken  $t \geq 5\text{ mm}$  zu erfassen. Für die Bewertung der berechneten Kerbspannungen ist dann die Wöhlerlinie der Schwingfestigkeitsklasse FAT 225 maßgebend.

Der Mittelspannungseinfluss ist analog zum Nennspannungskonzept zu berücksichtigen. Kerbspannungsberechnungen von längs beanspruchten Stumpf- und Kehlnähten mit Kerbradius  $r = 1\text{ mm}$  sind mit der Wöhlerlinie nachzuweisen, die für den Nennspannungsnachweis des jeweiligen Kerbfalles maßgebend ist. Dies gilt auch für auf Schub beanspruchte Schweißnähte.

Weitere Informationen für die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes sind in der Literatur zu finden (siehe [8] und [9]). Dies betrifft auch die Kerbspannungsbewertung von Schweißverbindungen mit Blechdicken  $t < 5\text{ mm}$ .

### 5.5 Schwingversuche zum Nachweis erhöhter Schwingfestigkeit

Von den in den IIW-Empfehlungen aufgeführten Schwingfestigkeiten kann abgewichen werden, wenn durch geeignete Schwingversuche mit geschweißten Proben eine höhere Schwingfestigkeit bei entsprechender statistischer Absicherung nachgewiesen wird. Die IIW-Empfehlungen enthalten Informationen für die statistische Auswertung solcher Versuche.

### 5.6 Sicherheitsfaktoren

Bei der Auswertung sind die in Tabelle 2 angegebenen Sicherheitsfaktoren  $j_D$  anzuwenden (auf 5 Hundertstel gerundet):

**Tabelle 2: Sicherheitskonzept**

|   | Zu bewertendes<br>Strukturdetail inspizierbar      | Zu bewertendes<br>Strukturdetail nicht<br>inspizierbar |
|---|--|--|
| Grundmaterial mit niedrigem<br>Sicherheitsbedürfnis | $j_D = j_L \cdot j_M =$<br>$1,05 \cdot 1,2 = 1,25$ | $j_D = j_L \cdot j_M =$<br>$1,05 \cdot 1,3 = 1,35$     |
| Grundmaterial mit mittlerem<br>Sicherheitsbedürfnis | $j_D = 1,05 \cdot 1,2 = 1,25$                      | $j_D = 1,05 \cdot 1,3 = 1,35$                          |
| Grundmaterial mit hohem<br>Sicherheitsbedürfnis     | $j_D = 1,05 \cdot 1,25 = 1,3$                      | $j_D = 1,05 \cdot 1,4 = 1,45$                          |
| Schweißnaht mit niedrigem<br>Sicherheitsbedürfnis   | $j_D = j_L \cdot j_M =$<br>$1,05 \cdot 1,0 = 1,05$ | $j_D = j_L \cdot j_M =$<br>$1,05 \cdot 1,1 = 1,15$     |
| Schweißnaht mit mittlerem<br>Sicherheitsbedürfnis   | $j_D = 1,05 \cdot 1,0 = 1,05$                      | $j_D = 1,05 \cdot 1,1 = 1,15$                          |
| Schweißnaht mit hohem<br>Sicherheitsbedürfnis       | $j_D = 1,05 \cdot 1,1 = 1,15$                      | $j_D = 1,05 \cdot (1,1 \cdot 1,1) = 1,25$              |

mit

- $j_L$  Lastsicherheitsfaktor
- $j_M$  Materialsicherheitsfaktor
- $j_D$  Gesamtsicherheitsfaktor für den Ermüdungsnachweis.

Die in Tabelle 2 angegebenen Sicherheitsfaktoren für Grundmaterial enthalten einen Teilfaktor von  $j_{M,G}=1,2$ , welcher die Unsicherheiten bei der Berechnung der Bauteil-Dauerfestigkeit aus den statischen Normwerten nach dem Algorithmus der FKM-Richtlinie abdecken soll. Bei der alternativ möglichen Verwendung von experimentell bestimmten Bauteil-Dauerfestigkeitswerten mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 97,5\%$  kann dieser Teilfaktor entfallen und die Zahlenwerte der Sicherheitsfaktoren für Grundmaterial aus Tabelle 2 können durch 1,2 dividiert werden.

Der Lastsicherheitsfaktor von 1,05 deckt die Unsicherheiten bei der Ermittlung von sicheren Lasten ab. Für Schweißnähte mit hohem Sicherheitsbedürfnis ist der Materialsicherheitsfaktor 10% höher als für Schweißnähte mit mittlerem Sicherheitsbedürfnis. Für nicht inspizierbare Strukturdetails ist der Materialsicherheitsfaktor 10% höher als für inspizierbare Strukturdetails.

Die Zuordnung des Sicherheitsbedürfnisses zum Strukturdetail ist vom rechnerischen Nachweis zu übernehmen. Die Anwendung der Sicherheitsfaktoren nach Tabelle 2 erfüllt die Anforderungen der Tabelle 2 aus der DIN EN 15085-3 [4].

Die in der Tabelle 2 angegebenen Sicherheitsfaktoren sind gegenüber der FKM-Richtlinie bzw. den IIW-Empfehlungen bei Schweißnähten reduziert, da diese auf einem rein rechnerischen Nachweis beruhen, während hier der finale Validierungsschritt im Rahmen der DIN EN 13749 durchgeführt wird.

Bei Verzicht auf Laborversuche nach Phase 2 bzw. 3 der DIN EN 13749 muss ein höherer Sicherheitsfaktor beim Betriebsfestigkeitsnachweis von Fahrwerkrahmen verwendet werden: Die Sicherheitsfaktoren aus Tabelle 2 sind entweder um den Wert 0,1 für die Sicherheitsbedürfnisse mittel und hoch additiv zu erhöhen, oder die Sicherheitsfaktoren nach der FKM-Richtlinie werden für Grundmaterial und für Schweißnähte herangezogen.

## 5.7 Schädigungsberechnungsmethodik und zulässige Schädigungssumme

Gemäß dem aktuellen Stand der Technik wird für die Anwendungsrichtlinie eines der 3 folgenden Verfahren vorgeschlagen:

- a) Miner Elementar mit Cutoff bei der Lastwechselzahl  $5 \cdot 10^6 \cdot 2^m$  mit  $m$  als Steigung der Wöhlerlinie (entspricht 50% des 5 Millionen Lastwechselwerts) mit erlaubter Schädigungssumme  $D_M = 1,0$  für Grundmaterial und Schweißnähte kombiniert mit den ertragbaren Werten der FKM-Richtlinie (Grundmaterial) bzw. IIW-Empfehlungen (Schweißnähte).
- b) Miner konsequent nach FKM-Richtlinie mit erlaubter Schädigungssumme  $D_M = 0,3$  für Grundmaterial und  $D_M = 0,5$  für Schweißnähte kombiniert mit den ertragbaren Werten der FKM-Richtlinie.
- c) Miner Verfahren nach Haibach mit erlaubter Schädigungssumme  $D_M = 0,3$  für Grundmaterial und  $D_M = 0,5$  für Schweißnähte kombiniert mit den ertragbaren Werten der FKM-Richtlinie bzw. der IIW-Empfehlungen. Für die Steigung  $m_2$  nach dem Knickpunkt gilt:  $m_2 = 2 \cdot m - 1$ . Spannungsamplituden, die unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit bei  $10^9$  Lastwechsel liegen, dürfen vernachlässigt werden.

## 5.8 Ermüdungsfestigkeitsnachweis für gemessene Dehnungen

### 5.8.1 Auslastungsgrad beim Dauerfestigkeitsnachweis

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis für die aus gemessenen Dehnungen ermittelten Spannungen erfolgt im Allgemeinen in Form eines Betriebsfestigkeitsnachweises. Falls jedoch die gemessene maximale Spannungsamplitude (Kollektivhöchstwert) an der zu bewertenden Stelle kleiner als die korrespondierende über den Sicherheitsfaktor aus Kapitel 5.6 ermittelte ertragbare Dauerfestigkeit aus der FKM-Richtlinie bzw. den IIW-Empfehlungen ist, wird der Auslastungsgrad nach folgender Formel vereinfacht bestimmt:

$$a_{BK} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_D} \cdot j_D \leq 1 \quad (2)$$

Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749

mit  $\sigma_{\max}$  maximale Spannungsamplitude,  
 $\sigma_D$  ertragbare Dauerfestigkeitsamplitude und  
 $j_D$  Sicherheitsfaktor nach Abschnitt 5.6.

Ansonsten ist der Auslastungsgrad durch einen Betriebsfestigkeitsnachweis nach Abschnitt 5.8.2 zu bestimmen.

Bei der Beurteilung von mehrachsigen Beanspruchungen ist der Auslastungsgrad für jede Spannungs Komponente zu berechnen.

### 5.8.2 Auslastungsgrad beim Betriebsfestigkeitsnachweis

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis für die aus gemessenen Dehnungen ermittelten Spannungen erfolgt unter Verwendung des Auslastungsgrades

$$a_{BK} = \frac{\sigma_{\ddot{a}qu}}{\sigma_{ertr}} \cdot j_D \leq 1 \quad (3)$$

mit  $\sigma_{\ddot{a}qu}$  Äquivalentamplitude für die spezifizierte Lastwechselzahl,  
 $\sigma_{ertr}$  ertragbare Ermüdungsfestigkeitsamplitude für die spezifizierte Lastwechselzahl und  
 $j_D$  Sicherheitsfaktor nach Abschnitt 5.6.

Hinweis: Weitere Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit nach Abschnitt 5, wie z.B. der Dickenfaktor, werden bei der Bestimmung der ertragbaren Ermüdungsfestigkeitsamplitude  $\sigma_{ertr}$  berücksichtigt.

Die Äquivalentamplitude  $\sigma_{\ddot{a}qu}$  wird in folgenden Schritten berechnet:

1. Signalkorrektur der Dehnungs-Zeit-Verläufe nach Abschnitt 4.1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**,
2. Berechnung von Spannungen nach Abschnitt 4.2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**,
3. Rainflow-Klassierung nach Abschnitt 4.3,
4. Gegebenenfalls Addition der Mittelspannungen aufgrund des bei den Messungen nach Punkt 3.3 nicht erfassten Eigengewichts
5. Mittelspannungsbewertung der Felder der Rainflow-Matrix unter Verwendung der Mittelspannungsempfindlichkeit nach Abschnitt 5.2,
6. Die Äquivalentamplitude ist nach einer Schädigungsakkumulationsmethodik nach Abschnitt 5.7 zu bestimmen.

Für die Schadensakkumulationsrechnung ist die Angabe der geforderten Lebensdauerkilometerleistung erforderlich. Die Häufigkeiten des Beanspruchungskollektivs werden von der Messstrecke auf die geforderte Lebensdauerkilometerleistung extrapoliert.

Alternativ kann durch direkte Berechnung der Anzahl der zulässigen Lastwechsel auf Basis von extrapoliertem Kollektiv und zulässiger Ermüdungsfestigkeitsamplitude  $\sigma_D$  die rechnerisch sicher ertragbare Lebensdauerkilometerleistung (für  $a_{BK} = 1$ ) bestimmt werden.



### 5.8.3 Einzelne Spannungskomponenten

Der Auslastungsgrad für Schweißnähte ist nach Abschnitt 5.8.2 bzw. 5.8.1 für jede Spannungskomponente separat zu berechnen und zu bewerten:

$$\begin{aligned}
 a_{BK,\perp} &= \frac{\sigma_{\ddot{a}qu,\perp}}{\sigma_{ertr,\perp}} \cdot j_D \leq 1, \\
 a_{BK,\parallel} &= \frac{\sigma_{\ddot{a}qu,\parallel}}{\sigma_{ertr,\parallel}} \cdot j_D \leq 1, \\
 a_{BK,\tau} &= \frac{\tau_{\ddot{a}qu}}{\tau_{ertr}} \cdot j_D \leq 1.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Bei der Beurteilung von mehrachsigen Spannungszuständen im Grundmaterial ist analog unter Heranziehung eines lokalen Koordinatensystems vorzugehen.

### 5.8.4 Zusammengesetzte Spannungskomponenten

Die Bewertung von mehrachsigen Spannungszuständen ist mit den dazu in den IIW-Empfehlungen enthaltenen Vorgaben, nach der FKM Richtlinie oder nach dem in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren nach der Richtlinie DVS1608 [10] vorzunehmen. Um die Mehrachsigkeit der Beanspruchungen zu berücksichtigen, werden die Auslastungsgrade  $a_{BK,i}$  kombiniert.

Der Vergleichsauslastungsgrad  $a_{BK,v}$  (mehrachsige Beanspruchung) ist über die Auslastungsgrade der Einzelkomponenten nach folgender Formel zu berechnen:

$$a_{BK,v} = \sqrt{a_{BK,\perp}^2 + a_{BK,\parallel}^2 + f(\varphi) \cdot a_{BK,\perp} \cdot a_{BK,\parallel} + a_{BK,\tau}^2} \leq 1 \tag{5}$$

Der Faktor  $f(\varphi)$  berücksichtigt den zeitlichen Verlauf der Normalspannungen zueinander und kann Werte zwischen  $-1,0$  und  $+1,0$  annehmen.

Die Berechnung des Faktors  $f(\varphi)$  erfolgt in folgenden Schritten:

- a) Für alle relevanten Lastfallkombinationen wird zu jedem Zeitpunkt der Wert  $X_i$  berechnet:

$$X_i = \text{sign}(\sigma_{\perp} \cdot \sigma_{\parallel}) \cdot \sqrt{|\sigma_{\perp} \cdot \sigma_{\parallel}|} \tag{6}$$

- b) Davon werden anschließend das Maximum und das Minimum aller  $X_i$  ermittelt:

$$\begin{aligned}
 X_{\max} &= \text{MAX}(X_i) \\
 X_{\min} &= \text{MIN}(X_i)
 \end{aligned} \tag{7}$$

- c) Der Faktor  $f(\varphi)$  ergibt sich in Abhängigkeit von

$$\begin{aligned}
 \text{falls } X_{\min} \geq 0: & \quad f(\varphi) = -1 \\
 \text{falls } X_{\max} \leq 0: & \quad f(\varphi) = +1
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\text{ansonsten:} \quad f(\varphi) = -\cos\left(2 \cdot \arctan\left(\frac{|X_{\min}|}{X_{\max}}\right)\right)$$

Das Vorzeichen  $f(\varphi)$  in der Formel für den Vergleichsauslastungsgrad  $a_{BK,v}$  wird aus den Messergebnissen berechnet. Bei Unkenntnis der Phasenlage gilt:  $f(\varphi) = +1$ .

Der Nachweis ist erfolgreich erbracht, wenn alle Auslastungsgrade kleiner gleich 1,0 sind.

## 5.9 Erforderliche Dokumentation

Folgende Ergebnisse müssen bei der Auswertung der Streckenmessungen dokumentiert werden:

- das zu verwendende Fahrzeug,
- Spezifikation zu den Streckenversuchen mit
  - Beschreibung der auszuführenden Testfahrten,
  - Belastungsbedingung des Fahrzeugs,
  - durchzuführende Messpositionen und –arten,
  - zulässige Belastungsgrenzwerte,
  - alle weiteren Freigabekriterien.
- Messstellenplan inkl. Fotodokumentation
- Messkette,
- Abtastrate, Filterfrequenzen,
- gemessene Strecke, Messzeitraum, Witterung
- Bewertungsmethodik und –vorgehensweise,
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis für alle spezifizierten Messstellen,
- zusätzliche Dokumentationen entsprechend den Angaben in dieser Richtlinie.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN 13749 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen; Deutsche Fassung EN 13749:2011
- [2] DIN EN 12663-1: Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen
- [3] DIN EN15663:2009: Bahnanwendungen - Fahrzeugmassedefinitionen
- [4] DIN EN 15085-3:2010: Bahnanwendungen – Schweißen von Schienenfahrzeugen und –fahrzeugteilen, Teil 3:Konstruktionsvorgaben.
- [5] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 6. Ausgabe, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main, 2012
- [6] Hobbacher, A. (Editor): Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07. Welding Research Council New York, WRC-Bulletin 520, 2009
- [7] DIN EN ISO 5817:2003 Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2003); Deutsche Fassung EN ISO 5817:2003
- [8] DVS-Berichte Band 256: Festigkeit geschweißter Bauteile - Anwendbarkeit lokaler Nachweiskonzepte bei Schwingbeanspruchung. Tagungsband des DVS-Forschungskolloquiums im März 2009, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2009

- [9] Fricke, W.: Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures, IIW-Doc. XIII-2240-08/XV-1289-08, Graz, 2008
- [10] DVS1608:2011 Richtlinie: Gestaltung und Festigkeitsbewertung von Schweißkonstruktionen aus Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2011
- [11] Kaßner, M., Küppers, M., Bieker, G., Moser, C. u. Sonsino, C. M.: Fatigue design of welded components of railway vehicle – influence of manufacture condition and weld quality. IIW-Doc. XIII-2267-09/XV-1313-09, International Institute of Welding, Paris, France 2009
- [12] Sonsino, C. M.: A Consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with the reference radii  $r_{ref} = 1,00$  and  $0,05$  mm. Welding in the World, Vol. 53, n° 3/4, 2009
- [13] Radaj, D., Sonsino, C. M. and Fricke, W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Woodhead Publishing, Cambridge, 2006, Second Edition
- [14] Olivier, R. und R. Ritter: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen, Teile 1 bis 5. DVS-Berichte Band 56/I bis V. DVS-Verlag, Düsseldorf, 1979 bis 1985.
- [15] Pötting, St. u. H. Zenner: Lebensdauer von Schweißverbindungen im Bereich hoher Lastspielzahlen (HCF). Abschlussbericht des DVS-Forschungsvorhabens AiF-Nr. 11.661N, DVS-Nr. 9.018, Düsseldorf 2002
- [16] Schliebner, R. u. M. Vormwald: Innovative Konstruktionen für den Maschinen- und Stahlbau durch Kombination neuartige Stahlwerkstoffe – Bemessungsgrundlagen für wirtschaftliche Verbindungen hochfester Feinkornbaustähle mit normalfesten Stählen, Teil 2: Schwingfestigkeitsuntersuchungen zur Festlegung von FAT-Klassen für Hybrid-Schweißverbindungen. Abschlussbericht zum Vorhaben B 409-01001 der Bauhaus-Universität Weimar, Institut für Strukturmechanik Jan. 2004
- [17] Fricke, W.; A. v. Lilienfeld-Toal u. H. Paetzold: Versteifte Plattenstrukturen aus dem Schiffbau. Beitrag in DVS Berichte Band 256, S. 95-106, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2009
- [18] Krebs, J., Hübner, P. u. Kaßner, M.: Eigenspannungseinfluss auf Schwingfestigkeit und Bewertung in geschweißten Bauteilen, DVS-Berichte Band 234, 2. Edition, DVS Media GmbH Düsseldorf 2012
- [19] Krebs, J. u. Kassner, M.: Influence of welding residual stresses on fatigue design of welded joints and components. (IIW–Doc. XIII-2126-06 / XV-1220–06), Welding in the World, Vol. 51, No 7/8-2007, Journal of Welding International Institute of Welding, Paris, France
- [20] Clormann, U.H.; Seeger, T.: Rainflow-HCM, ein Hysteresis-Schleifen-Zählalgorithmus auf werkstoffmecha-nischer Grundlage, FF-2, Fachgebiet Werkstoffmechanik, TH Darmstadt, 1985 bzw. Stahlbau, 55.Jahrgang, März 1986, Heft 3
- [21] ASTM E1049 - 85(2011)e1: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis

Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749

- [22] Esderts, A., Willen, J.: Offene und geschlossene Stahlprofile im Schienenfahrzeugbau. Beitrag in DVS-Berichte Band 256, S. 53-62, DVS Media GmbH, Düsseldorf 2009

## Anhang A1: Referenzstrecken

### A1.1 Referenzstrecken für Deutschland

#### A1.1.1 Streckenverlauf für S-Bahn und Regionalverkehr (ca. 900 km)



Streckenverlauf für S-Bahn und Regionalverkehr (ca. 900 km)

| Strecke von      | Strecke nach                    | km  |
|------------------|---------------------------------|-----|
| Bielefeld        | Hamm                            | 68  |
| Hamm             | Dortmund                        | 32  |
| Dortmund         | Köln (über Hagen, Wuppertal)    | 104 |
| Köln             | Mainz (Rheinlinie)              | 194 |
| Mainz            | Frankfurt / Main (über FRA)     | 43  |
| Frankfurt / Main | Kassel (über Fulda u. Bebra)    | 217 |
| Kassel           | Hamm (über Warburg, Altenbeken) | 186 |
| Hamm             | Bielefeld                       | 68  |

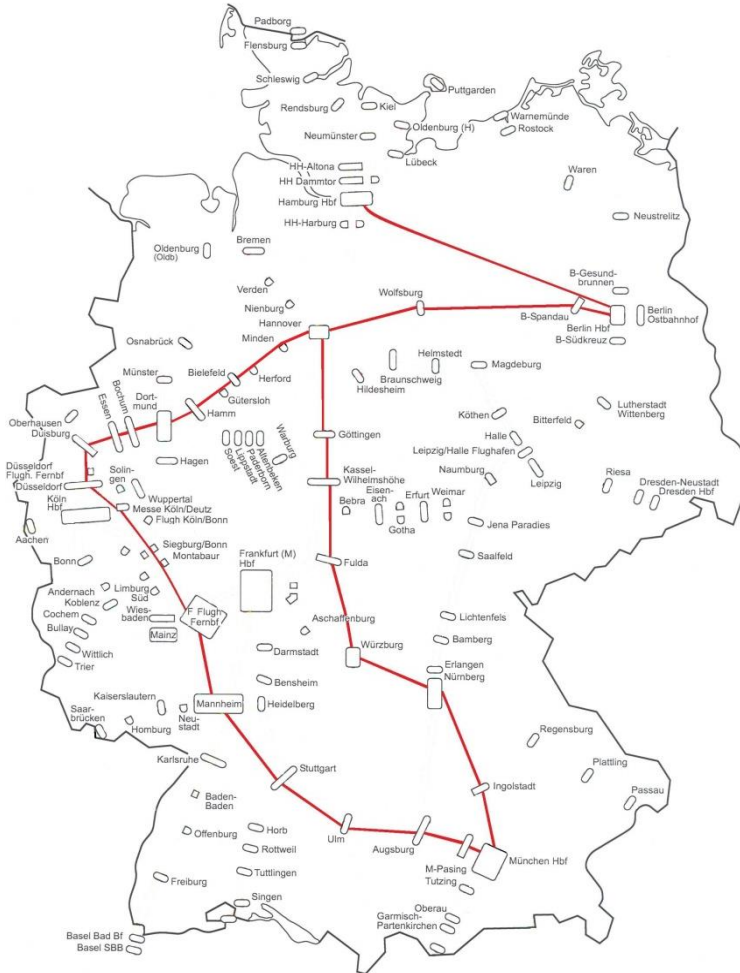
**A1.1.2 Messstrecke für Fernverkehr (konventionell):  
Streckenverlauf für Fernverkehr konventionell (ca. 1570 km)**



Streckenverlauf für Fernverkehr konventionell (ca. 1570 km)

| Strecke von   | Strecke nach                       | km  |
|---------------|------------------------------------|-----|
| Köln          | Mainz (Rheinstrecke)               | 194 |
| Mainz         | Mannheim                           | 71  |
| Mannheim      | Heidelberg                         | 17  |
| Heidelberg    | Stuttgart (über Altnetz)           | 115 |
| Stuttgart     | Ulm                                | 94  |
| Ulm           | Augsburg                           | 85  |
| Augsburg      | Nürnberg                           | 138 |
| Nürnberg      | Halle (über Lichtenfeld, Naumburg) | 316 |
| Halle (Saale) | Magdeburg                          | 86  |
| Magdeburg     | Hannover                           | 145 |
| Hannover      | Minden                             | 65  |
| Minden        | Dortmund                           | 145 |
| Dortmund      | Köln (über Hagen, Wuppertal)       | 104 |

**A1.1.3 Messstrecke für Fernverkehr (HGV):  
Streckenverlauf für Fernverkehr HGV (ca. 2250 km)**



Streckenverlauf für Fernverkehr \_ HGV (ca. 2250 km)

| Strecke von         | Strecke nach         | km  |
|---------------------|----------------------|-----|
| Hamburg             | Berlin               | 297 |
| Berlin              | Hannover             | 291 |
| Hannover            | Würzburg             | 361 |
| Würzburg            | Nürnberg             | 103 |
| Nürnberg            | Ingolstadt           | 118 |
| Ingolstadt          | München              | 81  |
| München             | Stuttgart (über Ulm) | 241 |
| Stuttgart           | Mannheim             | 132 |
| Mannheim            | Frankfurt Flughafen  | 77  |
| Frankfurt Flughafen | Köln/Deutz           | 216 |
| Köln / Deutz        | Duisburg             | 65  |
| Duisburg            | Hannover             | 265 |

**A1.1.4 Messstrecke für Güterlokomotiven:  
Streckenverlauf für Güterverkehr (ca. 1384 km)**



Streckenverlauf für Güterverkehr (ca. 1384 km)

| Strecke von | Strecke nach                 | km  |
|-------------|------------------------------|-----|
| Leipzig     | Dresden                      | 120 |
| Dresden     | Chemnitz                     | 79  |
| Chemnitz    | Leipzig                      | 81  |
| Leipzig     | Magdeburg                    | 124 |
| Magdeburg   | Hannover                     | 145 |
| Hannover    | Dortmund                     | 210 |
| Dortmund    | Köln (über Wuppertal)        | 106 |
| Köln        | Mannheim (über Bonn / Mainz) | 258 |
| Mannheim    | Karlsruhe                    | 62  |
| Karlsruhe   | Freiburg                     | 136 |
| Freiburg    | Basel SBB                    | 63  |



### A1.1.5 Streckenverlauf für Neigetechnik Fahrzeuge (ca. 1922 km)



Streckenverlauf für Neigetechnik Fahrzeuge (ca. 1922 km)

| Strecke von   | Strecke nach                       | km  |
|---------------|------------------------------------|-----|
| Köln          | Mainz (Rheinstrecke)               | 194 |
| Mainz         | Mannheim                           | 71  |
| Mannheim      | Heidelberg                         | 17  |
| Heidelberg    | Stuttgart (über Altnetz)           | 115 |
| Stuttgart     | Singen                             | 176 |
| Singen        | Stuttgart                          | 176 |
| Stuttgart     | Ulm                                | 94  |
| Ulm           | Augsburg                           | 85  |
| Augsburg      | Nürnberg                           | 138 |
| Nürnberg      | Halle (über Lichtenfeld, Naumburg) | 316 |
| Halle (Saale) | Magdeburg                          | 86  |
| Magdeburg     | Hannover                           | 145 |
| Hannover      | Minden                             | 65  |
| Minden        | Dortmund                           | 145 |
| Dortmund      | Köln (über Hagen, Wuppertal)       | 104 |

## **A1.2 Referenzstrecken für das Schweizer Eisenbahnnetz:**

### **A1.2.1 Referenzstrecken für S-Bahn und Regionalverkehr**

- S-Bahnnetz Zürich, insbesondere Linie S12
- Winterthur – Bauma
- S-Bahnnetz Lausanne – Genf.

### **A1.2.2 Referenzstrecken für Fernverkehr (konventionell)**

- Winterthur – Romanshorn
- St. Gallen – Zürich
- Zürich - Bern (inkl. Neubaustrecke)
- Bern – Thun
- Chiasso – Zürich.

### **A1.2.3 Referenzstrecken für Fernverkehr (HGV):**

- Zürich - Bern (inkl. Neubaustrecke)
- Bern – Lötschbergtunnel.

### **A1.2.4 Referenzstrecken für Güterlokomotiven:**

- St. Gallen – Zürich – Bern - Genf
- Chiasso – Zürich.

### **A1.2.5 Referenzstrecken für Neigetechnik Fahrzeuge**

- St. Gallen – Zürich.

### **A1.3 Referenzstrecken für das österreichische Eisenbahnnetz:**

#### **A1.3.1 Referenzstrecken für S-Bahn und Regionalverkehr**

- Westbahnstrecke Wien Westbahnhof / Wien Hauptbahnhof – Altbaustrecke - Salzburg
- Salzburg – Villach – Klagenfurt - Wien
- Laa – Wolfsthal
- Bregenz – Feldkirch – Bludenz – Arlberg – Landeck – Innsbruck
- Innsbruck – Brenner.

Anmerkung: für Lokomotiven entfällt die Strecke Laa - Wolfsthal, für S-Bahn- und Regionalverkehr können die Strecken Bregenz- Innsbruck sowie Innsbruck-Brenner entfallen.

#### **A1.3.2 Referenzstrecken für Fernverkehr (konventionell)**

- Westbahnstrecke Salzburg - Wien Westbahnhof / Wien Hauptbahnhof – Neubau- (inkl. Wienerwaldtunnel) und Altbaustrecke
- Salzburg – Villach
- Wien – Bruck an der Mur - Graz
- Graz – Bruck an der Mur - Klagenfurt - Villach
- Bregenz – Feldkirch – Bludenz – Arlberg – Landeck – Innsbruck
- Innsbruck – Brenner.

#### **A1.3.3 Referenzstrecken für Fernverkehr (HGV):**

- Westbahnstrecke Salzburg - Wien Westbahnhof / Wien Hauptbahnhof – Neubau- (inkl. Wienerwaldtunnel)
- Innsbruck – Kufstein (Neubaustrecke).

#### **A1.3.4 Referenzstrecken für Güterlokomotiven:**

- Westbahnstrecke Salzburg - Wien Westbahnhof / Wien Hauptbahnhof
- Salzburg – Villach
- Wien – Bruck an der Mur - Graz
- Graz – Bruck an der Mur - Klagenfurt - Villach
- Bregenz – Feldkirch – Bludenz – Arlberg – Landeck – Innsbruck
- Innsbruck – Brenner.

## **Anhang A2: Veränderte Schwingfestigkeitswerte für Schweißverbindungen gegenüber IIW-Empfehlungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis im Schienenfahrzeugbau**

Die nachfolgend angegebenen, gegenüber den IIW-Empfehlungen erhöhten Schwingfestigkeitswerte für den Nennspannungsnachweis mit Normalspannungen von Schweißverbindungen aus Stahl sind dem aktuellen Bearbeitungsstand der europäischen Normungsaktivität zum Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugen entnommen (CEN/TC 256 N 3291: „Railway applications – Fatigue strength assessment of railway vehicle structures based on cumulative damage“, Stand Oktober 2012).






Ausgehend von der Definition der Schwingfestigkeitsklassen FAT in den IIW-Empfehlungen wurden in dieser europäischen Normungsarbeit für den Schienenfahrzeugbau spezifische Schwingfestigkeitsklassen mit der Bezeichnung RFAT festgelegt. Während in den IIW-Empfehlungen die FAT-Werte für Schweißverbindungen für Wanddicken bis  $t=25\text{mm}$  gelten, beziehen sich die RFAT-Werte auf Wanddicken  $t\leq 10\text{mm}$  und sind in Abhängigkeit von der Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085 angegeben. Des Weiteren gelten die RFAT-Werte wie auch die FAT-Werte in den IIW-Empfehlungen für

- die Schwingfestigkeit bei 2 Mill. Schwingspiele,
- das Spannungsverhältnis  $R = 0,5$ ,
- die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}} = 97,7\%$  und
- bei Zug/Druckbelastung.

In den Tabellen A-1 bis A-5 sind für grundlegende Verbindungsformen in Abhängigkeit von der Schweißnahtgüte- und Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085 die RFAT-Werte sowie die Neigung der Wöhlerlinie vor dem Abknickpunkt und die Schwingspielzahl angegeben, bei welcher der Abknickpunkt liegt. Die Neigung der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt ergibt sich aus der anzuwendenden Schädigungsmethodik und ist unabhängig von der Schweißverbindungsform (siehe Abschnitt 5.7). Damit liegen alle benötigten Informationen für den Wöhlerlinienverlauf bezogen auf die RFAT-Werte vor.

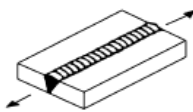
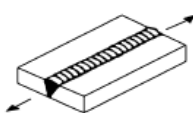
Sobald durch die oben genannte europäische Normungsaktivität ein Normentwurf erstellt worden ist, werden die in diesem Anhang aufgeführten Schwingfestigkeitsangaben aktualisiert.

**Tabelle A-1:** Schwingfestigkeitsangaben für Stumpfstoßverbindungen mit Beanspruchungen quer zur Schweißnaht – RFAT-Werte und Vorgaben für Wöhlerlinie

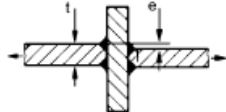
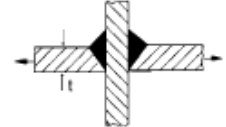
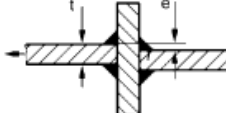
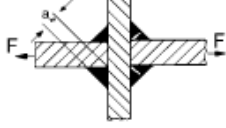
| Nr.  | Stoß- und Nahtausbildung  |   |   |                              | Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 | Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085-3 | RFAT $\Delta\sigma(R=0,5)$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Neigung der Wöhlerlinie vor Abknickpunkt | Position des Abknickpunktes der Wöhlerlinie | Bemerkungen   |
|------|---|---|---|------------------------------|---|---|---|--|---|---|
|      | Darstellung   | Beschreibung  | Nahtart   | Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3 |   |   |   |  |   |   |
| 1.1  |    | beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegenlage                         | I-Naht<br>V-Naht mit Gegenlage<br>HV-Naht mit Gegenlage<br>DV-Naht,<br>DHY-Naht | 1c<br>2c<br>3c<br>6<br>7     | CP A                                      | CT 1                                      | 125   | 4,3                                      | 10 <sup>7</sup><br>Schwing-<br>spiele       | höchstbeanspruchte Stelle (Anrissort) im Nahtübergang |
| 1.2  |   |   |   |                              | CP B                                      | CT 2                                      | 112   |  |   |   |
| 1.3  |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 106   |  |   |   |
| 1.4  |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 100   |  |   |   |
| 1.5  |    | einseitig durchgeschweißt auf nicht verbleibende Badsicherung oder WIG-geschweißte Nahtwurzel)2 | I-Naht,<br>V-Naht<br>Steifflankennaht<br>HV-Naht<br>Halbsteifflankennaht        | 1b<br>2b<br>2d<br>3b<br>3d   | CP A                                      | CT 1                                      | 112   |  |   |   |
| 1.6  |   |   |   |                              | CP B                                      | CT 2                                      | 112   |  |   |   |
| 1.7  |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 106   |  |   |   |
| 1.8  |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 100   |  |   |   |
| 1.9  |   | einseitig durchgeschweißt, verbleibende Badsicherung  | I-Naht,<br>V-Naht<br>Steifflankennaht<br>HV-Naht<br>Halbsteifflankennaht        | 1b<br>2b<br>2d<br>3b<br>3d   | CP B                                      | CT 2                                      | 100   |  |   |   |
| 1.10 |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 95  |  |   |   |
| 1.11 |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 90  |  |   |   |
| 1.12 |  | einseitig durchgeschweißt ohne Badsicherung   | I-Naht<br>V-Naht<br>HV-Naht   | 1a<br>2a<br>3a               | CP B                                      | CT 2                                      | 100   |  |   |   |
| 1.13 |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 95  |  |   |   |
| 1.14 |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 90  |  |   |   |
| 1.15 |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 50) <sup>1</sup>                                |  |   |   |
| 1.16 |  | beidseitig nicht durchgeschweißt  | Y-Naht mit Gegenlage<br>HY-Naht mit Gegenlage<br>DY-Naht<br>DHY-Naht            | 4b<br>5b<br>8<br>9           | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 50) <sup>1</sup>                                |  |   |   |

)<sup>1</sup> entsprechend der Schwingfestigkeit für Kehlnahtverbindung mit max. Beanspruchung an der Nahtwurzel

**Tabelle A-2:** Schwingfestigkeitsangaben für Stumpfstoßverbindungen mit Beanspruchungen längs zur Schweißnaht – RFAT-Werte und Vorgaben für Wöhlerlinie

| Nr. | Stoß- und Nahtausbildung   |   |                  |                              | Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 | Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085-3 | RFAT $\Delta\sigma(R=0,5)$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Neigung der Wöhlerlinie vor Abknickpunkt | Position des Abknickpunktes der Wöhlerlinie | Bemerkungen   |
|-----|--|---|------------------|------------------------------|---|---|---|--|---|---|
|     | Darstellung  | Beschreibung  | Nahtart          | Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3 |   |   |   |  |   |   |
| 2.1 |   | beidseitig oder einseitig durchgeschweißt, beidseitig nicht durchgeschweißt, ohne Nahtansätze | I-Naht           | 1a – 1c                      | CP A                                      | CT 1                                      | 140   | 4,3                                      | 10 <sup>7</sup> Schwingspiele               | höchstbeanspruchte Stelle (Anrissort) im Nahtübergang |
| 2.2 |  |   | V-Naht           | 2a – 2c                      | CP B                                      | CT 2                                      | 125   |  |   |   |
| 2.3 |  |   | Steifflankennaht | 2d                           | CP C1                                     | CT 2                                      | 117   |  |   |   |
| 2.4 |  |   | HV-Naht          | 3a – 3c                      | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 112   |  |   |   |
|     | Halb-Steifflankennaht  | 3d  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | Y-Naht mit Gegenlage   | 4b  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | HY-Naht mit Gegenlage  | 5b  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DV-Naht  | 6   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DHV-Naht   | 7   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DY-Naht  | 8   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DHY-Naht   | 9   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
| 2.5 |  | beidseitig oder einseitig durchgeschweißt, beidseitig nicht durchgeschweißt, mit Nahtansätze  | I-Naht           | 1a – 1c                      | CP B                                      | CT 2                                      | 112   | 4,3                                      | 10 <sup>7</sup> Schwingspiele               | höchstbeanspruchte Stelle (Anrissort) im Nahtübergang |
| 2.6 |  |   | V-Naht           | 2a – 2c                      | CP C1                                     | CT 2                                      | 106   |  |   |   |
|     |  |   | Steifflankennaht | 2d                           | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 100   |  |   |   |
| 2.7 |  |   | HV-Naht          | 3a – 3c                      |   |   |   |  |   |   |
|     | Halb-Steifflankennaht  | 3d  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | Y-Naht mit Gegenlage   | 4b  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | HY-Naht mit Gegenlage  | 5b  |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DV-Naht  | 6   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DHV-Naht   | 7   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DY-Naht  | 8   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |
|     | DHY-Naht   | 9   |                  |                              |   |   |   |  |   |   |

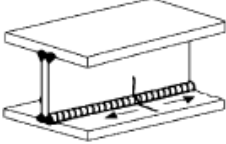
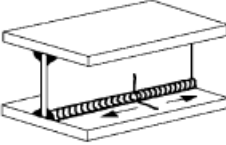
**Tabelle A-3:** Schwingfestigkeitsangaben für T- und Kreuzstoßverbindungen mit Beanspruchungen quer zur Schweißnaht – RFAT-Werte und Vorgaben für Wöhlerlinie

| Nr.  | Stoß- und Nahtausbildung  |   |  |                              | Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 | Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085-3 | RFAT $\Delta\sigma(R=0,5)$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Neigung der Wöhlerlinie vor Abknickpunkt | Position des Abknickpunktes der Wöhlerlinie | Bemerkungen  |  |
|------|---|---|--|------------------------------|---|---|---|--|---|--|--|
|      | Darstellung   | Beschreibung  | Nahtart  | Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3 |   |   |   |  |   |  |  |
| 3.1  |    | beidseitig durchgeschweißt  | DHV Naht<br>HV-Naht mit Kehlnaht als Gegenlage<br>HV-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht<br>HV-Naht mit Gegenlage | 7                            | CP B                                      | CT 2                                      | 80 <sup>2</sup>                                 | 3,0                                      | 10 <sup>7</sup> Schwing-spiele              | höchstbeanspruchte Stelle (An-rissort) im Nahtübergang |  |
| 3.2  |   |   |  | 10b                          | CP C1                                     | CT 2                                      | 75 <sup>2</sup>                                 |  |   |  |  |
| 3.3  |   |   |  | 10c                          | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 71 <sup>2</sup>                                 |  |   |  |  |
| 3.4  |    | einseitig durchgeschweißt auf nicht verbleibender Badsicherung oder mit WIG-geschweißter Nahtwurzel | HV-Naht<br>HV-Naht mit Gegenlage   | 10a                          | CP B                                      | CT 2                                      | 80 <sup>2</sup>                                 |  |   |  |  |
| 3.5  |   |   |  | 10d                          | CP C1                                     | CT 2                                      | 75 <sup>2</sup>                                 |  |   |  |  |
| 3.6  |   |   |  | 10d                          | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 71 <sup>2</sup>                                 |  |   |  |  |
| 3.7  |   | beidseitig nicht durchgeschweißt, max. Spannung am Nahtübergang                                     | DHY-Naht<br>HY-Naht mit Kehlnaht als Gegenlage<br>Doppelkehlnaht   | 9                            | CP B                                      | CT 2                                      | 71) <sup>1,2</sup>                              |  |   |  |  |
| 3.8  |   |   |  | 11b                          | CP C1                                     | CT 2                                      | 67) <sup>1,2</sup>                              |  |   |  |  |
| 3.9  |   |   |  | 13b                          | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 63) <sup>1,2</sup>                              |  |   |  |  |
| 3.10 |  | beidseitig nicht durchgeschweißt, max. Spannung an der Nahtwurzel                                   | DHY-Naht<br>HY-Naht mit Kehlnaht als Gegenlage<br>Doppelkehlnaht   | 9                            | CP B                                      | CT 2                                      | 50  |  |   |  | höchstbeanspruchte Stelle (An-rissort) an der Nahtwurzel |
| 3.11 |   |   |  | 11b                          | CP C1                                     | CT 2                                      | 50  |  |   |  |  |
| 3.12 |   |   |  | 13b                          | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 50  |  |   |  |  |

)<sup>1</sup> für Kehlnahtdicke a=5mm; Bei Kehlnahtdicke a=7mm ist der RFAT-Wert höher: CP B: RFAT 80; CP C1: RFAT 75; CP C2/C3: RFAT 71.

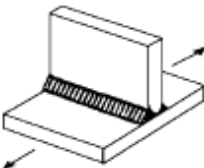
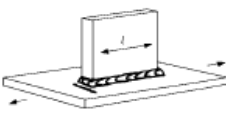
)<sup>2</sup> Bei T-Stoßverbindungen können diese Werte um 10% erhöht werden (dies entspricht ungefähr der Anhebung um eine RFAT-Klasse).

**Tabelle A-4:** Schwingfestigkeitsangaben für T- und Kreuzstoßverbindungen mit Beanspruchungen längs zur Schweißnaht – RFAT-Werte und Vorgaben für Wöhlerlinie

| Nr. | Stoß- und Nahtausbildung  |   |  |   | Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 | Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085-3 | RFAT $\Delta\sigma(R=0,5)$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Neigung der Wöhlerlinie vor Abknickpunkt | Position des Abknickpunktes der Wöhlerlinie | Bemerkungen   |
|-----|---|---|--|---|---|---|---|--|---|---|
|     | Darstellung   | Beschreibung  | Nahtart  | Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3            |   |   |   |  |   |   |
| 4.1 |  | beidseitig oder einseitig durchgeschweißt, beidseitig nicht durchgeschweißt, ohne Nahtansätze | DHV-Naht<br>DHY-Naht<br>HV-Naht<br>HY-Naht<br>Doppelkehlnaht | 7<br>9<br>10a – 10e<br>11a – 11c<br>13b | CP B                                      | CT 2                                      | 125   | 4,3                                      | 10 <sup>7</sup><br>Schwing-<br>spiele       | höchstbeanspruchte Stelle (Anrissort) im Nahtübergang |
| 4.2 |   |   |  |   | CP C1                                     | CT 2                                      | 117   |  |   |   |
| 4.3 |   |   |  |   | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 112   |  |   |   |
| 4.4 |  | beidseitig oder einseitig durchgeschweißt, beidseitig nicht durchgeschweißt, mit Nahtansätze  | DHV-Naht<br>DHY-Naht<br>HV-Naht<br>HY-Naht<br>Doppelkehlnaht | 7<br>9<br>10a – 10e<br>11a – 11c<br>13b | CP B                                      | CT 2                                      | 112   |  |   |   |
| 4.5 |   |   |  |   | CP C1                                     | CT 2                                      | 106   |  |   |   |
| 4.6 |   |   |  |   | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 100   |  |   |   |



**Tabelle A-5:** Schwingfestigkeitsangaben für Quer- und Längssteife – RFAT-Werte und Vorgaben für Wöhlerlinie

|     | Stoß- und Nahtausbildung  |   |   |                              | Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3 | Schweißnahtprüfklasse nach DIN EN 15085-3 | RFAT $\Delta\sigma(R=0,5)$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                      | Neigung der Wöhlerlinie vor Abknickpunkt | Position des Abknickpunktes der Wöhlerlinie | Bemerkungen   |
|-----|---|---|---|------------------------------|---|---|--|--|---|---|
|     | Darstellung   | Beschreibung  | Nahtart   | Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3 |   |   |  |  |   |   |
| 5.1 |  | beidseitig oder einseitig durchgeschweißte, beidseitig nicht durchgeschweißte                         | DHV-Naht<br>DHY-Naht<br>HV-Naht<br>Doppelkehlnaht | 7<br>9<br>10a – 10e<br>13b   | CP B                                      | CT 2                                      | 90) <sup>1</sup><br>80) <sup>2</sup>   | 3,0                                      | 10 <sup>7</sup><br>Schwingspiele            | höchstbeanspruchte Stelle (Anrissort) im Nahtübergang |
| 5.2 |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 85) <sup>1</sup><br>71) <sup>2</sup>   |  |   |   |
| 5.3 |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3/CT 4                                 | 80) <sup>1</sup><br>75) <sup>2</sup>   |  |   |   |
| 5.4 |  | beidseitig oder einseitig durchgeschweißte, beidseitig nicht durchgeschweißte, Längsrippe umschweißte | DHV-Naht<br>DHY-Naht<br>Doppelkehlnaht            | 7<br>9<br>13b                | CP B                                      | CT 2                                      | 90) <sup>3,7</sup><br>80) <sup>4,7</sup><br>71) <sup>5,7</sup><br>56) <sup>6,7</sup> |  |   |   |
| 5.5 |   |   |   |                              | CP C1                                     | CT 2                                      | 85) <sup>3,7</sup><br>74) <sup>4,7</sup><br>67) <sup>5,7</sup><br>53) <sup>6,7</sup> |  |   |   |
| 5.6 |   |   |   |                              | CP C2/C3                                  | CT 3                                      | 80) <sup>3,7</sup><br>71) <sup>4,7</sup><br>63) <sup>5,7</sup><br>50) <sup>6,7</sup> |  |   |   |

)<sup>1</sup> bei gleicher Wanddicke des durchlaufenden und des angeschlossenen Bleches (t=10mm)

)<sup>2</sup> Wanddicke des angeschlossenen Bleches ist größer als die Dicke des durchlaufenden Bleches

)<sup>3</sup> Länge des angeschlossenen Bleches  $l < 50$  mm

)<sup>5</sup> Länge des angeschlossenen Bleches  $l < 300$  mm

)<sup>7</sup> Die angegebenen zulässigen Spannungen gelten für den Nennspannungsnachweis, bei dem die spannungserhöhende Wirkung der Anschweißteile bei der Spannungsermittlung nicht erfasst wird. Da bei der Messung die spannungserhöhende Wirkung der Längsrippe erfasst wird, sind höhere Ermüdungsfestigkeitswerte zulässig: In diesem Fall sind die RFAT-Werte für die entsprechenden Quersteifen – Kerbdetails 5.1 – 5.3 heranzuziehen.

)<sup>4</sup> Länge des angeschlossenen Bleches  $l < 150$  mm

)<sup>6</sup> Länge des angeschlossenen Bleches  $l > 300$  mm

## **Anhang A3: Begründung für veränderte Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen aus Stahl gegenüber den Angaben in den IIW-Empfehlungen**

### **A3.1 Quer beanspruchte Stumpfstoßverbindungen**

Die Stichprobenuntersuchung verschiedener Schienenfahrzeughersteller [11] hat für quer beanspruchte, durchgeschweißte Stumpfstoßverbindungen aus S355, beidseitig oder auf nicht verbleibender Badsicherung geschweißt, Schweißnahtgüteklasse CP B nach DIN EN 15085 und Wanddicke  $t = 10$  mm folgenden Schwingfestigkeitswert für 2 Mill. Schwingspiele ergeben (vgl. Bild 1):

$$\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=50\%;R=0) = 173 \text{ MPa}$$

Die Umrechnung dieses Versuchsergebnisses auf die Schwingfestigkeitsbasis der IIW-Empfehlungen erfolgte in [11] mit dem im Versuch festgestellten Streuband  $T_{\sigma} = 1:1,50$  (Standardabweichung  $s = 0,069$ ) und nach IIW-Vorgaben zur Mittelspannungsabhängigkeit in [12]:

$$\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%;R=0,5) = 115 \text{ MPa.}$$

Die so vorgenommene Umrechnung von  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=50\%)$  auf  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%)$  entspricht auch dem dazu vorliegenden Kenntnisstand (u.a. in [13]). D.h., das im Versuch festgestellten Streuband  $T_{\sigma}=1:1,50$  ist identisch mit dem für Schweißverbindungen allgemein anerkannten Streuband. Unter Berücksichtigung der Unterteilung in FAT-Klassen in den IIW-Empfehlungen (Abstufung der Schwingfestigkeitswerte in Abhängigkeit vom Kerbfall) ergibt sich für diese Verbindungsform bei konservativer Zuordnung die FAT-Klasse

#### **FAT 112.**

Dies entspricht der Spannungsschwingbreite von  $\Delta\sigma = 112$  MPA bezogen auf

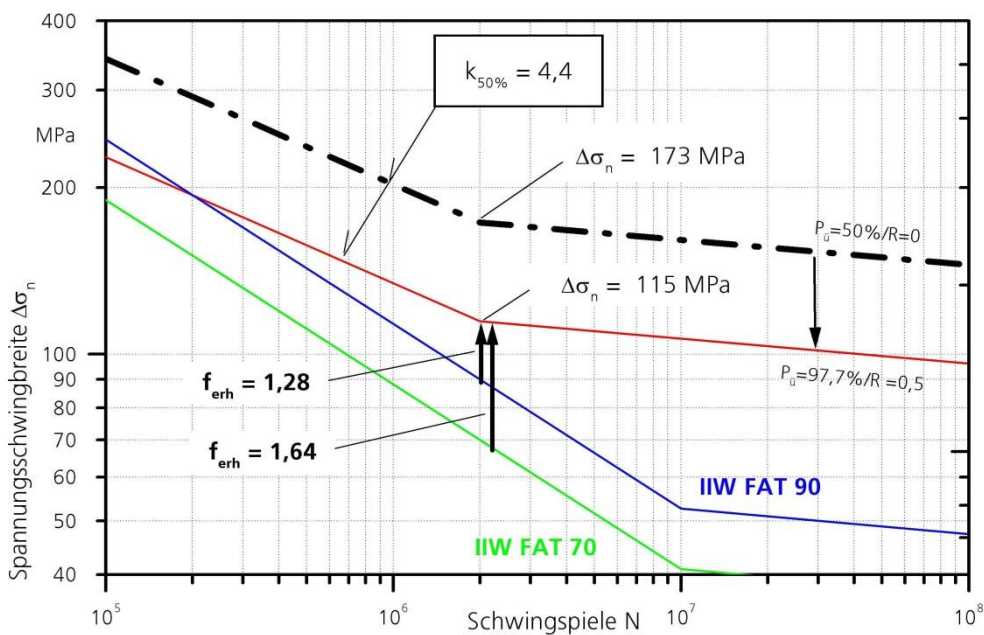
- $N = 2 \cdot 10^6$  Schwingspiele
- Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{u}} = 97,7\%$
- Spannungsverhältnis von  $R = 0,5$
- Wanddicke  $t = 10$  mm (abweichend von IIW-Empfehlungen)
- Schweißnahtgüteklasse CP B nach DIN EN 15085 (abweichend von IIW-Empfehlungen).

In den IIW-Empfehlungen ist FAT 90 für die vergleichbare Stumpfstoßverbindung aufgeführt, die dort als beidseitig durchgeschweißte Stumpfnah mit flachem Nahtübergang  $h < 0,1 \cdot t$  mit der Forderung von ZFP und für die Wanddicke  $t = 25$  mm angegeben ist und somit in etwa den Anforderungen von CP B nach DIN EN 15085 entspricht. Das Verhältnis zwischen dem Ergebnis der Stichprobenuntersuchung und der Schwingfestigkeit der vergleichbaren Stumpfstoßverbindung in den IIW-Empfehlungen beträgt

$$115 / 90 = 1,28.$$

Ausgehend von diesem Verhältnis lässt sich eine Schwingfestigkeitserhöhung für folgende Stumpfstoßausführungen der Wanddicken  $t=10$  mm begründen:

- beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit temporärer Badsicherung und normaler Nahtübergang entsprechend Bewertungsgruppe C nach DIN EN ISO 5817 bzw. CP C2 nach DIN EN 15085
  - IIW-Empfehlungen: FAT 80
  - Schienenfahrzeugbau: FAT 100 (80 · 1,28 = 102,4)
- einseitig durchgeschweißt mit oder ohne verbleibender Badsicherung und normaler Nahtübergang entsprechend Bewertungsgruppe C nach DIN EN ISO 5817 bzw. CP C2 nach DIN EN 15085
  - IIW-Empfehlungen: FAT 71
  - Schienenfahrzeugbau: FAT 90 (70 · 1,28 = 89,6)



**Bild A3-1:** Auswertung des Stichprobenergebnisses für die untersuchten Stumpfstoßverbindungen und Vergleich mit relevanten Schwingfestigkeitsangaben der IIW-Empfehlungen aus [11]

### A3.2 Quer beanspruchte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen

#### A3.2.1 Maximale Beanspruchung an der Nahtwurzel

Für direkt quer beanspruchte Kreuzstoßproben aus Blechen des Stahles S355 mit  $t = 10$  mm, Doppelkehlnaht und Rissausgang an der Nahtwurzel hat die Stichprobenuntersuchung verschiedener Schienenfahrzeughersteller [11] den folgenden Schwingfestigkeitswert für 2 Millionen Schwingspiele ergeben (vgl. Bild 2):

$$\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=50\%;R=0) = 69 \text{ MPa}$$

Dieses Ergebnis gilt für die an den Versuchsproben festgestellte Kehlnahtdicke und Größe des nicht verschweißten Wurzelspaltes (siehe in [11]: durchschnittliche Kehlnahtdicke  $a = 7,2$  mm und durchschnittliche Größe des nicht verschweißten Wurzelspaltes  $g = 7,8$  mm).

In [11] erfolgte die Umrechnung dieses Wertes auf die Schwingfestigkeitsbasis der IIW-Empfehlungen mit dem im Versuch festgestellten Streuband ( $T_\sigma = 1:1,26$  bzw. Standardabweichung  $s = 0,036$ ):

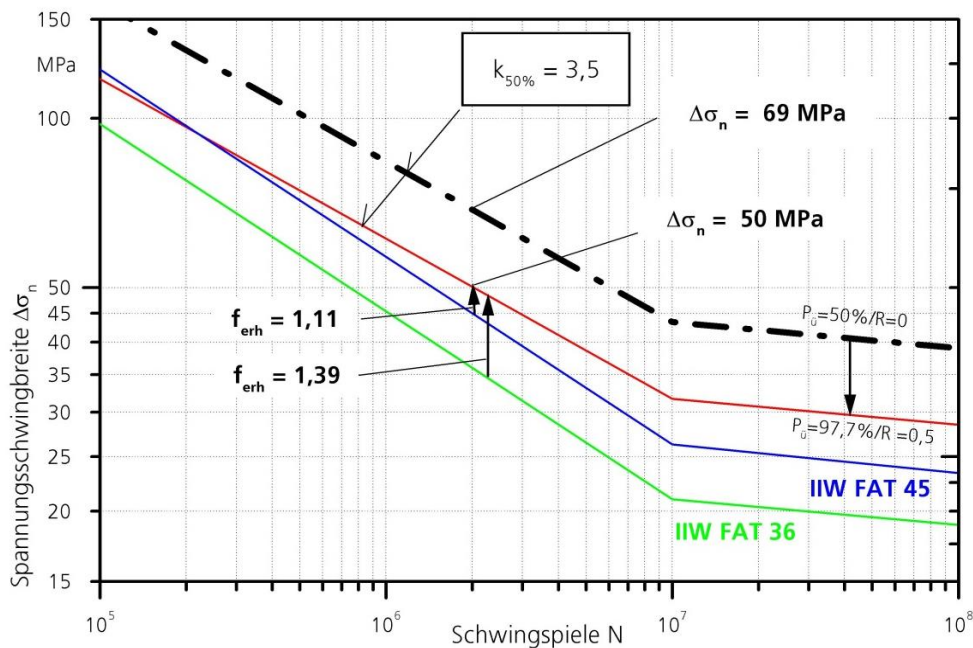
$$\Delta\sigma(P_{\bar{v}}=97,7\%;R=0,5) = 50 \text{ MPa} \quad \text{bezogen auf } T_\sigma = 1:1,26$$

Dieser Wert entspricht gemäß der Unterteilung von FAT-Klassen in den IIW-Empfehlungen

### FAT 50

und bezieht sich abweichend von den Kriterien für die Definition von FAT-Klassen in den IIW-Empfehlungen auf

- Wanddicke  $t = 10 \text{ mm}$
- Schweißnahtgüteklasse CP C nach DIN EN 15085.



**Bild A3- 2:** Auswertung des Stichprobenergebnisses für die untersuchten Kreuzstoßverbindungen und Vergleich mit relevanten Schwingfestigkeitsangaben der IIW-Empfehlungen aus [11]

Im Schienenfahrzeugbau wird die Kehlnahtdicke bei Kreuz- und T-Stößen im Allgemeinen so festgelegt, dass der Nahtquerschnitt gleich dem angeschlossenen Blechquerschnitt ist (querschnittdeckender Anschluss). Das bedeutet für den Kreuzstoß mit Blechdicke  $t = 10 \text{ mm}$  und Doppelkehlnahtanschluss, dass die Kehlnahtdicke  $a = 5 \text{ mm}$  vorzugeben ist.

Ausgehend von der Schwingfestigkeit des Stichprobenergebnisses für den Kreuzstoß mit  $t = 10 \text{ mm}$  und  $a = 7,2 \text{ mm}$  lässt sich die Schwingfestigkeit für den Kreuzstoß mit  $t = 10 \text{ mm}$  und  $a = 5 \text{ mm}$  unter Berücksichtigung

- des veränderten Nahtquerschnittes und
- der erhöhten Kerbwirkung

ableiten. Die Umrechnung auf den Blechquerschnitt ( $t=10\text{mm}$ ) ergibt:

$$\Delta\sigma_{\text{FAT,Blech}}(a=7,2\text{mm}) = 50 \cdot (2 \cdot 7,2)/(10) = 72 \text{ MPa.}$$

Beim Kreuzstoß mit  $t = 10 \text{ mm}$  und  $a = 5$  ist der Nahtquerschnitt gleich dem Blechquerschnitt, und somit ist auch die nahtquerschnittsbezogene Schwingfestigkeit gleich der blechquerschnittsbezogenen Schwingfestigkeit im Unterschied zum Kreuzstoß mit  $a = 7,2 \text{ mm}$ . Um von dem o. g. Schwingfestigkeitswert  $\Delta\sigma_{\text{FAT,Blech}}(a=7,2\text{mm})$  auf die für den Kreuzstoß mit  $a = 5 \text{ mm}$  geltende Schwingfestigkeit  $\Delta\sigma_{\text{FAT,Blech}}(a=5\text{mm})$  zu schließen, ist die erhöhte Kerbwirkung an der Nahtwurzel infolge der geringeren Nahtdicke zu berücksichtigen (von  $t = 7,2 \text{ mm}$  auf  $a = 5 \text{ mm}$ ).

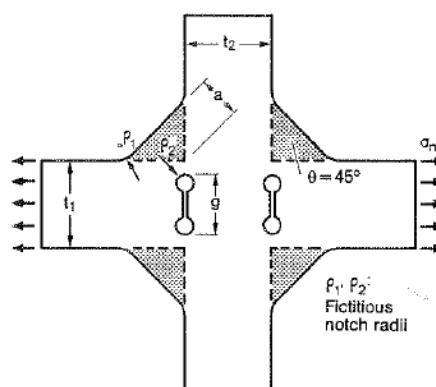
Die erhöhte Kerbwirkung infolge geringerer Kehlnahtdicke kann durch die Ermittlung der Kerbformzahl abgeschätzt werden, mit denen die Beanspruchungserhöhung in der Schweißnahtkerbe gegenüber der Nennspannung im angeschlossenen Blech erfasst wird. Für die Berechnung der Kerbformzahl von Schweißnähten gibt es in der Fachliteratur eine Reihe von Berechnungsformeln. Nach *Radaĵ* sind in [13] folgende Formeln für die Ermittlung der Kerbformzahl bezogen auf Nahtwurzel und Nahtübergang für den quer belasteten Kreuzstoß angegeben:

#### Nahtübergang

$$K_t = 1,192 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{-0,311} \cdot \left(\frac{g}{t}\right)^{0,130} \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^{-0,392} \quad (\text{A1})$$

#### Nahtwurzel

$$K_t = 1,155 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{-0,72} \cdot \left(\frac{g}{t}\right)^{0,433} \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^{-0,371} \quad (\text{A2})$$



**Bild A3-3:** Kreuzstoß mit Geometrieparameter für die Ermittlung von Kerbformzahl mit Formeln (A1) bzw. (A2) aus [13]

Bei der Nutzung dieser Formeln zur Abschätzung der Kerbwirkung wird ausgehend von den Grundlagen des Kerbspannungskonzeptes ein Kerbradius von  $\rho = 1 \text{ mm}$  angenommen (vgl. auch IIW-Empfehlungen). Für den Kreuzstoß der Stichprobenuntersuchung mit Kehlnahtdicke  $a = 7,2 \text{ mm}$  und Länge des unverschweißten Wurzelspaltes  $g = 7,8 \text{ mm}$  ergeben die Formeln (1) und (2) folgende Kerbformzahlen bezogen auf den Kerbradius  $\rho = 1 \text{ mm}$ :

- für Nahtwurzel  $K_{t,NW} = 3,09$
- für Nahtübergang  $K_{t,NÜ} = 3,15$ .

Für den Kreuzstoß mit querschnittsdeckender Kehlnahtdicke  $a = 5$  mm und Länge des unverschweißten Wurzelspaltes von  $g = 10$  mm ergeben die Formeln (1) und (2) folgende Kerbformzahlen bezogen auf den Kerbradius  $\rho = 1$  mm:

- für Nahtwurzel  $K_{t,NW} = 4,47$
- für Nahtübergang  $K_{t,NÜ} = 3,65$ .

Die Schwingfestigkeit des Kreuzstoßes mit  $t = 10$  mm und  $a = 5$  mm lässt sich ausgehend von den für die Nahtwurzel ermittelten Kerbwirkungszahlen  $K_{t,NW} = 3,09$  (Kreuzstoß mit  $a = 7,2$  mm) und  $K_{t,NW} = 4,47$  (Kreuzstoß mit  $a = 5$  mm) wie folgt bestimmen:

$$\Delta\sigma_{FAT,Naht}(a=5\text{mm}) = \Delta\sigma_{FAT,Blech}(a=7,2\text{mm}) \cdot (3,09/4,47) = 72 \cdot (3,09/4,47) = 50 \text{ MPa.}$$

Für den Kreuzstoß mit querschnittsdeckender Kehlnahtdicke ergibt sich damit die gleiche nennspannungsbezogene Schwingfestigkeit wie für die in der Stichprobenuntersuchung geprüften Kreuzstoßproben mit der Kehlnahtdicke  $a = 7,2$  mm. Der verringerte Nahtquerschnitt einerseits und die dadurch veränderte Kerbwirkung an der Nahtwurzel andererseits heben sich offensichtlich in ihrer Wirkung auf die Größe der nennspannungsbezogenen Schwingfestigkeit auf.

### A3.2.2 Maximale Beanspruchung am Nahtübergang

#### A3.2.2.1 Durchgeschweißte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen

In den IIW-Empfehlungen ist für durchgeschweißte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen mit maximaler Beanspruchung am Nahtübergang die FAT-Klasse FAT 71 angegeben.

Die Fachliteratur enthält jedoch eine Reihe von Belegen für eine höhere Schwingfestigkeit dieser Verbindungsform. Dies ist

- nach DVS-Wöhlerlinienkatalog [14]:  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%;R>0,2) = 81,2$  MPa (Zusammenstellung umfangreicher Versuchsergebnisse von Kreuzstoßverbindungen mit Blechdicken  $t = 6$  bis 38 mm)
- nach [15]  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%;R=0,5) = 92$  MPa (Versuchsergebnisse von Kreuzstoßproben aus S235JRG2 der Blechdicke  $t = 8$  mm)
- nach [16]  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%;R=0,5) = 83$  MPa (Versuchsergebnisse von Kreuzstoßproben aus S355 der Blechdicke  $t = 25$  mm, Kantenversatz  $e < 0,15 \cdot t$ )
- nach [17]  $\Delta\sigma(P_{\bar{u}}=97,7\%;R=0,5) = 76$  MPa (Versuchsergebnisse von Kreuzstoßproben aus S355 der Blechdicke  $t = 20$  mm, Kantenversatz  $e < 0,15 \cdot t$ ).

Diese verschiedenen Untersuchungsergebnisse werden als ausreichende Begründung für eine Erhöhung der Schwingfestigkeit durchgeschweißter Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen mit maximaler Beanspruchung am Nahtübergang auf **FAT 80** eingestuft.

#### A3.2.2.2 Nicht durchgeschweißte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen

Bei diesen Kreuz- bzw. T-Stoßverbindungen tritt die maximale Beanspruchung nur dann am Nahtübergang auf, wenn bei einem Anschluss mit Doppelkehlnaht der Nahtquerschnitt

deutlich größer als der angeschlossenen Blechquerschnitt oder wenn der nicht verschweißte Wurzelspalt hinreichend klein ist (z.B. HY-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht).

In den IIW-Empfehlungen gilt für die nicht durchgeschweißte Kreuz- bzw. T-Stoßverbindung mit Doppelkehlnaht und mit maximaler Beanspruchung am Nahtübergang unabhängig von der Nahtdicke FAT 63 (Kerbfall Nr. 413). Dagegen wird der Anschluss mit deutlich reduziertem Wurzelspalt bzw. mit HY-Naht mit FAT 71 bewertet (Kerbfall Nr. 416), wobei aber die spannungserhöhende Wirkung der Exzentrizität zwischen Blech- und Nahtquerschnitt auf der Beanspruchungsseite zu berücksichtigen ist.

Nach verschiedenen Angaben in der Fachliteratur (u.a. [14] und [13]) ist bei Kreuzstoßverbindungen mit Doppelkehlnaht und Blechdicke  $t = 10$  mm erst ab etwa einer Kehlnahtdicke von  $a = 7$  mm mit maximaler Beanspruchung am Nahtübergang zu rechnen. Bei kleinerer Kehlnahtdicke tritt die maximale Beanspruchung an der Nahtwurzel auf. Da mit zunehmender Kehlnahtdicke die Kerbwirkung an der Nahtüberhöhung abnimmt, ist für solche Verbindungen eine Erhöhung der Schwingfestigkeit auf **FAT 71** entsprechend dem Verhältnis der Kerbformzahlen für Kehlnahtdicke  $a = 5$  mm mit  $K_t = 3,65$  und für Kehlnahtdicke  $a = 7$  mm mit  $K_t = 3,28$  vertretbar (Berechnung der Kerbformzahlen nach Formel (A1) im Abs. A3.2.1). Diese FAT-Erhöhung wird auch durch Untersuchungen in [22] bestätigt.

### **A3.3 Quer- und Längssteife bzw. indirekt beanspruchte Schweißnähte**

In den IIW-Empfehlungen ist für die Quersteife (Kerbfall Nr. 511) bei gleicher Dicke der verbundenen Bleche FAT 80 angegeben. Dieser Schwingfestigkeitswert wird durch den DVS-Wöhlerlinienkatalog [14] bestätigt, der eine Zusammenstellung umfangreicher Versuchsergebnisse von solchen Verbindungsformen vor allem im Dickenbereich von  $t = 10$  bis 15 mm enthält.

Gleiches gilt für die Längssteife, für die in den IIW-Empfehlungen FAT 50 bis FAT 80 in Abhängigkeit von der Länge des aufgeschweißten Details angegeben ist (Kerbfall Nr. 521). D.h., für Längen  $l > 300$  mm gilt FAT 50 und für Längen  $l < 50$  mm FAT 80. Auch diese Schwingfestigkeitsangaben werden durch den DVS-Wöhlerlinienkatalog [14] und andere Untersuchungen bestätigt (z.B. [17]), die sich auf Längssteifen mit Blechdicken zwischen  $t = 10$  mm und  $t = 12$  mm beziehen. Es ist somit festzustellen, dass die Schwingfestigkeitswerte der IIW-Empfehlungen für diese Verbindungsformen auch für Wanddicken  $t = 10$  mm zutreffend sind, und es offenbar keine Grundlage für eine Erhöhung der IIW-Schwingfestigkeitswerte gibt.

### **A3.4 Längs beanspruchte Stumpf- und Kehlnähte**

Die IIW-Empfehlungen enthalten für längs beanspruchte

- Stumpfnähte ohne Nahtansatzstellen und mit ZFP sowie
- mit Automaten geschweißte Kehlnähte ohne Nahtansatzstellen

jeweils die Schwingfestigkeit FAT 112, die sich auf die Wanddicke  $t = 25$  mm bezieht. Für querbeanspruchte Stumpf- und Kehlnahtverbindung hat die Stichprobenuntersuchung [13] aufgezeigt, dass der Schwingfestigkeitsunterschied zu den IIW-Angaben offenbar auf den Wanddickeneinfluss zurückgeführt werden kann. Daher ist es vertretbar, die Schwingfestigkeit für längs beanspruchte Stumpfnähte und für längs beanspruchte, mit dem Automaten geschweißte Kehlnähte - jeweils ohne Nahtansatzstellen - entsprechend dem Wanddickenfaktor für diese Verbindungsform (siehe Bild A3-1 und Abschnitt A3.2)

$$f(t=10\text{mm}) = (25/10)^{0,1} = 1,1$$

auf die Schwingfestigkeitsklasse **FAT 125** anzuheben und diese auf die Schweißnahtgüteklasse CP B nach DIN EN 15085 zu beziehen.

### **A3.5 Mittel- und Eigenspannungen**

Basierend auf einer umfangreichen Versuchsnachauswertung wurden in [18] und [19] für verschiedene geschweißte Bauteilformen eine Mittelspannungsabhängigkeit aufgezeigt, die dem Erhöhungsfaktor  $f(R)=1,25$  für die Wechselfestigkeit ( $R=-1$ ) gegenüber der reinen Schwellfestigkeit ( $R=0$ ) entspricht. Diese Mittelspannungsabhängigkeit deckt sich im Wesentlichen mit der in der FKM-Richtlinie [5] angegebenen Mittelspannungsempfindlichkeit für mäßige Eigenspannungen, wobei dort der Schwingfestigkeitsunterschied zwischen der Wechselfestigkeit ( $R=-1$ ) und der Schwellfestigkeit bei  $R=0,5$  mit dem Eigenspannungsfaktor  $K_{E,\sigma}=1,26$  erfasst ist. Die im Schienenfahrzeugbau auftretenden Schweißkonstruktionen entsprechen weitgehend den in [18] und [19] angegebenen Fällen mit o.g. Mittelspannungsabhängigkeit.

### **A3.6 Wöhlerlinienneigung**

Die gegenüber den IIW-Empfehlungen unterschiedliche Vorgabe der Wöhlerlinienneigung in Abhängigkeit vom Kerbfall der Schweißverbindungsform basiert auf den Untersuchungsergebnissen in [11] und den Festlegungen in [10].



## Anhang A4: Kraftmessungen

Gemessene Belastungen, im Allgemeinen entsprechen diese Kraft-Zeit-Verläufen, sind grundsätzlich wie gemessene Dehnungen nach Abschnitt 4.2 zu analysieren. Analyseergebnis ist die Äquivalentamplitude der gemessenen Kraft.

Folgende Besonderheiten sind bei der Berechnung der Äquivalentamplitude gemessener Kräfte zu berücksichtigen:

1. Signalkorrektur des Kraft-Zeit-Verlaufs nach Abschnitt 4.1,
2. Rainflow-Klassierung nach Abschnitt 4.3,
3. Addition nicht erfasster Mittellasten, z.B. aus dem Eigengewicht nach Kapitel 3.3, keine Bewertung der Felder der Rainflow-Matrix auf Mittelspannungsempfindlichkeit ( $M_{\sigma} = 0$ )
4. Schadensakkumulationsrechnungen nach einem Verfahren nach Abschnitt 5.7.

Für die Schadensakkumulationsrechnung zur Ermittlung der Äquivalentamplitude ist die Annahme einer Wöhlerlinienform notwendig. Die Wahl der Wöhlerlinienform sollte sich nach der Mehrzahl der zu betrachtenden hochbeanspruchten Bauteilstellen richten. Für Fahrwerkrahmen nach DIN EN 13749 sollte im Allgemeinen eine standardisierte Wöhlerlinie für geschweißte Bauteile zur Anwendung kommen.

Folgende Ergebnisse müssen bei der Auswertung der Kraftmessungen im Rahmen von Streckenmessungen dokumentiert werden:

- Kraftkomponente,
- gemessene Strecke,
- Maximalamplitude der gemessenen Belastung,
- Mittelwert der gemessenen Belastung,
- Äquivalentamplitude oder Betriebsfestigkeitsfaktor,
- Darstellung des Belastungskollektivs,
- Kalibrierprotokolle.

## **Anhang A5: Rainflowzählung (informativ)**

Die Messdaten werden vor der Diskretisierung mit mindestens einer Klassenbreite hysteresefiltert. Bei dieser Hysteresefilterung werden alle Lastwechsel, die kleiner als die Klassenbreite sind, eliminiert und als Ergebnis bleibt eine Folge von Umkehrpunkten. Bei der anschließenden Diskretisierung sind diese Umkehrpunkte auf den nächsten Diskretisierungslevel zu runden. Mit dem oben beschriebenen Rainflow-Algorithmus wird anschließend das Rainflowkollektiv der Lastwechsel und das Residuum ermittelt.

### **Parameter:**

Bei der Diskretisierung ist das Intervall vom Minimal- bis zum Maximalwert in mindestens 32 Diskretisierungslevels gleichmäßig aufzuteilen. Der Mindestwert für die Breite der Hysteresefilterung ist die Differenz zwischen zwei benachbarten Diskretisierungslevels.

Für die Rainflowzählung gibt es mehrere gängige Algorithmen, deren Ergebnisse sich durch die unterschiedliche Behandlung des Residuums unterscheiden.

Da davon auszugehen ist, dass für die Bildung des Gesamtkollektivs für den Fahrzeugeinsatz verschiedene Teilabschnitte zu einem Gesamtkollektiv kombiniert werden müssen, sind nur solche Rainflowzählalgorithmen geeignet, die das Residuum berücksichtigen.

### **Mögliche Vorgangsweise:**

Bei der Kombination von Rainflowkollektiven werden die gleichen Lastwechsel der Teilkollektive direkt addiert und die Residuen in der entsprechenden Reihenfolge aneinandergereiht und wieder rainflowanalysiert. Das Rainflowkollektiv des Residuums wird anschließend zum Summenkollektiv der Teilabschnitte addiert. Das verbleibende Residuum wird durch zyklisches Schließen des Residuums gezählt und zum Gesamtkollektiv addiert.

Eine alternative Möglichkeit besteht darin, das Residuum direkt in das Rainflowkollektiv des Teilkollektivs hineinzuzählen. Die so ermittelten Teilkollektive können dann direkt zum Gesamtkollektiv addiert werden.

### **Anmerkung:**

Das Residuum ist entsprechend der von Clormann und Seeger [20] vorgeschlagenen bzw. der im ASTM-Standard E 1049 [21] definierten Vorgangsweise des zyklischen Schließens der Umkehrpunkte-Folge vorzunehmen. Durch dieses Verfahren werden alle Lastwechsel gezählt, die sich beim zweiten und bei den folgenden Durchläufen schließen.