

DIN EN 17149-2

ICS 45.060.01

Einsprüche bis 2022-11-02

Entwurf

**Bahnanwendungen –
Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen –
Teil 2: Statischer Festigkeitsnachweis;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17149-2:2022**

Railway applications –
Strength assessment of railway vehicle structures –
Part 2: Static strength assessment;
German and English version prEN 17149-2:2022

Applications ferroviaires –
Évaluation de la résistance des structures de véhicule ferroviaire –
Partie 2: Évaluation de la résistance statique;
Version allemande et anglaise prEN 17149-2:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-09-02 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

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

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

Gesamtumfang 54 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-2:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

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

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

September 2022

prEN 17149-2

**Bahnanwendungen – Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen – Teil 2:
Statischer Festigkeitsnachweis**

Railway applications – Strength assessment of railway vehicle structures – Part 2: Static strength assessment

Applications ferroviaires – Évaluation de la résistance des structures de véhicule ferroviaire – Partie 2: Évaluation de la résistance statique

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Belastungs- und Dehnungsermittlung	7
4.1 Allgemeines	7
4.2 Berechnung der Äquivalentspannung mit linear elastischem Werkstoffverhalten	7
4.3 Berechnung mit nichtlinearem Werkstoffverhalten	7
4.3.1 Werkstoffmodelle	7
4.3.2 Äquivalentspannung	9
4.3.3 Äquivalente plastische Dehnung	9
4.4 Bestimmung der Spannungen und Dehnungen im Test	9
5 Statische Festigkeit	10
5.1 Werkstoffeigenschaften	10
5.1.1 Allgemeines	10
5.1.2 Grundwerkstoff	10
5.1.3 Wärmeeinflusszone (WEZ) und Schweißgut	11
5.2 Zulässige plastische Dehnung	12
5.2.1 Außergewöhnliche Bemessungslasten	12
5.2.2 Bemessungsbruchlast	13
6 Teilbeiwerte	13
6.1 Allgemeines	13
6.2 Teilbeiwert für Lasten γ_L	13
6.3 Teilbeiwert für die Bauteilfestigkeit γ_M	14
6.3.1 Allgemeines	14
6.3.2 Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$	14
6.3.3 Teilbeiwert für den Validierungsgrad $\gamma_{M,V}$	14
6.3.4 Teilbeiwert für die Werkstoffverfestigung $\gamma_{M,T}$	14
6.3.5 Teilbeiwert für Gussstücke $\gamma_{M,G}$	15
6.4 Teilbeiwert für Instabilität γ_I	15
7 Verfahren zum statischen Festigkeitsnachweis	15
7.1 Allgemeines	15
7.2 Linear-elastische Analyse	15
7.2.1 Spannungskriterium	15
7.2.2 Plastifizierungskriterium	16
7.2.3 Instabilitätskriterium	16
7.3 Nichtlineare elastisch-plastische Analyse	17
7.3.1 Allgemeines	17
7.3.2 Spannungskriterium	17
7.3.3 Dehnungskriterium	17
7.3.4 Verformungskriterium	18
7.3.5 Instabilitätskriterium	18
Anhang A (informativ) Zusätzliche Informationen für den Querschnittsfaktor $n_{pl,\varepsilon}$	19
Anhang B (informativ) Beispiel für einen Nachweis mit einer einmaligen Umverteilung der Spannungen aufgrund von Plastifizierung	20
B.1 Ausgangslage	20
B.2 Lastfälle	20
B.3 Nachweis	21
Anhang C (informativ) Nachbearbeitung der plastischen Dehnung/Spannung	22
Literaturhinweise	24

Bilder

Bild 1 — Reales Werkstoffverhalten a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung	8
Bild 2 — Zweilineares Werkstoffmodell a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung	8
Bild 3 — Dreilineares Werkstoffmodell a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung	9
Bild 4 — Breite der Wärmeeinflusszone b_{HAZ}	11
Bild B.1 — Lastfallverlauf	21

Tabellen

Tabelle 1 — Relevante Dicke und Festigkeitswerte	10
Tabelle 2 — Anisotropiefaktor f_A für Stahl und Aluminium	10
Tabelle 3 — Druckfestigkeitsfaktor f_C	11
Tabelle 4 — Breite der Wärmeeinflusszone b_{HAZ}	12
Tabelle 5 — Parameter für die zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$	12
Tabelle 6 — Zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$ für den Nachweis gegen die Bemessungsbruchlast	13
Tabelle 7 — Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$	14
Tabelle 8 — Teilbeiwert für Gussstücke $\gamma_{M,G}$	15
Tabelle A.1 — Querschnittsfaktor $n_{pl,\varepsilon}$	19

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17149-2:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

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

- Teil 1: Allgemeines
- Teil 2: Statischer Festigkeitsnachweis
- Teil 3: Betriebsfestigkeitsnachweis

Einleitung

Dieses Dokument enthält Verfahren und Kriterien für den statischen Festigkeitsnachweis von außergewöhnlichen Lastfällen und Bruchlastfällen auf der Grundlage einer linearen Analyse oder einer nichtlinearen elastisch-plastischen Analyse.

Es definiert keine Lastfälle und legt nicht fest, in welchen Fällen, für welche Strukturbauteile oder für welche Arten von Schienenfahrzeugen ein statischer Festigkeitsnachweis durchzuführen ist.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren für den statischen Festigkeitsnachweis für Schienenfahrzeugstrukturen fest.

Es ist Teil einer Normenreihe, die Verfahren zum Festigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen festlegt, die nach den für Eisenbahnanwendungen geltenden Normen hergestellt, betrieben und instand gehalten werden.

Dieses Dokument gilt für außergewöhnliche Lastfälle und Bruchlastfälle.

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

In dieser Dokumentenreihe werden keine Auslegungslastfälle definiert.

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

Diese Normenreihe ist für alle Arten von Schienenfahrzeugen anwendbar. Sie legt jedoch nicht fest, in welchen Fällen oder für welche Arten von Schienenfahrzeugen eine statische Festigkeitsbewertung vorzunehmen ist.

2 Normative Verweisungen

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

EN 12663-1:2010+A1:2014, *Bahnanwendungen — Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen — Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)*

EN 12663-2:2010, *Bahnanwendungen — Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen — Teil 2: Güterwagen*

EN 13749:2021, *Bahnanwendungen — Radsätze und Drehgestelle — Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*

EN 15227:2020, *Bahnanwendungen — Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen*

EN 15827:2011, *Bahnanwendungen — Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke*

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

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe, Symbole und Abkürzungen nach prEN 17149-1:2021.

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

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

4 Belastungs- und Dehnungsermittlung

4.1 Allgemeines

Das Nachweisverfahren basiert auf Spannungen oder Dehnungen. Diese können aus Berechnungen oder aus Messungen während der Prüfung abgeleitet werden. Wenn nicht anders angegeben, wird die Spannung oder die Dehnung für jeden einzelnen Lastfall separat ohne einen entsprechenden Lastfall ermittelt.

Spannungen und Dehnungen können bei linear elastischem oder nichtlinearem Werkstoffverhalten ermittelt werden. Anhang C enthält eine Anleitung für die Bestimmung von plastischen Dehnungen und Spannungen aus einer FEA. Bei Schweißverbindungen muss die Exzentrizität zwischen der Mitte der Kehlnaht und dem angeschlossenen Blech e_W nicht berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Spannungsbestimmung aus Dehnungsmessungen.

4.2 Berechnung der Äquivalentspannung mit linear elastischem Werkstoffverhalten

Für die Berechnung der Äquivalentspannung sollte der ebene Spannungstensor an der Bauteiloberfläche als charakteristischer Spannungswert für den statischen Festigkeitsnachweis verwendet werden. Die Spannungskomponenten des ebenen Spannungstensors sind, $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$.

Die Äquivalentspannung für duktilen Werkstoff wird nach der von-Mises-Formel ermittelt:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

Die Äquivalentspannung für spröden Werkstoff wird nach Rankine ermittelt:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left[|\sigma_x + \sigma_y| + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \right] \quad (2)$$

Für einen allgemeineren Ansatz kann die Ableitung der Äquivalentspannung für den dreiachsigen Spannungszustand der Fachliteratur entnommen werden.

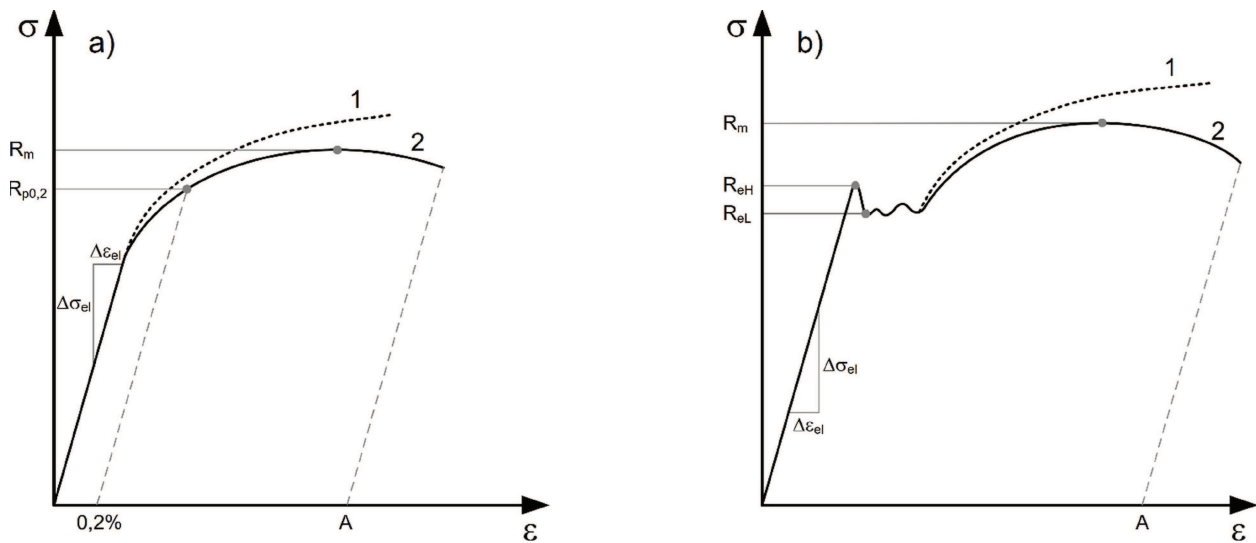
4.3 Berechnung mit nichtlinearem Werkstoffverhalten

4.3.1 Werkstoffmodelle

Das reale Werkstoffverhalten (Bild 1) darf durch zweilineare (Bild 2), dreilineare (Bild 3), multilineare oder kontinuierliche Werkstoffmodelle angenähert werden. Verfestigungseffekte für Dehnungen, die die Festigkeit überschreiten, dürfen angewendet werden, aber auch die Anwendung eines elastischen, ideal-plastischen Werkstoffgesetzes ist zulässig.

Je nach Werkstoffmodell kann die Grenze für das elastische Verhalten, das durch die Fließgrenze R_p repräsentiert wird, entweder die Fließgrenze R_{eH} oder die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ sein, wie in EN ISO 6892-1 definiert.

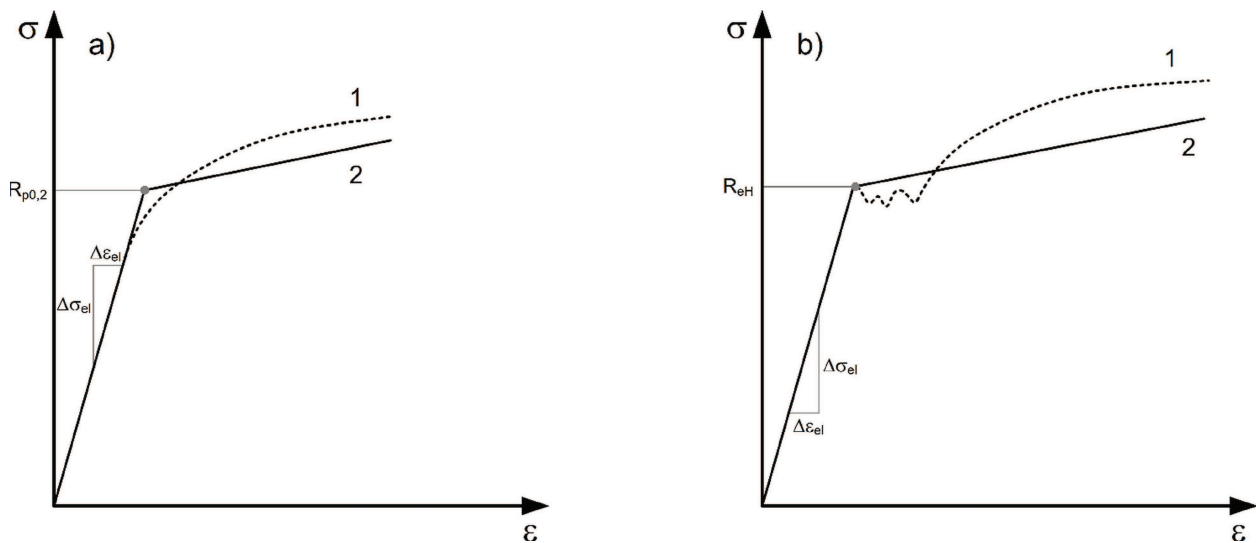
ANMERKUNG [1] und [2] geben Hinweise auf die Definition des Werkstoffgesetzes für die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Berechnung.



Legende

- 1 echtes Spannungs-Dehnungs-Verhalten
- 2 technisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten

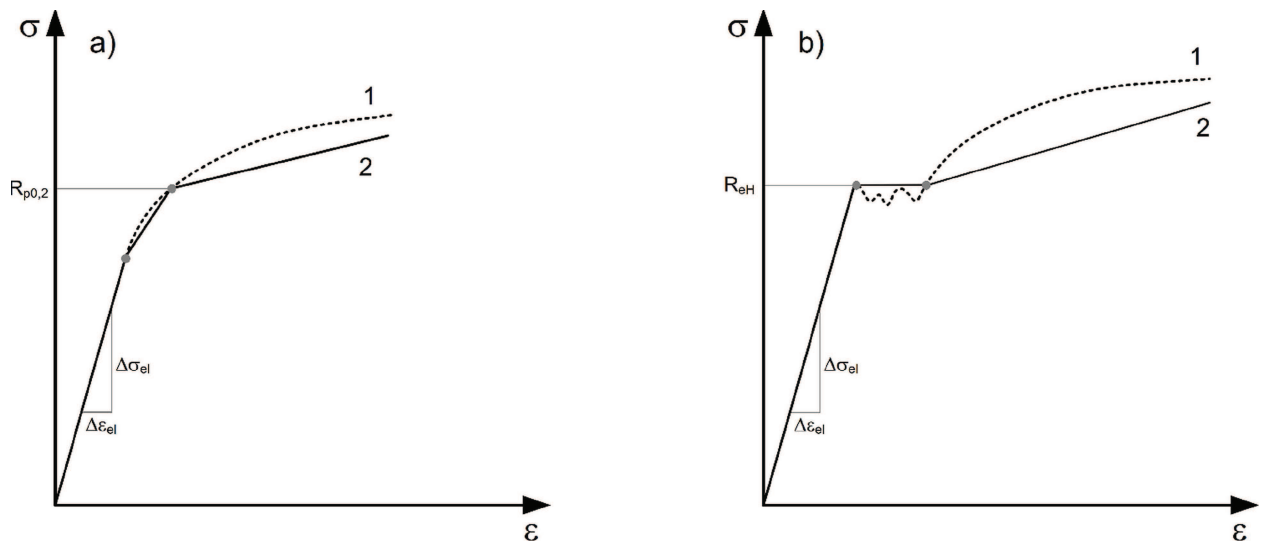
Bild 1 — Reales Werkstoffverhalten a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung



Legende

- 1 echtes Spannungs-Dehnungs-Verhalten
- 2 zweilineare Annäherung

Bild 2 — Zweilineares Werkstoffmodell a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung



Legende

- 1 echtes Spannungs-Dehnungs-Verhalten
- 2 dreilineare Annäherung

Bild 3 — Dreilineares Werkstoffmodell a) ohne ausgeprägte Fließspannung b) mit ausgeprägter Fließspannung

4.3.2 Äquivalentenspannung

Die Berechnung der Äquivalentenspannung mit nichtlinearem Werkstoffverhalten folgt dem Verfahren für lineares elastisches Werkstoffverhalten wie in 4.2 angegeben.

4.3.3 Äquivalente plastische Dehnung

Die äquivalente plastische Dehnung wird im Allgemeinen nach der Von-Mises-Hypothese berechnet und darf durch Verwendung der Fachliteratur oder durch Anwendung von Gleichung (3) bestimmt werden.

$$\varepsilon_{p,eq} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{p,x}^2 + \varepsilon_{p,y}^2 + \varepsilon_{p,z}^2) + \frac{4}{3} (\varepsilon_{p,xy}^2 + \varepsilon_{p,yz}^2 + \varepsilon_{p,xz}^2)} \quad (3)$$

4.4 Bestimmung der Spannungen und Dehnungen im Test

In realen Bauteilen können fertigungs- oder vorspannungsbedingte Restdehnungen auftreten. Gemessene Dehnungen während der Prüfungen beinhalten Einflüsse solcher Restdehnungen. Das in Abschnitt 7 beschriebene Festigkeitsnachweisverfahren ist für die aus solchen Messungen abgeleiteten Spannungen und Dehnungen anwendbar und deckt die Auswirkungen solcher Restdehnungen ausreichend ab.

Je nach Art des Bewertungsverfahrens (siehe Abschnitt 7) müssen die Spannungen aus gemessenen Dehnungen mit linear-elastischem Werkstoffverhalten oder nichtlinearen Werkstoffmodellen nach 4.3.1 bestimmt werden.

5 Statische Festigkeit

5.1 Werkstoffeigenschaften

5.1.1 Allgemeines

Die Werkstoffeigenschaften müssen den Festigkeitswerten der Bauteile, wie in prEN 17149-1:2021, Abschnitt 7 definiert, entsprechen. Aus Werkstoffnormen entnommene Festigkeitswerte erfüllen diese Anforderungen.

Dieser Abschnitt beschreibt die Werkstoffeigenschaften für den statische Festigkeitsnachweis des Grundwerkstoffs und der Schweißverbindungen unter der Anwendungstemperatur innerhalb des in der Werkstoffspezifikation angegebenen Bereichs. Wird der Anwendungsbereich überschritten, so ist ein Nachweisverfahren zu wählen, welches den spezifischen Anwendungsfall (z. B. Temperaturbereich) berücksichtigt.

Nach 7.1 ist bei Schweißverbindungen die Bewertung für das Schweißgut, die WEZ und den angrenzenden Grundwerkstoff unter Berücksichtigung der Breite der WEZ erforderlich. Die entsprechenden Dicken und Festigkeitswerte sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Relevante Dicke und Festigkeitswerte

Bereich	Relevante Dicke	Festigkeitswerte R_p, R_m, A
Grundwerkstoff	Blechdicke	Festigkeitswert des Grundwerkstoffs
Wärmeeinflusszone WEZ	Blechdicke in der Wärmeeinflusszone	Mindestwert des Grundwerkstoffs und der WEZ ^a
Schweißgut	wirksame Nahtdicke a	Mindestwert des Grundwerkstoffs und der WEZ ^a und des Schweißguts ^b
^a Wenn die bleibende Bruchdehnung A für die WEZ nicht verfügbar ist, darf der Wert für den Grundwerkstoff verwendet werden.		
^b Beim Schweißen kommt es zu einer Vermischung des Schweißguts mit dem Grundwerkstoff. Daher kann der effektive Festigkeitswert einer Schweißnaht höher sein als der Mindestwert des Schweißguts und der Wärmeeinflusszone. Höhere Festigkeitswerte bzw. die Werte der Wärmeeinflusszone dürfen verwendet werden, wenn dies z. B. durch Zugfestigkeitsprüfungen nachgewiesen wird.		

5.1.2 Grundwerkstoff

Die Werkstoffeigenschaften müssen für den Nachweisort gültig sein.

Wenn die Festigkeitseigenschaften von Halbzeugen die ursprüngliche Wanddicke berücksichtigen, ist der Einfluss der Bauteilgröße normalerweise abgedeckt.

ANMERKUNG Halbzeuge können über ihren Querschnitt stark variierende Festigkeitseigenschaften aufweisen.

Anisotropieeffekte aufgrund von Herstellungsverfahren werden durch den Anisotropiefaktor f_A berücksichtigt. Für gewalzte Bleche und Strangpressprofile muss ein Anisotropiefaktor f_A in der Richtung quer zur Hauptwalzrichtung nach Tabelle 2 berücksichtigt werden, es sei denn, dies ist in der Werkstoffnorm oder Bauteilspezifikation bereits berücksichtigt oder ausdrücklich ausgeschlossen.

Tabelle 2 — Anisotropiefaktor f_A für Stahl und Aluminium

Werkstoff	$R_{m,N}$ [N/mm ²]	f_A
Walzstahl	≤ 600	0,9
	> 600 ≤ 900	0,86

Tabelle 2 (fortgesetzt)

Werkstoff	$R_{m,N}$ [N/mm ²]	f_A
Gewalzte Bleche und Strangpressprofile aus Aluminium	≤ 200	1,0
	$> 200 \leq 400$	0,95
	$> 400 \leq 600$	0,9
Alle anderen Werkstoffanwendungen		1,0
Wärmeeinflusszone		1,0

Bei gegossenen Werkstoffen und im Falle eines Druckfestigkeitszustandes darf eine erhöhte Druckstreckgrenze und Druckfestigkeit bei dem statischen Festigkeitsnachweis berücksichtigt werden. Der anwendbare Druckfestigkeitsfaktor f_C für verschiedene Gruppen von Gusswerkstoffen ist in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 — Druckfestigkeitsfaktor f_C

Werkstoffgruppe ^a	GS	GJS	GJL	GJM	Aluminiumguss	Nicht gegossene Werkstoffe
f_C	1,0	1,3	2,5	1,5	1,5	1,0

Als konservativer Ansatz kann der Druckfestigkeitsfaktor f_C im Allgemeinen auf 1,0 gesetzt werden.

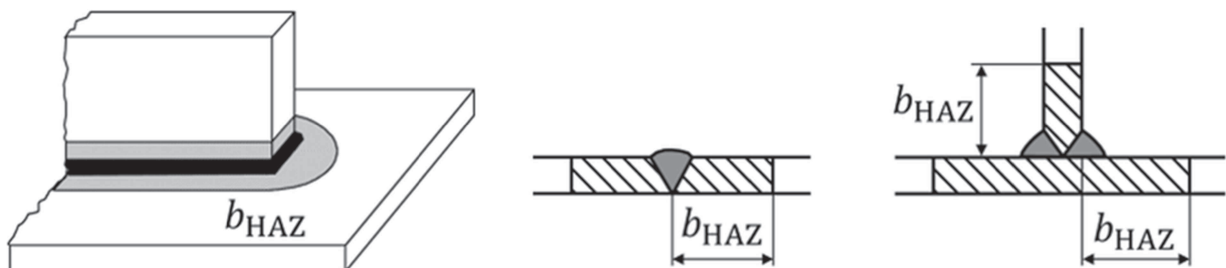
Die statischen Festigkeitswerte des Grundwerkstoffs für den statischen Festigkeitsnachweis sind

$$R_m = f_A \cdot f_C \cdot R_{m,N}$$

$$R_p = f_A \cdot f_C \cdot R_{p,N} \quad (4)$$

5.1.3 Wärmeeinflusszone (WEZ) und Schweißgut

Für Aluminium ist die Breite der Wärmeeinflusszone in Bild 4 dargestellt.



Legende

b_{HAZ} Breite der Wärmeeinflusszone

Bild 4 — Breite der Wärmeeinflusszone b_{HAZ}

Die Werte für die Breite der Wärmeeinflusszone sind in Tabelle 4 angegeben. Alternativ kann die Breite der Wärmeeinflusszone auch durch eine Härtemessung bestimmt werden.

Tabelle 4 —Breite der Wärmeeinflusszone b_{HAZ}

t [mm]	b_{HAZ} [mm] MIG	b_{HAZ} [mm] TIG
$0 < t \leq 6$	20	30
$6 < t \leq 12$	30	30
$12 < t \leq 25$	35	35
> 25	40	40

Die Festigkeitswerte des Schweißguts und der Wärmeeinflusszone sind in entsprechenden Normen, Richtlinien (siehe Literaturverzeichnis) oder Werkstoffspezifikationen angegeben.

5.2 Zulässige plastische Dehnung

5.2.1 Außergewöhnliche Bemessungslasten

Die Bestimmung der zulässigen plastischen Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$ muss unter Berücksichtigung der Anzahl der Lastfallereignisse N berechnet werden. Basierend auf den Grundsätzen des Manson-Coffin-Ansatzes und angepasst an Versuchsdaten (siehe [37], [38]) wird die zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$ in Gleichung (5) angegeben.

$$\varepsilon_{p,adm} = \min \left(\varepsilon_{p,adm,B} \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^m ; \varepsilon_{p,adm,max} \right) \quad (5)$$

Dabei ist

- A die bleibende Bruchdehnung;
- $\varepsilon_{p,adm,max}$ die höchstens zulässige plastische Dehnung (siehe Tabelle 4);
- $\varepsilon_{p,adm,B}$ die zulässige plastische Dehnung für $N_B = 1\,000$ (siehe Tabelle 4);
- m der Exponent der E-N-Kurve (siehe Tabelle 4);
- N die Anzahl der Vorkommnisse.

Als konservativer Ansatz kann die zulässige plastische Dehnung auf $\varepsilon_{p,adm} = \varepsilon_{p,adm,B}$ gesetzt werden.

ANMERKUNG 1 Für Wagenkastenstrukturen finden sich Angaben zur Anzahl der Vorkommen in [25].

Tabelle 5 —Parameter für die zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$

Werkstoff	m [-]	$\varepsilon_{p,adm,max}$ [-]	$\varepsilon_{p,adm,B}$ [-]
Stahl (gewalzt oder geschmiedet)	-0,52	0,2 A	0,02 A
Gussstahl	-0,58	0,2 A	0,02 A
Edelstahl im geglühten Zustand	-0,36	0,2 A	0,02 A
Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)	-0,70	0,2 A	0,01 A
Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)	-0,56	0,2 A	0,01 A
Grauguss (GJL) ^a	-0,50	0,004	0,001

Tabelle 5 (fortgesetzt)

Werkstoff	m [-]	$\varepsilon_{p,adm,max}$ [-]	$\varepsilon_{p,adm,B}$ [-]
Geglühtes Gusseisen (GJM)	-0,70	0,1 A	0,01 A
Aluminium (alle Arten, einschließlich Aluminiumguss)	-0,83	0,2 A	0,02 A
Geschweißte Verbindungen aus Stahl (WEZ und Schweißgut)	-0,61	0,15 A	0,02 A
Schweißverbindungen aus Aluminium (WEZ und Schweißgut)	-0,93	0,1 A	0,02 A
^a Für GJL darf die Bruchdehnung A auf $A = 0,006$ festgelegt werden.			

ANMERKUNG 2 Die Parameter m und $\varepsilon_{p,adm,B}$ in Tabelle 5 sind empirisch für einen Bereich von 10 bis 1 000 Vorkommnissen bestimmt. Der Parameter $\varepsilon_{p,adm,max}$ stellt die Obergrenze für die zulässige plastische Dehnung dar.

Die in der Manson-Coffin-Gleichung angegebene zulässige plastische Dehnung stellt eine Dehnungsamplitude von zwei alternierenden Lastfällen dar. Dieser Wert deckt die getrennte Bewertung der einzelnen Lastfälle ab.

5.2.2 Bemessungsbruchlast

Die zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$ für die Bemessung gegen die Tragfähigkeit ist in Tabelle 6 angegeben. Diese Werte decken die Auswirkungen der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes ab. Wenn validierte Werkstoffmodelle und die Auswirkungen der Mehrachsigkeit des Spannungszustands berücksichtigt werden, darf die zulässige plastische Dehnung in Übereinstimmung mit der Fachliteratur oder experimentellen Ergebnissen erhöht werden.

Tabelle 6 — Zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$ für den Nachweis gegen die Bemessungsbruchlast

Bereich	Zulässige plastische Dehnung $\varepsilon_{p,adm}$
Grundwerkstoff	0,5 A
Wärmeeinflusszone (WEZ)	0,5 A
Schweißgut	0,4 A

6 Teilbeiwerte

6.1 Allgemeines

Für die Ableitung der Spannung bzw. der Dehnung und in Bezug auf die statische Festigkeit werden Teilbeiwerte verwendet.

6.2 Teilbeiwert für Lasten γ_L

Die Bemessungslast enthält alle notwendigen Zuschläge, um Unsicherheiten in ihrem Wert zu berücksichtigen. Sie ist die repräsentative Last multipliziert mit dem Teilbeiwert γ_L . Dies gilt sowohl für außergewöhnliche Lasten als auch für Bruchlasten.

Die repräsentative Last darf aus normativen Lasten, Simulationen oder Spezifikationen abgeleitet werden.

Sofern nicht anders angegeben, sind Lasten aus EN 12663-1:2010+A1:2014 und EN 12663-2:2010 für Wagenkastenstrukturen, EN 13749:2021 und EN 15827:2011 für Drehgestelle und Fahrwerkstrukturen und EN 15227:2020 für Crash-Simulationen Bemessungslasten. In diesen Fällen ist ein Teilbeiwert von $\gamma_L = 1,0$ anwendbar.

Wird die Last aus Simulationen abgeleitet, muss ein geeigneter Teilbeiwert $\gamma_L \geq 1,0$ in Abhängigkeit von den Simulationsparametern und den Unsicherheiten der Simulation berücksichtigt werden.

6.3 Teilbeiwert für die Bauteilfestigkeit γ_M

6.3.1 Allgemeines

Der Teilbeiwert γ_M für die statische Festigkeit des Bauteils ist gegeben durch

$$\gamma_M = \gamma_{M,S} \cdot \gamma_{M,V} \cdot \gamma_{M,T} \cdot \gamma_{M,G} \quad (6)$$

Diese Teilbeiwerte werden in den folgenden Unterabschnitten erläutert.

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

Eine Schadensfolge "hoch" sollte angewendet werden, wenn ein Versagen des Strukturdetails zu Folgeereignissen mit Personenschäden und Ausfall der Gesamtfunktion führt und die Bauteilstruktur keine alternativen Lastpfade bietet.

ANMERKUNG Die Versagensfolge kann das Ergebnis einer Risikobewertung (z. B. FMECA) sein.

In allen anderen Fällen kann eine Schadensfolge von „mittel“ angesetzt werden.

Abhängig von der Schadensfolge ist der Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$ in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7 — Teilbeiwert für die Schadensfolge $\gamma_{M,S}$

Schadensfolge	Teilbeiwert $\gamma_{M,S}$
Mittel	1,0
Hoch	1,15

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

Wenn der strukturelle Validierungsplan aus dem Validierungsprozess besteht, wie er in der entsprechenden Norm definiert ist, z. B. in EN 15827:2011, EN 13749:2021 und EN 12663-1:2010+A1:2014, beträgt der Teilbeiwert $\gamma_{M,V} = 1,0$. Handelt es sich bei dem Entwurf um eine Weiterentwicklung eines früheren Produkts, können alle früheren, noch gültigen Prüfdaten zur Validierung des überarbeiteten Produkts verwendet werden, und der entsprechende Teilbeiwert ist $\gamma_{M,V} = 1,0$. In allen anderen Fällen beträgt der Teilbeiwert $\gamma_{M,V} = 1,15$.

6.3.4 Teilbeiwert für die Werkstoffverfestigung $\gamma_{M,T}$

Die statische Festigkeit des Bauteils muss sowohl mit der Fließgrenze R_p als auch mit der Zugfestigkeit R_m des Werkstoffs bewertet werden. Beide Bewertungen werden durch einen kombinierten Teilbeiwert $\gamma_{M,T}$ nach Gleichung (7) abgedeckt.

$$\gamma_{M,T} = \max\left(\frac{1,3}{1+A} \cdot \frac{R_p}{R_m}; 1,0\right) \quad (7)$$

Als konservativer Ansatz kann in Gleichung (7) die Bruchdehnung auf $A = 0$ gesetzt werden.

6.3.5 Teilbeiwert für Gussstücke $\gamma_{M,G}$

Der Teilbeiwert für Gussstücke $\gamma_{M,G}$ ist in Tabelle 8 angegeben. Für nicht gegossene Bauteile muss der Teilbeiwert auf $\gamma_{M,G} = 1,0$ gesetzt werden.

Tabelle 8 — Teilbeiwert für Gussstücke $\gamma_{M,G}$

Art	Teilbeiwert $\gamma_{M,G}$ für GS, GJS, ADI, GJL, GJM	Teilbeiwert $\gamma_{M,G}$ für Aluminiumgüsse
einer zerstörungsfreien Prüfung unterzogen	1,1 ^a	1,25 ^a
nicht der zerstörungsfreien Prüfung unterzogen	1,25	1,4
^a Für lokale Regionen darf ein verminderter Wert von 1,0 angesetzt werden, wenn der Nachweis durch entsprechende Prüfungen mit Prüfkörpern aus diesen Regionen und entsprechende Qualitätssicherungsmaßnahmen für den Herstellungsprozess erbracht wird.		

6.4 Teilbeiwert für Instabilität γ_I

Für die rechnerische Beurteilung anhand des Instabilitätskriteriums ist ein spezieller Teilbeiwert erforderlich.

Ist in der einschlägigen Norm für statische Anforderungen kein bestimmter Wert festgelegt, so ist ein Teilbeiwert von $\gamma_I = 1,5$ zu verwenden. Bei einer Analyse, die materielle und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt, kann der Teilbeiwert für Instabilität auf $\gamma_I = 1,15$ reduziert werden.

7 Verfahren zum statischen Festigkeitsnachweis

7.1 Allgemeines

Der statische Festigkeitsnachweis eines Nachweisortes gilt als erfolgreich, wenn alle Kriterien der linear-elastischen Analyse nach 7.2 oder die Kriterien der nichtlinear-elastisch-plastischen Analyse nach 7.3.1 erfüllt sind.

Die Ermittlung der Spannung oder Dehnung muss nach Abschnitt 4 durchgeführt werden.

Bei geschweißten Verbindungen muss der Nachweis für das Schweißgut, die WEZ und den angrenzenden Grundwerkstoff unter Berücksichtigung der Breite der WEZ nach 5.1.3 vorgenommen werden.

Die maßgebende Dicke und die statischen Festigkeitswerte sind nach Abschnitt 5 zu ermitteln.

Sofern nicht anders angegeben, dürfen die Teilbeiwerte γ_L und γ_M nach Abschnitt 6 auf die statischen Festigkeitswerte oder auf die einwirkenden Lasten angewendet werden.

Das Festigkeitsnachweisverfahren basiert auf einer getrennten Bewertung der einzelnen Lastfälle. Wenn alle Lastfälle als einzelne Lastfälle bewertet werden, ist die Bewertung konservativ.

Bei einer Nachweisstelle, die in allen relevanten Lastfällen proportionale Spannungszustände aufweist und bei der eine einmalige Umlagerung von Spannungen infolge Plastifizierung auftritt, darf diese Spannungsumlagerung bei der Bemessung berücksichtigt werden. Anhang B enthält ein Beispiel für eine solche Bewertung.

7.2 Linear-elastische Analyse

7.2.1 Spannungskriterium

Die Spannungen müssen mit linear-elastischem Werkstoffverhalten ermittelt werden.