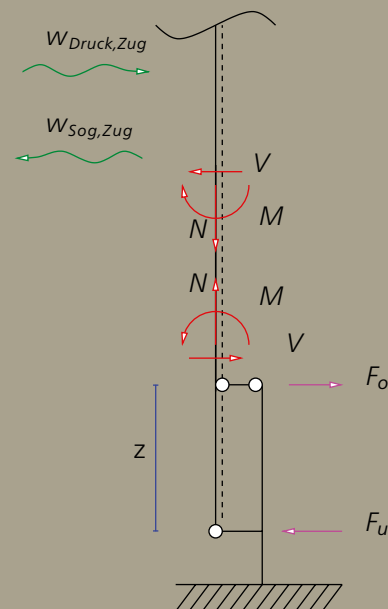


Ermüdungsnachweise im Holzbau



Inhalt

seite		seite	
3	1 _ Einleitung	20	3.3 _ Berechnung eines Zweifeldträgers
4	2 _ Begriffe und Formelzeichen	20	3.3.1 _ Allgemeines
4	2.1 _ Begriffe	20	3.3.2 _ Eingangswerte für die Berechnung
5	2.2 _ Formelzeichen	20	3.3.3 _ Belastung
6	3 _ Nachweiskonzept bei konstanter Amplitude	23	3.3.4 _ Statischer Nachweis
6	3.1 _ Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit – Normative Regelungen	23	3.3.5 _ Ermüdungsnachweis
6	3.1.1 _ Allgemeines	31	3.4 _ Berechnung einer Bahnhofsoberdachung unter Berücksichtigung der Druck-Sog-Einwirkung eines vorbeifahrenden Zuges
6	3.1.2 _ Ermüdungsrelevante Belastungen	31	3.4.1 _ System
9	3.1.3 _ Schnittgrößen- und Spannungsermittlung	32	3.4.2 _ Schnittgrößen am Stützenfuß
10	3.1.4 _ Bisheriges, nicht in FprEN 1995-1-1:2025 aufgenommenes Nachweisformat	33	3.4.3 _ Ausnutzungsgrade statischer Nachweis
12	3.1.5 _ Ermüdungsnachweis	34	3.4.4 _ Ermüdungsnachweis der Stütze
15	3.1.6 _ Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite $\gamma_{M,fat}$	41	3.4.5 _ Ermüdungsnachweis Anschluss
16	3.1.7 _ Bekannte Schwächen des Nachweises	47	4 _ Nachweiskonzept bei variabler Amplitude
16	3.1.8 _ Anwendungsgrenzen	47	4.1 _ Allgemeines
17	3.2 _ Wann ist Ermüdung im Vergleich zur statischen Bemessung relevant?	48	4.2 _ Ermüdungseinwirkung mit variabler Amplitude
		50	4.3 _ Anwendung der Palmgren-Miner-Regel
		52	4.4 _ Beispiel der Anwendung der Palmgren-Miner-Regel
		56	5 _ Rainflow-Auswertung des Lastmodells LM3 nach DIN EN 1991-2:2010
		61	6 _ Zusammenfassung
		62	7 _ Literatur
		63	_ Impressum

Anmerkung:

Wir legen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung der Geschlechter. In diesem Zusammenhang weisen wir darauf hin, dass in der vorliegenden Publikation zugunsten einer besseren Lesbarkeit von Texten und Tabellen das generische Maskulinum sowie geschlechterneutrale und feminisierte Sprachformen Verwendung finden. In jedem Fall gelten die gewählten Sprachfassungen für alle Geschlechter.

1 _ Einleitung

Ziel der Tragsicherheitsnachweise ist es, ein Versagen während der Nutzungsdauer zuverlässig zu verhindern. Das Versagen im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann durch eine einmalige maximale Belastung oder aber durch eine wiederholende, zyklische Einwirkung ausgelöst werden:

- Einmalige maximale Belastung: Mit Ausnahme der durch den Modifikationsbeiwert k_{mod} -Wert nach DIN EN 1995-2:2010 [1] berücksichtigten Dauer der Einwirkung ist kein Einfluss der Vorgeschichte der Belastung zu berücksichtigen. Es wird davon ausgegangen, dass die maximale Belastung nur einmal während der Nutzungsdauer des Bauteils auftritt und dieses Ereignis auch nur einmal überstanden werden muss.
- Wiederholende, zyklische Belastung: In diesem Fall werden wiederholt Belastungen auf das System aufgebracht. Diese wiederholten Belastungen können Mikroschäden erzeugen, die im Lauf der Zeit anwachsen und damit bemessungsrelevant werden. Es sind die innerhalb der Nutzungsdauer regelmäßig auftretenden Lasten von Bedeutung. Beispiele für regelmäßig auftretenden Lasten sind LKW-Überfahrten, durch Maschinen erzeugte wechselnde Belastungen oder Glockengeläut.

Die Bemessung von wiederholenden, zyklischen Belastungen (Ermüdungsnachweis) ist, da sie häufig im Brückenbau erforderlich ist, derzeit in DIN EN 1995-2:2010 [1] mit DIN EN 1995-2/NA:2011 [2] geregelt. Da es wiederholende, zyklischen Belastungen auch im Hochbau gibt, wird der Ermüdungsnachweis künftig in FprEN 1995-1-1:2025 [3] geregelt sein.

2_ Begriffe und Formelzeichen

2.1 _ Begriffe

Die in dieser Publikation verwendeten Begriffe und Formelzeichen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Amplitude der Spannung

Abstand zwischen maximalem bzw. minimalem Wert und Mittelwert der Spannung

Schwellbeanspruchung

Ermüdungsbeanspruchung, bei der während des Belastungszyklus kein Vorzeichenwechsel der Spannung auftritt

Statische Belastung

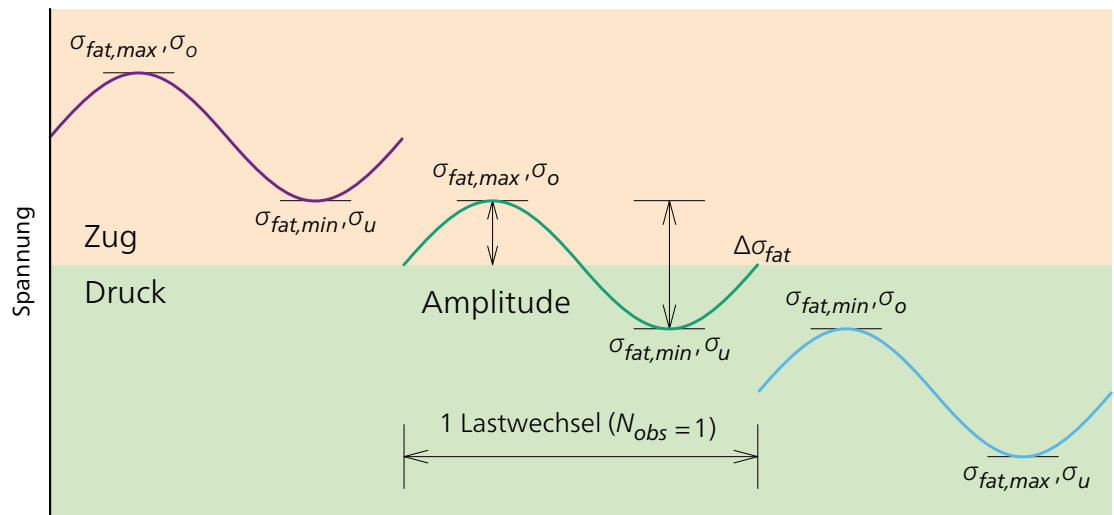
Belastung durch ruhende Lasten ohne ermüdungsrelevante Auswirkungen (wie z.B. Verkehrsbelastung im Hochbau oder Belastungen bei Fußgängerbrücken)

Wechselbeanspruchung

Ermüdungsbeanspruchung, bei der während des Belastungszyklus ein Vorzeichenwechsel der Spannung auftritt

Abb. 1:

Typischer Spannungsverlauf



- Schwellbeanspruchung
- Wechselbeanspruchung
- Schwellbeanspruchung

2.2 _ Formelzeichen

Hier werden nur die zur statischen Bemessung zusätzlichen Formelzeichen für den Ermüdungsnachweis gelistet.

Lateinische Formelzeichen

a_{fat}	Beiwert, der den Einfluss der Ermüdung auf die Festigkeit erfasst
b_{fat}	Beiwert, der den Einfluss der Ermüdung auf die Festigkeit erfasst
f_k	Charakteristische, statische Festigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Beanspruchungsart und -richtung
$f_{fat,d}$	Bemessungswert der Festigkeit, in der der Einfluss der Festigkeitsabnahme infolge Ermüdung berücksichtigt ist
k_{fat}	Beiwert zur Berücksichtigung der Ermüdung in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses R , der Beanspruchungsart und der Anzahl der Lastwechsel
N_{obs}	Anzahl der jährlichen Lastwechsel
R	Vorzeichenbehaftetes Verhältnis der absolut betrachteten minimalen, vorzeichenbehafteten Spannung zur absolut betrachteten maximalen, vorzeichenbehafteten Spannung
t_{life}	Nutzungsdauer Geplante Nutzungsdauer des Bauteils, während der die Ermüdungsbeanspruchung auftritt

Griechische Formelzeichen

β	Bedeutungsbeiwert zur Berücksichtigung der Konsequenzen bei Ermüdungsversagen
$\Delta\sigma_{fat}$	Schwingbreite als Abstand zwischen der maximalen und der minimalen Spannung; die Schwingbreite entspricht i.d.R. der doppelten Amplitude der Spannung
$Y_{M,fat}$	Teilsicherheitsbeiwert zur Berechnung der Bemessungsfestigkeitswerte für den Ermüdungsnachweis
$\sigma_{fat,max,d}$	Absolut betrachtet maximale, vorzeichenbehaftete Bemessungsspannung während eines Belastungszyklus infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkung
$\sigma_{fat,min,d}$	Absolut betrachtet minimale, vorzeichenbehaftete Bemessungsspannung während eines Belastungszyklus infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkung
σ_o	Oberspannung als maximale Spannung während eines Belastungszyklus
σ_u	Unterspannung als minimale Spannung während eines Belastungszyklus

3 _ Nachweiskonzept bei konstanter Amplitude

3.1 _ Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit – Normative Regelungen

3.1.1 _ Allgemeines

Ermüdungsnachweise werden künftig in FprEN 1995-1-1:2025 [3] geregelt sein. In der folgenden Zusammenstellung und den folgenden Berechnungen wird der zum Zeitpunkt der Drucklegung bekannte Stand von FprEN 1995-1-1:2025 [3] vorgestellt. Es sei deutlich darauf hingewiesen, dass sich im Zuge der Fertigstellung und einer geplanten A1 Änderung noch Änderungen ergeben können.

Nachfolgend werden

- die Lastermittlung;
- die Schnittgrößen- und Spannungsermittlung und
- die Ermittlung des Widerstands und Nachweis

nach DIN EN 1995-2:2010, Anhang A [1] bzw. FprEN 1995-1-1:2025, Abschnitt 10 [3] vorgestellt.

3.1.2 _ Ermüdungsrelevante Belastungen

Für Ermüdungsnachweise sind die ständigen Belastungen, die häufig auftretenden veränderlichen Belastungen sowie gegebenenfalls eine vorhandene Vorspannung relevant, siehe Gleichung (1):

$$\sum F_d = \sum_i G_{k,i} \oplus \sum_j \psi_{2,j} Q_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{fat} \quad (1)$$

mit $\sum F_d$ ermüdungsrelevante Einwirkung

$\sum_i G_{k,i}$ Eigengewicht der Konstruktion

$\sum_j \psi_{2,j} \cdot Q_{k,j}$ quasi-ständiger Anteil der veränderlichen Einwirkung

P_k Vorspannung

Q_{fat} wiederholte, zyklische Einwirkung

\oplus ... in Kombination mit ...

Mit dieser Lastkombination sollen die für den Schwingungsnachweis relevanten häufig auftretenden, wirklichen maximalen und minimalen Spannungen (d.h. die $\gamma = 1$ -fachen charakteristischen Spannungen) ermittelt werden.

Die Berücksichtigung der ständigen Belastungen z.B. des Eigengewichts unterscheidet sich vom Vorgehen im Stahlbau. Dort wird i.d.R. bei der Belastung nur der Anteil der Spannung berücksichtigt, der durch die wechselnden Belastungen hervorgerufen wird. Grund hierfür ist, dass im Stahlbau nur die Schwingbreite $\Delta\sigma_{fat}$ in den Ermüdungsnachweis eingeht. Damit ergibt sich für den Stahlbau bei linear-elastischen Systemen z.B. bei Berechnungen nach Theorie I. Ordnung:

$$\Delta\sigma_{fat} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2)$$

$$= \sigma \left(\sum_i G_{k,i} + \sum_j \psi_{2,j} Q_{k,j} + P_k \right) + \sigma_{max}(Q_{fat}) - \left(\sigma \left(\sum_i G_{k,i} + \sum_j \psi_{2,j} Q_{k,j} + P_k \right) + \sigma_{min}(Q_{fat}) \right) \quad (3)$$

$$= \sigma_{max}(Q_{fat,max}) - \sigma_{min}(Q_{fat,min}) \quad (4)$$

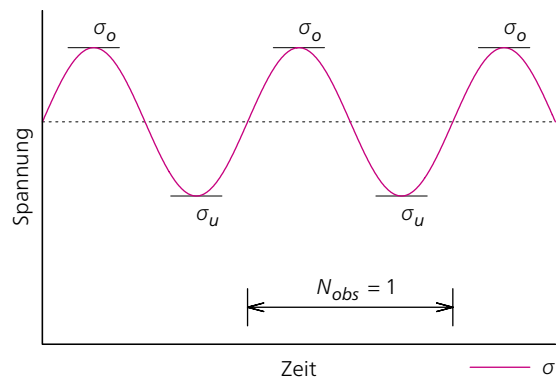
mit	$\Delta\sigma_{fat}$	Schwingbreite, hier für den Nachweis im Stahlbau
	σ_{max}	maximale Spannung
	σ_{min}	minimale Spannung
	$\sigma \left(\sum_i G_{k,i} + \sum_j \psi_{2,j} Q_{k,j} + P_k \right)$	quasi-ständig wirkende Spannung z.B. infolge Eigengewicht
	$\sigma_{max}(Q_{fat,max})$	maximale Spannung infolge der veränderlichen, ermüdungsrelevanten Einwirkung z.B. infolge Kranüberfahrt
	$\sigma_{min}(Q_{fat,min})$	minimale Spannung infolge der veränderlichen, ermüdungsrelevanten Einwirkung z.B. infolge Kranüberfahrt

Wie aus dieser Herleitung ersichtlich wird, kürzt sich beim Ermüdungsnachweis im Stahlbau der ständige Anteil der Spannung bei linear elastischen Systemen und einer Berechnung nach Theorie I. Ordnung heraus, so dass nur die Schwingbreite und damit nur der veränderliche Anteil der ermüdungsrelevanten Einwirkung zu berücksichtigen ist. Bei einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung dagegen ist das Eigengewicht strenggenommen auch beim Stahlbau mit zu berücksichtigen, da durch den nichtlinearen Zuwachs der Spannung mit zunehmender Belastung das Eigengewicht auch einen Anteil an der Schwingbreite erzeugen kann.

Im Holzbau dagegen ist die Ermüdungsfestigkeit u. a. abhängig vom Spannungsniveau, ausgedrückt durch das Spannungsverhältnis R. Damit hat nicht nur die Schwingbreite $\Delta\sigma_{fat}$ einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit, sondern auch das Spannungsniveau dieser Schwingbreite. Daraus folgt, dass immer auch die ständigen Belastungen im Ermüdungsnachweis zu berücksichtigen sind.

Die Bemessungsregeln nach DIN EN 1995-2:2010 [1] gehen von einem Lastzyklus mit konstanter Amplitude aus. Dies bedeutet, dass bei jeder zyklischen Belastung die gleiche Oberspannung σ_o und Unterspannung σ_u auftreten, siehe Abbildung 2. Als Lastzyklus wird die Zeitspanne angenommen, bei der die Ausgangsspannung wieder erreicht wird.

Abb. 2:
Lastzyklus mit
konstanter Amplitude
für eine Bemessung nach
FprEN 1995-1-1:2025 [3] und
DIN EN 1995-2:2010 [1]



Bei dieser Belastung wird davon ausgegangen, dass sich diese ausreichend genau durch einen Zyklus beschreiben lässt, wie dies in den meisten Fällen möglich ist. Typische Vertreter dieser nur durch einen Zyklus beschriebenen Belastung sind diejenigen Belastungen, deren resultierende Spannungen durch einen sin-Verlauf approximiert werden können. Aus dieser Belastungsgeschichte lassen sich die minimale bzw. die maximale Spannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen direkt bestimmen.

3.1.3 _ Schnittgrößen- und Spannungsermittlung

Mit Hilfe der Belastung sind die Schnittgrößen unter allen möglichen Kombinationen und Laststellungen zu ermitteln. Daraus ergeben sich dann die minimalen und maximalen Spannungen an den jeweiligen Stellen.

Bei einer Berechnung von Stützen nach dem Ersatzstabverfahren ist der Einfluss der Theorie II. Ordnung auf die Stützen im Nachweis „versteckt“. Um diese Verfahren auch bei der Ermüdung anwenden zu können, wird empfohlen, entsprechend DIN EN 1995-1-1/NA:2013 [4] aus der Berechnung des Ersatzstabverfahren die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung durch folgende Beziehung zu bestimmen

$$\Delta M = N \cdot \frac{W}{A} \cdot \left(\frac{1}{k_c} - 1 \right) \quad (5)$$

mit ΔM Zuwachs des Moments infolge Theorie II. Ordnung

N Normalkraft in der Stütze

W Widerstandsmoment des Querschnitts

A Querschnittsfläche

k_c Knickbeiwert der Stütze

Weiterhin wird beim (Ermüdungs-)Nachweis für Kragstützen empfohlen, bei der Ermittlung des k_c -Werts anstatt dem Imperfektionsbeiwert $\beta_c = 0,1$ für Brettschichtholz bzw. $\beta_c = 0,2$ für Vollholz materialunabhängig einen Imperfektionsbeiwert $\beta_c = 0,25$ zu verwenden (siehe Schänzlin, 2022 [5]), um die Schiefstellung der Kragstützen mit $\varphi_{Krag} = 1/200$ im Imperfektionsansatz berücksichtigen zu können.

Mit diesem zusätzlichen Moment können dann die resultierenden Spannungen an der Stütze unter Berücksichtigung des Netto-Querschnitts bestimmt werden.

3.1.4 _ Bisheriges, nicht in FprEN 1995-1-1:2025 aufgenommenes, vereinfachtes Nachweisformat

In DIN EN 1995-2:2010, A.2 [6] kann abgeschätzt werden, ob ein Ermüdungsnachweis notwendig wird. Dazu ist folgendes Verhältnis zu bilden:

$$K = \frac{|\sigma_{fat,max} - \sigma_{fat,min}|}{\frac{f_k}{Y_{M,fat}}} \leq K_{max} \quad (6)$$

mit K Ausnutzung der Schwingbreite

$\sigma_{fat,max,d}$ maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkung

$\sigma_{fat,min,d}$ minimale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkung

f_k charakteristische Festigkeit

$Y_{M,fat}$ Teilsicherheitsbeiwert von Baustoffen für den Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1995-2:2010 [1] bzw. DIN EN 1995-2/NA:2011 [2] i.d.R. $Y_{M,fat} = 1$

K_{max} Grenzwert der Schwingbreite

Der Ermüdungsnachweis muss entsprechend DIN EN 1995-2:2010 [1] nicht geführt werden, wenn der κ -Wert nach Gleichung (6) kleiner als die in Tabelle 1 gegebenen Werte κ_{max} für die jeweilige Beanspruchungsart sind.

Tab. 1:

Grenzwerte der Schwingbreite κ_{max} aus DIN EN 1995-2:2010, A.1 [1]

Belastung	κ_{max}
Holzbauteile mit Druck parallel und senkrecht zur Faser	0,6
Holzbauteile beansprucht auf Biegung und Zug	0,2
Holzbauteile beansprucht auf Schub	0,15
Stabdübelverbindungen	0,4
Nagelverbindungen	0,1
andere Verbindungen	0,15

Diese Grenzen der Schwingbreite κ_{max} stellen keine Dauerfestigkeit dar, sondern wurden aus dem eigentlichen Nachweis für bestimmte Randbedingungen abgeleitet. Die genaue Herleitung liegt der Arbeitsgruppe CEN TC250/SC5/WG3/SG Fatigue leider nicht vor. Allerdings ergibt eine Rückrechnung folgende Eingangswerte, damit der Ermüdungsnachweis bei Einhaltung der in Gleichung (6) definierten Grenzen nicht maßgebend wird:

- Nutzungsklasse 3, wie dies z.B. bei QS-Brücken ohne Fahrbahnbelag vorzufinden ist, sodass sich für die kurzzeitig wirkende Verkehrslast bei Vollholz und Brettschichtholz ein Modifikationsbeiwert $k_{mod} = 0,7$ ergibt.
- mittlerer Teilsicherheitsbeiwert für alle Lasten $\gamma_F = 1,45$
- Teilsicherheitsbeiwert des Materials für statische Nachweise $\gamma_{M,stat} = 1,3$
- Teilsicherheitsbeiwert des Materials für den Ermüdungsnachweise $\gamma_{M,fat} = 1,0$
- Lastwechsel während der gesamten Nutzungsdauer $N_{obs} \cdot t_{life} = 10^7$
- Bedeutungsbeiwert $\beta = 1$ für geringe Konsequenzen des Versagens
- Spannungsverhältnis R
 - für Druck $R = -0,79$
 - für Biegung und Zug $R = 0,48$
 - für Schub $R = 0,52$
 - für Dübel $R = -0,22$
 - für Nägel $R = 0,66$

Wird der Ermüdungsnachweis nach Abschnitt 3.1.5 dieser Schrift mit diesen Grenzen geführt, wird der statische Nachweis maßgebend, sodass der Ermüdungsnachweis vernachlässigt werden kann.

In der zukünftigen Fassung von FprEN 1995-1-1:2025 [3] wird dieses Nachweisverfahren nicht mehr enthalten sein. Die Gründe hierfür sind, dass die Ergebnisse bei einer Überschreitung der oben genannten Randbedingungen auf der unsicheren Seite liegen können. Hinzu kommt, dass in der Herleitung des Grenzwerts der Schwingbreite κ_{max} die Teilsicherheitsbeiwerte im statischen Fall und unter Ermüdung Eingang finden. Diese Werte betreffen das Sicherheitsniveau, sind damit national festzulegen und können sich in den europäischen Mitgliedsstaaten unterscheiden. Somit lassen sich keine europaweit einheitlichen κ_{max} -Werte festlegen.

Darüber hinaus müssen für den Nachweis nach Gleichung (6) ohnehin die maximalen und minimalen Spannungen ermittelt werden. Der Aufwand für den Nachweis mit Gleichung (6) und dem eigentlichen Ermüdungsnachweis nach Abschnitt 3.1.5 ist vergleichbar.

3.1.5 _ Ermüdungsnachweis

Um die Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen, wird in DIN EN 1995-2:2010 [1] der Beiwert k_{fat} eingeführt, mit dem die Festigkeit ähnlich dem Modifikationsfaktor k_{mod} angepasst wird.

$$k_{fat} = 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \log \left(\beta \cdot \underbrace{N_{obs} \cdot t_{life}}_{\text{Anzahl Lastspiele während der gesamten Nutzungsdauer}} \right) \quad (7)$$

mit	k_{fat}	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdung auf die Festigkeit
	R	Spannungsverhältnis, siehe Gleichung (8)
	a_{fat}	Beiwert, siehe Tabelle 2
	b_{fat}	Beiwert, siehe Tabelle 2
	β	Beiwert zur Berücksichtigung der Konsequenzen bei Ermüdungsversagen, siehe Gleichung (10)
	N_{obs}	Anzahl der jährlichen Lastwechsel
	t_{life}	geplante Nutzungsdauer in Jahre

Das Spannungsverhältnis R ist wie folgt definiert:

$$R = \frac{\sigma_{fat,min,d}}{\sigma_{fat,max,d}} \quad -1 \leq R \leq 1 \quad |\sigma_{fat,min,d}| \leq |\sigma_{fat,max,d}| \quad (8)$$

mit	R	Spannungsverhältnis der ermüdungsrelevanten Einwirkung
	$\sigma_{fat,min,d}$	vorzeichenbehaftete Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkung, wobei diese Spannung absolut kleiner ist als die absolute maximale Spannung $\sigma_{fat,max,d}$.
	$\sigma_{fat,max,d}$	vorzeichenbehaftete Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkung, wobei diese Spannung absolut größer ist als die absolute minimale Spannung $\sigma_{fat,min,d}$.

Um dieses Spannungsverhältnis zu bestimmen, werden aus den Schnittgrößen der einzelnen Lastfälle die einzelnen kombinierten Spannungen bestimmt. Die absolut betrachtete größte Bemessungsspannung wird vorzeichenbehaftet als $\sigma_{fat,max,d}$ verwendet, während die absolut betrachtete kleinste Bemessungsspannung vorzeichenbehaftet der Variablen $\sigma_{fat,min,d}$ zugewiesen wird. Ebenso kann der Fall auftreten, dass negative Spannungen als $\sigma_{fat,max,d}$ auftreten. Das Spannungsverhältnis R kann damit Werte zwischen -1 und 1 annehmen.

Bei der Ermittlung dieser Spannungen sind die Spannungen entsprechend der technischen Mechanik zu überlagern. Dies bedeutet, dass bei einer Kombination aus Normalkraft und Biegebeanspruchung die Spannungen zur Ermittlung von R sich wie folgt ermitteln:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{J} \cdot z = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (9)$$

mit	σ	Spannung zur Ermittlung des Spannungsverhältnisses R
	N	Normalkraft im Querschnitt
	A	Fläche des Querschnitts
	M	Moment im Querschnitt
	J	Flächenträgheitsmoment
	z	Abstand vom Schwerpunkt
	W	Widerstandsmoment

Tab. 2:

Beiwerte a_{fat} und b_{fat}

Bezeichnung in DIN EN 1995-2:2010 [1]	Bezeichnung in FprEN 1995-1-1:2025 [3]	a_{fat}	b_{fat}
Holzbauteile			
beansprucht auf Druck, oder \perp zur Faser	$\sigma_{fat,max,d}$ = Bemessungswert der Druckspannung oder \perp zur Faser	2,0	9,0
beansprucht auf Biegung und Zug	$\sigma_{fat,max,d}$ = Bemessungswert der Zugspannung	9,5	1,1
beansprucht auf Schub	Schubspannung	6,7	1,3
— (keine Angaben)	Zugspannungen \perp zur Faser	4,7	2,1
Verbindungsmittel			
Dübel und Passbolzen mit $d \leq 12 \text{ mm}^a$	Dübel und Passbolzen mit $d \leq 12 \text{ mm}^a$	6,0	2,0
Nägeln	Nägeln	6,9	1,2
— (keine Angaben)	eingeklebte Gewindestange unter Zugbeanspruchung ^b	6,7	1,3

a Die Werte für Dübel und Passbolzen basieren größtenteils auf Tests an 12 mm dicken Passbolzen.

Dübel und Passbolzen mit deutlich größeren Durchmessern sowie Bolzen können weniger günstige Ermüdungseigenschaften haben.

b Die Ermüdungsfestigkeit der Gewindestange muss gesondert nachgewiesen werden.

Bei der Interaktion zwischen Normalkraft und Biegemoment ist die maßgebende Spannung zu verwenden. Wie Schänzlin, 2019 [7] zeigt, ist der Nachweis mit der maximalen Spannung maßgebend, auch wenn z.B. bei einem unter Druck stehenden Bauteil infolge Biegung auch Zugspannungen auftreten können.

Der Bedeutungsbeiwert β berücksichtigt die Auswirkungen bei einem Versagen infolge Ermüdung

$$\beta = \begin{cases} 1,0 & \text{ohne beträchtliche Konsequenzen} \\ 3,0 & \text{beträchtliche Konsequenzen} \end{cases} \quad (10)$$

Die Einteilung in Bauteile mit bzw. ohne beträchtliche Konsequenzen unterliegt der Entscheidung der Planenden. Generell ist das Versagen eines Bauteils in ein Versagen mit beträchtlicher Konsequenz einzustufen, wenn die Folgen eines Versagens Gefahr für Leib und Leben darstellen und/oder wenn die Bauteile nicht einfach ausgetauscht werden können.

Die Anzahl der betrachteten Belastungswechsel ist entweder den Herstellerangaben (bei Maschinen), aus den Hubklassen und Beanspruchungsklassen bei Kränen nach DIN EN 1991-3:2006 [8] oder aus DIN EN 1991-2:2010 [9] bei Brückenbauwerken zu entnehmen. Die Nutzungsdauer ist ebenfalls auch auf das Bauwerk abzustimmen (Hochbauten i.d.R. 50 Jahre, Brückenbauwerke i.d.R. 100 Jahre, siehe DIN EN 1990:2010 [10]).

Mit dem k_{fat} -Wert nach Gleichung (7) sind die Festigkeiten analog zur Verwendung des k_{mod} -Werts zu modifizieren.

$$X_{fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{X_k}{Y_{M,fat}} \quad (11)$$

mit $X_{fat,d}$ Bemessungswert der Festigkeit bzw. Tragfähigkeit mit Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdung

k_{fat} Beiwert für die Festigkeitsminderung infolge der Anzahl der Belastungswechsel, siehe Gleichung (7)

X_k charakteristische Festigkeit bzw. Tragfähigkeit

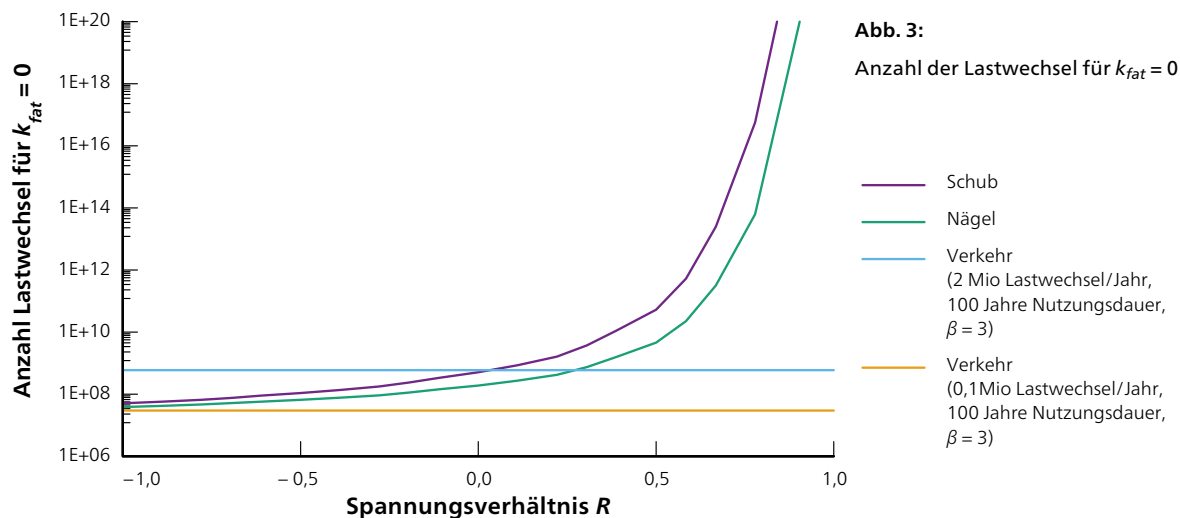
$Y_{M,fat}$ Teilsicherheitsbeiwert Materialseite für Ermüdungsnachweise, siehe Absatz 3.1.6

Bei einer Anwendung in Nutzungsklasse 3 ist nach FprEN 1995-1-1:2025, 10.2(4) [3] die Festigkeit mit dem Faktor 2/3 zu multiplizieren, während DIN EN 1995-2:2010 [1] hierzu keine Angaben gibt.

Bei kombinierten Belastungen (z.B. Normalkraft und Moment) wird derselbe k_{fat} -Wert sowohl für die Spannung infolge Normalkraft als auch für die Biegespannung verwendet. Der Nachweis ist entsprechend den üblichen Nachweisregeln im statischen Lastfall mit den maßgebenden Lastfallkombinationen (= i.d.R. derjenige Lastfall, der zu $\sigma_{fat,max,d}$ führt) zu führen.

3.1.6 _ Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite $\gamma_{M,fat}$

Um die Bemessungsfestigkeit im Ermüdungslastfall zu bestimmen, ist die charakteristische Eigenschaft u.a. durch den Teilsicherheitsbeiwert bei Ermüdung $\gamma_{M,fat}$ zu teilen. Nach DIN EN 1995-2:2010 [1] bestimmt sich dieser Wert zu 1,0, nach FprEN 1995-1-1:2025 [3] zu $\gamma_{M,fat} = 1,3$ (dem üblichen Teilsicherheitsbeiwert für Holz). Dies liegt daran, dass die Materialstreuung in der Bemessung berücksichtigt werden muss. Diese Änderung von $\gamma_{M,fat} = 1,0$ nach DIN EN 1995-2:2010 [1] zu $\gamma_{M,fat} = 1,3$ nach FprEN 1995-1-1:2025 [3] ist dadurch bedingt, dass im Rahmen der Überarbeitung der Ermüdungsnachweise für die Werkstoffe Stahl, Beton und Holz eine vergleichbare Herangehensweise gewünscht war, auch wenn die einzelnen Nachweiskonzepte der Materialien unterschiedlich sind. Eine wesentliche Vorgabe war dabei der Vorschlag der Verwendung der gleichen Teilsicherheitsbeiwerte im statischen Fall und bei der Ermüdung. Diese Vorgabe wurde in FprEN 1995-1-1:2025 [3] übernommen, wohl wissend dass Teilsicherheitsbeiwerte über den Nationalen Anhang zu regeln sind. Allerdings ist – im Gegensatz zu anderen Werkstoffen – beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von Holztragwerken durch den Bedeutungsfaktor β ist eine Sicherheit vorhanden. Bei Bauteilen mit großer Konsequenz eines Versagens ist die ertragbare Anzahl an Lastwechsel dreimal so groß wie die rechnerisch erwartete Lastwechselanzahl. Wie weitere Untersuchungen zeigen, wird durch den Bedeutungsbeiwert $\beta = 3$ eine ausreichende Sicherheit erzielt, sodass für den Nationalen Anhang abweichend von FprEN 1995-1-1:2025 [3] ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M,fat} = 1,0$ vorgeschlagen wird. Dieser Teilsicherheitsbeiwert wird in den folgenden Berechnungen angewandt.



3.1.7 _ Bekannte Schwächen des Nachweises

Durch den k_{fat} -Wert wird die statische Festigkeit so angepasst, dass sie die Einflüsse der wechselnden Belastung berücksichtigt. Dieser k_{fat} -Wert ist dabei u.a. abhängig vom Spannungsverhältnis R siehe Gleichung (8). Insbesondere beim Schubnachweis kann der Fall auftreten, dass die Ermüdungsfestigkeit der Schubspannung bei einer wechselnden Beanspruchung ($-1 \leq R \leq 0$) deutlich geringer ist als bei einer Schwellbeanspruchung ($0 \leq R \leq 1$, siehe Abbildung 3). Dies hat zur Folge, dass bei einem Einfeldträger die Ermüdungsfestigkeit für eine Schubbeanspruchung vom Auflagerbereich zur Mitte hin abnimmt, da im Auflagerbereich i.d.R. nur eine schwellende Belastung ($0 < R < 1$) auftritt, während in Feldmitte eine wechselnde Belastung ($-1 < R < 0$) auftritt. Dies kann dazu führen, dass der wechselnd beanspruchte Bereich in Feldmitte trotz deutlich geringerer Querkraft im Vergleich zum Schwellbereich im Auflagerbereich rechnerisch maßgebend wird.

Aus ingenieurmäßiger Sicht kann ein Versagen ohne Belastung aber nicht auftreten, so dass der Ermüdungsnachweis infolge einer Querkraft an der Stelle der maximalen Querkraft geführt werden muss.

3.1.8 _ Anwendungsgrenzen

Der Nachweis der Ermüdung ist in DIN EN 1995-2:2010 [1] und FprEN 1995-1-1:2025 [3] geregelt. Allerdings ist die Bedeutung dieses Nachweises im Vergleich zu einer Bemessung unter quasi-statischer Belastung deutlich geringer, da Ermüdung bisher im Wesentlichen „nur“ beim Anwendungsfall „Straßenbrücken aus Holz“ und „Glockenstuhl aus Holz“ zur Anwendung kommt. Damit ist der Umfang der wissenschaftlichen Untersuchungen im Bereich der Ermüdung deutlich geringer als bei den quasi-statischen Nachweisen, sodass nicht per se alle Nachweise unter quasi-statischer Belastung in einen Ermüdungsnachweis überführt werden können. Es ist z.B. unklar, inwieweit dieses Verfahren bei Spannungsspitzen wie z.B. bei Durchbrüchen, Ausklinkungen und zimmermannsmäßigen Verbindungen angewandt werden kann.

Im Hinblick auf die Anwendung von Kernen als Verbindungsmittel bei Holz-Beton-Verbundbrücken zeigen allerdings z.B. Kuhlmann, Schänzlin und Aldi, 2008 [11], Kudla, 2017 [12] und Mönch, 2026 [13], dass das Nachweisformat prinzipiell auch für Kernenverbindungen angewandt werden kann.

3.2 _ Wann ist Ermüdung im Vergleich zur statischen Bemessung relevant?

Bei dem in DIN EN 1995-2:2010 [1] bzw. FprEN 1995-1-1:2025 [3] vorgestellten Verfahren zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdung auf die Tragfähigkeit des Bauteils wird die Festigkeit mit Hilfe des Beiwerts k_{fat} angepasst. Dieser Bemessungswert der Festigkeit wird mit der Spannung aus der Einwirkung verglichen, so dass sich ergibt:

$$f_{fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_k}{\gamma_{M,fat}} \geq \sigma(G_{k_i}, P_{k_i}, \gamma_F = 1, 0) \quad \underbrace{\equiv}_{\text{linear elastische Systeme}} \quad \sigma_G + \sigma_P + \dots \quad (12)$$

mit $f_{fat,d}$	Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit
k_{fat}	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdung auf die Festigkeit
$\gamma_{M,fat}$	Teilsicherheitsbeiwert Materialseite für Ermüdungsnachweise
$\sigma(G_{k_i}, P_{k_i}, \gamma_F = 1, 0)$	Spannung infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkung
σ_G	Spannung infolge Eigengewicht
σ_P	Spannung infolge Verkehrsbelastung

Bei der Bemessung der Bauteile ist allerdings nicht nur der Ermüdungslastfall nachzuweisen, sondern auch die quasi-statische Belastung. Dies lässt sich durch folgende Beziehung beschreiben

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_{M,stat}} \geq \sigma(G_{k_i}, P_{k_i}, \gamma_F) \quad \underbrace{\equiv}_{\text{linear elastische Systeme}} \quad \gamma_{F,G} \cdot \sigma_G + \gamma_{F,P} \cdot \sigma_P + \dots = \gamma_{F,eff} \cdot (\sigma_G + \sigma_P \dots) \quad (13)$$

mit f_d	Bemessungswert der Festigkeit
k_{mod}	Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Zeit und der Feuchte auf die Festigkeit
$\gamma_{M,stat}$	Teilsicherheitsbeiwert Materialseite für statische Nachweise
$\sigma(G_{k_i}, P_{k_i}, \gamma_F)$	Bemessungswert der Spannung infolge der statischen Einwirkung
$\gamma_{F,G}$	Teilsicherheitsbeiwert der Spannung infolge Eigengewichts, i.d.R. $\gamma_{F,G} = 1,35$
σ_G	Spannung infolge Eigengewicht
$\gamma_{F,P}$	Teilsicherheitsbeiwert der Spannung infolge veränderlicher Einwirkung, i.d.R. $\gamma_{F,G} = 1,50$
σ_P	Spannung infolge Verkehrsbelastung
$\gamma_{F,eff}$	effektiver Teilsicherheitsbeiwert der gesamten Spannung, $1,35 \leq \gamma_{F,eff} \leq 1,50$

Diese Gleichung nach der Spannung umgeformt, ergibt

$$k_{mod} \cdot \frac{f_k}{Y_{M,stat} \cdot Y_{F,eff}} \geq \sigma_G + \sigma_P \dots \quad (14)$$

so dass sich Gleichung (12) zu folgender Beziehung umformen lässt

$$k_{fat} \cdot \frac{f_k}{Y_{M,fat}} = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{Y_{M,stat} \cdot Y_{F,eff}} \quad (15)$$

bzw.

$$k_{fat} = k_{mod} \cdot \frac{Y_{M,fat}}{Y_{M,stat} \cdot Y_{F,eff}} \quad (16)$$

Da der Beiwert k_{fat} durch Gleichung (7) gegeben ist, kann die effektive Anzahl der Lastwechsel $N_{obs,eff} = \beta \cdot N_{obs} \cdot t_{life}$ bestimmt werden, ab der ein Ermüdungsnachweis bemessungsrelevant werden kann

$$N_{obs,eff} = \beta \cdot N_{obs} \cdot t_{life} = 10 \left(1 - \frac{k_{mod} \cdot Y_{M,fat}}{Y_{F,eff} \cdot Y_{M,stat}} \right) \cdot \frac{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)}{1 - R} \quad (17)$$

mit $N_{obs,eff}$ effektive Anzahl an Lastwechsel

β Bedeutungsfaktor nach Gleichung (10)

N_{obs} Anzahl der jährlichen Lastwechsel

t_{life} Nutzungsdauer in Jahren

k_{mod} Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Zeit und der Feuchte auf die Festigkeit

$Y_{M,fat}$ Teilsicherheitsbeiwert Materialseite für Ermüdungsnachweise

$Y_{F,eff}$ effektiver Teilsicherheitsbeiwert der gesamten Spannung, $1,35 \leq Y_{F,eff} \leq 1,50$

$Y_{M,stat}$ Teilsicherheitsbeiwert Materialseite für statische Nachweise

a_{fat} Beiwert in Abhängigkeit der Belastungsart nach Tabelle 2

b_{fat} Beiwert in Abhängigkeit der Belastungsart nach Tabelle 2

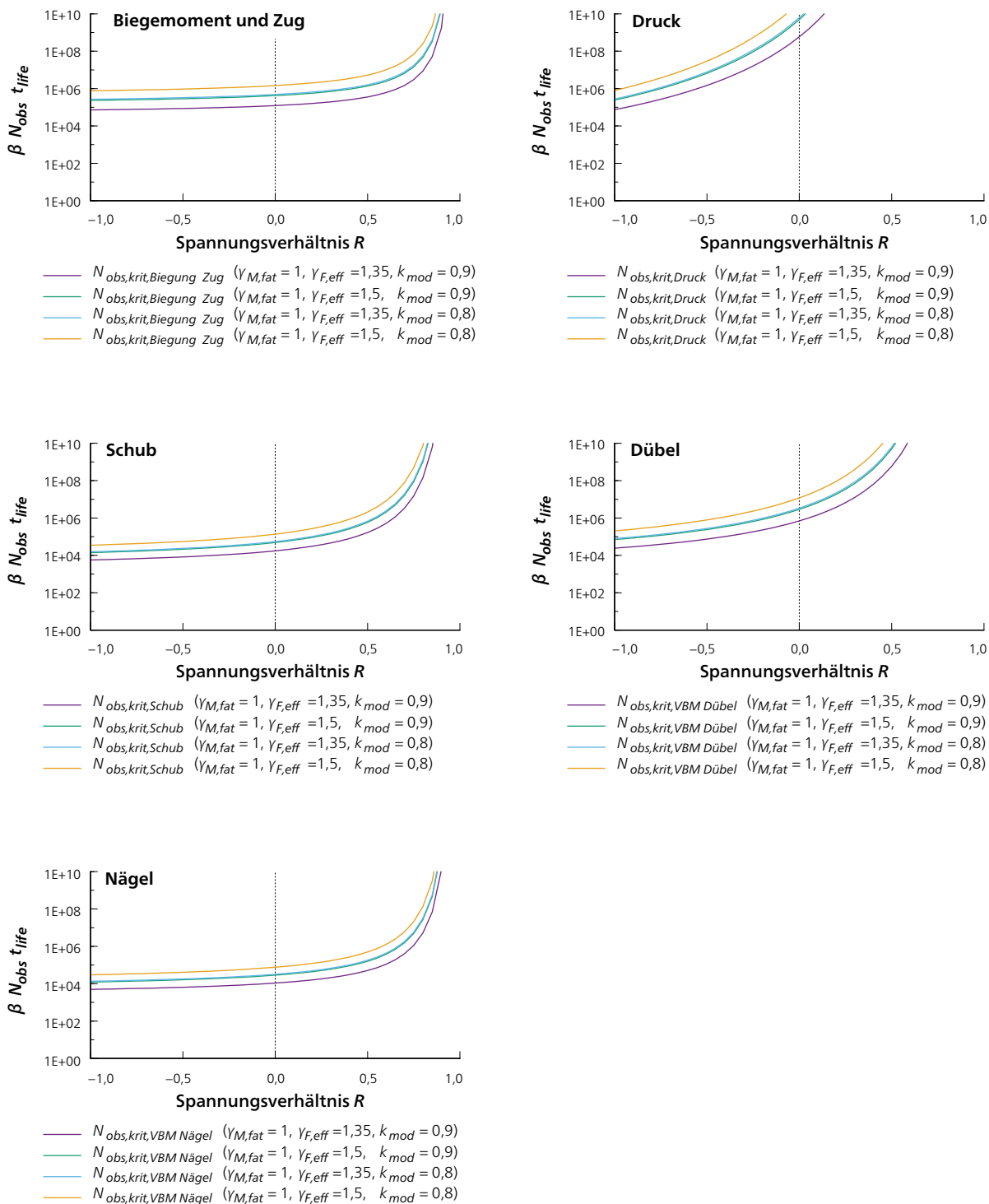
R Spannungsverhältnis nach Gleichung (8)

Ist die vorhandene Anzahl an Lastwechsel kleiner als die in Gleichung (17) ermittelte Anzahl, ist davon auszugehen, dass die Ermüdung keinen bemessungsrelevanten Einfluss auf die Bauteile hat.

Für verschiedene Randbedingungen ist die maximale Anzahl in Abbildung 4 zusammengestellt.

Abb. 4:

Kritische Anzahl an Lastwechsel, ab der die Ermüdung bemessungsrelevant sein kann



3.3 _ Berechnung eines Zweifeldträgers

3.3.1 _ Allgemeines

Im Folgenden soll das in Abbildung 5 dargestellte System nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich um einen Zweifeldträger, bei dem in Feldmitte des linken Felds (Feld 1) eine Maschine aufgestellt wird, die infolge einer planmäßigen Unwucht eine wechselnde, ermüdungsrelevante Belastung auf den Träger einleitet.

Eine Verkehrsbelastung auf der Decke wird nicht berücksichtigt.

3.3.2 _ Eingangswerte für die Berechnung

Die Maschine wird auf einem Zweifeldträger mit einer Spannweite von 5 m mittig im Feld 1 aufgelagert. Der Querschnitt des Bauteils ist ein Rechteckquerschnitt ($b/h=100\text{ mm}/300\text{ mm}$) der Festigkeitsklasse C24.

3.3.3 _ Belastung

3.3.3.1 _ Quasi-ständige Belastung

Die quasi-ständige Belastung auf den Zweifeldträger besteht aus dem Eigengewicht der Decke, dem quasi-ständigen Anteil der Verkehrslast und dem Eigengewicht der Maschine, wobei in diesem Berechnungsbeispiel davon ausgegangen wird, dass kein quasi-ständiger Anteil der Verkehrslast vorhanden ist.

Das Eigengewicht der Konstruktion beträgt $g_k = 3,5\text{ kN/m}$. Das Eigengewicht der Maschine wird zu $G_{M,k} = 5\text{ kN}$ angenommen.

Die Lasten sind in Abbildung 6 zusammengestellt.

Abb. 5:
System mit Maschine

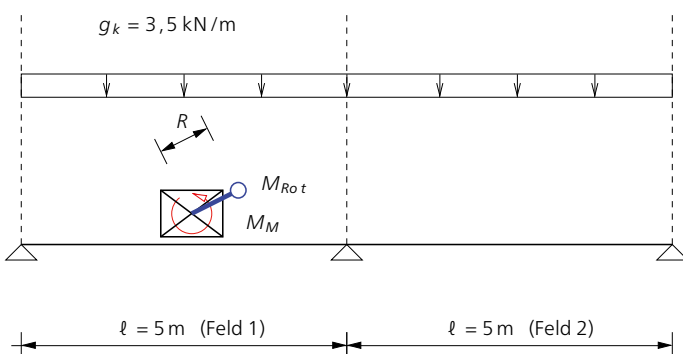
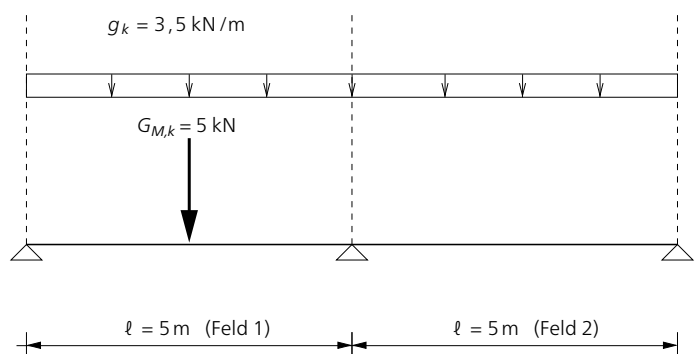


Abb. 6:
Quasi-ständige Belastung auf die Decke



3.3.3.2 _ Belastung infolge der Maschinenunwucht

Die Einwirkung, die eine wechselnde Beanspruchung erzeugt, entsteht infolge einer Unwucht in der Maschine. Die Kräfte infolge der Unwucht werden durch die Zentrifugalkraft der rotierenden Masse hervorgerufen, die sich wie folgt bestimmt:

$$F_Z = m_{UW} \cdot \frac{v_{UW}^2}{R} \quad (18)$$

mit F_Z Zentrifugalkraft in N
 m_{UW} Masse der Unwucht in kg
 v_{UW} Geschwindigkeit der Unwucht in m/s
 R Radius der Unwucht in m

Die Geschwindigkeit der Unwuchtmasse kann dabei aus der Umdrehungsgeschwindigkeit wie folgt bestimmt werden:

$$v_{UW} = R \cdot \omega = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot f \quad (19)$$

mit v_{UW} Geschwindigkeit der Unwucht in m/s
 R Radius der Unwucht in m
 ω Kreiseigenfrequenz in rad/s
 f Drehfrequenz in U/s

Die Zentrifugalkraft wirkt dabei immer radial zur Rotation. Für die Biegebeanspruchung des Bauteils ist „nur“ der vertikale Anteil zu berücksichtigen, so dass sich die einwirkende Belastung wie folgt ergibt:

$$F_{M,fat} = F_Z \cdot \sin(\omega) \quad (20)$$

mit $F_{M,fat}$ wechselnde Beanspruchung aus der Rotation der Unwucht
 F_Z Zentrifugalkraft nach Gleichung (18)
 ω Kreiseigenfrequenz in rad/s

Für das Berechnungsbeispiel werden folgende Eingangsgrößen angenommen, die üblicherweise vom Maschinenhersteller abzufragen sind:

- Rotierende Masse $M_{Rot} = 125 \text{ kg}$
- Radius der Kreisbahn der rotierenden Masse $R = 0,2 \text{ m}$
- Anzahl der Umdrehungen pro Minute $U = 60 \text{ U/min}$

Die Belastung infolge der bewegten Unwucht ergibt sich aus folgenden Beziehungen:

- Umfang der Bewegung

$$U_{Kreis} = \pi \cdot 2 \cdot R = \pi \cdot 2 \cdot 0,2 \text{ m} = 1,26 \text{ m/U} \quad (21)$$

- Kreisgeschwindigkeit

$$v_U = U \cdot U_{Kreis} = \frac{1 \text{ U}}{\text{s}} \cdot \frac{1,26 \text{ m}}{\text{U}} = 1,26 \text{ m/s} \quad (22)$$

- Zentrifugalkraft

$$F_{max} = M_{Rot} \cdot \frac{(v_U)^2}{R} = 125 \text{ kg} \cdot \frac{\left(\frac{1,26 \text{ m}}{\text{s}}\right)^2}{0,2 \text{ m}} = 987 \text{ N} \quad (23)$$

Der Verlauf der vertikalen Belastung infolge der Unwucht ist in Abbildung 7 dargestellt.

Der resultierende, rechtwinklig zum Bauteil wirkende Anteil der Belastung ist in Abbildung 8 dargestellt. Der in Bauteilachse wirkende Anteil der Belastung infolge der Maschinenunwucht wird im Folgenden vernachlässigt.

Abb. 7:

Vertikale Einwirkung auf die Decke
infolge der Unwucht der Maschine

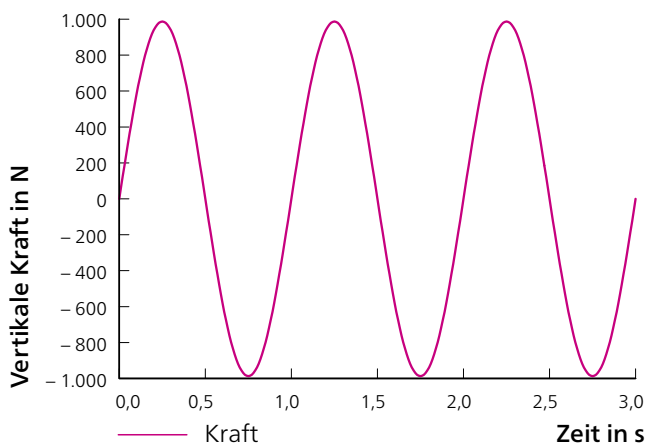
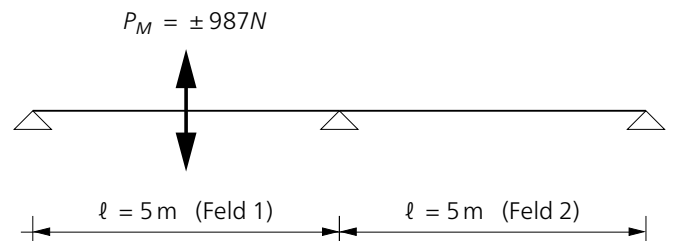


Abb. 8:

Belastung infolge der Unwucht der Maschine



3.3.4 _ Statischer Nachweis

Aus der statischen Berechnung ergeben sich folgende Ausnutzungen des Bauteils:

- infolge Biegung $\eta_m = 0,75$ [–]
- infolge Schub $\eta_v = 0,57$ [–]
- infolge Auflagerpressung $\eta_A = 0,71$ [–]

3.3.5 _ Ermüdungsnachweis

3.3.5.1 _ Anzahl der Lastwechsel

Um die Auswirkungen der wechselnden Beanspruchung erfassen zu können, ist die Anzahl der einwirkenden Lastspiele von Bedeutung. Diese Anzahl hängt vom jeweiligen Fall ab.

Bei der hier angenommenen Maschine sind die Angaben vom Hersteller zu beziehen.

- Nutzungsdauer $t_{life} = 50$ Jahre
- Betriebszeit $t_{Tage} = 200$ Tage / Jahr
- Einsatzzeit pro Tag $t_{Betrieb} = 360$ min / Tag

Die Anzahl der Lastwechsel N_{obs} innerhalb eines Jahres ergibt sich zu:

$$N_{obs} = t_{Tage} \cdot t_{Betrieb} \cdot U = \frac{200 \text{ Tage}}{\text{Jahr}} \cdot \frac{360 \text{ min}}{\text{Tag}} \cdot \frac{60}{\text{min}} = 4.320.000 \text{ [–]} \quad (24)$$

Für den Ermüdungsnachweis wird von einer bedeutenden Konsequenz ausgegangen, da in diesem Fall durch ein Versagen des Bauteils ein Absturz der Maschine in die darunter liegenden Geschosse zu erwarten ist.

3.3.5.2 _ Ermüdung infolge Biegung

Ermittlung des Biegemoments

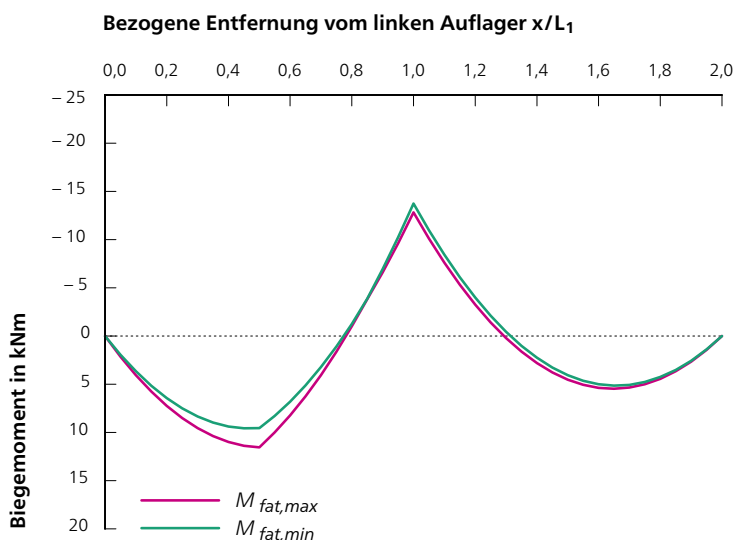
Es sind alle relevanten Stellen (= Stellen mit lokal maximalen Schnittgrößen) zu untersuchen. Die maximale Ausnutzung infolge Ermüdung tritt in Feldmitte des Felds 1 auf. Zwar entsteht das absolut betrachtet größte Moment am Mittelaufleger, aber die Spannungsänderung an dieser Stelle ist kleiner als in Feldmitte (siehe Abbildung 9), so dass die größte Ausnutzung im Hinblick auf die Ermüdung nicht am Mittelaufleger, sondern in Feldmitte vorhanden ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die maßgebende Beanspruchung nicht zwingend an der Stelle mit dem größten Moment auftritt. Die ermüdungsrelevanten Momente im Feld sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Das Moment $M_{p+,k}$ entsteht, wenn die Unwucht am unteren Umkehrpunkt ist, während das Moment $M_{p-,k}$ auftritt, wenn die Unwucht am oberen Umkehrpunkt ist. Damit können beide Momente nicht gleichzeitig einwirken. Sie stellen damit das maximale bzw. minimale Moment infolge der Maschinenunwucht dar.

Die ermüdungsrelevanten Einwirkungen ergeben sich aus den in Tabelle 3 zusammengestellten Schnittgrößen, indem die ständigen und quasi-ständigen Schnittgrößen mit den Schnittgrößen aus den wechselnden Beanspruchungen (ohne Teilsicherheitsbeiwert γ_F) überlagert werden, da die „wirklich“ wiederholt einwirkende Belastung im Ermüdungsnachweis berücksichtigt werden soll.

Abb. 9:

Verlauf des Biegemoments im Ermüdungslastfall



Tab. 3:

Charakteristisches Biegemoment in Feldmitte des Felds 1 des Zweifeldträgers

Moment infolge	M_k
Eigengewicht Bauteil $M_{g,k}$	5,47 kNm
Eigengewicht Maschine $M_{G,k}$	5,08 kNm
Betrieb (max.) $M_{p-,k}$	1 kNm
Betrieb (min.) $M_{p+,k}$	-1 kNm

Das maßgebende minimale bzw. maximale Moment für den Ermüdungsnachweis bestimmt sich wie folgt, siehe Abbildung 9:

- maximales resultierendes Moment in Feldmitte des Felds 1

$$\begin{aligned}M_{fat,max,d} &= M_{g,k} + M_{G,k} + M_{P-,k} \\ &= 5,47 \text{ kNm} + 5,08 \text{ kNm} + 1 \text{ kNm} \\ &= 11,6 \text{ kNm}\end{aligned}\tag{25}$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010 [1] A.2 (1)

- minimales resultierendes Moment in Feldmitte des Felds 1

$$\begin{aligned}M_{fat,min,d} &= M_{g,k} + M_{G,k} + M_{P+,k} \\ &= 5,47 \text{ kNm} + 5,08 \text{ kNm} + (-1 \text{ kNm}) \\ &= 9,54 \text{ kNm}\end{aligned}\tag{26}$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010 [1] A.2 (1)

Biegespannungen

Aus den maximalen und minimalen Schnittgrößen ergeben sich damit folgende maximalen bzw. minimalen Spannungen an der maßgebenden Stelle:

- maximale Spannung

$$\sigma_{fat,max,d} = \frac{M_{fat,max,d}}{W} = \frac{11.549.257 \text{ Nmm}}{1.500.000 \text{ mm}^3} = 7,70 \text{ N/mm}^2\tag{27}$$

- minimale Spannung

$$\sigma_{fat,min,d} = \frac{M_{fat,min,d}}{W} = \frac{9.544.493 \text{ Nmm}}{1.500.000 \text{ mm}^3} = 6,36 \text{ N/mm}^2\tag{28}$$

Ermittlung von k_{fat}

Als Eingangsgröße für die Ermittlung der Auswirkungen der wechselnden Beanspruchung ist das Spannungsverhältnis zwischen den minimalen und maximalen Spannungen an der jeweiligen Stelle zu bestimmen.

Dabei wird die absolut betrachtete minimale Spannung durch die absolut betrachtete maximale Spannung geteilt. Die Vorzeichen der jeweiligen Spannungen werden in der Berechnung berücksichtigt, so dass das Spannungsverhältnis R Werte zwischen -1 und $+1$ ergibt.

Für den hier untersuchten Fall ergibt sich somit ein Spannungsverhältnis R von:

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.6) [1]

$$R = \frac{\sigma_{fat,min,d}}{\sigma_{fat,max,d}} = \frac{6,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{7,70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,83 [-] \quad (29)$$

Bei einer Biegebeanspruchung sind folgende Beiwerte aus Tabelle 2 zu verwenden:

$$- a_{fat} = 9,5 [-]$$

$$- b_{fat} = 1,1 [-]$$

Mit dem Spannungsverhältnis R und den Beiwerten a_{fat} und b_{fat} ergibt sich dann folgender k_{fat} -Wert:

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.5) [1]

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(\beta \cdot N_{obs} \cdot t_{Jahre}) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,83[-]}{9,5[-] \cdot (1,1[-] - 0,83[-])} \cdot \text{LOG}(3[-] \cdot 4.320.000 [-] \cdot 50 \text{ Jahre}) \\ &= 0,41 [-] \end{aligned} \quad (30)$$

Nachweis

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.4) [1]

Die Ermüdungsfestigkeit bestimmt sich damit zu folgendem Wert:

$$f_{m,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{m,k}}{Y_{M,fat}} = 0,41[-] \cdot \frac{24 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 9,88 \text{ N/mm}^2 \quad (31)$$

Die Ausnutzung infolge Biegebeanspruchung bestimmt sich damit zu

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.3) [1]

$$\eta_{fat,Biegung} = \frac{\sigma_{fat,max,d}}{f_{m,fat,d}} = \frac{7,70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{9,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,78 [-] \quad (32)$$

3.3.5.3 _ Ermüdung infolge Schub

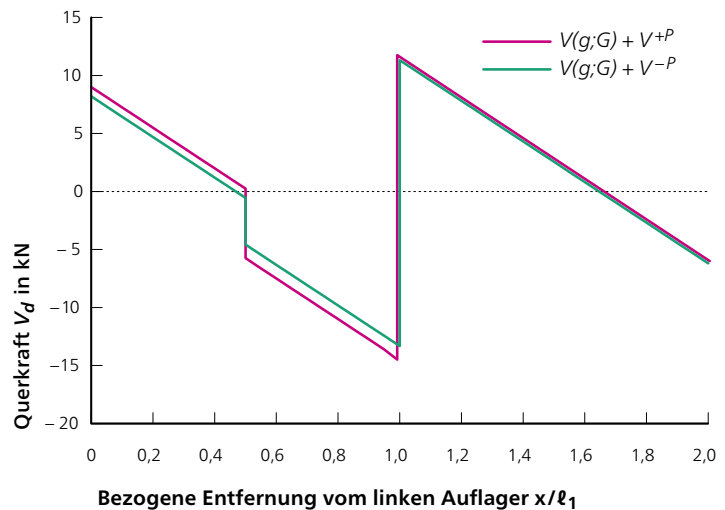
Ermittlung der Querkraft

Die maßgebenden charakteristischen Querkräfte ergeben sich am Mittelaufleger.
 Die Querkräfte der einzelnen Lastfälle sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tab. 4:
 Charakteristische Querkraft
 am Mittelaufleger des Zweifeldträgers

Querkraft infolge	V_k
Eigengewicht Bauteil $V_{g,k}$	-10,9 kN
Eigengewicht Maschine $V_{G,k}$	-2,97 kN
Betrieb (max.) $V_{P-,k}$	-0,59 kN
Betrieb (min.) $V_{P+,k}$	0,59 kN

Abb. 10:
 Verlauf der Querkraft im Ermüdungslastfall



Aus diesen Lastanteilen ergeben sich folgende überlagerte Querkräfte im Ermüdungslastfall (siehe Abbildung 10).

– maximale Querkraft

$$\begin{aligned}
 V_{fat,max,d} &= V_{g,k} + V_{G,k} + V_{P-,k} \\
 &= -10,9 \text{ kN} + (-2,97 \text{ kN}) + (-0,59 \text{ kN}) \\
 &= -14,5 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Quelle:
 DIN EN 1995-2:2010,
 (A.2) (1) [1]

– minimale Querkraft

$$\begin{aligned}
 V_{fat,min,d} &= V_{g,k} + V_{G,k} + V_{P+,k} \\
 &= -10,9 \text{ kN} + (-2,97 \text{ kN}) + 0,59 \text{ kN} \\
 &= -13,3 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

Quelle:
 DIN EN 1995-2:2010,
 (A.2) (1) [1]

Schubspannungen

Aus den maßgebenden Schnittgrößen ergeben sich folgende Schubspannungen unter Berücksichtigung des Crack-Faktors mit $2,0 \text{ N/mm}^2 / f_{vk} = 2,0 \text{ N/mm}^2 / 4,0 \text{ N/mm}^2 = 0,5$:

– maximale Schubspannung

$$\tau_{fat,max,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,max,d}}{k_{cr} \cdot A} = 1,5 \cdot \frac{-14.500 \text{ N}}{0,5 [-] \cdot 30.000 \text{ mm}^2} = -1,45 \text{ N/mm}^2 \quad (35)$$

– minimale Schubspannung

$$\tau_{fat,min,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,min,d}}{k_{cr} \cdot A} = 1,5 \cdot \frac{-13.300 \text{ N}}{0,5 [-] \cdot 30.000 \text{ mm}^2} = -1,33 \text{ N/mm}^2 \quad (36)$$

Ermittlung von k_{fat}

Das Spannungsverhältnis an der maßgebenden Stelle ergibt sich damit wie folgt:

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.6) [1]

$$R = \frac{\tau_{fat,min,d}}{\tau_{fat,max,d}} = \frac{-1,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{-1,45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,92 [-] \quad (37)$$

Bei der Schubbeanspruchung sind folgende Beiwerte a_{fat} und b_{fat} nach Tabelle 2 zu verwenden

– Vorwert $a_{fat} = 6,7 [-]$

– Vorwert $b_{fat} = 1,3 [-]$

Mit dem Spannungsverhältnis R und den Beiwerten a_{fat} und b_{fat} ergibt sich dann folgender k_{fat} -Wert

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.5) [1]

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(\beta \cdot N_{obs} \cdot t_{Jahre}) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,92 [-]}{6,7 [-] \cdot (1,3 [-] - 0,92 [-])} \cdot \text{LOG}(3 [-] \cdot 4.320.000 [-] \cdot 50 \text{ Jahre}) \\ &= 0,72 [-] \end{aligned} \quad (38)$$

Nachweis

Die Ermüdungsfestigkeit bestimmt sich damit zu folgendem Wert

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.4) [1]

$$f_{v,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{v,k}}{Y_{M,fat}} = 0,72 [-] \cdot \frac{4,0 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 2,88 \text{ N/mm}^2 \quad (39)$$

Die Ausnutzung infolge Schubbeanspruchung bestimmt sich damit zu:

Quelle:
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.3) [1]

$$\eta_{fat,Schub} = \frac{\tau_{fat,max,d}}{f_{v,fat,d}} = \frac{\left| -1,45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right|}{2,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,50 [-] \quad (40)$$

3.3.5.4 _ Ermüdung infolge Querdruck am Auflagerkraft B

Ermittlung der Auflagerkraft in Auflager B

Die maßgebenden charakteristischen Auflagerlasten ergeben sich am Mittelaufleger.

Die Auflagerlasten der einzelnen Lastfälle sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Aus diesen Lastanteilen ergeben sich folgende überlagerte Auflagerkräfte im Ermüdungslastfall (siehe Abbildung 10).

- minimale Auflagerkraft

$$B_{fat,min,d} = B_{g,k} + B_{G,k} + B_{p^-,k} = 21,9 \text{ kN} + 3,44 \text{ kN} + (-0,68 \text{ kN}) = 24,6 \text{ kN} \quad (41)$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
(A.2) (1) [1]

- maximale Auflagerkraft

$$B_{fat,max,d} = B_{g,k} + B_{G,k} + B_{p^+,k} = 21,9 \text{ kN} + 3,44 \text{ kN} + 0,68 \text{ kN} = 26,0 \text{ kN} \quad (42)$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
(A.2) (1) [1]

Querdruckspannung

Das Mittelaufleger hat eine Länge von 120 mm, sodass sich mit der Lastausbreitung von $\Delta l = 30 \text{ mm}$ zu jeder Seite eine effektive Auflagerlänge von $\ell_{eff} = 180 \text{ mm}$ ergibt. Bei einer Breite des Trägers von 100 mm, ergibt sich eine effektive Auflagerfläche A_{eff} von 18.000 mm².

Die Querdruckspannungen am Auflager ergeben sich damit zu:

- maximale Querdruckspannung

$$\sigma_{c,90,fat,min,d} = \frac{B_{fat,min,d}}{A_{eff}} = \frac{24.600 \text{ N}}{18.000 \text{ mm}^2} = 1,37 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
(A.2) (1) [1]

- minimale Querdruckspannung

$$\sigma_{c,90,fat,max,d} = \frac{B_{fat,max,d}}{A_{eff}} = \frac{26.000 \text{ N}}{18.000 \text{ mm}^2} = 1,44 \text{ N/mm}^2 \quad (44)$$

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
(A.2) (1) [1]

Tab. 5:

Charakteristische Auflagerlast am Mittelaufleger des Zweifeldträgers

Auflagerlast infolge	B_k
Eigengewicht Bauteil $B_{g,k}$	21,9 kN
Eigengewicht Maschine $B_{G,k}$	3,44 kN
Betrieb (max.) $B_{p^-,k}$	-0,68 kN
Betrieb (min.) $B_{p^+,k}$	0,68 kN

Ermittlung von k_{fat}

Das Spannungsverhältnis am Auflager *B* ergibt sich damit wie folgt:

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.6) [1]

$$R = \frac{\sigma_{c,90,fat,min,d}}{\sigma_{c,90,fat,max,d}} = \frac{1,37 \text{ N/mm}^2}{1,44 \text{ N/mm}^2} = 0,95 \text{ [-]} \quad (45)$$

Beim Nachweis des Querdrucks sind folgende Vorwerte a_{fat} und b_{fat} nach Tabelle 2 zu verwenden:

– Vorwert $a_{fat} = 2 \text{ [-]}$

– Vorwert $b_{fat} = 9 \text{ [-]}$

Mit dem Spannungsverhältnis R und den Beiwerten a_{fat} und b_{fat} ergibt sich dann folgender k_{fat} -Wert:

Quelle:

DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A.5) [1]

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG} \beta \cdot N_{obs} \cdot t_{life} \\ &= 1 - \frac{1 - 0,95 \text{ [-]}}{2 \text{ [-]} \cdot (9 \text{ [-]} - 0,95 \text{ [-]})} \cdot \text{LOG}(3 \text{ [-]} \cdot 4.320.000 \text{ [-]} \cdot 50 \text{ Jahre}) \\ &= 0,97 \text{ [-]} \end{aligned} \quad (46)$$

Nachweis

Die Ermüdungsfestigkeit ergibt sich damit zu

$$f_{c,90,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{Y_{M,fat}} = 0,97 \text{ [-]} \cdot \frac{2,5 \text{ N/mm}^2}{1 \text{ [-]}} = 2,43 \text{ N/mm}^2 \quad (47)$$

Die Ausnutzung bestimmt sich damit zu

$$\eta = \frac{\sigma_{c,90,fat,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,fat,d}} = \frac{1,44 \text{ N/mm}^2}{1,5 \text{ [-]} \cdot 2,43 \text{ N/mm}^2} = 0,40 \text{ [-]} \quad (48)$$

3.4 _ Berechnung einer Bahnsteg- überdachung unter Berücksichtigung der Druck-Sog-Einwirkung eines vorbeifahren- den Zuges

3.4.1 _ System

In Abbildung 11 ist eine Bahnstegüber-
 dachung dargestellt, an der einseitig Züge
 vorbeifahren.

Durch den vorbeifahrenden Zug wird die Luft
 am Kopf des Zugs verdrängt, was zu einer
 Druck- und anschließenden Sogbeanspru-
 chung auf das Bauwerk führt. Diese Druck- /
 Sogeinwirkung ist als ermüdungsrelevant
 einzustufen, so dass für diese Einwirkung der
 Ermüdungsnachweis zu führen ist.

Für den Abtrag der vertikalen und horizon-
 talen Lasten werden die Stützen aus GL24 h
 eingespannt (siehe Abbildung 11), wobei
 in der Berechnung die Nachgiebigkeit des
 Anschlusses erfasst wird.

Abb. 11:
 Bahnstegüberdachung

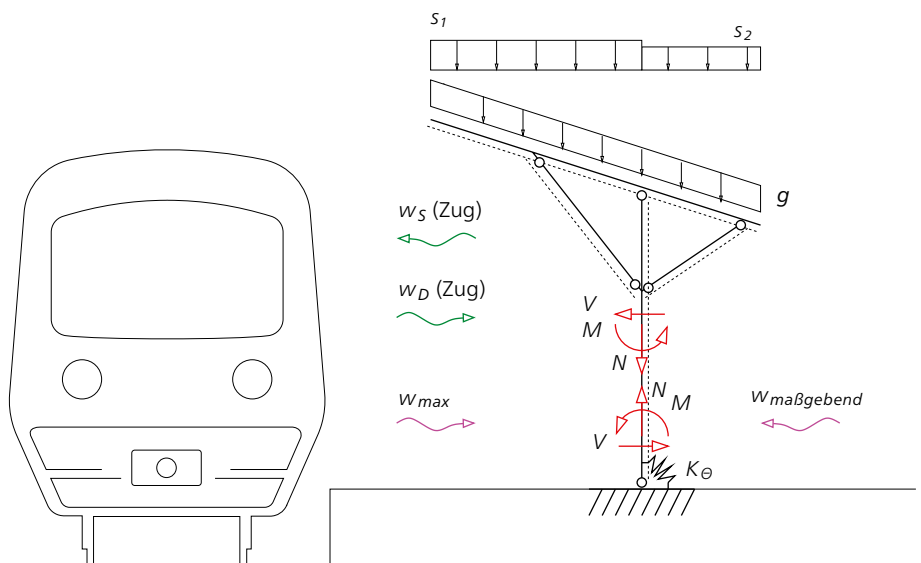
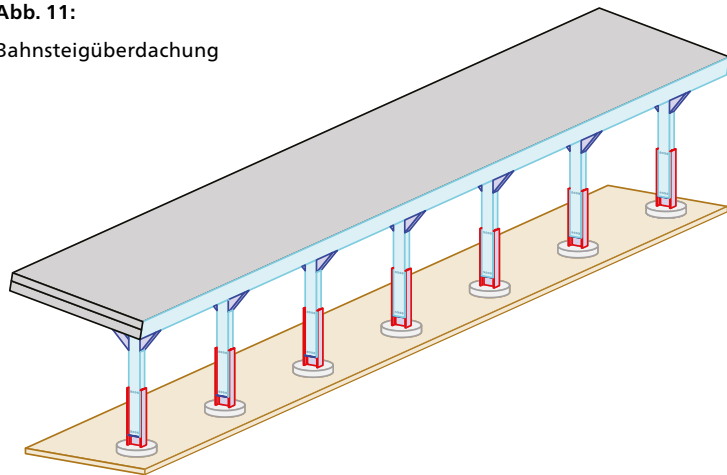


Abb. 12:
 Statisches System

3.4.2 _ Schnittgrößen am Stützenfuß

Aus der Schnittgrößenermittlung ergeben sich folgende Schnittgrößen am Stützenfuß nach Theorie I. Ordnung:

Tab. 6:
Schnittgrößen am Stützenfuß nach Theorie I. Ordnung

Lastfall	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
Eigengewicht g	-18,3	18,8	0
Schnee, voll: s_1 und s_2	-13,7	14,0	0
Schnee, einseitig: s_1 und $0,5 \cdot s_2$	-11,8	15,2	0
Wind von rechts = maßgebender Wind $w_{maßg.}$	-5,69	21,9	-2,59
Wind von links = maximaler Wind w_{max}	15,7	-44,6	4,37
Druck infolge Zug w_D (Zug)	2,55	-12,3	2,47
Sog infolge Zug w_S (Zug)	-2,55	12,3	-2,47

Als ermüdungsrelevante Belastungen sind die ständigen und quasi-ständigen Belastungen mit den Belastungen infolge der wechselnden Belastungen zu überlagern. In diesem Fall sind die Kombinationsbeiwerte ψ_2 des Winds und des Schnees zu 0 anzunehmen, sodass nur die Schnittgrößen aus Eigengewicht und infolge des vorbeifahrenden Zugs im Ermüdungsnachweis zu berücksichtigen sind.

Die Schnittgrößen infolge Drucks aus vorbeifahrendem Zug ergeben sich zu:

– Normalkraft

$$N_{fat,Druck,d} = N_g + N_{Zug,D} = -18,3 \text{ kN} + 2,55 \text{ kN} = -15,8 \text{ kN} \quad (49)$$

– Biegemoment

$$M_{fat,Druck,d} = M_g + M_{Zug,D} = 18,8 \text{ kNm} + (-12,3 \text{ kNm}) = 6,51 \text{ kNm} \quad (50)$$

– Querkraft

$$V_{fat,Druck,d} = V_g + V_{Zug,D} = 0 \text{ kN} + 2,47 \text{ kN} = 2,47 \text{ kN} \quad (51)$$

Die Schnittgrößen infolge Sogs aus vorbeifahrendem Zug ergeben sich zu:

– Normalkraft

$$N_{fat,Sog,d} = N_g + N_{Zug,S} = -18,3 \text{ kN} + (-2,55 \text{ kN}) = -20,9 \text{ kN} \quad (52)$$

– Biegemoment

$$M_{fat,Sog,d} = M_g + M_{Zug,S} = 18,8 \text{ kNm} + 12,3 \text{ kNm} = 31,1 \text{ kNm} \quad (53)$$

– Querkraft

$$V_{fat,Sog,d} = V_g + V_{Zug,S} = 0 \text{ kN} + (-2,47 \text{ kN}) = -2,47 \text{ kN} \quad (54)$$

Die Anzahl dieser ermüdungsrelevanten Belastungen hängt in diesem Fall von der Häufigkeit des vorbeifahrenden Zuges ab. Diese Angaben sind im Regelfall durch den Auftraggeber zu definieren. In diesem Fall werden folgende Häufigkeiten ermittelt:

- Angestrebte Nutzungsdauer der Überdachung $t_{life} = 50$ Jahre
- Anzahl Züge pro Tag $n_{Zug} = 100$ St./Tag
- Anzahl der Züge innerhalb eines Jahres = Anzahl der jährlichen Lastwechsel N_{obs} :

$$N_{obs} = n_{Zug} \cdot t = \frac{100 \text{ St.}}{\text{Tag}} \cdot \frac{365 \text{ Tage}}{\text{Jahr}} = 36.500 \text{ St./Jahr} \quad (55)$$

Damit ergibt sich die effektive Anzahl der Lastwechsel während der gesamten Nutzungsdauer der Überdachung unter der Annahme einer großen Konsequenz (siehe Abs. 3.4.4.1) zu:

$$N_{eff} = \beta \cdot N_{obs} \cdot t_{life} = 3 [-] \cdot \frac{36.500 \text{ St.}}{\text{Jahr}} \cdot 50 \text{ Jahre} = 5.475.000 \text{ Lastwechsel} \quad (56)$$

3.4.3 _ Ausnutzungsgrade statischer Nachweis

Unter Berücksichtigung der ermittelten Schnittgrößen und der Netto-Querschnittswerte ergeben sich für den quasi-statischen Fall folgende Ausnutzungen:

- Ausnutzung infolge Biegung $\eta_{Biegung} = 0,7 [-]$
- Ausnutzung infolge Querkraft $\eta_{Schub} = 0,07 [-]$

Im Rahmen der Ermittlung der Ausnutzungen wurden dabei folgende Größen bestimmt:

- Knickbeiwert $k_c = 0,44 [-]$
- Netto-Querschnittsfläche $A_{netto} = 82.488 \text{ mm}^2$
- Netto-Widerstandsmoment $W_{netto} = 5.916.511 \text{ mm}^3$

Die Nachgiebigkeit des Anschlusses wurde bei der Ermittlung des Knickbeiwerts k_c berücksichtigt.

3.4.4 _ Ermüdungsnachweis der Stütze

3.4.4.1 _ Bedeutung des Bauteils

Beim Ermüdungsnachweis muss die Konsequenz des Versagens in der Berechnung mit Hilfe des Bedeutungswerts β berücksichtigt werden. Bauteile mit geringerer Konsequenz sind Bauteile, deren Versagen keine relevanten Auswirkungen haben und die auch einfach ausgetauscht werden können. Beide Kriterien sind für die Stütze nicht erfüllt. Daher hat das Versagen beträchtliche Konsequenzen, sodass der Bedeutungswert für den Ermüdungsnachweis zu $\beta = 3$ festgelegt wird.

3.4.4.2 _ Biegespannungsnachweis auf der Druckseite der Stütze

Die Schnittgrößen an der Stütze entstehen beim Ermüdungsnachweis im Wesentlichen infolge des Eigengewichts und des Winddrucks bzw. Windsogs durch den vorbeifahrenden Zug. Damit werden im Folgenden die Schnittgrößen für diese beiden Lastfallkombinationen bestimmt, wobei zuerst die Schnittgrößen infolge Winddruck durch einen vorbeifahrenden Zug vorgestellt werden.

Die Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung infolge Winddruck aus vorbeifahrendem Zug ergeben sich zu, siehe Abschnitt 3.4.2:

– Normalkraft $N_{fat,Druck,d} = -15.800 \text{ N}$

– Moment nach Theorie I. Ordnung $M_{fat,Druck,d} = -6.510.000 \text{ Nmm}$

Da bei der Berechnung die wirklichen Spannungen zu verwenden sind, sind die Auswirkungen der Verformung auf die Schnittgrößen zu berücksichtigen. Dazu bietet DIN EN 1995-1-1/NA:2013, Gleichung (NA 171) [4] die Möglichkeit, aus den Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung in Verbindung mit dem Ersatzstabverfahren den Zuwachs des Biegemoment infolge zunehmender Verformung abzuschätzen.

Diese Zunahme bestimmt sich wie folgt:

Quelle:
DIN EN 1995-1-1/NA:2013,
Gleichung (NA 171) [4]

$$\begin{aligned} \Delta M_{fat,Druck,d} &= N_{fat,Druck,d} \cdot \frac{W}{A} \cdot \left(\frac{1}{k_c} - 1 \right) \\ &= (-15.800 \text{ N}) \cdot \frac{6.933.333 \text{ mm}^3}{104.000 \text{ mm}^2} \cdot \left(\frac{1}{0,44 [-]} - 1 \right) \\ &= 1.341.500 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (57)$$

Das resultierende Moment ergibt sich zu:

$$M_{fat,res,Druck,d} = \Delta M_{fat,Druck,d} + M_{fat,Druck,d} = 7.850.000 \text{ Nmm} \quad (58)$$

Damit könnten die Spannungen im Querschnitt unter Berücksichtigung der Querschnittschwächung infolge der einzelnen Schnittgrößen wie folgt bestimmt werden:

- Spannung infolge Normalkraft

$$\sigma_{fat,c,0,d} = \frac{N_{fat,Druck,d}}{A_{netto}} = \frac{-15.800 \text{ N}}{82.488 \text{ mm}^2} = -0,19 \text{ N/mm}^2 \quad (59)$$

- Spannung infolge Biegung (ohne ΔM)

$$\sigma_{fat,m,d}^I = \frac{M_{fat,Druck,d}}{W_n} = \frac{6.510.000 \text{ Nmm}}{5.916.511 \text{ mm}^3} = 1,10 \text{ N/mm}^2 \quad (60)$$

- Spannung infolge Biegung (inkl. ΔM)

$$\sigma_{fat,m,d}^{II} = \frac{M_{fat,res,Druck,d}}{W_n} = \frac{7.850.000 \text{ Nmm}}{5.916.511 \text{ mm}^3} = 1,33 \text{ N/mm}^2 \quad (61)$$

Die resultierende Spannung ergibt sich wie folgt:

$$\sigma_{res,Druck,d} = \sigma_{fat,c,0,d} - \sigma_{fat,m,d}^{II} = -0,19 \text{ N/mm}^2 - 1,33 \text{ N/mm}^2 = -1,52 \text{ N/mm}^2 \quad (62)$$

Neben Winddruck wird durch den vorbeifahrenden Zug auch eine Windsogbelastung auf das Bauwerk erzeugt. Die Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung dieser Lastfallkombination ergeben sich zu, siehe Abschnitt 3.4.2:

- Normalkraft $N_{fat,Sog,d} = -20.900 \text{ N}$
- Momente nach Theorie I. Ordnung $M_{fat,Sog,d} = 31.100.000 \text{ Nmm}$

Die Zunahme des Biegemoments infolge Verformung (Theorie II. Ordnung) kann – analog zur Bestimmung der Schnittgrößen bei Winddruck infolge des vorbeifahrenden Zugs – wie folgt abgeschätzt werden:

$$\begin{aligned} \Delta M_{fat,Sog,d} &= N_{fat,Sog,d} \cdot \frac{W}{A} \cdot \left(\frac{1}{k_c} - 1 \right) \\ &= (-20.900 \text{ N}) \cdot \frac{6.933.333 \text{ mm}^3}{104.000 \text{ mm}^2} \cdot \left(\frac{1}{0,44[-]} - 1 \right) \\ &= 1.774.163 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (63)$$

Quelle:
DIN EN 1995-1-1/NA:2013,
Gleichung (NA 171) [4]

sodass sich folgendes resultierendes Moment ergibt:

$$M_{res,Sog,d} = \Delta M_{fat,Sog,d} + M_{fat,Sog,d} = 32.900.000 \text{ Nmm} \quad (64)$$

Die Biegespannungen ergeben sich damit zu folgenden Werten:

- Spannung infolge Normalkraft

$$\sigma_{fat,c,0,d} = \frac{N_{fat,Sog,d}}{A_{netto}} = \frac{-20.900 \text{ N}}{82.488 \text{ mm}^2} = -0,25 \text{ N/mm}^2 \quad (65)$$

- Spannung infolge Biegung (ohne ΔM)

$$\sigma_{fat,m,d}^I = \frac{M_{fat,Sog,D}}{W_n} = \frac{31.076.104 \text{ Nmm}}{5.916.511 \text{ mm}^3} = 1,10 \text{ N/mm}^2 \quad (66)$$

- Spannung infolge Biegung (inkl. ΔM)

$$\sigma_{fat,m,d}^{II} = \frac{M_{res,Sog,d}}{W_n} = \frac{32.850.267 \text{ Nmm}}{5.916.511 \text{ mm}^3} = 5,55 \text{ N/mm}^2 \quad (67)$$

Die resultierende, mechanische Spannung kann wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{res,Sog,d} = \sigma_{fat,c,0,d} - \sigma_{fat,m,d}^{II} = -0,25 \text{ N/mm}^2 - 5,55 \text{ N/mm}^2 = -5,81 \text{ N/mm}^2 \quad (68)$$

Für den Ermüdungsnachweis ist das Spannungsverhältnis R erforderlich. Dazu sind die resultierenden Randspannungen in absolut betrachtet minimale bzw. absolut betrachtet maximale Spannung einzustufen. Bei der Weiterverwendung der Spannungen ist allerdings das Vorzeichen weiter mitzuführen.

Damit ergeben sich folgende minimale bzw. maximale Bemessungswerte der Randspannungen infolge Winddruck bzw. Windsog durch den vorbeifahrenden Zug:

- minimaler Bemessungswert der Spannung (siehe Gleichung (62))

$$\sigma_{min,fat,d} = \sigma_{res,Druck,d} = -1,52 \text{ N/mm}^2 \quad (69)$$

- maximaler Bemessungswert der Spannung (siehe Gleichung (67))

$$\sigma_{max,fat,d} = \sigma_{res,Sog,d} = -5,81 \text{ N/mm}^2 \quad (70)$$

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch das Spannungsverhältnis R bestimmt, das sich in diesem Fall zu folgendem Wert bestimmt:

$$R = \frac{\sigma_{min,fat}}{\sigma_{max,fat}} = \frac{-1,52 \text{ N/mm}^2}{-5,81 \text{ N/mm}^2} = 0,26 [-] \quad (71)$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.1) [3] bzw.

DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A6) [1]

Bei dieser Stelle im Querschnitt ist die Druckspannung die maximale Spannung.

Daher sind für die Ermittlung des Ermüdungsbeiwerts k_{fat} die Beiwerte für Druck nach Tabelle 2 zu verwenden. Diese sind:

- $a_{fat} = 2 [-]$

- $b_{fat} = 9 [-]$

Damit lässt sich der Beiwert zur Berücksichtigung der Ermüdung durch folgende Beziehung bestimmen:

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(N_{eff}) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,26[-]}{2[-] \cdot (9[-] - 0,26[-])} \cdot \text{LOG}(5.475.000 \text{ Lastwechsel}) \\ &= 0,72 [-] \end{aligned} \quad (72)$$

Quelle:
FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.3) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010
Gleichung (A5) [1]

Die Bemessungswerte der Festigkeiten der Stütze aus GL24h ergeben sich damit zu:

– Bemessungswert der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung der Ermüdung

$$f_{c,0,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{Y_{M,fat}} = 0,72 [-] \cdot \frac{24 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 17,2 \text{ N/mm}^2 \quad (73)$$

Quelle:
FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.2) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010
Gleichung (A4) [1]

– Bemessungswert der Biegefestigkeit unter Berücksichtigung der Ermüdung

$$f_{m,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{m,k}}{Y_{M,fat}} = 0,72 [-] \cdot \frac{24 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 17,2 \text{ N/mm}^2 \quad (74)$$

Quelle:
FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.2) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010
Gleichung (A4) [1]

Beim Nachweis sind „nur“ die maximalen Spannungen nachzuweisen, sodass sich folgende Einwirkungen ergeben:

– Bemessungswert der ermüdungsrelevanten Druckspannung (siehe Gleichung (65))

$$\sigma_{c,0,d} = \sigma_{fat,c,0,d} = -0,25 \text{ N/mm}^2 \quad (75)$$

– Bemessungswert der ermüdungsrelevanten Biegespannung (siehe Gleichung (67))

$$\sigma_{m,d} = \sigma_{fat,m,d} = 5,25 \text{ N/mm}^2 \quad (76)$$

Für die Biegespannung wird nur die Spannung infolge Theorie I. Ordnung verwendet, da bei diesem Nachweis das Knicken über den Beiwert k_c erfasst wird, sodass sich folgende Ausnutzung ergibt:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,fat,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,fat,d}} \\ &= \frac{0,25 \text{ N/mm}^2}{0,44 [-] \cdot 17,2 \text{ N/mm}^2} + \frac{5,25 \text{ N/mm}^2}{17,2 \text{ N/mm}^2} \\ &= 0,34 [-] \end{aligned} \quad (77)$$

Quelle:
DIN EN 1995-1-1:2010,
Gleichungen (6.23)
und (6.24) [14]

3.4.4.3 _ Biegespannungsnachweis auf der Zugseite der Stütze

Beim Nachweis zuvor wurde die Druckseite der Stütze nachgewiesen. Die Ermüdungsfestigkeit unter einer Zugbeanspruchung ist geringer als unter einer Druckbeanspruchung. In FprEN 1995-1-1:2025 [3] werden allerdings keine Angaben dazu gegeben, wie mit diesem Fall umzugehen ist, da prinzipiell auch eine kritische Einwirkung auf der Zugseite infolge der geringeren Ermüdungsfestigkeit entstehen kann.

Als ingenieurmäßiger Ansatz wird empfohlen, auch die Zugseite (für die Spannungen nach Theorie II. Ordnung) nachzuweisen. Da die Ermüdungseinwirkungen der Normalkraft im vorherigen Nachweis erfasst werden, werden im Folgenden nur die Randspannungen betrachtet. Diese Randspannungen sind durch Biegung hervorgerufen, so dass auch nur die Biegefestigkeit angesetzt wird, siehe Abschnitt 3.4.4.2.

- resultierende Zugspannungen bei Druck infolge vorbeifahrenden Zugs

$$\sigma_{fat,Druck,d} = \sigma_{fat,c,0,d} + \sigma_{fat,m,d}^II = -0,19 \text{ N/mm}^2 + 1,33 \text{ N/mm}^2 = 1,14 \text{ N/mm}^2 \quad (78)$$

- resultierende Zugspannungen bei Sog infolge vorbeifahrenden Zugs

$$\sigma_{fat,Sog,d} = \sigma_{fat,c,0,d} + \sigma_{fat,m,d}^II = -0,25 \text{ N/mm}^2 + 5,55 \text{ N/mm}^2 = 5,30 \text{ N/mm}^2 \quad (79)$$

Für den Ermüdungsnachweis werden die Bemessungswerte der Spannungen in die vorzeichenbehaftete, aber absolut betrachtete minimale bzw. maximale Spannungen eingeteilt:

- minimaler Bemessungswert der Zugspannung

$$\sigma_{fat,min,d} = \sigma_{fat,Druck,d} = 1,14 \text{ N/mm}^2 \quad (80)$$

- maximaler Bemessungswert der Zugspannung

$$\sigma_{fat,max,d} = \sigma_{fat,Sog,d} = 5,3 \text{ N/mm}^2 \quad (81)$$

Das Spannungsverhältnis R auf der Zugseite ergibt sich damit zu

$$R = \frac{\sigma_{fat,min}}{\sigma_{fat,max}} = \frac{1,14 \text{ N/mm}^2}{5,3 \text{ N/mm}^2} = 0,21 [-] \quad (82)$$

Da in diesem Fall die maximale Spannung eine Zugspannung ist, sind die Beiwerte für die Zugspannung nach Tabelle 2 zu verwenden:

$$- a_{fat} = 9,5 [-]$$

$$- b_{fat} = 1,1 [-]$$

Damit ergibt sich der Beiwert k_{fat} zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdungsbeanspruchung auf die Festigkeit zu folgendem Wert:

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1-R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(N_{eff}) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,21 [-]}{9,5 [-] \cdot (1,1 [-] - 0,21 [-])} \cdot \text{LOG}(5.475.000 \text{ Lastwechsel}) \\ &= 0,37 [-] \end{aligned} \quad (83)$$

Der Bemessungswert der Biegefestigkeit unter Berücksichtigung der Ermüdungsbeanspruchung bestimmt sich damit zu:

$$f_{m,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{m,k}}{Y_{M,fat}} = 0,37[-] \cdot \frac{24 \text{ N/mm}^2}{1[-]} = 8,90 \text{ N/mm}^2 \quad (84)$$

Aus der einwirkenden maximalen Spannung und der Festigkeit ergibt sich die Ausnutzung wie folgt:

$$\eta = \frac{\sigma_{fat,max,d}}{f_{m,fat,d}} = \frac{5,30 \text{ N/mm}^2}{8,90 \text{ N/mm}^2} = 0,60[-] \quad (85)$$

3.4.4.4 _ Schubspannung

Neben der Biegespannung wird der Querschnitt durch eine Querkraft beansprucht. Dabei sind die Querkräfte der einzelnen Lastfälle – wie beim Biegemoment – zu überlagern, wobei nur die durch die quasi-ständigen Lasten und die durch wechselnde Belastung hervorgerufene Querkräfte zu überlagern sind. Die bemessungsrelevanten Querkräfte außerhalb des Anschlusses ergeben sich dabei durch:

- resultierende Querkraft bei Druck infolge vorbeifahrenden Zugs

$$V_{fat,min,d} = V_{g,d} + V_{Zug,D} = 0 \text{ kN} + 2,47 \text{ kN} = 2,47 \text{ kN} \quad (86)$$

- resultierende Querkraft bei Sog infolge vorbeifahrenden Zugs

$$V_{fat,max,d} = V_{g,d} + V_{Zug,S,d} = 0 \text{ kN} + (-2,47 \text{ kN}) = -2,47 \text{ kN} \quad (87)$$

Daraus ergeben sich folgende Schubspannungen:

- resultierende Schubspannung bei Druck infolge vorbeifahrenden Zugs

$$\tau_{fat,min,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,min,d}}{k_{cr} \cdot A_{netto}} = 1,5 \cdot \frac{2.470 \text{ N}}{0,71[-] \cdot 82.488 \text{ mm}^2} = 0,06 \text{ N/mm}^2 \quad (88)$$

Quelle:

DIN EN 1995-1-1:2010,
Gleichung (6.13a) [14]

- resultierende Schubspannung bei Zug infolge vorbeifahrenden Zugs

$$\tau_{fat,max,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,max,d}}{k_{cr} \cdot A_{netto}} = 1,5 \cdot \frac{-2.470 \text{ N}}{0,71[-] \cdot 82.488 \text{ mm}^2} = -0,06 \text{ N/mm}^2 \quad (89)$$

Quelle:

DIN EN 1995-1-1:2010,
Gleichung (6.13a) [14]

Das Spannungsverhältnis R bestimmt sich damit mit folgenden, vorzeichenbehafteten, aber absolut betrachtet maximalen und minimalen Bemessungswerten der Spannungen:

- minimaler Bemessungswert der Schubspannung $\tau_{fat,min,d} = 0,06 \text{ N/mm}^2$
- maximaler Bemessungswert der Schubspannung $\tau_{fat,max,d} = -0,06 \text{ N/mm}^2$

Das Spannungsverhältnis R bestimmt sich also zu:

$$R = \frac{\tau_{fat,min,d}}{\tau_{fat,max,d}} = \frac{0,06 \text{ N/mm}^2}{-0,06 \text{ N/mm}^2} = -1 [-] \quad (90)$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.1) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A6) [1]

Um den Beiwert k_{fat} zu bestimmen, werden die Beiwerte für die Schubspannung nach Tabelle 2 gewählt:

- $a_{fat} = 6,7 [-]$
- $b_{fat} = 1,3 [-]$

Damit ergibt sich der Beiwert k_{fat} zur Berücksichtigung der Ermüdung bei der Ermittlung der Festigkeit zu:

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(N_{eff}) & (91) \\ &= 1 - \frac{1 - (-1)[-]}{6,7[-] \cdot (1,3[-] - (-1)[-])} \cdot \text{LOG}(5.475.000 \text{ Lastwechsel}) \\ &= 0,13 [-] \end{aligned}$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.3) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A5) [1]

sodass sich der Bemessungswert der Schubfestigkeit zu folgendem Wert bestimmen lässt:

$$f_{v,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{v,k}}{Y_{M,fat}} = 0,13 [-] \cdot \frac{3,5 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 0,44 \text{ N/mm}^2 \quad (92)$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.2) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A4) [1]

Die Ausnutzung ist damit:

$$\eta = \frac{|\tau_{fat,max,d}|}{f_{v,fat,d}} = \frac{|-0,06 \text{ N/mm}^2|}{0,44 \text{ N/mm}^2} = 0,14 [-] \quad (93)$$

Quelle:

DIN EN 1995-1-1:2010,
Gleichung (6.13) [14]

3.4.5 _ Ermüdungsnachweis Anschluss

3.4.5.1 _ Allgemeines

Der Anschluss ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Belastung auf die Verbindungsmittel entsteht durch die Anschlussmomente infolge Theorie II.Ordnung, da die Vertikalbelastung direkt über die eingeschweißten Bleche abgetragen wird. Auf den Nachweis der Vertikalbelastung wird hier verzichtet. Das statische System des Anschlusses ist in Abbildung 14 gegeben.

Abb. 13:
Anschluss

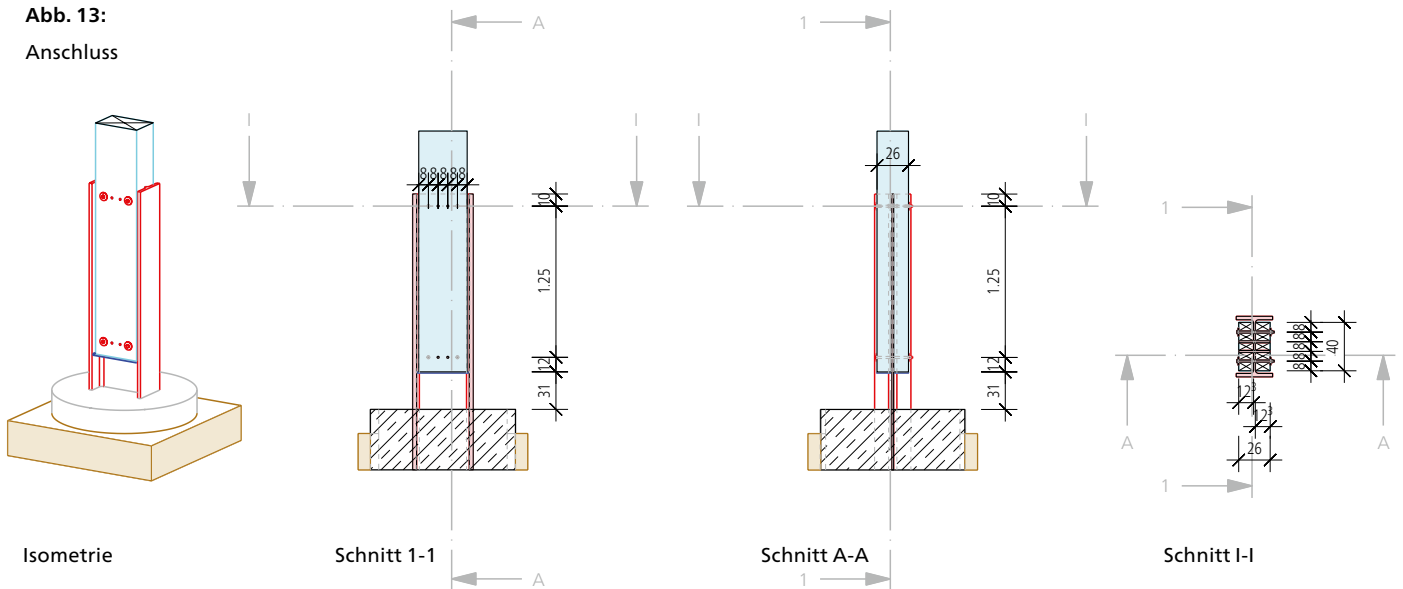
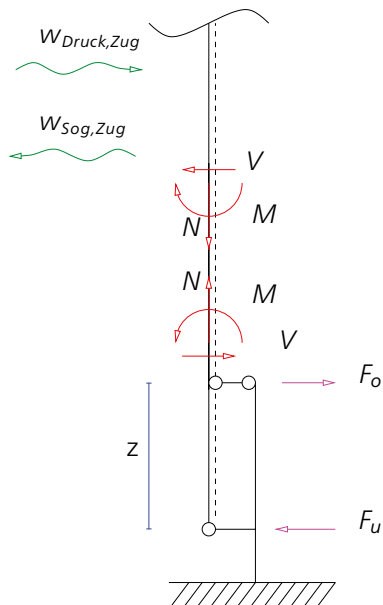


Abb. 14:
Statisches System
des Anschlusses



3.4.5.2 _ Statische Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit der Verbindungsmittel wird nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013 [4] bestimmt. Die charakteristische Tragfähigkeit pro Scherfuge des Verbindungsmittels bestimmt sich zu:

Quelle:

DIN EN 1995-1-1/NA:2013,
NCI NA. 115

$$\begin{aligned}
 F_{Rk} &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{yk} \cdot f_{h,90,k} \cdot d} & (94) \\
 &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{2 \cdot 145.927 \text{ Nmm} \cdot 16,68 \text{ N/mm}^2 \cdot 16 \text{ mm}} \\
 &= 12.481 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Die Ausnutzung der Verbindungsmittel ergibt sich im statischen Fall zu 0,64.

3.4.5.3 _ Querkraftnachweis innerhalb der Anschlussgruppe

Da das Biegemoment durch ein Kräftepaar übertragen wird, entsteht eine Querkraft innerhalb des Anschlusses. Diese Querkraft ist innerhalb des Anschlusses nachzuweisen. Die Ausnutzung des Bauteils innerhalb des Anschlusses infolge Schubs im statischen Fall ergibt sich damit zu 0,51.

3.4.5.4 _ Ermüdungsnachweis des Anschlusses**Verbindungsmittel**

Da die Vertikalbelastung durch über das eingeschweißte Blech abgetragen wird, werden die Verbindungsmittel nur durch das Biegemoment und durch die Querkraft in der Stütze beansprucht. Als Einwirkung sind dabei die Anschlussmomente nach Theorie II. Ordnung zu bestimmen. Nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013, Gleichung (NA 171) [4] kann das Moment nach Theorie II. Ordnung aus dem k_c -Verfahren bestimmt werden.

Die resultierenden Momente bei vorbeifahrendem Zug bestimmen sich zu (siehe Abschnitt 3.4.4.2):

- infolge Druck durch vorbeifahrendem Zug $M_{res,Druck,d} = 7.848.729 \text{ Nmm}$
- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug $M_{res,Sog,d} = 32.850.657 \text{ Nmm}$

Die resultierende Querkräfte bei vorbeifahrendem Zug ergibt sich zu, siehe Abschnitt 3.4.4.4:

- infolge Druck durch vorbeifahrendem Zug $V_{res,Druck,d} = 2.466 \text{ N}$
- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug $V_{res,Sog,d} = -2.466 \text{ N}$

Die Beanspruchung der unteren Verbindungsmittelsgruppe ergibt sich damit zu

- infolge Druck durch vorbeifahrendem Zug

$$F_{u,res,D,d} = \frac{M_{res,Druck,d}}{z} + \frac{V_{res,Druck,d}}{2} = \frac{7.850.000 \text{ Nmm}}{1.250 \text{ mm}} + \frac{2.470 \text{ N}}{2} = 7.510 \text{ N} \quad (95)$$

- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug

$$F_{u,res,S,d} = \frac{M_{res,Sog,d}}{z} + \frac{V_{res,Sog,d}}{2} = \frac{32.900.000 \text{ Nmm}}{1.250 \text{ mm}} + \frac{-2.470 \text{ N}}{2} = 25.000 \text{ N} \quad (96)$$

Die Beanspruchung auf die obere Verbindungsmittelgruppe bestimmt sich zu

- infolge Druck durch vorbeifahrenden Zug

$$F_{o,res,D,d} = \frac{M_{res,Druck,d}}{z} - \frac{V_{res,Druck,d}}{2} = \frac{7.850.000 \text{ Nmm}}{1.250 \text{ mm}} - \frac{2.470 \text{ N}}{2} = 5.000 \text{ N} \quad (97)$$

- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug

$$F_{o,res,S,d} = \frac{M_{res,Sog,d}}{z} - \frac{V_{res,Sog,d}}{2} = \frac{32.900.000 \text{ Nmm}}{1.250 \text{ mm}} - \frac{-2.470 \text{ N}}{2} = 27.500 \text{ N} \quad (98)$$

Da die obere und die untere Verbindungsmittelgruppe gleich ausgeführt wird, ist die obere Verbindungsmittelgruppe aufgrund der höheren Belastung bemessungsrelevant.

Die Beanspruchung pro Scherfuge und Verbindungsmittel bestimmt sich damit zu:

- infolge Druck durch vorbeifahrenden Zug

$$F_{o,vbm,D,d} = \frac{F_{o,res,D,d}}{n_{res} \cdot n_{Scherfuge}} = \frac{5.000 \text{ N}}{4 \text{ St.} \cdot 2[-]} = 631 \text{ N} \quad (99)$$

- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug

$$F_{o,vbm,S,d} = \frac{F_{o,res,S,d}}{n_{res} \cdot n_{Scherfuge}} = \frac{27.500 \text{ N}}{4 \text{ St.} \cdot 2[-]} = 3.440 \text{ N} \quad (100)$$

Für die Bestimmung des Spannungsverhältnisses sind die vorzeichenbehafteten, aber absolut betrachtet maximalen und minimalen Kräfte zu bestimmen.

- minimale Beanspruchung des Verbindungsmittels

$$F_{fat,min,d} = F_{o,vbm,D,d} = 631 \text{ N} \quad (101)$$

- maximale Beanspruchung des Verbindungsmittels

$$F_{fat,max,d} = F_{o,vbm,S,d} = 3.440 \text{ N} \quad (102)$$

Das Kräfteverhältnis R ergibt sich damit zu:

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,

Gleichung (10.1) [3] bzw.

DIN EN 1995-2:2010,

Gleichung (A6) [1]

$$R = \frac{F_{fat,min,d}}{F_{fat,max,d}} = \frac{631 \text{ N}}{3.440 \text{ N}} = 0,18 [-] \quad (103)$$

Die Beiwerte a_{fat} und b_{fat} ergeben sich für Verbindungsmittel nach Tabelle 2 zu:

$$- a_{fat} = 6 [-]$$

$$- b_{fat} = 2 [-]$$

Damit bestimmt sich der Beiwert k_{fat} zur Berücksichtigung der Ermüdung zu:

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,

Gleichung (10.3) [3] bzw.

DIN EN 1995-2:2010,

Gleichung (A5) [1]

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} \cdot (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(N_{eff}) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,18 [-]}{6[-] \cdot (2 [-] - 0,18 [-])} \cdot \text{LOG}(5.475.000 \text{ Lastwechsel}) \\ &= 0,50 [-] \end{aligned} \quad (104)$$

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit des Verbindungsmittels unter Berücksichtigung der Ermüdungseinwirkung bestimmt sich durch:

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,

Gleichung (10.2) [3] bzw.

DIN EN 1995-2:2010,

Gleichung (A4) [1]

$$\begin{aligned} F_{fat,R,d} &= k_{fat} \cdot \frac{F_{R,k}}{Y_{M,fat}} \\ &= 0,5 [-] \cdot \frac{124.801 \text{ N}}{1 [-]} \\ &= 6.180 \text{ N} \end{aligned} \quad (105)$$

Die Ausnutzung des Verbindungsmittels unter Berücksichtigung der Ermüdung ergibt sich damit zu:

Quelle:

DIN EN 1995-1-1:2010,

Gleichung (6.13) [14]

$$\eta_{VBM} = \frac{F_{fat,max,d}}{F_{fat,R,d}} = \frac{3.439 \text{ N}}{6.180 \text{ N}} = 0,56 [-] \quad (106)$$

Querkrachnachweis innerhalb der Anschlussgruppe

Die Querkraft im Anschluss entspricht in diesem Fall der Beanspruchung der untersten Verbindungsmittelreihe. Diese bestimmt sich zu:

- infolge Druck durch vorbeifahrendem Zug

$$V_{fat,D,d} = F_{u,res,D,d} = 7.512 \text{ N} \quad (107)$$

- infolge Sog durch vorbeifahrendem Zug

$$V_{fat,S,d} = F_{u,res,S,d} = 25.047 \text{ N} \quad (108)$$

Für die Bestimmung des Spannungsverhältnisses sind die vorzeichenbehafteten, aber absolut betrachtet maximalen und minimalen Kräfte zu bestimmen.

- minimale Beanspruchung des Verbindungsmittels

$$V_{fat,min,d} = V_{fat,D,d} = 7.512 \text{ N} \quad (109)$$

- maximale Beanspruchung des Verbindungsmittels

$$V_{fat,max,d} = V_{fat,S,d} = 25.047 \text{ N} \quad (110)$$

Daraus ergeben sich die vorzeichenbehafteten, absolut betrachtet minimalen und maximalen Schubspannungen im Anschlussbereich durch folgende Gleichungen:

- minimale Schubspannung infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkungen

$$\tau_{fat,min,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,min,d}}{k_{cr} \cdot A_{netto}} = 1,5 \cdot \frac{7.512 \text{ N}}{0,71 [-] \cdot 82.488 \text{ mm}^2} = 0,19 \text{ N/mm}^2 \quad (111)$$

- maximale Schubspannung infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkungen

$$\tau_{fat,max,d} = 1,5 \cdot \frac{V_{fat,max,d}}{k_{cr} \cdot A_{netto}} = 1,5 \cdot \frac{25.047 \text{ N}}{0,71 [-] \cdot 82.488 \text{ mm}^2} = 0,64 \text{ N/mm}^2 \quad (112)$$

Das Spannungsverhältnis R ergibt sich zu:

$$R = \frac{\tau_{fat,min,d}}{\tau_{fat,max,d}} = \frac{0,19 \text{ N/mm}^2}{0,64 \text{ N/mm}^2} = 0,30 [-] \quad (113)$$

Da die Schubspannungen nachgewiesen werden, ergeben sich die Beiwerte zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit nach Tabelle 2 zu:

$$- a_{fat} = 6,7 [-]$$

$$- b_{fat} = 1,3 [-]$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,

Gleichung (10.1) [3] bzw.

DIN EN 1995-2:2010,

Gleichung (A6) [1]

Damit kann der Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Ermüdung auf die Festigkeit durch folgende Beziehung bestimmt werden.

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.1) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A6) [1]

$$\begin{aligned} k_{fat} &= 1 - \frac{1 - R}{a_{fat} (b_{fat} - R)} \cdot \text{LOG}(N_{eff}) & (114) \\ &= 1 - \frac{1 - 0,3 [-]}{6,7 [-] \cdot (1,3 [-] - 0,3 [-])} \cdot \text{LOG}(5.475.000 \text{ Lastwechsel}) \\ &= 0,30 [-] \end{aligned}$$

Quelle:

FprEN 1995-1-1:2025,
Gleichung (10.2) [3] bzw.
DIN EN 1995-2:2010,
Gleichung (A4) [1]

Der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit für eine Schubbeanspruchung lässt sich wie folgt bestimmen:

$$f_{V,fat,d} = k_{fat} \cdot \frac{f_{v,k}}{Y_{M,fat}} = 0,3 [-] \cdot \frac{3,5 \text{ N/mm}^2}{1 [-]} = 1,04 \text{ N/mm}^2 \quad (115)$$

Quelle:

DIN EN 1995-1-1:2010,
Gleichung (6.13) [14]

Die Ausnutzung im Hinblick auf die Schubbeanspruchung bestimmt sich durch:

$$\eta_V = \frac{\tau_{fat,max,d}}{f_{V,fat,d}} = \frac{0,64 \text{ N/mm}^2}{1,04 \text{ N/mm}^2} = 0,62 [-] \quad (116)$$

4_ Nachweiskonzept bei variabler Amplitude

4.1 _ Allgemeines

In den vorangegangenen Abschnitten wird der Belastung immer unterstellt, dass die ermüdungsrelevante Belastung immer die gleiche Amplitude aufweist. Dies ist sicherlich zutreffend bei Maschinen. Bei LKW-Überfahrten ergibt sich allerdings gerade bei kurzen Spannweiten, dass durch die verschiedenen LKW diese Amplituden der Spannungen nicht mehr zwingend immer gleich sind, siehe Abbildung 15 und Kapitel 5.

Um diese Verläufe im Ermüdungsnachweis abbilden zu können, wird in FprEN 1995-1-1:2025 [3] die Anwendung der Palmgren-Miner-Regel ermöglicht, die im Folgenden vorgestellt werden soll.

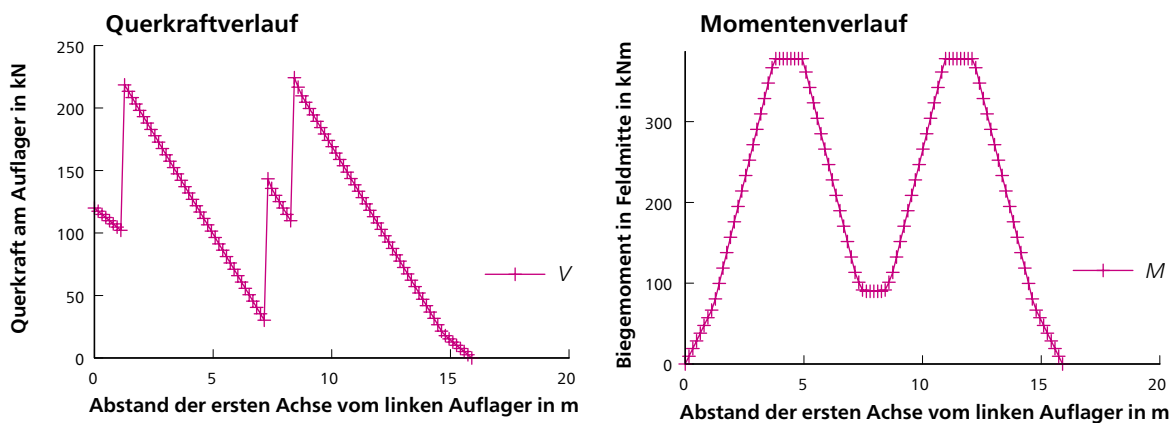


Abb. 15:

Schnittgrößen nur infolge Überfahrt des LM3 nach DIN EN 1991-2:2010 [9]
 bei einer Brücke mit Spannweite von 7,5m

4.2 _ Ermüdungseinwirkung mit variabler Amplitude

Sollten die Belastungsgeschichte aus mehreren Zyklen bestehen, müssen die Schnittgrößen für den jeweiligen Zyklus beschrieben werden. In diesem Fall werden diese Zyklen i.d.R. mit Hilfe der Rainflow-Methode ausgewertet. Bei dieser Methode wird der zyklische Verlauf als Pagodendach interpretiert, von dem der Regen abläuft (siehe Abbildung 16).

Die Schwingbreite ist die horizontale Lauflänge des auf einem Pagodendach abfließenden Wassers auf der unbenetzten Dachfläche. Der Start- bzw. Endpunkt dieses abfließenden Wassers ist die Ober- bzw. Unterspannung.

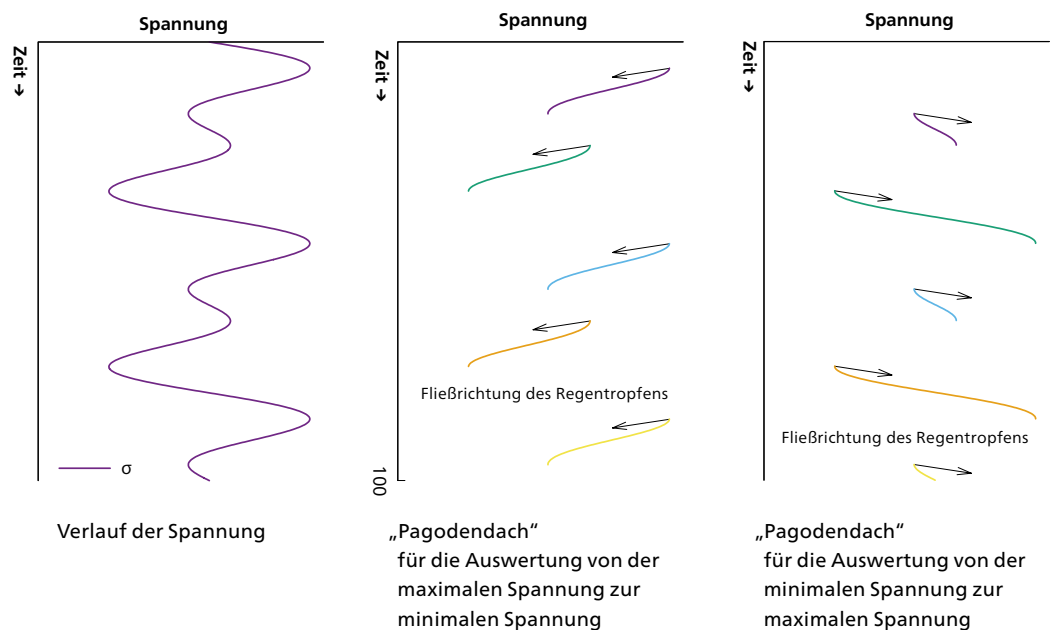
Dies bedeutet, dass die Schwingbreite dadurch bestimmt wird, indem an jedem Extrempunkt das Wasser beginnt abzufließen, bis es auf einen Punkt auftritt, der in der vorangegangenen Bestimmung der Schwingbreite und der Ober- bzw. Unterspannung bereits ausgewertet wurde. Die Auswertung erfolgt dabei in

zwei Stufen, indem zuerst bei den Maximalwerten gestartet wird und die Schwingbreite beim Abfließen zu den Minima ermittelt wird. Im zweiten Schritt wird dieser Prozess umgekehrt und bei den Minima gestartet und der Ablauf zu den Maximalwerten bewertet wird.

Bei der Anwendung dieser Regelung ist allerdings beim Holzbau zu beachten, dass nicht die Schwingbreite, sondern die Ober- und Unterspannung der einzelnen Schwingungen zu bestimmen ist. Damit ergibt sich aus den einzelnen „Abflüssen“ vom Dach jeweils der Startpunkt und der Endpunkt des Abflusses und damit die Ober- bzw. Unterspannung.

Bei der Auswertung wird gezählt, wie oft dieser Datensatz aus Ober- und Unterspannung bei beiden Auswertungsrichtungen auftritt (siehe Abbildung 17). Dies ist dahingehend notwendig, da die Be- und Entlastung nicht direkt aufeinander folgen müssen und durch diese Zählweise dann die Lastgeschichte unberücksichtigt bleiben kann.

Abb. 16:
Prinzip der
Rainflowmethode



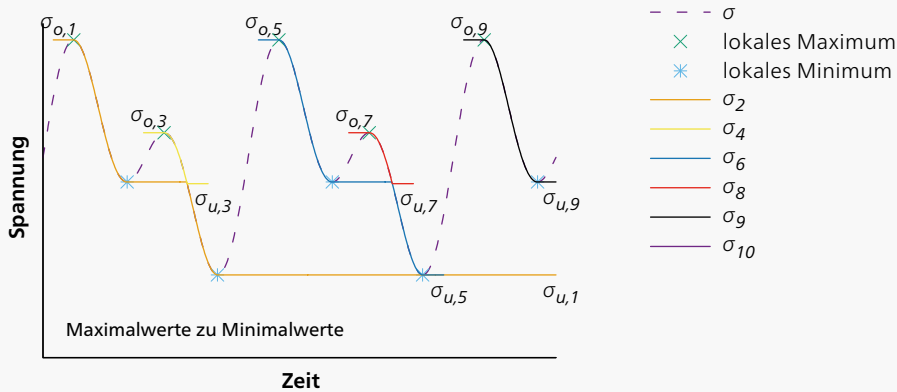
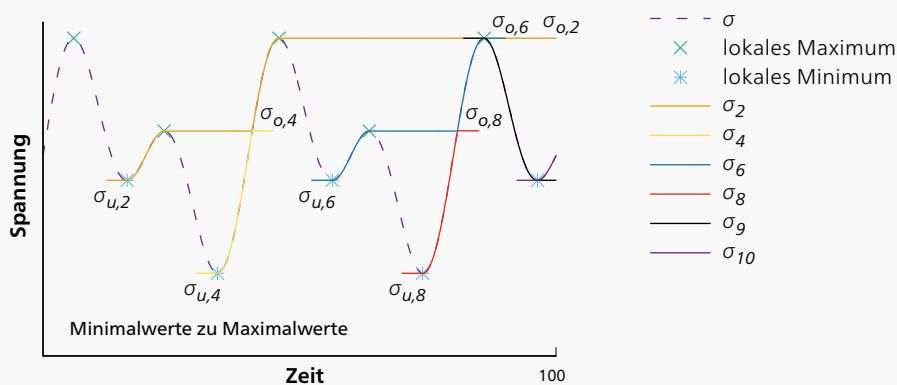


Abb. 17:
Ermittlung der
Ober- und Unterspannung
mit Hilfe der
Rainflow-Methode



Ablauf der Auswertung der Schwingungen mit Hilfe der Rainflow-Methode:

- Zählen der Fälle mit identischer Oberspannung $\sigma_{o,i}$ und $\sigma_{u,i}$

Lastwechsel	Oberspannung $\sigma_{o,i}$	Unterspannung $\sigma_{u,i}$	Anzahl
i	X	Y	$N_{Rainflow,i}$
...

mit $\sigma_{o,i}$ absolut betrachtet maximale, aber vorzeichenbehaftete Spannung als Startpunkt des Lastwechsels i in der Rainflowauswertung

$\sigma_{u,i}$ absolut betrachtet minimale, aber vorzeichenbehaftete Spannung als Endpunkt des Lastwechsels i in der Rainflowauswertung

$N_{Rainflow,i}$ Anzahl der Lastwechsel aus der Rainflowmethode

- Halbieren der gezählten Fälle, da beim Nachweis für die Bestimmung eines Lastwechsels davon ausgegangen wird, dass die Spannung am Ende des Lastzyklen wieder auf den Ausgangspunkt zurückkehrt, während bei der Rainflowmethode der Anstieg und der Abfall getrennt gezählt werden.

$$N_{obs,i} = \frac{N_{Rainflow,i}}{2}$$

mit $N_{obs,i}$ Anzahl der Wechsel des Lastwechsels i als Eingangsgröße für den Nachweis

$N_{Rainflow,i}$ Anzahl der Lastwechsel aus der Rainflowmethode des Lastwechsels

- Auswertung der Daten

Beim Ermüdungsnachweis ist ein Lastzyklus der Zyklus, bei dem die Spannung wieder an ihren Ausgangspunkt zurückkehrt. Dies bedeutet, dass ein Lastzyklus eine Be- und Entlastung des Bauteils umfasst. Da die Rainflow-Methode aber sowohl die Anzahl der Belastungen als

auch die Anzahl der der Entlastungen gezählt werden, ist die aus der Rainflow-Methode ermittelten Anzahl an Lastwechsel für die Anwendung des Ermüdungsnachweises nach DIN EN 1995-2:2010 [1] zu halbieren.

4.3 _ Anwendung der Palmgren-Miner-Regel

Besteht die wechselnde Einwirkung aus Einwirkungen mit verschiedenen Amplituden, kann die Palmgren-Miner-Regel zur Anwendung kommen, siehe FprEN 1995-1-1:2025, 10.3. [3] Sie ist noch nicht abschließend verifiziert, allerdings ergeben u.a. Untersuchungen von (Mönch 2024, [13]), dass eine Anwendbarkeit auch im Holzbau möglich ist.

Die wechselnden Einwirkungen mit verschiedenen Amplituden werden z.B. entsprechend der Rainflow-Methode (siehe Abschnitt 4.2) in einzelnen Zyklen zerlegt, bei denen die Ober- spannung, die Unterspannung und die Anzahl dieser Lastwechsel bekannt sind (= Fall i).

Bei der Palmgren-Miner-Regel wird diese Anzahl der einzelnen Fälle mit der ertragbaren Anzahl an Schwingungen verglichen. Dabei wird der Anteil die Schädigung D_i infolge des Falls aus dem Verhältnis der einwirkenden Anzahl an Schwingungsspiele $n_{i,Ed}$ und der ertragbaren Anzahl an Schwingungsspielen $N_{i,Rd}$ bestimmt. Die resultierende Schädigung D ist die Summe aller Schädigungen infolge der einzelnen Lastwechsel.

$$D = \sum D_i = \sum \frac{n_{i,Ed}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min})}{N_{i,Rd}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min})} \leq 1,0 \quad (117)$$

mit D Schädigung des Bauteils infolge Ermüdung

$n_{i,Ed}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min})$ vorhandene Anzahl an Lastwechsel des Falls i mit der minimalen Spannung $\sigma_{i,min}$ und maximalen Spannung $\sigma_{i,max}$, ermittelt z.B. mit Hilfe der Rainflow-Methode, siehe Abschnitt 4.2

$N_{i,Rd}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min})$ ertragbare Anzahl an Lastwechsel des Falls i mit der minimalen Spannung $\sigma_{i,min}$ und maximalen Spannung $\sigma_{i,max}$ nach Gleichung (117)

Von einem Versagen wird ausgegangen, wenn die akkumulierte Schädigung D größer als 1,0 wird.

Um die ertragbare Anzahl an Lastwechsel zu bestimmen, wird Gleichung (7) nach der Anzahl der Lastwechsel $N_{obs} \cdot t_{life}$ aufgelöst und $N_{obs} \cdot t_{life} = N_{i,Rd}$ gesetzt, so dass sich folgende Beziehung ergibt

$$N_{i,Rd}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min}) = \frac{1}{\beta} \cdot 10^{\frac{1-k_{i,fat,req}}{1-R_i} \cdot a_{fat} \cdot (b_{fat} - R_i)} \quad (118)$$

mit $N_{i,Rd}(\sigma_{i,max}, \sigma_{i,min})$ ertragbare Anzahl an Lastwechsel des Falls i mit der minimalen Spannung $\sigma_{i,min}$ und maximalen Spannung $\sigma_{i,max}$

β Beiwert zur Berücksichtigung der Folgen des Versagens (siehe Gleichung (10))

$k_{i,fat,req}$ erforderlicher Beiwert für die Festigkeitsminderung für den betrachteten Belastungswechsel im Fall i

R_i Verhältnis der maximalen und minimalen Spannung des Falls i (siehe Gleichung (8))

a_{fat} Beiwert (siehe Tabelle 2)

b_{fat} Beiwert (siehe Tabelle 2)

Bei der Anwendung der Palmgren-Miner-Regel ist nach FprEN 1995-1-1:2025 [3] immer von einem Bedeutungsfaktor $\beta = 3$ auszugehen, unabhängig davon welche Folgen ein Versagen hätte, während DIN EN 1995-2:2010 [1] hierzu keine Angaben macht.

Der erforderliche Beiwert zur Berücksichtigung der Festigkeitsminderung infolge der Ermüdung im Fall i bestimmt sich durch:

$$k_{i,fat,req} = \frac{\sigma_{fat,max,i}}{\frac{f_k}{\gamma_{m,fat}}} \quad (119)$$

mit $k_{i,fat,req}$ erforderlicher Beiwert für die Festigkeitsminderung für den betrachteten Belastungswechsel im Fall i

$\sigma_{fat,max,i}$ maximale Spannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkung im Fall i

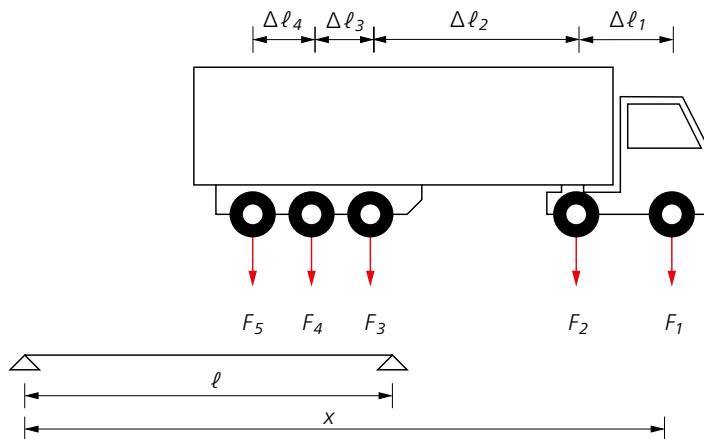
f_k charakteristische Festigkeit

$\gamma_{m,fat}$ Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialseite im Ermüdungslastfall = 1,0 für den Nachweis nach DIN EN 1995-2:2010 [1]

4.4 _ Beispiel der Anwendung der Palmgren-Miner-Regel

Im Folgenden soll die Schädigung einer Einfeldträgerbrücke mit 9 m Spannweite aus GL28c infolge der Überfahrt des LKW Typ III des Lastmodells IV nach DIN EN 1991-2:2010, Tab. 4.7 [9] geführt werden. Dieser LKW ist entsprechend Tabelle 7 definiert (siehe Abbildung 18).

Abb. 18:
Belastung und System



Tab. 7:
LKW Typ III (siehe Abb. 18)

Achsabstand	Häufige Achslast
$\Delta L_1 = 3,2 \text{ m}$	$F_1 = 70 \text{ kN}$
$\Delta L_2 = 5,2 \text{ m}$	$F_2 = 150 \text{ kN}$
$\Delta L_3 = 1,3 \text{ m}$	$F_3 = 90 \text{ kN}$
$\Delta L_4 = 1,3 \text{ m}$	$F_4 = 90 \text{ kN}$
	$F_5 = 90 \text{ kN}$

Für die Einfeldträger-Brücke mit 9 m ergibt sich bei der Überfahrt des in Tabelle 6 gegebenen LKW der in Abbildung 19 dargestellte Verlauf des Moments in Feldmitte in Abhängigkeit der Position der ersten Achse.

Diese Einwirkung wird mit allen weiteren Lasten entsprechend Abschnitt 3.1.2 überlagert (siehe Abbildung 20).

Abb. 19:
Feldmoment infolge LKW-Überfahrt

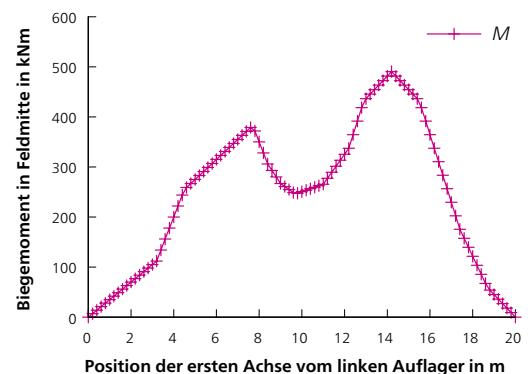
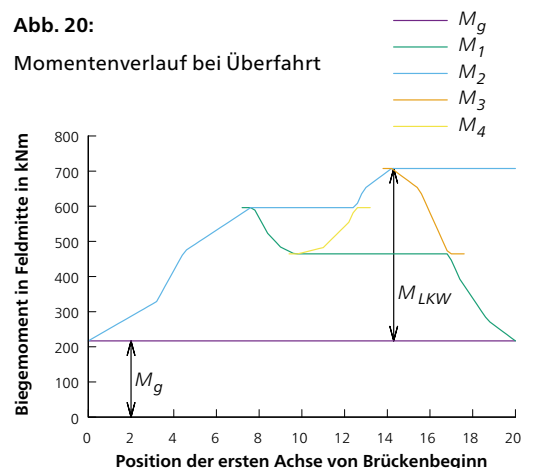


Abb. 20:
Momentenverlauf bei Überfahrt



Daraus ergeben sich die in Tabelle 8 zusammengestellten maximalen und minimalen Biegemomente. Die Anzahl wird wieder auf eine Überfahrt normiert. Dabei wird einerseits berücksichtigt, dass die Rainflowmethode sowohl die Spannungsänderung von der (lokalen) unteren Grenze zur (lokalen) oberen Grenze als auch die Spannungsänderungen von der (lokalen) oberen Grenze zur (lokalen) unteren Grenze zählt, während beim Ermüdungsnachweis als Zyklus einen kompletten Durchlauf von der Ausgangsspannung zum maximalen Wert und wieder zurück zur Ausgangsspannung verstanden wird. Daher ist die Anzahl der Schwingungen ermittelt durch die Rainflowmethode für den Nachweis zu halbieren.

Das Biegemoment infolge Eigengewichts beträgt 217 kNm.

Unter der Annahme eines Widerstandsmoments von $W = 126.583.333,3 \text{ mm}^3$ ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Spannungen.

Tab. 8:
Biegemoment bei einer Überfahrt

Nr.	M_{min}	M_{max}	N
[-]	[kNM]	[kNM]	[-]
1	217	596	0,5
2	217	707	0,5
3	464	707	0,5
4	464	596	0,5

Tab. 9:
Spannungen infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkung ($EG + P_{LKW}$)

Nr.	σ_{min}	σ_{max}	$N_{obs}/\text{Überfahrt}$
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
1	2,18	6,00	0,5
2	2,18	7,12	0,5
3	4,68	7,12	0,5
4	4,68	6,00	0,5

Um nun die ertragbare Anzahl an Lastwechsel bestimmen zu können, ist das Spannungsverhältnis R zu bestimmen. Für den Lastwechsel Nr. 2 ergibt sich dieses Spannungsverhältnis zu (siehe auch Tabelle 10):

$$R_2 = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{2,18 \text{ N/mm}^2}{7,12 \text{ N/mm}^2} = 0,31 \quad (120)$$

Der für die Ermittlung notwendige Beiwert $k_{fat,req}$ bestimmt sich für den Zyklus 2 durch (siehe Gleichung (119) und Tabelle 10):

$$k_{fat,req} = \frac{\sigma_{max}}{\frac{f_{mk}}{\gamma_{m,fat}}} = \frac{7,12 \text{ N/mm}^2}{\frac{28 \text{ N/mm}^2}{1,0}} = 0,25 \quad (121)$$

Damit kann die ertragbare Anzahl an Schwingspielen für den Zyklus 2 durch folgende Gleichung (121) bestimmt werden:

- Bedeutungsfaktor $\beta = 3$
- Vorfaktor $a_{fat} = 9,5$ (siehe Tabelle 2)
- Vorfaktor $b_{fat} = 1,1$ (siehe Tabelle 2)

$$\begin{aligned} N_{Rd,2}(\sigma_{2,max}, \sigma_{2,min}) &= \frac{1}{\beta} \cdot 10^{\frac{1-k_{fat,req}}{1-R_2} \cdot a_{fat} \cdot (b_{fat} - R_2)} \\ &= \frac{1}{3} \cdot 10^{\frac{1-0,25}{1-0,31} \cdot 9,5 \cdot (1,1 - 0,31)} \\ &= 42.401.739 \end{aligned} \quad (122)$$

Unter der Annahme von 1 Mio. Überfahrten innerhalb eines Jahres ergeben sich $n_{\text{Überfahrten}} = 5 \cdot 10^7$ Überfahrten im Lauf des betrachteten Zeitraums von 50 Jahren.

Für den Lastzyklus 2 ergeben sich damit folgende Anzahl und daraus folgende Schädigung

- Anzahl der Lastwechsel des Zyklus 2
 $n_{Ed} = N_{obs}/\text{Überfahrt} \cdot n_{\text{Überfahrten}} = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^7 = 2,5 \cdot 10^7 = 25.000.000$
- Anzahl der Lastwechsel des Zyklus 2

$$D_2 = \frac{n_{Ed}}{N_{Rd,2}(\sigma_{2,max}, \sigma_{2,min})} = \frac{25.000.000}{42.401.739} = 0,59 \quad (123)$$

Die gesamte Schädigung D bestimmt sich aus der Summe der einzelnen Schädigungen D_i (siehe Tabelle 10), so dass sich für das Beispiel folgende Schädigung bestimmt, siehe Gleichung (123).

$$\begin{aligned}
 D &= \sum D_i = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \\
 &= 0,173 + 0,589 + 0,053 + 0,001 \\
 &= 0,817 \leq 1,0
 \end{aligned}
 \tag{124}$$

Da die Schädigung D kleiner als 1,0 ist, ist das Bauteil nachgewiesen.

Wird bei diesem System nur von einem Belastungszyklus ausgegangen ($\sigma_{min} = 2,18 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_{max} = 7,12 \text{ N/mm}^2$ pro Überfahrt) wird eine Schädigung von 1,18 bestimmt, so dass in diesem Fall die Abbildung des Belastungsverlauf mit nur einem Zyklus auf der sicheren Seite liegt.

Weiterhin ist anzumerken, dass diese Berechnung mit einem LKW nur als Berechnungsbeispiel dienen soll und nicht eine vollständige Berechnung darstellt. Entsprechend DIN EN 1991-2/NA:2012 [15] ist normalerweise das Lastmodell III zu verwenden, das aus zwei Doppelachsen besteht. Nur in besonderen Fällen und in Abstimmung mit den zuständigen Behörden darf bei Zustimmung das Lastmodell IV verwendet werden, wovon der in diesem Beispiel verwendete LKW nur einer von 5 verschiedenen LKW-Typen darstellt. Daher ist für die Anwendung dieses Lastmodells IV die Schädigung infolge der Überfahrt durch die anderen LKW ebenfalls zu bestimmen und aufzuaddieren.

Tab. 10:
 Ermittlung der Schädigung

Nr.	R	$k_{fat,req}$	N_{Rd}	n_{Ed}	Schädigung D
[–]	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
1	0,36	0,21	$1,44 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	0,173
2	0,31	0,25	$4,24 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	0,589
3	0,66	0,25	$4,65 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^7$	0,053
4	0,78	0,21	$2,34 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^7$	0,001

N_{Rd} : Bemessungswert der Anzahl der ertragbaren Lastwechsel
 n_{Ed} : Bemessungswert der Anzahl der einwirkenden Lastwechsel

5_Rainflow-Auswertung

Rainflow-Auswertung des Lastmodells LM3 nach DIN EN 1991-2:2010 [9]

5.1 _ Allgemeines

Im Folgenden werden der Momenten- und Querkraftverlauf des Lastmodells LM3 nach DIN EN 1991-2:2010 [9] für einen einfeldrigen Träger bestimmt. Diese Verläufe werden dann mit der Rainflowmethode nach Abschnitt 4.2 ausgewertet, sodass die Änderungen der Schnittgrößen bestimmt werden.

5.2 _ Spannweite von 2,5 m

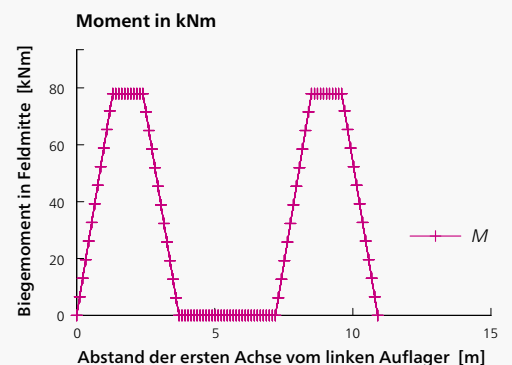
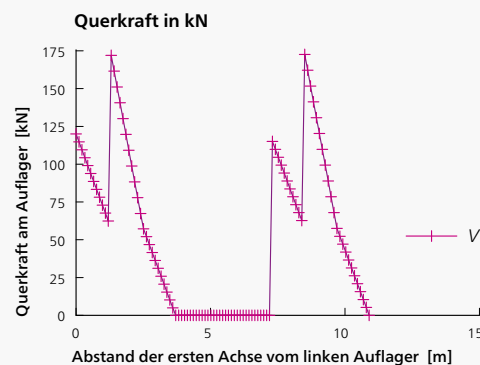
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	115	0,5
2	0	120	0,5
3	0	172	0,5
4	0	173	0,5
5	62,4	120	0,5
6	62,4	172	0,5
7	62,7	115	0,5
8	62,7	173	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	78	2

Abb. 21:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 2,5 m



5.3 _ Spannweite von 5 m

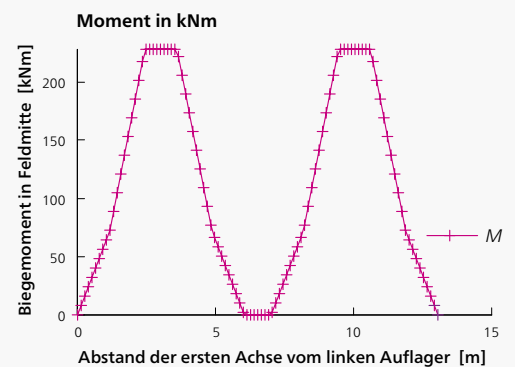
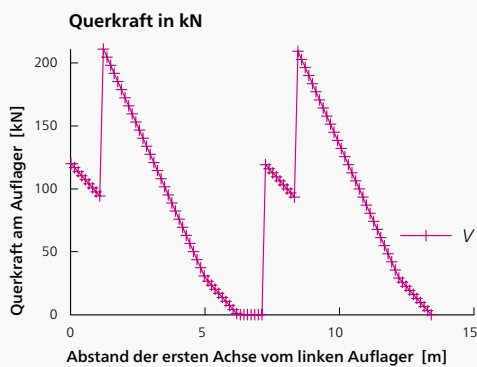
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	119	0,5
2	0	120	0,5
3	0	209	0,5
4	0	211	0,5
5	93,4	119	0,5
6	93,4	209	0,5
7	94,3	120	0,5
8	94,3	211	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	228	2

Abb. 22:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 5 m



5.4 _ Spannweite von 7,5 m

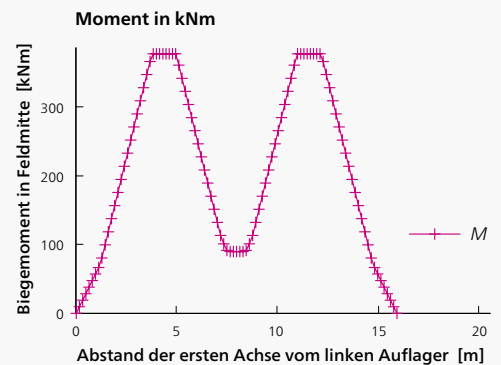
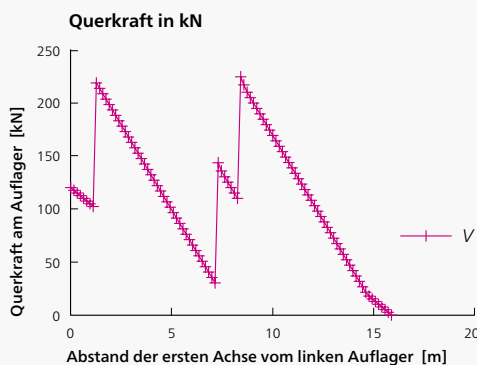
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	224	0,5
3	30,2	143	0,5
4	30,2	218	0,5
5	102	120	0,5
6	102	218	0,5
7	110	143	0,5
8	110	224	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	378	1
2	90	378	1

Abb. 23:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 7,5 m



5.5 _ Spannweite von 10 m

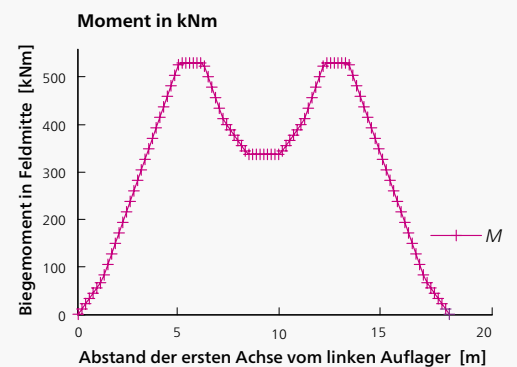
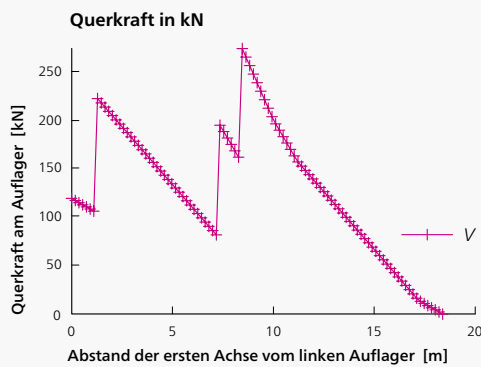
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	275	0,5
3	82,2	196	0,5
4	82,2	223	0,5
5	107	120	0,5
6	107	223	0,5
7	163	196	0,5
8	163	275	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	528	0,5
2	0	528	0,5
3	336	528	1

Abb. 24:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 10 m



5.6 _ Spannweite von 15 m

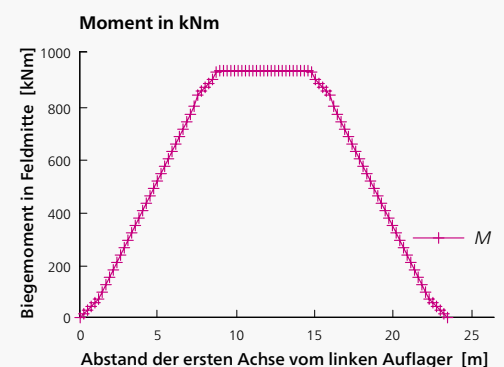
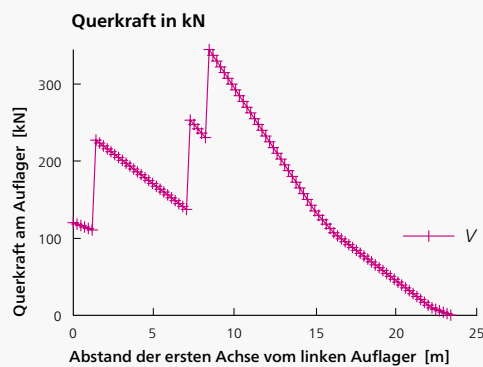
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	345	0,5
3	111	120	0,5
4	111	227	0,5
5	137	227	0,5
6	137	253	0,5
7	231	253	0,5
8	231	345	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	936	0,5
2	0	936	0,5

Abb. 25:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 15 m



5.7 _ Spannweite von 20 m

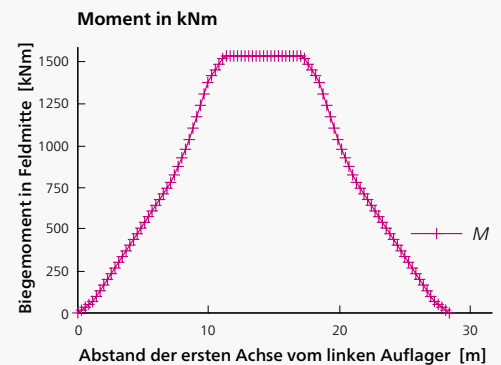
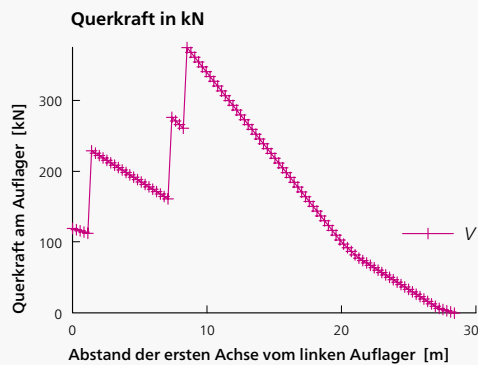
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	376	0,5
3	113	120	0,5
4	113	230	0,5
5	162	230	0,5
6	162	277	0,5
7	262	277	0,5
8	262	376	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	1.536	1

Abb. 26:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 20 m



5.8 _ Spannweite von 25 m

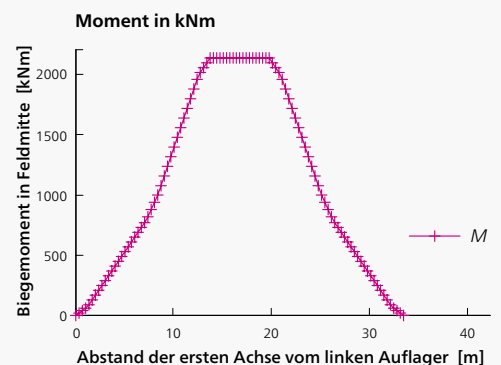
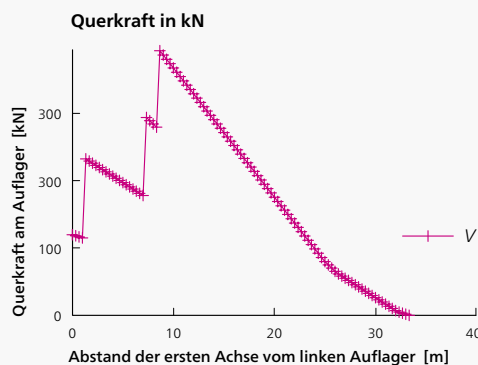
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	394	0,5
3	115	120	0,5
4	115	233	0,5
5	178	233	0,5
6	178	295	0,5
7	280	295	0,5
8	280	394	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{min}	N
1	0	2136	1

Abb. 27:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 25 m



5.9 _ Spannweite von 50 m

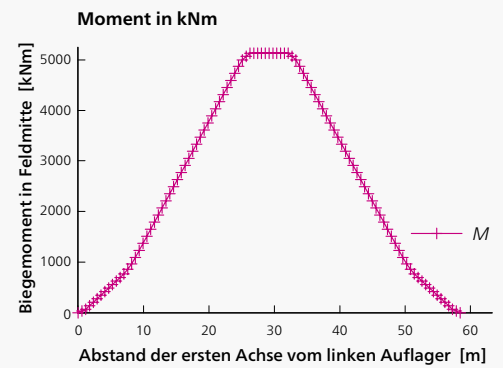
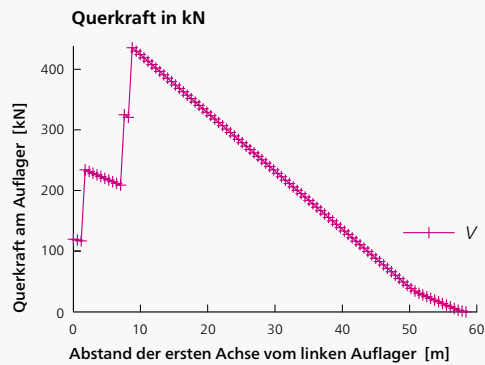
Querkraft in kN

Nr.	V_{min}	V_{max}	N
1	0	120	0,5
2	0	436	0,5
3	117	120	0,5
4	117	234	0,5
5	209	234	0,5
6	209	325	0,5
7	321	325	0,5
8	321	436	0,5

Moment in kNm

Nr.	M_{min}	M_{max}	N
1	0	5.136	1

Abb. 28:
Schnittgrößen
infolge einer Überfahrt
des LM3 nach
DIN EN 1991-2:2010 [9]
und Auswertung mit
der Rainflowmethode
bei einer Spannweite
von 50 m



6_Zusammenfassung

Wirkt eine Belastung wiederkehrend auf ein Bauteil ein, kann ein Versagen unterhalb der nominellen Bemessungsfestigkeit auftreten.

Dieses sogenannte Ermüdungsversagen ist daher insbesondere bei Straßenbrücken in der Bemessung zu berücksichtigen. Dazu bietet DIN EN 1995-2:2010 [1] bzw.

FprEN 1995-1-1:2025 [3] ein Verfahren an, mit dessen Hilfe diese Auswirkungen erfasst werden können. Dazu wird der Faktor k_{fat} ermittelt, der im Wesentlichen von der Art der Beanspruchung, der Anzahl der Lastwechsel, dem Spannungsverhältnis und dem Spannungsniveau abhängt. Dieser Faktor ist analog des Modifikationsbeiwerts k_{mod} bei einem Nachweis der statischen Belastung nach DIN EN 1995-1-1:2010 [14] zu verwenden.

Da die Ermüdungsfestigkeit bzw. der Ermüdungsbeiwert k_{fat} vom Spannungsniveau abhängt, sind bei der Ermittlung der ermüdungsrelevanten Einwirkung alle Lasten zu berücksichtigen, die auf das Bauwerk während dieser wiederkehrenden Belastung während deren Einwirkungsdauer einwirken. Damit ist z. B. im Gegensatz zum Stahlbau das Eigengewicht bei der Ermittlung der ermüdungsrelevanten Einwirkungen in der Berechnung zu berücksichtigen.

Der Ermüdungsbeiwert k_{fat} wird im Wesentlichen durch die Auswertung von Ermüdungsversuchen bestimmt. In diesen Versuchen wird üblicherweise von einer konstanten Amplitude ausgegangen. Sollten verschiedenen Schwingungen überlagert werden, wird oft die Palmgren-Miner-Regel angewandt.

Aus den in DIN EN 1995-1-1:2010 [14] bzw. FprEN 1995-1-1:2025 [3] gegebenen Bemessungsgleichungen kann für diesen Nachweis die ertragbare Anzahl an Schwingungen bestimmt werden, so dass auch die Palmgren-Miner-Regel zur Anwendung kommen kann.

Damit lassen sich – entsprechend dem heutigen Wissen – die Auswirkungen infolge einer wiederkehrenden Belastung auf die Tragfähigkeit von Holzbauwerken bestimmen. Anzumerken ist allerdings auch, dass einige Sachverhalte, wie z. B. Existenz einer Dauerfestigkeit oder Ermüdungsverhalten von Verbindungsmitteln mit großen Durchmesser noch nicht abschließend geklärt sind.

7_ Literatur

- [1] DIN EN 1995-2:2010, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken
- [2] DIN EN 1995-2/NA:2011, Nationaler Anhang – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken
- [3] FprEN 1995-1-1:2025, Eurocode 5 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [4] DIN EN 1995-1-1/NA:2013, Nationaler Anhang – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [5] Schänzlin, J. 2022, k_c -method – consideration of creep deformations / CEN/TC250/SC5/WG3 - N354. 2022. – Forschungsbericht, <https://opus.bsz-bw.de/hbc/frontdoor/index/index/start/3/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/Sch%C3%A4nzlin/docId/82>
- [6] DIN EN 1992-2:2010, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln
- [7] Schänzlin, J., 2019. „Offene Fragen – Ermüdungsnachweis.“ Interner Bericht. Veröffentlichung im Rahmen von CEN/TC250/TC5 (Holz) zur Abstimmung der offenen Fragen im Hinblick auf den Ermüdungsnachweis
- [8] DIN EN 1991-3:2006, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen
- [9] DIN EN 1991-2:2010, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
- [10] DIN EN 1990:2010, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [11] Kuhlmann, U., J. Schänzlin, and P. Aldi. 2008. „Timber-Concrete-Composite Structures for Road Bridges: Experimental Investigations on the Interface Fatigue Strength.“ In VII Workshop Italiano Sulle Strutture Composte. Benevento Italien.
- [12] Kudla, K. 2017. „Kerven als Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken.“ Dissertation, institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Mitteilung 2017/2. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18419/opus-9432>
- [13] Mönch, M. 2026. „Performance of Notched Connections Under Static and Cyclic Loading for Timber-Concrete Composite Systems.“ Institute of Structural Design.“ Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf.
- [14] DIN EN 1995-1-1:2010, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [15] DIN EN 1991-2/NA:2012, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken – Nationaler Anhang – National festzulegende Parameter

Alle Normen können bei
DIN media, Berlin, bezogen werden.

Impressum

Herausgeber:

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.
Heinz-Fangman-Straße 2
D-42287 Wuppertal
info@ingenieurholzbau.de



**Ingenieur
Holzbau.de**

Eine Initiative der
Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

Bearbeitung 1. Auflage:

– Prof. Dr.-Ing. habil Jörg Schänzlin,
Hochschule Biberach

Begleitende Arbeitsgruppe 1. Auflage:

– Dr.-Ing. Tobias Wiegand,
Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.,
Wuppertal
– M. Sc. Johannes Weinmann,
Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG
– Dipl.-Ing. Anke Blume,
Holzbau Deutschland Institut e.V., Berlin
– Dipl.-Ing.(FH) Jörg Bühler
Holzbau Deutschland Institut e.V., Berlin

holzbau handbuch

Reihe 2: Tragwerksplanung

Teil 1: Allgemeines

Folge 5: Ermüdungsnachweise im Holzbau

Erschienen: Juni 2026

ISSN 0466-2114

Abbildungen:

Titel: Martin Maier Photography BFF
Abb. 1 – 29: Prof. Dr.-Ing. habil Jörg Schänzlin,
Hochschule Biberach

Gestaltung 1. Auflage:

Schöne Aussichten:
Oliver Iserloh, Dresden



**Ingenieur
Holzbau.de**

Eine Initiative der
Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

Informationsverein Holz e.V.
Humboldtstraße 45
D-40237 Düsseldorf
+49 (0) 211 966 55 80
info@informationsdienst-holz.de
www.informationsdienst-holz.de

Technische Anfragen an:

Fachberatung Holzbau

Tel. +49 (0)30 57 70 19 95
Montag bis Freitag 9 bis 16 Uhr
Dieser Service ist kostenfrei.
fachberatung@informationsdienst-holz.de
www.informationsdienst-holz.de

Ein Angebot des
Holzbau Deutschland Institut e.V.
in Kooperation mit dem
Informationsverein Holz e.V.