



Arbeitsblatt 9
Überarbeitete Ausgabe 2009-03

Bewehren von Stahlbetontragwerken nach DIN 1045-1:2001+A1:2008-07 Nachweis gegen Ermüdung für Betonstahl

Herstellung und Herausgabe:
Institut für Stahlbetonbewehrung e.V.

Prüfung:
Dr.-Ing. J. Moersch

Nachweis gegen Ermüdung für Betonstahl (DIN 1045-1, 10.8)

1 Grundsätzliches

Der Nachweis gegen Ermüdung ist ein Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, der unter eigens definierten Einwirkungskombinationen des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit zu führen ist. Grundsätzlich ist ein hinreichender Widerstand gegen Ermüdung für Beton und Bewehrung getrennt nachzuweisen. Die Ermüdungsbeanspruchung des Betonstahls ist nur im Bereich von Zugspannungen zu überprüfen.

Kein Nachweis gegen Ermüdung ist im Allgemeinen bei folgenden Bauwerken und Bauteilen erforderlich:

- Bauwerke des üblichen Hochbaus unter vorwiegend ruhender Belastung
- Bauwerke, welche die Bedingungen der Anforderungsklassen A und B nach DIN 1045-1, Tabelle 18 erfüllen
- Geh- und Radwegbrücken
- Bogen- und Rahmentragwerke mit einer Erdüberschüttung $\geq 1,0$ m (Straßenbrücken) bzw. $\geq 1,5$ m (Eisenbahnbrücken)
- Fundamente von Straßen- und Eisenbahnbrücken
- Straßenbrücken
 - Widerlager, Pfeiler und Stützen, die nicht biegesteif mit dem Überbau verbunden sind
 - Stützwände (außer Platten und Wände von Hohlwiderlagern)
- Eisenbahnbrücken
 - Pfeiler und Stützen, die nicht biegesteif mit dem Überbau verbunden sind

Hinweis:

Diese Aufzählung ist in DIN 1045-1: 2001+A1:2008-07 nicht enthalten, sondern nur im DIN-Fachbericht 102 und gilt damit formal eigentlich nur für Brücken.

2 Einwirkungskombinationen

Vereinfachter Nachweis nach Abschnitt 4.3:

- Häufige Einwirkungskombination nach DIN 1055-100

Genauere Nachweise nach Abschnitt 4.1 und 4.2:

- Ständige Einwirkungen
- Maßgebender charakteristischer Wert der Vorspannung
- Wahrscheinlicher Wert der Setzungen, sofern ungünstig wirkend
- Häufiger Wert der Temperatureinwirkung, sofern ungünstig wirkend
- Maßgebliche Einwirkungen aus Nutzlasten
- wo relevant, Windböen (DIN-Fachbericht 102)

INSTITUT FÜR STAHLBETONBEWEHRUNG e.V.

3 Werkstoffdaten	
3.1 Wöhlerlinie	3.2 Darstellung der Wöhlerlinie
<p>Die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffes wird durch die Wöhlerlinie beschrieben. Sie besteht aus Abschnitten mit unterschiedlicher Neigung innerhalb derer folgender Zusammenhang zwischen Schwingbreite und Lastspielzahl gilt.</p> $(\Delta\sigma)^m \cdot N = const$	

3.3 Charakteristische Werte der Wöhlerlinie											
Die in nachstehender Tabelle grau hinterlegten charakteristischen Werte der Wöhlerlinie wurden DIN 1045-1, Tabelle 16 entnommen und auf den Bereich zwischen 10^5 und 10^{10} Lastspielzahlen ergänzt. Die Norm erlaubt Abweichungen (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zustimmung im Einzelfall, Prüfzeugnis).											
Betonstahl		Spannungs-exponent m		$\Delta\sigma_{Rsk}$ (N/mm ²)							
	N*	k ₁	k ₂	10 ⁵	10 ⁶	2·10 ⁶	5·10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰
Gerade Stäbe und gebogene Stäbe ^a d _s ≤ 28 mm	10 ⁶	5	9 ^c	277	175	162	146	135	105	81	63
			5	277	175	152	127	110	70	44	28
Gerade Stäbe und gebogene Stäbe ^a d _s > 28 mm	10 ⁶	5	9 ^c	230	145	134	121	112	87	67	52
			5	230	145	126	105	91	58	36	23
Geschweißte Stäbe und Betonstahlmatten einschließlich Heft- und Stumpfstoßverbindungen ^b	10 ⁶	4	5	151	85	74	62	54	34	21	13
<p>^a Für d_{br} < 25 d_s ist $\Delta\sigma_{Rsk}$ mit dem Reduktionsfaktor $\xi = 0,35 + 0,026 d_{br} / d_s$ zu multiplizieren. Dabei ist d_s der Stabdurchmesser d_{br} der Biegerolldurchmesser. Für Stäbe d_s > 28 mm ist $\Delta\sigma_{Rsk} = 145$ N/mm².</p> <p>^b Sofern nicht andere Wöhlerlinien durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall nachgewiesen werden.</p> <p>^c In korrosiven Umgebungsbedingungen (XC2, XC3, XC4, XS, XD) sind weitere Überlegungen zur Wöhlerlinie anzustellen. Wenn keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, ist für k₂ ein reduzierter Wert $5 \leq k_2 < 9$ anzusetzen.</p>											

3.4 Bemessungswerte der Wöhlerlinie
Die Bemessungswöhlerlinie erhält man durch Division der Spannungen der charakteristischen Wöhlerlinie durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{s, fat}$ nach Tabelle 2 der DIN 1045-1. Für den Knickpunkt der Bemessungswöhlerlinie gilt:
$\Delta\sigma_{Rsd}(N^*) = \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / \gamma_{s, fat}$
Im Regelfall beträgt der Teilsicherheitsbeiwert für den Bauteilwiderstand $\gamma_{s, fat} = 1,15$. Werden die der Spannungsschwingbreite der Einwirkungen zugrunde liegenden Schnittgrößen jedoch mit nichtlinearen Berechnungsverfahren nach DIN 1045-1, 8.5.1 berechnet, so ist ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{s, fat} = 1,3$ anzunehmen.

4.1 Betriebsfestigkeitsnachweis nach Palmgren-Miner (DIN 1045-1, 10.8.3)

Bei bekanntem Spannungskollektiv ist nachzuweisen, dass die Schädigungssumme $D_{Ed} \leq 1$ ist.
Für die Bestimmung von D_{Ed} gilt:

$$D_{Ed} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \frac{n_i}{N_{i,d}} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \frac{n_i}{N^*} \left[\frac{\Delta\sigma_{s,i}}{\Delta\sigma_{Rsd}(N^*)} \right]^k \quad N_{i,d} = N^* \cdot \left[\frac{\Delta\sigma_{Rsd}(N^*)}{\Delta\sigma_{s,i}} \right]^k$$

Die jeweiligen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{s,i}$ sind unter der maßgebenden Einwirkungskombination nach Abschnitt 2 zu bestimmen. Der Wert n_i bezeichnet die zugehörige Lastspielzahl. Für $\Delta\sigma_{s,i} > \Delta\sigma_{Rsd}(N^*)$ gilt $k=k_1$, anderenfalls muss $k=k_2$ angenommen werden.

4.2 Nachweis über die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite

Anstelle des Betriebsfestigkeitsnachweises nach Palmgren-Miner (siehe 4.1) darf der Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit über eine schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{s,equ}$ erfolgen. Der Nachweis ist erbracht, wenn gilt:

$$\gamma_{F,fat} \cdot \gamma_{Ed,fat} \cdot \Delta\sigma_{s,equ} \leq \Delta\sigma_{Rsd}(N^*) = \Delta\sigma_{Rsk}(N^*) / \gamma_{s,fat}$$

$$\text{mit: } \gamma_{F,fat} = \gamma_{Ed,fat} = 1,0; \gamma_{s,fat} = 1,15$$

Bei bekanntem Beanspruchungskollektiv ergibt sich $\Delta\sigma_{s,equ}$ für $N = N^*$ zu:

$$\Delta\sigma_{s,equ}(N^*) = \sqrt[k_2]{\frac{[\Delta\sigma_{Rsd}(N^*)]^{k_2-k_1} \cdot \sum n_i \cdot \Delta\sigma_{s,i} + \sum n_j \cdot \Delta\sigma_{s,j}}{N^*}}$$

mit: k_1, k_2, N^* und $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ nach Tabelle in Abschnitt 3.3

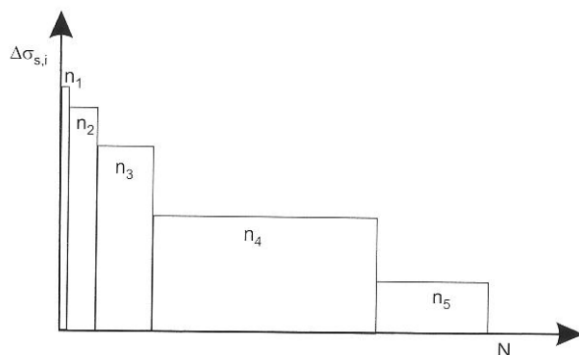
n_i : Anzahl Lastwechsel mit Spannung $\Delta\sigma_{s,i} \geq \Delta\sigma_{Rsd}(N^*)$

n_j : Anzahl Lastwechsel mit Spannung $\Delta\sigma_{s,j} < \Delta\sigma_{Rsd}(N^*)$

Bei unbekanntem Spannungskollektiv kann die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite näherungsweise angenommen werden zu:

- $\Delta\sigma_{s,equ} = \max \Delta\sigma_s$ bei üblichen Hochbauten unter nicht ruhender Belastung.
 $\max \Delta\sigma_s$ ist unter der maßgebenden Einwirkungskombination nach 2 zu berechnen.
- $\Delta\sigma_{s,equ}$ bei Brücken nach DIN-Fachbericht 102, Anhang 106 bzw. den entsprechenden Bemessungsnormen

Beispiel eines Kollektivs aus 5 ($i = 1 + 5$) Belastungsgruppen ($\Delta\sigma_{s,i}; n_i$)



4.3 Vereinfachter Nachweis

Bei ungeschweißten, geraden Stäben ohne Korrosionsgefahr unter Zugbeanspruchung ist ausreichender Widerstand gegen Ermüdung gegeben, wenn unter der häufigen Einwirkungskombination gilt:

$$\Delta\sigma_s \leq 70 \text{ N/mm}^2$$

Im Bereich von Schweißverbindungen und mechanischen Kopplungen ist kein Nachweis der Ermüdungsfestigkeit erforderlich, wenn der Betonquerschnitt im betreffenden Bereich unter der häufigen Einwirkungskombination und bei Berücksichtigung des Abminderungsfaktors von 0,75 für den Mittelwert der Vorspannkraft P_{mt} vollständig unter Druckspannungen steht.

5	Weitere Regelungen in DIN 1045-1	
5.1	Schweißen (DIN 1045-1, Tabelle 12)	
Verbindungen und Schweißverfahren unterteilt nach Belastungsarten (vorwiegend ruhend, Zeile 1 bis 6; nicht vorwiegend ruhend, Zeile 7 bis 9).		
5.2	Hin- und Zurückbiegen (DIN 1045-1, 12.3.2)	
Kaltbiegen:	Der Stabdurchmesser darf höchstens 14 mm sein. Mehrfachbiegungen an derselben Stelle sind unzulässig. Bei nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung gilt für den Biegedorndurchmesser beim Hinbiegen: $d_{br} \geq 15 d_s$ $\Delta\sigma_s = 50 \text{ N/mm}^2$ (Bemessungswert)	
Warmbiegen, Warmzurückbiegen:	$\Delta\sigma_s = 50 \text{ N/mm}^2$ (Bemessungswert)	

6 Beispiele

6.1 Ertragbare Lastspielzahl bei Einstufenkollektiv mit vorgegebener Schwingbreite

Für eine vorgegebene Schwingbreite von $\Delta\sigma_s = 250 \text{ N/mm}^2$ errechnet sich für einen ungeschweißten Betonstahl mit $d_s \leq 28 \text{ mm}$ ohne Korrosionsgefahr die ertragbare Lastspielzahl N_L zu:

$$N_L = \left(\frac{\Delta\sigma_{Rsd}(N^*)}{\Delta\sigma_s} \right)^k \cdot N^* = \left(\frac{175}{1,15 \cdot 250} \right)^5 \cdot 10^6 = 0,08 \cdot 10^6$$

Der Exponent k beträgt im vorliegenden Fall $k = 5$, da $\Delta\sigma_s = 250 \text{ N/mm}^2 > \Delta\sigma_{Rsd} = 152,2 \text{ N/mm}^2$ ist.

6.2 Näherungsnachweis mit schadensäquivalenter Schwingbreite

Als Beispiel sei das im Bild in 4.2 dargestellte Spannungskollektiv vorgegeben. Die zugehörigen Schwingbreiten sowie die Lastspielzahlen enthält nachstehende Tabelle. Es wird wiederum von einem geraden, ungeschweißten Betonstahl mit $d_s \leq 28 \text{ mm}$ ohne Korrosionsgefahr ausgegangen.

i =	1	2	3	4	5
$n_i (*10^6)$	0,01	0,05	0,1	0,8	0,2
$\sigma_{s,i} [N/mm^2]$	250	220	200	170	140

Für die schadensäquivalente Schwingbreite ergibt sich:

$$\Delta\sigma_{s, equ}(N^*) = \sqrt[9]{ \frac{ \left(\frac{175}{1,15} \right)^4 \cdot [0,01 \cdot 250^5 + 0,05 \cdot 220^5 + 0,1 \cdot 200^5 + 0,8 \cdot 170^5] + [0,2 \cdot 140^9] }{ 10^6 } } = 167 \text{ N/mm}^2$$

Die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite ist also geringfügig größer als der zulässige Wert von $\Delta\sigma_{Rsd} = 152,2 \text{ N/mm}^2$. Der Nachweis ist demnach **nicht** erfüllt.

6.3 Nachweis der Betriebsfestigkeit nach Palmgren-Miner

Für das in der Tabelle in Abschnitt 6.2 angegebene Spannungskollektiv ergibt sich für einen ungeschweißten Betonstahl mit $d_s \leq 28 \text{ mm}$ ohne Korrosionsgefahr eine Schädigungssumme von $D_{Ed} = 2,31 > 1$. Der Nachweis ist somit **nicht** erfüllt.

i =	1	2	3	4	5	
$n_i (*10^6)$	0,01	0,05	0,1	0,8	0,2	
$\sigma_{s,i} [N/mm^2]$	250	220	200	170	140	
k	5	5	5	5	9	
$N_{i,d} [*10^6]$	0,084	0,158	0,255	0,575	2,118	$D_{Ed} =$
$n_i/N_{i,d}$	0,120	0,316	0,392	1,392	0,094	2,31

Tabellarische Darstellung des Betriebsfestigkeitsnachweises nach Palmgren-Miner

6.4 Abschätzung der Lastzyklen je Lebensdauer im Hochbau

$$n_{ges} = \text{Jahre} \cdot \frac{\text{Arbeitstage oder Betriebstage}}{\text{Jahr}} \cdot \frac{\text{Betriebsstunden}}{\text{Tag}} \cdot \frac{\text{Lastzyklen}}{\text{Stunden}}$$

Beispiel: Lagerhalle 30 Jahre Lebensdauer
 250 Betriebstage/Jahr
 16 Stunden/Tag (2 Schichten)
 60 Zyklen/Stunde
 $n_{ges} = 7,2 \cdot 10^6$

- 7.1** Bei den in DIN 1045-1, Tabelle 11 angegebenen Werten der Wöhlerlinien handelt es sich um charakteristische Werkstoffwerte, die dem 5%-Quantil der Bruchlastverteilungen bei den angegebenen Schwingbreiten entsprechen. Die dort angegebenen Werte stimmen für Betonstahl in Stäben mit den Werten für die Bemessung auf Ermüdung mit den Angaben in Tabelle 16 überein. Lediglich der charakteristische Wert $\Delta\sigma_{Rsk}$ für geschweißte Stäbe und Betonstahlmatten wurde um 15 N/mm² gegenüber den Angaben in der Tabelle 11 abgemindert.
- 7.2** Gegenüber der alten Version der DIN 1045-1, Tabelle 16 sind Kopplungen (mechanische Verbindungen) nicht mehr enthalten. Werte für die Ermüdungsfestigkeit sind den jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zu entnehmen.
- 7.3** Bei ungeschweißten Bewehrungsstählen wird die Neigung k_2 von den Umweltbedingungen abhängig gemacht.
Bei nicht korrosionsfördernder Umgebung (Umweltklasse XC1) gilt der günstige Wert von $k_2 = 9$. Bei korrosionsauslösenden Umgebungsbedingungen (XC2, XC3, XC4, XS, XD) sind weitere Überlegungen zur Wöhlerlinie anzustellen. Wenn keine genaueren Erkenntnisse z. B. aus regelmäßigen Bauwerksüberwachungen vorliegen, ist für k_2 ein reduzierter Wert $5 \leq k_2 < 9$ anzusetzen.
Diese Regelung trägt der Tatsache Rechnung, dass bei verstärkter Bewehrungskorrosion, z. B. ausgelöst durch Chloride, Lochfraß eintreten kann, wodurch der Widerstand gegen Ermüdung abgemindert werden kann.
Liegen die Umweltklassen XC2 – XC4 (mögliche Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung der Betonüberdeckung) vor, so wird empfohlen, den Beginn der Korrosion aufgrund von Lebensdauerbetrachtungen (Karbonatisierungsfortschritt, Betongüte, Betondeckung) abzuschätzen und den Nachweis mit zwei Teilkollektiven und zwei Bemessungswöhlerlinien (jeweils mit und ohne Korrosionseinfluss) zu führen.
- 7.4** DIN 1045-1, Tabelle 16, Fußnote b erlaubt die Benutzung anderer Wöhlerlinien für die Bemessung, sofern gesicherte Versuchsergebnisse (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zustimmung im Einzelfall) vorliegen.
Am ISB vorliegende Versuchsergebnisse deuten an, dass für einige Betonstähle durchaus effizientere Wöhlerlinien nachgewiesen werden könnten. Demnach scheinen folgende Annahmen für die Spannungsexponenten im „Dauerschwingfestigkeitsbereich“ erreichbar:
- Spannungsexponenten für

Betonstabstahl	$k_2 = 15$ (Umweltbedingung XC 1)
Betonstahlmatten	$k_2 = 9$ (Umweltbedingung XC 1)
- 7.5 Maximale Spannungsschwingbreite für den Zeitfestigkeitsbereich**
DIN 1045-1 definiert keine Obergrenze für den Zeitfestigkeitsbereich bei kleinen Lastspielzahlen. Diesbezüglich wird empfohlen, den Zeitfestigkeitsbereich auf Lastspielzahlen $N > 5 \cdot 10^4$ zu begrenzen. Hieraus ergibt sich bei ungeschweißten, geraden Betonstählen eine ertragbare Schwingbreite von
 $\max \Delta\sigma_{Rsk} \approx 320 \text{ N/mm}^2$ für Betonstahl mit $d_s \leq 28 \text{ mm}$ und 264 N/mm^2 mit $d_s > 28 \text{ mm}$. Für geschweißte Matten und mechanische Verbindungen sollte $\max \Delta\sigma_{Rsk} = 180 \text{ N/mm}^2$ nicht überschreiten.
- 7.6. Besonderheiten bei der Bestimmung der schadigungsäquivalenten Schwingbreite**
Die in 4.2 angegebene Beziehung zur Bestimmung der schadensäquivalenten Schwingbreite $\Delta\sigma_{s, equ}$ geht von einer Bezugslastspielzahl $N = N^* = 1 \cdot 10^6$ aus.
Der DIN Fachbericht 102, Anhang 106 bezieht sich bei der Bestimmung von $\Delta\sigma_{s, equ}$ dagegen bei Straßenbrücken auf eine Lastspielzahl $N = 2 \cdot 10^6$. Dies bedeutet, dass bei Verwendung der schadensäquivalenten Schwingbreite nach DIN Fachbericht 102 für den Nachweis nach 4.2 die Rechenwerte für N^* und $\Delta\sigma_{Rsk} (N^*)$ entsprechend anzupassen sind (Werte für $\Delta\sigma_{Rsk}$ für $N = 2 \cdot 10^6$ siehe Tabelle in 3.3).