

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Bemessung von Kranbahnträgern

## Grundlagen der Berechnung und Bemessung nach Eurocode 3-6 Teil 2: Beulen, Ermüdung, Kranbahnträger für Hängekrane und Laufkatzen

Die neuen Nachweiskonzepte der Eurocodes in Bezug auf Beulen der Stege von Kranbahnträgern sowie zur Ermüdung infolge häufig wechselnder Beanspruchungen sind wesentliche Inhalte dieses zweiten Teils des Beitrages „Bemessung von Kranbahnträgern“. In vielen Fällen werden Kranbahnträger ausgeführt, die durch Radlasten auf dem Unterflansch belastet werden. Unterflansch-Laufkatzen oder Hängekrane hängen am Unterflansch eines als Kranbahnträger bezeichneten Kranbahnträgers. Die Radlasteinleitung am Unterflansch führt dabei zu einem mehrachsigen Spannungszustand im Untergurt des Kranbahnträgers.



Die Materialermüdung infolge häufig wechselnder Beanspruchungen führt zu Schädigungen der Bauteile und zur Rissbildung. Bei Kranbahnträgern ist deshalb neben den üblichen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen ein Nachweis zur Ermüdung zu führen.

Bei schwerem Kranbetrieb bildet der Ermüdungsnachweis oft die maßgebende Größe zur Dimensionierung. Bereits bei Entwurf und Planung von Kranbahnträgern sollte auf eine ermüdungsunempfindliche Konstruktion geachtet werden.

Eine ermüdungsgerechte Konstruktion ist nicht durch Berechnungen zu erzielen, sondern durch die Ausbildung ermüdungsunempfindlicher Konstruktionsdetails sowie deren Herstellung und Montage.

Für die nachfolgenden Nachweise und Nachweiskonzepte gelten die im 1. Teil [22] beschriebenen Grundlagen zu Kranen und Kranbahnen (wie Normensituation, Besonderheiten von Kranbahnen, ...) und die dort angegebenen Berechnungsgrundlagen (Einwirkungen, dynamische Faktoren, Lastgruppen, ...).

## 1. Beulnachweise nach DIN EN 1993-1-5

### 1.1 Allgemeines

Bei Platten, die durch Druckspannungen  $\sigma$  und/oder Schubspannungen  $\tau$  in der Mittelebene beansprucht werden, besteht die Gefahr der Instabilität durch Beulen. Insbesondere bei Kranbahnträgern kann das Beulen des Steges infolge der konzentrierten Einzellasteinleitung kritisch werden. Beansprucht wird ein Steg-Beulfeld durch Normalspannungen  $\sigma_x$  und Schubspannungen  $\tau_{xz}$  aus globaler Biegung und aus lokaler konzentrierter Radlasteinleitung. Die Sicherheit gegen Versagen durch Beulen ist für gedrückte Bereiche und Stege immer nachzuweisen.

Bei einer Nachweisführung nach DIN EN 1993-1-5 [10, 11] sind die nachfolgend aufgelisteten Einzelnachweise nach DIN EN 1993-1-1 [8, 9] abgedeckt (vgl. Tabelle 5 in [22]).

- Plastisches Stauchen
- Stegblechkrüppeln
- Beulen des Gesamtfeldes unter Querlasten

### 1.2 Nachweise des Steges infolge konzentrierter Radlasteinleitung nach EC 3-1-5

Die Nachweisführung der Stege von Kranbahnträgern auf Beulen infolge der konzentrierten Radlasteinleitung erfolgt nach DIN EN 1993-1-5, Kapitel 6 „Beanspruchbarkeit unter Querbelastung“.

Die Beanspruchbarkeit eines Trägersteges für Querlasten, die über die Flansche an den Längsrändern einwirken, wird nach Abschnitt 6.2 des EC 3-1-5 bestimmt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Flansche infolge ihrer eigenen Querbiegesteifigkeit oder durch Verbände in ihrer Lage quer gehalten werden.

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit eines nicht ausgesteiften oder ausgesteiften Stegbleches bei Plattenbeulen unter Querlast wird nach Gleichung (6.1) des EC 3-1-5 bestimmt zu:

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}}$$

mit

$f_{yw}$	Streckgrenze des Stegbleches
$L_{eff}$	wirksame Lastausbreitungslänge unter Berücksichtigung des Stegbeulens bei Querlasten
$t_w$	Stegblechdicke
$\gamma_{M1}$	Teilsicherheitsbeiwert des Materials

Die Bestimmung des Bemessungswertes der Beanspruchbarkeit setzt die Kenntnis der wirksamen Lastausbreitungslänge  $L_{eff}$  voraus. Deren Ermittlung wird im Folgenden im Rahmen der Nachweisführung für den Beulnachweis bei Stegblechen ohne Längssteifen hergeleitet und die einzelnen Rechenschritte dazu erläutert.

### Berechnung der Länge der starren Lasteinleitung:

In Kapitel 6.3 der DIN EN 1993-1-5 wird die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  definiert. Die Anwendung auf Kranbahnträger liefert nachfolgende Festlegungen:

- (1) Die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  ist die Länge, über die die Radlast auf den Flansch eingeleitet wird (Bild 1a). Diese Länge kann bei Lasteinleitung über die Kranschiene mit einem Lastausbreitungswinkel 1:1 berechnet werden. Der Wert der starren Lasteinleitung sollte jedoch nicht größer als die lichte Höhe  $h_w$  zwischen den Flanschen sein.
- (2) Liegen mehrere Radlasten dicht beieinander, ist in der Regel die Beanspruchbarkeit sowohl für jede Radlast als auch für die gesamte Radbelastung zu bestimmen. Für die gesamte Radbelastung ist die Beanspruchbarkeit mit einer Länge  $s_s$  der starren Lasteinleitung entsprechend dem Abstand der äußeren Radlasten zu ermitteln.

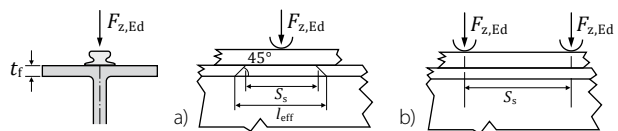


Bild 1. Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  für den Beulnachweis a) bei einer Radlast b) bei zwei (oder allgemein mehreren) nahe beieinander liegenden Radlasten

Die Radlasteinleitung wird – auf der sicheren Seite liegend – punktuell wirkend auf der Oberkante der Schiene angesetzt. Bei einer Lastausbreitung unter  $45^\circ$  wird die effektive Länge  $l_{eff}$  am Stegansatz erreicht. Dabei ist die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  nach Tabelle 4 aus [22] zu bestimmen. Für die starre Lasteinleitungslänge ergibt sich der Wert:

$$s_s = l_{eff} \cdot \frac{h_r}{d_r}$$

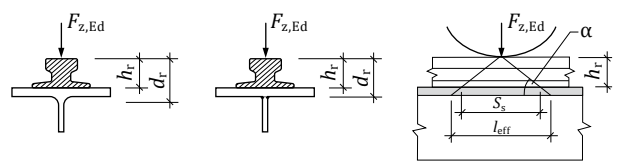


Bild 2. Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  bei Kranrädern nach [17]

Weiterhin sind zur Ermittlung der Beultragfähigkeit folgende Größen zu bestimmen:

- die Quetschgrenze  $F_y$
- der Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda} = \sqrt{F_y/F_{Cr}}$ , mit  $F_{Cr}$  als kritische Beullast
- der Abminderungsfaktor  $\chi_F = \chi_F(\bar{\lambda})$ , der die Quetschgrenze ab einem bestimmten Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}$  abmindert

### Berechnung der kritischen Beullast:

$$F_{Cr} = \frac{E \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot k_F \cdot \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w}$$

mit

$h_w$	lichte Höhe zwischen den Flanschen
$t_w$	Stegdicke

**Beulwerte  $k_F$ :**

DIN EN 1993-1-5 unterscheidet zwischen unterschiedlichen Lasteinleitungsarten:

- Lasten, die einseitig über einen Flansch eingeleitet werden und im Gleichgewicht mit Querkraften im Steg stehen (Bild 3, Typ a)
- Lasten, die beidseitig über beide Flansche eingeleitet werden und mit sich selbst im Gleichgewicht stehen (Bild 3, Typ b)

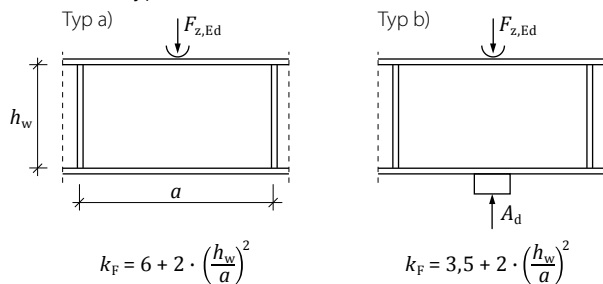


Bild 3. Beulwerte  $k_F$  nach [16]

Im Regelfall ist bei Kranbahnen infolge der wandernden Radlasten der Typ a) anzuwenden, bei dem die Kräfte einseitig an einem Flansch angreifen und im Gleichgewicht mit Querkraften im Stegblech stehen. Der für den Regeltyp a) zu berechnende Beulwert ergibt sich zu:

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2$$

mit

$h_w$  lichte Höhe zwischen den Flanschen  
 $a$  Quersteifenabstand

Der Typ b) tritt über einem Zwischenaufleger auf, wenn dort auf den Einbau von Quersteifen verzichtet wird. Grundsätzlich sind im Auflagerbereich von Kranbahnträgern Quersteifen anzuordnen. Selbst wenn eine Quersteife am Mittelaufleger eines Durchlaufträgers aus Gründen der Beulsicherheit nicht erforderlich sein sollte, so ist aber darauf zu achten, dass über dem Auflager die Querschnittsform erhalten bleibt und ein Gabellager realisiert wird.

An den Endauflagern von Kranbahnträgern sind nach Seeßelberg [16] Quersteifen in jedem Fall dringend empfohlen. Diese gewährleisten die Beulsicherheit und die Erhaltung der Querschnittsform (Biegedrillknicken).

**Bestimmung der Quetschgrenze  $F_y$ :**

Die Quetschgrenze  $F_y$  beschreibt das plastische Stauchen. Der Ermittlung liegt das mechanische Modell nach Bild 4 zugrunde.

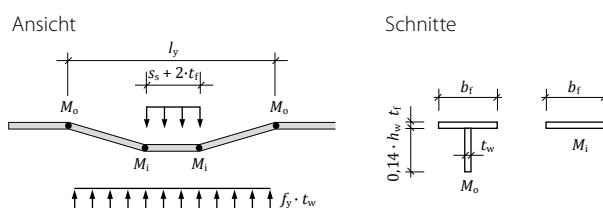


Bild 4. Mechanisches Modell zur Ermittlung der Quetschgrenze nach [17]

Im Flansch werden vier plastische Gelenke angenommen. Für die inneren plastischen Gelenke  $M_i$  werden in der Berechnung nur die Flansche berücksichtigt. Bei der Ermittlung der äußeren Momente  $M_o$  werden sowohl die Flansche als auch der Steg angesetzt. Mit wachsender Schlankheit des Steges nimmt dabei die Stegeindrüklänge  $l_y$  zu.

Für den Lasteinleitungstyp a) ermittelt sich die Quetschlast  $F_y$  mit Hilfe der wirksamen Belastungslänge  $l_y$  zu:

$$F_y = f_y \cdot t_w \cdot l_y \quad \text{und}$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$$

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w}$$

$$m_2 = 0.02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda} > 0.5; \text{ sonst gilt: } m_2 = 0.0$$

mit

$b_f$  Obergurtdicke  
 $h_w$  lichte Höhe zwischen den Flanschen  
 $t_f$  Obergurtdicke  
 $t_w$  Stegdicke

**Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}$ :**

Aus der Quetschgrenze ergibt sich der Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}$  zu:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{l_y \cdot f_y \cdot t_w}{F_{cr}}}$$

**Abminderungsfaktor  $\chi_F$**

Der Abminderungsfaktor  $\chi_F$  ermittelt sich dann zu:

$$\chi_F = \frac{0.5}{\bar{\lambda}} \leq 1.0$$

**Wirksame Länge  $L_{eff}$**

Die wirksame Länge  $L_{eff}$  zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit auf lokales Beulen bestimmt sich wie folgt:

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y$$

**Beulnachweis für die Lasteinleitungsspannungen:**

Mit den zuvor bestimmten Werten ergibt sich der Beulnachweis nach Formel (6.14) der DIN EN 1993-1-5 für die Lasteinleitungsspannungen zu:

$$\eta_2 = \frac{F_{z,Ed}}{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w} \leq 1.0$$

$\gamma_{M1}$

Die Kraft  $F_{z,Ed}$  ist dabei der Bemessungswert der einzelnen Radlast einschließlich des dynamischen Faktors. Bei einer Belastungssituation gemäß Bild 1b stellt der Wert  $F_{z,Ed}$  die Summe der Radlasten dar.

### Interaktionsnachweis:

Zusätzlich zu dem Nachweis des Beulens infolge der lokalen Radlasteinleitung ist der Einfluss aus der globalen Biegebeanspruchung als Interaktionsnachweis zu führen. Die Interaktion des Beulens infolge Lasteinleitungsspannungen mit dem Beulen infolge Biegenormalspannungen aus  $M_{y,Ed}$  wird nachgewiesen durch:

$$\eta_2 + 0.8 \cdot \eta_1 \leq 1.40$$

mit

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y \cdot W_{y,eff}}$$

wobei für die Querschnittsklassen 1 bis 3 gilt:

$$W_{y,eff} = W_{y,el}$$

### 1.3 Flanschinduziertes Stegblechbeulen

Regelungen zum flanschinduzierten Stegblechbeulen sind im Kapitel 8 (1) der DIN EN 1993-1-5 enthalten.

Um das Einknicken des Druckflansches in den Steg zu vermeiden, sollte das Verhältnis  $h_w/t_w$  des Steges folgendes Kriterium erfüllen:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

mit

$h_w$	lichte Höhe zwischen den Flanschen
$t_w$	Stegdicke
$f_{yf}$	Streckgrenze des Flansches
$A_w$	Stegfläche: $A_w = h_w \cdot t_w$
$A_{fc}$	effektive Querschnittsfläche des Druckflansches
$k$	= 0.40 bei Ausnutzung der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit = 0.55 bei Ausnutzung der elastischen Momentenbeanspruchbarkeit

## 2. Ermüdung

### 2.1 Einführung

Für Bauteile und Tragwerke, die während ihrer Nutzungsdauer häufig wechselnden Beanspruchungen unterliegen, muss neben den bekannten Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen auch der Nachweis der Ermüdung geführt werden.

Der Grund dafür ist, dass metallische Werkstoffe unter wechselnden Beanspruchungen bei niedrigeren Spannungen als im Fall ruhender Beanspruchung versagen. Infolge der wechselnden Beanspruchungen bilden sich Ermüdungsrisse, die meist an Kerben infolge von hohen Spannungskonzentrationen entstehen. Bei weiteren wechselnden Beanspruchungen können die Bereiche mit Rissbildung zum Versagen der Konstruktion führen.

Eine wesentliche Kenngröße, die Ermüdungsfestigkeit und damit die Lebensdauer, ist definiert als die Anzahl der Spannungswechsel bzw. Lastspiele infolge wiederholter veränderlicher Beanspruchungen bis zum Versagen. Sie ist von mehreren Faktoren abhängig, die nachfolgend – ohne nähere Erläuterungen – aufgelistet werden. In [17] beschreiben Kuhlmann et. al. diese Einflüsse ausführlich.

- Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$
- Kerbfall (Grad der Kerbwirkung)
- Werkstoff
- Eigenspannungen
- Geometrische Abmessungen
- Mittelspannung, Spannungsverhältnis
- Belastungsgeschichte und -frequenz
- Umgebungsbedingungen (Korrosion, Temperatur)

Zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit bildet der Wöhlerversuch die wesentliche Grundlage, auf die im Abschnitt 2.2 noch näher eingegangen wird.

### 2.2 Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises

#### Betriebsfestigkeit und Dauerfestigkeit:

Die Betriebsfestigkeit bezeichnet die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils, das einer realen, unregelmäßigen Belastung ausgesetzt ist. Dabei ist die reale Belastung durch eine zeitlich, größenmäßig und in der Häufigkeit unregelmäßige Folge von Beanspruchungen gekennzeichnet. Wird eine wechselnde Beanspruchung mit konstanter Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  beliebig oft ertragen, spricht man von der Dauerfestigkeit.

Während früher ein Bauteil üblicherweise dauerfest ausgelegt wurde, ermöglicht das heute zu verwendende Nachweiskonzept der Betriebsfestigkeit eine wirtschaftlichere Auslegung der Konstruktion. Dazu ist es zwingend erforderlich, den Einfluss der realen Beanspruchung auf die Betriebsfestigkeit eines Bauteils zu erfassen.

Es stehen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten zur Ermittlung der Lebensdauer zur Verfügung:

- Experimentelle Lebensdauerermittlung anhand von Simulationsversuchen (in der Baupraxis nicht üblich, da aufwändig und teuer). Diese Möglichkeit wird vor allem im Fahrzeug- und Flugzeugbau eingesetzt.
- Rechnerische Lebensdauerermittlung: Bei einer rechnerischen Lebensdauerermittlung werden zunächst die einwirkenden Betriebslasten bestimmt, aus denen dann die Beanspruchungen des Bauteils ermittelt werden. In einem weiteren Schritt wird mit einer Schadensakkumulationshypothese berechnet, wie groß die Restlebensdauer, d. h. der noch nicht verbrauchte Anteil der Lebensdauer, auf Grund der bisherigen Schädigung ist.

Die einzelnen Berechnungsschritte zur Lebensdauerermittlung sind in Bild 5 schematisch dargestellt.

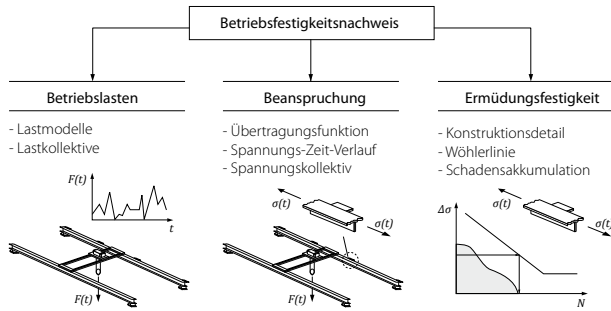


Bild 5. Einzelne Berechnungsschritte beim rechnerischen Betriebsfestigkeitsnachweis nach [17]

**Einwirkende Betriebslasten:**

Die auf ein Bauteil einwirkenden, regellosen Betriebslasten sind zeitlich veränderliche Belastungen, die durch Messung, rechnerische Simulation oder Abschätzung bestimmt werden können.

Für Kranbahnträger kann in Abhängigkeit der Angaben zur verwendeten Krananlage (Brückenspannweite, Kranbahnträgerlänge, Hakenhöhe) und aus den Angaben zu Geschwindigkeiten des Hubwerks, der Kranfahrt und der Katzfahrt für ein typisches Kranspiel die mittlere Spielzeit  $t_A$  bestimmt werden. Über die mittlere Spielzeit und der angenommenen Einsatzzeit des Krans pro Tag lässt sich für eine angenommene Lebensdauer der Krananlage die Anzahl der Lastspiele festlegen.

**Beanspruchung:**

Die aus den einwirkenden Betriebslasten im Bauteil bzw. am Kerbdetail verursachten Beanspruchungen (Spannungs-Zeit-Verläufe) sind anschließend so zu ermitteln, dass sie für eine Nachweisführung des Betriebsfestigkeitsnachweises geeignet sind. Die in Bild 5 angegebene Übertragungsfunktion stellt den funktionalen und zeitlichen Zusammenhang zwischen der äußeren Belastung und den örtlichen Beanspruchungen dar. Im einfachsten Fall stellt die Übertragungsfunktion einen linearen Faktor (z. B.  $1/W$ ) dar, der aus einem einwirkenden Biegemoment  $M$  die Nennspannung  $\sigma$  am Kerbdetail ermittelt. Die Übertragungsfunktion kann in komplexen Fällen auch ein nichtlineares Rechenmodell charakterisieren.

Aus den einwirkenden Spannungs-Zeitverläufen treten im Bauteil geschlossene Spannungs- bzw. Dehnungshysteresen auf, die maßgebend für die Schädigung des Bauteils sind. Über ein Zählverfahren (Rainflow-Methode oder Reservoir-Methode) werden die auftretenden Spannungs-Zeit-Verläufe ausgewertet. Trägt man anschließend die ermittelten Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$  über den zugehörigen Lastspielzahlen  $n_i$  auf, erhält man ein Häufigkeitsdiagramm. Die sich ergebende Summenhäufigkeitskurve bezeichnet man allgemein als Spannungskollektiv bzw. als Spektrum der Spannungsschwingbreiten.

Ein wesentliches Merkmal eines Kollektivs ist seine Völligkeit. Ein leichtes Kollektiv (leichtestes Kollektiv =  $S_0$ ) weist vorwiegend Spannungswechsel auf, die deutlich unterhalb der maximalen Nutzlast bleiben. Damit steht das Kollektiv

$S_0$  für einen Kran, der nur selten seine maximale Hublast trägt und meistens mit wesentlich geringeren Nutzlasten betrieben wird. Das höchste Kollektiv  $S_9$  steht demzufolge für einen Kran, der im Wesentlichen mit der maximalen Hublast beaufschlagt wird.

**Ermüdungsfestigkeit und Schädigungsberechnung:**

Schadensakkumulationshypothesen ermöglichen bei Kenntnis der Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerlinie) eines Kerbdetails die Ermittlung der Lebensdauer bei veränderlichen Spannungsschwingbreiten.

a) Schädigungsberechnung nach Palmgren-Miner

Die einfachste Schadensakkumulationshypothese von Palmgren-Miner (als „Miner-Regel“ bekannt) unterstellt einen linearen Schädigungsverlauf. Reihenfolgeeffekte oder der Einfluss der Größe der Oberlast spielen hierbei keine Rolle. Obwohl diese Annahmen nicht in jedem Fall erfüllt sind, stellt die Palmgren-Miner-Regel dennoch ein sehr brauchbares Werkzeug für die Betriebsfestigkeitsuntersuchung dar. Die lineare Schadensakkumulationshypothese geht davon aus, dass bei einer mehrstufigen Beanspruchung jede Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_i$  die  $n_i$  mal auftritt, einen Schädigungsanteil am Bruchversagen bewirkt, der durch den Quotienten  $n_i/N_i$  gebildet wird.

$N_i$  ist dabei die der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_i$  zugeordnete Bruchlastspielzahl der Ermüdungsfestigkeitskurve des betreffenden Bauteils. Für ein vorliegendes Spannungskollektiv brauchen lediglich die Schädigungsanteile infolge der einzelnen Spannungsspiele addiert zu werden, um feststellen zu können, ob das Bauteil eine ausreichende Ermüdungsfestigkeit aufweist. Ein Versagen tritt demnach dann auf, wenn die Schadenssumme der Teilschädigungen den Wert  $D = 1.0$  erreicht.

**Palmgren-Miner-Regel:**  

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \dots = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$$

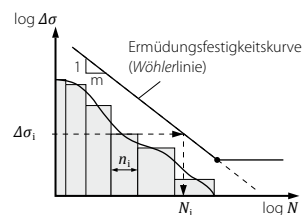


Bild 6. Schädigungsberechnung nach Palmgren-Miner aus [17]

b) Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

Unter Anwendung einer geeigneten Schadensakkumulationshypothese lässt sich jedes beliebige Spannungskollektiv (Mehrstufen-Kollektiv) in ein Einstufen-Kollektiv mit  $\Delta\sigma_E$  und  $n_E$  überführen, das dieselbe Schädigung bewirkt (Schadensäquivalent). In diesem Fall spricht man vom schadensäquivalenten Spannungskollektiv. In der Literatur wird die Herleitung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite von Kuhlmann [17] und Seeßelberg [16] ausführlich beschreiben, so dass an dieser Stelle nur die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen beschrieben werden.

Die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite ist lediglich von der Steigung  $m$  der Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerlinie) und vom Spannungskollektiv abhängig. Sie berechnet sich zu:

$$\Delta\sigma_E = \left[ \frac{1}{n_E} \cdot \sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) \right]^{\frac{1}{m}}$$

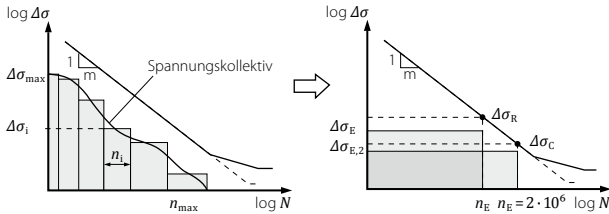


Bild 7. Schadensäquivalente Spannungsschwingbreite nach [17]

Ist die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_E$  bekannt, kann der Betriebsfestigkeitsnachweis für eine bestimmte Anzahl von  $n_E$  Spannungsspielen als Spannungsnachweis wie folgt geführt werden:

$$\Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_R$$

mit

$\Delta\sigma_R$  Ermüdungsfestigkeit des betreffenden Kerbfalls für  $n = n_E$

Diese Vorgehensweise bildet die Grundlage für die Betriebsfestigkeitsnachweise in Eurocode 3.

Nach Eurocode 3 wird der Referenzwert  $n_E = 2 \cdot 10^6$  für den Betriebsfestigkeitsnachweis zugrunde gelegt. Der zu führende Nachweis der Betriebsfestigkeit kann dadurch einfach als Vergleich der daraus resultierenden schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{E,2}$  mit dem Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit des entsprechenden Kerbfalls  $\Delta\sigma_c$  geführt werden:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \left[ \frac{1}{2 \cdot 10^6} \cdot \sum (\Delta\sigma_i^m \cdot n_i) \right]^{\frac{1}{m}} \leq \Delta\sigma_c$$

mit

$\Delta\sigma_{E,2}$  schadensäquivalente Spannungsschwingbreite für  $n_E = 2 \cdot 10^6$  Schwingspiele  
 $\Delta\sigma_i, n_i$  zugrunde gelegtes Spannungskollektiv  
 $\Delta\sigma_c$  Ermüdungsfestigkeit des betreffenden Kerbfalls für  $n = 2 \cdot 10^6$

In vielen Fällen ist zum Zeitpunkt der Tragwerksplanung die zu erwartende Betriebsbelastung bzw. das Spannungskollektiv für das betreffende Bauteil noch nicht bekannt. Deshalb wurde der Klammerausdruck in obiger Formel auf der Grundlage einheitlicher Lastmodelle bzw. Lastkollektive ausgewertet. Dadurch ist es unter Verwendung des  $\lambda$ -Beiwerts (schadensäquivalenter Beiwert) einfach möglich, die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite in Bezug auf die maximale Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{max}$  zu ermitteln.

Es gilt:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma_{max}$$

mit

$\lambda$  schadensäquivalenter Beiwert  
 $\Delta\sigma_{max}$  die aus der Ermüdungsbelastung resultierende maximale Spannungsschwingbreite

In DIN 1993-1-9 sind in den Tabellen 8.1 bis 8.10 für die verschiedensten Konstruktionsdetails die Werte  $\Delta\sigma_c$  der Kerbfälle angegeben. Auszugsweise sind für die Kranbahnträger die wesentlichen Fälle im Abschnitt 2.4 dieses Beitrags dargestellt.

Im Anhang A zur DIN EN 1993-1-9 [14, 15] ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der Betriebsfestigkeit zusammenfassend in Bild 8 angegeben.

Lastfolge: Typischer Lastzyklus (n-fach wiederholt in der Nutzungsdauer)	
Spannungs-Zeit-Verlauf am Konstruktionsdetail	
Zählverfahren (Reservoir-Methode)	
Spektrum der Spannungsschwingbreiten	
Anzahl der Spannungsschwingbreiten bis zum Versagen	
Schadensakkumulation (Palmgren-Miner-Regel)	$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} = D_L$

Bild 8. Schadensakkumulation nach [14, Anhang A]

### 2.3 Regeln für den Betriebsfestigkeitsnachweis nach Eurocode

#### 2.3.1 Nachweiskonzept nach DIN EN 1993-1-9:

##### Grundlagen

Der Ermüdungsnachweis wird auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts geführt. Basis des Nachweises ist das Nennspannungskonzept mit folgenden Grundlagen:

- Der Nachweis wird mit Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$  und  $\Delta\tau$  geführt.
- Für die Materialgüten S 235 und S 355 sind die Beanspruchbarkeiten gleich.

Voraussetzungen für die Anwendung:

- Werkstoffe entsprechen den Anforderungen der Grundnorm EC 3-1-1
- Begrenzung der Spannungsschwingbreiten nach EC 3-1-9, Kap. 8 unter häufiger Last auf:  
 $\Delta\sigma \leq 1.5 \cdot f_y$  für Längsspannungen und  
 $\Delta\tau \leq 1.5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}$  für Schubspannungen
- Die Nachweisregeln enthalten keinen Temperatureinfluss auf das Ermüdungsversagen.
- Ein Ermüdungsnachweis ist nicht erforderlich, wenn die Zahl der Lastwechsel mit mehr als 50% der Nutzlast 10000 nicht überschreitet (EC 3-6, Kap. 9.1 (2)).

**Zuverlässigkeitskonzepte:**

Der Ermüdungsnachweis ist i.d.R. nach einem der folgenden Konzepte gemäß EC 3-1-9, Kapitel 3 (1) durchzuführen:

- Konzept der Schadenstoleranz
- Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung

Die Wahl des Zuverlässigkeitskonzepts hängt davon ab, ob Ermüdungsrisse ohne Vorankündigung kritisch werden können und wie groß ihre Schadensfolgen sind. Nach Seeßelberg [16] hängt die Entscheidung des Zuverlässigkeitskonzeptes auch davon ab, ob nach Entstehung eines Ermüdungsrisses Lastumlagerungen auf nicht geschädigte Querschnittsteile oder Bauteile möglich sind.

**a) Konzept der Schadenstoleranz:**

Unter bestimmten Bedingungen werden Ermüdungsrisse toleriert. Nach Kuhlmann [17] beruht das Konzept der Schadenstoleranz auf der Annahme, dass das Entstehen und Anwachsen von Ermüdungsrissen sowie deren Folgen durch ein verbindliches Inspektions- und ggf. Instandsetzungsprogramm begrenzt werden. Das Konzept wird empfohlen, wenn sich der Ermüdungsschaden nur örtlich auswirkt. Sobald ein Ermüdungsriß erkannt wird, ist das entsprechende Bauteil entweder instand zu setzen oder auszutauschen. Mit Hilfe der Bruchmechanik kann alternativ auch ein Nachweis geführt werden, ob das Risswachstum ausreichend langsam ist.



Bild 9. Ermüdungsriß am Obergurt einer Auflagerkonsole

Infolge der Akzeptanz von Ermüdungsrissen ist das Sicherheitsniveau so festgelegt, dass am Ende der rechnerischen Nutzungsdauer die Lebensdauer des Bauteils erreicht wird.

Risse an tragenden Bauteilen ohne Möglichkeit der Lastumlagerung sind nicht akzeptabel und sind sofort nach dem Auftreten (Erkennen im Rahmen der Inspektionsintervalle) instand zu setzen. Bild 9 zeigt einen Ermüdungsriß entlang der Kehlnaht am Obergurt einer Auflagerkonsole.

**b) Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung:**

Bei diesem Konzept soll das Entstehen von Rissen verhindert werden. Es wird empfohlen, wenn die Rissbildung schnell zum Versagen der ganzen Konstruktion oder wesentlicher Tragwerksteile führt.

**Teilsicherheitsbeiwerte:**

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{FF}$  (Index *f*: Fatigue) für die Einwirkungen beträgt nach EC 3-6, Kap. 9.2 (1):

$\gamma_{FF} = 1.0$

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{Mf}$  für den Widerstand wird gemäß EC 3-1-9, Tab. 3.1 in Abhängigkeit vom Zuverlässigkeitskonzept und von den voraussichtlichen Schadensfolgen gewählt. Da Kranbahnen i.d.R. schadenstolerant entworfen werden und die Schadensfolgen wegen möglicher Gefährdung von Menschenleben als hoch bewertet werden, ist im Regelfall  $\gamma_{Mf} = 1.15$  zu wählen.

Zuverlässigkeitskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

Tabelle 1. Empfehlungen für  $\gamma_{Mf}$ -Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit nach EC 3-1-9 Tabelle 3.1

Als Standardfall für Kranbahnen ist von einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{Mf} = 1.15$  verbunden mit 3 Inspektionsintervallen auszugehen. Davon abweichende Teilsicherheitsbeiwerte sind an die Mindestanzahl der Inspektionsintervalle gemäß Tabelle NA.3 (EC 3-6) geknüpft.

Teilsicherheitswert $\gamma_{Mf}$	Anzahl der Inspektionsintervalle
1,00	4
1,15	3
1,35	2
1,60	1

Tabelle 2. Erforderliche Anzahl der Inspektionsintervalle nach EC 3-6 Tabelle NA.3

**2.3.2 Lastannahmen für den Ermüdungsnachweis: Beanspruchungsklassen (S-Klassen) nach EC 1-3**

Im Eurocode wurden die Beanspruchungsklassen (S-Klassen) neu definiert. Statt der bisherigen Beanspruchungsgruppen B1 bis B6 wurden 10 Klassen  $S_0$  bis  $S_9$  eingeführt.

Die Einstufung eines Krans erfolgt nach EC 1-3 Tabelle 2.11 über den Lastkollektivbeiwert (Völligkeit des Lastkollektivs) und der Anzahl der Lastspiele. Die Tabelle 2.11 basiert auf einer Gesamtnutzungsdauer der Krananlage von 25 Jahren.

Klasse der Gesamtzahl an Arbeitsspielen	Klasse des Lastkollektivs					
	Q <sub>0</sub> <i>kQ</i> ≤ 0,0313	Q <sub>1</sub> 0,0313 < <i>kQ</i> ≤ 0,0625	Q <sub>2</sub> 0,0625 < <i>kQ</i> ≤ 0,125	Q <sub>3</sub> 0,125 < <i>kQ</i> ≤ 0,25	Q <sub>4</sub> 0,25 < <i>kQ</i> ≤ 0,5	Q <sub>5</sub> 0,5 < <i>kQ</i> ≤ 1,0
U <sub>0</sub>	C ≤ 1,6 · 10 <sup>4</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>
U <sub>1</sub>	1,60 · 10 <sup>4</sup> < C ≤ 3,15 · 10 <sup>4</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>
U <sub>2</sub>	3,15 · 10 <sup>4</sup> < C ≤ 6,30 · 10 <sup>4</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>
U <sub>3</sub>	6,30 · 10 <sup>4</sup> < C ≤ 1,25 · 10 <sup>5</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>
U <sub>4</sub>	1,25 · 10 <sup>5</sup> < C ≤ 2,50 · 10 <sup>5</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
U <sub>5</sub>	2,50 · 10 <sup>5</sup> < C ≤ 5,00 · 10 <sup>5</sup>	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
U <sub>6</sub>	5,00 · 10 <sup>5</sup> < C ≤ 1,00 · 10 <sup>6</sup>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
U <sub>7</sub>	1,00 · 10 <sup>6</sup> < C ≤ 2,00 · 10 <sup>6</sup>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
U <sub>8</sub>	2,00 · 10 <sup>6</sup> < C ≤ 4,00 · 10 <sup>6</sup>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
U <sub>9</sub>	4,00 · 10 <sup>6</sup> < C ≤ 8,00 · 10 <sup>6</sup>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>

Dabei ist  
*kQ* Lastkollektivbeiwert für alle Arbeitsvorgänge des Krans  
*C* Gesamtzahl von Arbeitsspielen während der Nutzungsdauer des Krans  
**Anmerkung:** Die Klassen S<sub>*j*</sub> werden in EN 13001-1 durch den Lasteinwirkungs-Verlaufparameter *s* bestimmt. Dieser ist definiert als:  
*s* = *v* *k* mit:  
*k* Spannungsspektrumfaktor  
*v* Anzahl der Lastspiele *C* bezogen auf 2,0 x 10<sup>6</sup> Lastspiele.  
 Die Klassifizierung basiert auf einer Gesamtnutzungsdauer von 25 Jahren.

Tabelle 3. Klassifizierung der Ermüdungseinwirkungen von Kranen nach DIN EN 13001-1 entsprechend Tabelle 2.11 aus EC 1-3

Im Anhang B Tabelle B.1 „Klassifizierung für die Ermüdungsbeanspruchung“ zur DIN EN 1991-3 [4] sind Empfehlungen für die Beanspruchungsklassen der verschiedenen Arten der Krane enthalten. Diese Tabelle wird nachfolgend auszugsweise angegeben.

Zeile	Art des Krans	Hubklasse	S-Klasse
1	Handbetriebene Krane	HC1	S <sub>0</sub> , S <sub>1</sub>
2	Montagekrane	HC1, HC2	S <sub>0</sub> , S <sub>1</sub>
3	Maschinenhauskrane	HC1	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub>
4	Lagerkrane – mit diskontinuierlichem Betrieb	HC2	S <sub>4</sub>
5	Lager-, Traversen-, Schrottplatzkrane – mit kontinuierlichem Betrieb	HC3, HC4	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>
6	Werkstattkrane	HC2, HC3	S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
7	Brückenlauf-, Anschlagkrane – mit Greifer- oder Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>
8	Gießerekrane	HC2, HC3	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>
9	Tiefenkrane	HC3, HC4	S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub>
10	Stripper-, Beschickungskrane	HC4	S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub>
11	Schmiedekrane	HC4	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>
12	Transportbrücken, Halbportalkrane, Portalkrane mit Katz- oder Drehkran – mit Lasthakenarbeitsweise	HC2	S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub>
13	Transportbrücken, Halbportalkrane, Portalkrane mit Katz- od. Drehkran – mit Greifer- od. Magnetarbeitsweise	HC3, HC4	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>

Tabelle 4. Empfehlungen für die Ermüdungsbeanspruchung nach DIN EN 1991-3 Anhang B Tabelle B.1

### 2.3.3 Berechnung der schädigungsäquivalenten Ermüdungslasten

Unter normalen Betriebsbedingungen des Krans dürfen die Ermüdungslasten mittels schadensäquivalenter Ermüdungslasten *Q<sub>e</sub>* bestimmt werden. Diese dürfen zur Bestimmung von Ermüdungseinwirkungen als konstant für alle Kranpositionen angenommen werden.

Die schadensäquivalente Ermüdungslast *Q<sub>e</sub>* ist so zu bestimmen, dass sie die Einflüsse der aus spezifizierten Betriebsbedingungen entstehenden Spannung-Zeit-Verläufe und des

Verhältnisses der Anzahl der Lastspiele während der erwarteten Nutzungsdauer des Tragwerks zum Bezugswert von *N* = 2,0 · 10<sup>6</sup> Lastspielen beinhaltet.

Nach DIN EN 1991-3 [4] Gleichung (2.16) kann die Ermüdungslast angegeben werden mit:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max,i}$$

mit

*Q<sub>max,i</sub>* Maximalwert der charakteristischen vertikalen Radlast *i*  
 $\lambda_i = \lambda_{1,i} \cdot \lambda_{2,i}$  schadensäquivalenter Beiwert zur Berücksichtigung des entsprechend genormten Ermüdungslastspektrums und der absoluten Anzahl der Lastspiele im Verhältnis zu *N* = 2,0 · 10<sup>6</sup> Lastspielen

$$\lambda_{1,i} = \sqrt[m]{kQ} = \left[ \sum_j \left( \left( \frac{\Delta Q_{i,j}}{\max \Delta Q_i} \right)^m \cdot \frac{n_{i,j}}{\sum n_{i,j}} \right) \right]^{\frac{1}{m}}$$

$$\lambda_{2,i} = \sqrt[m]{n \cdot v} = \left[ \frac{\sum_j n_{i,j}}{N} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Dabei ist

$\Delta Q_{i,j}$  Lastamplitude *j* für das Rad *i*:  
 $\Delta Q_{i,j} = Q_{i,j} - Q_{min,i}$   
*maxΔQ<sub>i</sub>* maximale Lastamplitude für das Rad *i*:  
 $\max \Delta Q_i = Q_{max,i} - Q_{min,i}$   
*kQ, v* schadensäquivalente Beiwerte  
*m* Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve  
 $\varphi_{fat}$  schadensäquivalenter dynamischer Faktor  
*i* Nummer des Rades  
*N* 2,0 · 10<sup>6</sup>

Die  $\lambda_i$ -Werte dürfen der Tabelle 5 [ ≙ Tabelle 2.12 der DIN EN 1991-3] entsprechend der Kranklassifizierung entnommen werden.

Klassen S	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>
Normalspannung	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	1,260	1,587
Schubspannung	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,000	1,149	1,320

**Anmerkung 1:** Bei der Bestimmung der  $\lambda$ -Werte sind genormte Spektren mit einer Gaußverteilung der Lasteinwirkungen, die Miner-Regel und Ermüdungsfestigkeitskurven S-N mit einer Neigung von *m* = 3 für Normalspannungen und *m* = 5 für Schubspannungen verwendet worden.

**Anmerkung 2:** Falls die Kranklassifizierung nicht in den Betriebsanforderungen des Betreibers der Krananlage erhalten ist, sind Hinweise zur Kranklassifizierung im Anhang B angegeben.

Tabelle 5.  $\lambda_i$ -Werte entsprechend der Kranklassifizierung nach [4]

Den in Tabelle 5 angegebenen  $\lambda$ -Werten (schadensäquivalente Beiwerte) liegt Folgendes zugrunde:

- genormte Lastkollektive
- Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner
- Ermüdungsfestigkeitskurven mit *m* = 3 für Längsspannungen und *m* = 5 für Schubspannungen

Der schadensäquivalente dynamische Faktor  $\varphi_{fat}$  kann unter normalen Betriebsbedingungen nach Gleichung (2.19) wie folgt angenommen werden:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1+\varphi_1}{2} \text{ und } \varphi_{fat,2} = \frac{1+\varphi_2}{2}$$



Bei Berücksichtigung von mehreren Kranen sind die Hubklassen des zweiten und aller weiteren Krane ebenfalls nach GL. (2.19) anzunehmen. Nur wenn zwei Krane in erheblichem Ausmaß zusammen betrieben werden (gekoppelt), sollen beide Krane zusammen als ein einziger Kran behandelt werden.

### 2.3.4 Einwirkungen für den Ermüdungsnachweis

Als vertikale Lasten sind Eigengewichte der Kranbahn und der Kranbrücke sowie die maximale Hublast zu berücksichtigen.

Für Ermüdungsnachweise lautet die Einwirkungskombination:

$$\gamma_{FF} \cdot (\varphi_{fat,1} \cdot \text{Gewicht Kranbrücke} + \varphi_{fat,2} \cdot \text{Hublast})$$

Im Regelfall kann das Eigengewicht der Kranbahn vernachlässigt werden, da für den Ermüdungsnachweis nur noch die Spannungsschwingbreiten maßgebend sind, auf die das Eigengewicht der Kranbahn keinen Einfluss hat.

Horizontale Lasten werden beim Ermüdungsnachweis normalerweise nicht berücksichtigt, da sie nicht dauerhaft wirken. Falls regelmäßig in einem bestimmten Bereich der Kranbahn gebremst / beschleunigt wird, müssen ausnahmsweise Horizontallasten auch im Ermüdungsnachweis berücksichtigt werden.

### Exzentrizität der Radlasteinleitung:

In den Beanspruchungsklassen  $S_3$  bis  $S_9$  ist beim Ermüdungsnachweis die Stegblechbiegung aus Radlasteinleitung infolge einer Exzentrizität von  $0.25 \cdot k$  ( $k$  = Schienenkopfbreite) anzusetzen. Für die Beanspruchungsklassen  $S_0$  bis  $S_2$  darf auf die Berücksichtigung der Stegblechbiegung verzichtet werden (EC 3-6, Kap. 9.3.3 (1)).

Bei der Berechnung der Radlasteinleitungsspannungen und bei den Querschnittswerten des Kranbahnträgers bei mittragender Schiene sind 12.5 % Abnutzung (Fehlfläche) des Schienenkopfes zu berücksichtigen (EC 3-6, Kap. 5.6.2 (2)+(3) und Kap. 5.7.1 (2)). Die Lasteinleitungsspannungen  $\sigma_{oz,ED}$  und  $\tau_{oxz,ED}$  sind gemäß EC 3-6, Kap. 5.7 zu ermitteln.

Für Schweißnähte sind nach EC 3-1-9, Kap. 5 (6) für  $\tau_{wf}$  und  $\sigma_{wf}$  zwei getrennte Nachweise der Schweißnahtspannungen zu führen. Die Schweißnahtspannungen beziehen sich stets auf die rechnerische Kehlnahtdicke  $a_w$ .

Längsspannungen  $\sigma_{wf}$  quer zur Nahtachse:

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$$

Schubspannungen  $\tau_{wf}$  längs der Nahtachse:

$$\tau_{wf} = \tau_{xz} = \tau_{\parallel f}$$



## Ein Buch für Aufsteller, Prüfer und Software-Entwickler

Der Entwurf eines Tragwerks ist heute ohne den Einsatz moderner Software nicht mehr vorstellbar. Umfangreiche Überprüfungen von Stabtheorie und Berechnungsergebnissen durch die Verfasser belegen, dass der EDV-gestützte Entwurf eines Tragwerks grob fehlerhaft sein kann.

Das vorliegende Buch klärt die Frage, wie wirklichkeitsnah die Resultate aktueller Stabstatik-Software ausfallen. Mit Hilfe zahlreicher Referenzbeispiele kann jeder Anwender diese Frage für die von ihm genutzte Software prüfen.

Günter Lumpe, Volker Gensichen

### Evaluierung der linearen und nichtlinearen Stabstatik in Theorie und Software

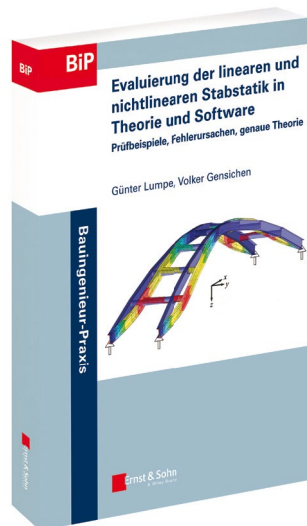
Prüfbeispiele, Fehlerursachen, genaue Theorie

Frühjahr 2014. 288 S.

€ 55,-\*

ISBN 978-3-433-03053-0

Auch als eBook erhältlich



**Online-Bestellung:**  
[www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

**BiP** Aus der Reihe  
Bauingenieur-Praxis  
(BiP)

**Ernst & Sohn**  
Verlag für Architektur und technische  
Wissenschaften GmbH & Co. KG

Kundenservice: Wiley-VCH  
Boschstraße 12  
D-69469 Weinheim

Tel. +49 (0)6201 606-400  
Fax +49 (0)6201 606-184  
service@wiley-vch.de

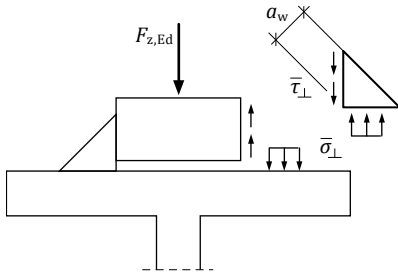


Bild 10. Schweißnahtspannungen

Die Spannungen werden – anders als bei Nachweisen im GZT – auf die Winkelschenkel der Nähte bezogen und ergeben sich für mittige Lasteinwirkung mit  $l = l_{eff} - 2 \cdot t_f$  zu:

$$\tau_{\perp f} = \sigma_{\perp f} = \frac{F_{z,Ed,f}}{l \cdot 2 \cdot a_w} \quad \text{und} \quad \tau_{\parallel f} = 0.2 \sigma_{\perp f}$$

Die nachzuweisenden Spannungen sind:

$$\sigma_{wf} = \sigma_{\perp f} \quad \text{und} \quad \tau_{wf} = \tau_{\parallel f}$$

Da  $\sigma_{\perp f}$  und  $\tau_{\parallel f}$  nicht am selben Ort wirken, wird  $\sigma_{wf}$  nicht als Vergleichswert aus beiden ermittelt (d.h.  $\tau_{\perp f}$  ist in obiger Formel für  $\sigma_{wf}$  mit „0“ zu berücksichtigen).

### 2.3.5 Berechnung der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite der Nennspannungen

In Abschnitt 2.2 dieses Beitrags wurde bereits die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{E,2}$  definiert.  $\Delta\sigma_{E,2}$  errechnet sich unter Verwendung des schadensäquivalenten Beiwertes  $\lambda$  zu:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma$$

mit

$\Delta\sigma$  Spannungsschwingbreite

Mit dem schadensäquivalenten Beiwert  $\lambda$  werden das genormte Ermüdungslastspektrum für Kranbahnen und die absolute Zahl der Lastspiele im Verhältnis zu  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechseln berücksichtigt.

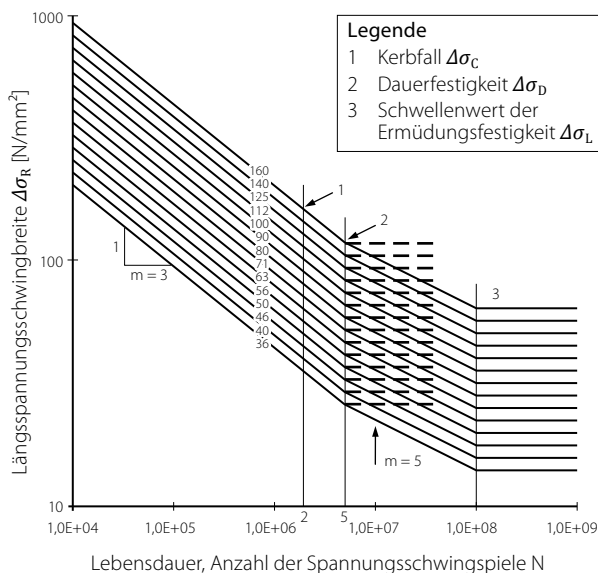


Bild 11. Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungen

## 2.4 Ermüdungsfestigkeit

Für Nennspannungen werden die Ermüdungsfestigkeiten durch eine Reihe von  $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ -Kurven und  $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$ -Kurven „Wöhlerlinien“ bestimmt, wobei jede Kurve einer bestimmten Kerbfallkategorie zugeordnet wird. Jeder Kerbfall ist durch eine Kerbfallkategorie gekennzeichnet, die den Bezug  $\Delta\sigma_c$  oder  $\Delta\tau_c$  in N/mm<sup>2</sup> der Ermüdungsfestigkeitskurve bei 2 Millionen Spannungsspielen darstellt.

### Wöhlerlinien nach EC 3-1-9:

Die Wöhlerlinien für den Ermüdungsnachweis der Längsspannungen  $\Delta\sigma$  liegen in Form eines Rasters von Geraden mit der Neigung  $m = 3$  über den im doppeltlogarithmischen Maßstab aufgetragenen Achsen  $\Delta\sigma_R$  und  $N_R$  vor (Bild 11).

Die einzelnen Kurven können mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \text{mit} \quad m = 3 \quad \text{für} \quad N_R \leq 5 \cdot 10^6$$

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6 \quad \text{mit} \quad m = 5 \quad \text{für} \quad 5 \cdot 10^6 \leq N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

mit

$$\text{Dauerfestigkeit } \Delta\sigma_D = 0.737 \cdot \Delta\sigma_c \quad \text{und}$$

$$\text{Schwellenwert } \Delta\sigma_L = 0.405 \cdot \Delta\sigma_c$$

Die Dauerfestigkeit wird bei  $N = 5 \cdot 10^6$  Lastwechseln angenommen.

Die Linien der Schubspannungen weisen eine Neigung von  $m = 5$  auf. Schwellenwert und Dauerfestigkeit fallen bei Schubspannungen zusammen (Bild 12).

$$\Delta\tau_R^m \cdot N_R = \Delta\tau_c^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \text{mit} \quad m = 5 \quad \text{für} \quad N_R \leq 1 \cdot 10^8$$

mit

$$\text{Schwellenwert } \Delta\tau_L = \Delta\tau_D = 0.457 \cdot \Delta\tau_c$$

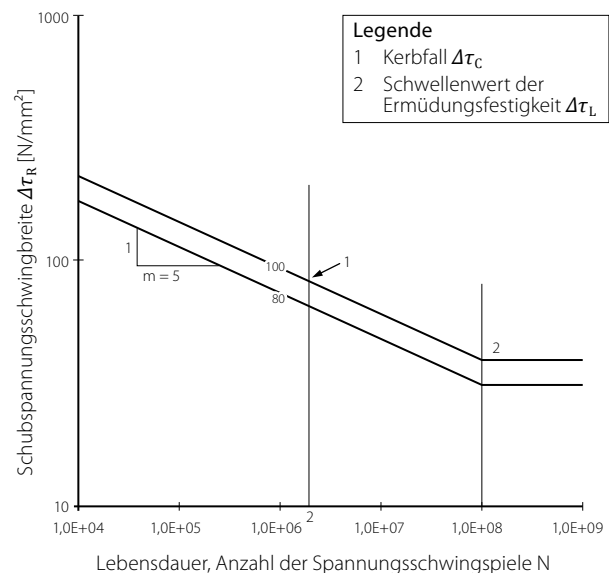


Bild 12. Ermüdungsfestigkeitskurven für Schubspannungen

**Kerbfälle nach EC 3-1-9:**

Nach EC 3-1-9 lässt sich der Kerbfall eines Konstruktionsdetails über die Tabellen 8.1 bis 8.10 bestimmen. Jeder Kerbfall ist mit einer Kerbgruppennummer bezeichnet, die den Wert  $\Delta\sigma_c$  angibt.  $\Delta\sigma_c$  ist die ertragbare Spannungsschwingbreite bei  $N_E = 2 \cdot 10^6$  Lastwechseln.

Mit der Kerbgruppennummer kann sofort die zugehörige Wöhlerlinie identifiziert werden. Ein und dasselbe Detail kann für unterschiedliche Spannungsarten unterschiedlichen Kerbfällen zugeordnet sein.

Eine Auswahl möglicher Kerbdetails für Kranbahnträger ist den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
160		<u>Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse:</u> 1) Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten 2) Walzprofile mit gewalzten Kanten 3) nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile	<u>Kerbfälle 1) bis 3):</u> Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.
100 <i>m</i> = 5		6) und 7) gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3)	<u>Kerbfälle 6) und 7)</u> $\Delta\tau$ berechnet sich nach $\tau = \frac{V \cdot S(t)}{I \cdot t}$

Tabelle 6. Kerbfälle für ungeschweißte Bauteile (Auszug) nach [14]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
125		<u>Durchgehende Längsnähte:</u> 1) Mit Automaten oder voll mechanisiert beidseitig durchgeschweißte Nähte. 2) Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gemäß Kerbfall 6) oder 7) in Tabelle 8.5 nachzuweisen	<u>Kerbfälle 1) und 2):</u> Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparatur-schweißung.

Tabelle 7. Kerbfälle für geschweißte Bauteile (Auszug) nach [14]

Kerbfall	Konstruktionsdetails	
80	$l \leq 50$	für beliebige $t$
71	$50 < l \leq 80$	für beliebige $t$
63	$80 < l \leq 100$	für beliebige $t$
56	$100 < l \leq 120$	für beliebige $t$
56	$l > 120$	$t \leq 20$
50	$120 < l \leq 200$	$t > 20$
	$l > 200$	$20 < t \leq 30$
45	$200 < l \leq 300$	$t > 30$
	$l > 300$	$30 < t \leq 50$
40	$l > 300$	$t > 50$

Tabelle 8. Kerbfälle für teilweise geschweißte Bauteile (Auszug) nach [14]

**Unterbrochene Schienenschweißnähte:**

Die Ermüdungsfestigkeit dazu wurde in der Vorbereitung des EC 3-1-9 nicht untersucht und ist deshalb nicht explizit enthalten.

Es erfolgt ein Verweis auf Fall 1 aus Tabelle 8.5, da in der Regel gilt:

Schweißnahtlänge $l \leq 300$ mm			
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		1) Gewalzte I- oder H-Querschnitte	1) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{vert}$ im Steg infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung
71		2) Voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß	2) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{vert}$ im Steg infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung
36*		3) Nicht voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß oder wirksam voll durchgeschweißter T-Stumpfstoß in Übereinstimmung mit EN 1993-1-8	3) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{vert}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung
36*		4) Kehlnähte	3) Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{vert}$ in der Schweißnaht infolge vertikaler Druckkräfte aus Radlasteinleitung

Tabelle 9. Kerbfälle für Lasteinleitungsspannungen am oberen Stegrand (Auszug) nach [14]

Kerbfall	Konstruktionsdetails	
125		10) Längsbeanspruchte Stumpfnaht, beidseitig in Lastrichtung blechen geschliffen, 100 % ZFP
112		10) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen
90		10) Mit Ansatzstellen

Tabelle 10. Kerbfälle, anwendbar auf den Nahtbereich angeschweißter Winkelprofile aus Tab. 8.2 (Auszug) nach [14]

**2.5 Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9**

**2.5.1 Nachweis für einen einzelnen Kran (nach DIN EN 1993-1-9, Kap. 8)**

Als Ermüdungsnachweise sind zu führen:

$$\frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1.0 \text{ und } \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1$$

Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_{E,2}$  und  $\Delta\tau_{E,2}$  ist nachzuweisen:

$$\left( \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1.0$$

Wenn keine Angaben zu  $\Delta\sigma_{E,2}$  oder  $\Delta\tau_{E,2}$  vorliegen, darf der Nachweis nach Anhang A des EC 3-1-9 geführt werden.

Wirkt zusätzlich eine zweite Normalspannung (z. B. Radlasteinleitung), so lautet der Nachweis nach „Seeger“:

$$\left( \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{x,E,2}}{\Delta\sigma_{x,c} / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{z,E,2}}{\Delta\sigma_{z,c} / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{FF} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1.0$$

### 2.5.2 Nachweis für Kranbahnen mit mehreren Kranen (nach EC 3-6, Kap. 9.4.2)

Wenn ein Bauteil (z. B. Kranbahn) durch zwei oder mehrere Krane belastet wird, sollte die Gesamtschädigung folgenden Nachweis erfüllen:

$$\sum_i D_i + D_{\text{dup}} \leq 1.0$$

mit

$D_i$	Schädigung infolge eines einzelnen unabhängig wirkenden Krans $i$
$D_{\text{dup}}$	Zusätzliche Schädigung infolge der Kombination von zwei oder mehr Kranen, die zeitweise zusammenwirken

Die Schädigung  $D_i$  infolge eines einzelnen unabhängig wirkenden Krans  $i$  sollte mit der Spannungsschwingbreite der Längsspannung oder der Schubspannung oder beidem in Abhängigkeit vom Konstruktionsdetail berechnet werden, siehe DIN EN 1993-1-9:

$$D_i = \left( \frac{\gamma_{\text{FF}} \cdot \Delta\sigma_{\text{E},2}}{\Delta\sigma_{\text{c}}/\gamma_{\text{Mf}}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{\text{FF}} \cdot \Delta\tau_{\text{E},2}}{\Delta\tau_{\text{c}}/\gamma_{\text{Mf}}} \right)^5$$

Die zusätzliche Schädigung  $D_{\text{dup}}$  infolge zwei oder mehr zeitweise zusammenwirkender Krane sollte in Abhängigkeit vom Konstruktionsdetail mit der Spannungsschwingbreite der Längsspannung oder Schubspannung oder beider berechnet werden, siehe DIN EN 1993-1-9:

$$D_{\text{dup}} = \left( \frac{\gamma_{\text{FF}} \cdot \Delta\sigma_{\text{E},2,\text{dup}}}{\Delta\sigma_{\text{c}}/\gamma_{\text{Mf}}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{\text{FF}} \cdot \Delta\tau_{\text{E},2,\text{dup}}}{\Delta\tau_{\text{c}}/\gamma_{\text{Mf}}} \right)^5$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{\text{E},2,\text{dup}}$	schadensäquivalente Längsspannungsschwingbreite zweier oder mehrerer zusammenwirkender Krane
$\Delta\tau_{\text{E},2,\text{dup}}$	schadensäquivalente Schubspannungsschwingbreite zweier oder mehrerer zusammenwirkender Krane

Werden zwei Krane in erheblichem Ausmaß zusammen betrieben (im Parallelbetrieb oder anderweitig), sollten beide Krane zusammen als ein Kran behandelt werden.

Falls keine genaueren Informationen vorhanden sind, dürfen die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_{\text{E},2}$  aus zwei oder mehr zeitweise zusammenwirkenden Kranen mit Hilfe des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda_{\text{dup}}$  bestimmt werden.

Nach dem Nationalen Anhang wird empfohlen, für  $\lambda_{\text{dup}}$  die Werte für  $\lambda_i$  aus DIN EN 1991-3 Tabelle 2.12 für die Beanspruchungsgruppe  $S_i$  wie folgt zu verwenden:

- **bei zwei Kranen:**  
2 Beanspruchungsgruppen unter der B.gruppe des Krans mit der niedrigsten B.gruppe
- **bei drei oder mehr Kranen:**  
3 Beanspruchungsgruppen unter der B.gruppe des Krans mit der niedrigsten B.gruppe

Werden bei mehreren Kranen, die die gleiche Kranbahn befahren, keine Krane zeitweise gekoppelt, so ergibt sich die Gesamtschädigung aus der Summe der Teilschädigungen der einzelnen Krane (gemäß der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner).

## 3. Kranbahnträger für Hängekrane und Laufkatzen

### 3.1 Allgemeines

Hängekrane und Unterflansch-Laufkatzen befahren den Kranbahnträger auf den Untergurten des Trägers. Neben der globalen Tragwirkung werden die Untergurte des Trägers infolge der Radlasten auf lokale Flanschbiegung beansprucht. Der untere Flansch wird damit auf zweiachsige Biegung beansprucht.

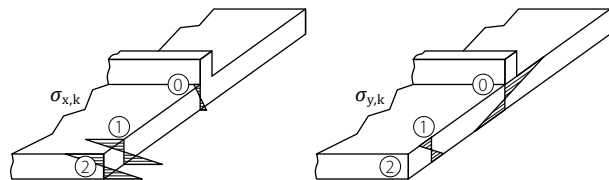


Bild 13. Zweiachsige Biegung im Unterflansch nach [16]

Im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen werden lediglich die wesentlichsten Berechnungsgrundlagen und Nachweise vorgestellt. In Bild 14 ist eine Unterflansch-Laufkatze dargestellt. Mit Unterflansch-Laufkatzen können Lasten ausschließlich entlang des Kranbahnträgers gehoben und transportiert werden.



Bild 14. Unterflansch-Laufkatze [Foto Demag]

### 3.2 Lastannahmen

Bezüglich der Lastannahmen gelten grundsätzlich die im 1. Teil des Beitrags beschriebenen Vorschriften. Bezüglich der Horizontalkräfte ist in DIN EN 1991-3, Kapitel 2.5.2.2 (3) folgende Regelung enthalten:

(3) Bei Hängekranen sollten die Horizontalkräfte in der Radlauffläche in der Größe von mindestens 10% der größten vertikalen Radlast ohne dynamischen Faktor angesetzt werden, es sein denn, ein genauerer Wert ist gerechtfertigt.



### 3.3 Lokale Biegespannungen im Untergurt infolge Radlasten nach DIN EN 1993-6

Für die Ermittlung der lokalen Biegespannungen infolge Radlasteinleitung im Unterflansch eines I-Trägers gibt die DIN EN 1993-6 im Kapitel 5.8 nachfolgendes Berechnungsverfahren an.

Erfolgt die Lasteinleitung in einem Abstand größer als  $b$  vom Trägerende ( $b$  = Flanschbreite), können die Biegespannungen an den drei in Bild 15 dargestellten Stellen ermittelt werden:

- Stelle 0: am Übergang vom Steg zum Flansch
- Stelle 1: in der Schwerlinie der Lasteinleitung
- Stelle 2: an der äußeren Flanschseite

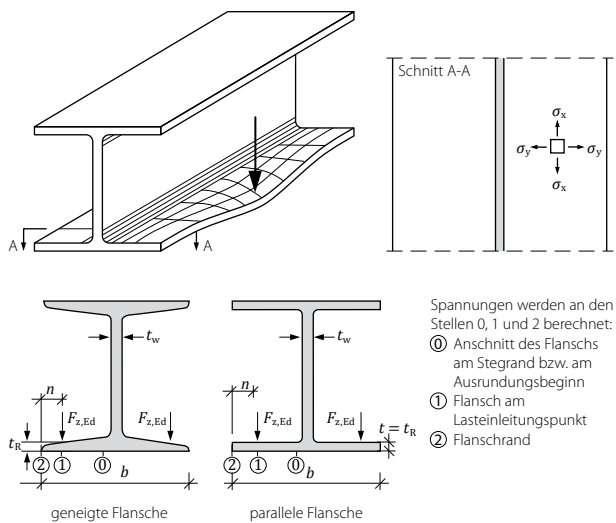


Bild 15. Unterflanschbiegung mit Stellen zur Bestimmung der Spannungen infolge Radlasten nach [16]

Erfolgt die Radlasteinleitung in einem Abstand größer  $b$  vom Trägerende und ist der Abstand  $x_w$  zwischen benachbarten Rädern nicht kleiner als  $1.5 \cdot b$ , dann sollten die lokale Biegespannung  $\sigma_{ox,ED}$  und die Querbiegespannung  $\sigma_{oy,ED}$  im Unterflansch wie folgt ermittelt werden (Gleichungen (5.5) und (5.6) aus [6]):

$$\sigma_{ox,Ed} = c_x \cdot F_{z,Ed} \cdot \frac{1}{t_f^2}$$

$$\sigma_{oy,Ed} = c_y \cdot F_{z,Ed} \cdot \frac{1}{t_f^2}$$

mit

$F_{z,Ed}$  Bemessungswert der vertikalen Radlast  
 $t_f$  Blechdicke des Flansches in der Schwerlinie der Lasteinleitung

Die Koeffizienten  $c_x$  und  $c_y$  zur Bestimmung der Längs- und Querbiegespannungen an den drei in Bild 15 festgelegten Stellen 0, 1 und 2 dürfen mit Hilfe von Tabelle 10 (≙ Tabelle 5.2 aus [6]) bestimmt werden.

Dies erfolgt in Abhängigkeit davon, ob der Träger parallele oder geneigte Flansche hat, sowie vom Verhältnis  $\mu$ :

$$\mu = 2 \cdot \frac{n}{(b - t_w)}$$

mit

$n$  Abstand der Schwerlinie der Last zur äußeren Flanschseite  
 $t_w$  Blechdicke des Steges

Bei Radlasten, die nahe der äußeren Flanschseite eingeleitet werden, dürfen alternativ die in Tabelle 12 (≙ Tabelle 5.3 aus [6]) angegebenen Werte der Koeffizienten  $c_x$  und  $c_y$  verwendet werden.

Spannung	parallele Flansche	geneigte Flansche (siehe Anmerkung)
Längsbiegespannung $\sigma_{ox,Ed}$	$c_{x0} = 0,050 - 0,580\mu + 0,148e^{3,015\mu}$	$c_{x0} = -0,981 - 1,479\mu + 1,120e^{1,322\mu}$
	$c_{x1} = 2,230 - 1,490\mu + 1,390e^{-18,33\mu}$	$c_{x1} = 1,810 - 1,150\mu + 1,060e^{-7,700\mu}$
	$c_{x2} = 0,730 - 1,580\mu + 2,910e^{-6,000\mu}$	$c_{x2} = 1,190 - 2,810\mu + 0,840e^{-4,690\mu}$
Querbiegespannung $\sigma_{oy,Ed}$	$c_{y0} = -2,110 + 1,977\mu + 0,0076e^{6,530\mu}$	$c_{y0} = -1,096 + 1,095\mu + 0,192e^{-6,000\mu}$
	$c_{y1} = 10,108 - 7,408\mu - 10,108e^{-1,364\mu}$	$c_{y1} = 3,965 - 4,835\mu - 3,965e^{-2,675\mu}$
	$c_{y2} = 0,0$	$c_{y2} = 0,0$

Vorzeichenkonvention:  $c_{x1}$  und  $c_{y1}$  sind positiv bei Zugspannungen an der Flanschunterseite.

Anmerkung: Die Koeffizienten für geneigte Flansche gelten für eine Neigung von 14% oder 8°. Für Träger mit größerer Flanschneigung liegen sie auf der sicheren Seite. Für Träger mit geringerer Neigung ist eine konservative Annahme, die Koeffizienten für Träger mit parallelen Flanschen zu verwenden. Als Alternative darf linear interpoliert werden.

Tabelle 11. Koeffizienten  $c_{xi}$  und  $c_{yi}$  zur Bestimmung der Spannungen an den Stellen 0, 1 und 2 nach [6]

Spannung	Koeffizient	parallele Flansche		geneigte Flansche (siehe Anmerkung)
		$\mu = 0,10$	$\mu = 0,15$	$\mu = 0,15$
Längsbiegespannung $\sigma_{ox,Ed}$	$c_{x0}$	0,2	0,2	0,2
	$c_{x1}$	2,3	2,1	2,0
	$c_{x2}$	2,2	1,7	2,0
Querbiegespannung $\sigma_{oy,Ed}$	$c_{y0}$	-1,9	-1,8	-0,9
	$c_{y1}$	0,6	0,6	0,6
	$c_{y2}$	0,0	0,0	0,0

Vorzeichenkonvention:  $c_{x1}$  und  $c_{y1}$  sind positiv bei Zugspannungen an der Flanschunterseite.

Anmerkung: Die Koeffizienten für geneigte Flansche gelten für eine Neigung von 14% oder 8°. Für Träger mit größerer Flanschneigung liegen sie auf der sicheren Seite. Für Träger mit geringerer Neigung ist eine konservative Annahme, die Koeffizienten für Träger mit parallelen Flanschen zu verwenden. Als Alternative darf linear interpoliert werden.

Tabelle 12. Koeffizienten  $c_{xi}$  und  $c_{yi}$  zur Bestimmung der Spannungen nahe der äußeren Flanschseite nach [6]

Sofern keine genaueren Werte bekannt sind, sollte die lokale Biegespannung  $\sigma_{oy,end,Ed}$  infolge Radlasteinleitung in einem unverstärkten Unterflansch an einem rechtwinkligen Trägerende berechnet werden zu:

$$\sigma_{oy,end,Ed} = (5.6 - 3.225 \cdot \mu - 2.8 \cdot \mu^3) \cdot \frac{F_{z,Ed}}{t_f^2}$$

mit

$t_f$  mittlere Nenndicke des Flansches

### 3.4 Beanspruchbarkeit des Unterflansches bei Radlasteinleitung

Die Beanspruchbarkeit  $F_{f,Ed}$  des Unterflansches eines Trägers bei Lasteinleitung mit Radlasten von  $F_{z,Ed}$  aus einem Hängekran oder einer Unterflansch-Laufkatze beträgt:

$$F_{f,Rd} = \frac{l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot f_y / \gamma_{Mo}}{4 \cdot m} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{f,Ed}}{f_y / \gamma_{Mo}} \right)^2 \right]$$

mit

- $l_{eff}$  effektive Länge des Flansches
- $m$  Hebelarm von der Radlast zum Übergang Flansch – Steg
- $t_f$  Flanschdicke
- $\sigma_{f,Ed}$  Spannung in der Schwerachse des Flansches infolge Biegebeanspruchung des Trägers

Der Hebelarm  $m$  von der Radlast zum Übergang Flansch – Steg beträgt:

- Walzprofil:  $m = 0.5 \cdot (b - t_w) - 0.8 \cdot r - n$
- Schweißprofil:  $m = 0.5 \cdot (b - t_w) - 0.8 \cdot \sqrt{2} a - n$

mit

- $a$  Kehlnahtdicke
- $b$  Flanschbreite
- $n$  Abstand der Schwerlinie der Last zur äußeren Flanschseite
- $r$  Walzradius
- $t_w$  Stegblechdicke

Die effektive Länge  $l_{eff}$  des Flansches ist in Abhängigkeit von der Position der Radlast nach Tabelle 13 zu bestimmen.

Fall	Position Radlast	$l_{eff}$
(a)	Rad an einem ungestützten Flanschende	$2(m + n)$
(b)	Rad außerhalb der Trägerendbereiche	$4\sqrt{2}(m + n)$ für $x_w \geq 4\sqrt{2}(m + n)$
		$2\sqrt{2}(m + n) + 0,5x_w$ für $x_w < 4\sqrt{2}(m + n)$
(c)	Rad im Abstand $x_e \leq 2\sqrt{2}(m + n)$ von einem Prellbock, am Trägerende	$2(m + n) \left[ \frac{x_e}{m} + \sqrt{1 + \left( \frac{x_e}{m} \right)^2} \right]$ aber $\leq \sqrt{2}(m + n) + x_e$ für $x_w \geq 2\sqrt{2}(m + n) + x_e$
		$2(m + n) \left[ \frac{x_e}{m} + \sqrt{1 + \left( \frac{x_e}{m} \right)^2} \right]$ aber $\leq \sqrt{2}(m + n) + \frac{x_w + x_e}{2}$ für $x_w < 2\sqrt{2}(m + n) + x_e$
(d)	Rad im Abstand $x_e \leq 2\sqrt{2}(m + n)$ am gestützten Flanschende, das entweder von unten oder durch eine angeschweißte Stirnplatte gelagert ist	$2\sqrt{2}(m + n) + x_e + \frac{2(m + n)^2}{x_e}$ für $x_w \geq 2\sqrt{2}(m + n) + x_e + \frac{2(m + n)^2}{x_e}$
		$\sqrt{2}(m + n) + \frac{x_e + x_w}{2} + \frac{(m + n)^2}{x_e}$ für $x_w < 2\sqrt{2}(m + n) + x_e + \frac{2(m + n)^2}{x_e}$

Dabei ist  
 $x_e$  Abstand vom Trägerende zur Schwerlinie des Rades  
 $x_w$  Radabstand

Tabelle 13. Effektive Länge  $l_{eff}$  nach [6]

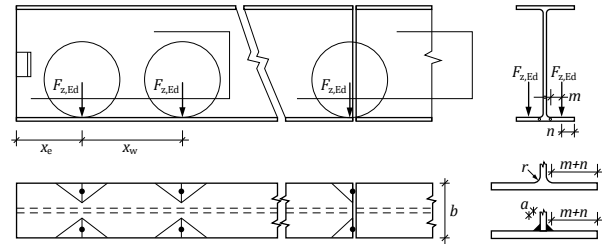


Bild 16. Biegung des Unterflansches entfernt vom Trägerende und am ungestützten Flanschende nach [6]

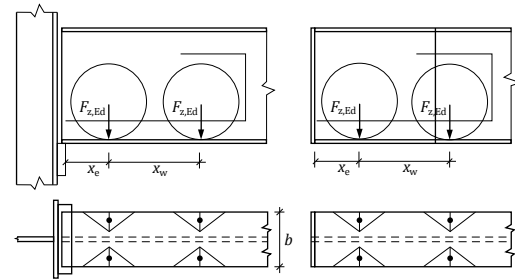


Bild 17. Biegung des Unterflansches am ungestützten Flanschende nach [6]

### 3.5 Berechnungen und Nachweise

Die in diesem Beitrag (einschließlich 1. Teil) beschriebenen Berechnungen und Nachweise sind grundsätzlich auch für Hängekrane und Unterflansch-Laufkatzen anzuwenden.

Als Besonderheit ist der zuvor beschriebene Nachweis der Tragfähigkeit und der Spannungsermittlung für die Unterflansche zu nennen. Bezüglich des Biegedrillknickens verhalten sich die Kranbahnträger von Unterflansch-Laufkatzen befahrenen Träger günstiger. Durch die Verdrehung des Trägers wird ein rückdrehendes Moment  $M = \varphi \cdot R \cdot e_y$  hervorgerufen.

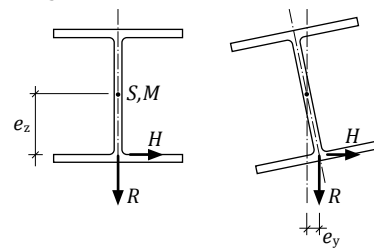


Bild 18. Torsion des Kranbahnträgers und rückdrehendes Moment nach [16]

Da der Steg eines Kranbahnträgers infolge der Belastung auf dem Untergurt in Querrichtung auf Zug beansprucht wird, besteht für den Steg des Trägers prinzipiell keine Beulgefahr. Für die gedrückten Bereiche des Trägers (z. B. Druckgurt) ist ein Beulnachweis erforderlich, der in der Regel als Nachweis  $c/t \leq \text{grenz } c/t$  geführt werden kann.

## 4. Zusammenfassung

Um die Grundlagen zur Bemessung von Kranbahnen nach EC 3-6 zu vervollständigen, werden in diesem 2. Teil des Beitrags folgende Berechnungsgrundlagen behandelt:

- Beulen nach DIN EN 1993-1-5
- Ermüdung nach DIN EN 1993-1-9
- Kranbahnträger für Hängekrane und Laufkatzen

Die Lebensdauer der Kranbahnträger ist entscheidend durch ein ermüdungsgerechtes Konstruieren zu beeinflussen. Eine ermüdungsgerechte Konstruktion ist nicht durch Berechnungen zu erzielen, sondern durch die Ausbildung ermüdungsunempfindlicher Konstruktionsdetails sowie deren Herstellung und Montage.

Der Ermüdungsnachweis kann entweder nach der Schadensakkumulationshypothese von Palmgren-Miner erbracht werden oder alternativ auf der Grundlage von schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten in Verbindung mit den für das Bauteil gültigen Kerbfällen (Ermüdungsfestigkeitskurven).

Die Einstufung der Krane nach definierten S-Klassen beruht auf genormten Lastkollektiven und dazu ermittelten schadensäquivalenten Werten und ist auf eine Lastspielzahl von  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastspielen bezogen. Die Ermüdungsnachweise für die genormten Lastkollektive lassen sich einfach mittels der schadensäquivalenten Spannungsschwingbreite nachweisen. Der Ermüdungsnachweis unter Verwendung von schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten stellt das Standardverfahren dar.

Liegen genaue Angaben zu einem individuellen Lastkollektiv (Mehrstufen-Kollektiv) vor, bietet eine Nachweisführung nach der Schadensakkumulationshypothese von Palmgren-Miner eine wirtschaftlichere Nachweisführung.

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

## Normen und Literatur

- [1] DIN EN 13001-1-2:2009-12, Krane – Konstruktion allgemein - Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13001-1+A1:2009 + Berichtigung 1 vom Juni 2010
- [2] DIN EN 13001-2-2:2012-06, Kransicherheit – Konstruktion allgemein - Teil 2: Lasteinwirkungen; Deutsche Fassung EN 13001-2:2011
- [3] DIN EN 13001-3-1:2012-09, Krane – Konstruktion allgemein - Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 13001-3-1:2012
- [4] DIN EN 1991-3:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Deutsche Fassung EN 1991-3:2006
- [5] DIN EN 1991-3/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen
- [6] DIN EN 1993-6:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007 + AC:2009
- [7] DIN EN 1993-6/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen
- [8] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
- [9] DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [10] DIN EN 1993-1-5:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009
- [11] DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [12] DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009
- [13] DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen
- [14] DIN EN 1993-1-9:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009
- [15] DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung
- [16] Seeßelberg, C.: Kranbahnen – Bemessung und konstruktive Gestaltung. Berlin, Bauwerk-Verlag 2009
- [17] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Günther, H.-P.: Kranbahnen und Betriebsfestigkeit. In: Stahlbau-Kalender 2003, Kapitel 4, Ernst & Sohn-Verlag, 2003
- [18] Mangerig, I.; Zapfe, C.: Stahlhallen. In: Stahlbau-Kalender 2003, Kapitel 5, Ernst & Sohn-Verlag, 2003
- [19] Demag-Kransysteme: Planungsunterlagen, TIP 2003
- [20] Kretz, J.: Grundlagen und Nachweise zu Kranen und Kranbahnen nach DIN 4132 und DIN 15018, mb-news Nr. 1/2005
- [21] Seeßelberg, C.: Kranbahnen und Ermüdungsfestigkeit nach EC. In: Schneider Bautabellen für Ingenieure. Köln, Werner Verlag 2012.
- [22] Kretz, J.: Bemessung von Kranbahnträgern – 1. Teil. mb-news Nr. 2/2014