

Dr.-Ing. Joachim Kretz

Bemessung von Kranbahnträgern

Grundlagen der Berechnung und Bemessung nach Eurocode 3-6

Krananlagen, deren Hauptkomponenten aus Kran und Kranbahn gebildet werden, dienen zum Heben und Fördern von Gütern. Belastet werden die Kranbahnen, die die Fahrwege der beweglichen Krane darstellen, durch zeitlich und örtlich veränderliche Kraneinwirkungen. Infolge der wechselnden Beanspruchungen aus Kranbetrieb sind die Kranbahnträger der Materialermüdung ausgesetzt. Deshalb ist zusätzlich zu den üblichen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen für Kranbahnen ein Ermüdungsnachweis zu führen. Im nachfolgenden Beitrag werden die Grundlagen der Berechnung und Bemessung nach den neuen Nachweiskonzepten der Eurocodes vorgestellt.



Im Stahlbau nehmen die Krananlagen eine Sonderstellung ein, da sie im Grenzbereich zwischen Maschinenbau und Bauwesen einzuordnen sind und unterschiedlichen Zuständigkeiten unterliegen. Während die Krane in den Bereich der Fördertechnik zu den Maschinen gehören und damit nicht baugenehmigungspflichtig sind, ist die Kranbahn ein Bestandteil eines Gebäudes und unterliegt den bauaufsichtlich eingeführten Bestimmungen. Die Bemessung der Kranbahnträger liegt daher im Verantwortungsbereich des Tragwerkplaners.

Die Oberkante der Schiene eines Kranbahnträgers bildet üblicherweise die Trennungslinie zwischen Bauwerk und Maschine. Um die Beanspruchungen des lastabtragenden Bauteils, des Kranbahnträgers, besser zu verstehen, werden nachfolgend zumindest einige Grundlagen der belastenden Krananlage vorgestellt. Wegen der Komplexität des Themas können im Rahmen dieses Artikels nur die wesentlichsten Grundlagen dargestellt werden. Der Gesamtbeitrag erscheint in 2 Teilen. Zur weiteren Vertiefung wird auf die entsprechenden Normenkapitel bzw. Literaturstellen verwiesen.

1. Grundlagen zu Kranen und Kranbahnen

1.1 Normensituation

Die verschiedenen Teile der zwischenzeitlich bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes stellen das Regelwerk für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Kranen und Kranbahnen dar. Für Krane bildet die DIN EN 13001 „Krane – Konstruktion allgemein“ in den verschiedenen Teilen [1, 2 und 3] die Grundlage für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung. Da Kranbahnträger eine Schnittstelle zwischen Krankonstruktion und Bauwerk Kranbahnträger darstellen, basieren die Einwirkungen aus Kranbetrieb in DIN EN 1991-3 „Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen“ [4, 5] auf DIN EN 13001-2 [2] „Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen“.

Die Regeln für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Kranbahnträgern und deren Unterstützungen stehen über DIN EN 1993-6 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 6: Kranbahnen“ [6, 7] zur Verfügung. Die zugehörigen Grundnormen sind mit den nachfolgend aufgelisteten Normenteilen des Eurocode 3 gegeben:

- DIN EN 1993-1-1 [8, 9] „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“
- DIN EN 1993-1-5 [10, 11] „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-5: Plattenbeulen“
- DIN EN 1993-1-8 [12, 13] „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen“
- DIN EN 1993-1-9 [14, 15] „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Ermüdung“

DIN EN 13001	Bemessung von Kranen
DIN EN 1991-3	Einwirkungen auf Kranbahnen
DIN EN 1991	Weitere Einwirkungen
DIN EN 1993-6	Bemessung von Kranbahnen
DIN EN 1993-1-1	Stahlbau Grundnorm
DIN EN 1993-1-5	Beulen
DIN EN 1993-1-8	Bemessung von Anschlüssen
DIN EN 1991-3 DIN EN 1993-1-9 DIN EN 1993-6	Ermüdung

Tabelle 1. Normensituation für Krane und Kranbahnen

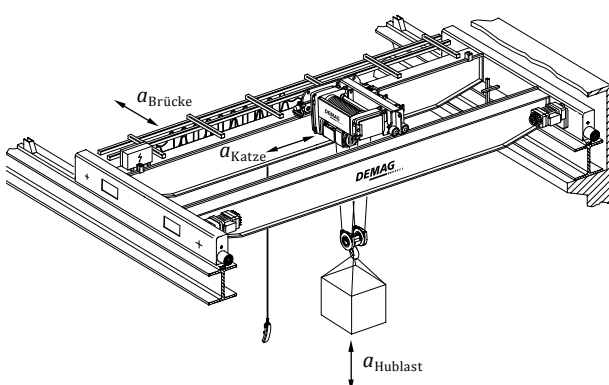


Bild 1. Beschleunigte Massen beim Kranbetrieb nach [16]

1.2 Besonderheiten von Kranbahnen

Trotz der einfachen statischen Systeme (Einfeld- oder Mehrfeldsysteme) sind Kranbahnen besondere Tragwerke, die sich von den Tragwerken des üblichen Hochbaus unterscheiden [16]:

- Infolge von Stoßeinwirkungen beim Fahren des Krans oder beim Heben von Gütern entstehen Schwingungen, die vom Kran auf die Kranbahn übertragen werden. Dadurch werden Kranbahnen nicht vorwiegend ruhend beansprucht. Die auftretenden Spannungen sind in der Regel zeitlich veränderlich. Infolge der häufig wechselnden Beanspruchungen treten Ermüdungserscheinungen auf.
- Durch Brems- und Anfahrvorgänge der Kranbrücke und der Krankatze oder durch vertikales Beschleunigen der Hublast entstehen Massenkkräfte $F = m \cdot a$ (mit: m = Masse und a = Beschleunigung), die die Krananlage in alle Richtungen beanspruchen (Bild 1).
- Beim Nachweis der Kranbahnträger sind komplexe Stabilitätsprobleme zu lösen, wie z. B. Biegedrillknicken in Verbindung mit planmäßig vorhandener Torsion oder Beulprobleme des Steges unter Berücksichtigung von konzentrierten Radlasteinleitungen.
- Die Gebrauchstauglichkeitskriterien für Kranbahnen sind deutlich restriktiver als die üblichen Anforderungen im Stahlhochbau. Die Grenzwerte der horizontalen und vertikalen Verformungen ergeben sich aus der Anforderung nach einem störungsfreien und verschleißarmen Betrieb.

1.3 Bauarten von Kranen

Die Kriterien für die Unterteilung von Krananlagen sind die Bauart und der Verwendungszweck.

Um bei Hallentragwerken einen möglichst großen Bereich der Halle mit der Hub- und Transportfähigkeit von Kranen abdecken zu können, werden Krananlagen häufig im Kopfbereich der Hallenstützen aufgelagert. Die Krananlagen sind dabei in der Regel als Brückenkran ausgeführt, die in Hallenlängsrichtung auf der Kranbahn verfahrbar sind. Die Konzeption einer Krananlage ist von der projektierten Hublast und der Einsatzhäufigkeit abhängig. Das nachfolgende Bild 2 zeigt die grundsätzliche Ausführung von Hallenkranen als Decken- oder Brückenkranen.

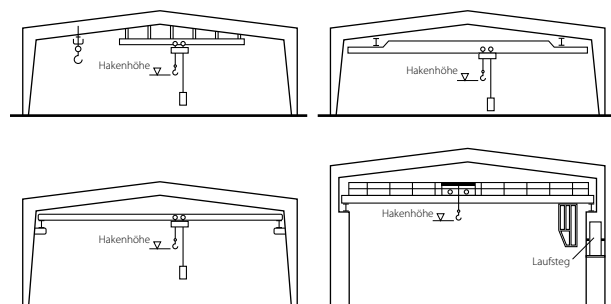


Bild 2. Grundsätzliche Ausführungsbeispiele für Hallenkran nach [18]

Die häufigsten Bauarten sind Einschienen-Unterflansch-Laufkatzen, Hängekrane, Brückenkrane, Prozesskrane, Portalkrane und Schwenkkrane. Die drei erstgenannten Kranarten werden nachfolgend kurz erläutert. Für die Bauarten Portalkrane und Schwenkkrane wird auf weitere Literatur verwiesen.

Einschienen-Unterflansch-Laufkatzen

Diese Einschienenkatzen laufen direkt auf dem Unterflansch der Kranbahnträger und haben eine Tragfähigkeit bis zu 12,5 t. Güter können ausschließlich entlang der Trägerachse gehoben und gefördert werden.

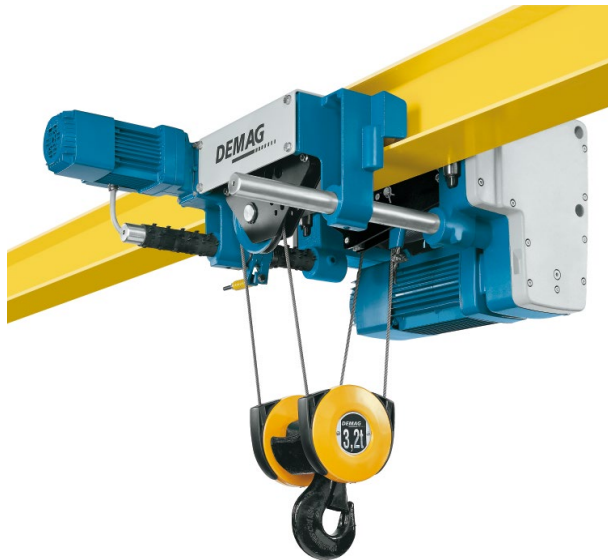


Bild 3. Einschienen-Unterflansch-Laufkatze [Foto Demag]

Hängekrane

Hänge- bzw. Deckenkrane sind Brückenkrane, die auf den Unterflanschen der Kranbahnträger fahren. Bei dieser Ausführung wird die Kranbahn an der Dach- oder Deckenkonstruktion befestigt und ersetzt damit den Einbau von Kranbahnstützen. So steht die gesamte Hallenfläche für die Produktion zur Verfügung. Darüber hinaus können nach Belieben auch Teilbereiche der Halle bedient werden.

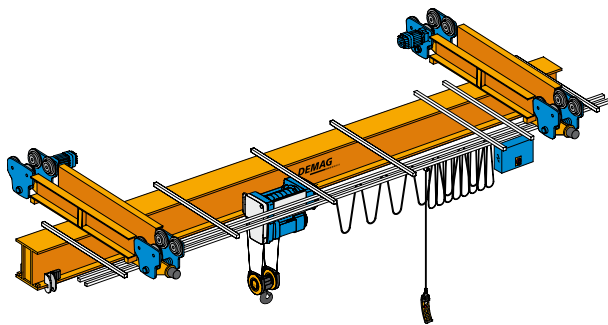


Bild 4. Deckenkran mit Unterflansch-Laufkatze [Prinzipgrafik Demag]

Brückenlaufkrane

Brückenlaufkrane bestehen aus den Komponenten Kranbrücke (Brückenträger), Kopfträger, Laufkatze und Hubwerk (Bild 5).

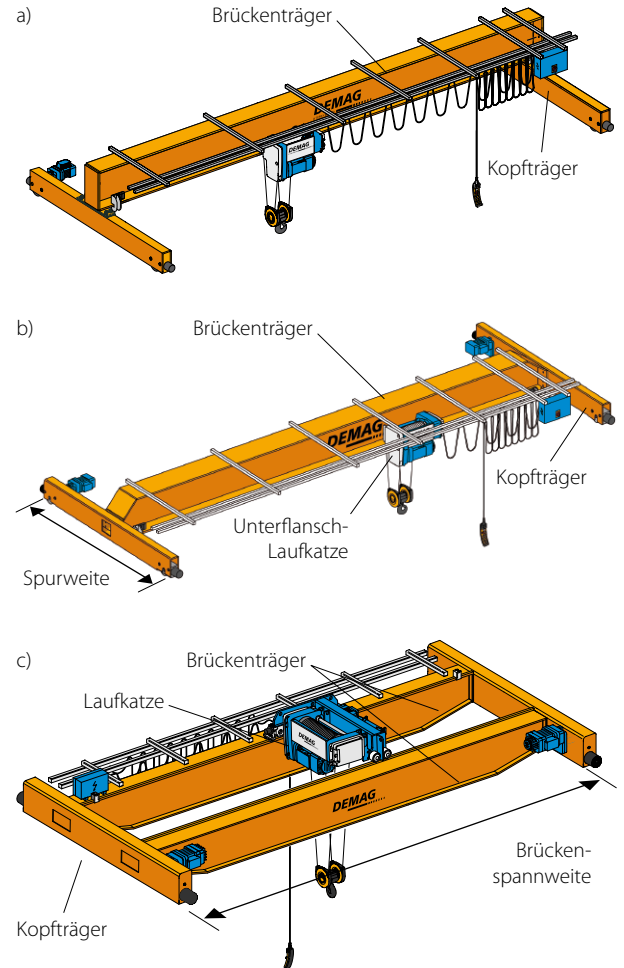


Bild 5. Prinzipgrafiken Demag
 a) Einträger-Brückenlaufkran mit oben aufliegendem Kranträger
 b) Einträger-Brückenlaufkran mit Unterflansch-Laufkatze
 c) Zweiträger-Brückenlaufkran

Das Hubwerk mit der Lastaufnahmeeinrichtung ist an der Laufkatze (obenlaufende Katze oder Unterflansch-Katze) angebracht, die längs der Kranbrücke frei verfahrbar ist. Die Kranbrücke überbrückt den Abstand zwischen den Kranbahnträgern. Sie wird an den beiden Enden zwischen den Kopfträgern eingehängt oder auf die Kopfträger aufgelegt. Durch die Kopfträger erfolgt dann die Belastung über das Laufwerk und die Schiene auf den Kranbahnträger.

Je nach geforderter Tragfähigkeit und zu überbrückender Stützweite kommen Brückenlaufkrane mit einem einzigen Brückenträger oder mit zwei Brückenträgern zum Einsatz. Dabei werden Einträger-Brückenlaufkrane bei Tragfähigkeiten bis 12,5 t ausgeführt. Bis zur Tragfähigkeit von 50 t (100 t) kommen Zweiträger-Brückenlaufkrane mit Serienkomponenten zum Einsatz. Darüber hinaus werden Prozesskrane mit Windwerken bis 500 t Tragfähigkeit eingesetzt.

2. Berechnungsgrundlagen

2.1 Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung

Das Nachweiskonzept des Eurocode 3 entspricht dem semi-probabilistischen Teilsicherheitskonzept. Die Tragsicherheit ist nachgewiesen, wenn der Bemessungswert der Beanspruchung S_d kleiner als der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit R_d ist.

Die im Nachweiskonzept zu berücksichtigenden Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite werden in den nachfolgenden Kapiteln angegeben.

2.2 Einwirkungen aus Kranen auf Kranbahnträger Allgemeines

Die Belastung des Kranbahnträgers erfolgt von dem Laufwerk der Krane über die Kranschiene auf den Kranbahnträger selbst. Neben den Beanspruchungen aus Eigengewicht und Hublast des Krans wird die Kranbahn durch weitere Kräfte aus der Fahrdynamik des Krans belastet. Die horizontalen und vertikalen Belastungen aus Kranbetrieb führen zu Beanspruchungen mit zweiachsiger Biegung und Torsion. Darüber hinaus entstehen durch das Fahren des Krans und das Heben von Nutzlasten Schwingungen, die zu zusätzlichen Beanspruchungen des Kranbahnträgers führen.

Dynamische Faktoren

Die aus der Fahrdynamik des Krans entstehenden dynamischen Einwirkungsanteile infolge von Schwingungen, die durch Trägheitskräfte und Dämpfungswirkungen hervorgerufen werden, werden im Allgemeinen durch dynamische Faktoren φ_i erfasst, mit denen die statischen Lasten zu multiplizieren sind.

$$F_{\varphi,k} = \varphi_i \cdot F_k$$

mit

- $F_{\varphi,k}$ charakteristischer Wert der Kraneinwirkung
- φ_i dynamischer Faktor (siehe Tabelle 2)
- F_k charakteristischer statischer Anteil der Kraneinwirkung

Die für jede Einwirkungsursache definierten dynamischen Faktoren nach DIN EN 1991-3 sind in Tabelle 2 angegeben. Diese dynamischen Faktoren zur Ermittlung der Kraneinwirkungen sind nach den Festlegungen in DIN EN 13001-1 [1] und DIN EN 13001-2 [2] bestimmt und sollen den Informationsaustausch mit den Kranherstellern erleichtern.

Unterstützungs- und Aufhängekonstruktionen, die die Kranlasten bis in die Fundamente weiterleiten, dürfen bei dynamischen Faktoren $\varphi_i > 1.1$ mit um $\Delta\varphi_i = 0.1$ reduzierten Faktoren nachgewiesen werden. Gründungskonstruktionen dürfen ohne die Berücksichtigung von dynamischen Faktoren bemessen werden.

φ_i	Berücksichtigter Einfluss	Anzuwenden auf	Definition der Schwingbeiwerte		
φ_1	Schwingungsanregung des Krantragwerks infolge Anhebens der Hublast vom Boden	Eigengewicht des Krans	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ 1,1 und 0,9 decken die unteren und oberen Schwingungsimpulse ab		
φ_2	Dynamische Wirkungen beim Anheben der Hublast vom Boden	Hublast	$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h$ v_h konstante Hubgeschwindigkeit in [m/s]; $\varphi_{2,min}$ und β_2 sind von der Hubklasse des Krans abhängig		
			Hubklasse	β_2	$\varphi_{2,min}$
			HC 1	0,17	1,05
			HC 2	0,34	1,10
			HC 3	0,51	1,15
HC 4	0,68	1,20			
φ_3	Dynamische Wirkungen durch plötzliches Loslassen der Nutzlast bei Verwendung von Greifern und Magneten	Hublast	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m} \cdot (1 + \beta_3)$ Δm der abgesetzte oder losgelassene Teil der gesamten Hublastmasse m $\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsames Absetzen $\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnelles Absetzen		
φ_4	Dynamische Wirkungen hervorgerufen durch Fahren auf Schienen o.Ä.	Eigengewicht von Kran und Hublast	$\varphi_4 = 1,0$, falls die in EN 1090-2 spezifizierten Maßabw. für Kranschienen eingehalten werden. Sonst: siehe EN 13001-2		
φ_5	Dynamische Wirkungen verursacht durch Antriebskräfte	Antriebskräfte	$\varphi_5 = 1,0$ für Fliehkräfte $1,0 < \varphi_5 < 1,5$ für Systeme mit stetiger Veränderung der Kräfte $1,5 < \varphi_5 < 2,0$ bei plötzlichen Veränderungen der Kräfte bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel $\varphi_5 = 3,0$		
φ_6	Dynamische Wirkungen infolge einer Prüflast	Dyn. Prüflast 110%	$\varphi_6 = 0,5 (1 + \varphi_2)$, EC 1-3, Kap. 2.10 (4)		
φ_7	Dynamische, elastische Wirkungen verursacht durch Pufferanprall	Pufferkräfte	$\varphi_7 = 1,25$ für $0 \leq \xi \leq 0,5$ $\varphi_7 = 1,25 + 0,7 \cdot (\xi - 0,5)$ für $0,5 \leq \xi \leq 1,0$ ξ ist von der Pufferkennlinie abhängig 		

Tabelle 2. Dynamische Faktoren φ_i nach [21]

Hubklassen

Auch nach EC 3-6 werden die Hubwerke in eine von vier Hubklassen HC1 bis HC4 eingestuft. Diese spiegeln die Auswirkungen der jeweiligen Hubwerke auf die Krankonstruktion wider. Über den dynamischen Faktor φ_2 wird die Stoßwirkung beim Heben der Hublast vom Boden berücksichtigt. Anhang B zur DIN EN 1991-3 [4] gibt in Tabelle B.1 eine Zuordnung der Hubklasse zum Verwendungszweck der Krananlage sowie zur Zuordnung zur S-Klasse (siehe Abschnitt Ermüdung) an.

Einteilung der Einwirkungen aus Kranbetrieb

Nach DIN EN 1991-3 Kapitel 2.2 sind die durch Krane verursachten Einwirkungen als veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen zu klassifizieren.

- Die veränderlichen Einwirkungen wiederum werden in veränderliche vertikale Einwirkungen, die durch das Eigengewicht des Krans und die Hublast verursacht werden sowie in veränderliche horizontale Einwirkungen, die durch das Beschleunigen und Bremsen, durch Schräglauf oder andere dynamische Einwirkungen verursacht werden, unterteilt.
- Außergewöhnliche Einwirkungen können durch Pufferanprall oder durch Kollision von Lastaufnahmemitteln mit Hindernissen (Kippkräfte) erzeugt werden.

Lastgruppen

Gemäß Kapitel 2.2.2 (6) darf das gleichzeitige Auftreten von Kranlastanteilen durch die Bildung von Lastgruppen berücksichtigt werden. Tabelle 3 stellt die nach DIN EN 1991-3 zu bildenden Lastgruppen mit den zu berücksichtigenden dynamischen Faktoren φ_i dar. In Tabelle 3 sind zusätzlich zu den Lastgruppen für Lastkombinationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie der außergewöhnlichen Kombinationen ergänzend auch die Lastkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und der Ermüdung aufgelistet.

Jede dieser Lastgruppen sollte für die Kombination mit anderen, nicht aus Kranbetrieb resultierenden Einwirkungen als eine einzige charakteristische Kraneinwirkung angesehen werden.

Die Kombinationsregeln für Kraneinwirkungen zusammen mit sonstigen Einwirkungen sind im Anhang A der DIN EN 1991-3 angegeben. Die Gruppeneinteilung gemäß Tabelle 3 sieht vor, dass zum jeweiligen Zeitpunkt nur eine horizontale Kraneinwirkung berücksichtigt wird.

Belastung	EC 1-3		Grenzzustand und Lastgruppe											Ermüdung		
	Symbol	Abschnitt	GZT ^a							GZG ^b			Außer-gewöhnl.		14	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9 ^d	10 ^e	11 ^e	12	13	
Eigengewicht des Krans	Q_c	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,1}$
Hublast	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	η^c	-	1	1	1	1	1	$\varphi_{fat,2}$
Beschleunigen/Bremsen der Kranbrücke	H_L H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-	1	-	-	-
Schräglauf der Kranbrücke	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Beschleunigen/Bremsen der Laufkatze oder des Hubwerks	$H_{T,3}$	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Wind in Betrieb	F_w^*	Anh. A	1	1	1	1	1	-	-	1	-	1	1	-	-	-
Kranprüflast	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-	-	-	-	-
Pufferkraft	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-	-
Kippkraft	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Teilsicherheitsbeiwerte γ_F, γ_M			$\gamma_F = 1,35$ $\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M1} = 1,10$ $\gamma_{M2} = \gamma_{M3} = 1,25$							$\gamma_{F,ser} = 1,00$ $\gamma_{M,ser} = 1,00$			$\gamma_{E,A} = 1,00$ $\gamma_{M,A} = 1,00$		$\gamma_{FF} = 1,00$ $\gamma_{MF} = 1,00/1,15/1,35$	

Bemerkung
 a Grenzzustand der Tragfähigkeit
 b Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
 c η ist der Anteil der Hublast, der nach Entfernen der Nutzlast verbleibt, jedoch nicht im Eigengewicht des Krans enthalten ist
 d zur Bestimmung der vertikalen Durchbiegungen bzw. Verformungen
 e zur Bestimmung der horizontalen Verformungen

Tabelle 3. Lastgruppen mit dynamischen Faktoren und Teilsicherheitsbeiwerten nach [17]

Einwirkungen aus Kranbetrieb und sonstigen Einwirkungen

Bild 6 stellt die Einwirkungen, die auf einen Kranbahnträger aus Kranbetrieb und sonstigen Einwirkungen anzusetzen sind, dar.

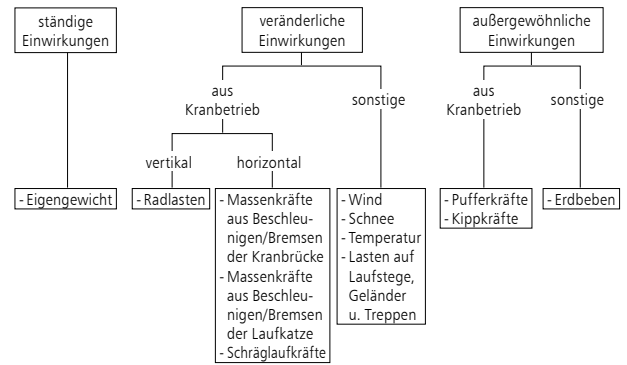


Bild 6. Einwirkungen auf den Kranbahnträger nach [17]

Ständige Einwirkungen

Im Regelfall gehören nur die Eigengewichte des Krans und das Eigengewicht des Bauteils d. h. des Kranbahnträgers zu den ständigen Einwirkungen. Gegebenenfalls sind auch Eigengewichte aus z. B. Laufstegen, Rohrleitungen oder andere den Träger belastende Konstruktionen als ständige Einwirkungen zu berücksichtigen.

2.3 Lasten und Lastanordnungen

2.3.1 Veränderliche vertikale Lasten

Die maximalen sowie die minimalen Radlasten werden zur Bemessung einer Kranbahn benötigt. Diese Radlasten sind unter Berücksichtigung der jeweils kritischen Lastanordnung für die einzelnen Lastgruppen nach Tabelle 3 zu bestimmen.

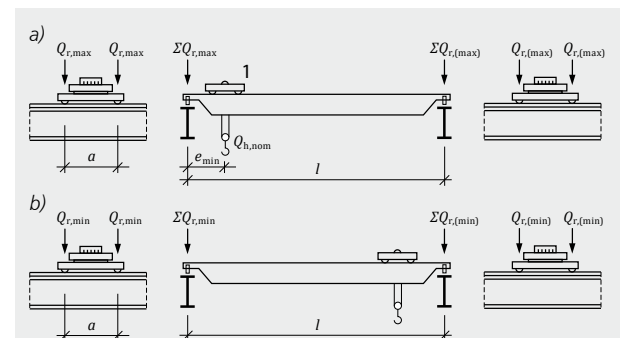


Bild 7. a) Lastanordnung des belasteten Krans zur Bestimmung der maximalen Belastung des Kranbahnträgers nach [4]
 b) Lastanordnung des unbelasteten Krans zur Bestimmung der minimalen Belastung des Kranbahnträgers nach [4]

mit

- e_{min} minimaler Abstand zwischen Laufkatze und Schienenmitte
- $Q_{r,max}$ maximale Last je Rad des belasteten Krans
- $Q_{r,(max)}$ zugehörige Last je Rad des belasteten Krans
- $\Sigma Q_{r,max}$ Summe der maximalen Radlasten $Q_{r,max}$ des belasteten Krans je Kranbahn
- $\Sigma Q_{r,(max)}$ Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(max)}$ des belasteten Krans je Kranbahn
- $Q_{r,min}$ minimale Last je Rad des unbelasteten Krans
- $Q_{r,(min)}$ zugehörige Last je Rad auf dem mehrbelasteten Kranbahnträger
- $\Sigma Q_{r,min}$ Summe der minimalen Radlasten $Q_{r,min}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn
- $\Sigma Q_{r,(min)}$ Summe der zugehörigen Radlasten $Q_{r,(min)}$ des unbelasteten Krans je Kranbahn
- $Q_{h,nom}$ Nennhublast
- 1 Laufkatze

Für Standardkrananlagen werden die maßgebenden Radlasten von den Kranherstellern angegeben. Sind diese nicht verfügbar, können diese Lasten auch rechnerisch ermittelt werden. In [17] sind die Bestimmungsgleichungen in Kapitel 3.3.3 angegeben.

Die Randlasteinleitung ist gemäß DIN EN 1991-3 Kapitel 2.5.2.1 (2) mit einer Exzentrizität e von 1/4 der Schienenkopfbreite b_r anzusetzen: $e = 0.25 \cdot b_r$. Die sich aus der Exzentrizität der vertikalen Radlasteinleitung ergebende Torsion ist aber in der Liste der zu berücksichtigenden Schnittgrößen nach EC 3-6, Kapitel 5.6.1 (1) nicht enthalten.

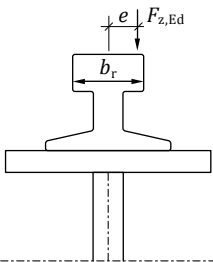


Bild 8. Exzentrizität der Radlast nach [6]

Explizit angegeben ist die Berücksichtigung der exzentrischen Radlasteinleitung nur für den Ermüdungsnachweis in den Beanspruchungsklassen S_3 bis S_9 gemäß DIN EN 1993-6, Kapitel 9.3.3 (1).

2.3.2 Veränderliche horizontale Lasten

Ursache der auftretenden horizontalen Lasten sind:

- Massenkräfte, die sich aus dem Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke ergeben. Dadurch ergeben sich Kräfte längs und quer zur Fahrbahn.
- Massenkräfte, die sich aus dem Beschleunigen und Bremsen der Laufkatze ergeben. Im Vergleich zu den möglichen Pufferkräften aus dem Anprall der Laufkatze sind diese Kräfte eher gering.
- Spurführungskräfte, die sich aus dem Schräglauf des Krans ergeben.

Die Ermittlung dieser veränderlichen horizontalen Lasten erfolgt nach DIN EN 1991-3 [4], Kapitel 2.5 und 2.7. Diese Berechnungen entsprechen grundsätzlich den Lastermittlungen in DIN EN 13001-2 [2].

Auch die horizontalen Lasten aus Spurführungskräften und die Massenkräfte aus Bremsen und Anfahren werden in der Regel von den Kranherstellern angegeben. Die von den Kranherstellern festgelegten Nennwerte der horizontalen Lasten sind dabei als charakteristische Werte anzunehmen.

Antriebskräfte:

Die Antriebskraft K eines angetriebenen Rades ist so ausulegen, dass ein Durchdrehen der Räder verhindert wird. Um dies zu gewährleisten muss das Antriebsmoment der Räder kleiner sein als durch den Reibschluss zwischen Rad und Schiene übertragen werden kann. Der minimale Reibschluss entsteht bei den geringstmöglichen Radlasten eines Krans. Weiterhin ist der Wert von der Größe des Reibungsbeiwerts μ und der Antriebsart abhängig.

Wenn kein radkontrolliertes System verwendet wird, ermittelt sich die Antriebskraft K nach Gleichung (2.5) der DIN EN 1991-3 [4] zu:

$$K = K_1 + K_2 = \mu \cdot \sum Q_{r,min}^*$$

- bei Einzelradantrieb:
 $\sum Q_{r,min}^* = m_w \cdot Q_{r,min}$, wobei m_w die Anzahl der angetriebenen Räder ist

- bei Zentralantrieb:
 $\sum Q_{r,min}^* = Q_{r,min} + Q_{r,(min)}$

mit
 μ Reibungsbeiwert
 $\mu = 0.2$ bei Stahl auf Stahl
 $\mu = 0.5$ bei Stahl auf Gummi

Die modernen Krananlagen besitzen üblicherweise keinen Zentralantrieb mehr, sondern besitzen Einzelradantriebe.

2.3.2.1 Horizontale Kräfte $H_{L,i}$ und $H_{T,i}$ aus Beschleunigung und Bremsen der Kranbrücke

In Fahrrichtung der Kranbrücke, d. h. in Längsrichtung des Kranbahnträgers, entstehen durch das Beschleunigen und Bremsen der Kranbrücke horizontale Lasten $H_{L,i}$. Diese Längskräfte sind in der Regel für die Bemessung der Kranbahnträger vernachlässigbar. Für die Lastweiterleitung bzw. für die Auslegung der Bremsverbände müssen sie jedoch berücksichtigt werden. Nach Gleichung (2.2) aus [4] dürfen die Längskräfte berechnet werden zu:

$$H_{L,i} = \varphi_5 \cdot K \cdot \frac{1}{n_r}$$

mit
 φ_5 Dynamischer Faktor, siehe Tabelle 2
 K Antriebskraft
 n_r Anzahl der Kranbahnträger
 i Kennzeichnung des Kranbahnträgers

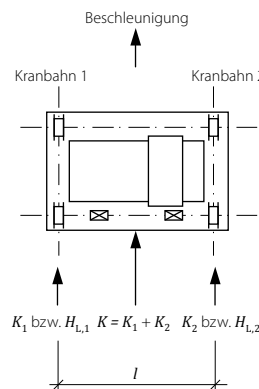


Bild 9. Antriebskräfte bzw. horizontale Lasten längs der Fahrbahn nach [17]

Bei Ausführung des Antriebs mit Einzelradantrieb werden diese auf beiden Kranbahnseiten gleich ausgelegt, so dass die resultierende Antriebskraft in der Mitte der Kranstützweite wirkt.

Bei einseitiger Katzstellung fällt jedoch der Massenschwerpunkt der Krananlage nicht mit der resultierenden Antriebskraft K zusammen (Bild 10 a).

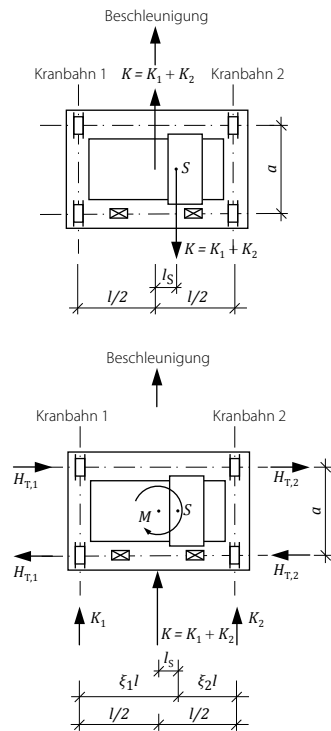


Bild 10 a und b. Horizontale Massenkräfte quer zur Kranbahn infolge von Beschleunigen und Bremsen nach [17]

Zwischen dem Massenschwerpunkt und der resultierenden Antriebskraft entsteht der maximale Abstand I_s bei extremer Katzstellung des vollbelasteten Krans. Das durch die Antriebskräfte erzeugte Moment M , das im Massenschwerpunkt angreift, wird in ein horizontales Kräftepaar $H_{T,i}$ zerlegt, das quer zur Kranbahn wirkt. Die mit dem Moment im Gleichgewicht stehenden Massenkräfte $H_{T,i}$ werden durch Kraftschluss über die Räder an die Schiene und damit an den Kranbahnträger weitergeleitet (Bild 10 b).

Die Aufteilung der Massenkräfte auf die beiden Kranbahnseiten erfolgt proportional zu ξ_1 und ξ_2 , sofern die Laufradpaare Festlager sind. Diese quer zur Fahrbahn in Höhe der Schienenoberkante angreifenden Kräfte sind bei der Bemessung der Kranbahnträger zu berücksichtigen.

Die Horizontalkräfte $H_{T,1}$ werden nach DIN EN 1991-3 [4] Gleichungen (2.3) und (2.4) berechnet zu:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \cdot \xi_2 \cdot \frac{M}{a}$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \cdot \xi_1 \cdot \frac{M}{a}$$

mit

$$\xi_1 = \frac{\sum Q_{r,max}}{\sum Q_r}$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1$$

$$\sum Q_r = \sum Q_{r,max} + \sum Q_{r(max)}$$

a Abstand der Führungsrollen bzw. der Spurkränze

M Moment $M = K \cdot I_s$ und $I_s = (\xi_1 \cdot 0,5) \cdot l$

l Spannweite der Kranbrücke

2.3.2.2 Horizontale Kräfte $H_{S,i,j,k}$ und Führungskraft S infolge Schräglauf des Krans

Spiel und Verschleiß von Schienen und Rädern sowie Maßabweichungen führen zu einer leichten „Verkantung“ der auf den Kranbahnen fahrenden Kranbrücke. Daraus entstehen Kräfte quer zur Schiene, die aufzunehmen und abzutragen sind.

Die Kraftübertragung kann erfolgen über:

- Reibungskräfte in der Rad / Schiene-Ebene. Die maximal aktivierbaren Reibungskräfte hängen von der Größe der vertikalen Radlast und dem Reibungsbeiwert μ ab.
- Seitliche Führung entweder über Spurkränze oder über seitliche Seitenführungsrollen (Bild 11).



Bild 11. Laufräder mit Spurführungselementen, Spurkränzen, Horizontal-Führungsrollen [Foto Demag]

Die Regelungen zum Spurführungsproblem sind in DIN EN 1991-3, Kapitel 2.7.4 angegeben. Da die tatsächlichen Vorgänge sehr kompliziert zu erfassen sind, werden zur Abschätzung der auftretenden Kräfte vereinfachte Modelle benutzt. Folgende Annahmen werden nach Seeßelberg [16] und Kuhlmann et. al. [17] für die vereinfachenden Modellberechnungen angesetzt:

- Annahme einer stationären Bewegung: Das dynamische Problem wird auf einen statischen Gleichgewichtszustand reduziert.
- Für Kranbrücke und Kranbahn wird eine Starrkörperbewegung vorausgesetzt.
- Die Laufräder sind Spielfrei und haben den gleichen Durchmesser.
- Es wird die hintere Freilaufstellung als maßgebend angenommen. Dabei wird der Kran mit dem vordersten Führungsmittel (Spurkranz oder Führungsmittel) geführt und alle anderen Räder laufen frei. Am vordersten Führungsmittel entsteht dadurch eine Führungskraft S , die eine Drehung der Kranbrücke um den Gleitpol M einleitet. Aus Gleichgewichtsgründen stehen dieser Führungskraft S horizontale Reaktionskräfte $H_{S,i,j,k}$ in den Aufstandsflächen der Räder längs und quer zur Fahrbahn gegenüber. Die Größe dieser Kräfte hängt vom Kranfahrwerkssystem, der Geometrie der Kranbrücke und der Art der Spurführung ab. Das vereinfachte Modell ist in Bild 12 abgebildet.

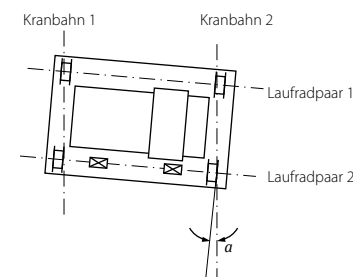


Bild 12. Starrkörperbewegung mit Freilaufstellung nach [17]

Die Gleichungen (2.6) bis (2.10) in DIN EN 1991-3 [4] geben die Führungskraft S und die Schräglaufkräfte $H_{S,i,j,k}$ an zu:

$$S = f \cdot \lambda_{S,j} \cdot \sum Q_r$$

$$H_{S,1,j,L} = f \cdot \lambda_{S,1,j,L} \cdot \sum Q_r$$

$$H_{S,2,j,L} = f \cdot \lambda_{S,2,j,L} \cdot \sum Q_r$$

$$H_{S,1,j,T} = f \cdot \lambda_{S,1,j,T} \cdot \sum Q_r$$

$$H_{S,2,j,T} = f \cdot \lambda_{S,2,j,T} \cdot \sum Q_r$$

mit

- $f = 0.3 (1 - \exp(-250 \cdot \alpha)) \leq 0.3$ Kraftschlussbeiwert
- $\lambda_{S,2,j,k}$ Kraftbeiwert (Ermittlung nach Tabelle 2.9 in [4])
- i Schienenachse i
- j Radpaarachse j
- k Richtung der Kraft ($L =$ längs, $T =$ quer)
- α Schräglaufwinkel

Für die genaue Ermittlung der Schräglaufkräfte und der Führungskraft S wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. [16], [17]).

In Bild 13 sind die Schräglaufkräfte und die horizontalen Reaktionskräfte für einige Antriebsarten dargestellt.

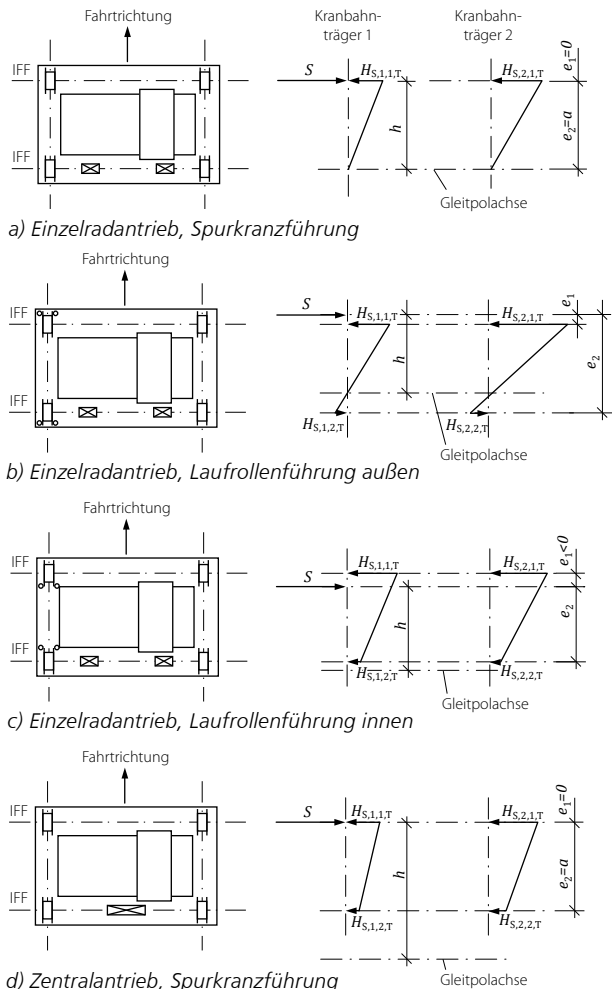


Bild 13. Schräglaufföhrungskräfte und horizontale Reaktionskräfte quer zur Fahrbahn abhängig von Spurföhrung und Antriebsart nach [17]

2.3.3 Außergewöhnliche Einwirkungen

Pufferkräfte infolge Anprall des Krans:

Die Pufferkräfte resultieren aus einem möglichen Aufprall der Kranbrücke auf die Puffer. Für die Dimensionierung des Kranbahnträgers können diese Lasten längs der Fahrbahn i.d.R. vernachlässigt werden. Sie sind jedoch für die Dimensionierung der Längsaussteifungen der Kranbahn- bzw. Hallenstützen zu berücksichtigen. Die Pufferkräfte werden in der Regel vom Kranhersteller angegeben.

Pufferkräfte infolge Anprall der Laufkatze:

Die Pufferkräfte aus Anprall der Laufkatze sind für die Kranbahnträger wegen der üblicherweise geringen Größe von untergeordneter Bedeutung. Nach DIN EN 1991-3 berechnet sich die Pufferkraft unter Voraussetzung einer freischwingenden Nutzlast zu:

$$H_{B,2} = 0.1 \cdot (Q_{C2} + Q_h)$$

mit

- Q_{C2} Eigengewicht der Laufkatze
- Q_h Hublast des Krans

2.3.4 Einwirkungen aus mehreren Kranen

Für die maximale Anzahl von Kranen, die gleichzeitig eine Kranbahn befahren, sind in DIN EN 1991-3 Empfehlungen angegeben (Bild 14). Dabei ist jede Lastgruppe eines Krans als eine einzelne charakteristische Einwirkung zu verstehen.

Bei gleichzeitiger Wirkung von mehreren Kranen pro Kranbahn darf nach dem NA zu DIN EN 1993-6 [7] für den Kran mit dem größten Wert $\varphi_2 \cdot Q_h$ mit dessen dynamischen Faktor gerechnet werden und für die übrigen Krane mit dem dynamischen Faktor der Hubklasse HC1 nach DIN EN 1991-3 [4].

	Krane je Kranbahn	Krane je Hallenschiff	Krane in mehrschiffigen Hallen	
Vertikale Kraneinwirkung	3	1	1	2
Horizontale Kraneinwirkung	2	2	2	2

Bild 14. Empfehlung für die maximale Anzahl von Kranen in ungünstigster Stellung nach [4]

In bestimmten Fällen – z.B. beim Transport einer besonders großen Hublast – ist es erforderlich, dass zwei Krane planmäßig zusammenwirken. Nach 2.5.3 (1) aus EC 1-3 [4] sind die zusammenwirkenden Krane wie ein Kran zu behandeln.

3. Bemessung von Kranbahnträgern

3.1 Allgemeines

Im Wesentlichen erfolgt die Belastung der Kranbahnträger durch wandernde Radlastgruppen bestehend aus vertikalen Radlasten und horizontalen Lasten quer zur Fahrbahn infolge von Massen- und Schräglaufkräften.

Die horizontalen Lasten werden an der Oberkante der Schiene eingeleitet und beanspruchen damit den Kranbahnträger auf Torsion und Biegung um die schwache Achse. Verstärkt wird die Torsionsbeanspruchung ggf. noch durch eine exzentrische vertikale Radlasteinleitung, die bei einer Einstufung des Krans in die S-Klassen S₃ bis S₉ zu berücksichtigen ist.

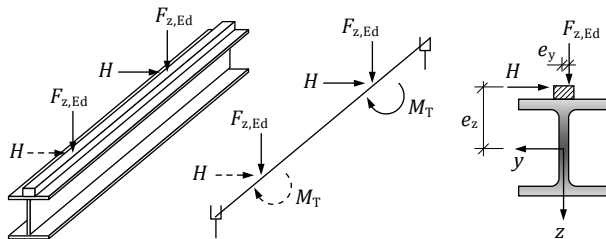


Bild 15. Beanspruchung eines Kranbahnträgers

Damit liegt für den Kranbahnträger eine Beanspruchung aus zweiachsiger Biegung und Torsion vor, die den Träger zusätzlich verdrillt. Dies erfordert eine Nachweisführung nach der Spannungstheorie II. Ordnung unter Berücksichtigung des 7. Freiheitsgrades, der Verwölbung.

Obwohl es sich bei Kranbahnträgern um statisch einfache Systeme handelt, sind weder der Ort der maximalen Beanspruchung noch die zugehörige Radlastposition von vornherein bekannt.

3.2 Radlasteinleitung

Die hohen konzentrierten Radlasten bewirken im Obergurt und im Bereich des angrenzenden Steges sowie in den Schweißnähten bei aufgeschweißten Schienen hohe Zusatzbeanspruchungen. Diese Zusatzbeanspruchungen sind mit den globalen Beanspruchungen zu überlagern. Infolge exzentrischer Radlasteinleitung werden am oberen Steganschluss zusätzliche lokale Biegespannungen erzeugt.

3.2.1 Zentrische Radlasteinleitung

Lokale vertikale Druckspannungen im Steg:

Im Steg entstehen durch die Radlasteinleitung auf dem Obergurt lokale vertikale Druckspannungen. Der tatsächliche Spannungsverlauf stellt sich wegen der Nachgiebigkeit des „weichen“ Steges qualitativ entsprechend dem Verlauf in Bild 16 ein. Vereinfachend dürfen diese lokalen Druckspannungen nach DIN EN 1993-6, Kapitel 5.7 jedoch als konstant über die effektive Länge l_{eff} angesetzt werden.

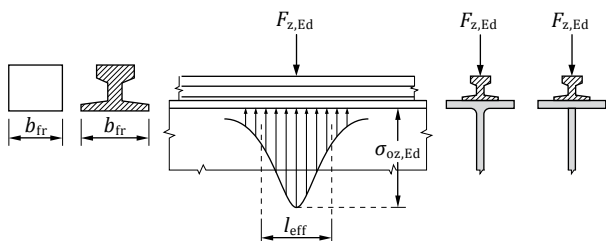


Bild 16. Effektive Lastausbreitungslänge nach [6]

Nach GL (5.1) [6] bestimmt sich die lokale vertikale Druckspannung zu:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{t_w \cdot l_{eff}}$$

mit

- $F_{z,Ed}$ Bemessungswert der Radlast
- l_{eff} effektive Lastausbreitungslänge
- t_w Dicke des Stegbleches

Für Walzprofile mit dem Ausrundungsradius r darf statt der Länge l_{eff} die Länge $(l_{eff} + 2 \cdot r)$ zur Ermittlung der lokalen vertikalen Druckspannungen verwendet werden. Die effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} , über die die vertikale Druckspannung $\sigma_{oz,Ed}$ infolge einer einzelnen Radlast gleichmäßig verteilt angenommen werden darf, kann mit den Angaben nach Tabelle 4 (Tabelle 5.1 aus [6]) bestimmt werden.

Ist der Abstand benachbarter Kranräder kleiner als l_{eff} , kommt es zu Spannungsüberlagerungen, die rechnerisch zu berücksichtigen sind.

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{rf} / t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{r,eff}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6 mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{r,eff}) / t_w]^{1/3}$

$I_{r,eff}$ Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}
 I_r Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene
 $I_{r,f}$ Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}
 t_w Stegdicke
 $b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ aber $b_{eff} \leq b$
 Dabei ist:
 b Gesamtbreite des Obergurtes
 b_{fr} Breite des Schienenfußes
 h_r Schienenhöhe
 t_f Flanschdicke

Anmerkung: Der Verschleiß der Kranschiene wird bei der Bestimmung von I_r , I_{rf} und h_r berücksichtigt, siehe 5.6.2(2) und 5.6.2(3) in [6].

Tabelle 4. Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}

Ausgehend von der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} an der Oberseite des Steges kann für die Berechnung der vertikalen lokalen Spannung $\sigma_{oz,Ed}$ in horizontalen Schnitten des Steges eine Lastausbreitung von 45° angenommen werden (Bild 17). Überschreitet die gesamte Lastausbreitungslänge den Abstand zwischen zwei benachbarten Rädern, so sind die Spannungen aus beiden Rädern zu überlagern.

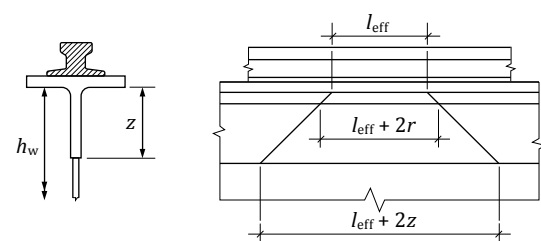


Bild 17. Ausbreitung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} unter 45° nach [6]

Lokale Schubspannungen im Steg:

Zusätzlich zu den lokalen vertikalen Druckspannungen entstehen durch die Radlasteinleitung auch lokale Schubspannungen. Die maximal wirkende lokale Schubspannung entsteht auf beiden Seiten der Radlast. Das Schubspannungsmaximum tritt etwas versetzt zur maximalen vertikalen Druckspannung auf. Die Größe der lokalen Schubspannung darf nach DIN EN 1993-6, Kapitel 5.7.2 zu 20% der im Steg wirkenden lokalen vertikalen Druckspannung $\sigma_{oz,Ed}$ angenommen werden.

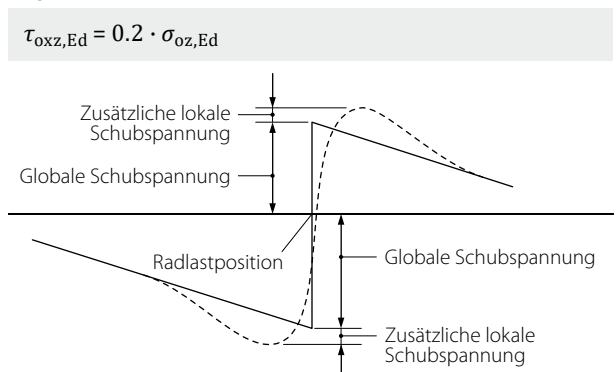


Bild 18. Lokale und globale Schubspannungen infolge einer Radlast nach [6]

Diese lokalen Schubspannungen müssen bei den Tragfähigkeitsnachweisen nicht berücksichtigt werden, da es sich hierbei um Zwängungsspannungen handelt. Sie sind jedoch in der Nachweisführung zur Ermüdung anzusetzen. Die lokale Schubspannung ist dabei zusätzlich zu der globalen Schubspannung aus derselben Radlast zu berücksichtigen. In horizontalen Schnitten im Steg unterhalb $z = 0.2 \cdot h_w$ darf die lokale Schubspannung vernachlässigt werden (mit z und h_w entsprechend Bild 17).

3.2.2 Exzentrische Radlasteinleitung

Eine exzentrische Radlasteinleitung ist bei Kranen der Kranklassifizierung S_3 bis S_9 (vgl. Abschnitt Ermüdung) anzunehmen. Hierbei ist die Radlastausmitte e_y mit $0.25 \cdot b_r$ ($b_r =$ Schienenkopfbreite) zu berücksichtigen. Diese Exzentrizität führt zu einer Torsionsbeanspruchung im Obergurt des Kranbahnträgers und zu einer Biegebeanspruchung am Steganschluss (Bild 19).

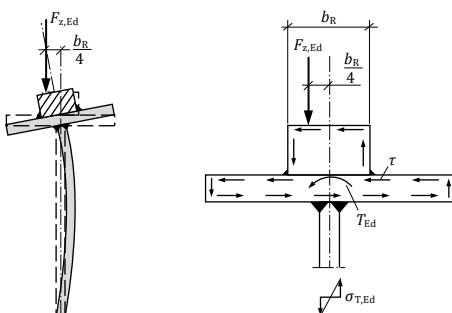


Bild 19. Gurttorsion und Stegbiegung bei exzentrischer Radlasteinleitung nach [17]

Entsprechend EC 3-6, Kapitel 6.5.1 (2) dürfen die Einwirkungen aus der seitlichen Ausmitte bei den Tragfähigkeitsnachweisen vernachlässigt werden. Sie sind aber beim Nachweis der Ermüdung zu berücksichtigen.

Die Stegbiegebeanspruchung errechnet sich nach GL (5.2) [6] zu:

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot \tanh(\eta)$$

mit

$$\eta = \left[\frac{0.75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_t} \times \frac{\sinh^2 \left(\frac{\pi \cdot h_w}{a} \right)}{\sinh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_w}{a} \right) - \frac{2 \cdot \pi \cdot h_w}{a}} \right]^{0.5}$$

- a Abstand der Querstreifen im Steg
- h_w Gesamthöhe des Steges als lichter Abstand zwischen den Flanschen
- I_t Torsionsträgheitsmoment des Flansches (einschl. der Schiene, falls sie schubstarr befestigt ist)

Das Torsionsmoment T_{Ed} infolge seitlicher Exzentrizität e_y der Radlast $F_{z,Ed}$ berechnet sich dabei zu:

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y$$

3.3 Grenzzustände

EC 3-6 unterscheidet folgende Grenzzustände:

- Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT)
- Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG)
- Ermüdungsnachweis

Diese Grenzzustände sind bei Entwurf, Berechnung und Bemessung zu untersuchen.

3.3.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit

Kuhlmann et. al. geben in Tabelle 5 eine Übersicht über die im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu führenden Einzelnachweise und deren Alternativen.

Nachweis	Einzelnachweis nach EN 1993-1-1	Alternative
Querschnittsnachweis	Querschnittsnachweis	Spannungsnachweis nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung
Bauteilnachweis	Biegedrillknicknachweis	
Lokale Nachweise	Nachweis des Fließ-Kriteriums bei Querbelastung von Stegblechen	Beulnachweis von Stegen unter lokaler Querbelastung nach EN 1993-1-5
	Nachweis gegen plastisches Stauchen	
	Nachweis gegen Stegblechkrüppeln	
	Beulen des Gesamtfeldes ¹	

¹ Der Nachweis ist nach EN 1993-1-1 nur zu führen, wenn die Kräfte an beiden Flanschen gegengerichtet angreifen und durch das Stegblech hindurchgeführt werden, z.B. an Innenauflagern ohne Querstreifen.

Tabelle 5. Übersicht der zu führenden Einzelnachweise und deren Alternativen nach [17]

Querschnittsnachweise:

Die Querschnitte von Stahlprofilen werden nach DIN EN 1993-1-1 [8] ihrem Tragverhalten entsprechend in die Querschnittsklassen 1 bis 4 eingeteilt. Die c/t -Verhältnisse der einzelnen Querschnittsteile und die Spannungsverläufe sind maßgebend für die Zuordnung eines Querschnitts zu einer Querschnittsklasse (QK). Von der Querschnittsklasse hängt ab, ob die Querschnittstragfähigkeit elastisch unter Berücksichtigung des lokalen Beulens (QK 4), oder elastisch (QK 3) berechnet werden darf, oder ob auch plastische Querschnittstragfähigkeiten (QK 1 und 2) genutzt werden dürfen.

Aufgrund der häufig wechselnden Beanspruchungen sind Kranbahnträger der Materialermüdung ausgesetzt. Bei schwerem Betrieb kann dies bemessungsmaßgebend werden. Hohe Anforderungen werden bei Kranbahnträgern auch an die Verformungsbegrenzung gestellt, die damit in vielen Fällen bemessungsmaßgebend werden kann. Wegen den Verformungs- und Ermüdungsrestriktionen erfolgt in der Regel eine elastische Tragwerksbemessung. Plastische Querschnittsreserven sind nur bei leichtem Kranbetrieb und mit geringer Ermüdungsbeanspruchung nutzbar.

Kranbahnträger werden im Allgemeinen elastisch nachgewiesen. Dies kann sowohl über Spannungen als auch über Schnittgrößen erfolgen.

Querkraft:

Der Querkraftnachweis ist bei Kranbahnträgern für den Steg infolge der vertikalen Radlasten zu führen. Die resultierenden horizontalen Einwirkungen aus Massen- und Schräglaufkräften werden über den Obergurt übertragen, so dass auch hierfür der Querkraftnachweis zu führen ist.

Die elastische Querkraft-Nachweisführung lautet:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \leq 1.0 \text{ mit } \tau_{Ed} = \frac{V_{Sd} \cdot S_y}{I_y \cdot t}$$

Die Nachweisführung nach EC 3-1-1 ermöglicht bei einer elastischen Bemessung auch eine teilweise Plastizierung des Steges, so dass der Querkraftnachweis lautet:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1.0 \text{ mit } V_{Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Zusätzlich ist ein Nachweis gegen Schubbeulen für unausgesteifte Stegbleche nach DIN EN 1993-1-5 [10] zu führen (siehe Abschnitt Beulen).

Biegung und Längskraft:

Die Schnittgrößen des Kranbahnträgers ergeben sich aus der Haupt- und Querbiegung des Trägers sowie aus Torsion. Die Torsionsbeanspruchung resultiert aus der Hebelwirkung einer an der Schienenoberkante angreifenden Horizontalkraft bezogen auf den Schubmittelpunkt. Sie verursacht als Schnittgrößen Torsionsmomente und Wölbbimomente.

a) elastische Berechnung

Bei Kranbahnträgern können die Biegemomente infolge der horizontalen Einwirkungen vereinfacht dem Obergurt bzw. dem Untergurt zugewiesen werden. Die Biegemomente infolge der vertikalen Einwirkungen werden vom Gesamtquerschnitt aufgenommen. Auf der sicheren Seite und vereinfachend dürfen die Längskräfte ebenfalls dem Ober- bzw. Untergurt zugewiesen werden. Die Längskräfte sind üblicherweise jedoch so gering, dass sie keine wesentliche Auswirkung auf die Spannungsermittlung haben.

Der vereinfachte Nachweis bei zweiachsiger Biegung mit Längskraft bestimmt sich für den Obergurt zu:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{fo}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,el}} + \frac{M_{z,o,Ed}}{W_{z,fo,el}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

mit

- N_{Ed} Bemessungswert der Längskraft
- $M_{y,Ed}$ Bemessungswert des Biegemoments infolge vertikaler Einwirkungen
- $M_{z,o,Ed}$ Bemessungswert des Biegemoments am Obergurt infolge der resultierenden horizontalen Einwirkungen
- A_{fo} Querschnittsfläche des Obergurts, bei starrer Schienenbefestigung einschließlich Schiene
- $W_{y,el}$ elastisches Widerstandsmoment des Gesamtquerschnitts um die y-Achse, bei starrer Schienenbefestigung einschließlich Schiene
- $W_{z,fo,el}$ elastisches Widerstandsmoment des Obergurtes um die z-Achse, bei starrer Schienenbefestigung einschließlich Schiene

Die vereinfachte Nachweisführung kann auch mit einer genauen Torsionsrechnung durchgeführt werden. In diesem Fall sollte die Schnittgrößenermittlung nach der Biegetorsionstheorie II. Ordnung durchgeführt werden, damit auf einen zusätzlichen Biegedrillknicknachweis verzichtet werden kann.

b) plastische Berechnung

Unter Berücksichtigung des Wölbbimomentes ist die Querschnittstragfähigkeit eines I-Profiles der Querschnittsklassen 1 oder 2 zu führen mit:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{\omega,Ed}}{M_{pl,\omega,Rd}} \leq 1.0$$

Interaktion Biegung und Querkraft:

Übersteigt die Querkraft 50% der vollplastischen Querkraft, so ist die Momententragfähigkeit über eine reduzierte Streckgrenze entsprechend Kapitel 6.2.10 [8] zu berücksichtigen.

Nachweis des Steges infolge konzentrierter Radlasteinleitung:

Infolge der konzentrierten Radlasteinleitung sind die Stege von Kranbahnträgern auf Beulen (Bild 20) unter lokaler Querkraftbeanspruchung nachzuweisen.

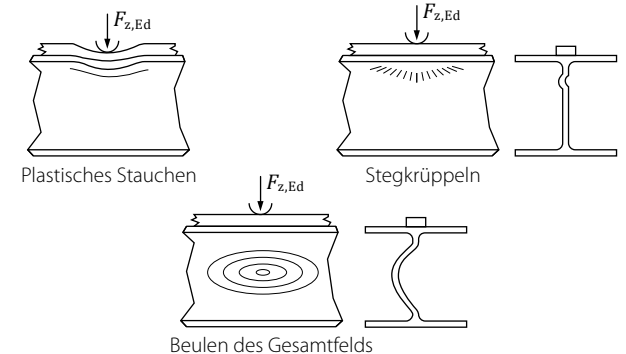


Bild 20. Nachweise von Stegen infolge konzentrierter Radlasteinleitung

Die Beulnachweise sind nach DIN EN 1993-1-5 [10] für plattenförmige Bauteile zu führen. In Teil 2 zu diesem Beitrag werden die Grundlagen und die Nachweise detailliert vorgestellt.

Nachweis gegen Biegedrillknicken:

Bei Kranbahnträgern für Laufkrane ist eine ausreichende Biegedrillknicksicherheit in vielen Fällen bemessungsmaßgebend. Infolge der außermittigen vertikalen und horizontalen Belastungen (Bild 21) sind die Kranbahnträger durch zweiachsige Biegung, Torsion und Imperfektionen beansprucht. Die Verdrehung des Kranbahnquerschnitts infolge Torsion führt zu einem vergrößerten Hebelarm der vertikalen Lasten zum Schubmittelpunkt des Trägers und damit zu einer vergrößerten Torsionslast. Dieser Effekt ist bei der Kranbahnträgerbemessung immer zu berücksichtigen; es liegt damit ein Biegetorsionsproblem II. Ordnung vor.

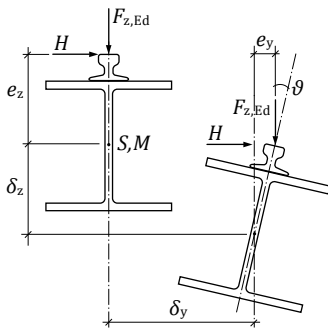


Bild 21. Kranbahnträger bei Belastung an der Schienenoberkante nach [16]

Die in EC 3-1-1 [8] angegebenen Regelungen für den Biegedrillknicknachweis erfassen jedoch nicht den Fall der planmäßigen Torsion und sind deshalb für Kranbahnträger nicht anwendbar.

Tordiert der Kranbahnträger, so wandert der Lasteinleitungspunkt der vertikalen Radlasten in Richtung der Schienenkante (Bild 22). Gemäß EC 3-6, Kapitel 6.3.2 [6] darf dieser Effekt für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei starrer Schienenverbindung ausgenutzt werden. Die Lasteinleitung darf in diesem Fall als im Schubmittelpunkt wirkend angesetzt werden.

Dieser günstige Einfluss darf bei Verwendung einer elastischen Unterlage zwischen Kranschiene und Kranbahnträger nicht berücksichtigt werden.

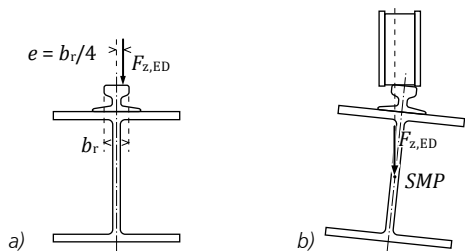


Bild 22. Radlasteinleitung mit
a) Exzentrizität der Radlast (Ermüdungsnachweis)
b) Effekt der Lasteinleitung bei starrer Schiene

Zur Nachweisführung des Biegedrillknickens gibt es nachfolgende Möglichkeiten:

a) Ersatzstabverfahren - Nachweis des Druckflansches als Druckstab

Nach EC 3-6, Kapitel 6.3.2.3 kann ein genaueres BDK-Nachweis entfallen, wenn der Obergurt und 1/5 des Steges als Druckstab infolge der vertikalen Biegung und einer zusätzlichen Biegebeanspruchung in der horizontalen Ebene infolge der Horizontallasten nachgewiesen werden.

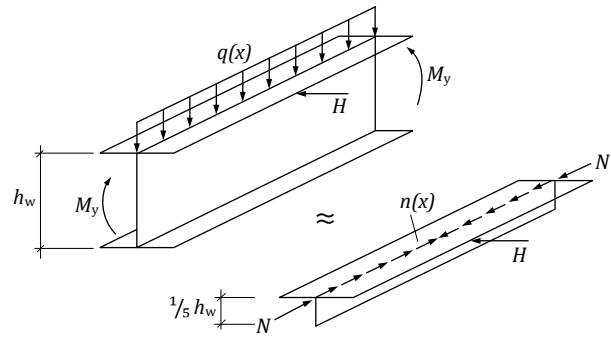


Bild 23. Beanspruchung des Obergurtes und 1/5 des Steges als Druckstab nach [17]

b) Ersatzstabverfahren – Alternatives Verfahren nach Anhang A des EC 3-6

Das im Anhang A des EC 3-6 beschriebene Verfahren ist unter Berücksichtigung des Wölbbimomentes B_{Ed} anzuwenden. Die Anwendung ist aufwändiger als das unter a) beschriebene Ersatzstabverfahren, da es die Berechnung des Wölbbimomentes voraussetzt.

c) Biegedrillknicknachweis als Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung

Wird ein genauer Biegedrillknicknachweis nach Spannungstheorie II. Ordnung geführt, ist ein zusätzlicher Querschnittsnachweis nicht mehr erforderlich. Eine allgemeine Berechnung ist nur mit leistungsfähiger Software möglich, bei der zwingend die Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion enthalten sein muss.

Als Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung sind beim Biegedrillknicknachweis Ersatzimperfektionen zu berücksichtigen, deren Vorverformung affin der zum kleinsten Eigenwert gehörenden Verformung anzusetzen ist (Bild 24).

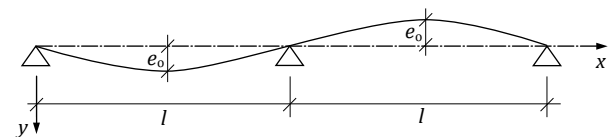


Bild 24. Ansatz der Ersatzimperfektionen bei einem zweifeldrigen Kranbahnträger nach [17]

In DIN EN 1993-1-1 sind die Vorverformungen für den Biegedrillknicknachweis nicht explizit definiert. Nach Kuhlmann et. al. [17] sind die Bemessungswerte für das Stichmaß e_0 der Bogenvorkrümmung in Tabelle 6 angegeben. Die Wahl der anzusetzenden Knickspannungslinie ist profilabhängig.

Knickspannungslinie ($Y_{M1} = 1,0$)	Knicknachweis		Biegedrillknicknachweis	
	Elastischer Querschnittswiderstand	Plastischer Querschnittswiderstand	Elastischer Querschnittswiderstand	Plastischer Querschnittswiderstand
	I / e_0	I / e_0	I / e_0	I / e_0
a_0	350	300	700	600
a	300	250	600	500
b	250	200	500	400
c	200	150	400	300
d	150	100	300	200

Tabelle 6. Bemessungswerte für das Stichmaß e_0 der Bogenvorkrümmungen nach [17]

Eine Berechnung nach der Spannungstheorie II. Ordnung liefert für den Kranbahnträger infolge zweiachsiger Biegung und Wölbkrafttorsion prinzipiell Spannungsverläufe entsprechend Bild 25.

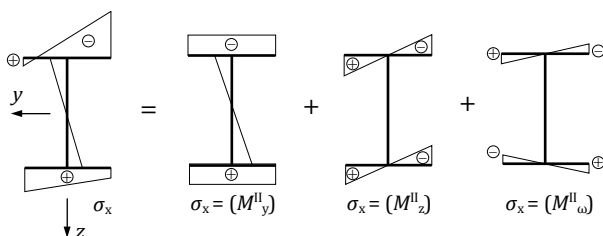


Bild 25. Normalspannungsverteilung bei zweiachsiger Biegung mit Wölbkrafttorsion nach [17]

Zusätzlich zu den Normalspannungen treten Schubspannungen infolge der Querkräfte, der primären Schubspannungen infolge der St. Venant'schen Torsion sowie der sekundären Schubspannungen infolge der Wölbkrafttorsion auf.

Die maßgebende Querschnittsstelle ist in der Regel die Flanschaußenkante, an der sich die einzelnen Komponenten aus Biege- und Wölbkraftnormalspannungen überlagern. Da an den Flanschaußenkanten die Schubspannungen aus den Querkäften und die sekundären Schubspannungen verschwinden, ist eine Interaktion nicht erforderlich.

Damit ist der Spannungsnachweis nach Theorie II. Ordnung wie folgt zu führen:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{y,Ed}^{II}}{W_{y,el}} + \frac{M_{z,Ed}^{II}}{W_{z,el}} + \frac{M_{\omega,Ed}^{II}}{W_{\omega,el}} \cdot \omega \leq f_{yd}$$

Weitere Nachweise:

Als typische Nachweise, die bei gewöhnlichen Kranbahnträgern zu führen sind, gehören:

- Nachweis von Quer- und ggf. Längssteifen
- Nachweis der Auflagerpressung bei Auflagerungen mit Zentrierleisten
- Nachweis der Auflagerknaggen
- Nachweis von Auflagerkonsolen
- Nachweis von Schienenbefestigungen

3.4 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Für Kranbahnen und deren Unterstützungen werden in DIN EN 1993-6 Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit gestellt in Form von:

- Begrenzung der Verformungen
- Spannungsbegrenzung zur Gewährleistung elastischen Verhaltens
- Begrenzung des Stegblechatmens
- Schwingungen

Die Begrenzung der Verformungen und Verschiebungen dient vor allem dem Zweck, einen störungsfreien und verschleißarmen Kranbetrieb sicherzustellen. Dabei ist die Begrenzung der Verformung keine bauaufsichtliche Forderung, sondern jeweils eine im Einzelfall abzustimmende Vereinbarung mit dem Bauherrn. Die in den Normen angegebenen Verformungsrestriktionen stellen Empfehlungen dar.

Vertikale Verformungen

Die Größe der vertikalen Verformungen wird begrenzt (siehe Tabelle 7), um folgenden Ziele zu erreichen:

- zu starke Schwingungen der Krananlage verhindern
- zu starke Neigungen der Kranbahn zu vermeiden
- zu starke Neigungen der Kranbrücke zu verhindern

Horizontale Verformungen

Die Begrenzung der horizontalen Verformungen und Verschiebungen δ_y ist auf die Schienenoberkante zu beziehen (siehe Bild 26).

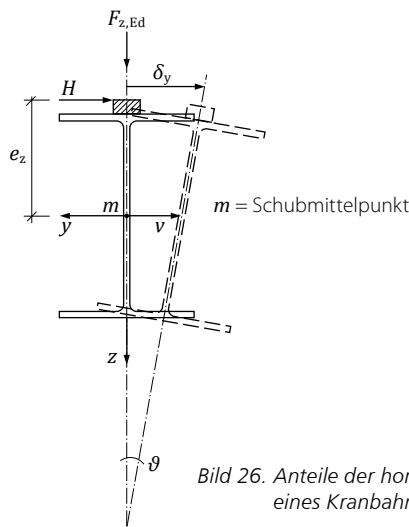


Bild 26. Anteile der horizontalen Verformung eines Kranbahnträgers nach [17]

Die Verformungs- und Verschiebungsrestriktionen sollen nach [16] folgendes bewirken:

- Begrenzung des Schräglaufs der Kranbrücke
- Vermeidung von erhöhtem Verschleiß an Rädern und Schienen infolge gleichzeitigem Anliegen der Spurkränze an die Schienenköpfe beider Kranbahnen
- Vermeidung übermäßiger Tragwerksschwingungen

Die nach DIN EN 1993-6, Kapitel 7 [6] angegebenen Werte sind Tabelle 8 zu entnehmen.

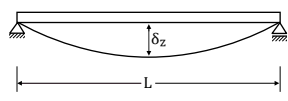
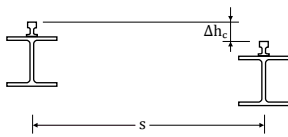
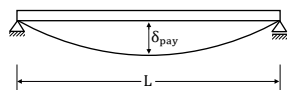
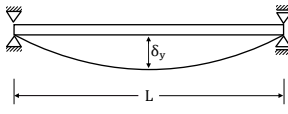
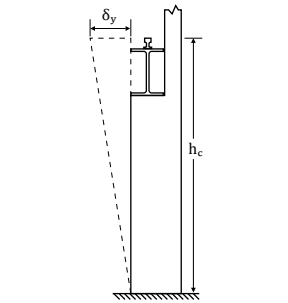
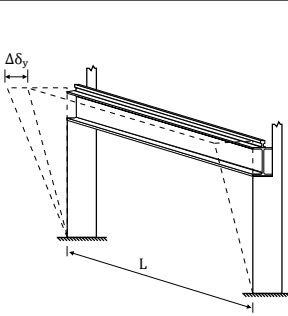
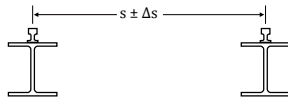
Beschreibung der Verformung (Durchbiegung und Verschiebung)	Skizze
a) Vertikale δ_z Durchbiegung eines Kranbahnträgers: $\delta_z \leq L/500$ und $\delta_z \leq 25$ mm Die vertikale Durchbiegung δ_z sollte als Gesamtdurchbiegung infolge vertikaler Lasten abzüglich möglicher Überhöhungen, analog zu δ_{max} in EN 1990, Bild A1.1 bestimmt werden	
b) Differenz Δh_c der vertikalen Durchbiegung zweier benachbarter Träger, die eine Kranbahn bilden: $\Delta h_c \leq s/600$	
c) Vertikale Durchbiegung δ_{pay} infolge der Nutzlast eines Kranbahnträgers bei einer Unterflansch-Laufkatze: $\delta_{pay} \leq L/500$	

Tabelle 7. Grenzwerte der vertikalen Verformungen nach DIN EN 1993-6 [6]

Beschreibung der Verformung (Durchbiegung und Verschiebung)	Skizze										
a) Horizontale Durchbiegung δ_y eines Kranbahnträgers in Höhe der Oberkante Kranschiene: $\delta_y \leq L/600$											
b) Horizontale Verschiebung δ_y eines Tragwerks (oder einer Stütze) in Höhe der Kranauflagerung:	 <table border="1" data-bbox="135 1064 391 1209"> <thead> <tr> <th>Hubklassen</th> <th>grenz δ_y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HC 1</td> <td>$h_c / 250$</td> </tr> <tr> <td>HC 2</td> <td>$h_c / 300$</td> </tr> <tr> <td>HC 3</td> <td>$h_c / 350$</td> </tr> <tr> <td>HC 4</td> <td>$h_c / 400$</td> </tr> </tbody> </table> <p>Dabei ist h_c der Abstand zu der Ebene, in der der Kran gelagert ist (auf einer Kranschiene oder auf einem Flansch)</p>	Hubklassen	grenz δ_y	HC 1	$h_c / 250$	HC 2	$h_c / 300$	HC 3	$h_c / 350$	HC 4	$h_c / 400$
Hubklassen		grenz δ_y									
HC 1	$h_c / 250$										
HC 2	$h_c / 300$										
HC 3	$h_c / 350$										
HC 4	$h_c / 400$										
c) Differenz $\Delta \delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Tragwerke (oder Stützen), auf denen Träger einer innen liegenden Kranbahn lagern. $\Delta \delta_y \leq L/600$											
d) Differenz $\Delta \delta_y$ der horizontalen Verschiebungen benachbarter Stützen (oder Tragkonstruktionen), auf denen Träger einer außen liegenden Kranbahn lagern: - infolge der Lastfallkombination von seitlichen Krankräften und Windlast während des Betriebes: $\Delta \delta_y \leq L/600$ - infolge Windlast außer Betrieb: $\Delta \delta_y \leq L/400$											
e) Änderung des Abstandes Δs der Schwerlinien der Kranschiene, einschließlich der Auswirkungen von Temperaturänderungen: $\Delta s \leq 10$ mm [siehe Anmerkung]											

Anmerkung:

Horizontale Verformungen und Abweichungen von Kranbahnträgern werden bei der Berechnung von Kranbahnen gemeinsam berücksichtigt. Die zulässigen Verformungen und Toleranzen sind abhängig von der Detailausbildung und den Abständen der Kranführungsmittel. Unter der Voraussetzung, dass das Spiel c zwischen Spurkranz und Kranschiene (oder zwischen anderen Führungsmitteln und dem Kranbahnträger) ausreichend ist, um die erforderlichen Toleranzen aufzunehmen, können nach Vereinbarung zwischen dem Kranhersteller und dem Bauherrn auch größere Verformungsgrenzwerte für die einzelnen Projekte vereinbart werden.

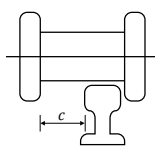


Tabelle 8. Grenzwerte für horizontale Verformungen nach DIN EN 1993-6 [6]

Begrenzung des Stegblechatmens nach EC 3-6, Kapitel 7.4:

Träger mit schlanken Stegen besitzen überkritische Tragreserven. Die Ausnutzung dieser Tragreserven ist jedoch mit großen Verformungen des Stegbleches aus der Stegblechebene heraus verbunden. Bei häufig wechselnden Beanspruchungen kann es zu wiederkehrendem Ausbeulen des Stegbleches kommen. Dies wird als „Stegblechatmen“ bezeichnet. An den Beulfeldrändern führt dies ggf. zu Ermüdungsrissen. Dies ist unbedingt zu vermeiden.

Der Nachweis des Stegblechatmens darf entfallen, wenn die Stegslankheit eines unversteiften Biegeträgers nachfolgenden Grenzwert einhält:

$$\frac{b_w}{t_w} \leq 120$$

mit

b_w Stegblechhöhe
 t_w Stegblechdicke

3.5 Ermüdung

Die Nachweise zur Ermüdung von Kranbahnträgern sind in DIN EN 1993-1-9 [14] geregelt. Für schweren Kranbetrieb werden Ermüdungsnachweise oft bemessungsmaßgebend. Die Nachweisführung zur Ermüdung wird ausführlich im nächsten Beitrag (Teil 2 zur Kranbahnbemessung) behandelt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden 1. Teil des Beitrages werden zunächst die von Kranen auf die Kranbahn anzusetzenden Einwirkungen beschrieben. Diese kran-spezifischen Einwirkungen, die für den Bereich des Maschinenbaus in der Normenreihe DIN EN 13001 geregelt sind, stehen für die Bemessung der Kranbahnträger in DIN EN 1991-3 (in mit DIN EN 13001 abgestimmter Form) zur Verfügung. Die bisherige Erfassung der nicht ruhenden Beanspruchungen aus Kranbetrieb wurde nach DIN 4132 mit einem globalen Schwingbeiwert berücksichtigt. Dies hat sich in den neuen Nachweiskonzepten geändert. Nach DIN EN 1993-6 werden die einzelnen Lastanteile nun mit einwirkungsspezifischen dynamischen Faktoren belegt.

Trotz der relativ einfachen statischen Systeme (Ein- und/oder Mehrfeldträger) sind die zu führenden Nachweise sehr komplex und anspruchsvoll. Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, die den störungsfreien und verschleißarmen Betrieb sicherstellen sollen, werden angegeben. Ein Großteil der Nachweisführung im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird im weiteren Verlauf des Beitrags behandelt.

Um die Grundlagen zur Bemessung von Kranbahnen nach EC 3-6 zu vervollständigen, werden im 2. Teil des Beitrags (mb-news 3/2014) folgende Berechnungsgrundlagen behandelt:

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

Die Lebensdauer der Kranbahnträger ist entscheidend durch eine ermüdungsgerechte Konstruktion zu beeinflussen. Bei schwerem Kranbetrieb bildet der Ermüdungsnachweis oft die maßgebende Größe zur Dimensionierung.

Neben den Brückenkranen, die im 1. Teil behandelt wurden, kommen in vielen Fällen Hängekrane und Laufkatzen zum Einsatz, deren Räder die Unterflansche der Kranbahnträger befahren und diese zusätzlich auf Querbiegung beanspruchen.

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] SeeBelberg, 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 2011
- [20] Kretz, J.: Grundlagen und Nachweise zu Kranen und Kranbahnen nach DIN 4132 und DIN 15018, mb-news 1/2005
- [21] SeeBelberg, C.: Kranbahnen und Ermüdungsfestigkeit nach EC. In: Schneider Bautabellen für Ingenieure. Köln, Werner Verlag 2012.