

BFS-RL 07-103

Entwurf und Berechnung von Kranbahnen

**Empfehlungen des
Arbeitsausschusses Technisches Büro
der Mitglieder des Deutschen Stahlbau-Verbands (DSTV)
im bauforumstahl**

November 2018 (1. Auflage)

Copyright-Klausel mit Haftungsausschluss

© Copyright-Klausel

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren, der Verlag und der Hersteller können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind daher ausgeschlossen. Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind Herausgeber und Verlag stets dankbar. Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung von elektronischen Medien.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Nachspeicherung und Auswertung von Datenverarbeitungsunterlagen, bleiben auch bei Verwendung von Teilen des Werkes, der Verlag vorbehalten. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind ausgeschlossen. Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den Verlag gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

Herausgeber:

bauforumstahl e. V., Düsseldorf

Vertrieb:

Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf

Empfehlung zum Entwurf und Berechnung von Kranbahnen

Die Empfehlung wurde vom Arbeitsausschuss Technisches Büro
des Deutschen Stahlbau-Verbands (DSTV) erstellt.

Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung	6
1.1 Anwendungsbereich	6
1.2 Bemessungsgrundlagen	7
1.2.1 Bautechnische Festlegungen	7
1.2.2 Bedingungen des Kranbetriebs	7
1.2.3 Festlegung wiederkehrender Prüfungen	8
2 Hilfsmittel zur Kranklassifizierung	8
2.1 Allgemeines	8
2.2 Pauschale Klassifizierung nach Kranart	8
2.3 Direkte Klassifizierung	9
2.3.1 Vorgehensweise	9
2.3.2 Vereinfachende Annahmen	10
3 Konstruktive Hinweise	13
3.1 Querschnittswahl	13
3.1.1 Gewalzte Querschnitte	13
3.1.2 Gewalzte Querschnitte mit Verstärkung	13
3.1.3 Zusammengesetzte Querschnitte	14
3.2 Schienenauswahl	16
3.3 Schienenstöße	17
3.4 Schienenbefestigung	18
3.4.1 Überblick	18
3.4.2 Starre Befestigung	18
3.4.3 Halbelastische Befestigung	19
3.4.4 Elastische Befestigung	19
3.4.5 Klemmplatten	20
3.5 Auflager	23
3.5.1 Konstruktive Grundsätze	23
3.5.2 Ausführungsbeispiele	24
3.6 Aussteifung	29
3.7 Schraubensicherung gegen Lösen	31
3.8 Toleranzen	32
4 Einwirkungen	32
4.1 Vorbemerkung	32
4.2 Ständige Einwirkungen	33
4.3 Veränderliche Einwirkungen	33
4.4 Außergewöhnliche Einwirkungen	33
4.5 Prüflasten	34
4.6 Dynamische Faktoren	34
4.7 Lastgruppen	34
4.8 Hinweise zu Schräglaufräften	36

4.9	Betrieb von mehreren Kranen	37
5	Hinweise zur Bemessung	38
5.1	Allgemeine Hinweise	38
5.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	39
5.2.1	Einwirkungskombinationen	39
5.2.2	Biegedrillknicknachweis	39
5.2.3	Beulnachweis	40
5.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	40
5.4	Ermüdung	40
5.4.1	Bohrungen durchgeschraubter Schienenbefestigungen	40
5.4.2	Schubspannungen durchgeschweißter Nähte	41
5.4.3	Gelegentliches Zusammenwirken mehrerer Krane	41
5.4.4	Schienenschweißnähte	41
6	Berechnungsbeispiel 1	42
6.1	Beschreibung	42
6.2	Querschnitt	43
6.3	Werkstoffe	44
6.4	Lastannahmen	44
6.4.1	Ständige Einwirkungen	44
6.4.2	Einzelkran	44
6.4.3	Annahmen zum Tandembetrieb	46
6.4.4	Stabilisierungskräfte	47
6.5	Lastgruppenbildung	47
6.6	Grenzzustand der Tragfähigkeit	48
6.6.1	EK 1: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot$ Lastgruppe 1	48
6.6.2	EK 2: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot$ Lastgruppe 5 (maximale Radlasten)	52
6.6.3	EK 3: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot$ Lastgruppe 5 (minimale Radlasten)	54
6.6.4	Bauteilnachweise	56
6.6.5	Lokale Nachweise (Beulen)	60
6.7	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	63
6.8	Ermüdungsnachweise	63
6.8.1	Vorbemerkung	63
6.8.2	Überblick über die Konstruktionsdetails	63
6.8.3	Ermüdungslasten	66
6.8.4	Detail 1: Schienenbefestigung (Bohrung) im Oberflansch	66
6.8.5	Detail 2: Gewalzter Stegansatz des HD-Profiles	68
6.8.6	Detail 3: Anschluss des Stegblechs an HD-Profil	72
6.8.7	Detail 4: Unterflansch-Steg-Verbindung	75
6.8.8	Detail 5: Quersteifenanschluss an Oberflansch	75
6.8.9	Detail 6: Quersteifenanschluss an Steg	77
6.8.10	Detail 7: Knotenblechanschluss an Steg	78
6.8.11	Detail 8: Stirnplattenanschluss an Steg	80
6.8.12	Detail 9: Stirnplattenanschluss an Flansch	80
7	Berechnungsbeispiel 2	81
7.1	Vorbemerkung	81
7.2	Statisches System und Belastung	81
7.3	Lokale Druckspannungen aus Radlasteinleitung	81
7.4	Lokale Schubspannungen aus Radlasteinleitung	83
7.5	Globale Schubspannungen	83

7.6	Schubspannungsschwingbreite	83
7.7	Ermüdungsnachweise	84
7.8	Vergleich mit derzeitiger Bemessung nach DIN EN 1993-6	84
Literaturverzeichnis		86

1 | Einleitung

1.1 | Anwendungsbereich

Gegenstand dieser Arbeitshilfe sind Kranbahnen für Laufkrane – insbesondere Brückenlaufkrane. Diese Arbeitshilfe gibt Hinweise und Beispiele für die Bemessung von Kranbahnen aus Stahl nach den geltenden europäischen Normen unter Berücksichtigung der Festlegungen der Nationalen Anhänge für Deutschland.

In einigen Bundesländern fallen Krananlagen aus dem Geltungsbereich der Landesbauordnungen (LBO) heraus, vgl. Tab. 1.1. Da jedoch die betrachteten Kranbahnen auch gleichzeitig Teil des Tragwerks von baulichen Anlagen sein können, muss ihre Bemessung unter Berücksichtigung der technischen Bestimmungen der entsprechenden Landesbauordnung am Aufstellungsort erfolgen. Die technischen Bestimmungen dienen zur Gewährleistung der Anforderungen aus der europäisch harmonisierten *Bauproduktenrichtlinie/Bauproduktenverordnung* [1], zu denen u. a. die Standsicherheit zählt.

Im Gegensatz zu den Kranbahnen zählen die Krane zu den maschinentechnischen Anlagen und müssen den Anforderungen der europäisch harmonisierten *Maschinenrichtlinie* [37] genügen. Aufgrund dieser Unterscheidung erfolgt die Auslegung von Kranen und Kranbahnen nach gesonderten technischen Regelwerken mit jeweils eigenen Lastannahmen und Bemessungsregeln.

Viele Bemessungsaspekte, wie z. B. die Kranklassifizierung, werden von beiden Regelwerken in ähnlicher oder identischer Weise behandelt. Diese Ähnlichkeit darf jedoch nicht zu einer Vermischung der Regeln führen. Zum Beispiel dürfen Bemessungsregeln, die für den Kran eine eventuell günstigere Auslegung erlauben, nicht auf die Kranbahnen übertragen werden.

Tab. 1.1: Geltungsbereich der Landesbauordnungen (LBO), Stand: 2016

Bundesland	Nicht im LBO-Geltungsbereich
Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Bremen, Sachsen, Niedersachsen	Kräne und Krananlagen
Hessen, Thüringen	Krane und Krananlagen
Brandenburg	Kräne mit Ausnahme von Kranbahnen und Unterstützungen
Hamburg	Kräne und ähnliche Anlagen, mit Ausnahme ihrer ortsfesten Bahnen und Unterstützungen
Mecklenburg-Vorpommern	Kräne und Krananlagen mit Ausnahme der Kranbahnen und Kranfundamente
Nordrhein-Westfalen	Kräne
Rheinland-Pfalz	Krane, mit Ausnahme von Kranbahnen und deren Unterstützungen
Saarland	Kräne und Krananlagen mit Ausnahme ihrer ortsfesten Bahnen und Unterstützungen
Sachsen-Anhalt	Krane, mit Ausnahme von Kranbahnträgern und deren Unterstützungen
Schleswig-Holstein	Kräne und Krananlagen mit Ausnahme der Kranbahnen und Kranfundamente

1. Einleitung

1.2 | Bemessungsgrundlagen

1.2.1 | Bautechnische Festlegungen

Kranbahnen aus Stahl zählen zu den Tragwerken des Hochbaus und sind nach der europäisch harmonisierten Normenreihe Eurocode 3 zu bemessen, die in Deutschland als Normenreihe DIN EN 1993 erschienen ist. Die allgemeinen Bemessungsregeln sind in einem Grundnormteil DIN EN 1993-1-1 [14] festgelegt, der durch weitere Teile, die besondere Bemessungsaspekte behandeln, wie z. B. DIN EN 1993-1-8 [17] für die Auslegung von Verbindungen und Anschlüsse, ergänzt wird. Erläuterungen und Beispiele für die Anwendung der allgemeinen Bemessungsregeln können u. a. [33] entnommen werden.

Die zu berücksichtigenden besonderen Aspekte bei der Bemessung von Kranbahnen sind im Anwendungsteil DIN EN 1993-6 [19] zusammengefasst. Bei der Anwendung dieses europäisch harmonisierten Anwendungsteils in Deutschland sind zusätzlich die nationalen Bestimmungen zu beachten, die dem Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-6 [20] zu entnehmen sind. Dieser Anhang enthält nationale Festlegungen zum geforderten Sicherheitsniveau in Deutschland (Höhe der Teilsicherheitsbeiwerte) aber auch Regeln, die die bisherigen nationalen Erfahrungen und Erkenntnisse widerspiegeln sollen.

1.2.2 | Bedingungen des Kranbetriebs

Der Bauherr hat die Bedingungen des Kranbetriebs zu definieren, die bei der Bemessung und Ausbildung von Kranbahnen zu berücksichtigen sind. Hinsichtlich der Lastannahmen zählen hierzu u. a. folgende Informationen über den Kranbetrieb:

- Art des Kranbetriebs,
- Anzahl der Krane pro Kranbahn,
- Anzahl der Krane pro Halle bzw. pro Hallenschiff bei mehrschiffigen Hallen,
- Information über planmäßiges permanentes Zusammenwirken von Kranen als Kranpaar,
- Information zum Zusammenwirken von Kranen zum Heben schwerer Lasten,

und über den einzelnen Kran:

- Art des Krans, z. B. Werkstattkran,
- Anzahl der zu erwartenden Arbeitsspiele,
- Belastungsart (Lastkollektiv),
- Art der Lastaufnahmemittel, z. B. Greifer,
- Art des Hubwerks,
- Hub- und Fahrgeschwindigkeit,
- Anzahl der Laufräder, Radstand,
- Art der Spurführung,
- Einwirkungsgrößen (Radlasten, Seitenlasten) aus Kranbetrieb.

Die Angaben für den Einzelkran führen zur Einstufung in eine **Hubklasse (HC)** und eine **Beanspruchungsklasse (S)** nach DIN EN 1991-3. In vielen Fällen erfolgt die Einstufung aufgrund von Erfahrungswerten für wichtige Kranarten pauschal nach DIN EN 1991-3 [12, Anhang B]. Siehe hierzu weitere Hinweise in Kap. 2

2. Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

Darüberhinaus ist der Bauherr verpflichtet, die Grenzwerte der zulässigen Verformungen und Verschiebungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu spezifizieren, wenn diese von den Empfehlungen nach DIN EN 1993-6 abweichen [19, Abs. 7.3(1)] oder wenn weitere Kriterien der Gebrauchstauglichkeit zu berücksichtigen sind, wie z. B. besondere Anforderungen an die Schwingungsempfindlichkeit.

1.2.3 | Festlegung wiederkehrender Prüfungen

In Absprache mit dem Bauherrn hat der Tragwerksplaner der Kranbahn die Anzahl der wiederkehrenden Prüfungen für die Kranbahn festzulegen, die nach [20, Tab. NA.3] die Höhe des anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerts γ_{Mf} für die Ermüdungsfestigkeit bestimmt, vgl. Tab. 1.2. Im Standardfall ist von zwei Inspektionen (= drei Inspektionsintervalle) über die Nutzungsdauer der Kranbahn [20, NDP zu 9.2(2)P] auszugehen. Die Nutzungsdauer der Kranbahn wird in der Regel mit 25 Jahren angesetzt [20, NDP zu 2.1.3.2(1)P].

Der Tragwerksplaner der Kranbahn hat den Bauherrn bei Übergabe der statischen Berechnungen über die Anzahl der erforderlichen Inspektionen der Kranbahn zu informieren. Dies kann z. B. im Deckblatt zur Statik in folgender Form erfolgen:

„Der Ermüdungsnachweis wurde mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = [\text{Zahlenwert}]$ nach Tabelle NA.3 des Nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-6 geführt. Dies setzt voraus, dass über die Nutzungsdauer der Kranbahn [Anzahl] Inspektionen im Sinne des Abschnitts NDP zu 2.1.3.2(1)P des Nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-6 vom Betreiber der Kranbahn (oder dessen Beauftragten) durchgeführt werden.“

Tab. 1.2: Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} und erforderliche Inspektionen nach DIN EN 1993-6

Teilsicherheitsbeiwert	Inspektionen
1,00	3
1,15 (Standardfall)	2
1,35	1
1,60	—

Durch den Bezug auf den Nationalen Anhang ist sichergestellt, dass die Notwendigkeit der Wartung der Kranbahnen und die Bestimmungen anderer Regelwerke, z. B. Unfallverhütungsvorschriften, durch die hier genannten Inspektionen unberührt bleiben.

2 | Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

2.1 | Allgemeines

Für die Beschreibung der Ermüdungsbeanspruchung von Kranbahnen werden die Krane in Beanspruchungsklassen S nach DIN EN 1991-3 [12] eingestuft. Die Einstufung kann entweder pauschal über die Art des Kranes oder über die direkte Ermittlung aus dem Lastkollektivbeiwert und der Klasse von Arbeitsspielen erfolgen.

2.2 | Pauschale Klassifizierung nach Kranart

Liegen keine detaillierten Informationen zur Arbeitsweise des Kranes vor, so kann nach [12, Tab. B.1] auf Grundlage der Art des Krans die Klassifizierung pauschal erfolgen, Tab. 2.1.

2. Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

Für Werkstattkrane führt eine pauschale Einstufung nach Tab. 2.1 zu einer Beanspruchungsklasse S2, S3 oder S4. Diese Einstufungsmöglichkeit bietet einen groben Anhaltswert und kann bei der Wahl der ungünstigsten Beanspruchungsklasse auf der sicheren Seite für die Berechnung verwendet werden. Um mit der Kranbahnbemessung nicht zu sehr auf der sicheren Seite zu liegen, wird die direkte Ermittlung der Beanspruchungsklasse aus dem Lastkollektivbeiwert und der Klasse von Arbeitsspielen empfohlen, siehe folgenden Abschnitt.

Tab. 2.1: Empfehlungen für Beanspruchungsklassen (Auszug aus DIN EN 1991-3 [13, Tab. B.1])

Nr.	Art des Krans	Klasse
1	Handbetriebene Krane	S0, S1
2	Montagekrane	S0, S1
3	Maschinenhauskrane	S1, S2
4	Lagerkrane mit diskontinuierlichem Betrieb	S4
5	Lagerkrane, Traversenkrane, Schrottplatz krane mit kontinuierlichem Betrieb	S6, S7
6	Werkstattkrane	S2-S4

2.3 | Direkte Klassifizierung

2.3.1 | Vorgehensweise

Für die Beschreibung der Ermüdungsbeanspruchung von Kranbahnen werden die Krane in Beanspruchungsklassen S nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.11] eingeteilt in Abhängigkeit von:

- Anzahl der Arbeitsspiele C des Krans während der Gesamtnutzungsdauer (Klasse U),
- Völligkeit des Lastkollektivs, ausgedrückt durch den Lastkollektivbeiwert kQ (Klasse Q).

Nach der Anzahl der Arbeitsspiele werden die Krane einer Klasse U1 bis U9 zugeordnet. Ein Arbeitsspiel wird als eine Abfolge von Bewegungen definiert, die beginnt, wenn der Kran zum Anheben der Nutzlast bereit ist, und endet, wenn der Kran zum Anheben der nächsten Nutzlast innerhalb derselben Aufgabe erneut bereit ist [9, Abs. 4.3.2]. Ein Arbeitsspiel besteht aus einem Arbeitsanteil und einem Rücklaufanteil.

Die Gesamtnutzungsdauer von Kranbahnen wird in der Regel mit 25 Jahren angenommen [20, NDP zu 2.1.3.2(1)].

Das Lastkollektiv beschreibt die regellose Folge der auf die Kranbahn einwirkenden Lasten. Üblicherweise werden die einzelnen Lasten zu Laststufen zusammengefasst. Die Völligkeit des Lastkollektivs gibt an, mit welcher Häufigkeit innerhalb der Gesamtnutzungsdauer eine Last bzw. Laststufe über- bzw. unterschritten werden, und wird durch den Lastkollektivbeiwert kQ beschrieben [12, Gl. 2.17], Gl. (1). In Abhängigkeit der Größe von kQ wird die Kraneinwirkung einer Klasse Q0 bis Q5 zugeordnet, vgl. Tab. 2.2 und Bild 2.1.

$$kQ = \sum_i \left(\frac{C_i}{C} \right) \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^3 \quad (1)$$

- i ... Ordnungsziffer der Laststufe
- Q_i ... Größe der Laststufe
- Q_{\max} ... größte Laststufe
- C_i ... Arbeitsspiele auf Laststufe Q_i
- C ... Gesamtanzahl der Arbeitsspiele

2. Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

Tab. 2.2: Klassifizierung der Ermüdungseinwirkungen von Kranen nach DIN EN 13001-1 [12, Tab. 22.1])

Klasse des Lastkollektivs	Q0	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
	0	0,0313	0,0625	0,125	0,25	0,5
	$< kQ \leq 0,0313$	$< kQ \leq 0,0625$	$< kQ \leq 0,125$	$< kQ \leq 0,25$	$< kQ \leq 0,5$	$< kQ \leq 1$
Klasse der Gesamtzahl von Arbeitsspielen						
U0	$0 < C \leq 1,60 \cdot 10^4$	S0	S0	S0	S0	S0
U1	$1,60 \cdot 10^4 < C \leq 3,15 \cdot 10^4$	S0	S0	S0	S0	S1
U2	$3,15 \cdot 10^4 < C \leq 6,30 \cdot 10^4$	S0	S0	S0	S1	S2
U3	$6,30 \cdot 10^4 < C \leq 1,25 \cdot 10^5$	S0	S0	S1	S2	S3
U4	$1,25 \cdot 10^5 < C \leq 2,50 \cdot 10^5$	S0	S1	S2	S3	S4
U5	$2,50 \cdot 10^5 < C \leq 5,00 \cdot 10^5$	S1	S2	S3	S4	S5
U6	$5,00 \cdot 10^5 < C \leq 1,00 \cdot 10^6$	S2	S3	S4	S5	S6
U7	$1,00 \cdot 10^6 < C \leq 2,00 \cdot 10^6$	S3	S4	S5	S6	S7
U8	$2,00 \cdot 10^6 < C \leq 4,00 \cdot 10^6$	S4	S5	S6	S7	S8
U9	$4,00 \cdot 10^6 < C \leq 8,00 \cdot 10^6$	S5	S6	S7	S8	S9

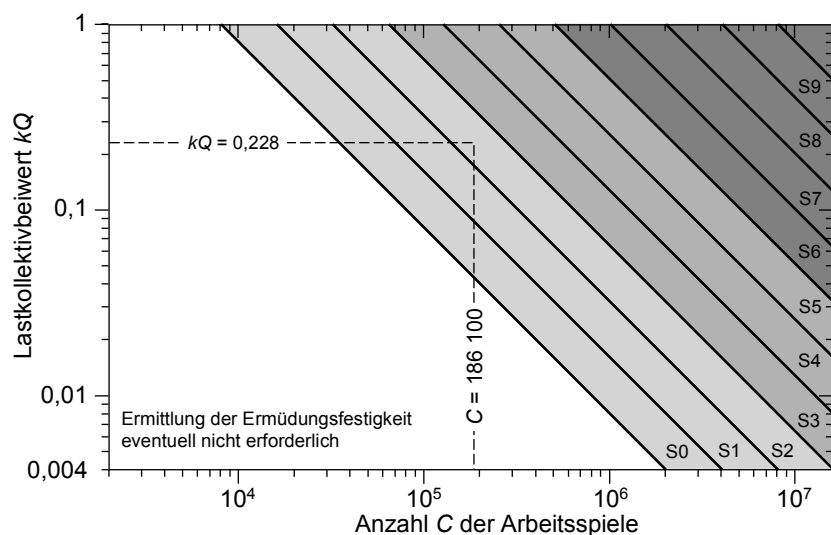


Bild 2.1: Grafische Veranschaulichung der Beanspruchungsklassen aus Tab. 2.1 mit Ablesung für Beispiel 2.1

Das Eigengewicht des Kranes (Kranbrücke, Laufkatze), das im Regelfall zwischen 50 und 100% seiner Hublast ausmacht, stellt für die Bestimmung des Lastkollektivbeiwertes des Kranbahnträgers einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Belastung dar. Deshalb ist dieses Eigengewicht bei der Bestimmung des Lastkollektivbeiwertes kQ zusammen mit den Hublasten zu berücksichtigen.

Die Arbeitsspiele eines Krans umfassen neben Lastfahrten (Last am Haken) auch Leerfahrten des Kranes. Diese Leerfahrten können als Bestandteil eines Arbeitsspiels, z. B. Rücklaufanteil, oder zwischen zwei Arbeitsspielen auftreten. Die Kranbahn erfährt bei Leerfahrt nur die Belastung aus dem Kraneigengewicht. Leerfahrten können in der Regel vernachlässigt werden. Vergleiche nachfolgendes Beispiel 2.1. Siehe auch Beispiele in [47, Abs. 15.2].

2.3.2 | Vereinfachende Annahmen

Für die Berechnung des Lastkollektivbeiwertes kQ des Kranbahnträgers wird üblicherweise davon ausgegangen, dass sich das Eigengewicht des Kranes Q_c – unabhängig von der Stellung der

2. Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

Laufkatze – gleichmäßig auf die beiden Kranbahnträger verteilt und die Hublast Q_h komplett nur auf einen Kranbahnträger wirkt.

Zur Verdeutlichung der Annahme zur Hublast wird die Kranbahn L in Bild 2.2 betrachtet. Die Annahme, dass sich die Laufkatze bei Kranfahrt stets in der Anfahrsposition befindet, kann z. B. für Prozesskrane zutreffend sein. Für Kranbetrieb, bei dem bei unterschiedlicher Laufkatzenstellung (in Bild 2.2 gestrichelt) Hublasten aufgenommen und verfahren werden, ist diese Annahme konservativ.

Liegt ein Krاندatenblatt mit Angabe genauerer Werte für die Eigengewicht- und Hublastverteilung des Kranes vor, kann der Lastkollektivbeiwert k_Q noch etwas genauer bestimmt werden. Dies ist u. a. sinnvoll, wenn z. B. der vereinfacht berechnete Lastkollektivbeiwert k_Q im Grenzbereich zwischen einzelnen Q-Klassen liegen sollte.

Die Klassifizierung der Ermüdungsbeanspruchung nach DIN EN 1991-3 basiert vereinfachend auf der Grundlage von (Rad-)Lasten und Arbeitsspielen des Krans. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nicht die Lasten auf der Kranbahn an sich, sondern die durch sie hervorgerufenen Spannungsschwingbreiten an den zu bewertenden Konstruktionsdetails ermüdungswirksam werden. Der Klassifizierung nach DIN EN 1991-3 liegt die Annahme zugrunde [44, S. 7], dass pro Arbeitsspiel des Krans eine Kranfahrt (Lastfahrt) stattfindet, die zu einem Schwingenspiel im Haupttragwerk des Kranbahnträgers, z. B. Untergurt, führt.

Für einzelne Tragwerksteile der Kranbahn, wie z. B. die Kranschiene und deren Befestigung, können pro Arbeitsspiel mehrere Spannungsschwingbreiten auftreten. Die Schwingenspielzahl übertrifft dann die Anzahl der Arbeitsspiele. Wenn bestimmte Kranbewegungen nicht bei jedem Arbeitsspiel des Krans auftreten, kann umgekehrt die Anzahl der Spannungsschwingbreiten einzelner Tragwerksteile der Kranbahn auch die Zahl der Arbeitsspiele des Krans unterschreiten.

Die Klassifizierung der Ermüdungsbeanspruchung der Kranbahn im Allgemeinen aufgrund der Lasten und Arbeitsspiele des Krans kann bei genauer Kenntnis der Spannungszeitverläufe der Kranbahn durch Beanspruchungsklassen für jedes Konstruktionsdetail präzisiert werden. Siehe Hinweise in DIN EN 13001-1 [9, Abs. 4.4.3]. In diesem Fall wird der Lastkollektivbeiwert und die Anzahl der Arbeitsspiele als Bestimmungsgrößen der Beanspruchungsklassen durch den Spannungskollektivbeiwert und die Anzahl der Spannungsschwingspiele ersetzt.

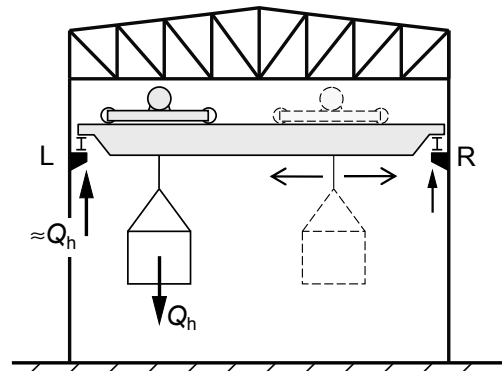


Bild 2.2: Ungünstigste Stellung der Laufkatze für größte Vertikalbeanspruchung von Kranbahn L, abweichende Stellung gestrichelt

Beispiel 2.1 Direkte Ermittlung der Beanspruchungsklasse

Ein Werkstattkran mit einer Tragfähigkeit von $Q_h = 20$ to (max. Hublast) soll vornehmlich im 2-Schichtbetrieb (2x8 Stunden/Tag) und 5 Arbeitstage (AT) die Woche für den Transport bzw. die Verladung von Stahlrohren zum Einsatz kommen. Pro Schicht werden ca. 4 Stahlrohre mit je einem Gesamtgewicht von bis zu 14 to mit dem Kran bewegt. Die Gesamtnutzungsdauer des Kranes wird mit 25 Jahren (53 Wochen pro Jahr) angenommen.

Außerplanmäßig sollen 2-mal im Monat mit dem identischen Kran Maschinenbauteile einer Anlage ausgetauscht werden. Dabei werden Teile mit einem Gesamtgewicht von bis zu 19 to gefahren.

2. Hilfsmittel zur Kranklassifizierung

Fortsetzung Bsp. 2.1

Es kann des Weiteren nicht ausgeschlossen werden, dass der Kran in jeder Schicht gelegentlich auch für bis zu 10 Hubvorgänge mit einer maximalen Hublasten von bis zu 8 to genutzt wird.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Kraneigengewichts werden vier Fälle untersucht. Das Kraneigengewicht wird mit 50% der Hublast ($Q_c = 10$ to), 75% der Hublast ($Q_c = 15$ to) und 100% der Hublast ($Q_c = 20$ to) angenommen. Außerdem wird der Fall ohne Berücksichtigung des Eigengewichts untersucht.

Um das Vernachlässigen der möglichen Leerfahrten zwischen den einzelnen Arbeitsabläufen/Arbeitsspielen zu überprüfen, wird die Bestimmung der S-Klasse jeweils einmal ohne und einmal mit Leerfahrten durchgeführt.

Schritt 1: Anzahl der Arbeitsspiele

4 Rohre x 2 Schichten x 5 AT x 53 Wo. x 25 Jahre	=	53 000 Arbeitsspiele á $Q_i = 14$ to
2 Anlagenteile x 12 Monate x 25 Jahre	=	600 Arbeitsspiele á $Q_i = 19$ to
10 Hübe x 2 Schichten x 5 AT x 53 Wo. x 25 Jahre	=	132 500 Arbeitsspiele á $Q_i = 8$ to
		Gesamtzahl der Arbeitsspiele C
		= 186 100 (ohne Leerfahrten) → Klasse U4
		= 372 200 (mit Leerfahrten) → Klasse U5

Schritt 2: Lastkollektivbeiwert (beispielhaft für 10 to. Kraneigengewicht)

$$kQ = \sum_i \frac{C_i}{C} \left(\frac{Q_c/2 + Q_i}{Q_c/2 + Q_h} \right)^3$$

$$= \frac{53\,000}{186\,100} \left(\frac{10/2+14}{10/2+20} \right)^3 + \frac{600}{186\,100} \left(\frac{10/2+19}{10/2+20} \right)^3 + \frac{132\,500}{186\,100} \left(\frac{10/2+8}{10/2+20} \right)^3 = 0,228 \text{ ohne Leerfahrten}$$

$$= \frac{53\,000}{372\,200} \left(\frac{10/2+14}{10/2+20} \right)^3 + \frac{600}{372\,200} \left(\frac{10/2+19}{10/2+20} \right)^3 + \frac{132\,500}{372\,200} \left(\frac{10/2+8}{10/2+20} \right)^3 = 0,118 \text{ mit Leerfahrten}$$

Schritt 3: Ermittlung der Beanspruchungsklasse

Der Lastkollektivbeiwert $kQ = 0,228$ bei Vernachlässigung der Leerfahrten fällt nach Tab. 2.1 in Klasse Q3. Zusammen mit der Klasse U4 ergibt sich nach Tab. 2.1 eine Beanspruchungsklasse S2. Alternativ kann die Klassifizierung mit Bild 2.1 erfolgen. Dieses Vorgehen führt zur selben Einstufung in S2.

Der Lastkollektivbeiwert $kQ = 0,118$ bei Berücksichtigung der Leerfahrten fällt nach Tab. 2.1 in Klasse Q2. Zusammen mit der Klasse U5 ergibt sich nach Tab. 2.1 eine Beanspruchungsklasse S2. Auch hier ist eine Ablesung aus Bild 2.1 alternativ möglich, die zur selben Einstufung führt. Bei der Klassifizierung für Kraneigengewichte von 15 und 20 to ist analog vorzugehen. Die Lastkollektivbeiwerte aller untersuchten Fälle sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

Fall	ohne Leerfahrten (U4)	mit Leerfahrten (U5)
Eigengewicht 10 to.	Q3 ($kQ = 0,228$) → S2	Q2 ($kQ = 0,118$) → S2
Eigengewicht 15 to.	Q4 ($kQ = 0,267$) → S3	Q3 ($kQ = 0,143$) → S3
Eigengewicht 20 to.	Q4 ($kQ = 0,303$) → S3	Q3 ($kQ = 0,170$) → S3
ohne Eigengewicht	Q3 ($kQ = 0,146$) → S2	—

3. Konstruktive Hinweise

Fortsetzung Bsp. 2.1

Aus der Zusammenstellung geht hervor, dass im Regelfall die Leerfahrten für die Bestimmung der S-Klassen vernachlässigt werden können. Liegt das Gesamteigengewicht des Kranes im Bereich seiner Hublast oder deutlich darüber und liegt gleichzeitig der berechnete Lastkollektivbeiwert kQ ohne Berücksichtigung der Leerfahrten im Grenzbereich zwischen zwei Q-Klassen, kann eine Vernachlässigung von Leerfahrten für die Bestimmung der S-Klassen auf der unsicheren Seite liegen.

Das Eigengewicht des Kranes sollte bei der Bestimmung der S-Klassen nicht vernachlässigt werden. Schon bei üblichen Verhältnissen zwischen Eigengewicht (50 bis 75 % der Hublast) und Hublast liegt die berechnete S-Klasse dabei auf der unsicheren Seite.

Es wird betont, dass es sich bei der gezeigten direkten Bestimmung der S-Klasse, die sich vor allem auf die Angaben des Bauherrn über die zukünftige Krannutzung stützt, um eine grobe Schätzung handelt. Im Zweifelsfall, wenn der berechnete Lastkollektivbeiwert kQ im Grenzbereich zwischen zwei Q-Klassen liegt, sollte die ungünstigere der beiden möglichen S-Klassen gewählt werden.

3 | Konstruktive Hinweise

3.1 | Querschnittswahl

3.1.1 | Gewalzte Querschnitte

Bei Kranbahnen mit kurzen Spannweiten können vollwandige Träger ohne Horizontalaussteifung des Obergurts wirtschaftlich ausgeführt werden [39]. Mehrfeldrig spannende Kranbahnträger mit gewalztem Querschnitt sind mit Blick auf die strengen Durchbiegungsbeschränkungen gemäß DIN EN 1993-6 [19, Abs. 7] gegenüber baugleichen einfeldrigen Kranbahnträgern vorteilhaft. Die mehrfeldrige Verlegung ist jedoch nur dann wirtschaftlich, wenn aufwendige biegesteife Stöße vermieden werden, z. B. durch Ausführung des Trägerstoßes über dem Auflager. Oftmals ist daher aufgrund der begrenzten Profillieferlängen nur eine zweifeldrige Verlegung möglich.

Bei leichtem und mittleren Kranbetrieb ist der Einsatz von mehrfeldrigen Walzträgern mit aufgeschweißter Flach-/Vierkantschiene üblich, wobei HE-, HD-, HL-Profile gegenüber IPE-Profilen aufgrund größerer Seitensteifigkeit zu bevorzugen sind [47, Abs. 4.3.2], Bild 3.1. Die aufgeschweißte Schiene ist Bestandteil des tragenden Querschnitts. Beim Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit kann und beim Ermüdungsnachweis ist dies zu berücksichtigen.

Als Schienen werden folgende warmgewalzte Flachstäbe aus Baustahl nach DIN EN 10058 [6] bevorzugt: 50×30 und 60×40 mm. Weitere Hinweise zu Schienen sind Abs. 3.2 zu entnehmen.

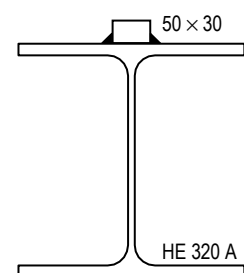


Bild 3.1: Beispiel für gewalzten Kranbahnträger mit aufgeschweißter Schiene

3.1.2 | Gewalzte Querschnitte mit Verstärkung

Bei größeren Spannweiten ist eine Horizontalaussteifung des Obergurts in Form von Verstärkungen (Bild 3.2) oder durch Anordnung eines Horizontalverbands empfehlenswert. IPE-Profile

3. Konstruktive Hinweise

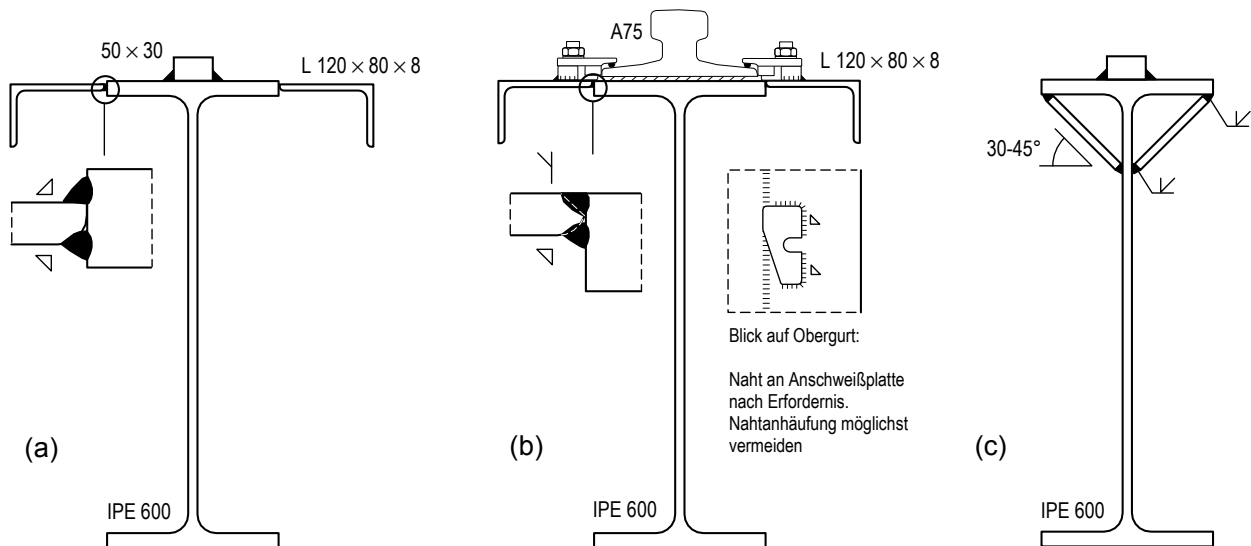


Bild 3.2: Beispiele verstärkter IPE-Profile: Verstärkung durch (a, b) seitliche Winkel und (c) Schotte (Hohlkammer)

benötigen i. d. R. eine Aussteifung des stabilitätsgefährdeten Oberflanschs, z. B. durch seitlich angeordnete Winkel, Bilder 3.2a und b. Verstärkungen, die zu Hohlkammern führen (Bild 3.2c), erhöhen einerseits die Torsionssteifigkeit des Kranbahnträgers und führen aber andererseits zu größerer Torsionsbeanspruchung, die sich ungünstig bei Ermüdung auswirken kann [41]. Im Gegensatz zu vergleichbar aufgebauten, aber geschweißten Querschnitten sind die aufgrund der Hohlkammern nicht mehr inspizierbaren Querschnittsbereiche (vgl. Bild 3.4) weniger ermüdungskritisch.

Bei den Querschnitten in Bild 3.2 konzentrieren sich die Schweißarbeiten auf den Bereich des Oberflansches. Die sich nach dem Schweißen einstellende Längsschrumpfung in diesem Bereich führt zu einer Trägerkrümmung. Es ist ein entsprechender Richtaufwand einzuplanen.

3.1.3 | Zusammengesetzte Querschnitte

Zusammengesetzte Kranbahnträger gegebenenfalls unter Verwendung von Walzprofilen werden fast ausschließlich als Einfeldträger ausgebildet und vorrangig bei schwerem Kranbetrieb ausgeführt. Einfeldrige Kranbahnträger weisen im Gegensatz zu mehrfeldrig spannenden Kranbahnträgern größere Durchbiegungen auf, sind jedoch aufgrund ihrer statischen Bestimmtheit setzungsunempfindlich und weisen keine abhebenden Auflagerkräfte auf [26, S. 130].

Aufgrund des Einsatzes bei schwerem Kranbetrieb werden die Schienen nicht aufgeschweißt, sondern geklemmt. Als Folge der Nachgiebigkeit der Klemmverbindung zählt die Schiene nicht zum tragenden Querschnitt. Zur Schienenauswahl siehe Abs. 3.2.

Es sind symmetrische Querschnitte zu bevorzugen, um den Richtaufwand infolge Schweißverzugs zu minimieren. Abstufungen im Stegblech sind bei sehr hohen Raddrücken zu empfehlen. Bei hohen Radlasten sind ganze oder halbierte Walzprofile – vorzugsweise aus den Profilvereinen HEB, HEM, HD oder HL – im Obergurt günstig, da deren ausgerundete Flansch-Steg-Verbindung eine hohe Ermüdungsfestigkeit aufweist, Bilder 3.3a und b.

Geschweißte Querschnitte wie in Bild 3.4 sind zu vermeiden. Aufgrund des Schweißverzugs ist der in Bild 3.4a unterstellte Kontakt der Querschnitteile nicht gegeben. Dies führt zu hohen Beanspruchungen der verbindenden Flankenkehlnähte. Schweißverbindungen, die für Inspektionen unzugänglich sind, sollten nach Möglichkeit vermieden werden, Bild 3.4b.

3. Konstruktive Hinweise

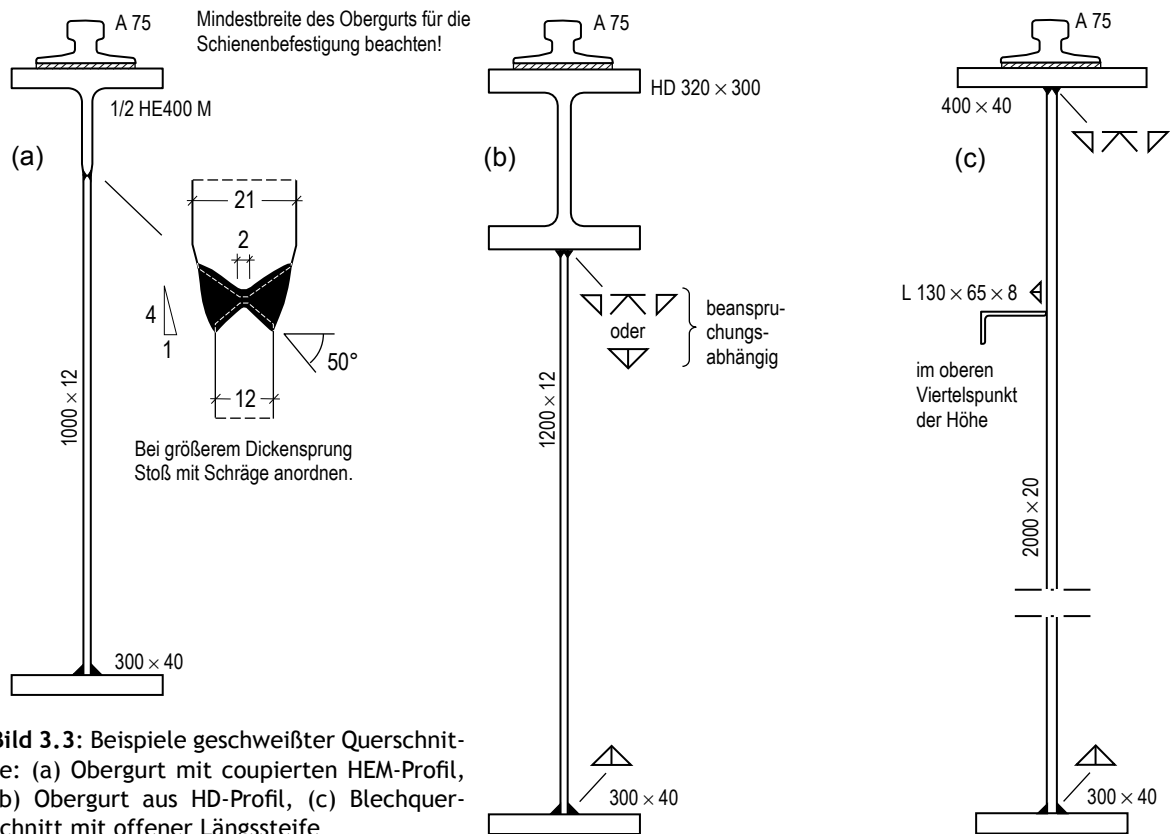


Bild 3.3: Beispiele geschweißter Querschnitte: (a) Obergurt mit coupierem HEM-Profil, (b) Obergurt aus HD-Profil, (c) Blechquerschnitt mit offener Längssteife

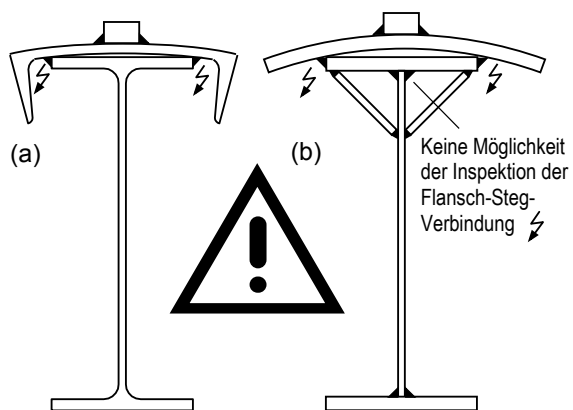


Bild 3.4: Beispiel zu vermeidender geschweißter Querschnitte: (a) unsicherer Kontakt der Querschnittsteile, (b) nicht inspizierbare Verbindungen

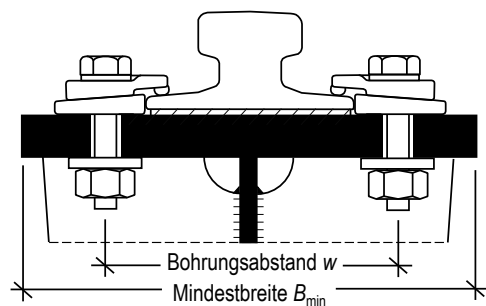


Bild 3.5: Beispiel einer durchgeschraubten Befestigung der Schiene mit Klemmplatten und elastischer Unterlage

Bei der Bemessung der häufig dicken Gurte in Bild 3.3 ist die blechdickenabhängige Streckgrenze zu berücksichtigen. Je nach Breite des Schienenfußes und Art der Schienenbefestigung ist die erforderliche Mindestbreite B_{\min} des Obergurts zu beachten, Bild 3.5.

Hohe Querschnitte mit beulgefährdeten Trägerstegen können neben Quer- auch Längssteifen erfordern, um die Größe der Beulfelder zu begrenzen, Bild 3.3c. Die Längssteifen sind bei Einfeldträgern etwa im oberen Viertelpunkt des Querschnitts anzuordnen [43, S. 23]. In Bild 3.3b kann der Unterflansch des Walzquerschnitts als Längssteife in Ansatz gebracht werden.

Fachwerkträger sollten nur bei Kranen mit untergeordneter Ermüdungsbeanspruchung (z. B. Maschinenhauskran zur Wartung von Turbinen) eingesetzt werden.

3. Konstruktive Hinweise

3.2 | Schienenauswahl

Folgende Schienenprofile sind im Kranbahnbau gebräuchlich, Bild 3.6:

- **Flach- bzw. Vierkantschienen** nach DIN EN 10 058 [6] und DIN EN 10 059 [7]. Bevorzugte Querschnitte, siehe Abs. 3.1.1. Handelsübliche Lieferlängen sind 6 und 12 m. Aufgrund der hohen lokalen Beanspruchung der Schiene durch die Radlasten (*Hertzsche Pressung*) ist die verschleißfestere Stahlsorte S 355 J2 (im Vergleich zu S 235) üblich. Die warmgewalzten Flachstäbe weisen herstellungsbedingt Formtoleranzen auf, wie z. B. Toleranzen der Querschnittsabmessungen, Abweichung von Geradheit, Abweichung von Rechtwinkligkeit. Darüberhinaus sind bei Vierkantstählen, wie z. B. 50 × 50 mm herstellungsbedingte Verdrillungen zu beachten. Im Stahlhandel werden auch doppelt (d. h. um beide Querschnittsachsen) vorgerichtete Flachstäbe nach DIN EN 10058 mit Kantenradius r angeboten, wie z. B. 50 × 30 mm mit $r = 5 \dots 6$ mm und 60 × 40 mm mit $r = 10$ mm.
Kaltgezogene Flachstäbe (z. B. S355J2+C) für aufzuschweißende Kranschienen sind nicht zu empfehlen. Sie weisen zwar geringere Formtoleranzen auf, haben jedoch bereits durch das Kaltziehen eine plastische Verformung erfahren. Damit ist ihre Bruchdehnung gegenüber warmgewalzten Flachstäben reduziert. Dies kann sich bei aufgeschweißten Schienen mit Ermüdungsbeanspruchung ungünstig auswirken.
- **Kranschienen (A-Form)** mit ausgeprägtem Schienenfuß nach DIN 536-1 [4]; Werkstoff: Stahl mit Mindestzugfestigkeit von 690 N/mm². Querschnitte: A45, A55, A65, A75, A100, A120, A150. Bei längerer Nutzungsdauer und bei höheren Radlasten wird Stahl mit Mindestzugfestigkeit von 880 N/mm² empfohlen. Handelsübliche Lieferlängen der Kranschienen (A-Form) betragen zwischen 10 und 20 m.
- **Kranschienen (F-Form)** ohne ausgeprägten Schienenfuß nach DIN 536-2 [5]; Schienenform ist nicht handelsüblich, Beschaffung kann Schwierigkeiten bereiten. Querschnitte: F100, F120.

Da Flach- und Vierkantschienen auf den Kranbahnträger aufgeschweißt werden müssen, sind sie für Kranbahnen mit Beanspruchungsklassen bis S3 geeignet [20, NCI zu 8.5.2]. In den höheren Beanspruchungsklassen sind Kranschienen nach DIN 536-1 [4] vorzusehen.

Die Auswahl der Schienengröße hängt von folgenden Aspekten ab und ist mit dem Kranhersteller abzustimmen:

- *Hertzsche Pressung* am Schienenkopf unter Berücksichtigung der Werkstoffpaarung Schiene/Laufrad, Laufraddurchmesser, Fahrgeschwindigkeit und Betriebsdauer [2],
- Schienenbiegung infolge Radlasten ggf. unter Berücksichtigung elastischer Zwischenlagen,
- Schienendrillung infolge der Exzentrizität der Radlasten,
- Schienenseitenbiegung infolge horizontaler Querkräfte bei punktueller Schienenbefestigung (Klemmplatten),
- Führungsart (Spurkranz, Führungsrollen),
- Mindestbreite des Schienenkopfes (Angabe des Kranherstellers).

Siehe Hinweise zur Auswahl einer geeigneten Kombination von Schiene und Laufrad in [47, Abs. 3.4].

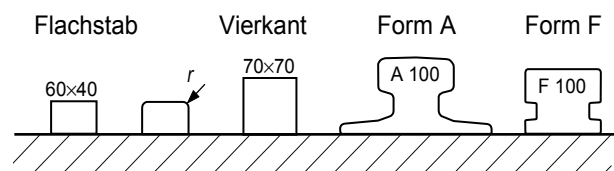


Bild 3.6: Beispiele für Schienenquerschnitte

3. Konstruktive Hinweise

3.3 | Schienenstöße

Bei **Flach- und Vierkantschienen** stellen Schrägstöße die Standardausführung dar, Bild 3.7a. Bei aufgeschweißten Schienen sind die Schienenstöße im Bereich der Trägerstöße anzuordnen. Dabei sollte aus folgenden Gründen der Stoß nicht sehr weit vom Trägerende entfernt werden:

- Die Auflagerverdrehung kann zu Unebenheiten im Bereich der Stöße führen. Dies kann bereits bei einem Kran mit großem Radstand problematisch sein, Bild 3.7b.
- Je größer die Entfernung vom Trägerende, umso größer die Seitenbiegung der Schiene, Bild 3.7c.
- Das überstehende Schienenende ist unpraktisch für den Transport (Verletzungsgefahr)

Bei größerer Entfernung vom Auflager sind zur Begrenzung der Seitenbiegung der Schiene seitlich Knaggen anzuordnen, Bild 3.7d. Die Knaggendicke ist bei Spurkranzführung des Krans möglichst gering zu wählen. Da die Knaggen nicht voll umschweißt werden können, sollte die Ausführung nach Bild 3.7a bevorzugt werden. Im Bereich von Dehnfugen ist durch Stufenstöße für einen Längsausgleich zu sorgen, Bild 3.7e.

Kranschienen mit A- und F-Form werden vor allem bei Kranbahnen mit hoher Beanspruchungsklasse eingesetzt. Die Schienen werden in der Werkstatt vorgerichtet, auf der Baustelle über die erforderliche Länge ausgelegt und durch voll durchgeschweißte Stumpfstoße miteinander verbunden. Die durchgeschweißten Schienenstöße sollten nicht direkt im Endauflagerbereich der Kranbahnträger angeordnet werden [39, Bilder 4 u. 5] [36, Fig. 18]. Es wird ein Abstand von $L/10$ mit L der Spannweite des Kranbahnträgers empfohlen (vgl. auch [40, S. 2]), wobei ein Mindestabstand von 500 mm [48, Abs. 2] einzuhalten ist.

Der so entstehende Schienenstrang darf auch über Dehnfugen hinweggeführt werden, wenn die Schienenbefestigung durch Klemmplatten erfolgt [20, Abs. 8.5.3]. Es gehört zur üblichen Ausführungspraxis, dass merkbare Schienenstöße beschliffen werden [3, Abs. 5.7.3], [48, Abs. 2]. Um die Anzahl der Baustellenstöße gering zu halten, sind die Schienen in möglichst großen Lieferlängen einzuplanen.

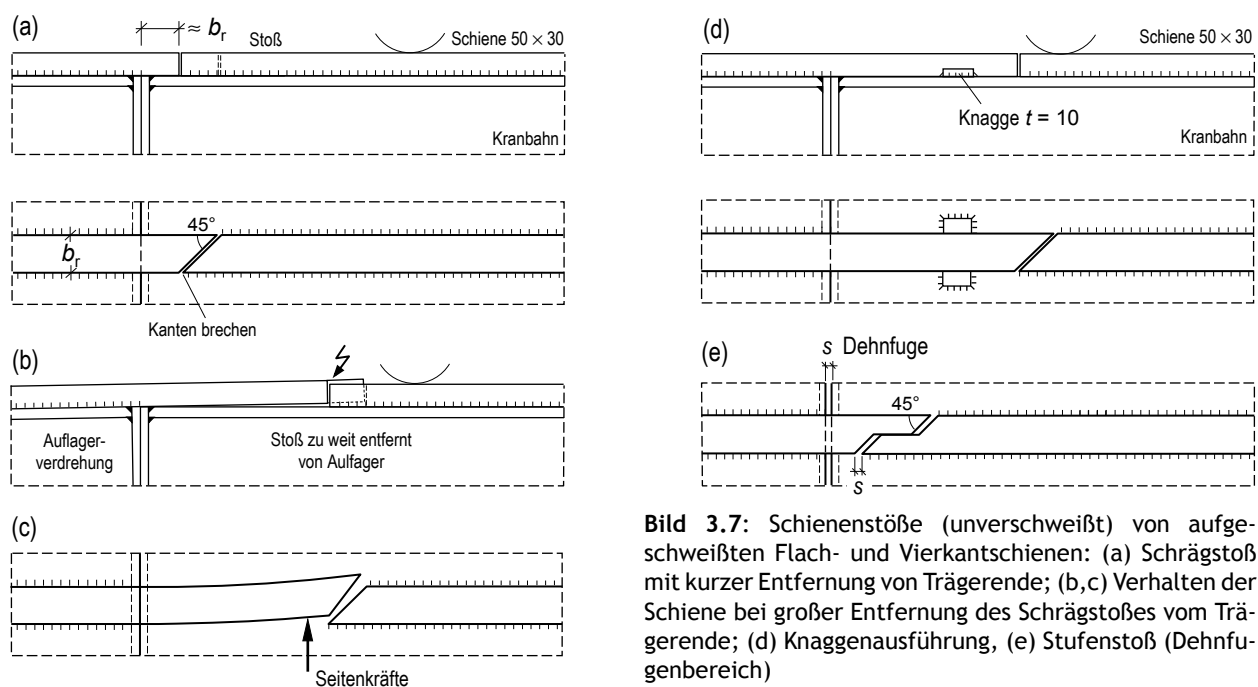


Bild 3.7: Schienenstöße (unverschweißt) von aufgeschweißten Flach- und Vierkantschienen: (a) Schrägstöß mit kurzer Entfernung von Trägerende; (b,c) Verhalten der Schiene bei großer Entfernung des Schrägstößes vom Trägerende; (d) Knaggenausführung, (e) Stufenstoß (Dehnfugenbereich)

3. Konstruktive Hinweise

Als Verbindungsschweißung von Kranschiene mit A- und F-Form bei Kranbahnen von Brückenkranen kommen vorzugsweise aluminothermisches Schweißen, Lichtbogenschweißen und Metall-Schutzgasschweißen zur Anwendung [51, Abs. 3.3]. Beim aluminothermischen Schweißen wird Stahl bei einer Temperatur von 2000°C aus einem Gemisch von Eisenoxid und Aluminium gewonnen und in eine feuerfeste, der Schienenform angepasste Form gegossen. Beim Lichtbogenschweißen und Metall-Schutzgasschweißen wird die Stoßfuge lagenweise verschweißt. Die Überprüfung der Schweißstöße mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren wird empfohlen und ist bei schwer beanspruchten Kranbahnen erforderlich [51, Abs. 3.3].

3.4 | Schienenbefestigung

3.4.1 | Überblick

Bei den Schienenbefestigungen unterscheidet man in der Regel zwischen starrer, halbelastischer und elastischer Schienenbefestigung [38]. Die Schienenbefestigungen unterscheiden sich hinsichtlich:

- Beanspruchbarkeit,
- Beeinträchtigung der Ermüdungsfestigkeit des Kranbahnträgers,
- Ausgleich von Montagetoleranzen (Seiten- und Höhenverstellbarkeit),
- Möglichkeit eines Schienenwechsels.

Für alle Schienenbefestigungen sind entweder Bohrlöcher oder Schweißnähte erforderlich, die einen unterschiedlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Oberflanschs des Kranbahnträgers haben.

3.4.2 | Starre Befestigung

Allgemeines. Bei starrer Schienenbefestigung wird die Schiene starr mit der Unterlage verbunden. Hierzu zählen z. B. Schienenschweißnähte und gelegentlich bei schmalen Kranbahnträgern im Sanierungsfall die Durchschraubung des Schienenfußes von Kranschiene mit A-Form.

Durchgehende Schienenschweißnähte. Die Befestigung der Schienen über Schienenschweißnähte sollte nur gewählt werden, wenn aufgrund geringer Beanspruchung ein Schienenwechsel nicht erwartet wird. Hierbei handelt es sich um die Standardausführung bei leichtem und mittlerem Kranbetrieb. Der Tragwerksplaner der Kranbahn bemisst die Schienenschweißnähte.

Die Schienenschweißnähte beeinflussen die Ermüdungsfestigkeit des Kranbahnträgerflansches (Grundmaterialversagen am Schweißnahtübergang), der Längsspannungen σ_{\parallel} erfährt, vgl. Bild 3.8a. Für die Ermüdungsfestigkeit der Schienenschweißnähte (Nahtversagen), die durch quergerichtete Druckspannungen σ_{\perp} und Schubspannungen τ_{\parallel} beansprucht werden, siehe neuere Forschungsergebnisse [34]. Wenn

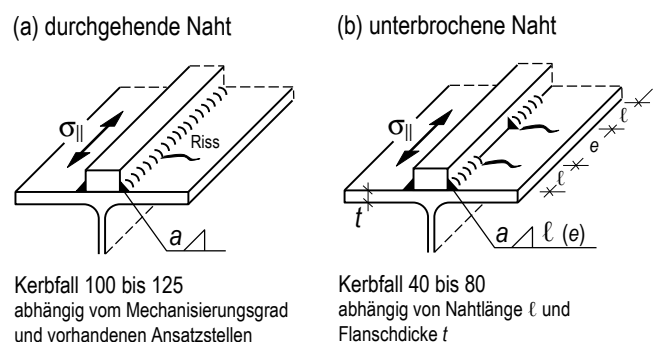


Bild 3.8: Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ [N/mm^2] des Trägeroberflansches unter σ_{\parallel} bei aufgeschweißten Kranschiene [32]

3. Konstruktive Hinweise

nicht durch entsprechende Verfahrensanweisungen der Kontakt zwischen Schiene und Oberflansch sichergestellt ist, ist dieser in der Berechnung zu vernachlässigen [19, Abs. 9.3.3(3)]. Siehe Berechnungsbeispiel in Abs. 7.

Unterbrochene Schienenschweißnähte. Unterbrochene Schienenschweißnähte kommen seit vielen Jahren bei leichtem und mittlerem Kranbetrieb zur Ausführung. Durch die Vermeidung von durchlaufenden Schweißnähten sinken zum einen die Fertigungsdauer und der Materialeinsatz, und zum anderen verringert sich der Schweißverzug des Trägers und damit der Richtaufwand. Gegenüber den durchgehenden Schienenschweißnähten reduzieren unterbrochene Nähte die Ermüdungsfestigkeit des Kranbahnträgerflansches in stärkerem Umfang, vgl. Bild 3.8b. Durch entsprechende Verfahrensanweisungen ist der Kontakt zwischen Schiene und Oberflansch sicherzustellen [19, Abs. 9.3.3(3)]. Im Gegensatz zu den durchgehenden Schienenschweißnähten ist bei den unterbrochenen Nähten eine Kontaktprüfung zumindest in den unverschweißten Nahtbereichen möglich.

3.4.3 | Halbelastische Befestigung

Bei halbelastischer Befestigung werden die Schienen in A- oder F-Form ohne elastische Schienenunterlage auf dem Kranbahnträger aufgelegt, aber mit elastischen Schienenklemmen befestigt, die die Schienen seitlich fixieren, jedoch aufgrund ihrer Nachgiebigkeit eine Längsbewegung zulassen [22, S. 1419], siehe Bild 3.9a. Ein Auswechseln der Schienen ist bei geschraubten Klemmplatten ohne größere Probleme möglich.

Aufgrund der nicht mehr schubfesten Verbindung treten zwischen Kranbahnträger und Schiene Längsbewegungen auf. Man spricht von schwimmender Schienenlagerung, da die Schiene wandern kann [45, S. 896]. Die mit der schwimmenden Schienenlagerung verbundene Beweglichkeit kann zu Verschleiß durch Abrieb führen. Die Schiene kann sich in den Flansch des Kranbahnträgers einarbeiten. Zum Schutz des Kranbahnträgers ist daher bei schwerem Kranbetrieb eine Zwischenlage minderer Festigkeit (Schleißblech) empfehlenswert [49, S. 26]. Auch wenn der Schienenstrang im Bereich von Dehnfugen hinweggeführt wird, sind die Schleißbleche, die auf dem Flansch des Kranbahnträgers fixiert sind, zu trennen [35, S. 260].

Zur Lagesicherung des schwimmend über die Träger einer Kranbahn verlegten, durchlaufenden Schienenstrangs ist entweder ein Fixpunkt in der Mitte oder Endanschläge (mit genügend Spiel für die Längsausdehnung) vorzusehen [30, S. 92].

Die lokale Beanspruchung des Kranbahnträgers – speziell der Flansch-Steg-Verbindung – wird durch die Schleißbleche in Abhängigkeit von deren Dicke geringfügig reduziert.

3.4.4 | Elastische Befestigung

Allgemeines. Bei schwerem Kranbetrieb zählt die Auflagerung der Schienen mit A- und F-Form auf einer elastischen Schienenunterlage und Befestigung mittels durchgeschraubter Klemmplatten zu den Standardlösungen, siehe Bilder 3.9b und c. Der Einbau (speziell die Einbaulage) und die Lagesicherung der elastischen Unterlage an den Stößen erfolgt nach den Angaben des Herstellers. Hinweise zur Lagesicherung der Schiene in Längsrichtung sind Abs. 3.4.3 zu entnehmen. Zu den Vorteilen der elastischen Schienenunterlage zählen [38], [29, S. 36]:

- Vermeidung von Punktbelastung (Lastverteilung) bei gleichzeitiger Zentrierung der Last,

3. Konstruktive Hinweise

- Gewährleistung von Längsbewegungen der Schiene infolge Bremsen/Anfahren, Temperaturänderungen etc. ohne Verschleiß der Befestigungsteile und Einarbeitung des Schienenfußes in den Kranbahnträgerflansch,
- Verminderung des Schallpegels bei Kranfahrt und Schonung des Kranlaufwerkes,
- Verringerung der Korrosion im Bereich Schienenfuß - Kranbahnträgerflansch,
- Ausgleich von kleinen Unebenheiten.

Neben diesen Vorteilen gewährleistet die elastische Schienenunterlage eine günstigere Lastverteilung für den Kranbahnträger [29, S. 36]. Infolge der elastischen Unterlage kann die rechnerische Beanspruchung für die Flansch-Steg-Verbindung des Kranbahnträgers durch Ansatz einer um 25% vergrößerten Lastausbreitungslänge reduziert werden [19, Tab. 5.1]. Allerdings nimmt dadurch die Schienenbiegung und unter Umständen auch die Querbiegung im Obergurt zu [29, S. 36].

Die Klemmung des Schienenfußes kann wie in Bild 3.9b direkt oder wie in Bild 3.9c über eine Elastomerstützung erfolgen [51, S. 27]. Im letzteren Fall wird eine elastische Klemmkraft bei freier Längsverschieblichkeit der Schiene erzeugt. Durch die Klemmung des Schienenfußes in Bild 3.9c wird die elastische Schienenunterlage leicht vorgespannt [38, S. 1057].

3.4.5 | Klemmplatten

Bild 3.9 gibt einen schematischen Überblick über verschiedene Typen von Klemmplatten. Die Klemmplatten zur Schienenbefestigung haben folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Seitliche Arretierung der Schiene, Aufnahme von Seitenkräften aus Kranbetrieb,
- Behinderung von vertikalen Schienenbewegungen, Abhebesicherung,
- freie Schienenbewegung in Längsrichtung (Wandern),
- Ausgleich der Herstellungstoleranzen der Schiene und Montagetoleranzen, seitliche Verstellbarkeit.

Die Aufnahme der Seitenkräfte aus dem Kranbetrieb wird durch das Anliegen des Schienenfußes an der Klemme realisiert [51, S. 28]. Bei geschraubten Klemmplatten werden die Kräfte von der Klemme in den Kranbahnträger durch Reibschluss übertragen. Bei geschweißten Klemmplatten erfolgt die Übertragung durch die Schweißnähte.

Bei der Überführung der Schiene stellen sich sinusförmige Schienendurchbiegungen ein, die stellenweise zum Abheben der Schiene führen [38, S. 1057], das durch die Klemmplatte verhindert werden soll.

Die Auswahl der passenden Klemmplatte sollte sich an folgenden Gesichtspunkten orientieren:

- Schientyp,
- Dicke der elastischen Schienenunterlage oder Schleißlamelle,
- Größe der maximalen Seitenkraft,
- Mindestbreite des Kranbahnträgeroberflansches, vgl. Bild 3.5,
- Größe der seitlichen Verstellbarkeit,
- Häufigkeit des Schienenwechsels,
- Begrenzung der Bauhöhe zur Vermeidung von Kollisionen mit horizontalen Führungsrollen, Sicherungen gegen Windabtrieb und Kippsicherungen.

3. Konstruktive Hinweise

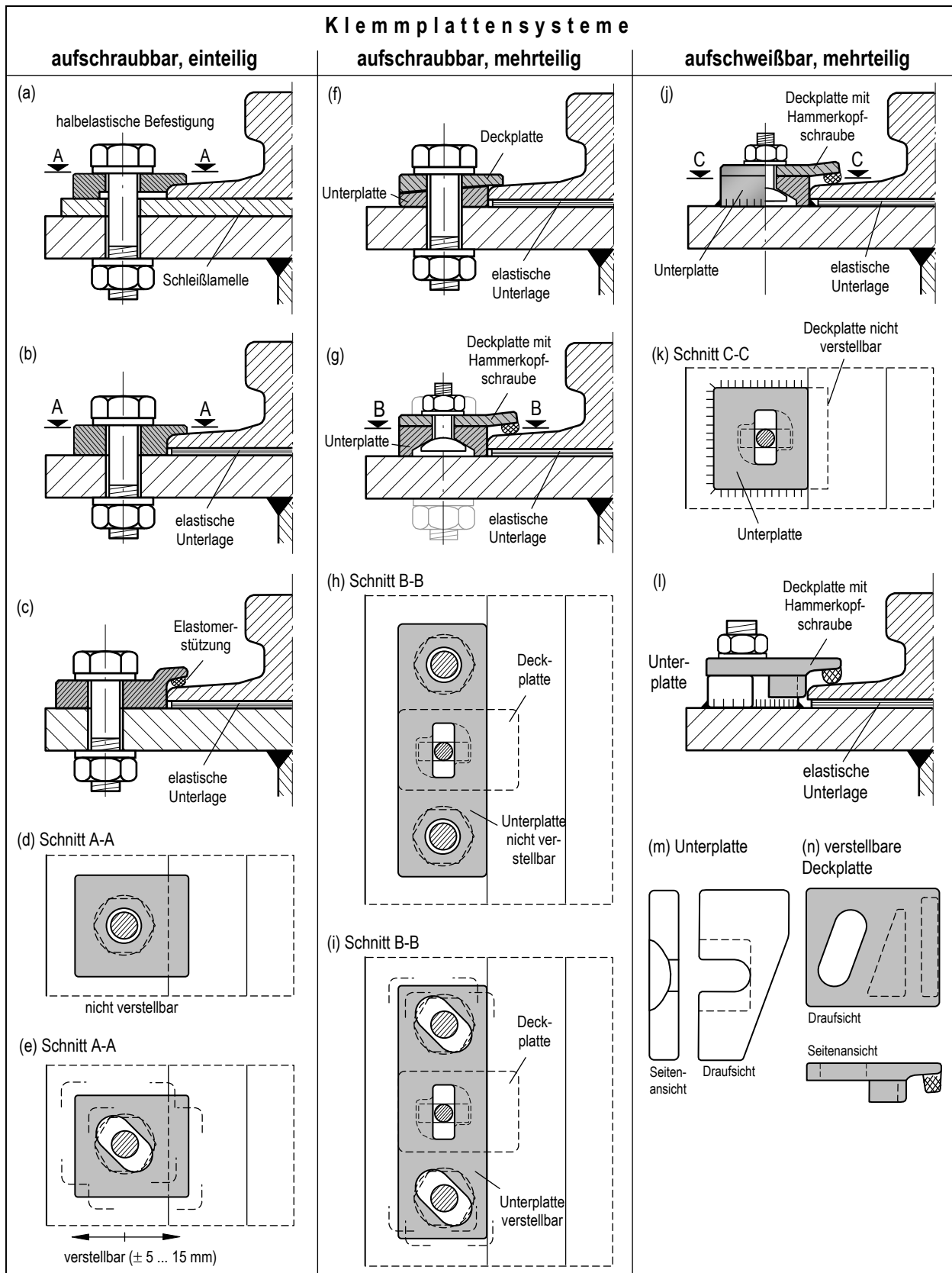


Bild 3.9: Beispiele für gebräuchliche Klemmplatten zur Schienenbefestigung (schematisch)

- aufschraubbare, einteilige Schienenklemmen: (a) halbelastische Befestigung, (b, c) elastische Befestigung, (d) unverstellbare und (e) verstellbare Klemmplatte;
- aufschraubbare, mehrteilige Schienenklemmen: (f) keilförmige Klemmplatten, (g) separat befestigte Deckplatte mit (h) unverstellbarem und (i) verstellbarem Unterteil;
- aufschweißbare, mehrteilige Schienenklemmen: (j, k) unverstellbare und (l-n) verstellbare Schienenklemme

3. Konstruktive Hinweise

Die seitliche Verstellbarkeit (Toleranzausgleich) bewegt sich herstellerabhängig im Bereich von ca. $\pm 5 \dots 15$ mm, vgl. Bilder 3.9d und 3.9e bei einteiligen geschraubten Klemmplatten und Bilder 3.9h und 3.9i bei mehrteiligen geschraubten Klemmplatten.

Bei geschraubten Klemmplatten gehören in der Regel die Schrauben zur Befestigung auf dem Kranbahnträger nicht zum Klemmplatzensystem und müssen separat beigestellt werden. Hinweise zur Lösesicherung von Schraubverbindungen sind in Abs. 3.7 zusammengefasst. Mehrteilige Klemmplatten in geschraubter Ausführung mit keilförmiger Unter- und Deckplatte (Bild 3.9f) weisen bei auftretenden Seitenkräften infolge der Verkeilung eine Selbsthemmung auf.

Die mehrteiligen Klemmplatten in geschraubter Ausführung in den Bildern 3.9g bis 3.9i sind bei häufigem Schienenwechsel günstig. Die Befestigung der Schrauben für die Deckplatte ist unabhängig von der Befestigung auf dem Kranbahnträger und benötigt nur einen Zugang von oben.

Ein Korrosionsschutz der durchgeschraubten Klemmplatten darf in vielen Fällen nur nach Rücksprache mit dem Lieferanten aufgebracht werden, da an die Reibbeiwerte der Kontaktflächen der Schraubverbindung herstellerabhängig besondere Anforderungen gestellt werden. Bei Kranbahnen in Gebäuden verbleiben die Klemmplatten üblicherweise im Lieferzustand.

Bei schmalen Obergurten werden gelegentlich auch Klemmplatzensysteme mit direkt auf den Kranbahnträger aufgeschweißter Unterplatte ausgeführt, Bilder 3.9j bis 3.9n. Dies gilt auch für große Kranbahnträgerquerschnitte, bei denen das Bohren der Löcher für geschraubte Klemmplattenlösungen ausführungstechnisch zu aufwendig ist. Auch hier stehen neben nicht verstellbaren Systemen (Bilder 3.9j und 3.9k) auch Systeme mit begrenzter Seitenverstellbarkeit (Bilder 3.9l und 3.9n) zur Verfügung.

Aufgeschweißte Unterplatten sind nur bei Kranbahnen bis einschließlich Beanspruchungsklasse S6 zulässig [19, Abs. 8.2(4)]. Wenn an die Kontaktfläche zwischen der aufzuschweißenden Unterplatte und der Deckplatte Anforderungen an die Reibbeiwerte gestellt werden, ist vor Aufbringen des Korrosionsschutzes Rücksprache mit dem Lieferanten zu nehmen. Gegebenenfalls ist die am Kranbahnträger angeschweißte Unterplatte beim Aufbringen des Korrosionsschutzes entsprechend zu behandeln.

Der Abstand und die Ausführung der Klemmplatten wird durch den Tragswerksplaner nach konstruktiven Gesichtspunkten unter Berücksichtigung der Angaben des Klemmplattenherstellers festgelegt [38, S. 1059]. Abstände zwischen 500 und 800 mm sind üblich. Gegebenenfalls ist die Seitenbiegung der Schiene für die ungünstige Laststellung der größten Seitenkraft zwischen zwei Klemmplatten in Bild 3.10 zu überprüfen. Die Auslegung der Klemmplatten für die auftretenden Kräfte erfolgt üblicherweise durch den Lieferanten des Befestigungssystems unter Berücksichtigung der Schienengröße und dem Vorhandensein einer elastischen Zwischenlage.

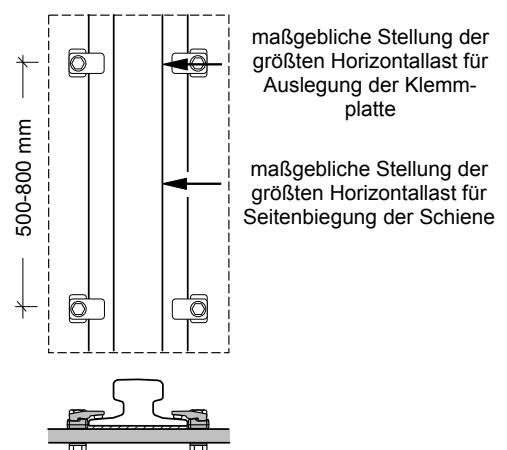


Bild 3.10: Maßgebende Laststellungen für Dimensionierung der Schienenklemmen und Schiene

3. Konstruktive Hinweise

3.5 | Auflager

3.5.1 | Konstruktive Grundsätze

Die Ausbildung der Auflager von Kranbahnträgern muss folgenden Anforderungen genügen:

- Aufnahme und Ableitung der auftretenden Vertikal-, Längs- und Seitenkräfte,
- Möglichkeit zum Ausrichten der Kranbahnträger (Ausgleich von Toleranzen) in vertikaler und horizontaler Richtung [19, Abs. 8.3(2)],
- geringe Behinderung der Trägerverformungen bzw. Vermeidung von ungewünschten Einspanneffekten (lokale Spannungsspitzen).

In den Bildern 3.11, 3.12 und 3.13 werden empfohlene und ungünstige Ausführungsvarianten für Endauflager von Kranbahnträgern gegenübergestellt. Bild 3.11 zeigt verschiedene Ausführungen mit überstehenden Stirnplatten, bei denen die Vertikalkräfte aus den Kranbahnträgern nahezu zentrisch in die kranbahnunterstützende Konstruktion (hier: Konsole) eingeleitet werden. In den Bildern 3.11b bis d wird die Endverdrehung der Kranbahnträger unter vertikaler Belastung durch die gewählte Ausführung behindert. In der Folge entstehen in den Verbindungsmitteln Zusatzbeanspruchungen, die zu einem vorzeitigen Ermüdungsversagen führen können. In Bild 3.11a wird die Endverdrehung nur geringfügig durch die Anordnung nur einer Schraubenreihe und durch eine Begrenzung der Futterhöhe auf ≤ 70 mm [39, Abs. 2.3.9] behindert.

Bild 3.12 zeigt eine Ausführung für ein Endauflager mit eingepassten Quersteifen. Bei der Ausführung in Bild 3.12b wird die Endverdrehung des Kranbahnträgers durch die Verankerung behindert, die aufgrund der Abstützwirkung eine hohe Zusatzbeanspruchung erfahren kann. In Bild 3.12a wird ein solcher unerwünschter Einspanneffekt vermieden.

Die Kranbahnunterstützung, wie z. B. Kranbahnkonsole oder Kranbahnstütze, für die Endauflager benachbarter Kranbahnträger erfährt während der Kranüberfahrt eine exzentrische Belastung, da je nach Kranstellung der eine oder der andere Kranbahnträger belastet wird. Für die Endauflager mit überstehenden Stirnplatten in Bild 3.11 ist die exzentrische Belastung im Vergleich zu denen mit eingepassten Quersteifen in Bild 3.12 geringer.

In Bild 3.13b ist eine Horizontalanbindung dargestellt, die vertikale Relativverschiebungen zwischen der Kranbahnunterstützung und dem Hallentragwerk, an dem sie befestigt ist, behindert. Ein vorzeitiges Ermüdungsversagen ist hier aufgrund der Zusatzbeanspruchung möglich. In Bild 3.13a ist eine Horizontalanbindung dargestellt, die die vertikalen Relativverschiebungen nicht behindert.

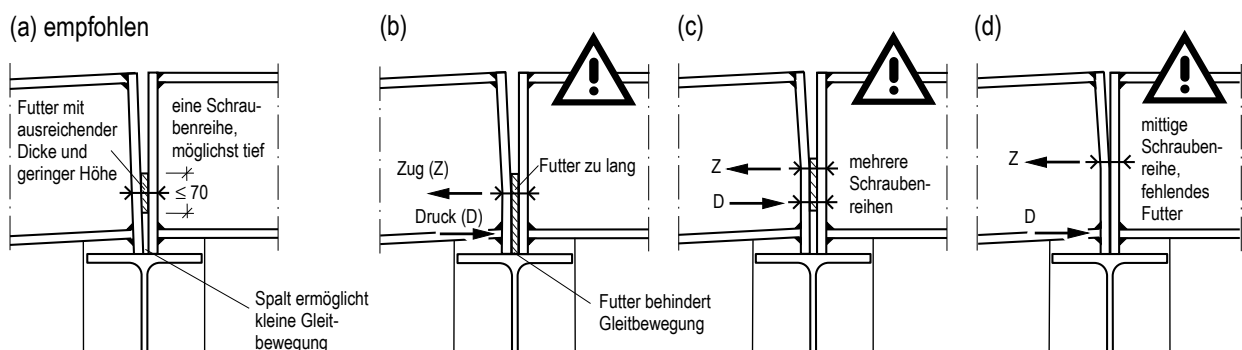


Bild 3.11: Endauflager mit Stirnplatten: (a) empfohlene Ausführungsvariante, (b) bis (d) zusätzliche Beanspruchungen aus Einspanneffekten. Schiene nicht dargestellt.

3. Konstruktive Hinweise

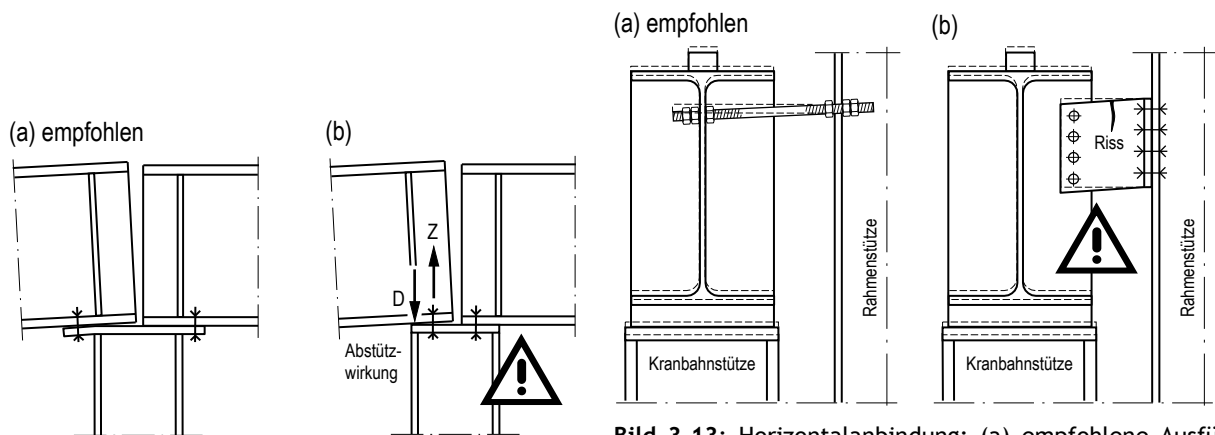


Bild 3.12: Endauflager ohne Stirnplatten: (a) empfohlene Ausführungsvariante, (b) Einspanneffekt bei bündiger Stützenkopfplatte. Schiene nicht dargestellt.

Bild 3.13: Horizontalanbindung: (a) empfohlene Ausführungsvariante, (b) Behinderung von vertikalen Relativverschiebungen zwischen Rahmen- und Kranbahnstütze durch Einspanneffekt der Horizontalanbindung

3.5.2 | Ausführungsbeispiele

In Bild 3.14 ist eine Ausführungsmöglichkeit für das End- und Zwischenaufleger einer Kranbahn für leichten Kranbetrieb dargestellt.

Kranbahnausrichtung: Langlöcher in der Konsole ermöglichen die horizontale Ausrichtung der Kranbahnträger auf der Konsole. Bei Fertigungstoleranzen zwischen den einzelnen Trägern ermöglichen Langlöcher in den Stirnplatten der Träger eine Fluchtung der Schiene. Futterbleche dienen zur Einstellung der geplanten Höhenlage der Schiene, wenn der Höhenausgleich nicht am Fuss der Kranbahnstütze vorgenommen wird.

Seitenkräfte: Seitenkräfte quer zur Kranbahn werden durch Gewindestangen im Auflagerbereich aufgenommen, die für Zug- und Druckkräfte (Knicken) auszulegen sind.

Längskräfte: Die Übertragung der Längskräfte (Bremskräfte) zwischen den Kranbahnträgern wird durch eine Verschraubung (vorgespannt) der Stirnplatten der Träger gewährleistet. Auf die Abtragung dieser Längskräfte wird in Abs. 3.6 im Rahmen der Aussteifung der Kranbahn eingegangen. Wenn das Kammblech (gestrichelt dargestellt) in den Bildern 3.14b und c nicht nur eine lagesichernde Funktion übernimmt, sondern auch zur seitlichen Halterung der Kranbahnstütze durch die Kranbahnträger oder zur Aufnahme der Bremskräfte herangezogen wird, ist es entsprechend zu bemessen.

Abhebesicherung: Die Verschraubung der Kranbahnträger auf der Unterstützungsstruktur (Konsole) in den Bildern 3.14a und 3.14d dient zum einen als konstruktive Lagesicherung. Da bei mehrfeldrig durchlaufenden Kranbahnträgern an den Endauflagern abhebende Auflagerkräfte auftreten können, dient die Verschraubung hier außerdem als Abhebesicherung. Aufgrund des fehlenden Kontakts zwischen Träger und Konsole können die Schrauben nicht vorgespannt werden. Die Verschraubung wird daher in Bild 3.14 gegen Lösen gesichert.

Es wird empfohlen, die Quersteifen über dem Zwischenaufleger von Kranbahnträgern aus Walzprofilen in den Ausrundungsbereich einzupassen, Bild 3.15. Werden die Quersteifen im Ausrundungsbereich ausgespart, so ist die Ausnehmung groß genug für ein sauberes, kerbarmes Umschweißen zu wählen.

3. Konstruktive Hinweise

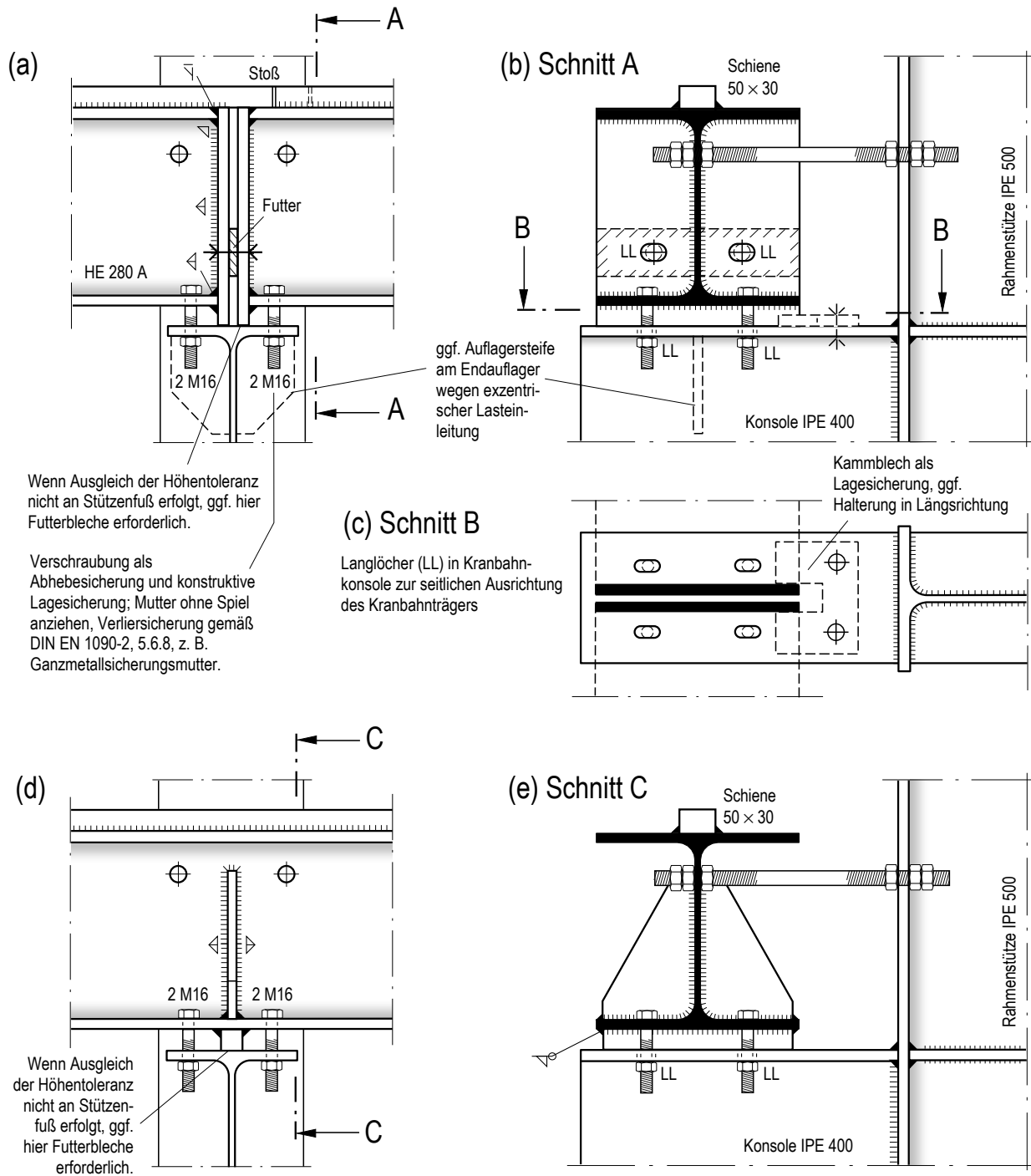


Bild 3.14: Ausführungsbeispiel eines Kranbahnträgers für leichten Kranbetrieb: Endauflager in (a) Längsansicht, (b) Querschnitt (Schnitt A), (c) Konsolenoberseite (Schnitt B); Zwischenaufleger bei mehrfeldrig durchlaufender Kranbahn: (d) Längsansicht, (e) Querschnitt (Schnitt C)

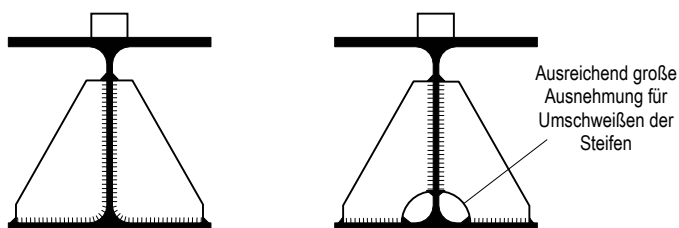


Bild 3.15: Lasteinleitungssteifen von Walzprofilen: eingepaßt und Ausrundungsbereich ausgenommen

3. Konstruktive Hinweise

Im Bereich des Innenauflegers in Bild 3.14d ergibt sich ein leichter Einspanneffekt für den Kranbahnträger. Mit den Annahmen in Bild 3.16a bewirkt die Beschränkung der vertikalen Kranbahnträgerdurchbiegung im Feld auf $f \leq L/500$ nach [20, NDP zu 7.3(1)] eine maximale Verdrehung am Innenaufleger von $\varphi \approx 1/250$ (etwa $0,25^\circ$). Die daraus resultierende Zwangsbeanspruchung in Form von Stegbiegung in steifenlosen Kranbahnkonsolen aus Walzprofilen ist bei leichtem Kranbetrieb ($\leq S4$ und $\leq HC 2$) in der Regel vernachlässigbar [25]. Die Zugbeanspruchung in der Verschraubung wird auch für den Ermüdungsnachweis als vernachlässigbar angesehen, wenn die Schrauben in Bild 3.16b möglichst nahe der Auflagerknagge angeordnet werden.

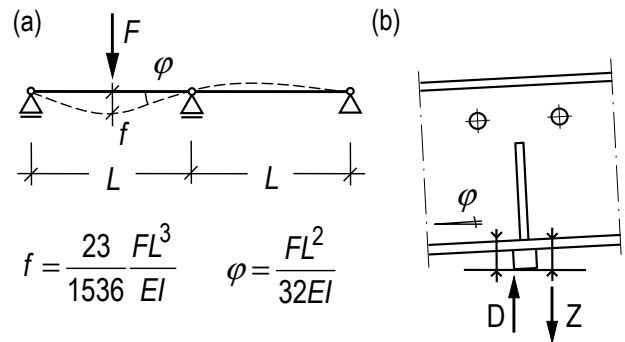


Bild 3.16: Zweifeldträger mit Einzellast: (a) Durchbiegung in Feldmitte und zugehörige Verdrehung am Innenaufleger, (b) Einspanneffekt

Bei leichtem Kranbetrieb (bis Beanspruchungsklasse S2) wird auch die direkte Auflagerung (ohne Stirnplattenüberstand und Zentrierleisten) des Kranbahnträgers auf der Konsole als ausreichend angesehen [47, S. 88].

In Bild 3.17 ist das Endauflager eines einfeldrigen Kranbahnträgers für mittleren Kranbetrieb dargestellt. Die Anbindung an die unterstützende Konstruktion erfolgt mittelbar durch ein T-Stück, das über Langlöcher zum horizontalen Ausrichten der Kranbahn verfügt. Aufgrund des mittleren

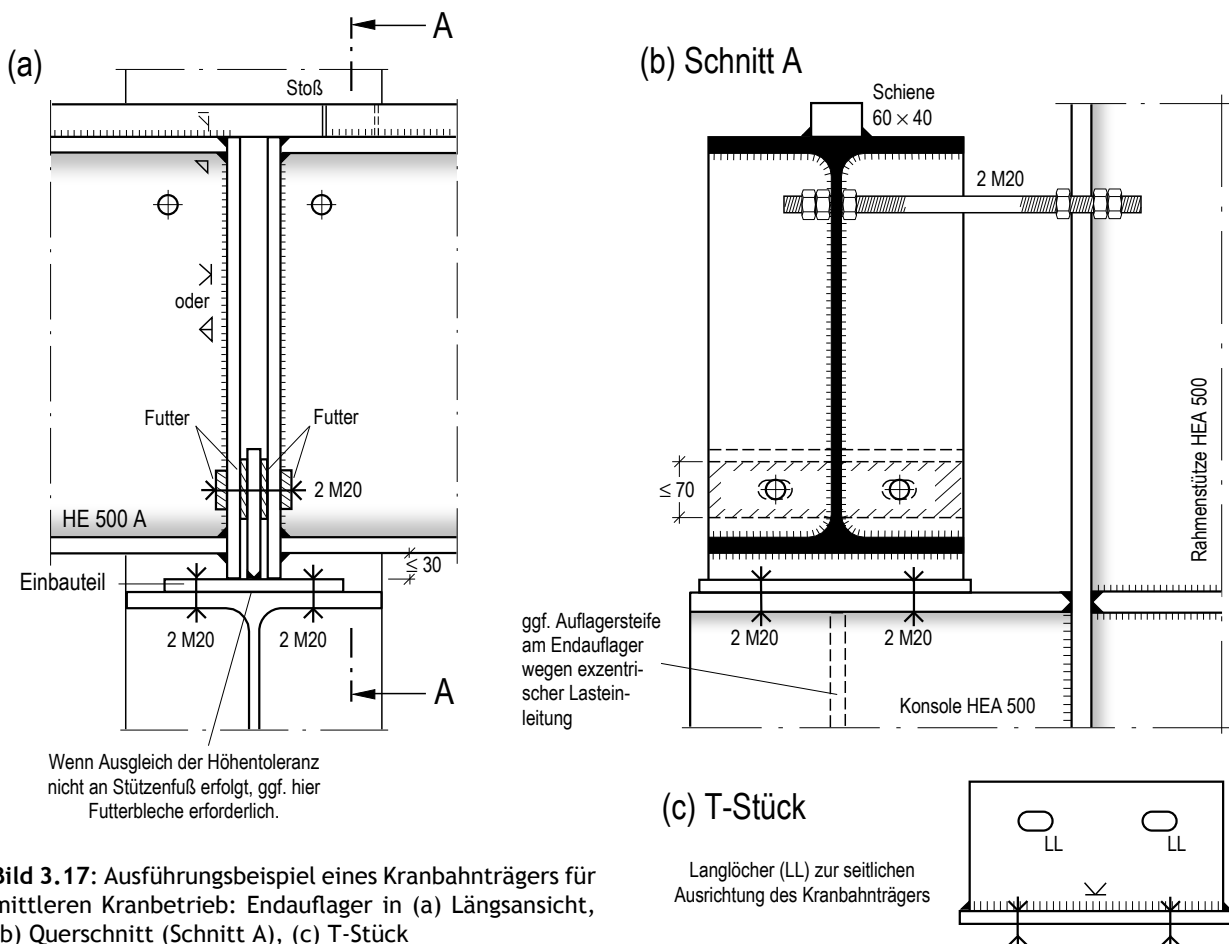


Bild 3.17: Ausführungsbeispiel eines Kranbahnträgers für mittleren Kranbetrieb: Endauflager in (a) Längsansicht, (b) Querschnitt (Schnitt A), (c) T-Stück

3. Konstruktive Hinweise

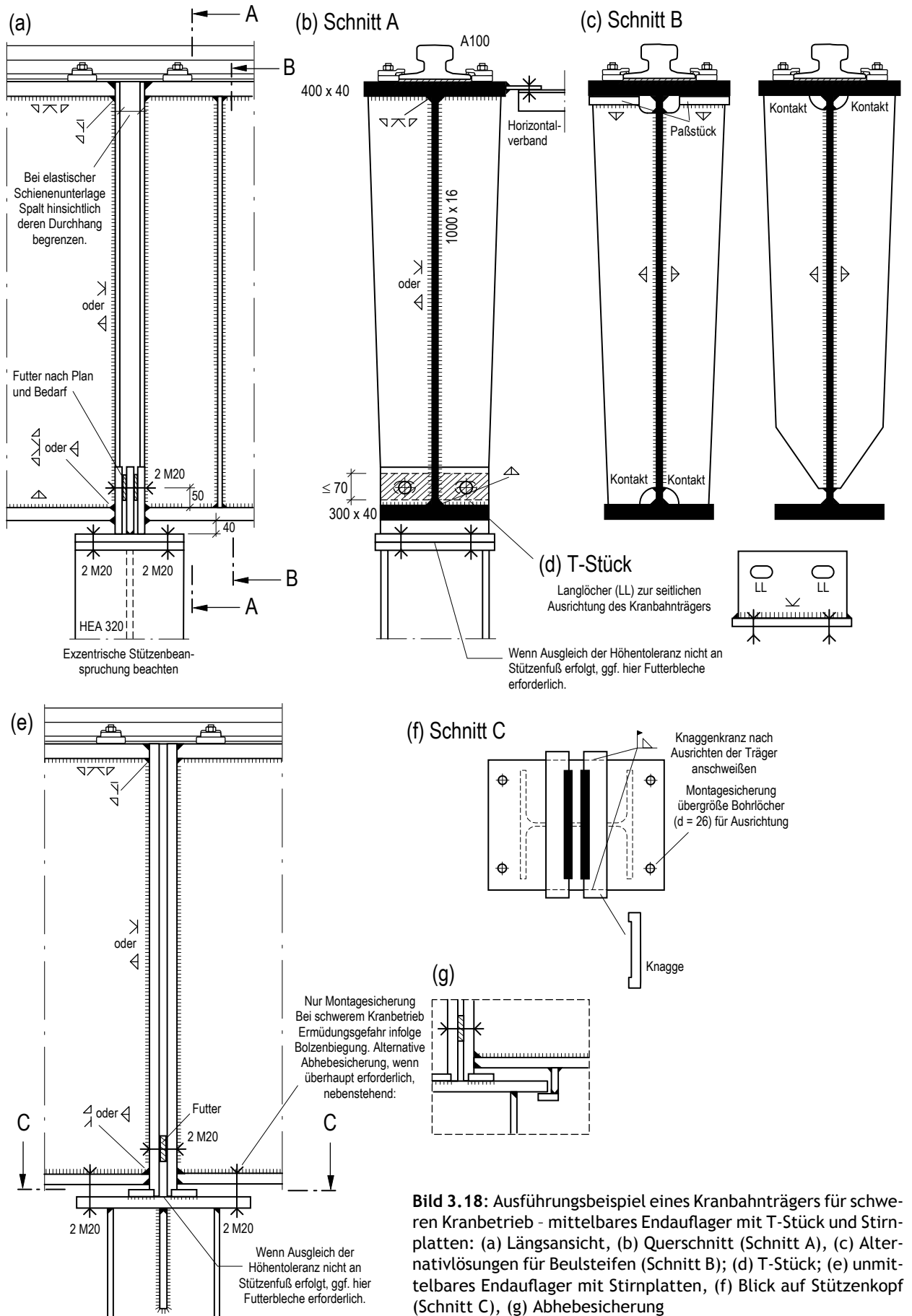


Bild 3.18: Ausführungsbeispiel eines Kranbahnträgers für schweren Kranbetrieb - mittelbares Endauflager mit T-Stück und Stirnplatten: (a) Längsansicht, (b) Querschnitt (Schnitt A), (c) Alternativlösungen für Beulsteifen (Schnitt B); (d) T-Stück; (e) unmittelbares Endauflager mit Stirnplatten, (f) Blick auf Stützenkopf (Schnitt C), (g) Abhebesicherung

3. Konstruktive Hinweise

Kranbetriebs wurde die Klemmlänge der Schrauben in der Stirnplatte durch zusätzliche Futterstücke vergrößert, um die Ermüdungsbeanspruchung zu reduzieren. Das T-Stück übernimmt die Lagesicherung gegen Verschieben auf der Unterstützungsstruktur als auch Abhebesicherung.

Die **mittelbare Endauflagerung** mittels eines T-Stücks für einen Kranbahnträger bei schwerem Kranbetrieb ist in den Bildern 3.18a und 3.18b dargestellt. Muss die elastische Schienenunterlage am Trägerstoß größere Abstände freitragend überbrücken ($>50\text{ mm}$), besteht die Gefahr, dass die Unterlage im Stoß eine Falte bildet. Die Zulage von Edelstahlblechen (1 bis 1,5 mm dick) unter der elastischen Schienenunterlage im Stoßbereich mit Einbindung von ca. 1,0 m zu beiden Seiten des Stoßes haben sich in diesem Fall bewährt.

Bild 3.18c zeigt zwei mögliche Beulsteifenausführungen, die auf ein Anschweißen am Obergurt verzichtet. Eine Ausführungsvariante mit Vertikalsteifen aus Winkeln, die zwischen die Gurte des Kranbahnträgers mittels keilförmiger Bleche formschlüssig eingepasst sind, ist in Bild 3.21 dargestellt.

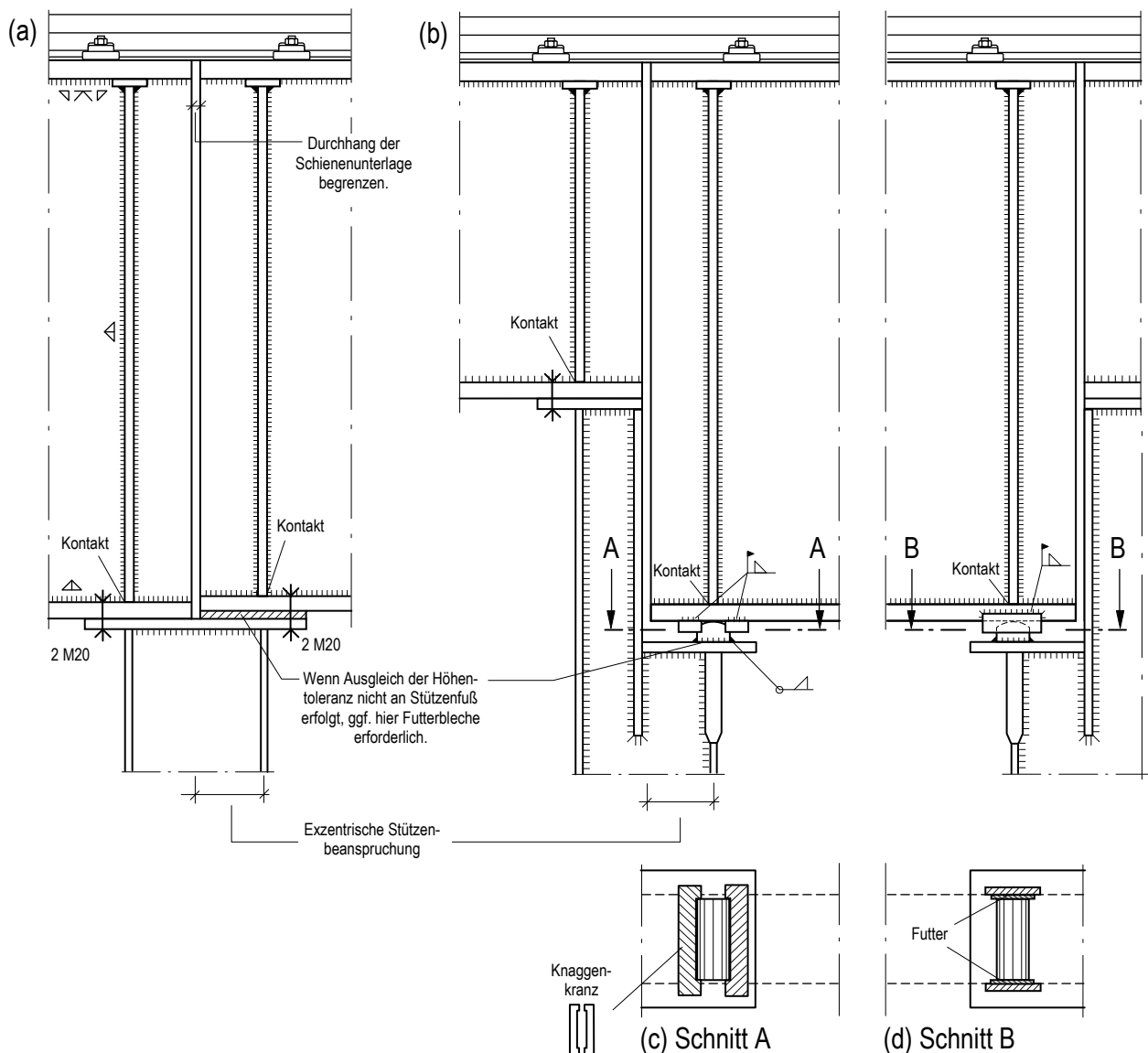


Bild 3.19: Ausführungsbeispiel eines Kranbahnträgers für schweren Kranbetrieb: Endauflager ohne Stirnplatten: (a) Auflagerung ohne Zentrierung, (b) Höhensprung, Auflagerung mit Zentrierung, (c) Festlager, (d) Loslager

3. Konstruktive Hinweise

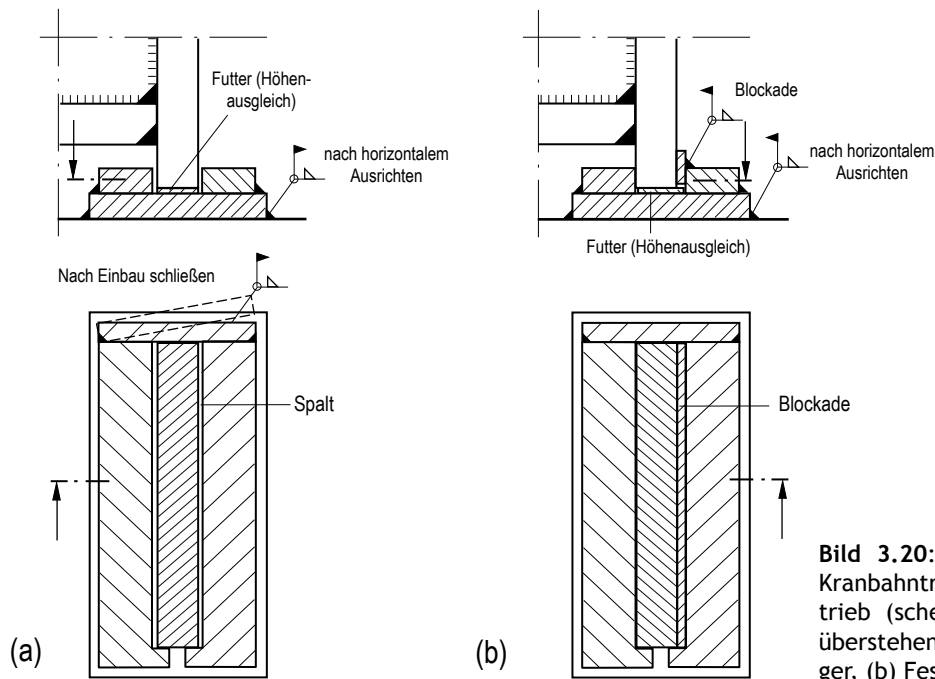


Bild 3.20: Ausführungsbeispiel eines Kranbahnträgers für schweren Kranbetrieb (schematisch): Endauflager mit überstehender Stirnplatte: (a) Loslager, (b) Festlager

Eine **unmittelbare Endauflagerung mittels überstehender Stirnplatten** ist in Bild 3.18e abgebildet. Die Ausführungsvariante unterbindet eine Durchlaufwirkung nahezu komplett zwischen den Kranbahnträgern. Die Verschraubung der Kranbahnträger untereinander dient lediglich der Lagesicherung. Die Übertragung von Längskräften (Bremskräfte etc.) erfolgt ausschließlich über den Knaggenkranz, der ebenfalls lagesichernde Funktion übernimmt.

Die Verschraubung der Kranbahnträger auf dem Stützenkopf in den Bildern 3.18e und 3.18f dient als Montagesicherung und sollte nicht als Abhebesicherung bei schwerem Kranbetrieb genutzt werden. Aufgrund der Verformungen der Kranbahnträger (Endtangentialwinkel) tritt unplanmäßig Bolzenbiegung auf, vgl. Schadensfälle in [50]. Wenn eine Abhebesicherung erforderlich ist, sollten andere konstruktive Lösungen gewählt werden, Bild 3.18g.

Die Bilder 3.19a und 3.19b zeigen zwei Ausführungsbeispiele für **unmittelbare Endauflagerung ohne Stirnplatten**. In beiden Fällen erfährt die Unterbaukonstruktion exzentrische Vertikalbeanspruchung. Bei der Ausführungsvariante in Bild 3.19b wird die Auflagerkraft des Kranbahnträgers durch eine Zentrierleiste in den Stützenflansch eingeleitet. Die Zentrierleiste ist auf der vor außermittiger Lasteinleitung zu schützenden Stütze zu befestigen.

Bei großen Temperaturänderungen wie z. B. in Stahlwerken ist besonderes Augenmerk auf freie Lagerbewegungen infolge der Trägerlängung zu richten. Die Bilder 3.19c und 3.19d zeigen die zwängungsfreie Auflagerung eines Kranbahnträgers mit Los- und Festlager. Eine Ausführungsvariante für Los- und Festlager bei einem Kranbahnträger bei Auflagerung mittels überstehender Stirnplatten ist in Bild 3.20 dargestellt.

3.6 | Aussteifung

Queraussteifung. Bei kleinen Horizontallasten quer zur Fahrbahn und geringer Spannweite des Kranbahnträgers genügt es in der Regel, den Kranbahnträger wie in Bild 3.14 lediglich im Auflagerbereich durch direkten Anschluss an die Stütze quer auszusteifen. Zwischen den Auflagern kann der Kranbahnträger aufgrund seiner Seitensteifigkeit die Horizontallasten durch Biegung

3. Konstruktive Hinweise

übertragen. Ist der Kranbahnträger bei großen Horizontallasten und/oder Spannweiten nicht mehr in der Lage, die Horizontallasten aufzunehmen, ist ein Horizontalträger zur Queraussteifung des Kranbahnträgers erforderlich, der gleichzeitig als Kippsicherung des Kranbahnträgers dient und am Obergurt oder in unmittelbarer Nähe anschließen sollte.

Bild 3.21 zeigt die Kranbahnträger an der Innenstütze einer mehrschiffen Halle für schweren Kranbetrieb in einem Stahlwerk. Die großen Seitenkräfte der Krane werden über Seitenführungsrollen seitlich am Obergurt über Kranschienen mit A-Form in die Kranbahnträger eingeleitet. Die vertikalen Radlasten werden über Kranschienen mit F-Form eingetragen.

Die beiden benachbarten Kranbahnträger werden durch jeweils einen Horizontalträger am Obergurt und Untergurt miteinander verbunden, so dass ein kastenförmiger Querschnitt entsteht. Der Horizontalträger im Obergurtbereich ist vollwandig ausgeführt und besteht aus einem Laufstegblech (Scheibe). Der Horizontalträger im Untergurtbereich ist fachwerkartig ausgeführt und wird durch einen Winkelverband gebildet, der gleichzeitig einen Laufsteg für die Wartung trägt.

Die in Bild 3.21 erkennbaren Schrägstreben dienen lediglich als Transportsicherung. Die beiden Hälften des Laufstegblechs im Obergurtbereich werden in der Werkstatt an die beiden Kranbahnträger angeschweißt und auf der Baustelle durch einen Schraubstoß miteinander verbunden.

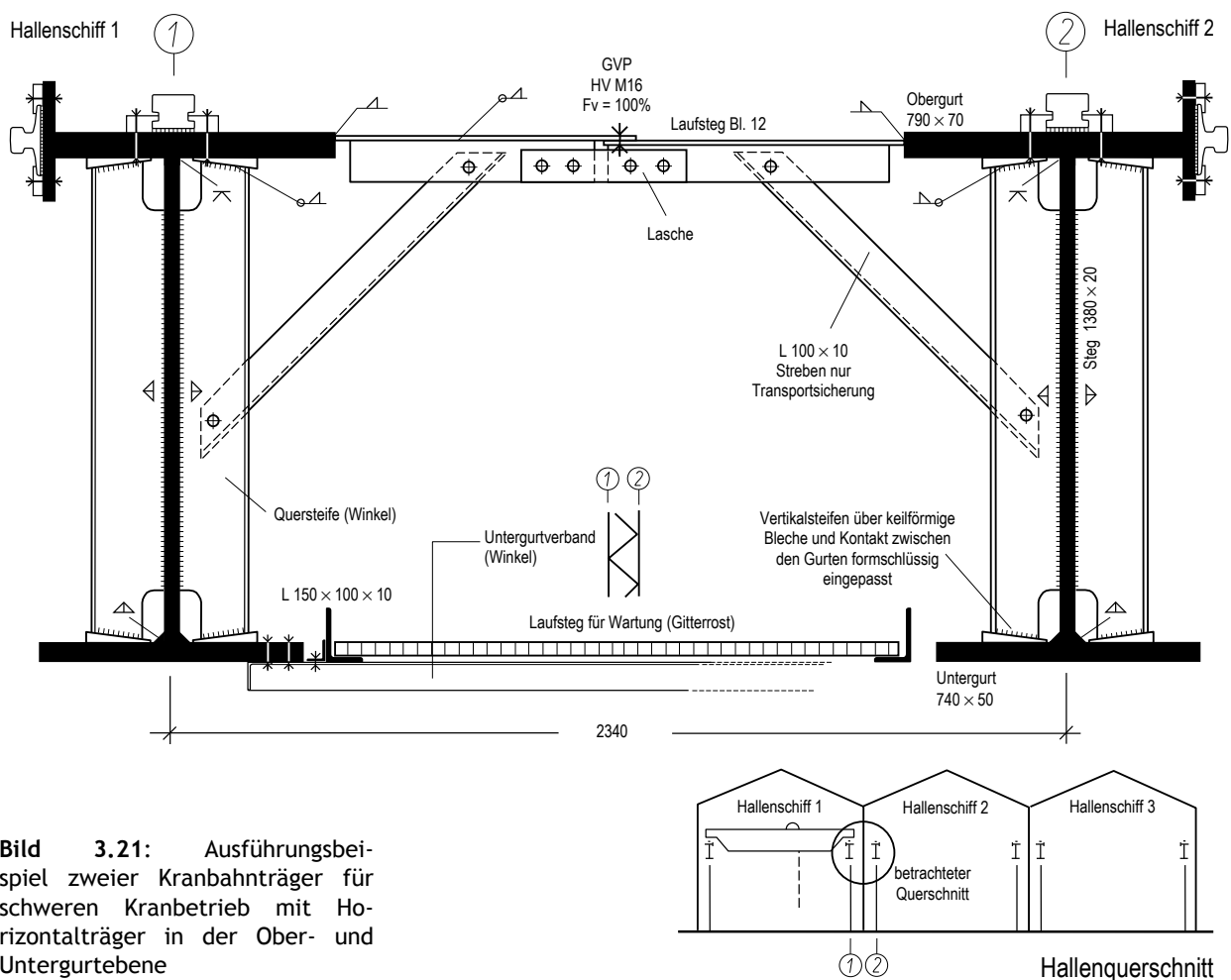


Bild 3.21: Ausführungsbeispiel zweier Kranbahnträger für schweren Kranbetrieb mit Horizontalträger in der Ober- und Untergurtebene

3. Konstruktive Hinweise

Längsaussteifung. Zur Abtragung der horizontalen Längskräfte aus Kranbetrieb bedarf es der Längsaussteifung der Kranbahnen. Häufig wirken die Längskräfte aus Kranbetrieb nicht in den Aussteifungsebenen der Halle (Windverbände), so dass eine Kraftumlenkung erforderlich ist, wenn diese Aussteifungsebenen zur Längsaussteifung der Kranbahnen herangezogen werden sollen.

Bei Kranbahnträgern mit Horizontalträgern übernimmt der Horizontalträger bei entsprechender konstruktiver Durchbildung die Kraftumlenkung. Bei Kranbahnen ohne Horizontalträger sind in der Regel zusätzliche Einleitungsstäbe oder Horizontalscheiben erforderlich, Bild 3.22a. Wird darauf verzichtet, sind die kranbahntragenden Stützen auf die entstehende Torsion zu bemessen, Bild 3.22b.

Bild 3.23 zeigt ein Beispiel für die Ausführung der Ankopplung eines leichten Kranbahnträgers an den Windverband durch Einleitungsstäbe.

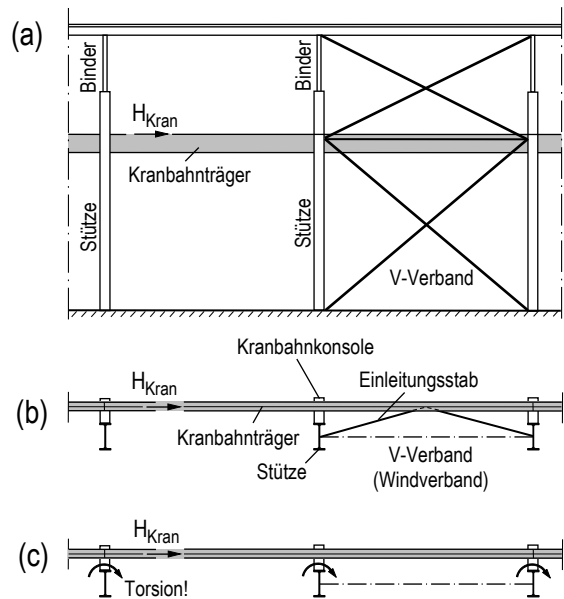


Bild 3.22: Längsaussteifung eines Kranbahnträgers durch den Windverband einer Außenwand (nach [21, Bild B213]): (a) Ansicht der Außenwand, (b) Umlenkung der Kraft aus Kranbahnträger in Verband, (c) Torsion der kranbahntragenden Stützen

3.7 | Schraubensicherung gegen Lösen

Die Praxis zeigt, dass es zur Zeit keine Sicherungsmethode von Schraubverbindungen gegen Lösen gibt, die als ausreichend sicher bei Kranbahnen einschließlich der Befestigung von Schienenklemmen angesehen werden kann. Aus diesem Grund ist die Sicherung von Schraubverbindungen als ein Thema der Wartung und Unterhaltung von Kranbahnen zu betrachten. Besonders bei Kranbahnen mit schwerem Kranbetrieb sind im Rahmen regelmäßiger Kontrollen sich lösende Verbindungen entsprechend nachzuziehen.

Zur konstruktiven Verbesserung der Sicherheit gegenüber selbsttätigem Lösen der Schraubverbindungen werden betrachtet:

- Reduzierung des Lochspiels z. B. für die Schraubverbindungen eines Horizontalträgers,
- Ausführung von GV-Verbindungen und HV-Passverbindungen,
- Verwendung von Keilsicherungsscheiben,
- Verminderung des Farbauftrags im Bereich von Schraube, Mutter und der Kontaktflächen der zu verbindenden Bauteile,
- vergrößerte Klemmlänge für erhöhte elastische Nachgiebigkeit der Schraubverbindung,
- hohe Schraubenvorspannkraft, z.B. $F_{p,c}$, $F_{p,c}^*$,
- größere Schraubenvorspannkraft durch Wahl größerer Schrauben,
- Reduzierung der Anzahl an Trennfugen.

Bei nicht vorgespannten SL- und Zugverbindungen, wie z. B. der Abhebesicherung in Bild 3.14, steht der Aspekt der Verliersicherung im Vordergrund. Hier wird z. B. das Zerstören der Gewindegänge durch Körnerschlag als wirksam betrachtet.

4. Einwirkungen

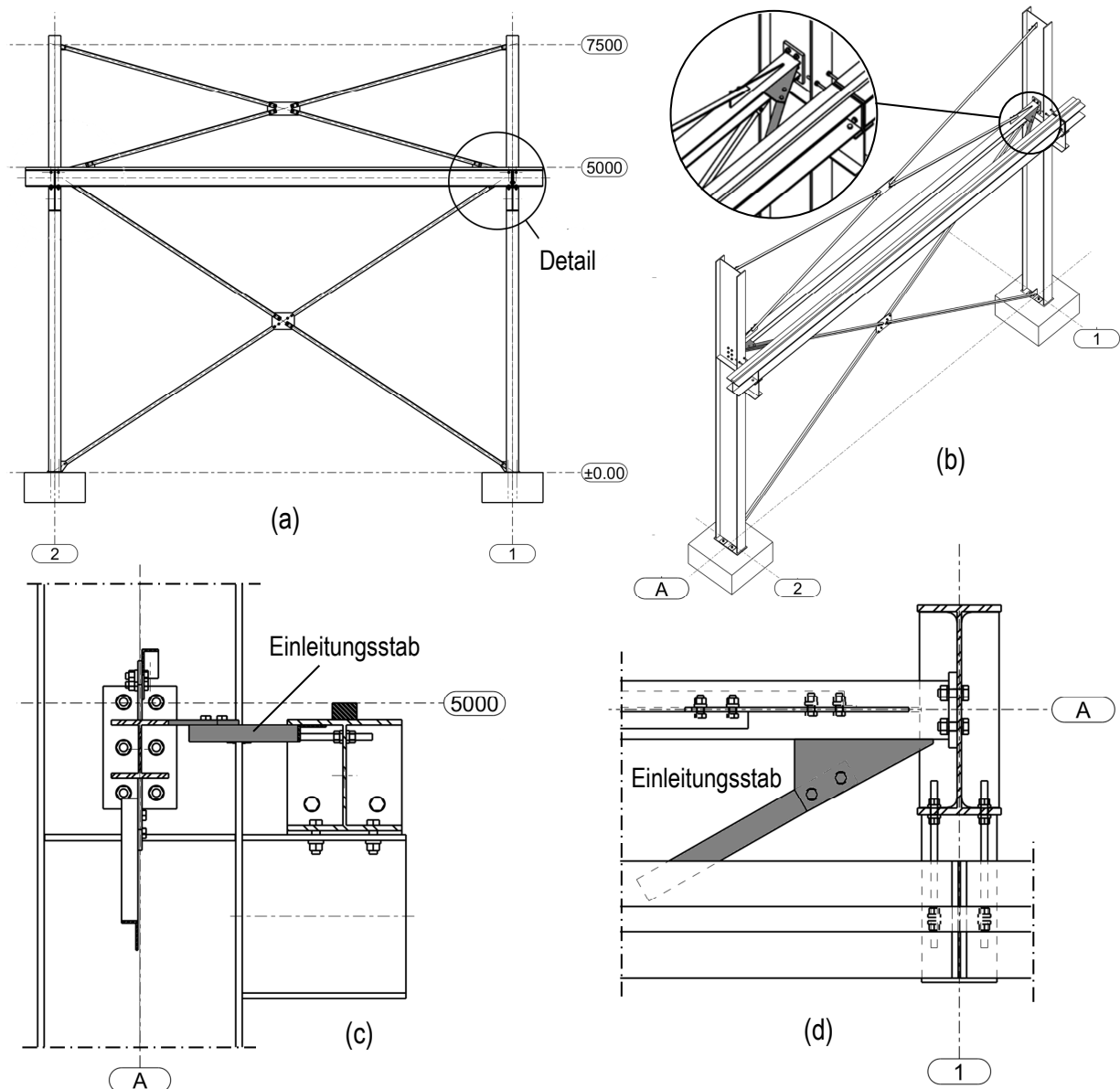


Bild 3.23: Ausführungsbeispiel für Längsaussteifung einer Kranbahn über Windverband: (a) Ansicht des Windverbands, (b) Isometrie, (c) Schnitt von Detail, (d) Draufsicht auf Detail

3.8 | Toleranzen

Wenn keine Festlegungen durch den Bauherrn getroffen werden, gilt die Toleranzklasse 1 nach DIN EN 1090-2 [8, Abs. 11.3.2] als vereinbart.

4 | Einwirkungen

4.1 | Vorbemerkung

Die Einwirkungen auf Tragwerke des Hochbaus werden nach der europäisch harmonisierten Normenreihe Eurocode 1 ermittelt, die in Deutschland als Normenreihe DIN EN 1991 erschienen ist und bauaufsichtlich eingeführt wurde.

4. Einwirkungen

4.2 | Ständige Einwirkungen

Zu den ständigen Einwirkungen von Kranbahnen zählt deren Eigengewicht sowie das Gewicht der Anbauten wie Verbände, Laufstege, Geländer, Schleifleitungen etc. In Einzelfällen kann ein Gewichtszuschlag bei signifikanten Schmutzablagerungen, z. B. bei Zementwerken, erforderlich sein.

4.3 | Veränderliche Einwirkungen

Die Einwirkungen aus Kranbetrieb zählen überwiegend zu den veränderlichen Einwirkungen und werden in Deutschland nach DIN EN 1991-3 [12] ermittelt. Zu diesen Einwirkungen zählen:

- vertikale Kräfte aus Kraneigengewicht,
- vertikale Kräfte aus Hublast,
- horizontale Kräfte aus Schräglauf,
- horizontale Massenkräfte aus Beschleunigen und Bremsen bei Kranfahren,
- horizontale Massenkräfte aus Beschleunigen und Bremsen bei Katzfahren.

Das Kraneigengewicht setzt sich bei Brückenlaufkränen üblicherweise aus dem Gewicht der Kranbrücke und der Laufkatze zusammen.

Die Massenkräfte aus Katzfahren sind im Allgemeinen für die Kranbahnen von Brückenlaufkränen nicht maßgebend [12, Abs. 2.7.5].

Die horizontalen Massenkräfte aus Beschleunigen und Bremsen bei Kranfahren treten quer und längs zur Kranbahnachse auf. Die quergerichteten Massenkräfte sind für die Kranbahnabmessung maßgebend. Die längsgerichteten Massenkräfte sind für die Auslegung der Längsaussteifung (z. B. Verbände) von Bedeutung.

Weitere veränderliche Einwirkungen wie vertikale Nutzlasten auf Laufstegen, Treppen und Podesten sowie horizontale Nutzlasten für Geländer brauchen nicht mit den Einwirkungen aus Kranbetrieb überlagert werden [12, Abs. 2.9].

Bei Kranbahnen im Freien sind zusätzlich Wind- und ggf. Schnee- und Eislasten anzusetzen. Für die Windeinwirkung bei Kranbetrieb ist von einer gegenüber DIN EN 1991-4 (Windlasten) reduzierten Windgeschwindigkeit von 20 m/s auszugehen.

Im Einzelfall, vor allen Dingen bei Freikranbahnen, kann es erforderlich sein, Einwirkungen aus Temperaturänderungen zu berücksichtigen. Es wird empfohlen, von Temperaturschwankungen zwischen -25°C und $+45^{\circ}\text{C}$ bei einer mittleren Aufstelltemperatur von $+10^{\circ}\text{C}$ auszugehen [3, Abs. 3.2.6]. Ungleiche Erwärmungen bei Kranbahnen im Freien sind i. Allg. vernachlässigbar.

Die niedrigste Temperatur bei Kranbahnen in Gebäuden ist mit -10°C anzunehmen [20, NDP zu 3.2.3(1)]. Betrieblich bedingte Temperaturänderungen (z. B. in Stahlwerken) sind vom Bauherrn anzugeben.

4.4 | Außergewöhnliche Einwirkungen

Aus dem Kranbetrieb können außergewöhnliche Einwirkungen infolge Pufferkräften bei Anprall des Krans an die Puffer der Endanschläge der Kranbahn und infolge von Kippkräften bei Kollision der Lastaufnahmemittel mit Hindernissen hervorgerufen werden.

4. Einwirkungen

Weitere außergewöhnliche Einwirkungen können aus dem Anprall an Kranbahnstützen entstehen, wenn die Kranbahn Verkehrswege kreuzt.

In den deutschen Erdbebengebieten ist zusätzlich die Erdbebeneinwirkung zu berücksichtigen.

Ist eine außergewöhnliche Einwirkung zu berücksichtigen, brauchen weder weitere auftretende außergewöhnliche Einwirkungen noch Einwirkungen aus Wind und Schnee als gleichzeitig wirkend berücksichtigt werden [12, Anh. A.2.1(2)].

4.5 | Prüflasten

Nach der Montage von Kranen ist vor deren erster Inbetriebnahme eine Funktionsprüfung des Krans unter Belastung gemäß der Maschinenrichtlinie [37, Abs. 4.1.2.3] durchzuführen. Hierbei wird kontrolliert, ob der Kran so konstruiert und gebaut wurde, dass er unter einer definierten Überlastung ohne bleibende Verformung und ohne offenkundige Schäden standhält.

Es wird eine statische Prüfung (ohne Kranfahren) unter einer Prüflast von 125 % der Nenn-Hublast und eine dynamische Prüfung (mit Kranfahren) unter einer Prüflast von 110 % der Nenn-Hublast durchgeführt. Die Prüflasten stellen nicht nur für den Kran, sondern auch die Kranbahn eine definierte Überlastung dar und sind bei der Kranbahnbemessung zu berücksichtigen.

4.6 | Dynamische Faktoren

Die dynamische Faktoren nach DIN EN 1991-3 [12] berücksichtigen dynamische Erhöhungen der als statisch definierten Einwirkungen infolge Kranbetrieb. Die Faktoren φ_1 bis φ_3 nach [12, Abs. 2] decken die beim Hub- und Absetzvorgang des Krans ausgelösten Stöße ab, deren Höhe von der Art des Hubwerks und der Lastaufnahme abhängig ist. Der Faktor φ_4 berücksichtigt Schwingungsanregungen infolge von Kranfahren über Unebenheiten. Der Faktor φ_5 erfasst dynamische Wirkungen aus dem Antrieb. Die Faktoren φ_6 und φ_7 sind für bei der Kranprüfung bzw. dem Pufferanprall von Bedeutung.

Sofern der Kranhersteller keine Angaben zu den Faktoren φ_1 bis φ_7 liefert, können diese nach [12, Abs. 2] abgeschätzt werden.

Der Faktor φ_4 ist unmittelbar mit der Einhaltung der zulässigen Ausführungstoleranzen von Kranbahnen nach DIN EN 1090-2 [8] verknüpft.

In Deutschland sind neben den harmonisierten europäischen Regeln Vereinfachungen beim Lastansatz möglich [20]: Für den Nachweis der Unterstützungs- und Aufhängungskonstruktionen von Kranbahnen, die die Lasten von der Kranbahn bis in die Fundamente weiterleiten, dürfen Schwingbeiwerte $\varphi \geq 1,1$ um $\Delta\varphi = 0,1$ reduziert werden. Die Bemessung der Gründungen darf ohne Ansatz der Schwingbeiwerte erfolgen. Bei der Berechnung von Spannungen aus dem gleichzeitigen Wirken mehrerer Krane ist für den Kran mit dem größten Wert $F_{z,Ed}$ (einschließlich Schwingbeiwert) mit dessen Schwingbeiwert und für die übrigen mit dem Schwingbeiwert der Hubklasse HC1 nach DIN EN 1991-3 zu rechnen.

4.7 | Lastgruppen

Die unterschiedlichen Einwirkungen infolge Kranbetrieb sind zu Lastgruppen (LG) zusammenzufassen, die als eine einzelne charakteristische Einwirkung bei der Kombination mit anderen

4. Einwirkungen

Einwirkungen anzusehen ist. Die Lastgruppen LG 1 bis 7 beschreiben typische Arbeitsvorgänge, die für den Grenzzustand der Tragfähigkeit von Bedeutung sind, Tab. 4.1:

- LG 1: Anheben der Hublas,
- LG 2: Loslassen der Hublast,
- LG 3: Beschleunigen des unbeladenen Krans,
- LG 4: Beschleunigen des beladenen Krans,
- LG 5: Kranfahren (Schräglauf) des beladenen Krans,
- LG 6: Beschleunigtes Katzfahren,
- LG 7: stehender unbeladener Kran,
- LG 8: Kranprüfung.

Beim plötzlichen Loslassen der Hublast in LG 2 schwingt die Kranbrücke nach oben. Daraus resultiert eine auf die Kranbahn abhebend wirkende zusätzliche Kraft ($\varphi_3 < 1$). Die Lastgruppe LG 2 wird daher gegenüber LG 1 für die Bemessung der Kranbahn nicht maßgebend. Sie ist z. B. bei der Auslegung von Sicherungsmitteln gegen Abheben von Bedeutung.

Die Kranhersteller spezifizieren keine unterschiedlichen Seitenkräfte (Massenkräfte) aus der Beschleunigung des beladenen oder unbeladenen Krans, die durch eine andere Gewichtsverteilung bedingt sind. Aus diesem Grund wird für die Kranbahnbemessung die Lastgruppe LG 4 gegenüber der Lastgruppe LG 3 maßgebend.

Für die Kranbahnbemessung sind üblicherweise die Lastgruppen LG 1 und LG 5 maßgebend.

Tab. 4.1: Lastgruppen (LG) von Einwirkungen infolge Kranbetrieb (einschl. dynamischer Faktoren φ), die bei der Kombination mit anderen Einwirkungen im **Grenzzustand der Tragfähigkeit** als eine einzige charakteristische Einwirkungen anzusehen sind

Einwirkung	Lastgruppen für ständige/vorübergehende Bemessungssituation [12, Tab. 2.2]						
	LG1	LG2	LG3	LG4	LG5	LG6	LG7
Kran-Eigengewicht	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1
Hublast	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	η
Kranfahren	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-
Schräglauf	-	-	-	-	1	-	-
Katzfahren	-	-	-	-	-	1	-
Wind in Betrieb	1	1	1	1	1	-	-

Einwirkung	... für außergewöhnliche Bemessungssituation [12, Tab. 2.2]	
	LG9	LG10
Kran-Eigengewicht	1	1
Hublast	1	1
Pufferkraft	φ_7	-
Kippkraft	-	1

Auf ähnliche Weise sind für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ebenfalls die Einwirkungen infolge Kranbetrieb zu einer Lastgruppe nach Tab. 4.2 zusammenzufassen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Schwingbeiwerte hierbei - mit Ausnahme der Kranprüfung - nicht zu berücksichtigen sind.

4. Einwirkungen

Tab. 4.2: Gruppen von Einwirkungen infolge Kranbetrieb (einschließlich dynamischer Faktoren φ), die bei der Kombination mit anderen Einwirkungen im **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit** als eine einzige charakteristische Einwirkungen anzusehen sind

Einwirkung	Lastgruppen [20, Tab. NA.1]			Einwirkung	Kranprüfung LG8
	LG101	LG102	LG103		
Kran-Eigengewicht	1	1	1	Kran-Eigengewicht	φ_1
Hublast	1	1	1	Prüflast	φ_6
Kranfahren	-	-	1	Kranfahren	φ_5
Schräglauf	-	1	-	Wind in Betrieb	1
Wind in Betrieb	-	1	1		

4.8 | Hinweise zu Schräglaufräften

Ein nach den Regeln der Technik fehlerfreier Kran bewegt sich auf einer ebensolchen Kranbahn nicht auf einer geometrischen Geraden fort. Aufgrund unvermeidbarer Fertigungstoleranzen, dynamischer Einflüsse etc. beschreibt der Kran vielmehr innerhalb des zur Verfügung stehenden Spurspiels eine Bewegung, die im Grundriss aus einem oder mehreren hintereinanderliegenden Bögen besteht [27, S. 21].

Infolge dieses Bogenlaufs fährt der Kran zwangsläufig an einer vorher nicht bestimmbarer Stelle der Kranbahn mit seinem in Fahrtrichtung vorderem Seitenführungselement (Spurkranz oder horizontale Führungsrolle) gegen die Schiene. Obwohl der Kran in der Rollrichtung seiner Laufräder weiterhin geradeaus fahren möchte, wird er durch den Kontakt mit der Schiene (Formschluss) seitlich abgedrängt. Von allen anderen (hinteren) Seitenführungselementen wird angenommen, dass sie nicht gegen die Schiene laufen. Daher wird eine solche Konstellation als hintere Freilaufstellung bezeichnet.

Die infolge des Formschlusses von der Schiene auf den Kran einwirkende Richtkraft S (Aktionskraft) bewirkt eine Drehung des Krans. Die Richtkraft greift am Ort des Formschlusses an. Der durch die Richtkraft eingeleiteten Krandrehung wirken horizontale Reaktionskräfte in den Aufstandsflächen der Laufräder infolge Reibung entgegen. Da diese Reaktionskräfte von den gleichzeitig wirkenden vertikalen Radlasten der Laufräder abhängen (Reibungsgesetz), werden sie als kraftschlüssig bezeichnet.

In Bild 4.1a ist beispielhaft für einen 50-t-Kran mit vier Laufrädern pro Kopfträger die Verteilung der Reaktionskräfte in den Radaufstandsflächen nach Angaben des Kranherstellers dargestellt, die von der Stellung der Laufkatze abhängig ist. In Bild 4.1a gehören somit die für die linke Kranbahn ($i = 1$) eingetragenen Reaktionskräfte $H_{S,i,j}$ (16 kN; 9 kN; 27 kN; 51 kN) zu den vertikalen Radlasten mit dem höheren Hublastanteil. Die Spurführung erfolgt über Spurkränze.

Die Richtkraft S , die auch als Spurführungskraft bezeichnet wird, wurde vom Kranhersteller in Bild 4.1a am vorderen Führungsmittel in Fahrtrichtung auf der linken Kranbahn angesetzt. Sie steht mit der Summe der Reaktionskräfte im Gleichgewicht.

Der in Bild 4.1a dargestellte Angriffsort von S unterstellt das Anliegen des Spurkranzes auf der linken Kranbahn z. B. bedingt durch eine zufällige Schiefstellung des Krans. Zufallsbedingt kann jedoch bei einer solchen Schiefstellung auch der Spurkranz des ersten Laufrads auf der rechten Kranbahn anliegen, Bild 4.1b. Das bedeutet, die Spurführungskraft kann sowohl auf der linken als auch auf der rechten Kranbahn angreifen.

4. Einwirkungen

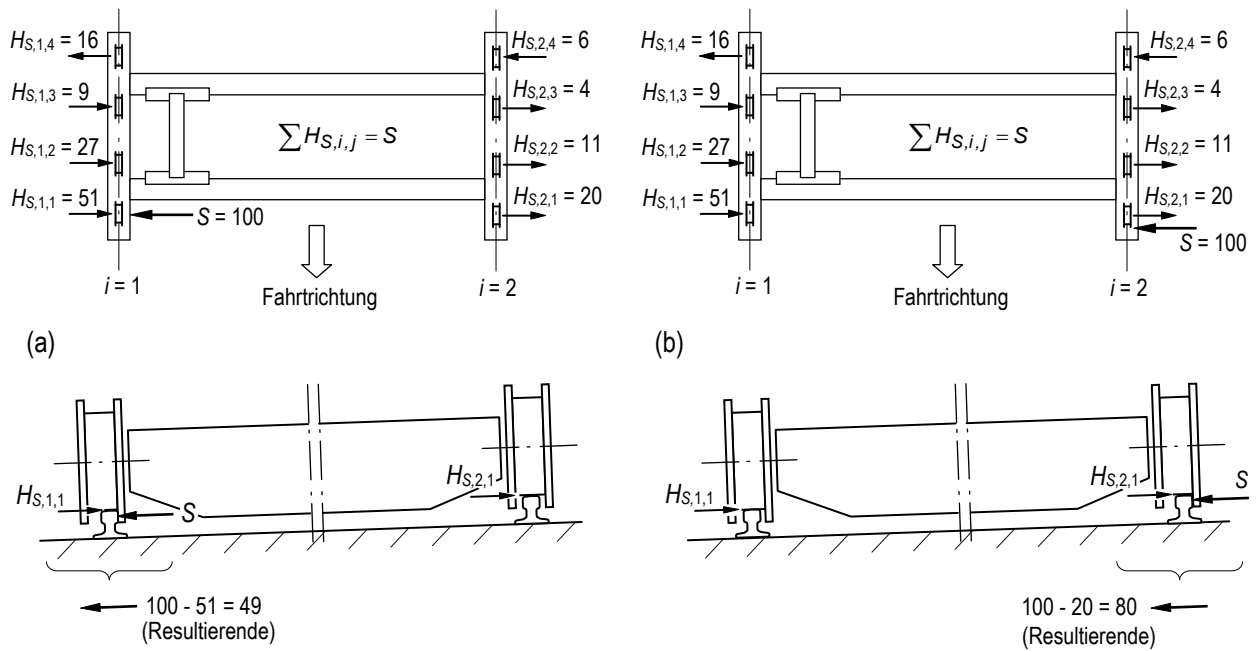


Bild 4.1: Schräglaufkräfte [kN] mit Bezug auf Schiene, Verteilung der Reaktionskräfte in den Aufstandsflächen der Laufräder (Beispiel), Formschluss des in Fahrtrichtung vordersten Spurkranzes mit Schiene (a) der linken Kranbahn ($i = 1$) und (b) der rechten Kranbahn ($i = 2$)

Weist der Kran eine Schiefstellung in die andere Richtung als in den Bildern 4.1a und 4.1b auf, wirkt die Spurführungskraft nach rechts. Entsprechend ändern auch die Reaktionskräfte $H_{S,i,j}$ ihre Wirkungsrichtung.

Bei der Bemessung des Kranbahnträgers ist für das Laufrad mit anliegendem Spurkranz lediglich die Resultierende aus $H_{S,i,1}$ und S zu berücksichtigen, die in den Bildern 4.1a und 4.1b ebenfalls dargestellt sind. In der Praxis wird häufig ausschließlich der Lastenzug in Bild 4.1a mit Ansatz von S auf den Kranbahnträger mit den größten Vertikallasten untersucht, obwohl für den betrachteten Kran beim Anliegen des Spurkranzes am minder beanspruchten Kranbahnträger an der Stelle des anliegenden Laufrads eine größere resultierende Seitenlast von 80 kN wirkt.

Da für die horizontale Belastung des Kranbahnträgers gelegentlich der Lastenzug der Schräglaufkräfte auf der Seite der geringen vertikalen Radlasten maßgebend wird, kann dieser Zusammenhang für eine Einsparung bei der Kranbahnträgerbemessung genutzt werden, der allerdings mit einem erhöhten Rechenaufwand erkauft wird.

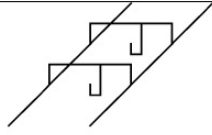
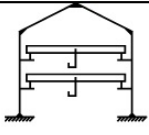
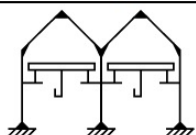
Ist die Zuordnung der Katzstellung zu den vom Kranhersteller angegebenen Reaktionskräften $H_{S,i,j}$ nicht eindeutig, sollte konservativerweise vom gleichzeitigen Auftreten des ungünstigsten Lastenzugs aus $H_{S,i,j}$ und der maximalen vertikalen Radlasten ausgegangen werden.

4.9 | Betrieb von mehreren Kranen

Bei Verkehr mehrerer Krane regelt DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.3] die Anzahl der in der Bemessung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigenden Krane unter Beachtung der zum Stand der Drucklegung dieser Arbeitshilfe noch nicht erschienenen korrigierten Berichtigung [11], siehe Tab. 4.3. Dabei wird zwischen dem Kranbahnträger und den Unterstützungs- und Aufhängungskonstruktionen des Kranbahnträgers unterschieden.

5. Hinweise zur Bemessung

Tab. 4.3: Rechnerisch im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzusetzende Krane nach DINEN 1991-3 beim Verkehr mehrerer Krane (korrigierte Berichtigung [11])

	Für Kranbahnen 	Für Kranunterkonstruktionen	
		Einschiffige Halle 	Mehrschiffige Halle 
Vertikale Kraneinwirkung	3	4 ANMERKUNG: Die ungünstigste Stellung der 4 Krane könnte sein: a) 3 Krane hintereinander und 1 Kran auf einer weiteren Kranbahn oder b) 2 Krane hintereinander und 2 Krane auf einer weiteren Kranbahn oder c) 2 Krane hintereinander und 2 Krane übereinander auf zwei weiteren Kranbahnen	6 ANMERKUNG: Die ungünstigste Stellung der 6 Krane könnte sein: a) Stellung der Krane wie für eine einschiffige Halle und 2 weitere Krane in einer weiteren Halle einem weiteren Hallenschiff oder b) 6 Krane über mehrere Hallen Hallenschiffe verteilt
Horizontale Kraneinwirkung	1 ANMERKUNG: Es ist festzustellen, ob es ungünstiger ist, wenn zwei Krane zusammenarbeiten, um schwere Lasten zu heben.	2 ANMERKUNG: 2 Krane je Halle Halle, die übereinander arbeiten	4 ANMERKUNG: Unter Berücksichtigung der Bedingungen für Kranbahnen und für einschiffige Hallen

Wenn z. B. der in Bild 4.1 betrachtete Kran zweimal als Einzelkran auf einer Kranbahn zur Ausführung kommen soll, sind für die Bemessung der Kranbahnträger in diesem Fall nur die horizontalen Einwirkungen eines Krans zu berücksichtigen, ausgenommen die Fälle, in denen die beiden Einzelkrane zusammenarbeiten, um gemeinsam schwere Lasten zu heben.

Wenn die beiden Einzelkrane gemeinsam schwere Lasten heben, sind die in Bild 4.1 dargestellten Schräglauf-Lastenzüge unter Beachtung der Katzstellung auf der gleichen Seite (gemeinsames Heben) und der identischen Fahrtrichtung als Gesamt-Schräglauf-Lastenzug mit einem realistischen Radabstand (z. B. in Abhängigkeit der Abmessungen der gemeinsam zu hebenden schweren Teile) hintereinander anzusetzen.

5 | Hinweise zur Bemessung

5.1 | Allgemeine Hinweise

Für die Bemessung von Kranbahnträgern von Brückenlaufkränen sind neben den globalen Beanspruchungen aus Trägerbiegung und Querkraftschub auch lokale Spannungen aus Radlasteinleitung zu berücksichtigen. Tab. 5.1 gibt einen Überblick, welche lokalen Spannungen in den einzelnen Grenzzuständen zu berücksichtigen sind.

5. Hinweise zur Bemessung

Tab. 5.1: Ansatz lokaler Spannungen aus Radlasteinleitung im Steg von Kranbahnträgern von Brückenlaufkranen in den Grenzzuständen

Grenzzustand	Ansatz lokaler Spannungen aus Radlasteinleitung nach DIN EN 1993-6		
	Lokale Druckspannungen [19, Abs. 5.7.1]	Lokale Schubspannungen [19, Abs. 5.7.2]	Lokale Biegespannungen [19, Abs. 5.7.3]
Tragfähigkeit [19, Abs. 5.6.1(2)]	ja	nein *	nein
Gebrauchstauglichkeit [19, Abs. 7.5(2)]	ja	nein	nein
Ermüdung [19, Abs. 9.3.3(1)]	ja	ja	ja für Klasse \geq S3

* Lokale Druck- und Schubspannungen treten versetzt auf. Schubspannungen sind Zwängungsspannungen. Für das Gleichgewicht mit der vertikalen Last und damit für die Traglast haben sie keine Bedeutung.

5.2 | Grenzzustand der Tragfähigkeit

5.2.1 | Einwirkungskombinationen

Für Kranbahnen in Gebäuden, die nur durch ständige Einwirkungen g und die zu einer Lastgruppe zusammengefassten Einwirkungen aus Kranbetrieb beansprucht werden, ist in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgende Bemessungslast q_{Ed} zu untersuchen:

$$q_{Ed} = 1,35 g + 1,35 p_{LG \text{ Kran}} \quad (2)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Lastgruppe aus Kraneinwirkungen beträgt nicht wie für veränderliche Einwirkungen üblicherweise $\gamma_F = 1,5$, sondern lediglich $\gamma_F = 1,35$.

Weitere Einwirkungskombinationen werden erforderlich, wenn neben der Lastgruppe $p_{LG \text{ Kran}}$ aus den Kraneinwirkungen andere veränderliche Einwirkungen wie z. B. Wind bei Freikranbahnen auftreten. Selbst für den Fall, dass die Lastgruppe aus Kraneinwirkungen nicht die Leitveränderliche darstellt, ist sie in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation nach DIN EN 1990 [10, Abs. 6.4.3.2] in voller Höhe ($\psi_0 = 1,0$) mit ihrem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,35$ anzusetzen.

In der Bemessungssituation für Erdbeben ist die Lastgruppe aus Kraneinwirkungen mit ihrem quasi-ständigen Wert $\psi_2 \cdot p_{LG \text{ Kran}}$ zu berücksichtigen. Gemäß [20] entspricht der Kombinationsbeiwert ψ_2 dem Verhältnis von Krangewicht zu Krangewicht plus Hublast des Krans. Das Krangewicht setzt sich in der Regel aus dem Brückengewicht und dem Katzgewicht zusammen.

Für die Ermittlung der Horizontallasten infolge Erdbeben sind lediglich das Krangewicht und gegebenenfalls geführte, mit ψ_2 multiplizierte Hublasten anzusetzen. Nicht geführte Hublasten werden durch horizontale Erdbeschleunigungen nicht zum Schwingen angeregt, sondern wirken eher günstig wie ein Dämpfer.

5.2.2 | Biegedrillknicknachweis

Nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 6.3.2.2] können Vereinfachungen hinsichtlich des Lastangriffspunkts der Radlasten beim Biegedrillknicknachweis getroffen werden, ohne dass dafür Randbedingungen definiert werden. Die Bemessungsbestimmung wird zur Zeit in den Normengremien diskutiert.

5. Hinweise zur Bemessung

Folgende Voraussetzungen sollten auf jeden Fall bei Ausnutzung der Vereinfachungen erfüllt sein:

1. Die Kran konstruktion ist so steif, dass die Annahme eines verdrehungsbehinderten Laufrades zutrifft.
2. Es besteht keine Gefahr eines Durchschlagens oder anderer ungünstiger Phänomene wie z. B. unberücksichtigte Schwingungen, die zu einer ungünstigen Verschiebung des Lastangriffspunkts führt.

Da das Vorliegen dieser Voraussetzungen genauere Untersuchungen erfordert, wird empfohlen, die genannten Vereinfachungen zum Lastangriffspunkt nicht zu nutzen.

5.2.3 | Beulnachweis

Bei gemeinsamer Wirkung von Querbelastrung an den Längsrändern sowie Querkraft und/oder Biegung ist die Beanspruchbarkeit des Stegs eines Kranbahnträgers, zusätzlich zu den Einzelnachweisen und der M-F-Interaktion nach DIN EN 1993-1-5 mit der M-F-V-Interaktionsbeziehung nach dem Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-5 [16, NCI zu 7] zu überprüfen.

5.3 | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Begrenzung der Spurweitenänderung in Tab. 7.1e von DIN EN 1993-6 [19] im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dient der Vermeidung übermäßigen Verschleißes von Kranlaufrollen und Kranschiene. Gemäß Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-6 [20, NDP zu 7.3(1)] sollten daher die Langzeitauswirkungen infolge der quasi-ständigen Einwirkungskombination anstelle der charakteristischen Einwirkungskombination nach DIN EN 1990 untersucht werden. Die Einwirkungen aus Kranbetrieb sind mit der Lastgruppe 101 (ohne Schwingbeiwerte) nach Tabelle NA.1 des Nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-6 bei der Bildung der Einwirkungskombination anzusetzen. Der Kombinationsbeiwert für die Lastgruppe 101 beträgt $\psi_2 = 1$.

Horizontale Einwirkungen aus Kranen (Massenkräfte, Seitenkräfte aus Schräglaufl) sind im Einzelfall nur dann zu berücksichtigen, wenn Brems- und Beschleunigungsvorgänge in einem bestimmten Kranbahnbereich bedingt durch den Kranbetrieb nach Angaben des Bauherrn regelmäßig wiederholt auftreten.

Wenn Temperaturänderungen, wie z. B. bei Außenkranbahnen, zu berücksichtigen sind, ist abweichend von DIN EN 1990 deren Kombinationsbeiwert zu $\psi_2 = 1$ zu setzen.

5.4 | Ermüdung

5.4.1 | Bohrungen durchgeschraubter Schienenbefestigungen

Beim Ermüdungsnachweis der Bohrlöcher im Oberflansch zur Befestigung aufgeschraubter Schienenklemmplatten ist der durch die DIN-Auslegungsseite im Internet korrigierte Übersetzungsfehler in DIN EN 1993-1-9 [18, Abs. 7.2] zu beachten. Durch die Korrektur ergibt sich für Bohrlöcher im Oberflansch von einfeldrigen Kranbahnträgern mit reiner Druckschwellbeanspruchung unter Längsspannungen eine 67% höhere Ermüdungsfestigkeit.

5. Hinweise zur Bemessung

Siehe Korrektur auf der DIN-Auslegungsseite unter:

<http://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/auslegungenzu-din-normen-des-nabau-68630>.

5.4.2 | Schubspannungen durchgeschweißter Nähte

DIN EN 1993-1-9 [18] enthält bislang keine Kerbfalleinstufung zu durchgeschweißten Nähten mit Schubbeanspruchung. In Anlehnung an die experimentellen Untersuchungen von *Seeger* et al. [46] wird in [23] eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_C = 100 \text{ N/mm}^2$ bei einer Neigung der *Wöhlerkurve* von $m = 5$ empfohlen. Diese Einstufung steht in Übereinstimmung mit der Empfehlung von International Institute of Welding (IIW) [28].

5.4.3 | Gelegentliches Zusammenwirken mehrerer Krane

Falls keine genaueren Informationen vorhanden sind, dürfen nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 9.4.2(5)] die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten aus zwei oder mehr zeitweise zusammenwirkenden Kranen mit Hilfe des Schadensäquivalenzfaktors λ_{dup} bestimmt werden. Der Nationale Anhang empfiehlt für λ_{dup} die Werte für λ_i aus DIN EN 1991-3 [12, Tabelle 2.12] für die Beanspruchungsgruppe S_i wie folgt zu verwenden:

- bei 2 Kranen: 2 Beanspruchungsgruppen unter der Beanspruchungsgruppe des Krans mit der niedrigsten Beanspruchungsklasse.
- bei 3 oder mehr Kranen: 3 Beanspruchungsgruppen unter der Beanspruchungsgruppe des Krans mit der niedrigsten Beanspruchungsklasse.

Hierbei handelt es sich um eine Empfehlung, deren Richtigkeit im Einzelfall zu überprüfen ist. Die Annahmen hinter der Empfehlung werden im Folgenden zusammengefasst:

Mit der Rückstufung um 2 Beanspruchungsklassen unter die Beanspruchungsgruppe des Einzelkrans mit der niedrigsten Beanspruchungsklasse wird für das Teilkollektiv aus dem Zusammenwirken der Krane ein Kollektivumfang von 25% der Schwingspielzahl des o.g. Einzelkrankollektivs angenommen. Das heißt, das ungünstige Zusammenwirken der Krane tritt bei jedem viertem Arbeitsspiel auf.

Mit der Rückstufung um 3 Beanspruchungsklassen unter die Beanspruchungsgruppe des Einzelkrans mit der niedrigsten Beanspruchungsklasse wird für das Teilkollektiv aus dem Zusammenwirken der Krane ein Kollektivumfang von 12,5% der Schwingspielzahl des o.g. Einzelkrankollektivs angenommen. Das heißt, das ungünstige Zusammenwirken der Krane tritt bei jedem achten Arbeitsspiel auf.

5.4.4 | Schienenschweißnähte

Auf Grundlage von Ermüdungsversuchen wird in [24] eine Vorgehensweise für den Ermüdungsnachweis von durchgehenden Schienenschweißnähten zur Schienenbefestigung vorgeschlagen. Dieser Vorschlag wird in einem Berechnungsbeispiel in Abs. 7 angewendet.

6 | Berechnungsbeispiel 1

6.1 | Beschreibung und statisches System

Es werden die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit und die Ermüdungsnachweise für einen Kranbahnträger geführt, der durch zwei Krane mit einer Tragfähigkeit von jeweils 100 t befahren wird, Bild 6.1. Der Kranbahnträger wird als Einfeldträger mit einer Spannweite von $L = 12,5$ m ausgeführt und verfügt über einen fachwerkartigen Horizontalträger. Die beiden Krane sind in Hubklasse HC 2 und Beanspruchungsklasse S4 eingestuft. Diese Einstufung wird für die Kranbahn übernommen. Es wird von einer Nutzungsdauer von 25 Jahren ausgegangen. Es sind drei Inspektionsintervalle geplant.

Die beiden Krane arbeiten nach Angabe des Bauherrn bei jedem zweiten Arbeitsspiel zum Heben schwerer Lasten zusammen (Tandembetrieb). Sie werden daher bei der Bemessung wie ein Kran behandelt.

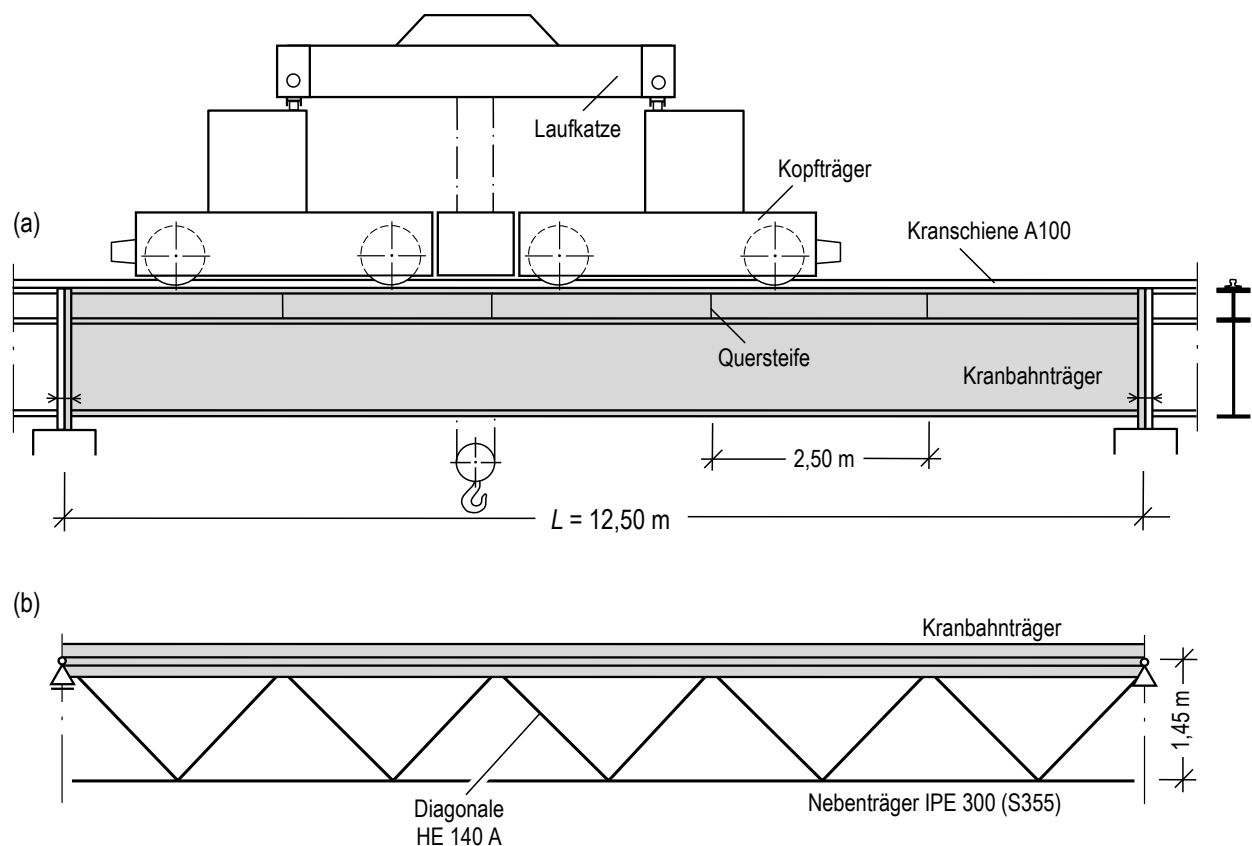


Bild 6.1: Statisches System: (a) Kranbahnträger mit einem Kran (Seitenansicht und Querschnitt), (b) Horizontalträger (Draufsicht)

6. Berechnungsbeispiel 1

6.2 | Querschnitt

Bild 6.2 zeigt den Querschnitt des Kranbahnträgers. Die Radlasteinleitung erfolgt über eine aufgeklemmte Kranschiene A100 mit durchgeschraubten Klemmplatten. Der Obergurt des Kranbahnträgers wird durch ein HD-Profil gebildet. Der Horizontalträger bindet am Steg des HD-Profiles über Knotenbleche an.

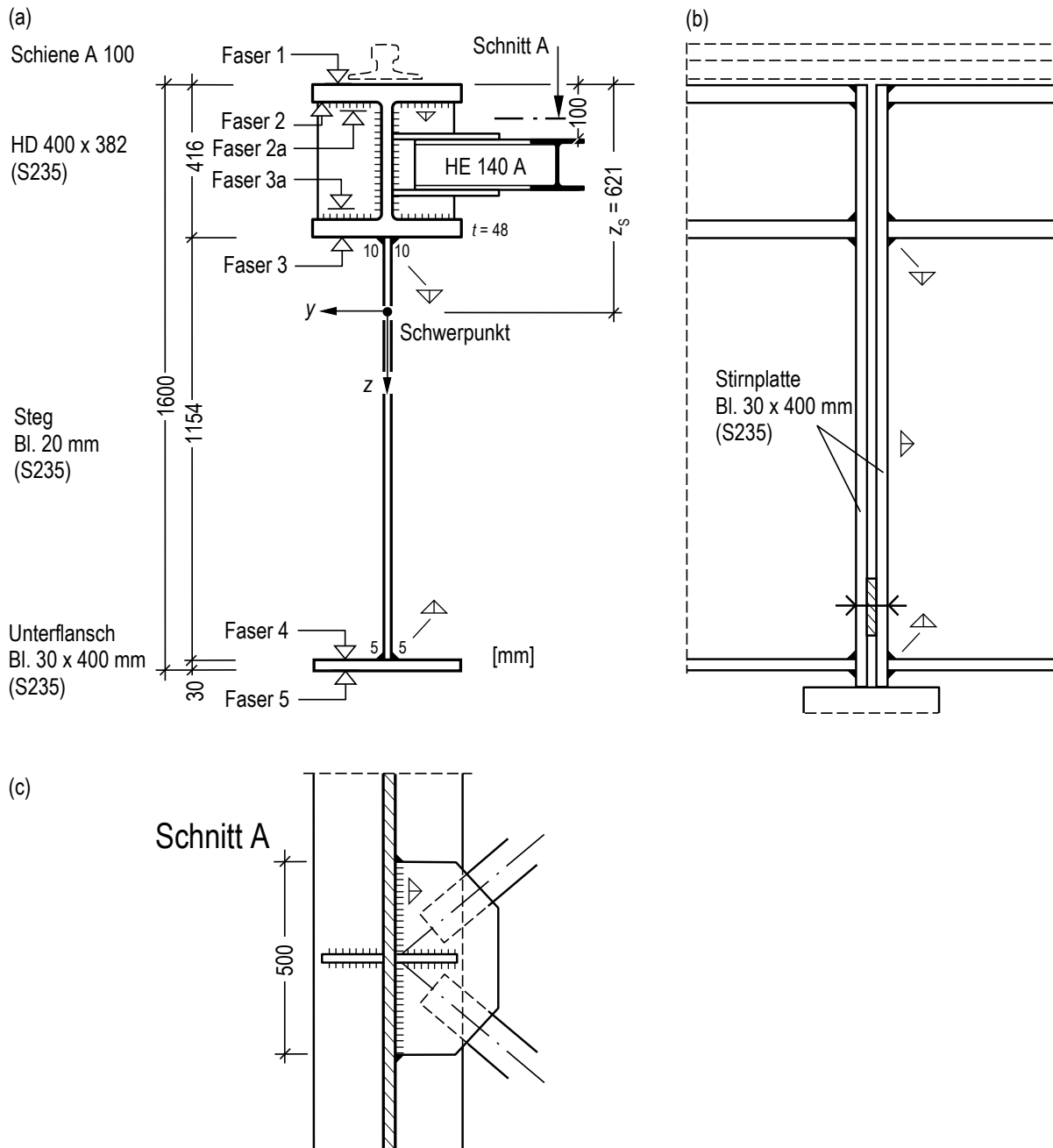


Bild 6.2: Querschnitt und Auflagerdetail des Kranbahnträgers: (a) Querschnitt, (b) Längsansicht am Auflager, (c) Schnitt A, Knotenblechanschluss

Querschnittswerte des Kranbahnträgers:

$$A = 838 \text{ cm}^2$$

$$z_s = 62,1 \text{ cm (Schwerpunktentfernung von Oberkante HD-Profil)}$$

$$I_y = 2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4$$

6. Berechnungsbeispiel 1

Widerstandsmomente und statische Momente ausgewählter Querschnittsfasern:

Oberkante HD-Oberflansch:	$W_{y,1} = -42\,848 \text{ cm}^3$	
Unterkante HD-Oberflansch:	$W_{y,2} = -46\,475 \text{ cm}^3$	
Walzradiusbeginn HD-Oberflansch:	$W_{y,2a} = -47\,724 \text{ cm}^3$	$S_{y,2a} \approx 11\,435 \text{ cm}^3$
Walzradiusbeginn HD-Unterflansch:	$W_{y,3a} = -99\,366 \text{ cm}^3$	$S_{y,3a} \approx 15\,751 \text{ cm}^3$
Oberkante Stegblech:	$W_{y,3} = -129\,902 \text{ cm}^3$	$S_{y,3} = 20\,085 \text{ cm}^3$
Schwerpunkt:		$S_{y,\max} = 20\,560 \text{ cm}^3$
Oberkante Unterflansch:	$W_{y,4} = 28\,061 \text{ cm}^3$	$S_{y,4} = 11\,419 \text{ cm}^3$
Unterkante Unterflansch:	$W_{y,5} = 27\,212 \text{ cm}^3$	

Querschnittswerte des Obergurts (HD-Profil):

$$A_{OG} = 487 \text{ cm}^2$$

$$W_{z,OG} = 2\,641 \text{ cm}^3 \text{ (Flanschseite)}$$

Querschnittswerte des Oberflanschs des HD-Profiles:

$$W_{z,fo} = 2\,641 / 2 = 1\,320 \text{ cm}^3 \text{ (Flanschseite)}$$

Querschnittswerte des Unterflanschs:

$$i_{z,fu} = 0,289 \cdot 40 \text{ cm} = 11,56 \text{ cm}$$

6.3 | Werkstoffe

Obergurt (HD-Profil, Flansche $t_f > 40 \text{ mm}$):	$f_y = 215 \text{ N/mm}^2$
Stegblech ($t_w < 40 \text{ mm}$), Unterflansch ($t_f < 40 \text{ mm}$):	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

6.4 | Lastannahmen

6.4.1 | Ständige Einwirkungen

Die ständigen Einwirkungen setzen sich aus dem Eigengewicht von Kranbahnträger und Schiene ($g = 0,73 \text{ kN/m}$) sowie einem Anteil aus dem Horizontalträgers zusammen. Außerdem sollte ein Zuschlag für Kleinteile (Steifen etc.), Laufstege und Stromleitungen berücksichtigt werden, der hier pauschal mit 230 kg/m angenommen wird.

Träger = $A \cdot 78,5 \text{ kN/m}^3$	= 6,60 kN/m
Schiene	= 0,73 kN/m
Kleinteile, Horizontalverband, Laufstege, Stromleitungen (pauschal)	= 2,30 kN/m
	<hr/>
	$g_{KBT} \approx 9,70 \text{ kN/m}$

6.4.2 | Einzelkran

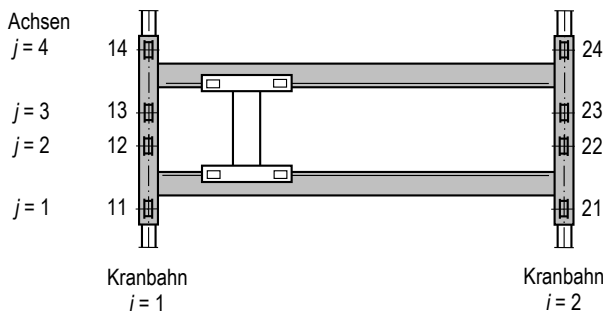
Die dynamischen Vergrößerungsfaktoren des Einzelkrans nach DIN EN 1991-3 betragen nach Angabe des Kranlieferanten:

$$\varphi_1 = 1,1 \quad \varphi_2 = 1,12 \quad \varphi_4 = 1,0 \quad \varphi_5 = 1,5 \quad \varphi_7 = 1,5$$

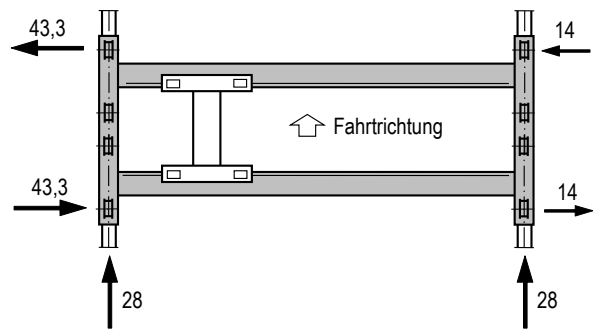
Die Kennzeichnung der Laufräder des Krans in Abhängigkeit von der Kranbahn und der Kranachse ist in Bild 6.3a dargestellt. Die Seitenkräfte aus Kranbetrieb sind den Bildern 6.3b und c zu entnehmen.

6. Berechnungsbeispiel 1

(a) Kennzeichnung der Laufräder



(b) Massenkräfte $H_{T,j}$ und $H_{L,j}$ in [kN]



(c) Schräglaufkräfte $H_{S,i,j,T}$ in [kN]

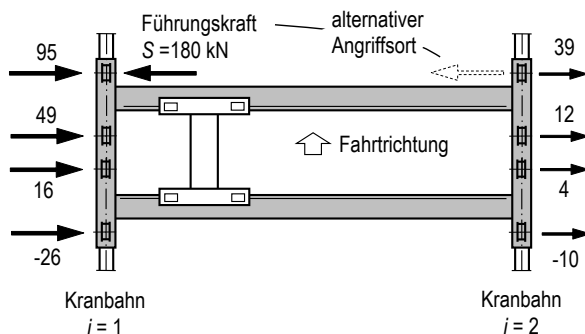


Bild 6.3: Kraneinwirkungen (ohne dynamische Vergrößerungsfaktoren): (a) Kennzeichnung der Laufräder des Krans, (b) Massenkräfte aus Kranfahren bei Laufkatze im Anfahrmaß von Kranbahn 1, (c) Schräglaufkräfte bei Laufkatze im Anfahrmaß von Kranbahn 1

Die Radlasten (ohne dynamische Vergrößerungsfaktoren) nach Angaben des Kranlieferanten sind im Folgenden zusammengestellt:

a) Radlasten aus Kraneigengewicht

	$Q_{r,11,max}^c = 190 \text{ kN}$	$Q_{r,21,min}^c = 155 \text{ kN}$
Laufkatze in Anfahrmaß von Kranbahn 1	$Q_{r,12,max}^c = 135 \text{ kN}$	$Q_{r,22,min}^c = 80 \text{ kN}$
	$Q_{r,13,max}^c = 140 \text{ kN}$	$Q_{r,23,min}^c = 85 \text{ kN}$
	$Q_{r,14,max}^c = 90 \text{ kN}$	$Q_{r,24,min}^c = 135 \text{ kN}$

	$Q_{r,11,min}^c = 150 \text{ kN}$	$Q_{r,21,max}^c = 195 \text{ kN}$
Laufkatze in Anfahrmaß von Kranbahn 2	$Q_{r,12,min}^c = 80 \text{ kN}$	$Q_{r,22,max}^c = 135 \text{ kN}$
	$Q_{r,13,min}^c = 85 \text{ kN}$	$Q_{r,23,max}^c = 140 \text{ kN}$
	$Q_{r,14,min}^c = 135 \text{ kN}$	$Q_{r,24,max}^c = 175 \text{ kN}$

b) Radlasten aus Hublast

	$Q_{r,11,max}^h = 215 \text{ kN}$	$Q_{r,21,min}^h = 10 \text{ kN}$
Laufkatze in Anfahrmaß von Kranbahn 1	$Q_{r,12,max}^h = 255 \text{ kN}$	$Q_{r,22,min}^h = 15 \text{ kN}$
	$Q_{r,13,max}^h = 255 \text{ kN}$	$Q_{r,23,min}^h = 15 \text{ kN}$
	$Q_{r,14,max}^h = 295 \text{ kN}$	$Q_{r,24,min}^h = 10 \text{ kN}$

	$Q_{r,11,min}^h = 10 \text{ kN}$	$Q_{r,21,max}^h = 210 \text{ kN}$
Laufkatze in Anfahrmaß von Kranbahn 2	$Q_{r,12,min}^h = 15 \text{ kN}$	$Q_{r,22,max}^h = 255 \text{ kN}$
	$Q_{r,13,min}^h = 15 \text{ kN}$	$Q_{r,23,max}^h = 255 \text{ kN}$
	$Q_{r,14,min}^h = 10 \text{ kN}$	$Q_{r,24,max}^h = 210 \text{ kN}$

6. Berechnungsbeispiel 1

6.4.3 | Annahmen zum Tandembetrieb

a) Radlasten

Bei Tandembetrieb können sich die beiden Krane aufgrund elektronischer Steuerung nur auf 1,90 m (Achsabstand) einander nähern, Bild 6.4a. Die zugehörige Anordnung der Radlasten ist in Bild 6.4b dargestellt.

b) Massenkkräfte

Bei Tandembetrieb wird davon ausgegangen, dass sich beide Krane nach Aufnahme der Hublast in dieselbe Richtung bewegen. Die Massenkkräfte infolge Beschleunigen und Bremsen beider Krane werden nach Bild 6.4c angesetzt. Das beschleunigte Aufeinanderzufahren der beladenen Krane im Tandembetrieb wird ausgeschlossen. Zusätzlich wird der Einzelkranbetrieb untersucht, bei dem beide Krane nah beieinander arbeiten und sich ein Kran vom anderen fortbewegt. In diesem Fall werden nur die Massenkkräfte eines Krans angesetzt.

c) Seitenkräfte aus Schräglauf

Bei Tandembetrieb wird davon ausgegangen, dass sich beide Krane nach Aufnahme der Hublast in dieselbe Richtung bewegen. Die Seitenkräfte von beiden Krane werden angesetzt. Für die Kranbahnen 1 und 2 werden die Belastungen in den Bildern 6.4d und e maßgebend. Hierbei wird

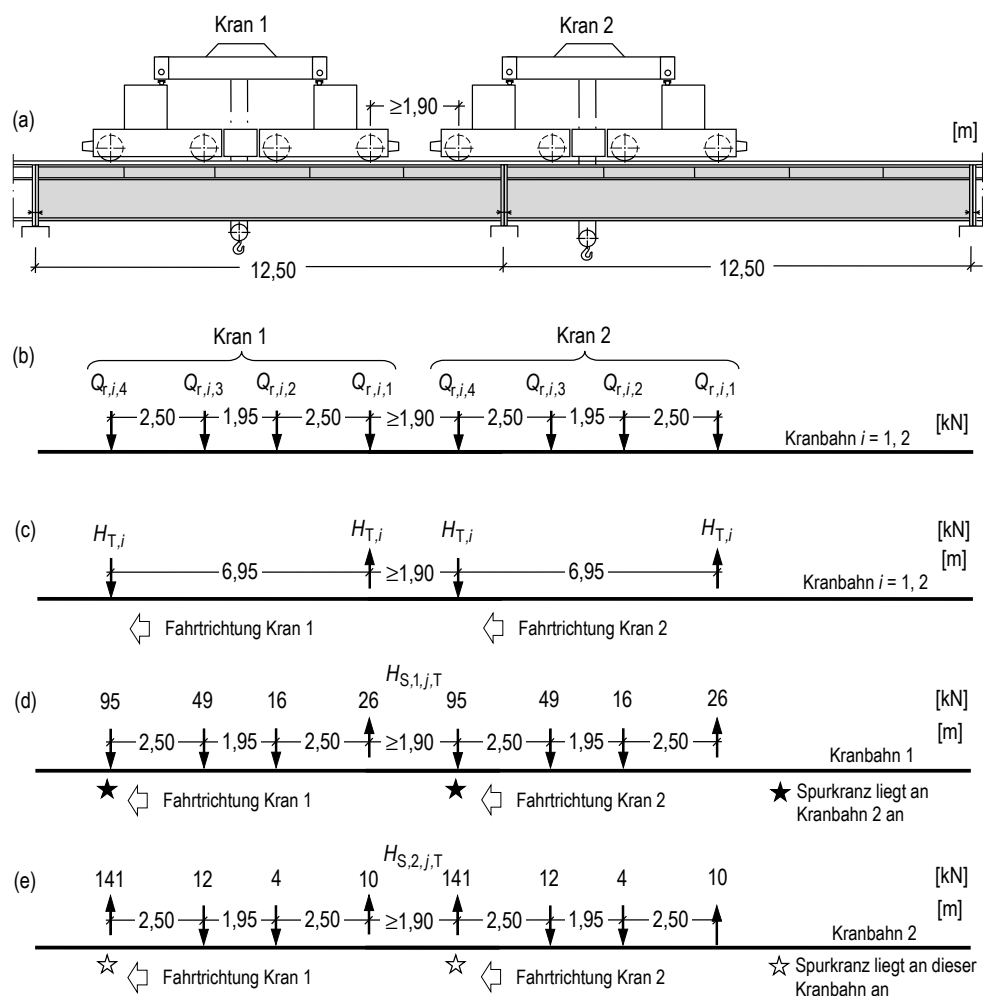


Bild 6.4: Charakteristische Lastenzüge (ohne dynamische Vergrößerungsfaktoren) aus Tandembetrieb auf Kranbahn 1: (a) Prinzipskizze, (b) Radlasten, (c) Massenkkräfte; Schräglaufrkräfte von (d) Kranbahn 1 und (e) Kranbahn 2

6. Berechnungsbeispiel 1

davon ausgegangen, dass der Kran an der Schiene der minder belasteten Kranbahn 2 anfährt und die Führungskraft S aus Schräglauf daher an dieser Kranbahn angreift.

Das Aufeinanderzufahren der beladenen Krane im Tandembetrieb wird ausgeschlossen. Zusätzlich wird der Einzelkranbetrieb untersucht, bei dem beide Krane nah beieinander arbeiten und sich ein Kran vom anderen fortbewegt. In diesem Fall werden nur die Seitenkräfte eines Krans angesetzt.

6.4.4 | Stabilisierungskräfte

Bei der Ermittlung der Stabkräfte im Horizontalträger sind die Imperfektionen (horizontale Vorkrümmung mit Stich $w_0 = L/500$) des Kranbahnträgers nach DIN EN 1993-1-1, Abs. 5.3.3 zu berücksichtigen.

$$S_{y,OG} = A_{OG} \cdot (z_s - h_{OG} / 2) = 487 \text{ cm}^2 \cdot (62,1 \text{ cm} - 41,6 \text{ cm}/2) = 20\,113 \text{ cm}^3$$

$$N_{OG} = \frac{M_{y,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y} = M_{y,d} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

$$q_{stab} = N_{OG} \cdot 8 \cdot \frac{w_0}{L_2} \quad \text{vgl. DIN EN 1993-1-1, Gl. (5.13)}$$

6.5 | Lastgruppenbildung

In Tab. 6.1 werden die Kraneinwirkungen unter Berücksichtigung der dynamischen Vergrößerungsfaktoren zu Lastgruppen nach DIN EN 1991-3 [12] zusammengefasst, die in der Kombination mit anderen Einwirkungen als eine charakteristische Einwirkung zu betrachten sind.

Tab. 6.1: Lastgruppenbildung (charakteristische Werte einschließlich dynamische Vergrößerungsfaktoren)

Lastgruppe (LG)		1	5	9	101	102	103	Ermüdung	
Dynamische Vergrößerungsfaktoren		$\varphi_1 = 1,1$ $\varphi_2 = 1,12$ $\varphi_5 = 1,5$	$\varphi_4 = 1,0$	$\varphi_7 = 1,5$	—	—	—	$\varphi_{fat,1} = 1,05$ $\varphi_{fat,2} = 1,1$	
Vertikal	Beladener Kran (Laufkatze in Anfahrmaß von Kranbahn 1)	$Q_{r,11,max}$	450	405	405	405	405	405	427
		$Q_{r,12,max}$	434	390	390	390	390	390	412
		$Q_{r,13,max}$	440	395	395	395	395	395	417
		$Q_{r,14,max}$	430	385	385	385	385	385	407
		$Q_{r,21,min}$	182	165	165	165	165	165	174
		$Q_{r,22,min}$	105	95	95	95	95	95	100
		$Q_{r,23,min}$	110	100	100	100	100	100	105
		$Q_{r,24,min}$	160	145	145	145	145	145	152
Horizontal	Massenkräfte	$H_{L,1}, H_{L,2}$	42	—	—	—	—	28	—
		$H_{T,1}$	65	—	—	—	—	43,33	—
		$H_{T,2}$	21	—	—	—	—	14	—
	Schräglaufräfte bei beladenem Kran (Führungskraft S greift an Kranbahn 2 an)	S	—	180	—	—	-180	—	—
		$H_{S,1,1,T}$	—	-26	—	—	-26	—	—
		$H_{S,1,2,T}$	—	16	—	—	16	—	—
		$H_{S,1,3,T}$	—	49	—	—	49	—	—
		$H_{S,1,4,T}$	—	95	—	—	95	—	—
		$H_{S,2,1,T}$	—	-10	—	—	-10	—	—
		$H_{S,2,2,T}$	—	4	—	—	4	—	—
Pufferkraft	$H_{S,2,3,T}$	—	12	—	—	12	—	—	
	$H_{S,2,4,T}$	—	-141	—	—	-141	—	—	
	H_B	—	—	75	—	—	—	—	

6. Berechnungsbeispiel 1

6.6 | Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.6.1 | Einwirkungskombination 1: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot \text{Lastgruppe 1}$

6.6.1.1 | Schnittgrößen

In Bild 6.5 sind die einzelnen Lastfälle dieser Einwirkungskombination zusammengestellt. Es werden die maximalen Schnittgrößen kombiniert, auch wenn sie nicht an derselben Tragwerksstelle unter derselben Kranstellung hervorgerufen werden.

– Globale Biegung des Kranbahnträgers um starke Achse, Bilder 6.5a und b:

$$M_{y,d} = 1,35 \cdot 190 + 1,35 \cdot 4000 \approx 5660 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.5c:

$$N_{OG,d} = 1,35 \cdot 139 \text{ kN} = 188 \text{ kN}$$

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.5d:

$$M_{z,fo,d} = 1,35 \cdot 41 \text{ kNm} = 55 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse infolge Stabilisierung, Bild 6.5e: Druckkraft im Obergurt des Kranbahnträgers, vgl. Abs.6.4.4:

$$N_d = M_{y,d} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 566000 \text{ kNcm} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 4275 \text{ kN}$$

$$q_{\text{stab}} = N_d \cdot 8 \cdot \frac{w_0}{L^2} = 4042 \text{ kN} \cdot 8 \cdot \frac{12,5 \text{ m}/500}{(12,5 \text{ m})^2} = 5,47 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = q_{\text{stab}} \cdot L^2/8 = 107 \text{ kNm}$$

$$N_{OG,d} = \frac{M_{z,d}}{h} = \frac{107 \text{ kNm}}{1,45 \text{ m}} = 74 \text{ kN}$$

– Normalkraft im Obergurt aus Antriebskraft, Bild 6.3b:

$$N_{OG,d} = 1,35 \cdot \varphi_5 \cdot H_{L,1} = 1,35 \cdot 1,5 \cdot 28 = 57 \text{ kN (konservativerweise nur Obergurt zugewiesen)}$$

– Lokale Spannungen aus Radlasteinleitung

Die lokalen Druckspannungen aus Radlasteinleitung werden unter Berücksichtigung der elastischen Schienenunterlage und von 25% Schienenkopfabnutzung ermittelt. Die lokale Druckspannung im Steg des HD-Profiles an der Unterseite des Oberflanschs beträgt:

$$h_r = 85 \text{ mm (abgenutzte Schiene A 100)}$$

$$b_{\text{eff}} = h_r + b_{fr} + t_f = 85 + 200 + 48 = 333 \text{ mm} < b_f = 406 \text{ mm}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

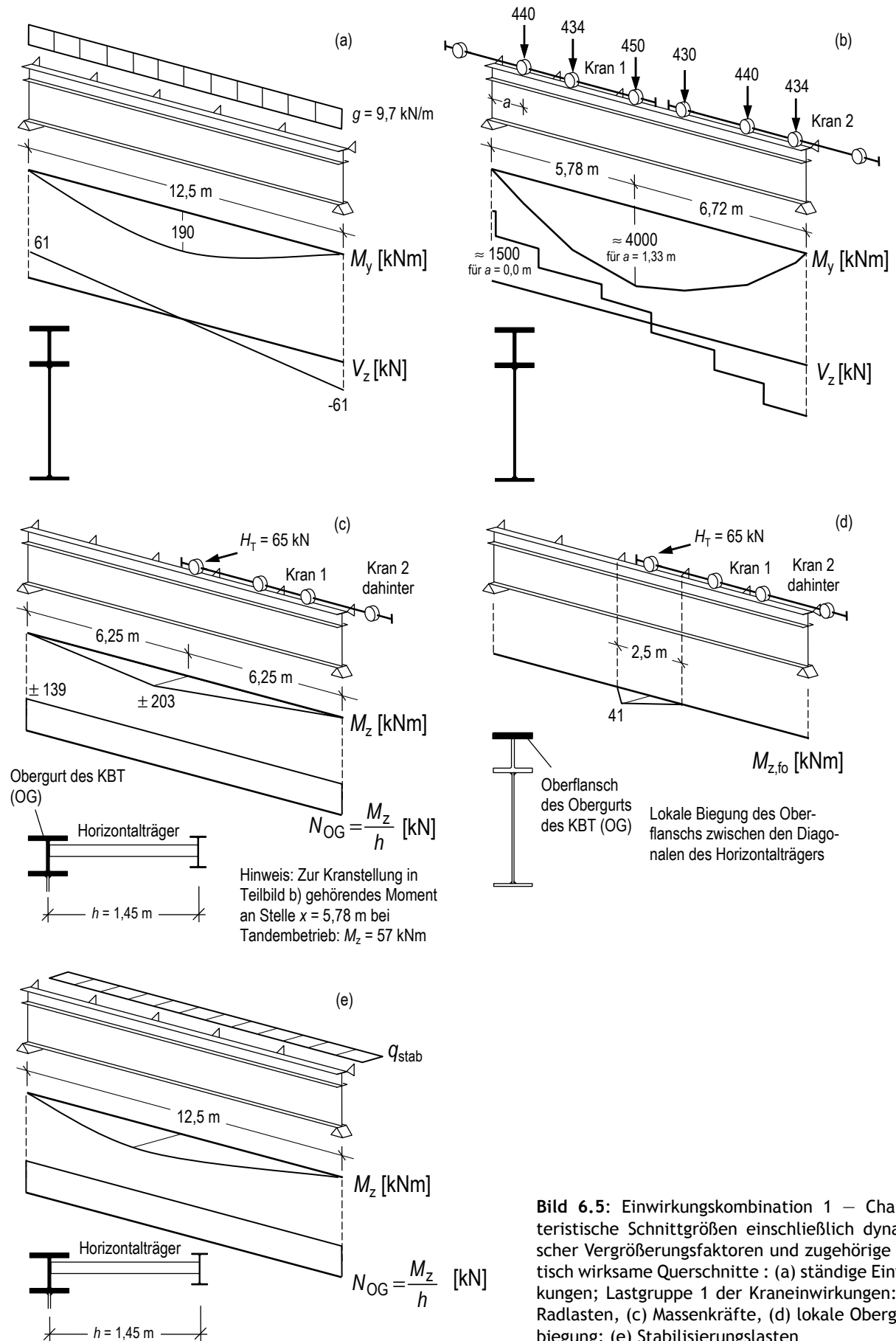


Bild 6.5: Einwirkungskombination 1 – Charakteristische Schnittgrößen einschließlich dynamischer Vergrößerungsfaktoren und zugehörige statisch wirksame Querschnitte : (a) ständige Einwirkungen; Lastgruppe 1 der Kraneinwirkungen: (b) Radlasten, (c) Massenkräfte, (d) lokale Obergurtbiegung; (e) Stabilisierungslasten

6. Berechnungsbeispiel 1

$$I_f = 33,3 \text{ cm} \cdot (4,8 \text{ cm})^3 / 12 = 307 \text{ cm}^4$$

$$I_r = 629 \text{ cm}^4 \quad \text{vgl. [31]}$$

$$I_{rf} = 374 + 629 = 936 \text{ cm}^4$$

$$l_{\text{eff}} = 4,25 \sqrt[3]{I_{rf} / t_w} \quad (\text{vgl. DIN EN 1993-6 [19, Tab. 5.1]})$$

$$= 4,25 \sqrt[3]{936 \text{ cm}^4 / 2,98 \text{ cm}}$$

$$= 28,9 \text{ cm}$$

Die lokale Druckspannung im Steg ($t_w = 29,8 \text{ mm}$) des HD-Profiles am Ende des Walzradius:

$$l_{\text{eff}} = 28,9 \text{ cm} + 2 \cdot r = 28,9 \text{ cm} + 2 \cdot 1,5 \text{ cm} = 31,9 \text{ cm}$$

$$F_{z,d} = 1,35 \cdot 450 \text{ kN} = 607,5 \text{ kN}$$

$$\sigma_{oz} = F_{z,d} / (l_{\text{eff}} \cdot t_w) = 607,5 \text{ kN} / (31,9 \text{ cm} \cdot 2,98 \text{ cm}) = 6,4 \text{ kN/cm}^2$$

Die lokale Druckspannung im Stegblech ($t_w = 20 \text{ mm}$) an der Unterseite des Unterflanschs des HD-Profiles beträgt:

$$l_{\text{eff}} = 28,9 \text{ cm} + 2 \cdot (41,6 - 4,8 \text{ cm}) = 102,5 \text{ cm}$$

$$\sigma_{oz} = F_{z,d} / (l_{\text{eff}} \cdot t_w) = 607,5 \text{ kN} / (102,5 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm}) = 3,0 \text{ kN/cm}^2$$

– Maximale Querkraft am Auflager, Bild 6.5b:

$$V_{z,d} = 1,35 \cdot 61 + 1,35 \cdot 1500 \approx 2110 \text{ kN}$$

6.6.1.2 | Vorbemerkung zu Querschnittsnachweisen

Die Querschnittsnachweise werden elastisch geführt. Die Schubspannungen im Steg des HD-Profiles bzw. im Stegblech werden wie folgt ermittelt:

$$\tau_{xz,d} = V_{z,d} \cdot S_y / (I_y \cdot t)$$

Das Ergebnis der Spannungsermittlung ist Bild 6.6 zu entnehmen.

6.6.1.3 | Spannungsnachweise

– Faser 1: Normalspannungsnachweis für Flanschke des HD-Profiles

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,1}} + \frac{M_{z,fo,d}}{W_{z,fo}} + \frac{N_{OG,d}}{A_{OG}} = \frac{566\,000 \text{ kNcm}}{42\,849 \text{ cm}^3} + \frac{5\,500 \text{ kNcm}}{1\,320 \text{ cm}^3} + \frac{188 + 74 + 57 \text{ kN}}{487 \text{ cm}^2}$$

$$= 13,2 + 4,2 + 0,7$$

$$= 18,1 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 21,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)$$

6. Berechnungsbeispiel 1

– Faser 2a: Vergleichsspannungsnachweis im Steg des HD-Profiles, vgl. Bild 6.6:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,2a}} = \frac{566\,000 \text{ kNcm}}{-47\,724 \text{ cm}^3} = -11,9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{oz,d} = -6,4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} \approx 3,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma_{v,d} &= \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{oz,d}^2 - \sigma_{x,d} \cdot \sigma_{oz,d} + 3\tau_{xz,d}^2} = \sqrt{(-11,9)^2 + (-6,4)^2 - (-11,9) \cdot (-6,4) + 3 \cdot (3,0)^2} \\ &= 11,6 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 21,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)\end{aligned}$$

– Faser 3a: Schubspannungsnachweis im Steg des HD-Profiles, vgl. Bild 6.6:

$$\tau_{xz,d} = 4,2 \text{ kN/cm}^2 < f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = 12,4 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)$$

– Faser 3 wird für das Grundmaterial aufgrund geringer Spannungen nicht maßgebend, vgl. Bild 6.6. Auf einen Nachweis der Schweißnähte, die durch quergerichtete Druckspannungen und Schubspannungen beansprucht werden, wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit verzichtet. Siehe Ermüdungsnachweis in Abs. 6.8.6.

– Schwerpunkt des Querschnitts: Schubspannungsnachweis

$$\tau_{xz,d} = 8,2 \text{ kN/cm}^2 < f_y / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = 13,6 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)$$

– Faser 4: Vergleichsspannungsnachweis für Grundmaterial, vgl. Bild 6.6:

$$\sigma_{x,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,4}} = \frac{566\,000 \text{ kNcm}}{28\,061 \text{ cm}^3} = +20,2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{xz,d} = 4,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma_{v,d} &= \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + 3\tau_{xz,d}^2} = \sqrt{(+20,2)^2 + 3 \cdot (4,5)^2} \\ &= 21,6 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 23,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)\end{aligned}$$

– Faser 4: Schubspannungsnachweis für Schweißnähte (Doppelkehlnaht $a = 5 \text{ mm}$) mit vereinfachtem Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 [17, Abs. 4.5.3.3(3)]

Korrelationsbeiwert nach DIN EN 1993-1-8 [17, Tab. 4.1]: $\beta_w = 0,8$

Teilsicherheitsbeiwert nach DIN EN 1993-6 [20]: $\gamma_{M2} = 1,25$

Zugfestigkeit des Grundmaterials S 235 nach DIN EN 1993-1-1: $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

$$\begin{aligned}\tau_{w,d} &= 4,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{20 \text{ mm}}{2 \cdot 5 \text{ mm}} = 9,0 \text{ kN/cm}^2 \\ &< f_{w,d} = f_u / (\beta_w \cdot \gamma_{M2} \sqrt{3}) = 20,8 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)\end{aligned}$$

– Faser 5: Normalspannungsnachweis für Flanschke des Unterflanschs

$$\begin{aligned}\sigma_{x,d} &= \frac{M_{y,d}}{W_{y,5}} = \frac{566\,000 \text{ kNcm}}{27\,212 \text{ cm}^3} \\ &= 20,8 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 23,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark)\end{aligned}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

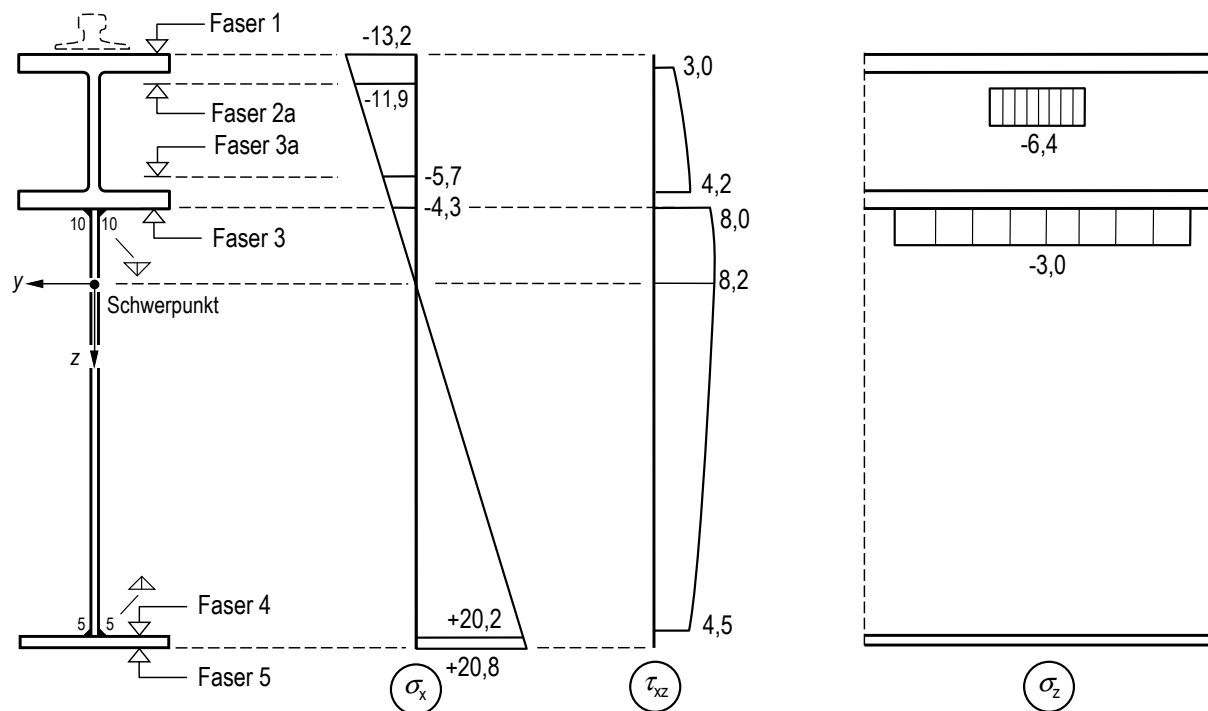


Bild 6.6: Spannungsverteilung (Bemessungswerte) in $[\text{kN/cm}^2]$ infolge der Vertikallasten (ständige Einwirkungen und Radlasten) aus Einwirkungskombination 1

6.6.2 | Einwirkungskombination 2: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot \text{Lastgruppe 5}$ (maximale Radlasten)

6.6.2.1 | Schnittgrößen

Im Gegensatz zur Einwirkungskombination 1 tritt größere Seitenbiegung bei geringerer vertikaler Trägerbiegung auf. Bei den Querschnittsnachweisen wird daher nur der Nachweis für die Flanschseite der Faser 1 erneut geführt. Es werden für diesen Nachweis die erforderlichen Schnittgrößen ermittelt.

– Globale Biegung des Kranbahnträgers um starke Achse, Bilder 6.7a und b:

$$M_{y,d} = 1,35 \cdot 190 + 1,35 \cdot 3\,577 \approx 5\,086 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.7c:

$$N_{OG,d} = 1,35 \cdot 281 \text{ kN} = 380 \text{ kN}$$

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.7d:

$$M_{z,fo,d} = 1,35 \cdot 60 \text{ kNm} = 81 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse infolge Stabilisierung, Bild 6.7e:

Druckkraft im Obergurt des Kranbahnträgers, vgl. Abs. 6.4.4:

6. Berechnungsbeispiel 1

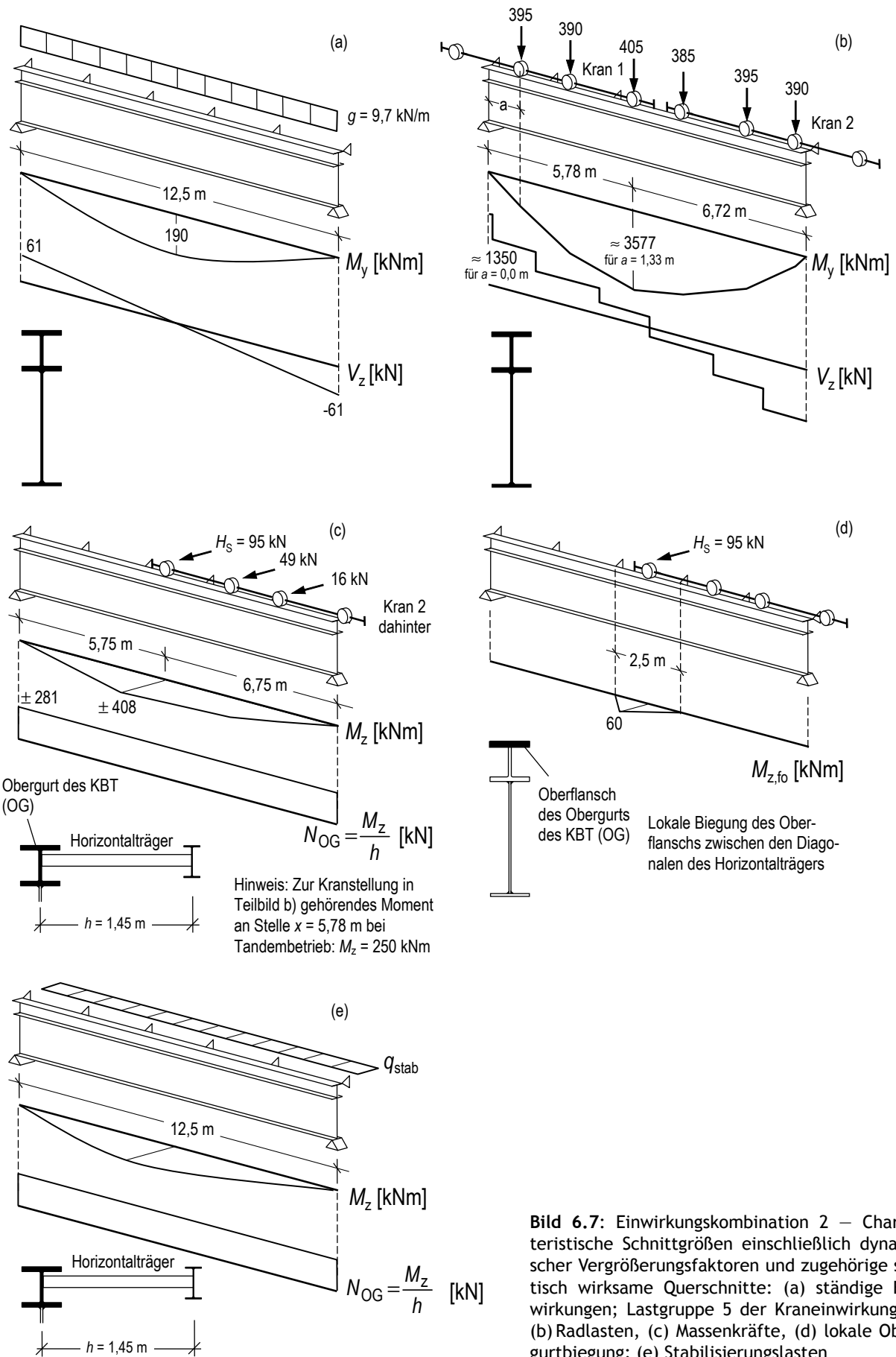


Bild 6.7: Einwirkungskombination 2 – Charakteristische Schnittgrößen einschließlich dynamischer Vergrößerungsfaktoren und zugehörige statisch wirksame Querschnitte: (a) ständige Einwirkungen; Lastgruppe 5 der Kraneinwirkungen; (b) Radlasten, (c) Massenkraften, (d) lokale Obergurtbiegung; (e) Stabilisierungslasten

6. Berechnungsbeispiel 1

$$N_d = M_{y,d} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 508\,600 \text{ kNcm} \cdot 7,141 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 3\,842 \text{ kN}$$

$$q_{\text{stab}} = N_d \cdot 8 \cdot \frac{w_0}{L^2} = 3\,842 \text{ kN} \cdot 8 \cdot \frac{12,5 \text{ m}/500}{(12,5 \text{ m})^2} = 4,92 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = q_{\text{stab}} \cdot L^2/8 = 96 \text{ kNm}$$

$$N_{\text{OG},d} = \frac{M_{z,d}}{h} = \frac{96 \text{ kNm}}{1,45 \text{ m}} = 66 \text{ kN}$$

6.6.2.2 | Spannungsnachweis

– Faser 1: Normalspannungsnachweis für Flanschseite des HD-Profiles

$$\begin{aligned} \sigma_{x,d} &= \frac{M_{y,d}}{W_{y,1}} + \frac{M_{z,fo,d}}{W_{z,fo}} + \frac{N_{\text{OG},d}}{A_{\text{OG}}} = \frac{508\,600 \text{ kNcm}}{42\,849 \text{ cm}^3} + \frac{8\,100 \text{ kNcm}}{1\,320 \text{ cm}^3} + \frac{380 + 66 \text{ kN}}{487 \text{ cm}^2} \\ &= 11,9 + 6,2 + 0,9 \\ &= 19,0 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 21,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark) \end{aligned}$$

6.6.3 | Einwirkungskombination 3: 1,35 · g + 1,35 · Lastgruppe 5 (minimale Radlasten)

6.6.3.1 | Schnittgrößen

In dieser Einwirkungskombination tritt die größte Seitenbiegung auf. Da im Vergleich zu den anderen Einwirkungskombinationen die vertikale Trägerbiegung geringer ist, wird nur der Querschnittsnachweis für die Flanschseite der Faser 1 geführt. Es werden für diesen Nachweis die erforderlichen Schnittgrößen ermittelt.

– Globale Biegung des Kranbahnträgers um starke Achse, Bilder 6.8a und b:

$$M_{y,d} = 1,35 \cdot 190 + 1,35 \cdot 1\,183 \approx 1\,860 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.8c:

$$N_{\text{OG},d} = 1,35 \cdot 299 \text{ kN} = 404 \text{ kN}$$

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, Bild 6.8d:

$$M_{z,fo,d} = 1,35 \cdot 88 \text{ kNm} = 119 \text{ kNm}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse infolge Stabilisierung, Bild 6.8e:

Druckkraft im Obergurt des Kranbahnträgers, vgl. Abs. 6.4.4:

$$N_d = M_{y,d} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 186\,000 \text{ kNcm} \cdot 7,141 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 1\,405 \text{ kN}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

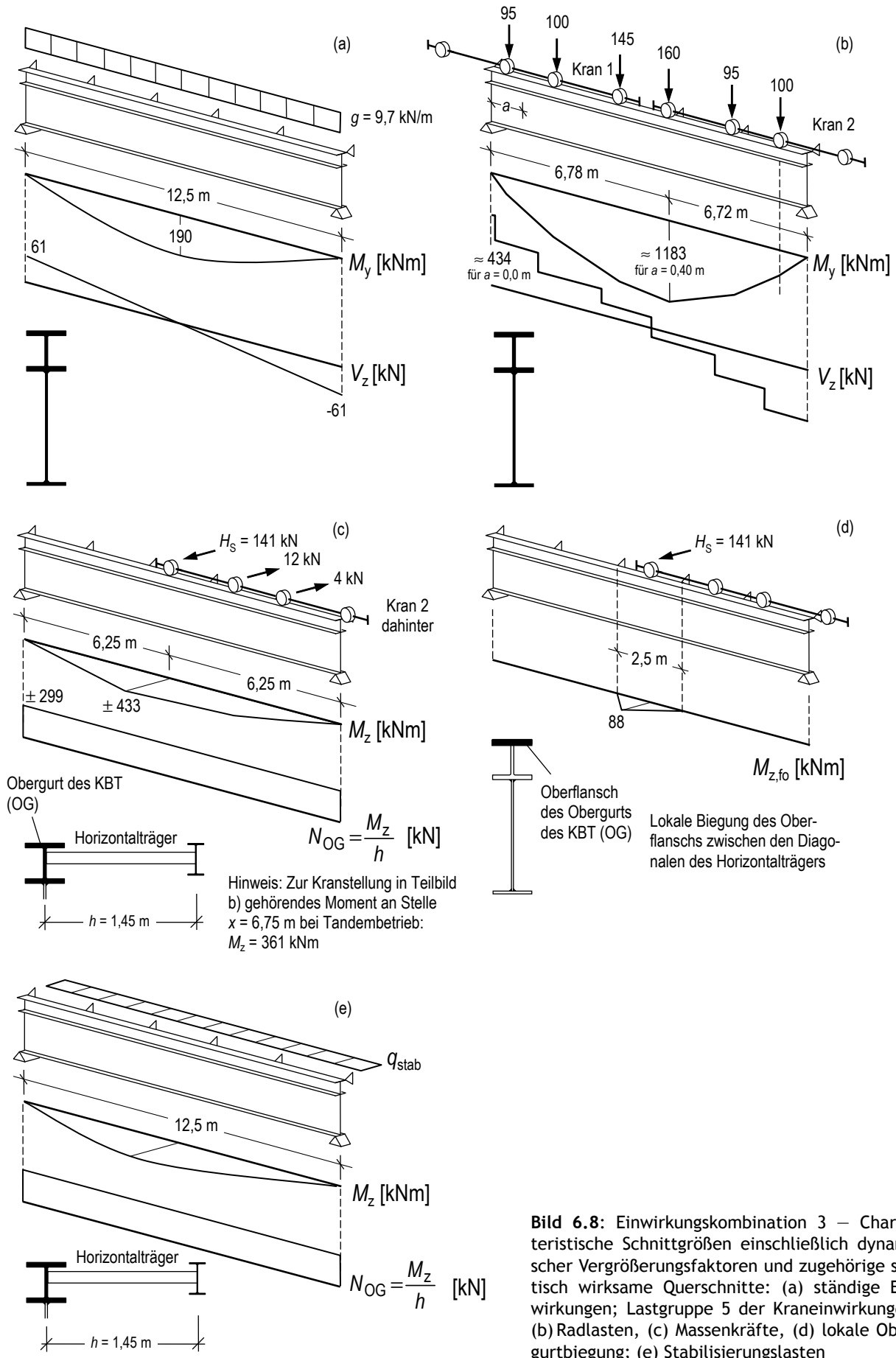


Bild 6.8: Einwirkungskombination 3 – Charakteristische Schnittgrößen einschließlich dynamischer Vergrößerungsfaktoren und zugehörige statisch wirksame Querschnitte: (a) ständige Einwirkungen; Lastgruppe 5 der Kraneinwirkungen; (b) Radlasten, (c) Massenkkräfte, (d) lokale Obergurtbiegung; (e) Stabilisierungslasten

6. Berechnungsbeispiel 1

$$q_{\text{stab}} = N_d \cdot 8 \cdot \frac{w_0}{L^2} = 1\,405 \text{ kN} \cdot 8 \cdot \frac{12,5 \text{ m}/500}{(12,5 \text{ m})^2} = 1,80 \text{ kNm}$$

$$M_{z,d} = q_{\text{stab}} \cdot L^2/8 = 35 \text{ kNm}$$

$$N_{OG,d} = \frac{M_{z,d}}{h} = \frac{35 \text{ kNm}}{1,45 \text{ m}} = 24 \text{ kN}$$

6.6.3.2 | Spannungsnachweis

– Faser 1: Normalspannungsnachweis für Flanschante des HD-Profiles

$$\begin{aligned} \sigma_{x,d} &= \frac{M_{y,d}}{W_{y,1}} + \frac{M_{z,fo,d}}{W_{z,fo}} + \frac{N_{OG,d}}{A_{OG}} = \frac{186\,000 \text{ kNcm}}{42\,849 \text{ cm}^3} + \frac{11\,900 \text{ kNcm}}{1\,320 \text{ cm}^3} + \frac{404 + 24 \text{ kN}}{487 \text{ cm}^2} \\ &= 4,3 + 9,0 + 0,9 \\ &= 14,2 \text{ kN/cm}^2 < f_y / \gamma_{M0} = 21,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (\checkmark) \end{aligned}$$

6.6.4 | Bauteilnachweise

6.6.4.1 | Vorbemerkung

Es wird der Biegedrillknicknachweis für das HD-Profil zwischen den seitlichen Haltepunkten des Horizontalträgers ($L = 250 \text{ cm}$) geführt. Das HD-Profil wird als Druckstab mit Seitenbiegung betrachtet. Da die Torsion im Knicknachweis des Obergurts nicht explizit berücksichtigt wird, wird M_z ausschließlich dem Oberflansch zugewiesen. Rechnerisch wird dies erreicht, wenn der Knicknachweis mit dem doppelten M_z geführt wird.

6.6.4.2 | Einwirkungskombination 1: $1,35 \cdot g + 1,35 \cdot \text{Lastgruppe 1}$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um starke Achse, vgl. Abs. 6.6.1.1:

$$N_{OG} = \frac{M_{y,d} \cdot S_{y,OG}}{I_y} \approx 566\,000 \text{ kNcm} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} = 4\,275 \text{ kN}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse aus Kraneinwirkungen, vgl. Abs. 6.6.1.1:

$$N_{OG} = 188 \text{ kN}$$

– Normalkraft im Obergurt aus globaler Biegung des Kranbahnträgers um schwache Achse infolge Stabilisierung, vgl. Abs. 6.6.1.1:

$$N_{OG} = 70 \text{ kN}$$

– Gesamte Normalkraft im Obergurt

$$N_{OG} = 4\,275 + 188 + 74 \approx 4\,533 \text{ kN}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse, vgl. Abs. 6.6.1.1:

$$M_{z,fo,d} = 2 \cdot 55 \text{ kNm}$$

**Biegeknicknachweis für einachsige Biegung mit Normalkraft
nach EC3-1-; Abs 6.3.3**

Position: GZT: Knicken HD 400x382 S235: Lastgruppe 1: Rmax

	Lastfall: LG1: Rmax	
E = 21.000 kN/cm ²		Biegemoment $M_{z,ed} = 110,0$ kNm = 2x55
G = 8.100 kN/cm ²		Druckkraft $N_{ed} = 4.533,0$ kN
$f_y = 21,5$ kN/cm ²		Knicklänge des Druckstabs $L_{cr} = 2,50$ m
$\gamma_{M1} = 1,10$		Fläche des Druckstabs $A = 487,0$ cm ²
		Trägheitsmoment Druckstabs $I_z = 53620$ cm ⁴
		Querschnittsklasse = 1
		Widerstandsmoment des Druckstabs $W_{z,pl} = 4031$ cm ³
		Knickspannungslinie = d

$i_z = 10,49$ cm	$M_{z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = 787,9$ kNm	
	$N_{pl,Rd} = 9518,6$ kN	

Berechnung von N_{cr} und χ :

$N_{cr,z,d} = 161649,05$ kN	$\lambda_1 = 98,18$	$\bar{\lambda}_z = 0,24$	$\alpha_z = 0,76$
$l_{cr,z} = L_{cr} = 250,0$ cm	$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$	$\phi = 0,5457$	$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$
			$\chi_z = 0,97$

Interaktionsbeiwerte:

$C_{mz} = 0,9$	$k_{zz,ei} = 0,96$	$\leq 1,17$	(für QK 3)
$k_{zz,pl} = 0,85$	$\leq 1,52$		(für QK 1+2)

Nachweisformat:

$N_{Ed} = 4.533,0$ kN	$M_{z,Ed} = 110,0$ kNm	
	$k_{zz} = k_{zz,pl} = 0,85$	

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

0,49	+	0,12	=	0,61	<=	1,0	Nachweis erfüllt
------	---	------	---	------	----	-----	------------------

Bild 6.9: Biegedrillknicknachweis für Einwirkungskombination 1

6.6.4.3 | Einwirkungskombination 2: 1,35 · g + 1,35 · Lastgruppe 5 (maximale Radlasten)

– Gesamte Normalkraft im Obergurt, vgl. Abs. 6.6.2.1:

$$N_{OG} \approx 508\,600 \text{ kNcm} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} + 380 \text{ kN} + 66 \text{ kN} = 3\,842 + 380 + 66 \approx 4\,285 \text{ kN}$$

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse, vgl. Abs. 6.6.2.1:

$$M_{z,fo,d} = 2 \cdot 81 \text{ kNm}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

**Biegeknicknachweis für einachsige Biegung mit Normalkraft
nach EC3-1-; Abs 6.3.3**

Position: GZT: Knicken HD 400x382 S235: Lastgruppe 5: Rmax

E = 21.000 kN/cm²

G = 8.100 kN/cm²

f_y = 21,5 kN/cm²

γ_{M1} = 1,10

Lastfall: LG5: Rmax

Biegemoment M_{z,ed} = 162,0 kNm = 2x81

Druckkraft N_{ed} = 4.285,0 kN

Knicklänge des Druckstabs L_{cr} = 2,50 m

Fläche des Druckstabs A = 487,0 cm²

Trägheitsmoment Druckstabs I_z = 53620 cm⁴

Querschnittsklasse = 1

Widerstandsmoment des Druckstabs W_{z,pl} = 4031 cm³

Knickspannungslinie = d

i_z = 10,49 cm

M_{z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = 787,9 kNm

N_{pl,Rd} = 9518,6 kN

Berechnung von N_{cr} und χ:

l_{cr,z} = L_{cr} = 250,0 cm

λ₁ = 98,18

λ̄_z = 0,24

α = 0,76

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

φ = 0,5457

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

χ_z = 0,97

Interaktionsbeiwerte:

C_{mz} = 0,9

k_{zz,el} = 0,96

k_{zz,pl} = 0,85

≤ 1,15 (für QK 3)

≤ 1,49 (für QK 1+2)

Nachweisformat:

N_{Ed} = 4.285,0 kN

M_{z,Ed} = 162,0 kNm

k_{zz} = k_{zz,pl} = 0,85

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

0,47

+ 0,18

= 0,64 ≤ 1,0 Nachweis erfüllt

Bild 6.10: Biegedrillknicknachweis für Einwirkungskombination 2

6.6.4.4 | Einwirkungskombination 3: 1,35 · g + 1,35 · Lastgruppe 5 (minimale Radlasten)

– Gesamte Normalkraft im Obergurt, vgl. Abs. 6.6.3.1:

$$N_{OG} \approx 186\,000 \text{ kNcm} \cdot 7,553 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} + 404 \text{ kN} + 24 \text{ kN} = 1\,405 + 404 + 23 \approx 1\,832 \text{ kN}$$

– Lokale Biegung des Kranbahnträgerobergurts um schwache Achse, vgl. Abs. 6.6.3.1:

$$M_{z,fo,d} = 2 \cdot 119 \text{ kNm}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

**Biegedrillknicknachweis für einachsige Biegung mit Normalkraft
nach EC3-1-; Abs 6.3.3**

Position: GZT: Knicken HD 400x382 S235: Lastgruppe 5: Rmin

	Lastfall: LG5: Rmin	
E = 21.000 kN/cm ²		Biegemoment M _{z,ed} = 238,0 kNm = 2x119
G = 8.100 kN/cm ²		Druckkraft N _{ed} = 1.832,0 kN
f _y = 21,5 kN/cm ²		Knicklänge des Druckstabs L _{cr} = 2,50 m
γ _{M1} = 1,10		Fläche des Druckstabs A = 487,0 cm ²
		Trägheitsmoment Druckstabs I _z = 53620 cm ⁴
		Querschnittsklasse = 1
		Widerstandsmoment des Druckstabs W _{z,pl} = 4031 cm ³
		Knickspannungslinie = d

i _z = 10,49 cm	M _{z,Rd} = M _{pl,z,Rd} = 787,9 kNm	
	N _{pl,Rd} = 9518,6 kN	

Berechnung von N_{cr} und χ:

N _{cr,z,d} = 161649,05 kN		
l _{cr,z} = L _{cr} = 250,0 cm	λ ₁ = 98,18	λ̄ _z = 0,24 α _z = 0,76
Φ = 0,5 [1 + α (λ̄ - 0,2) + λ̄ ²]	φ = 0,5457	χ = $\frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$ χ _z = 0,97

Interaktionsbeiwerte:

C _{mz} = 0,9		
k _{zz,el} = 0,93	≤	1,01 (für QK 3)
k _{zz,pl} = 0,88	≤	1,15 (für QK 1+2)

Nachweisformat:

N _{Ed} = 1.832,0 kN		M _{z,Ed} = 238,0 kNm
		k _{zz} = k _{zz,pl} = 0,88

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{Rd}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

0,20	+	0,27	=	0,46	≤	1,0	Nachweis erfüllt
------	---	------	---	------	---	-----	------------------

Bild 6.11: Biegedrillknicknachweis für Einwirkungskombination 3

6. Berechnungsbeispiel 1

6.6.5 | Lokale Nachweise (Beulen)

Es sind zwei Beulfelder zu untersuchen, Bild 6.12. Das Beulfeld a repräsentiert den Steg des HD-Profiles zwischen den Quersteifen. Das Beulfeld b beschreibt das an das HD-Profil angeschweißte Stegblech. Es wird die Einwirkungskombination 1 mit der größten Trägerbiegung betrachtet.

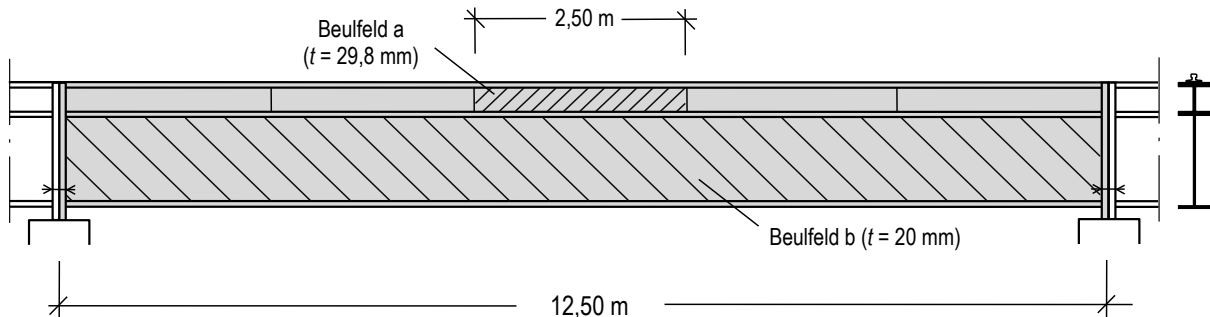


Bild 6.12: Beulfelder

Beulfeld a:

Für den Nachweis von Beulfeld a wird die größte Radlast mit 607,5 kN (Bemessungswert) maßgebend, Bild 6.13. Die Schubspannungen in Beulfeldmitte werden konservativerweise für die maximale Querkraft ($V_{z,d} \approx 2110$ kN) ermittelt. Vgl. die Spannungsermittlung in Bild 6.6.

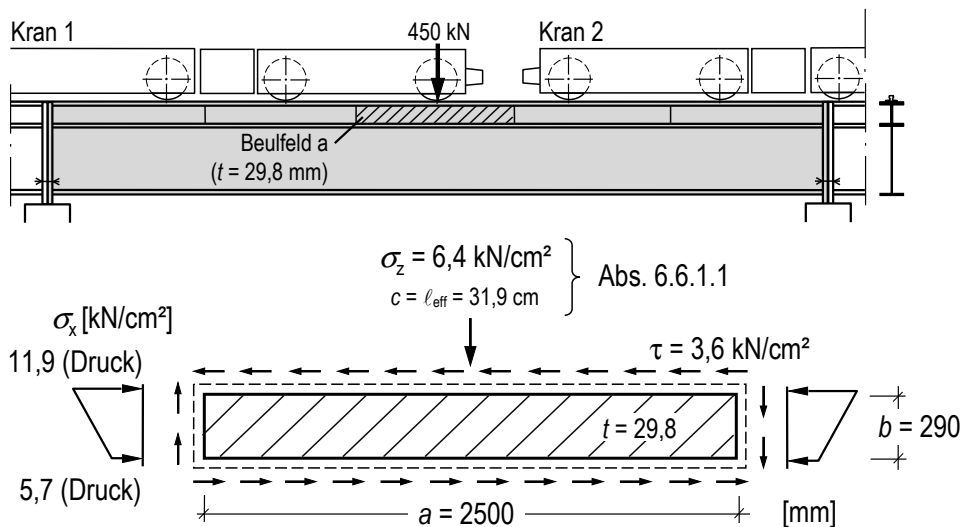


Bild 6.13: Maßgebende Laststellung (vgl. Bild 6.5) in Einwirkungskombination 1 und zugehörige Spannungen (Bemessungswerte) von Beulfeld a

Eingangswerte:

$$\psi_x = 5,7/11,9 = 0,48$$

$$\psi_z = 1,0$$

$$\alpha = a/b = 250/29 = 8,62$$

$$\beta = c/a = 31,9/250 = 0,13$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot 21000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \left(\frac{2,98}{29} \right)^2 = 200 \text{ kN/cm}^2$$

6. Berechnungsbeispiel 1

Beulwerte:

$$k_{\sigma x} = 8,2 / (1,05 + 0,48) = 5,36 \text{ [15, Tab. 4.1]}$$

$$k_{\sigma z} = 0,4 \cdot a/c = 3,13 \text{ [45, Kap. 21, Bild 86]}$$

$$k_{\tau} = 5,39 \text{ [15, Gl. A5]}$$

Lasterhöhungsfaktoren:

$$\alpha_{cr,x} = 90,3$$

$$\alpha_{cr,z} = 98$$

$$\alpha_{cr,\tau} = 300$$

$$\alpha_{cr} = 48,8 \text{ [15, Gl. 10.5]}$$

$$\alpha_{ult,k} = 1,952 \text{ [15, Gl. 10.3]}$$

Systemschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = 0,2$$

Abminderungsbeiwerte und Nachweis:

$$\rho_x = 1,00 \text{ [15, Tab. 4.2]}$$

$$\rho_z = 1,00 \text{ [15, Gl. NA.8]}$$

$$\chi_w = 1,20 \text{ [15, Tab. 5.1]}$$

$$V = 1,00$$

$$\text{Ausnutzung} = 0,295 < 1,00 \text{ (}\checkmark\text{)}$$

Beulfeld b:

Das längere Beulfeld b wird durch mehrere Radlasten beansprucht, deren Lastausbreitungslängen sich nicht überlagern, Bild 6.14a. In der nachfolgenden Abschätzung der Beulsicherheit wird eine gleichmäßige Verteilung der Radlasten angenommen, Bild 6.14b. Das Beulfeld befindet sich fast ausschließlich in der Zugzone aus Trägerbiegung. Die Längsspannungen werden daher vernachlässigt. Für den genauen Beulnachweis sind jedoch die einzelnen Radlasten sowie die Längsspannungen zu berücksichtigen, ggf. unter Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens.

Eingangswerte:

$$\psi_z = 1,0$$

$$\alpha = a/b = 1250/115,4 = 10,83$$

$$\beta = c/a = 1,00$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot 21000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \left(\frac{2,00}{115,4} \right)^2 = 5,7 \text{ kN/cm}^2$$

Beulwert:

$$k_{\sigma z} = 1,7 \cdot a/c = 1,7 \text{ [45, Kap. 21, Bild 86]}$$

Lasterhöhungsfaktoren:

$$\alpha_{cr} = \alpha_{cr,z} = 3,23$$

$$\alpha_{ult,k} = 7,83 \text{ [15, Gl. 10.3]}$$

6. Berechnungsbeispiel 1

Systemschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = 1,56$$

Abminderungsbeiwert und Nachweis:

$$\rho_z = 0,485 \text{ [15, Gl. NA.8]}$$

$$\text{Ausnutzung} = 0,29 < 1,00 \text{ (}\checkmark\text{)}$$

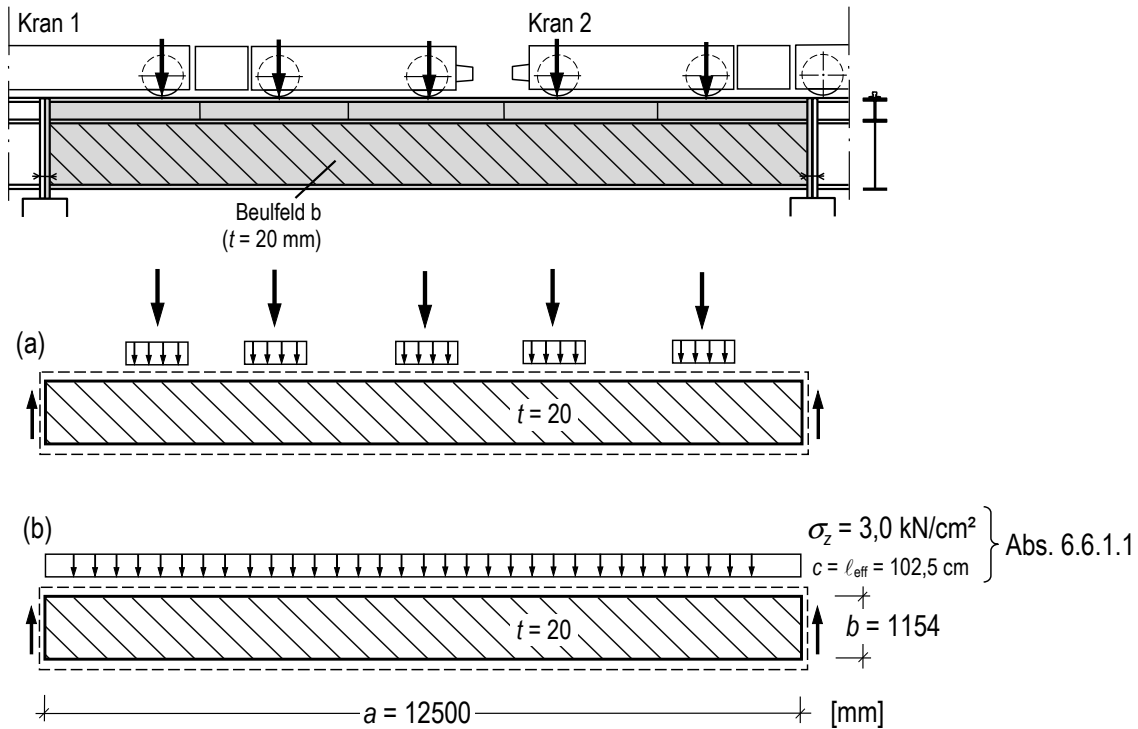


Bild 6.14: Maßgebende Laststellung (vgl. Bild 6.5) in Einwirkungskombination 1 und zugehörige Spannungen (Bemessungswerte) von Beulfeld b: (a) realitätsnahes Lastbild, (b) vereinfachtes Lastbild

6. Berechnungsbeispiel 1

6.7 | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Verformungen des Kranbahnträgers wurden mit einem Computerprogramm ermittelt.

– Die vertikalen Verformungen in der Einwirkungskombination mit Lastgruppe 101 ergibt 1,1 cm. Der zulässige Grenzwert aus DIN EN 1993-6 [19, Tab. 7.2] von $L/500 = 2,5$ cm wird nicht überschritten.

– Die horizontalen Verformungen in der Einwirkungskombination mit Lastgruppe 102 betragen aufgrund des Horizontalträgers nur 0,4 cm. Der zulässige Grenzwert aus DIN EN 1993-6 [19, Tab. 7.1] von $L/600 = 2$ cm wird weit unterschritten.

– Vermeidung von Querschwingungen des Untergurts nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 7.6] :

$$L/i_{z, fu} = 1250 \text{ cm} / 11,56 \text{ cm} = 108 < 250 (\checkmark)$$

6.8 | Ermüdungsnachweise

6.8.1 | Vorbemerkung

Die Einstufung des Krans in Beanspruchungsklasse S4 wird für die Kranbahn übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass der Kran für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt wird und daher die horizontalen Kranlasten nicht regelmäßig in einem bestimmten Kranbahnbereich auftreten. Aus diesem Grund werden nur die vertikalen Kranlasten als ermüdungsrelevant betrachtet.

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen beträgt $\gamma_{Ff} = 1,0$ [20, Abs. 9.2(1)]. Da von drei Inspektionsintervallen über die Nutzungsdauer ausgegangen wird, beträgt der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,15$ für die Ermüdungsfestigkeit [20, Tab. NA.3].

Für die Beanspruchungsklasse S4 betragen die schadensäquivalenten Beiwerte $\lambda_{\sigma} = 0,5$ bei Beanspruchung durch Normalspannungen und $\lambda_{\tau} = 0,66$ bei Beanspruchung durch Schubspannungen gemäß DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12].

6.8.2 | Überblick über die Konstruktionsdetails

Das Bild 6.15 gibt einen Überblick über die zu untersuchenden Konstruktionsdetails des Regelquerschnitts. Das Detail ① erfasst die Bohrungen im Oberflansch für die Schienenbefestigung. Das Detail ② steht für den Stegansatz des Obergurts (HD-Profil), der die größten Radlasteinleitungsspannungen erfährt. Das Detail ③ beschreibt den geschweißten Anschluss des Stegblechs an die Unterseite des HD-Profiles. Das Detail ④ charakterisiert die geschweißte Flansch-Steg-Verbindung des Unterflanschs.

In Bild 6.16 werden die Konstruktionsdetails im Anschlussbereich des Horizontalträgers bzw. im Auflagerbereich dargestellt. Das Detail ⑤ steht für den Quersteifenanschluss am Oberflansch des HD-Profiles. Das Detail ⑥ erfasst den Quersteifenanschluss am Steg des HD-Profiles. Das Detail ⑦ beschreibt den Knotenblechanschluss am Steg des HD-Profiles. Das Detail ⑧ charakterisiert die Stirnplattennaht zur Übertragung der Querkraft. Das Detail ⑨ erfasst die Flanschbindung an die Stirnplatte.

6. Berechnungsbeispiel 1

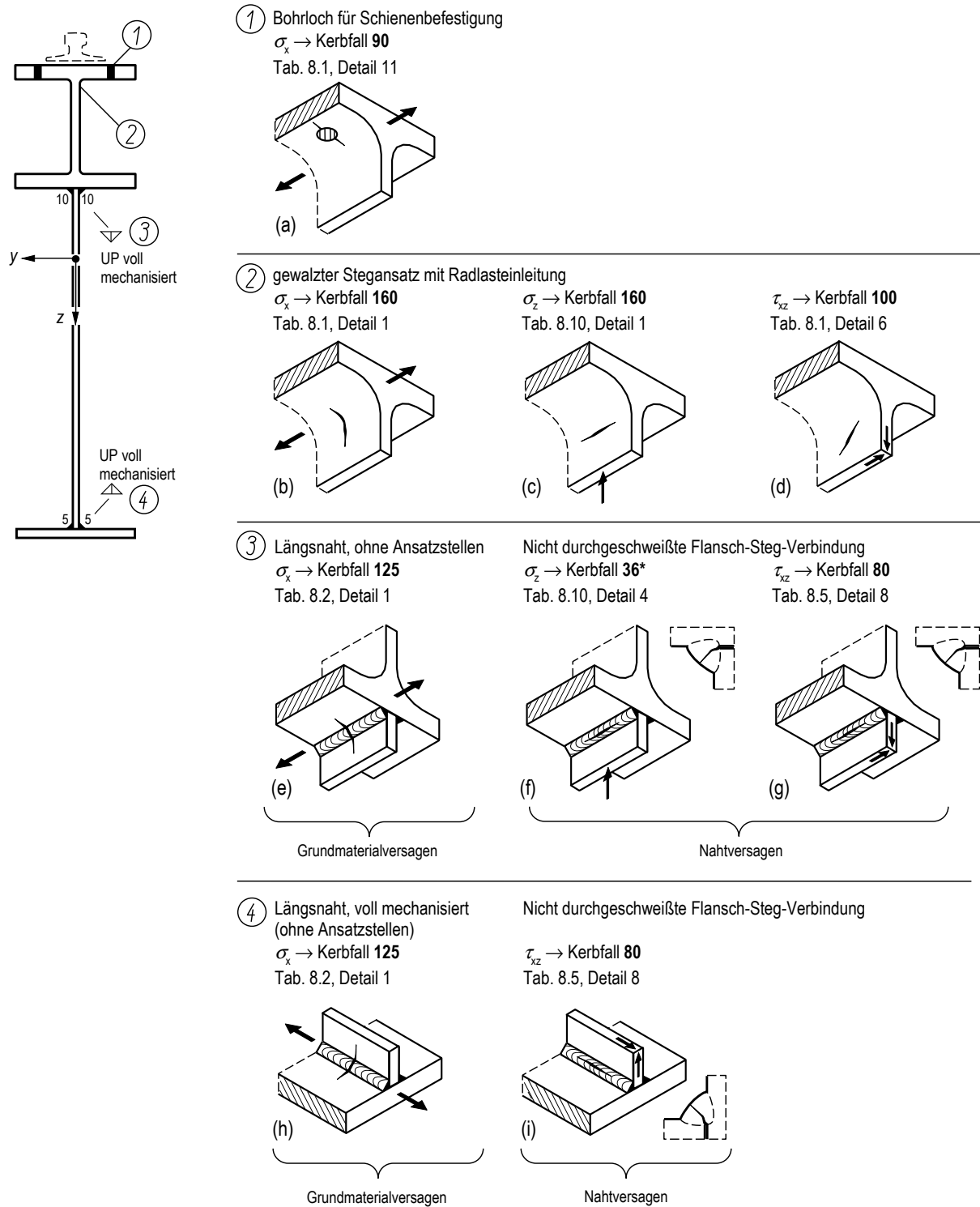


Bild 6.15: Überblick zu den Konstruktionsdetails im Regelquerschnitt

6. Berechnungsbeispiel 1

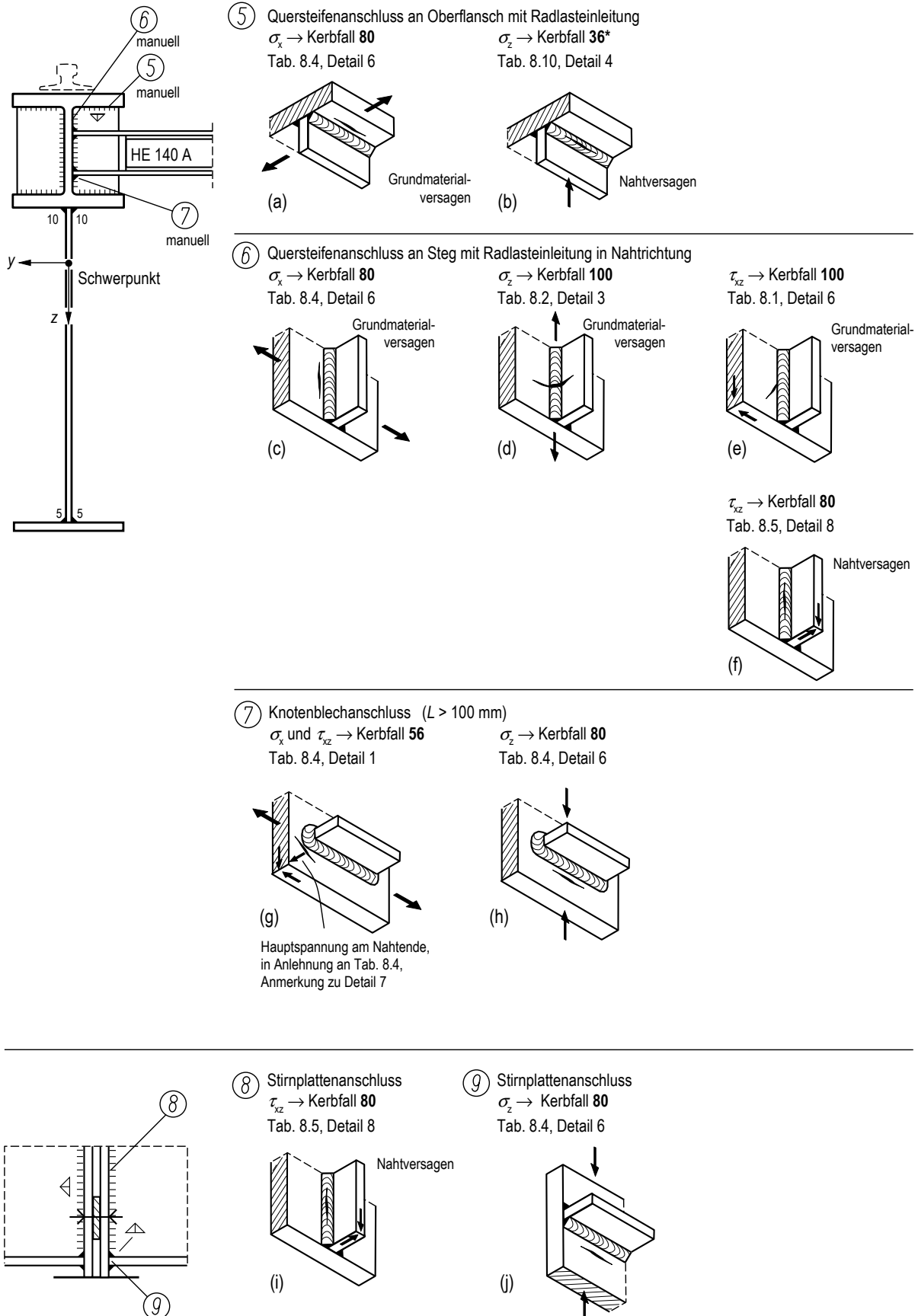


Bild 6.16: Überblick zu den Konstruktionsdetails für den Anschluss der Querstreifen und des Horizontalträgers und für das Auflagerdetail

6. Berechnungsbeispiel 1

6.8.3 | Ermüdungslasten

In Bild 6.18 sind die Zeitverläufe für die Schnittgrößen in Trägermitte und im Auflagerbereich infolge der ermüdungsrelevanten Einwirkungen aus Kranbetrieb zur Ermittlung der Beanspruchungsschwingbreiten dargestellt.

Die Ermittlung und Auszählung der Schwingbreiten wird in Bild 6.17 am Beispiel des Querkraftzeitverlaufs aus Bild 6.18b nach der Reservoir-Zählmethode erläutert. Der Zeitverlauf eines Arbeitsspiels wird unter Einbeziehung des vorangegangenen Arbeitsspiels gedanklich mit Wasser gefüllt. Dadurch entsteht ein Reservoir. Anschließend wird dieses Reservoir am tiefsten Punkt abgelassen. Die Veränderung des Wasserstands entspricht der größten Schwingbreite des Arbeitsspiels, die im Bild 6.17 ca. 800 kN beträgt.

Allerdings verbleiben nach der Entleerung über einen Ablass am tiefsten Punkt kleinere Reservoirs über. Diese Reservoirs müssen durch zusätzliche Ablässe entleert werden. Die dabei auftretenden Wasserstandsveränderungen entsprechen zusätzlichen Schwingbreiten. In Bild 6.17 sind sieben zusätzliche Ablässe für die vollständige Entleerung notwendig. Es treten somit neben der größten Schwingbreite pro Arbeitsspiel noch sieben weitere Schwingbreiten von untergeordneter Größe auf.

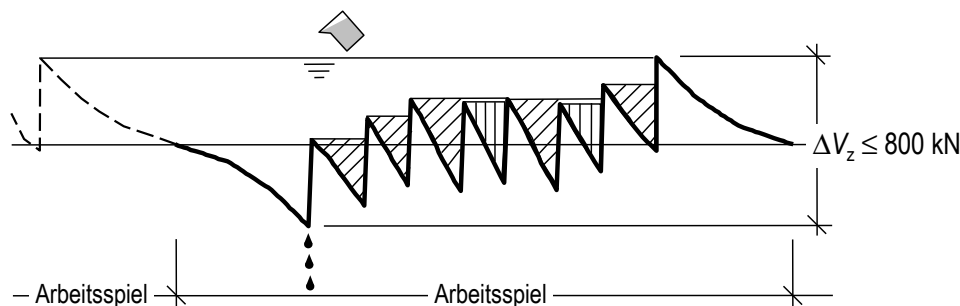


Bild 6.17: Zählung der Spannungsschwingbreiten zu Querkraft in Bild 6.18b

6.8.4 | Detail 1: Schienenbefestigung (Bohrung) im Oberflansch

6.8.4.1 | Kerbfalleinordnung

Längsspannungen $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 90, $\Delta\sigma_C = 90 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.1, Detail 11], vgl. Bild 6.15a.

6.8.4.2 | Globale Biegespannungen

Die Spannungsschwingbreite liegt im Druckbereich. Da es sich um ein nicht geschweißtes Konstruktionsdetail handelt, darf der Druckanteil der Schwingbreite auf 60% reduziert werden [18, Abs. 7.2.1]. Siehe Auslegungen der zuständigen Arbeitsausschüsse des DIN-Normenausschusses Bauwesen (NABau) im Internet: <http://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/auslegungen-zu-din-normen-des-nabau-68630>.

6. Berechnungsbeispiel 1

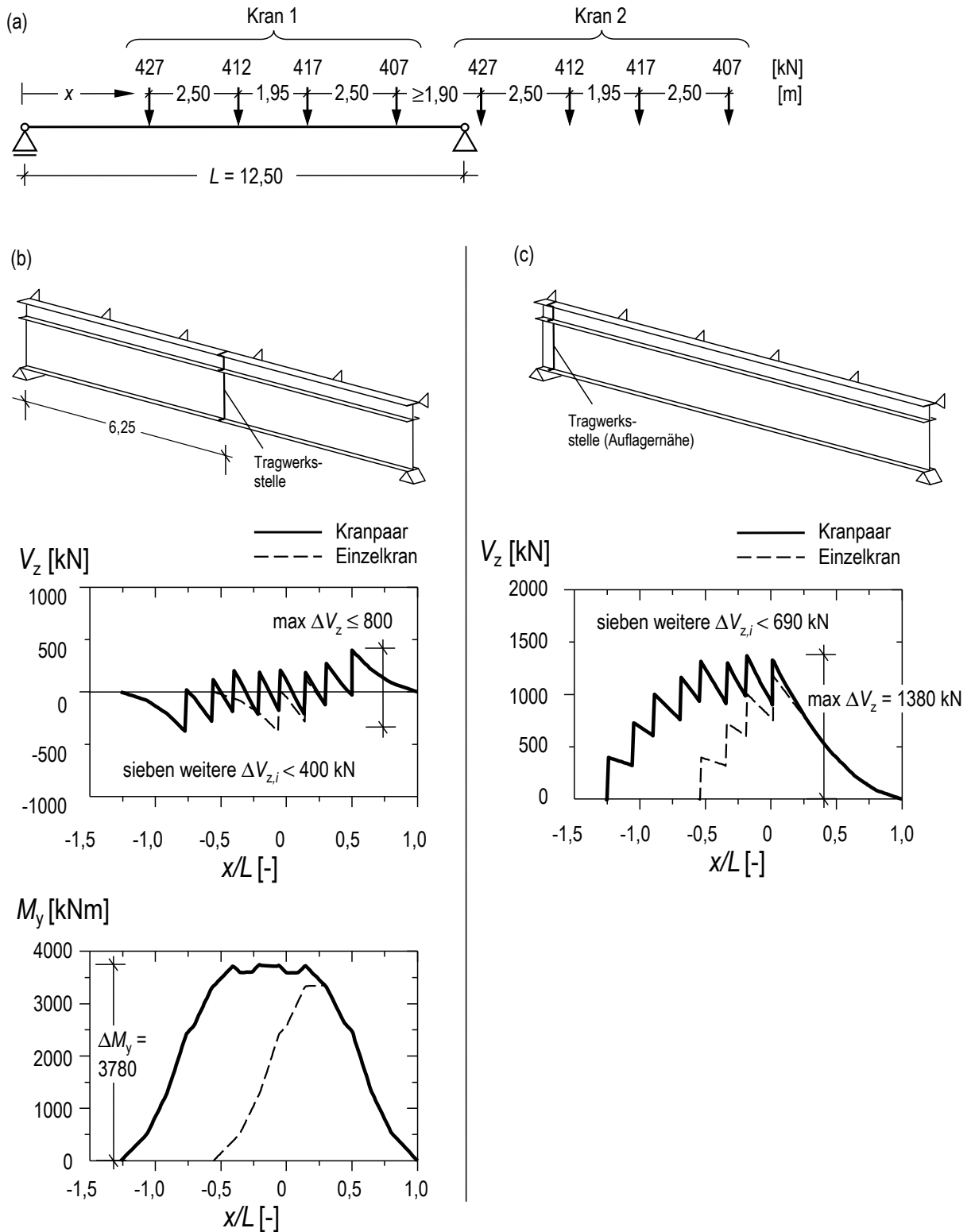


Bild 6.18: Schwingbreitenermittlung: (a) Ermüdungslasten (einschließlich dynamische Vergrößerungsfaktoren, ohne schadensäquivalente Beiwerte); Zeitverlauf der Schnittgrößen (b) in Feldmitte und (c) am Auflager

6. Berechnungsbeispiel 1

$M_y = 3\,780 \text{ kNm}$, vgl. Bild 6.18b

$$\Delta\sigma_x = 0,6 \cdot \frac{\Delta M_y}{W_{y,1}} = 0,6 \cdot \frac{3\,780\,000 \text{ kNcm}}{-42\,848 \text{ cm}^3} = 5,3 \text{ kN/cm}^2$$
$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 5,3 \text{ kN/cm}^2}{9,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,34 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.5 | Detail 2: Gewalzter Stegansatz des HD-Profiles

6.8.5.1 | Kerbfalleinordnung

Längsspannungen $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 160, $\Delta\sigma_C = 160 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.1, Detail 2], vgl. Bild 6.15b.
Lokale Druckspannungen $\Delta\sigma_z$: Kerbfall 160, $\Delta\sigma_C = 160 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.10, Detail 1], vgl. Bild 6.15c.

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 100, $\Delta\tau_C = 100 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.1, Detail 5]d.

6.8.5.2 | Globale Biegespannungen

Pro Arbeitsspiel des Kranpaars (Kranüberfahrt) tritt eine Schwingbreite der globalen Biegespannungen auf.

$M_y = 3\,780 \text{ kNm}$, vgl. Bild 6.18b

$$\Delta\sigma_x = \frac{\Delta M_y}{W_{y,2a}} = \frac{3\,780\,000 \text{ kNcm}}{-47\,724 \text{ cm}^3} = 7,9 \text{ kN/cm}^2$$
$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 7,9 \text{ kN/cm}^2}{16 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,28 < 1 \quad (\checkmark)$$
$$D_{\sigma_x} = 0,28^3 = 0,02$$

Der Nachweis für den Tandembetrieb deckt den Einzelkranbetrieb mit ab, der zu einer geringeren Biegung von $M_y = 3\,350 \text{ kNm}$ führt, vgl. Bild 6.18b.

6.8.5.3 | Lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Die lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung wird unter Berücksichtigung der elastischen Schienenunterlage und von 12,5% Schienenkopfabnutzung ermittelt. Die lokale Druckspannung im Steg des HD-Profiles an der Unterseite des Oberflanschs beträgt:

$h_r = 90 \text{ mm}$ (abgenutzte Schiene A 100)

$b_{\text{eff}} = h_r + b_{fr} + t_f = 90 + 200 + 48 = 338 \text{ mm} < b_f = 406 \text{ mm}$

$I_f = 33,8 \text{ cm} \cdot (4,8 \text{ cm})^3 / 12 = 312 \text{ cm}^4$

$I_r = 744 \text{ cm}^4$ vgl. [31]

$I_{rf} = 312 + 744 = 1\,056 \text{ cm}^4$

$\ell_{\text{eff}} = 4,25 \sqrt[3]{I_{rf} / t_w} = 4,25 \sqrt[3]{1\,056 \text{ cm}^4 / 2,98 \text{ cm}} = 30,1 \text{ cm}$

Lastausbreitungslänge am Ende des Walzradius:

$\ell_{\text{eff}} = 30,1 \text{ cm} + 2 \cdot r = 30,1 \text{ cm} + 2 \cdot 1,5 \text{ cm} = 33,1 \text{ cm}$

6. Berechnungsbeispiel 1

Damit ergeben sich die Druckspannungen unter den vier Laufrädern eines Krans zu:

$$\sigma_{oz} = F_z / (\ell_{\text{eff}} \cdot t_w) = F_z / (33,1 \text{ cm} \cdot 2,98 \text{ cm})$$

1. Laufrad: $F_z = 427 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 4,3 \text{ kN/cm}^2$

2. Laufrad: $F_z = 412 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 4,1 \text{ kN/cm}^2$

3. Laufrad: $F_z = 417 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 4,2 \text{ kN/cm}^2$

4. Laufrad: $F_z = 407 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 4,1 \text{ kN/cm}^2$

Für die weitere Betrachtung wird für alle vier Laufräder beider Krane von einem Mittelwert von $\sigma_{oz} = 4,2 \text{ kN/cm}^2$ ausgegangen. Unter dieser Annahme ergeben sich pro Arbeitsspiel des Kranpaares (Kranüberfahrt) acht Spannungsschwingbreiten von $\Delta\sigma_{oz} = 4,2 \text{ kN/cm}^2$.

6.8.5.4 | Lokale Biegespannungen aus exzentrischer Radlasteinleitung

Die Biegespannungen im Steg infolge exzentrischer Radlasteinleitung mit Ausmitte e werden nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.3] ermittelt. Das Torsionsträgheitsmoment der Schiene kann nach [42, S. 216] hierbei berücksichtigt werden, vgl. auch [45, S. 932].

– Quersteifenabstand $a = 250 \text{ cm}$

– lichte Steghöhe $h_w = 32 \text{ cm}$

– Verhältnis $h_w/a = 0,128$

– Torsionsträgheitsmoment des Oberflanschs: $I_{T,f} = 40,6 \text{ cm} \cdot (4,8 \text{ cm})^3 / 3 = 1\,497 \text{ cm}^4$

– Torsionsträgheitsmoment der Schiene mit 12,5% Abnutzung: $I_{T,r} = 581 \text{ cm}^4$ vgl. [31]

– Gesamttorsionsträgheitsmoment: $I_T = I_{T,f} + I_{T,r} = 2\,078 \text{ cm}^4$

$$e = k/4 = 100 \text{ mm} / 4 = 25 \text{ mm}$$

$$T = F_z \cdot e = 416 \text{ kN} \cdot 2,5 \text{ cm} = 1\,040 \text{ kNcm}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_T} \cdot \frac{\sinh(\pi h_w/a)}{\sinh(2\pi h_w/a) - 2\pi h_w/a}}$$
$$= \sqrt{\frac{0,75 \cdot 250 \text{ cm} \cdot 2,98 \text{ cm}^3}{2\,078 \text{ cm}^4} \cdot \frac{\sinh(\pi \cdot 0,128)}{\sinh(2 \cdot \pi \cdot 0,128) - 2 \cdot \pi \cdot 0,128}} = 2,13$$

Es wird im Folgenden von einer über alle Laufräder des Einzelkrans gemittelten Radlast von $F_z = 416 \text{ kN}$ ausgegangen.

$$\sigma_T = \frac{6 \cdot T}{a \cdot t_w^2} \eta \tanh \eta = \frac{6 \cdot 1\,040 \text{ kNcm}}{250 \text{ cm} \cdot (2,98 \text{ cm})^2} \cdot 2,13 \cdot \tanh 2,13 = \pm 5,8 \text{ kN/cm}^2$$

6.8.5.5 | Überlagerte Druckspannungen aus Radlasteinleitung

Die lokalen Druckspannungen aus zentrischer Radlasteinleitung und die lokalen Biegespannungen aus exzentrischer Radlasteinleitung überlagern sich auf einer Stegseite ungünstigst:

$$\sigma_z = \sigma_{oz} + \sigma_T = 4,2 + 5,8 = 10,0 \text{ kN/cm}^2$$

6. Berechnungsbeispiel 1

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) treten somit vier annähernd gleichgroße Schwingbreiten der lokalen quergerichteten Druckspannungen auf. Für das Kranpaar treten acht annähernd gleichgroße Schwingbreiten pro Arbeitsspiel auf.

Durch den schadensäquivalenten Beiwert λ_σ wird angenommen, dass die Überfahrt des Einzelkrans bzw. des Kranpaars zu einem Spannungsschwingspiel führt. Im Gegensatz zur globalen Beanspruchung (Trägerbiegung) gilt dies für die hier betrachteten lokalen Spannungen nicht mehr. Hier liegt ein härteres Spannungskollektiv vor, das auf zwei Wegen erfasst werden kann:

(a) Schadensakkumulation

Schädigung aus der einzelnen Schwingbreite:

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{\sigma z}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 10,0 \text{ kN/cm}^2}{16 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,36$$
$$D_{\sigma z} = 0,36^3 = 0,047$$

Schädigungssumme für insgesamt acht (annähernd gleich große) Schwingspiele aus zwei Kranen:

$$\sum D_{\sigma z} = 8 \cdot D_{\sigma z} = 8 \cdot 0,047 = 0,37 < 1 \quad (\checkmark)$$

(b) Anpassung des schadensäquivalenten Beiwerts λ_σ

Bei mehreren gleichgroßen Spannungsschwingbreiten pro Arbeitsspiel ist alternativ folgendes Vorgehen möglich. Eine Höherstufung der Beanspruchungsklasse um eine Stufe bedeutet eine Verdoppelung der Schwingspielzahl (= 2^1) bei gleichbleibender Völligkeit des Spannungskollektivs. Eine Höherstufung um zwei Stufen bedeutet eine Vervierfachung (= 2^2) und um drei Stufen eine Verachtfachung (= 2^3) der Schwingspielzahl. Da im betrachteten Fall die Schwingspielzahl der quergerichteten Druckspannungen um den Faktor 8 größer als die Schwingspielzahl der globalen Beanspruchung ist, wird der schadensäquivalente Beiwert der um drei Stufen höheren Beanspruchungsklasse S7 nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12] angesetzt: $\lambda_\sigma = 1,0$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{\sigma z}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 10,0 \text{ kN/cm}^2}{16 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,72$$
$$\sum D_{\sigma z} = 0,72^3 = 0,37 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.5.6 | Globale Querkraftschubspannung

– Schubspannungsschwingbreiten in Feldmitte

Größte Spannungsschwingbreite:

$$\max \Delta V_z \leq 800 \text{ kN, vgl. Bild 6.18b}$$
$$\max \Delta \tau_{xz} = \frac{V_z \cdot S_{y,2a}}{I_y \cdot t_w} = \frac{800 \text{ kN} \cdot 11\,435 \text{ cm}^3}{2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 \cdot 2,98 \text{ cm}} = 1,2 \text{ kN/cm}^2$$

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta V_z \leq 400 \text{ kN, vgl. Bild 6.18b}$$

$$\Delta \tau_{xz} = 0,6 \text{ kN/cm}^2$$

6. Berechnungsbeispiel 1

– Schubspannungsschwingbreiten am Auflager

Größte Spannungsschwingbreite:

$$\max \Delta V_z \leq 1\,380 \text{ kN, vgl. Bild 6.18c}$$

$$\max \Delta \tau_{xz} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$$

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta V_z \leq 690 \text{ kN, vgl. Bild 6.18c}$$

$$\Delta \tau_{xz} = 1,0 \text{ kN/cm}^2$$

6.8.5.7 | Lokale Schubspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Die lokalen Schubspannungen werden nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.2] ermittelt.

$$\Delta \tau_{oxz} = 2 \cdot 0,2 \cdot \Delta \sigma_{oz} = 2 \cdot 0,2 \cdot 4,3 \text{ kN/cm}^2 = 1,7 \text{ kN/cm}^2$$

6.8.5.8 | Überlagerung von lokalen und globalen Schubspannungen in Feldmitte

Größte Spannungsschwingbreite:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{xz} + \Delta \tau_{oxz} = 1,2 + 1,7 = 2,9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 2,9 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,28$$

$$D_{\tau, \max} = 0,28^5 < 1 \quad (\checkmark)$$

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{xz} + \Delta \tau_{oxz} = 0,6 + 1,7 = 2,3 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 2,3 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,22$$

$$D_{\tau, i} = 0,22^5 < 1 \quad (\checkmark)$$

Durch den schadensäquivalenten Beiwert λ_τ wird angenommen, dass ein Arbeitsspiel (Überfahrt) des Einzelkrans bzw. des Kranpaars zu einem Spannungsschwingspiel führt. Beim Auftreten von mehreren Spannungsschwingbreiten pro Arbeitsspiel ist daher deren Schädigungssumme zu bilden:

$$\sum D_\tau = D_{\tau, \max} + 7 \cdot D_{\tau, i} = 0,28^5 + 7 \cdot 0,22^5 = 0,005 < 1 \quad (\checkmark)$$

6. Berechnungsbeispiel 1

6.8.5.9 | Überlagerung von lokalen und globalen Schubspannungen am Auflager

Größte Spannungsschwingbreite:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{xz} + \Delta\tau_{oxz} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 3,7 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,35$$

$$D_{\tau, \max} = 0,35^5 < 1 \quad (\checkmark)$$

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{xz} + \Delta\tau_{oxz} = 1,0 + 1,7 = 2,7 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 2,7 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,26$$

$$D_{\tau, i} = 0,26^5 < 1 \quad (\checkmark)$$

Durch den schadensäquivalenten Beiwert λ_τ wird angenommen, dass ein Arbeitsspiel (Überfahrt) des Einzelkrans bzw. des Kranpaars zu einem Spannungsschwingspiel führt. Beim Auftreten von mehreren Spannungsschwingbreiten pro Arbeitsspiel ist daher deren Schädigungssumme zu bilden:

$$\sum D_\tau = D_{\tau, \max} + 7 \cdot D_{\tau, i} = 0,35^5 + 7 \cdot 0,26^5 = 0,013 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.5.10 | Kombinierte Schädigungen aus verschiedenen Spannungsarten in Feldmitte

$$D = D_{\sigma_x} + \sum D_{\sigma_z} + \sum D_\tau = 0,02 + 0,37 + 0,005 = 0,40 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.5.11 | Kombinierte Schädigungen aus verschiedenen Spannungsarten am Auflager

$$D = \sum D_{\sigma_z} + \sum D_\tau = 0,37 + 0,013 = 0,38 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.6 | Detail 3: Anschluß des Stegblechs an HD-Profil

6.8.6.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen:

Normalspannungen längs der Naht $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 125, $\Delta\sigma_C = 125 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.2, Detail 1], vgl. Bild 6.15e. Der Ermüdungsnachweis für das Grundmaterial ist für die Feldmitte zu führen. Er wird jedoch hier nicht maßgebend, da sich das Konstruktionsdetail nahe der Spannungsnulllinie befindet.

– Nahtversagen:

Lokale Druckspannungen quer zur Naht $\Delta\sigma_z$: Kerbfall 36, $\Delta\sigma_C = 36 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.10, Detail 4], vgl. Bild 6.15f.

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 80, $\Delta\tau_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.5, Detail 8], vgl. Bild 6.15g.

6. Berechnungsbeispiel 1

Der Ermüdungsnachweis für Nahtversagen ist am Auflager zu führen, da dort die Schubspannungen am größten sind.

6.8.6.2 | Lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Die lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung wird unter Berücksichtigung der elastischen Schienenunterlage und von 12,5% Schienenkopfabnutzung ermittelt. Die lokale Druckspannung im geschweißten Steganschluss wird wie folgt ermittelt:

Lastausbreitungslänge an Unterkante des HD-Profiles:

$$l_{\text{eff}} = 30,1 \text{ cm} + 2 \cdot (41,6 - 4,8 \text{ cm}) = 103,7 \text{ cm}$$

Damit ergeben sich die Druckspannungen unter den vier Laufrädern eines Krans zu:

$$\sigma_{\text{oz}} = F_z / (l_{\text{eff}} \cdot 2 \cdot a) = F_z / (103,7 \text{ cm} \cdot 2 \cdot 1,0 \text{ cm})$$

1. Laufrad: $F_z = 427 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{\text{oz}} = 2,1 \text{ kN/cm}^2$
2. Laufrad: $F_z = 412 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{\text{oz}} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$
3. Laufrad: $F_z = 417 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{\text{oz}} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$
4. Laufrad: $F_z = 407 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{\text{oz}} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$

Für die weitere Betrachtung wird für alle vier Laufräder von einem Mittelwert von $\Delta\sigma_{\text{oz}} = 2,1 \text{ kN/cm}^2$ ausgegangen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Verdrehung des HD-Profiles gering ist. Daher wird die Biegung des Stegblechs aus exzentrischer Radlasteinleitung vernachlässigt.

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) treten vier annähernd gleichgroße Schwingbreiten der lokalen querverrichteten Druckspannungen auf. Für das Kranpaar treten acht annähernd gleichgroße Schwingbreiten auf. Daher wird der Nachweis für die querverrichteten Druckspannungen mit dem schadensäquivalenten Beiwert $\lambda_\sigma = 1,0$ der Beanspruchungsklasse S7 nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12] geführt, die drei Stufen über der Beanspruchungsklasse des Krans von S4 liegt.

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{\text{Ff}} \cdot \Delta\sigma_{\text{oz}}}{\Delta\sigma_{\text{C}}/\gamma_{\text{Mf}}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,1 \text{ kN/cm}^2}{3,6 \text{ kN/cm}^2/1,15} = 0,67 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$\sum D_{\sigma_z} = 0,67^3 = 0,30$$

6.8.6.3 | Globale Querkraftschubspannung

– Schubspannungsschwingbreiten am Auflager

Größte Spannungsschwingbreite:

$\max \Delta V_z \leq 1380 \text{ kN}$, vgl. Bild 6.18c

$$\max \Delta\tau_{\text{xz}} = \frac{V_z \cdot S_{y,3}}{I_y \cdot t} = \frac{1380 \text{ kN} \cdot 20085 \text{ cm}^3}{2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 \cdot 2,0 \text{ cm}} = 5,2 \text{ kN/cm}^2$$

6. Berechnungsbeispiel 1

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta V_z \leq 690 \text{ kN, vgl. Bild 6.18c}$$

$$\Delta \tau_{xz} = 2,6 \text{ kN/cm}^2$$

6.8.6.4 | Lokale Schubspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Die lokalen Schubspannungen werden nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.2] ermittelt.

$$\Delta \tau_{oxz} = 2 \cdot 0,2 \cdot \Delta \sigma_{oz} = 2 \cdot 0,2 \cdot 2,1 \text{ kN/cm}^2 = 0,8 \text{ kN/cm}^2$$

6.8.6.5 | Überlagerung von lokalen und globalen Schubspannungen in Feldmitte

Größte Spannungsschwingbreite:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{xz} + \Delta \tau_{oxz} = 2,6 + 0,8 = 3,4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 3,4 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,57$$

$$D_{\tau, \max} = 0,57^5 = 0,06 < 1 \quad (\checkmark)$$

Sieben weitere, untergeordnete Spannungsschwingbreiten:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{xz} + \Delta \tau_{oxz} = 2,6 + 0,8 = 3,4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta \tau}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 3,4 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,32$$

$$D_{\tau, i} = 0,32^5 < 1 \quad (\checkmark)$$

Durch den schadensäquivalenten Beiwert λ_τ wird angenommen, dass ein Arbeitsspiel (Überfahrt) des Einzelkrans bzw. des Kranpaars zu einem Spannungsschwingenspiel führt. Beim Auftreten von mehreren Spannungsschwingbreiten pro Arbeitsspiel ist daher deren Schädigungssumme zu bilden:

$$\sum D_\tau = D_{\tau, \max} + 7 \cdot D_{\tau, i} = 0,06 + 7 \cdot 0,032^5 = 0,08 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.6.6 | Kombinierte Schädigungen aus verschiedenen Spannungsarten in Feldmitte

$$D = \sum D_{\sigma z} + \sum D_\tau = 0,30 + 0,08 = 0,38 < 1 \quad (\checkmark)$$

6. Berechnungsbeispiel 1

6.8.7 | Detail 4: Unterflansch-Steg-Verbindung

6.8.7.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen:

Normalspannungen längs zur Naht $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 125, $\Delta\sigma_C = 125 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.1, Detail 2], vgl. Bild 6.15h. Der Ermüdungsnachweis für das Grundmaterial ist für die Feldmitte zu führen.

– Nahtversagen:

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 80, $\Delta\tau_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.5, Detail 8], vgl. Bild 6.15i. Der Ermüdungsnachweis für die Schweißnähte ist am Auflager zu führen.

6.8.7.2 | Globale Biegespannungen

Spannungsschwingbreite aus Trägerbiegung in Feldmitte im Stegblech:

$M_y = 3780 \text{ kNm}$, vgl. Bild 6.18b

$$\Delta\sigma_x = \frac{\Delta M_y}{W_{y,4}} = \frac{378000 \text{ kNcm}}{28061 \text{ cm}^3} = 13,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{\text{Ff}} \cdot \Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_C / \gamma_{\text{Mf}}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 13,5 \text{ kN/cm}^2}{12,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,62 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.7.3 | Globale Querkraftschubspannung

Spannungsschwingbreite aus Querkraftschub am Auflager in den Schweißnähten ($a = 2 \cdot 5 \text{ mm} = 1,0 \text{ cm}$):

$\max \Delta V_z \leq 1380 \text{ kN}$, vgl. Bild 6.18c

$$\max \Delta\tau_{xz} = \frac{V_z \cdot S_{y,4}}{I_y \cdot t} = \frac{1380 \text{ kN} \cdot 11419 \text{ cm}^3}{2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 \cdot 1,0 \text{ cm}} = 5,9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{\text{Ff}} \cdot \Delta\tau_{xz}}{\Delta\tau_C / \gamma_{\text{Mf}}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 5,9 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,56 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.8 | Detail 5: Quersteifenanschluss an Oberflansch

6.8.8.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen:

Normalspannungen quer zur Naht $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.4, Detail 6], vgl. Bild 6.16a. Der Ermüdungsnachweis für das Grundmaterial ist für die Feldmitte zu führen.

– Nahtversagen:

Lokale Druckspannungen $\Delta\sigma_z$: Kerbfall 36, $\Delta\sigma_C = 36 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.10, Detail 4], vgl. Bild 6.16b. Der Ermüdungsnachweis für die Schweißnähte ist zu führen.

6.8.8.2 | Globale Biegespannungen

Spannungsschwingbreite aus Trägerbiegung in Feldmitte:

6. Berechnungsbeispiel 1

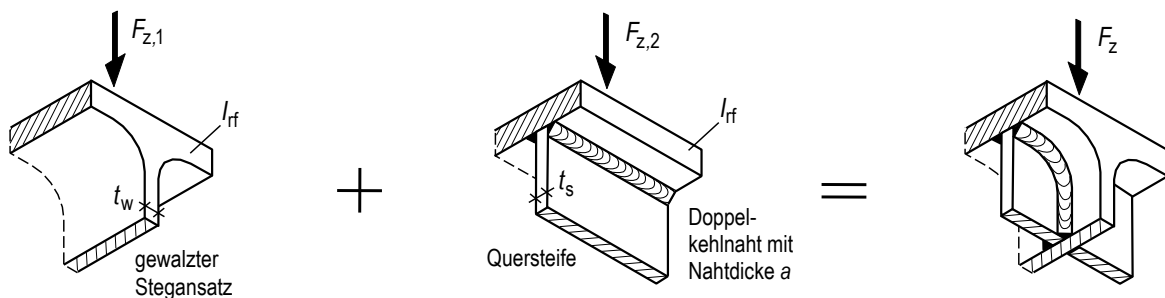
$M_y = 3780 \text{ kNm}$, vgl. Bild 6.18b

$$\Delta\sigma_x = \frac{\Delta M_y}{W_{y,2}} = \frac{378000 \text{ kNcm}}{46475 \text{ cm}^3} = 8,1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 8,1 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,58 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.8.3 | Lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung

Die lokale Druckspannung aus zentrischer Radlasteinleitung wird unter Berücksichtigung der elastischen Schienenunterlage und von 12,5% Schienenkopfabnutzung ermittelt. Die lokale Druckspannung in der Schweißnaht der Quersteife am Oberflansch wird gemäß Bild 6.19 aus der Überlagerung der Lastausbreitung im Trägersteg und in den Quersteifen ermittelt.



Spannung in Steg:

$$\sigma_{oz,1} = \frac{F_{z,1}}{\ell_{\text{eff},1} \cdot t_w}$$

$$\text{mit } \ell_{\text{eff},1} = 4,25 \cdot 3 \sqrt{\frac{l_{rf}}{t_w}}$$

Spannung in Quersteife:

$$\sigma_{oz,2} = \frac{F_{z,2}}{\ell_{\text{eff},2} \cdot t_s}$$

$$\text{mit } \ell_{\text{eff},2} = 4,25 \cdot 3 \sqrt{\frac{l_{rf}}{t_s}}$$

Aus der Verträglichkeitsbedingung

$$\sigma_{oz,1} = \sigma_{oz,2} = \sigma_{oz}$$

folgt für die Schweißnahtspannung:

$$\sigma_{oz} = \frac{F_z}{\ell_{\text{eff},1} \cdot t_w + \ell_{\text{eff},2} \cdot 2 \cdot a}$$

Bild 6.19: Nennspannung in der Schweißnaht der Quersteife am Oberflansch mit Radlasteinleitung unter Berücksichtigung einer elastischen Schienenunterlage

Lastausbreitungslänge im Steg an der Unterkante des Oberflanschs:

$$\ell_{\text{eff},1} = 30,1 \text{ cm} \quad \text{vgl. Abs. 6.8.5.3}$$

Lastausbreitungslänge in den Quersteifen ($t_s = 15 \text{ mm}$):

$$\ell_{\text{eff},2} = 4,25 \sqrt[3]{l_{rf}/t_s} = 4,25 \sqrt[3]{1056 \text{ cm}^4 / 1,5 \text{ cm}} = 37,8 \text{ cm}$$

Damit ergeben sich die Druckspannungen in den Schweißnähten der Quersteife ($a = 6 \text{ mm}$) am Oberflansch unter den vier Laufrädern eines Krans zu:

$$\sigma_{oz} = F_z / (\ell_{\text{eff},1} \cdot t_w + \ell_{\text{eff},2} \cdot 2 \cdot a) = F_z / (30,1 \text{ cm} \cdot 2,98 + 37,8 \text{ cm} \cdot 2 \cdot 0,6 \text{ cm})$$

1. Laufrad: $F_z = 427 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 3,2 \text{ kN/cm}^2$

2. Laufrad: $F_z = 412 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 3,1 \text{ kN/cm}^2$

3. Laufrad: $F_z = 417 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 3,1 \text{ kN/cm}^2$

4. Laufrad: $F_z = 407 \text{ kN} \rightarrow \sigma_{oz} = 3,0 \text{ kN/cm}^2$

6. Berechnungsbeispiel 1

Für die weitere Betrachtung wird für alle vier Laufräder von einem Mittelwert von $\sigma_{oz} = 3,1$ kN/cm² ausgegangen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Verdrehung des HD-Profil-Oberflanschs im Bereich der Quersteifen gering ist. Daher wird die Biegung des Trägerstegs aus exzentrischer Radlasteinleitung vernachlässigt.

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) treten vier annähernd gleichgroße Schwingbreiten der lokalen quergerichteten Druckspannungen auf. Für das Kranpaar treten acht annähernd gleichgroße Schwingbreiten auf. Daher wird der Nachweis für die quergerichteten Druckspannungen mit dem schadensäquivalenten Beiwert $\lambda_\sigma = 1,0$ der Beanspruchungsklasse S7 nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12] geführt, die drei Stufen über der Beanspruchungsklasse des Krans von S4 liegt.

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{oz}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 3,1 \text{ kN/cm}^2}{3,6 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,99 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.9 | Detail 6: Quersteifenanschluss an Steg

6.8.9.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen:

Das Grundmaterial am Nahtübergang zum Steg des HD-Profiles wird betrachtet. Der Nahtübergang zur Steife ist geringer beansprucht.

Es treten lokale Druckspannungen σ_{oz} aus Radlasteinleitung in Richtung der Naht auf. Es wirken weiterhin Normalspannungen σ_x quer zur Naht und Schubspannungen.

Normalspannungen quer zur Naht $\Delta\sigma_x$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80$ N/mm² [18, Tab. 8.4, Detail 6], vgl. Bild 6.16c. Dieser Nachweis wurde bereits bei Detail 5 für die größeren Flanschspannungen erbracht, vgl. Abs. 6.8.8.2.

$$D_{\sigma_x} \leq 0,58^3$$

Lokale Druckspannungen längs der Naht $\Delta\sigma_{oz}$: Kerbfall 100, $\Delta\sigma_C = 100$ N/mm² [18, Tab. 8.2, Detail 3], vgl. Bild 6.16d. Der Nachweis mit den lokalen Druckspannungen $\Delta\sigma_{oz}$ aus Abs. 6.8.8.3 ergibt:

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{oz}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 3,1 \text{ kN/cm}^2}{10 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,36 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$D_{\sigma_{oz}} = 0,36^3$$

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 100, $\Delta\sigma_C = 100$ N/mm² [18, Tab. 8.1, Detail 6], Bild 6.16e. Der Nachweis wird durch den Nachweis der Schubspannungen bei Detail 2 in Abs. 6.8.5.9 mit abgedeckt. Da hier betrachtete Konstruktionsdetail weist geringere lokale Schubspannungen auf.

$$\sum D_\tau \leq 0,013$$

Die Überlagerung der Schädigungen aus den verschiedenen Spannungsarten ergibt:

6. Berechnungsbeispiel 1

$$D = D_{\sigma_x} + D_{\sigma_{oz}} + \sum D_{\tau} = 0,58^3 + 0,36^3 + 0,013 = 0,26 < 1 \quad (\checkmark)$$

– Nahtversagen:

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.5, Detail 8], Bild 6.16f. Der Ermüdungsnachweis für die Schweißnähte für Detail 5 (vgl. Abs. 6.8.8.3) deckt diesen Nachweis mit ab, wenn die Doppelkehlnaht am Steg mit Nahtdicke $a = 6 \text{ mm}$ ausgeführt wird.

6.8.10 | Detail 7: Knotenblechanschluss an Steg

6.8.10.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen am Nahtübergang der Schmalseite des Knotenblechs:

In Anlehnung an die Anmerkung in der Kerbfalltabelle von DIN EN 1993-1-9 zum Steifenende einer nicht eingepassten Quersteife in [18, Tab. 8.4, Detail 7] wird für das betrachtete Konstruktionsdetail die Hauptspannung infolge der auftretenden Normalspannungen $\Delta\sigma_z$ und Schubspannungen $\Delta\tau$ bewertet.

Hauptspannung: Kerbfall 56, $\Delta\sigma_C = 56 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.4, Detail 1], vgl. Bild 6.16g.

– Grundmaterialversagen am Nahtübergang der Längsseite des Knotenblechs :

Längsspannungen $\Delta\sigma_z$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.4, Detail 6], vgl. Bild 6.16h.

6.8.10.2 | Hauptspannungen an Schmalseite des Knotenblechs

– Spannungsschwingbreite aus Trägerbiegung in Feldmitte im Stegblech auf Höhe der Horizontalträgeranbindung wird mit dem Widerstandsmoment der Faser 2a abgeschätzt, vgl. Bild 6.2:

$M_y = 3780 \text{ kNm}$, vgl. Bild 6.18b

$$\sigma_x \approx \frac{M_y}{W_{y,2a}} = \frac{378000 \text{ kNcm}}{47724 \text{ cm}^3} = 7,9 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Druck)}$$

– Die lokale Druckspannung im Steg aus zentrischer Radlasteinleitung wird unter Berücksichtigung der elastischen Schienenunterlage und von 12,5% Schienenkopfabnutzung ermittelt. Die lokale Druckspannung im geschweißten Steganschluss wird wie folgt berechnet, vgl. Abs. 6.8.5.3:

Lastausbreitungslänge auf Höhe der Horizontalträgeranbindung:

$$l_{\text{eff}} = 30,1 \text{ cm} + 2 \cdot (10 - 4,8 \text{ cm}) = 40,5 \text{ cm}$$

Damit ergeben sich die Druckspannungen unter den vier Laufrädern eines Krans zu:

$$\sigma_{oz} = F_z / (l_{\text{eff}} \cdot t_w) = F_z / (40,5 \text{ cm} \cdot 2,98 \text{ cm})$$

6. Berechnungsbeispiel 1

1. Laufrad: $F_z = 427 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{oz} = 3,5 \text{ kN/cm}^2$

2. Laufrad: $F_z = 412 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{oz} = 3,4 \text{ kN/cm}^2$

3. Laufrad: $F_z = 417 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{oz} = 3,4 \text{ kN/cm}^2$

4. Laufrad: $F_z = 407 \text{ kN} \rightarrow \Delta\sigma_{oz} = 3,4 \text{ kN/cm}^2$

Für die weitere Betrachtung wird für alle vier Laufräder von einem Mittelwert von $\Delta\sigma_{oz} = 3,4 \text{ kN/cm}^2$ (Druck) ausgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass die Verdrehung des HD-Profil-Oberflanschs im Steifenbereich gering ist. Die Stegbiegung aus exzentrischer Radlasteinleitung wird daher vernachlässigt.

– Die Schubspannungen, die in Feldmitte gleichzeitig mit den größten Biegespannungen auftreten, werden für eine Querkraft $V = \max F_z$ abgeschätzt:

$\max V \leq 427 \text{ kN}$, vgl. Bild 6.18a

$$\max \tau = \frac{V \cdot S_{y,2a}}{I_y \cdot t} = \frac{427 \text{ kN} \cdot 20\,085 \text{ cm}^3}{2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 \cdot 2,98 \text{ cm}} = 1,1 \text{ kN/cm}^2$$

– Die Hauptspannungsschwingbreite beträgt damit:

$$\begin{aligned}\sigma_H &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{oz}^2 - \sigma_x \cdot \sigma_{oz} + 3 \cdot \tau^2} \\ &= \sqrt{(-7,9)^2 + (-3,4)^2 - (-7,9) \cdot (-3,4) + 3 \cdot (1,1)^2} \\ &= 7,1 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) bzw. des Kranpaars tritt diese Hauptspannungsschwingbreite nur einmal auf.

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 7,1 \text{ kN/cm}^2}{5,6 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,72 < 1 \quad (\checkmark)$$

6.8.10.3 | Normalspannungen an Längsseite des Knotenblechs

Die lokale Druckspannung für alle vier Laufräder des Einzelkrans beträgt $\sigma_{oz} = 3,4 \text{ kN/cm}^2$, vgl. Abs. 6.8.10.2.

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) treten vier annähernd gleichgroße Schwingbreiten der lokalen quergerichteten Druckspannungen auf. Für das Kranpaar treten damit acht annähernd gleichgroße Schwingbreiten auf. Daher wird der Nachweis für die quergerichteten Druckspannungen mit dem schadensäquivalenten Beiwert $\lambda_\sigma = 1,0$ der Beanspruchungsklasse S7 nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12] geführt, die drei Stufen über der Beanspruchungsklasse des Krans von S4 liegt.

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{oz}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 3,4 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,49 < 1 \quad (\checkmark)$$

6. Berechnungsbeispiel 1

6.8.11 | Detail 8: Stirnplattenanschluss an Steg

6.8.11.1 | Kerbfalleinordnung

– Nahtversagen:

Schubspannungen $\Delta\tau$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.5, Detail 8], vgl. Bild 6.16i.

6.8.11.2 | Schubspannungen

Der Steg des Kranbahnträgers wird mit einer Doppelkehlnaht ($2 \cdot 7 \text{ mm}$) an die Kopfplatte angeschlossen. Die größte Schubspannung tritt am Auflager im Querschnittsschwerpunkt auf.

$\max \Delta V \leq 1\,380 \text{ kN}$, vgl. Bild 6.18c

$$\max \Delta\tau_{xz} = \frac{V \cdot S_{y,\max}}{I_y \cdot t} = \frac{1\,380 \text{ kN} \cdot 20\,085 \text{ cm}^3}{2,663 \cdot 10^6 \text{ cm}^4 \cdot 2 \cdot 0,7 \text{ cm}} = 7,4 \text{ kN/cm}^2$$

Die lokalen Schubspannungen aus Radlasteinleitung dürfen nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.2(2)] im Schwerpunkt des Querschnitts als abgeklungen betrachtet werden:

$$z = 621 \text{ mm} > 0,2 \cdot h_w = 0,2 \cdot (1600 - 48 - 30) = 304 \text{ mm} (\checkmark)$$

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) bzw. des Kranpaars tritt ein Schwingenspiel auf.

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{xz}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,66 \cdot 1,0 \cdot 7,4 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,70 < 1 (\checkmark)$$

6.8.12 | Detail 9: Stirnplattenanschluss an Flansch

6.8.12.1 | Kerbfalleinordnung

– Grundmaterialversagen:

Normalspannung quer zur Naht $\Delta\sigma_z$: Kerbfall 80, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ [18, Tab. 8.4, Detail 6], vgl. Bild 6.16j.

6.8.12.2 | Normalspannungen

Die Schwingbreite der Auflagerkraft entspricht der Schwingbreite der Querkraft an dieser Stelle. Der Auflagerdruck in der Kopfplatte mit einer Breite von 40 cm und einer Blechdicke von 3 cm beträgt:

$\max \Delta V \leq 1\,380 \text{ kN}$, vgl. Bild 6.18c

$$\max \Delta\sigma_z = \frac{V}{b \cdot t} = \frac{1\,380 \text{ kN}}{40 \text{ cm} \cdot 3,0 \text{ cm}} = 11,5 \text{ kN/cm}^2$$

Pro Arbeitsspiel des Einzelkrans (Kranüberfahrt) bzw. des Kranpaars tritt ein Schwingenspiel auf.

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_z}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 1,0 \cdot 11,5 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2 / 1,15} = 0,82 < 1 (\checkmark)$$

7 | Berechnungsbeispiel 2

7.1 | Vorbemerkung

In [24] wird ein auf Ermüdungsversuchen basierender Vorschlag für den Ermüdungsnachweis von durchgehenden Schienenschweißnähten zur Schienenbefestigung formuliert, der in diesem Beispiel angewendet wird. Die wichtigsten Merkmale dieses Vorschlags sind:

- Bestimmungsgleichung für quergerichtete Druckspannungen von Schienenschweißnähten,
- Kerbfall für Schienenschweißnähte, Bild 7.1,
- Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mf} = 1,0$ für den Regelfall der Bemessung von Kranbahnen in Gebäuden (zwei Inspektionen über die Nutzungsdauer) aufgrund des in den Versuchen beobachteten Bruchverhaltens und dem Ausmaß der Schadensfolgen.

Zur eindeutigen Abgrenzung von den Nennspannungen von Flansch-Steg-Verbindungen nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.1 bis 3] werden die hier verwendeten Nennspannungen von Schienenschweißnähten mit einem Überstrich gekennzeichnet, z. B. $\bar{\sigma}_{\perp}$.

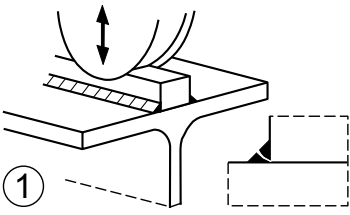

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Schweißsymbol	Beschreibung	Anforderung
57			Befestigung einer Kranschiene aus warmgewalztem Flach- oder Vierkantstab auf einem stegunterstützten Flansch mit Radlasteinleitung Schienenbefestigung mittels durchgehender Längsnähte	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schienenschweißnaht nach [...]

Bild 7.1: Kerbfall für durchgehende Schienenschweißnähte mit Querbeanspruchung

7.2 | Statisches System und Belastung

Es wird ein zweifeldrig durchlaufender Kranbahnträger mit Walzquerschnitt HE 400 A ($b_f = 300$ mm, $t_f = 19$ mm, $t_w = 11$ mm, $r = 27$ mm) und aufgeschweißter Schiene $b_r \times h_r = 60 \times 40$ mm betrachtet, der durch einen Werkstattkran (Hubklasse HC2, Beanspruchungsklasse S2) mit zwei Laufrädern pro Kopfträger befahren wird, Bild 7.2a. Die beiden Radlasten des Krans mit einem Abstand von 3 000 mm sind mit $F = 100$ kN gleich. Es wird der Ermüdungsnachweis der Schienenschweißnähte an der Innenstütze mit einer Einzelnahtdicke von $a = 4,5$ mm geführt. Der dynamische Vergrößerungsfaktor beträgt $\varphi_{fat} = 1,1$.

7.3 | Lokale Druckspannungen aus Radlasteinleitung

Die lokalen Druckspannungen in den Schienenschweißnähten werden mit Hilfe von Bild 7.3 berechnet. Hierzu sind folgende Eingangswerte erforderlich:

7. Berechnungsbeispiel 2

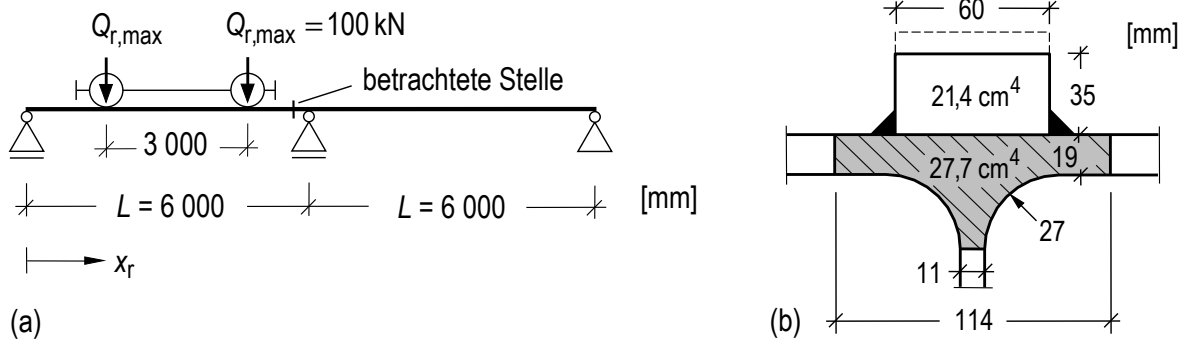


Bild 7.2: Berechnungsbeispiel mit aufgeschweißter Kranschiene: (a) statisches System und Belastung, (b) Ermittlung der Trägheitsmomente von Schiene und effektivem Oberflansch

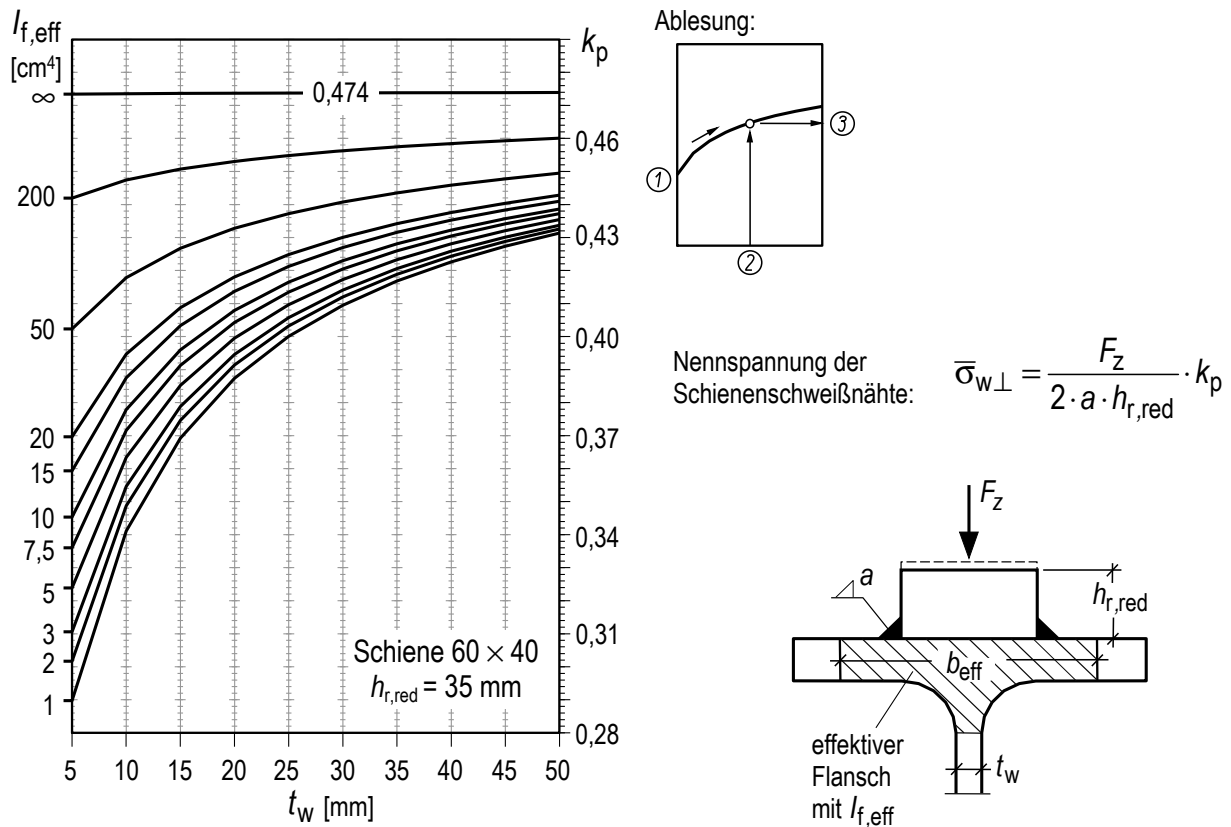


Bild 7.3: Bemessungsdiagramm zur Ermittlung der Nennspannung von Schienenschweißnähten zur Befestigung von Schienen 60×40 mm unter Berücksichtigung von 12,5% Verschleiß nach [24]

– Radlast für Ermüdung einschließlich dynamischem Vergrößerungsfaktor:

$$F_z = \varphi_{fat} = 1,1 \cdot 100 \text{ kN} = 110 \text{ kN}$$

– Trägheitsmoment der Schiene unter Berücksichtigung von 12,5% Schienenkopfabnutzung, Bild 7.2b: $I_r = 6 \text{ cm} \cdot (0,875 \cdot 4 \text{ cm})^3 / 12 = 21,4 \text{ cm}^4$

– Trägheitsmoment des Oberflanschs mit wirksamer Breite b_{eff} , Bild 7.2b:

$$h_{r,red} = 0,875 \cdot 4,0 \text{ cm} = 3,5 \text{ cm} \text{ (Abnutzung von 12,5\%)}$$

$$b_{eff} = b_f + h_{r,red} + t_f = 6,0 + 3,5 + 1,9 = 11,4 \text{ cm}$$

$$I_{f,eff} = 27,7 \text{ cm}^4 \text{ (Computerprogramm für Querschnittswerte)}$$

Aus Bild 7.3 wird $k_p = 0,41$ abgelesen.

7. Berechnungsbeispiel 2

Damit ergeben sich quergerichtete Druckspannungen in den Schienenschweißnähten von:

$$\bar{\sigma}_{w\perp} = \Delta\bar{\sigma}_{w\perp} = \frac{F_z}{2 \cdot a \cdot h_{r,\text{red}}} \cdot k_p = \frac{110 \text{ kN}}{2 \cdot 0,45 \text{ cm} \cdot 3,5 \text{ cm}} \cdot 0,41 = 14,3 \text{ kN/cm}^2$$

Die Druckspannungen bzw. Druckspannungsschwingbreiten treten pro Kranüberfahrt jeweils einmal unter den beiden Kranlaufrollen auf.

7.4 | Lokale Schubspannungen aus Radlasteinleitung

Die lokalen Schubspannungen aus Radlasteinleitung werden nach [24] aus den lokalen Druckspannungen wie folgt abgeschätzt:

$$\bar{\tau}_{w\parallel\text{lokal}} = \pm 0,2 \cdot \bar{\sigma}_{w\perp} = \pm 0,2 \cdot 14,3 \text{ kN/cm}^2 = 2,86 \text{ kN/cm}^2$$

7.5 | Globale Schubspannungen

Die Schiene (einschließlich 12,5% Abnutzung) ist schubstarr mit dem Walzträger verbunden und ist daher bei der Ermittlung der Trägerquerschnittswerte anzusetzen. Die globalen Schubspannungen in den Schienenschweißnähten berechnen sich wie folgt:

$$\bar{\tau}_{w\parallel\text{global}} = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot 2 \cdot a} = \frac{V_z \cdot 394,2 \text{ cm}^3}{53\,468 \text{ cm}^4 \cdot 2 \cdot 0,45 \text{ cm}} = 8,192 \cdot 10^{-3} \cdot V_z \text{ cm}^{-2}$$

Der Verlauf der Querkraft V_z an der Innenstütze während einer Kranüberfahrt wurde mit einem Statikprogramm ermittelt. Bild 7.4 zeigt den mit obiger Gleichung ermittelten Schubspannungsverlauf in den Schienenschweißnähten infolge einer Kranüberfahrt.

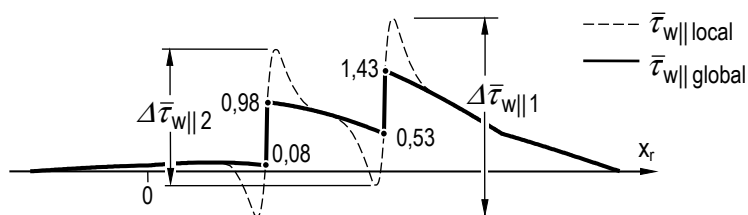


Bild 7.4: Schubspannungsverlauf in den Schienenschweißnähten an der Innenstütze in [kN/cm²]

7.6 | Schubspannungsschwingbreite

Die Schwingbreiten der überlagerten Schubspannungen, die sich aus globalen Anteilen aus Abs. 7.5 und lokalen Anteilen aus Abs. 7.4 zusammensetzen, ergeben sich nach Bild 7.4 zu:

$$\bar{\tau}_{w\parallel 1} = (1,43 + 2,86) - (0,08 - 2,86) = 7,1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\bar{\tau}_{w\parallel 2} = (0,98 + 2,86) - (0,53 - 2,86) = 6,2 \text{ kN/cm}^2$$

7. Berechnungsbeispiel 2

7.7 | Ermüdungsnachweise

Für den Ermüdungsnachweis von Schienenschweißnähten wird ein Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_C = 57 \text{ N/mm}^2$ unter quergerichteten Druckspannungen und von $\Delta\tau_C = 80 \text{ N/mm}^2$ unter Schubspannungen empfohlen. Es wird ein Teilsicherheitsbeiwert der Ermüdungsfestigkeit für Schienenschweißnähte von $\gamma_{Mf} = 1,0$ für den Regelfall der Bemessung von Kranbahnen in Gebäuden mit zwei Inspektionen über die Nutzungsdauer empfohlen. Unter Berücksichtigung der schadensäquivalenten Beiwerte $\lambda_\sigma = 0,315$ und $\lambda_\tau = 0,500$ für die Beanspruchungsklasse S2 nach DIN EN 1991-3 [12, Tab. 2.12] ergeben sich folgende Einzelnachweise:

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\sigma}_{w\perp}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,315 \cdot 1,0 \cdot 14,3 \text{ kN/cm}^2}{5,7 \text{ kN/cm}^2/1,0} = 0,790 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\tau}_{w\parallel 1}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,500 \cdot 1,0 \cdot 7,1 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2/1,0} = 0,44 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\tau}_{w\parallel 2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,500 \cdot 1,0 \cdot 6,2 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2/1,0} = 0,39 < 1 \quad (\checkmark)$$

Zur Berücksichtigung des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Beanspruchungsarten wird die Schadenssumme D nach DIN EN 1993-1-9 [18, Abs. 8(3)] aus der Überlagerung der unterschiedlichen Teilschädigungen berechnet. Bei den quergerichteten Druckspannungen ist hierbei das Auftreten von 2 Schwingspielen pro Kranüberfahrt zu berücksichtigen. Nach DIN EN 1993-1-9 [18, Abs. 5(6)] zählen die Längsspannungen $\bar{\sigma}_{w\parallel}$ nicht zu den ermüdungsrelevanten Spannungen von Kehlnähten und werden daher vernachlässigt.

$$D = 2 \cdot (0,790)^3 + 0,44^5 + 0,39^5 = 1,01 \approx 1,0 \quad (\checkmark)$$

7.8 | Vergleich mit derzeitiger Bemessung nach DIN EN 1993-6

Bei der derzeitigen Bemessung ergibt sich für den betrachteten Kranbahnträger eine theoretisch erforderliche Einzelnahtdicke von $a = 6,3 \text{ mm}$. Die wichtigen Zwischenergebnisse dieser Bemessung sind:

- Trägheitsmoment des Oberflanschs einschließlich Schiene mit 12,5% Abnutzung bei Vernachlässigung der Walzausrundung:

$$I_{f,eff} = 105,7 \text{ cm}^4$$

$$\ell_{eff} = 14,9 \text{ cm an der Flanschunterseite nach DIN EN 1993-6 [19, Tab. 5.1]}$$

$$\ell_{eff} = 14,9 \text{ cm} - 2 \cdot t_f = 11,1 \text{ cm an der Flanschoberseite (= Ort der Schienenschweißnähte)}$$

- Lokale Druckspannungen aus Radlasteinleitung nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.1]:

$$\bar{\sigma}_{w\perp} = 7,88 \text{ kN/cm}^2$$

- Lokale Schubspannungen aus Radlasteinleitung nach DIN EN 1993-6 [19, Abs. 5.7.2]:

$$\bar{\tau}_{w\parallel\text{lokal}} = \pm 1,58 \text{ kN/cm}^2$$

7. Berechnungsbeispiel 2

– Globale Schubspannungen:

$$\bar{\tau}_{w||\text{global}} = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot 2 \cdot a} = \frac{V_z \cdot 394,2 \text{ cm}^3}{53\,468 \text{ cm}^4 \cdot 2 \cdot 0,63 \text{ cm}} = 5,85 \cdot 10^{-3} \cdot V_z \text{ cm}^{-2}$$

– Schubspannungsschwingbreiten:

$$\bar{\tau}_{w||1} = 4,1 \text{ kN/cm}^2, \bar{\tau}_{w||2} = 3,5 \text{ kN/cm}^2$$

– Ermüdungsnachweise mit $\gamma_{Mf} = 1,15$ für den Regelfall der Bemessung von Kranbahnen mit zwei Inspektionen über die Nutzungsdauer nach DIN EN 1993-6/NA [20, Tab. NA.3]

Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9 [18]:

T-Stoß mit Doppelkehlnaht unter Querbeanspruchung [18, Tab. 8.10]: $\Delta\sigma_C = 3,6 \text{ kN/cm}^2$

T-Stoß Doppelkehlnaht unter Schubbeanspruchung [18, Tab. 8.5]: $\Delta\tau_C = 8,0 \text{ kN/cm}^2$

$$\frac{\lambda_\sigma \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\sigma}_{w\perp}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,315 \cdot 1,0 \cdot 7,88 \text{ kN/cm}^2}{3,6 \text{ kN/cm}^2/1,15} = 0,793 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\tau}_{w||1}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,500 \cdot 1,0 \cdot 4,1 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2/1,15} = 0,29 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$\frac{\lambda_\tau \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\bar{\tau}_{w||2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} = \frac{0,500 \cdot 1,0 \cdot 3,5 \text{ kN/cm}^2}{8,0 \text{ kN/cm}^2/1,15} = 0,25 < 1 \quad (\checkmark)$$

$$D = 2 \cdot (0,793)^3 + 0,29^5 + 0,25^5 = 1,0 \quad (\checkmark)$$

Zusammenfassend wird somit festgestellt, dass sich die theoretisch erforderliche Nahtdicke auf Grundlage einer Bemessung nach [24] gegenüber der derzeitigen Bemessung nach DIN EN 1993-6 um ca. 27% reduziert.

Literaturverzeichnis

- [1] Bauproduktenrichtlinie: *Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG)*. 1988
- [2] DIN 15070: *Krane: Berechnung der Lagerbeanspruchungen der Laufräder*. 1977
- [3] DIN 4132: *Kranbahnen, Stahltragwerke: Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung*. Februar 1981 (zurückgezogen)
- [4] DIN 536-1: *Kranschienen - Teil 1: Kranschienen mit Fußflansch Form A: Maße, statische Werte, Stahlsorten*. September 1991
- [5] DIN 536-2: *Kranschienen: Teil 2: Form F (flach): Maße, statische Werte, Stahlsorten*. Dezember 1974
- [6] DIN EN 10058: *Warmgewalzte Flachstäbe aus Stahl für allgemeine Verwendung: Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße*. Ausgabedatum: Februar 2004
- [7] DIN EN 10059: *Warmgewalzte Vierkantstäbe aus Stahl für allgemeine Verwendung: Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße*. Deutsches Institut für Normung, 2004
- [8] DIN EN 1090-2: *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*. Ausgabedatum: Dezember 2008
- [9] DIN EN 13001-1: *Krane: Konstruktion allgemein: Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen*. Deutsches Institut für Normung, 2015
- [10] DIN EN 1990: *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*. 2010
- [11] DIN EN 1991-3: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen - Berichtigung 1*. August 2013
- [12] DIN EN 1991-3: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen*. Dezember 2010
- [13] DIN EN 1991-3/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1 – Teil 3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen*. 2018
- [14] DIN EN 1993-1-1: *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2010
- [15] DIN EN 1993-1-5: *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*. 2010
- [16] DIN EN 1993-1-5/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*. 2010
- [17] DIN EN 1993-1-8: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*. Dezember 2010
- [18] DIN EN 1993-1-9: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*. Dezember 2010
- [19] DIN EN 1993-6: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 6: Kranbahnen*. Dezember 2010

- [20] DIN EN 1993-6/NA: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3 - Teil 6: Kranbahnen*. Dezember 2017
- [21] Dubas, P. ; Gehri, E.: *Stahlhochbau*. Berlin : Springer, 1988
- [22] Eckinger, K.: Die Befestigung von Kranschienen auf Stahl- und auf Beton-Kranbahnen. In: *Stahl und Eisen* 74 (1954), Nr. 22, S. 1418-1424
- [23] Euler, M. ; Kuhlmann, U.: *Bemessung von Kranbahnen nach DIN EN 1993-6*. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): *Stahlbaukalender 2017*. Berlin : Ernst & Sohn, 2017
- [24] Euler, M. ; Kuhlmann, U.: Aufgeschweißte Flach- und Vierkantschienen von Kranbahnträgern: Ermüdungsnachweis für Schweißnähte zur Schienenbefestigung. In: *Stahlbau* 87 (2018), Nr. 11
- [25] Euler, M. ; Kuhlmann, U. ; Steinmann, R.: Beitrag zu Kranbahnkonsolen im Stahlhochbau: Ermüdungsnachweis für die Lasteinleitung in den Konsolensteg. In: *Stahlbau* (2019)
- [26] Gehri, E.: Nutzungsgerechter Bau einer schweren Industriehalle. In: *IABSE Reports* 22 (1975)
- [27] Hennies, K.: *Beitrag zur Ermittlung der horizontalen Seitenkräfte in Brückenkrananlagen infolge Schräglauf des Kranes*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1968
- [28] Hobbacher, A.: *Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIV-Doc. No. XIII-2460-13/XV-1440-13*. Paris : International Institute of Welding, 2014
- [29] Hoffmann, K.: Zentrische Lasteinleitung in den Obergurt bei elastisch gebetteten Breitfußschienen - Teil I und II. In: *Fördern und Heben* 32 (1982), S. 36-42 und 83-87
- [30] Hoffmann, K. ; Krenn, E. ; Stanker, G.: *Fördertechnik 1: Bauelemente, ihre Konstruktion und Berechnung*. 4. Wien : Oldenbourg, 1993
- [31] Kraus, M. ; Mämpel, S.: Kennwerte neuer und abgenutzter Kranschienen für die Bemessung von Kranbahnträgern. In: *Stahlbau* 86 (2017), S. 36-44
- [32] Kuhlmann, U. ; Dürr, A. ; Günther, H.-P.: Kranbahnen und Betriebsfestigkeit. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): *Stahlbaukalender*. Berlin : Ernst & Sohn, 2003, S. 375-496
- [33] Kuhlmann, U. ; Feldmann, M. ; Lindner, J. ; Müller, C., Stroetmann, R.: *Beuthkommentar - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Band 1: Allgemeine Regeln und Hochbau DIN EN 1993-1-1 mit Nationalem Anhang, Kommentar und Beispiele*. Berlin : Beuth u. Ernst & Sohn, 2015
- [34] Kuhlmann, U. ; Roos, E. ; Herion, S. ; Euler, M. ; Rettenmeier, P. ; Lipp, A.: *Ermüdungsverhalten von Stahlkonstruktionen unter multiaxialer Beanspruchung durch Radlasten, Ausführlicher Bericht zum DFG-Forschungsvorhaben*. Stuttgart : Universitätsbibliothek, 2016 - <http://dx.doi.org/10.18419/opus-9163>
- [35] Ludewig, S.: *Bewegungsfugen*. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1986
- [36] MacCrimmon, R. A.: *Guide for the design of crane-supporting steel structures*. 2nd Edition, 5th revised printing. Niagara Falls and Ontario : Hatch, 2012
- [37] Maschinenrichtlinie: *Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)*

- [38] Meessen, J. ; Melon, J.: Kranschienenbefestigung auf Stahl und Beton mit einstellbaren Elementen. In: *Maschinenmarkt* 84 (1978), Nr. 53, S. 1057-1060
- [39] MLK-Richtlinie G18: *Kranbahnen*. VEB Metalleichtbaukombinat (Forschungsinstitut Leipzig), 1985
- [40] MLK-Richtlinie G18, Anlage 3: *Kranbahnen - Ergänzungen zur Ausgabe 10.1985*. VEB Metalleichtbaukombinat (Forschungsinstitut Leipzig), 1987
- [41] Oxfort, J.: Zur Beanspruchung der Obergurte vollwandiger Kranbahnträger durch Torsionsmomente und durch Querkraftbiegung unter dem örtlichen Radlastangriff. In: *Der Stahlbau* 32 (1963), S. 360-367
- [42] Oxfort, J.: Zur Biegebeanspruchung des Stegblechanschlusses infolge exzentrischer Radlasten auf dem Obergurt von Kranbahnträgern. In: *Der Stahlbau* 50 (1981), Nr. 7, S. 215-217
- [43] Oxfort, J.: *Stahl-Hoch- und Industriebau: Entwurf und Konstruktion, Vorlesungsskript*. Stuttgart : Universität, Institut für Stahlbau und Holzbau, 1987
- [44] Oxfort, J. ; Bitzer, H.-A.: *Beiblatt 1 zu DIN 4132: Kranbahnen, Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung*. Ausgabedatum: Februar 1981
- [45] Petersen, C.: *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig : Vieweg, 1993
- [46] Seeger, T. ; Olivier, R.: Ertragbare und zulässige Schubspannungen schwingbeanspruchter Schweißverbindungen. In: *Stahlbau* 56 (1987), Nr. 8, S. 231-238
- [47] Seeßelberg, C.: *Kranbahnen - Bemessung und konstruktive Gestaltung*. 5. Aufl. Berlin : Bauwerk, 2016
- [48] Stahl-Eisen-Betriebsblatt (SEB) 368 100: *Geschweißte Kranschienenstöße*. August 1987
- [49] Thiele, R. ; Friese, B.: Gesichtspunkte für die Bemessung von Kranbahnträgern. In: *Wissenschaftliche Berichte der Technischen Hochschule Leipzig* (1980), Nr. 1, S. 25-34
- [50] Unterweger, H. ; Taras, A. ; Kugler, P.: Zugverankerung von gelenkig aufgelagerten Kranbahnträgern - Unerwartet hohe Ermüdungsbeanspruchung und verbesserte Detaillösung. In: *Stahlbau* 84 (2015), Nr. 4, S. 239-245. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201510243>. - DOI 10.1002/stab.201510243
- [51] VDI-Richtlinie 3576: *Schienen für Krananlagen: Schienenverbindungen, Schienenlagerungen, Schienenbefestigungen, Toleranzen für Kranbahnen*. Verein Deutscher Ingenieure, März 2011