Erläuterungen zum Ermüdungsnachweis von Kranbahnen

Autor(en): **Hirt, Manfred A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 30-31

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85509

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Erläuterungen zum Ermüdungsnachweis von Kranbahnen

Von Manfred A. Hirt, Lausanne

Die Totalrevision der Stahlbaunorm [1] und insbesondere die Neufassung des Kapitels «Ermüdung» erforderten eine Überarbeitung der Berechnungsgrundlagen für Kranbahnen [2]. Um den Ermüdungsnachweis erbringen zu können, werden Angaben über die Betriebslasten benötigt, die bei Kranbahnen einerseits durch das Spektrum der gehobenen Lasten, der entsprechenden Stellungen der Kranbrücke und der Krankatze und anderseits durch die Anzahl der Kranbewegungen bestimmt sind. Es handelt sich also um stochastische Beanspruchungen, die nicht ohne weiteres auf einen einfachen Nennwert zurückgeführt werden können. Aufgrund vereinfachender Annahmen wird jedoch versucht, diese Betriebsbeanspruchungen zu erfassen, um dadurch eine Grundlage für den Ermüdungsnachweis zu schaffen.

Die nachfolgenden Ausführungen haben zum Ziel, das in der neuen SZS Empfehlung [3] verwendete Modell für den Ermüdungsnachweis und die darin aufgeführten Berechnungsgrundlagen zu erläutern und dem Konstrukteur näher zu bringen. Zugleich soll ein Gültigkeitsbereich definiert werden, in dem gezeigt wird, unter welchen Umständen die getroffenen Annahmen gerechtfertigt sind.

Grundlagen

Ermüdungsfestigkeit

Wird eine Zugprobe einem Spannungsverlauf unterworfen, der zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert variiert, so kann nach einer gewissen Anzahl Spannungswechsel ein Ermüdungsriss beobachtet werden, der nach zusätzlichen Spannungswechseln zum Bruch der Probe führt. Diese Schädigung kann auftreten, obschon die maximale Spannung wesentlich unter der statischen Fliessgrenze liegt.

Das Grundmaterial eines auf Ermüdung beanspruchten Elementes wird durch die Herstellung und die Formgebung sowie durch konstruktive Massnahmen (z. B. Montagestoss, angeschweisstes Knotenblech) wesentlich beeinflusst, was sich in einer Abminderung der Ermüdungsfestigkeit ausdrückt. Aufgrund umfangreicher Versuche an grossen Probeträgern, die mit verschiedenen Konstruktionsdetails versehen waren, können folgende Aussagen gemacht werden [4]:

1. Die Spannungsdifferenz
   $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
   ist massgebend für die Spannungswechselzahl N bis zum Bruch. Für den Ermüdungsnachweis ergibt sich somit die vereinfachte Tatsache, dass nur der Einfluss der Betriebslasten berücksichtigt werden muss.
2. Ein wichtiger Parameter ist der Einfluss des Kontruktionsdetails, der durch eine Einteilung in wenige Kategorien erfasst werden kann. Diese sind beispielsweise in Tabelle 14 der SIA Norm 161 [1] dargestellt; zugleich sind die entsprechenden Werte der Ermüdungsfestigkeit in Figur 17 gegeben.
3. Die Stahlsorte hat praktisch keinen Einfluss auf die Lebensdauer geschweisster Tragelemente. Dies bedeutet, dass Elemente aus hochfestem Stahl bezüglich Ermüdung keine grössere Ausnutzung erlauben, obschon die Fliessgrenze höher liegt.

Um diese Erkenntnisse nun auf einen Kranbahnträger übertragen zu können, muss zusätzlich eine Aussage über die Betriebsfestigkeit gemacht werden, d. h. die Ermüdungswirkung des wirklichen, variablen Spannungsverlaufs muss auf die Ermüdungsfestigkeit zurückgeführt werden.

Betriebsfestigkeit

Mit dem *Gesetz der linearen Schadenakkumulation* nach *Palmgren-Miner* kann eine äquivalente oder wirksame Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ bestimmt werden, deren Ermüdungswirkung gleich derjenigen der variablen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma_i$ ist:

$$(1)\quad \Delta\sigma_e = \left[\frac{\Sigma n_i \, \Delta\sigma_i^m}{\Sigma n_i}\right]^{1/m}$$

Die einzelnen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma_i$ werden in diesem gewichteten Wert mit der Potenz m berücksichtigt, wobei m die Neigung der Ermüdungsfestigkeitsgeraden darstellt (in der SIA Norm 161 [1] wurde $m = 3$ angenommen). Da diese Geraden parallel sind, ist die Berechnung von $\Delta\sigma_e$ unabhängig vom verwendeten Konstruktionsdetail.

Die Ermüdungswirkung eines gegebenen Spannung-Zeit-Verlaufes kann somit, unter geeigneter Auszählung der einzelnen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma_i$, durch die äquivalente (oder wirksame) Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ und die zugehörige Anzahl Spannungswechsel $N = \Sigma\, n_i$ erfasst und auf die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ der SIA Norm 161 [1] bezogen werden.

Ermüdungsnachweis

Der Ermüdungsnachweis lässt sich durchführen, indem die wirksame Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ gegenübergestellt wird:

$$(2)\quad \Delta\sigma_e \leq \frac{1}{\gamma_R}\,\Delta\sigma_R(N)$$

Es ist zu beachten, dass die von der Anzahl Spannungswechsel N abhängige Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ durch einen Faktor γ_R dividiert wird, der in der Regel einem Wert von 1,25 entspricht (vgl. SIA Norm 161 [1]).

Da dem projektierenden Ingenieur normalerweise diese äquivalente Spannungsdifferenz nicht bekannt ist, kann zum Erbringen des Ermüdungsnachweises auf folgende zwei Arten vorgegangen werden:

1. Es können Angaben gemacht werden, die es erlauben, die wirksame Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ auf eine nominelle Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ zu beziehen

   $$(3)\quad \Delta\sigma_e = \alpha\,\Delta\sigma,$$

   wobei die nominelle Spannungsdifferenz mit einer gegebenen Normlast, wie zum Beispiel der maximalen Radlast der Kranbrücke, bestimmt

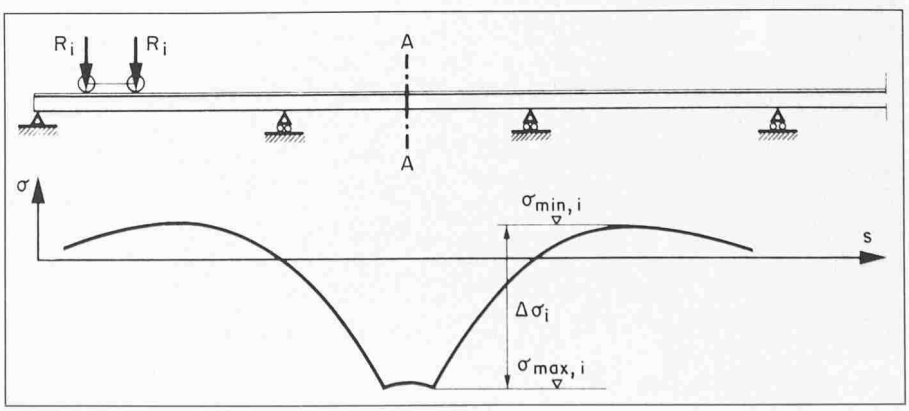


Bild 1. Spannungsverlauf im Querschnitt A-A bei der Überfahrt der Radlasten R_i über den Kranbahnträger

wird. Der Nachweis kann dadurch direkt mit dem Ausdruck (2) durchgeführt werden.

2. Der Ermüdungsnachweis kann aber auch mit der oben erwähnten nominellen Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ erfolgen, wenn die Anzahl Spannungswechsel N durch eine wirksame Spannungswechselzahl N_e

$$(4) \quad N_e = \alpha^m N$$

entsprechend angepasst wird. Dadurch ergibt sich die Forderung:

$$(5) \quad \Delta\sigma \leq \frac{1}{\gamma_R} \Delta\sigma_R(N_e)$$

Die für den Ermüdungsnachweis notwendige wirksame Spannungsdifferenz nach Gleichung (3) oder die wirksame Spannungswechselzahl nach Gleichung (4) berücksichtigen die Ermüdungswirkung der Betriebslasten mit dem Faktor α. Dieser Faktor lässt sich bestimmen, indem geeignete Annahmen über die statistische Häufigkeitsverteilung der Betriebslasten gemacht werden.

Lastannahmen

Die wirklich auftretenden Betriebslasten und die daraus resultierenden Betriebsspannungen in einem Kranbahnträger sind in den meisten Fällen unbekannt. Es muss deshalb versucht werden, die Beanspruchungen des Kranbahnträgers mit geeigneten Lastannahmen zu bestimmen und durch möglichst einfache Kenngrössen zu erfassen.

Spannungsverlauf im Kranbahnträger

Der Spannungsverlauf in einem gegebenen Schnitt des Trägers infolge der Überfahrt eines gegebenen Radlastpaares R_i ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Daraus kann die Spannungsdifferenz

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{max,\,i} - \sigma_{min,i}$$

direkt abgelesen und in die Berechnung eingeführt werden.

(Es kann zudem gezeigt werden, dass zusätzliche sekundäre Spannungsdifferenzen, die kleiner sind als 50 Prozent dieses maximalen Wertes, für den Ermüdungsnachweis vernachlässigt werden können, sofern ihre Auftretenshäufigkeit gering ist.)

Infolge des elastischen Tragverhaltens des Kranbahnträgers im Gebrauchszustand besteht eine Proportionalität zwischen den Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma_i$ und den entsprechenden Radlasten R_i. Zur Bestimmung der äquivalenten Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ kann deshalb zuerst die äquivalente (oder wirksame) Radlast R_e berechnet werden,

$$(6) \quad R_e = \left[\frac{\Sigma n_i R_i^m}{\Sigma n_i} \right]^{1/m}$$

welche anschliessend über die Einflusslinie gefahren wird. Es wird somit das Spektrum der Radlasten R_i gesucht, das mit vereinfachenden Annahmen über die statistischen Häufigkeitsverteilungen der gehobenen Lasten und der Stellung der Krankatze beschrieben werden kann.

Wirksame Nutzlast

Das in Bild 2 schematisch gezeigte Spektrum der gehobenen Lasten wird durch eine wirksame Last Q_e ersetzt, welche die Ermüdungswirkung der gesamten Lastverteilung enthält.

Da jedoch die Form der Häufigkeitsverteilung nicht bekannt ist, soll angenommen werden, dass die in Tabelle 1 [5] gemachten Angaben genügend genau sind, um die wirksame Last Q_e qualitativ einzuteilen. Es ist noch anzufügen, dass laut Gleichung (6) die Ermüdungswirkung grosser Lasten wesentlich grösser ist als diejenige kleiner Lasten, so dass die wirksame Last Q_e einen grösseren Wert annimmt als die mittlere oder die wahrscheinlichste Last der Häufigkeitsverteilung.

Einfluss der Stellung der Krankatze

Für einen gegebenen Wert der gehobenen Last Q (im speziellen der wirksamen Last Q_e) werden die Radlasten der Kranbrücke auf den Kranbahnträger durch die seitliche Stellung der Krankatze bestimmt. Wie in Bild 3 gezeigt, lassen sich verschiedene Extremwerte der Radlast in Kombination mit den Extremwerten der gehobenen Last definieren; darin ist die Radlast R auf dem linken Kranbahnträger in Abhängigkeit von der Stellung der Krankatze dargestellt. Die extreme Rechtsstellung der Krankatze *ohne Nutzlast* bestimmt die minimale Radlast R_{min}, während die extreme Linksstellung der Krankatze *mit der maximalen Hublast* Q_{max} die maximale Radlast R_{max} ergibt. Diese beiden Grenzwerte sind vom Kranhersteller gegeben.

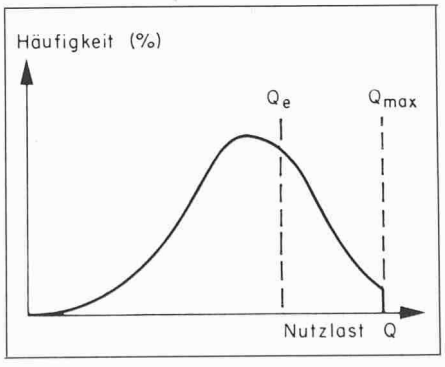


Bild 2. Schematische Häufigkeitsverteilung der Nutzlast Q

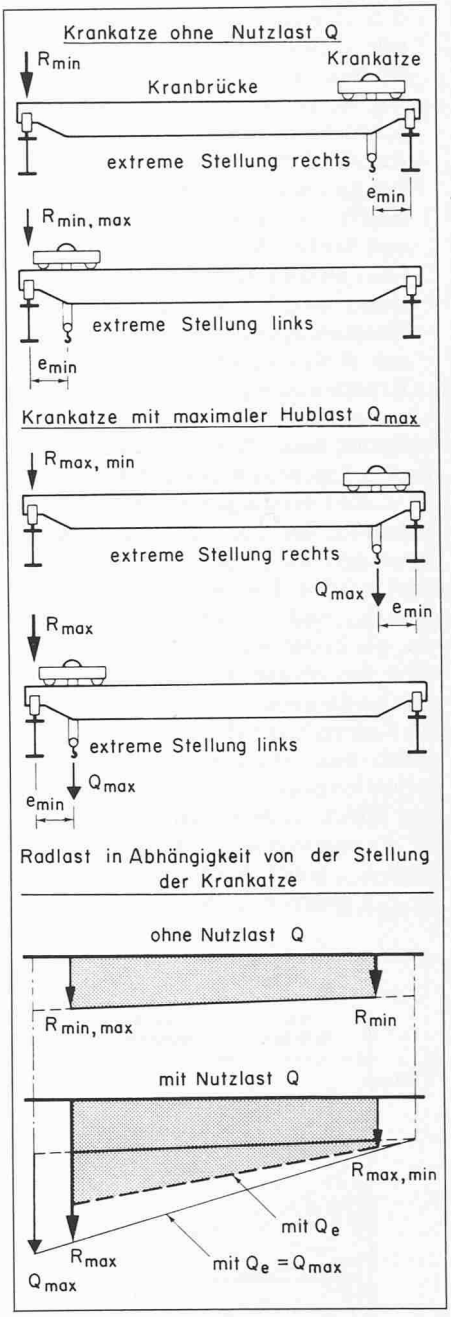


Bild 3. Laststellungen und entsprechende Radlasten auf dem linken Kranbahnträger

Die beiden Zwischenwerte $R_{min,\,max}$ und $R_{max,\,min}$ lassen sich aufgrund der extremen Linksstellung der Krankatze ohne Last beziehungsweise der extremen Rechtsstellung der Krankatze mit der maximalen Hublast ermitteln.

Häufigkeitsverteilung der Radlasten

Die Grösse der Radlast auf dem linken Kranbahnträger ist durch die Kombination der Häufigkeitsverteilung der gehobenen Lasten und derjenigen der seitlichen Stellung der Krankatze gegeben. Um diese komplizierte Verflechtung zu vereinfachen, werden folgende Annahmen getroffen:

1. Jede Stellung der Krankatze auf der Kranbrücke tritt mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf.
2. Die im Abschnitt «Wirksame Nutzlast» definierte wirksame Last Q_e ist für jede Stelle der Krankatze gültig,

d. h. in jeder Position der Krankatze tritt dieselbe Häufigkeitsverteilung der Nutzlast auf.

3. Die Belastungshäufigkeit des Kranbahnträgers ist durch die sogenannte Anzahl Ereignisse N gegeben. Ein Ereignis wird als Arbeitsvorgang definiert, der aus Heben, Verfahren und Senken der Last sowie der Leerfahrt an die nächste Bereitschaftsposition besteht. Die totale Anzahl Kranbewegungen setzt sich somit aus N Kranbewegungen mit und N Kranbewegungen ohne Nutzlast zusammen.

Aufgrund dieser Näherungen kann nun für eine gegebene wirksame Nutzlast Q_e die in Bild 4a) dargestellte Häufigkeitsverteilung der auf den linken Kranbahnträger wirkenden Radlasten abgeleitet werden. Die beiden Extremwerte $Q_e = Q_{max}$ und $Q_e = 0$ ergeben Verteilungen, die in der anschliessenden Berechnung den oberen bzw. unteren Grenzwert bestimmen.

Die Kenngrössen $R_{min,\,max}$ und $R_{max,\,min}$ stellen zwei Hilfswerte dar, die dem projektierenden Ingenieur in den meisten Fällen nicht bekannt sind. Unter der Voraussetzung, dass das Anfahrmass e_{min} gleich Null gesetzt wird, ist $R_{max,\,min}$ gleich R_{min}. Wird zusätzlich das Eigengewicht der Krankatze vernachlässigt, so nimmt auch $R_{min,\,max}$ den Wert von R_{min} an. Die Häufigkeitsverteilung der Radlasten vereinfacht sich dadurch zu der in Bild 4b) dargestellten, schraffierten Fläche.

Mit Hilfe dieser Auftretenshäufigkeit der Radlasten R_i kann nun die gesuchte wirksame Radlast R_e nach Gleichung (6) bestimmt werden. Dieser Wert ist abhängig von:

- der Grösse der wirksamen gehobenen Last Q_e,
- dem Eigengewicht der Kranbrücke, ausgedrückt durch die Grösse von R_{min} für die Leerfahrten,

jedoch nicht von der absoluten Anzahl Ereignisse N.

Um eine Beziehung zwischen der äquivalenten Radlast R_e und der maximalen Radlast R_{max} herzustellen, werden alle Werte der Radlasten auf die maximale Radlast bezogen. Es ergibt sich:

$$(7)\qquad R_e = \left[\frac{\Sigma n_i \,(R_i/R_{max})^m}{\Sigma n_i}\right]^{1/m} \cdot R_{max} = \alpha R_{max},$$

wobei der Faktor α von den Quotienten Q_e/Q_{max} und R_{min}/R_{max} (Bild 5) abhängig ist.

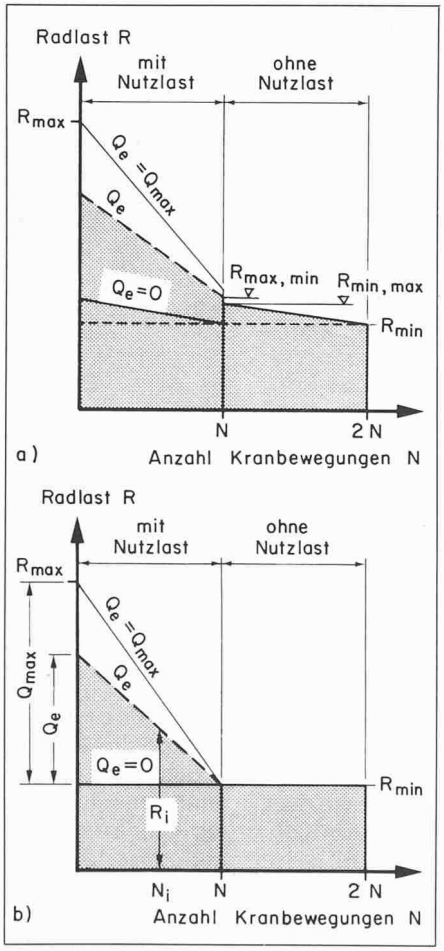


Bild 4. Darstellung der Radlasten in Abhängigkeit von der Anzahl Kranbewegungen.
a) Angenommene Häufigkeitsverteilung der Radlasten
b) Vereinfachte Häufigkeitsverteilung der Radlasten

Ermüdungsnachweis gemäss Richtlinie SZS

Grundlagen

Werden die im vorangegangenen Abschnitt gemachten Annahmen als genügend genau erachtet, so kann der Ermüdungsnachweis mit folgenden Angaben durchgeführt werden:

1. *Belastungszustand.* Er ist gekennzeichnet durch eine wirksame Nutzlast Q_e, die auf die maximale Hublast des Kranes bezogen ist. Aufgrund der Angaben der FEM [5] wird der Belastungszustand in vier Klassen 0 bis 3, d. h. Klasse «sehr leicht» bis «schwer», eingeteilt. Diese sind in Tabelle 1 festgehalten und näher umschrieben.
2. *Quotient* R_{min}/R_{max}. Er drückt die Radlasten des Kranes in günstigster und in ungünstigster Lastposition aus. *Diese zwei Extremwerte sind durch den Kranhersteller in Abhängigkeit von der Spannweite der Kranbrücke und der maximalen Hublast gegeben.*
3. *Belastungshäufigkeit.* Sie wird durch die Anzahl Ereignisse N ausgedrückt. In Tabelle 2 ist für eine Lebensdauer von 50 Jahren die Anzahl Ereignisse N festgehalten, die in Anlehnung an die Angaben der FEM [5] in vier Klassen A bis D unterteilt worden sind.

Bemessungshilfen

Um den Ermüdungsnachweis mit einem geringen Aufwand durchzuführen, sind numerische Angaben für die wirksame Radlast R_e bzw. die wirksame Spannungswechselzahl N_e erforderlich. Basierend auf der Häufigkeitsverteilung der Radlasten R_i gemäss Bild 4 und der Festlegung der Steigung $m = 3$ der Ermüdungsfestigkeitsgeraden, können die Werte R_e mit Hilfe von Gleichung (7) bestimmt werden. Auf der linken Seite von Bild 5 ist der Zusammenhang zwischen den Verhältnissen R_e/R_{max} und R_{min}/R_{max} in Funktion von Q_e/Q_{max} gegeben. Die weitere Umrechnung auf $N_e/2\,N$ für dieselben Parameter kann anschliessend aus der rechten Seite des Diagramms entnommen werden.

Da für den Ermüdungsnachweis nach Ausdruck (5) nur die wirksame Spannungswechselzahl N_e erforderlich ist, wurde Bild 5 in einem Diagramm (Bild 6) zusammengefasst.

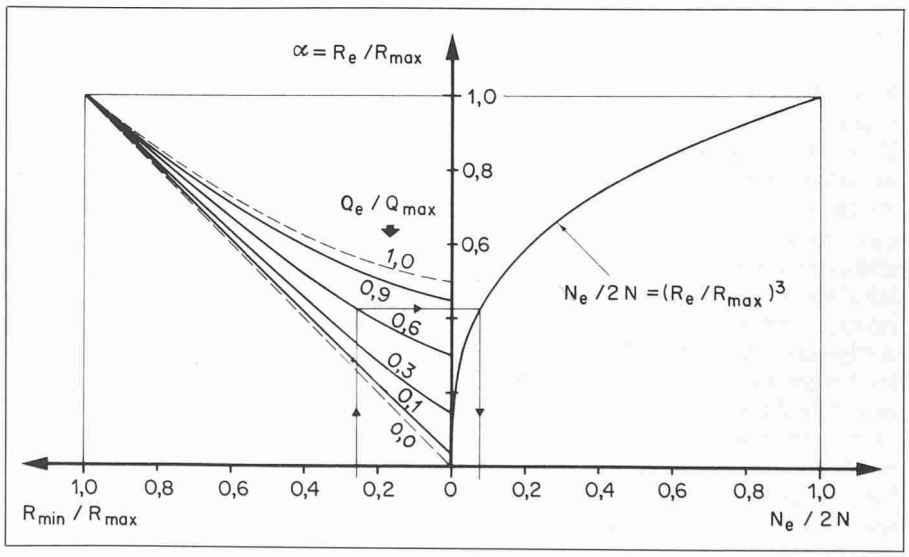


Bild 5. Zusammenhang zwischen R_{min}/R_{max}, R_e/R_{max} und $N_e/2N$ in Funktion von Q_e/Q_{max}

Ermüdungsnachweis

Der geforderte Nachweis wird gemäss dem Ausdruck

$$(5)\quad \Delta\sigma \leq \frac{1}{\gamma_R}\,\Delta\sigma_R(N_e)$$

erbracht, wobei $\Delta\sigma$ mit der maximalen Radlast R_{max}, vergrössert um den Stosszuschlag, berechnet wird. Die wirksame Spannungswechselzahl N_e kann mit Hilfe von Bild 6 (oder mit Abbildung 5 der SZS Empfehlung [3]) ermittelt werden. Daraus wird anschliessend aufgrund der Tabelle 14 und Figur 17 der SIA Norm 161 [1] die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_R$ bestimmt.

Das Vorgehen ist somit das folgende:

1. Der Quotient R_{min}/R_{max} wird mit den Angaben des Kranherstellers bestimmt.
2. Die wirksame Nutzlast Q_e, bezogen auf die maximale Hublast Q_{max}, wird laut Tabelle 1 entsprechend den Klassen 0 bis 3 festgelegt.
3. Mit Hilfe dieser zwei Angaben kann in Bild 6 das Verhältnis $N_e/2N$ abgelesen werden.
4. Indem aus Tabelle 2 die Anzahl Ereignisse N gemäss der Klassen A bis D herausgelesen wird, kann aufgrund des oben bestimmten Verhältnisses der Wert von N_e ermittelt werden.
5. Unter Berücksichtigung der Konstruktionsdetails laut Tabelle 14 der SIA Norm 161 [1] kann $\Delta\sigma_R(N_e)$ bestimmt werden.
6. Die maximale Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ lässt sich berechnen, indem mit den maximalen Radlasten R_{max}, vergrössert um den Stosszuschlag, über die Einflusslinie des betrachteten Schnittes gefahren wird, wodurch die maximale und minimale Spannung ermittelt werden kann (siehe auch Tabellen SZS [6]).
7. Aufgrund der Angaben von Punkt 5 und 6 lässt sich der Ermüdungsnachweis mit dem Ausdruck (5) durchführen.

Tabelle 1 Tabelle zur Ermittlung der wirksamen Nutzlast Q_e

Klasse	Belastungszustand	$\frac{Q_e}{Q_{max}}$
0 sehr leicht	Krane, die nur ausnahmsweise die maximale Hublast und laufend weit kleinere Teillasten heben	0,1
1 leicht	Krane, die nur selten die maximale Hublast und laufend Lasten von ungefähr ⅓ der maximalen Hublast heben	0,3
2 mittel	Krane, die ziemlich häufig die maximale Hublast und laufend Lasten zwischen ⅓ und ⅔ der maximalen Hublast heben	0,6
3 schwer	Krane, die regelmässig in der Nähe der maximalen Hublast arbeiten	0,9

Tabelle 2 Tabelle zur Ermittlung der Anzahl Ereignisse N

Klasse	Belastungshäufigkeit	Anzahl Ereignisse N*)
A	Gelegentlicher, unregelmässiger Betrieb, gefolgt von langen Ruhezeiten	$\leq 6{,}3 \cdot 10^4$
B	Regelmässiger, aber unterbrochener Betrieb	$2{,}0 \cdot 10^5$
C	Regelmässiger Dauerbetrieb	$6{,}3 \cdot 10^5$
D	Regelmässiger Dauerbetrieb mit mehr als einer Arbeitsschicht	$2{,}0 \cdot 10^6$

*) Als ein Ereignis wird der Arbeitsvorgang definiert, der aus Heben, Verfahren und Senken der Last sowie aus der leeren Kranfahrt an die nächstfolgende Bereitschaftsposition besteht

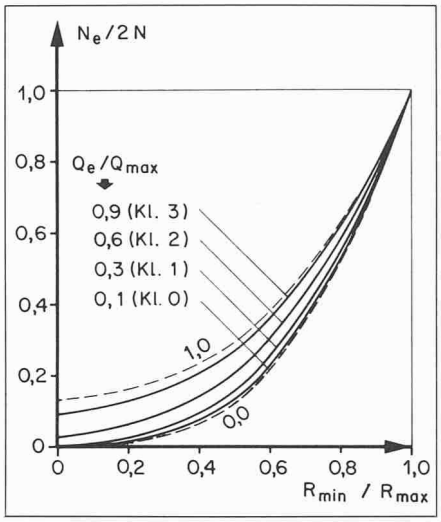


Bild 6. Wirksame Spannungswechselzahl N_e in Abhängigkeit von R_{min}/R_{max} und dem Belastungszustand (Q_e/Q_{max}) nach Tabelle 1

Gültigkeitsbereich

Mit den oben erläuterten Angaben soll dem Ingenieur beim Ermüdungsnachweis einer Kranbahn eine mögliche, einfache Art des Vorgehens aufgezeigt werden. Allerdings hat sich der Konstrukteur zu vergewissern, dass die vereinfachenden Annahmen genügend genau mit der Anwendung übereinstimmen.

Die im folgenden aufgeführten Fragen sollten deshalb immer überprüft werden:

- Beschreiben die Tabellen 1 und 2 die Einteilung des Belastungszustandes und der Belastungshäufigkeit genügend genau?
- Ist die Stellung der Krankatze beim Verfahren zufällig, oder wird sie durch konstruktive oder betriebliche Massnahmen bestimmt?
- Erzeugt die Kranbrücke bei der Überfahrt des betrachteten Schnittes nur *einen* wesentlichen Spannungswechsel (vgl. Abschnitt «Lastannahmen für den Ermüdungsnachweis»)?
- Verkehrt nur ein Kran auf der Kranbahn, oder sind mehrere vorhanden, die zusätzliche Spannungswechsel erzeugen? (Dieses Problem kann so erfasst werden, dass die Anzahl Ereignisse N erhöht wird.)

Die in diesem Aufsatz gemachten Erläuterungen sind immer von der Annahme ausgegangen, dass weder der Belastungszustand noch die Belastungshäufigkeit zum vornherein bekannt sind. Kann jedoch aufgrund von betrieblich bedingten Einsatzbereichen die Häufigkeitsverteilung der Radlasten R_i bestimmt werden, so ist eine direkte Berechnung der wirksamen Radlast R_e möglich. Die Betriebslasten können mit einer wirksamen Spannungsdifferenz $\Delta\sigma_e$ oder anhand der wirksamen Lastwechselzahl N_e analog dem dargestellten Vorgehen beschrieben werden. Mit Hilfe der Gleichungen (4) und (7) ist es anschliessend möglich, den Ermüdungsnachweis auf eine der beiden oben beschriebenen Arten zu erbringen.

Verdankungen

Die Bearbeitung der Ermüdungsprobleme im Rahmen der Forschung am *Institut für Stahlbau* (ICOM) der *ETH Lausanne* wird durch namhafte Beiträge des *Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung* unterstützt. Der vorliegende Aufsatz basiert auf Untersuchungen, die unter der Leitung des Autors von *Joseph Jacquemoud*, dipl. Ing., durchgeführt wurden. Die Mitarbeit von *Markus Gottier*, dipl. Ing., bei der Bearbeitung des Manuskriptes sowie die bereitwillige Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe «Kranbahnen» der Technischen Kommission der Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau (SZS) werden bestens verdankt.

Literaturangaben

[1] SIA Norm 161: Stahlbauten. Zürich, SIA, 1979
[2] Berechnungsgrundlagen für Kranbahnträger und Kranbahnstützen (Ausgabe, 1964). Zürich Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau, 1964.
[3] Berechnungsgrundlagen für Kranbahnen (Ausgabe 1979). Zürich, SZS, 1979 (Veröffentlichung B1).
[4] *Hirt, Manfred A.* «Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Ermüdung und deren Berücksichtigung bei der Bemessung von Eisenbahnbrücken». Bauingenieur, Berlin, Vol. 52, no 7, 1977, s. 255–262.
[5] Règles pour le calcul des appareils de levage, 2e édition. Paris, Fédération européenne de la manutention, 1970 (section 1: Appareils lourds de levage et de manutention).
[6] Bemessungstafeln für den Stahlbau, 4. Auflage. Zürich, SZS, 1975 (Veröffentlichung C4).

Adresse des Verfassers: Dr. *M. A. Hirt*, dipl. Ing. ETH, Institut de la construction métallique (ICOM), EPF Lausanne, 9, ch. des Délices, 1006 Lausanne.