



Restnutzungsdauer der Stahltragwerke von Kranen

Bericht B17

Ausschuß für Hafenumschlagtechnik

AHU

Hafentechnische Gesellschaft e. V.

HTG



Verfasser aus dem HTG-Fachausschuss für Hafenumschlagtechnik (AHU) :

Dr.-Ing. Jürgen Grießhaber

Dipl.-Ing. Holger Strohbach (Gast)

Dipl.-Ing. Jörg Dzierbicki (Gast)

Weitere Mitglieder des HTG-Fachausschusses für Hafenumschlagtechnik (AHU)
zum Zeitpunkt der Berichtfertigstellung

Dipl.-Ing. Karl-Friedrich Dobberstein

Dipl.-Ing. Jens Fahrbach

Dipl.-Ing. Klaus Höller

Dipl.-Ing. Volker Johannssen

Dipl.-Ing. Jörg Lange

Dipl.-Ing. Michael Maack

Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Mehrkens

Dipl.-Ing. Uwe Pietryga

Dipl.-Ing. Reiner Poetzl

Dipl.-Ing. Frank Rupp

Dipl.-Ing. Martin Schubring

Dipl.-Ing. Volkmar Schüßler

Dipl.-Ing. Siebelt Siuts

Dipl.-Ing. Michael Ziethen

Dipl.-Ing. Uwe Wolf

Herausgegeben im Mai 2005

Neues Layout im September 2017

Ansprechpartner HTG-Fachausschuss für Hafenumschlagtechnik (AHU) unter:

<https://www.htg-online.de/fachausschuesse/hafenumschlagtechnik/mitglieder-kontakt/>

Der Bericht ist online abrufbar unter:

<https://www.htg-online.de/fachausschuesse/hafenumschlagtechnik/veroeffentlichungen/das-blaue-buch/>



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Nutzungszyklus eines Kranes	7
3	Praktische Vorgehensweise bei der Bewertung der Nutzungsdauer	9
4	Theoretische Grundlagen	11
4.1	Die WÖHLER-Linie	11
4.2	Die Regel nach Palmgren-Miner	14
4.3	Die Modifikation der Miner-Regel nach <i>Haibach</i>	17
4.4	Bruchmechanische Betrachtung	19
5	Ermittlung der Schädigung und Abschätzung der Restnutzungsdauer	21
5.1	Die obere Schranke des Schädigungsgrades	21
5.2	Die ausführliche Untersuchung des Schädigungsgrades	22
6	Möglichkeiten der Ausschöpfung von Tragreserven zur Verlängerung der Lebensdauer	24
7	Zusammenfassung und Ausblick	25
8	Literaturhinweise	26
8.1	Normen	26
8.2	Literatur	26



Anhang (Beispiele)

A 1	Schadigungsgrad für Ausleger eines Containerkranes	27
A 2	Neuberechnung der Nutzungsdauer und Erhöhung der Tragfähigkeit eines Greiferschiffsladers Berechnungsgrundlage DIN 15018	29
A 2.1	Technische Daten	29
A 2.2	Neuberechnung	30
A 2.3	Schlussbemerkung	31



1 Einleitung

Der Bericht wendet sich hauptsächlich an Betreiber von Krananlagen, die den technischen Zustand der Stahltragwerke ihrer Krane beurteilen wollen. Es werden praktische Möglichkeiten und die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Restnutzungsdauer auch unter Beachtung der rechtlichen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden Krane ausgelegt für zwischen dem Hersteller und dem Betreiber vereinbarte betriebliche Belastungen, die so genannte bestimmungsgemäße Verwendung, für eine ebenfalls vereinbarte endliche Nutzungsdauer.

Anlass für die Untersuchung der Restnutzungsdauer von Kranen kann u. a. sein:

- die Änderung der bestimmungsgemäßen Verwendung;
- der Kauf oder Verkauf des Kranes;
- die wirtschaftliche Bewertung von erforderlichen Reparaturmaßnahmen.

Die Abschätzung der voraussichtlichen Restnutzungsdauer kann mit hinreichender Wahrscheinlichkeit erfolgen durch Ermittlung des Ermüdungszustandes des Stahltragwerkes des Kranes mit Hilfe der Betriebsfestigkeitsrechnung.

Hierfür sind zumindest erforderlich:

- statische Berechnung einschließlich Betriebsfestigkeitsnachweis, erforderlichenfalls für diesen Zweck neu zu erstellen;
- verlässliche Angaben über die bisherige Nutzung, wie Umschlagmengen, Häufigkeiten, Schwere des Betriebes;
- aussagefähige Dokumentation der durchgeführten Wartungen und Prüfungen sowie der Instandsetzungen und Korrosionsschutzmaßnahmen.

Außerdem sollte der aktuelle Kranzustand durch eine "befähigte Person" bzw. einen Sachkundigen beurteilt werden.



Die Prüfung von Kranen, veranlasst durch den Arbeitgeber (Betreiber), richtet sich nach heutigem Stand (April 2005) nach der

"Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes – **Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV.** vom 27. September 2003":

Der vorliegende Bericht basiert auf den Normen /1/ DIN prEN 13001, /2/ DIN 15018 und der /3/ FEM 1.001. Damit sind alle in diesen Normen festgelegten Annahmen und Voraussetzungen für die Anwendung auch dieses Berichtes zwingend.



2 Nutzungszyklus eines Kranes

Die Nutzung eines Kranes beginnt mit seiner Inbetriebnahme und endet theoretisch nach Ablauf der projektierten Nutzungsdauer mit seiner Stilllegung.

Die projektierte Nutzungsdauer wird zwischen Betreiber und Hersteller entsprechend der zu erwartenden betrieblichen Belastung indirekt durch die Kraneinstufung vereinbart.

Sie beinhaltet die Belastungsgrößen in Form eines Belastungskollektives (Schwere des Betriebes) und der Lastspielzahlen (Häufigkeit des Betriebes).

Theoretisch kann die Nutzungsdauer bei dauerhaft ausgelegten Tragkonstruktionen zeitlich unbegrenzt sein. Da jedoch die Tragkonstruktionen der meisten Krane unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten auf Betriebsfestigkeit bemessen werden, sind sie nur zeitlich begrenzt einsetzbar. Dies muss der Betreiber bei der langjährigen Nutzung beachten.

In Bild 1 ist die zeitliche Zuordnung der Begriffe für die Nutzungsdauer im Rahmen der Zeit- und Dauerfestigkeit sowie der Schädigung dargestellt.

Die Steigungen der Geraden stellen ein Maß für die Art des Kraneinsatzes dar, die durch Lastkollektiv und Lastspielzahl beschrieben wird. Sie entsprechen damit den Beanspruchungsgruppen in den Krannormen.

Dabei bedeuten die größeren Steigungen höhere, geringere Steigungen niedrigere Beanspruchungsgruppen im Vergleich zu der bei der Kranprojektierung zu Grunde gelegten Beanspruchungsgruppe.

Die unterschiedlichen Geraden beschreiben mögliche Abweichungen von den in der Projektierung festgelegten Einsatzbedingungen während der Nutzungsdauer.

Die zu erwartende Restnutzungsdauer ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Verwendungsgerechten mit der Schädigungslinie $S = 1$, die den theoretischen Versagensbeginn darstellt

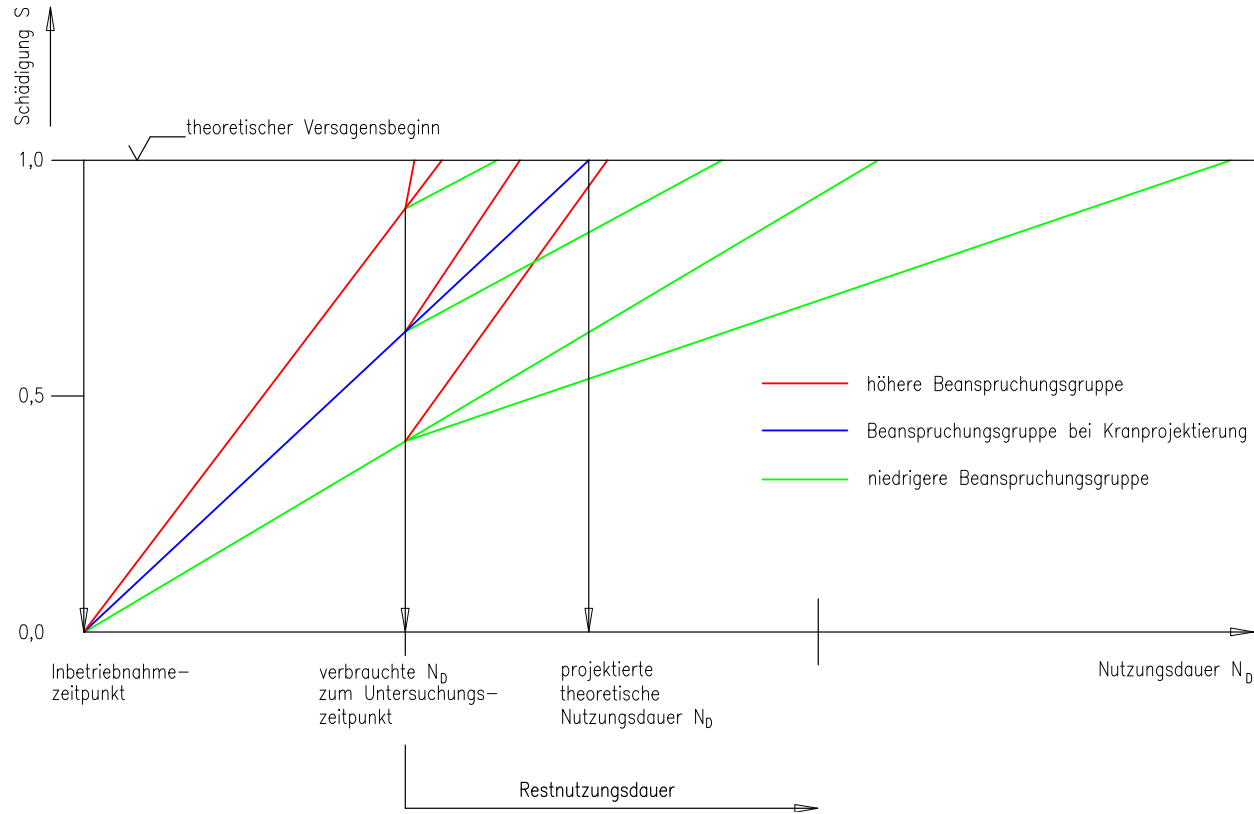


Bild 1: Nutzungsmöglichkeiten eines Kranes



3 Praktische Vorgehensweise bei der Bewertung der Nutzungsdauer

Besteht das Interesse bzw. die Erfordernis, die Restnutzungsdauer eines Kranes abzuschätzen, wird empfohlen, den Hersteller und einen Sachverständigen bezüglich der weiteren Vorgehensweise einzuschalten.

Vorgehensweise:

- Ermittlung der Einstufung der Tragkonstruktion aus dem Kranprüfbuch oder auch aus der statischen Berechnung;
- Ermittlung des bisher abgelaufenen Lastkollektivs und der Arbeitsspiele des Kranes nach Angaben des Betreibers bzw. soweit vorhanden nach geeigneten Zählwerken;
- Berechnung der Spannungsspiele, die ein Vielfaches der Arbeits- und Lastspiele sein können - siehe DIN 15018 bzw. FEM 1.001.

Es muss dem Sachverstand und dem Verantwortungsbewusstsein des Bearbeiters obliegen, die maßgeblichen Spannungsspiele bauteilbezogen zu bestimmen.

Ergibt die Berechnung, dass die theoretische Nutzungsgrenze erreicht oder sogar überschritten ist, muss der Sachverständige dem Betreiber diesen Sachverhalt und die daraus resultierende mögliche Gefährdung bewusst machen.

Für das weitere Vorgehen ergeben sich mehrere Möglichkeiten:

- Wenn bei Durchsicht der statischen Berechnung sich die Möglichkeit aufzeigt, nachträglich die Einstufung zu verändern, kann dieser Weg gewählt werden. Dabei können punktuelle Ertüchtigungen der Stahlkonstruktion notwendig und wirtschaftlich sinnvoll sein.
- Wenn sich herausstellt, dass diese Möglichkeit nicht gegeben ist und der Kran dennoch weiter betrieben werden soll, wird eine außerordentliche Prüfung des aktuellen Bauzustandes des Kranes durch den Sachverständigen erforderlich.

Schwerpunkte der Prüfungen sind:



- Visuelle Durchsicht aller Teile der Stahlkonstruktion von innen und außen - u. U. muss durch das Öffnen von z.B. Schottblechen für eine ausreichende Zugänglichkeit gesorgt werden.
- U. U. müssen an der Tragkonstruktion für besonders gefährdete Bauteile - hierzu gehören auch Steckbolzen und Achsen - zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt werden.

Die außerordentlichen Prüfungen durch den Sachverständigen sollten danach jährlich wiederholt werden. Der Prüfumfang ist vom Sachverständigen unter Berücksichtigung der Festigkeitsanalyse festzulegen, wobei die gründliche visuelle Untersuchung aller tragenden Teile auch unter Verwendung von z.B. Hubarbeitsbühnen immer jährlich zu erfolgen hat.

Die Ermittlung des Schädigungsgrades und daraus die Abschätzung der Restnutzungsdauer ist im Punkt 6 dargestellt.

Nach der außerordentlichen Prüfung kann eine Einschätzung der Restnutzungsdauer mittels einer Festigkeitsanalyse notwendig werden. Dabei ist die (neue) Einstufung der Krananlage für den geplanten Weiterbetrieb verbindlich festzulegen.

Sollen Krane mit Tragwerksschädigungen weiter betrieben werden, sind besondere Kontrollen und kürzere Prüfzeiten - mindestens jedoch jährlich - durch Sachverständige zwingend sowie eine genauere Untersuchung der Betriebsfestigkeit relevanter Bauteile notwendig. In diesen Fällen sind auch bruchmechanische Untersuchungen bezüglich der Rissfortschritte zur Absicherung möglich.



4 Theoretische Grundlagen

4.1 Die WÖHLER-Linie

Alle Betrachtungen zur Betriebsfestigkeit und Werkstoffschädigung basieren auf den Versuchserkenntnissen von Wöhler.

Dabei nutzt man die Darstellung von Wertepaaren aus Bruchlastwechselzahlen N_i mit den zugehörigen Spannungsniveaus σ_i des Einstufenprogramms zur Charakterisierung von Wechselfestigigkeiten. Der damit gegebene mathematische Zusammenhang lautet

$$\left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D}\right)^m = \frac{N_D}{N_i} . \quad (1)$$

Diese Darstellung ergibt im doppellogarithmischen Koordinatensystem eine Gerade - die in (Bild 2) gezeigte **WÖHLER-Linie**.

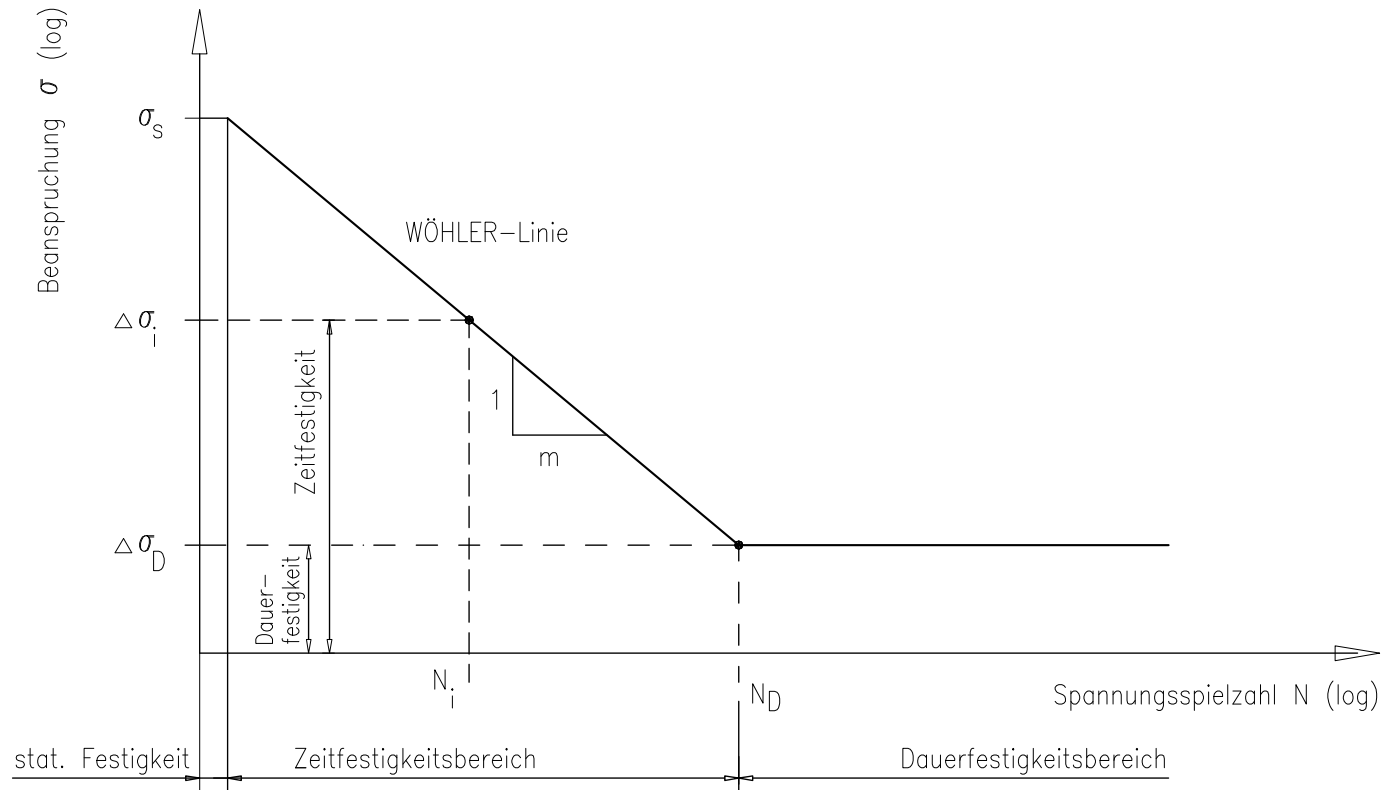


Bild 2: WÖHLER-Linie



Die Gleichung dieser Gerade lautet

$$m \log \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right) = \log \frac{N_D}{N_i} . \quad (2)$$

Wobei $\Delta\sigma = (\sigma_o - \sigma_u)_i$ die Differenz zwischen Ober- und Unterspannung eines Spannungsspieles ist.

Diese Gerade wurde auf der Grundlage einer Anzahl experimenteller Einstufenversuche mit konstant schwingender Spannung ermittelt.

- N_i Bruchlastwechselzahl, bei der unter der Spannung σ_i das Versagen eintritt,
- N_D Spannungsspielzahl, an der die WÖHLER-Linie einen Knickpunkt zur Horizontalen hat,
- m Anstieg der WÖHLER-Linie, auch als WÖHLER-Liniensexponent bezeichnet,
- $\Delta\sigma_i$ Spannungsdifferenz zur Bruchlastwechselzahl N_i ,
- $\Delta\sigma_D$ Dauerfestigkeit,
- σ_S Statische Festigkeit.

Der WÖHLER-Liniensexponent m hängt von Werkstoff, Beanspruchungsart (wechselnd oder schwellend) und Probenform ab. Für Stahlbauteile liegt er z. B. für ungekerbte Grundwerkstoffe im Bereich 6,0...6,5 und für Schweißkonstruktionen im Bereich 3,0...4,5.

Nun liegen in der Regel bei allen technischen Geräten und Anlagen komplexe Belastungskollektive vor, die deutlich vom Einstufenversuch abweichen.

Es besteht daher die Aufgabe, die Erkenntnisse aus der WÖHLER-Linie auf ein mehrstufiges Kollektiv zu übertragen.



4.2 Die Regel nach Palmgren-Miner

In der Betriebsfestigkeit wird vorzugsweise mit der linearen Schadensakkumulation-Hypothese nach Palmgren-Miner gerechnet.

Die Schädigung S eines Bauteiles setzt sich dabei aus den Teilschädigungen einzelner Beanspruchungsspiele zusammen, die sich zur Gesamtschädigung addieren.

Bei der Gesamtschädigung $S = 1$ beginnt theoretisch das Bauteilversagen.

Bild 3 zeigt ein mehrstufiges Belastungskollektiv aus mehreren k Teilbeanspruchungsstufen und den Teilstufen i zugeordnete n_i Spannungsspielzahlen.

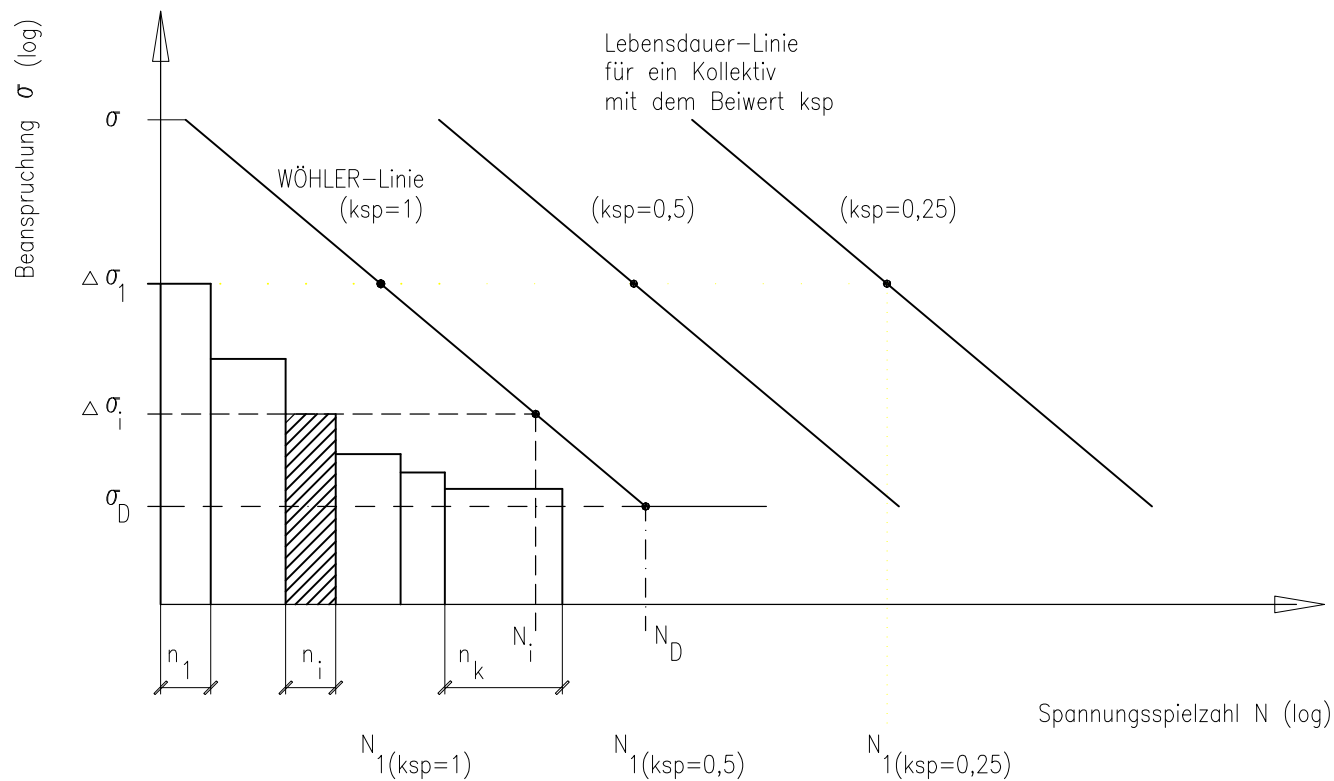


Bild 3: WÖHLER-Linie, Betriebsdauerlinie, mehrstufiges Belastungskollektiv



Im Einstufungsversuch mit $k = 1$ gilt:
$$\frac{n_1}{N_1} = S = 1, \quad (3)$$

d. h. es ist bei $n_1 = N_1$ der Bruch des Bauteiles im Rahmen der statistischen Sicherheit eingetreten.

In der linearen Schadensakkumulationstheorie von **Miner** wird nun gesagt, dass aus einem Kollektiv mit k Laststufen eine zur Einstufenbelastung äquivalente Schädigung S folgt, wenn analog zu Gleichung (3) die Beziehung

$$\sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = S = 1, \quad (4)$$

erfüllt ist.

Führt man in Gleichung (4) die Wöhlergleichung (1) für $N_i = \frac{N_D}{\left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D}\right)^m}$ ein, ergibt

sich für das mehrstufige Beanspruchungskollektiv, die äquivalente Gesamtschädigung zu

$$S = \sum_{i=1}^k \left[\frac{n_i}{N_D} \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^m \right] \leq 1 \quad (5)$$

S Schädigung, $S < 1$ in der projektierten Nutzungsphase.

Für das einstufige Kollektiv geht Gleichung (4) in Gleichung (3) über und liefert sofort einen Punkt auf der WÖHLER-Linie. Bei einem typischen Kollektiv entsprechend (Bild 3) ergibt die Summe aller n_i bis zum Erreichen des Bauteilver-sagens durch Bruch einen Punkt neben der WÖHLER-Linie. Man befindet sich, je nach Völligkeit des Kollektivs (durch den Kollektivbeiwert k_{sp} beschrieben), auf einer zu k_{sp} gehörenden Betriebs- oder Lebensdauerlinie.

Das Vorgehen bei der Kraneinstufung nach DIN 15018 bzw. FEM spiegelt den beschriebenen Sachverhalt wider. Dort sind Standardkollektive definiert, die zusammen mit den Lastwechselzahlen (Häufigkeit des Betriebes) die typischen Einsatzbedingungen widerspiegeln.

Beispielsweise kann bei einem Containerkran mit einem solchen Kollektiv die Entladung *eines* durchschnittlichen Schiffes beschrieben werden. So würde n_1 die Anzahl von Schwerlasthuben kennzeichnen, zwei weitere Lastwechselzahlen wären u. U. verschiedenen typischen Tonnagebereichen von Containern



zugeordnet und durch die Leerfahrten die Lastwechselzahlen mit der geringsten Belastung nur durch den Spreader.

Bei der Frage nach der Lebensdauer des Stahltragwerkes bzw. einzelner Bauteile muss dann noch berechnet werden, wie oft ein solches Kollektiv ertragen werden kann, bis die laut zugehöriger Lebensdauerlinie zulässige Gesamtlastwechselzahl erreicht wird.

4.3 Die Modifikation der Miner-Regel nach *Haibach*

Die Erfahrung und Tests haben gezeigt, dass auch Lastwechsel unterhalb der Schwelle $\Delta\sigma_D$ (Bild 4) einen Beitrag zur Schädigung liefern.

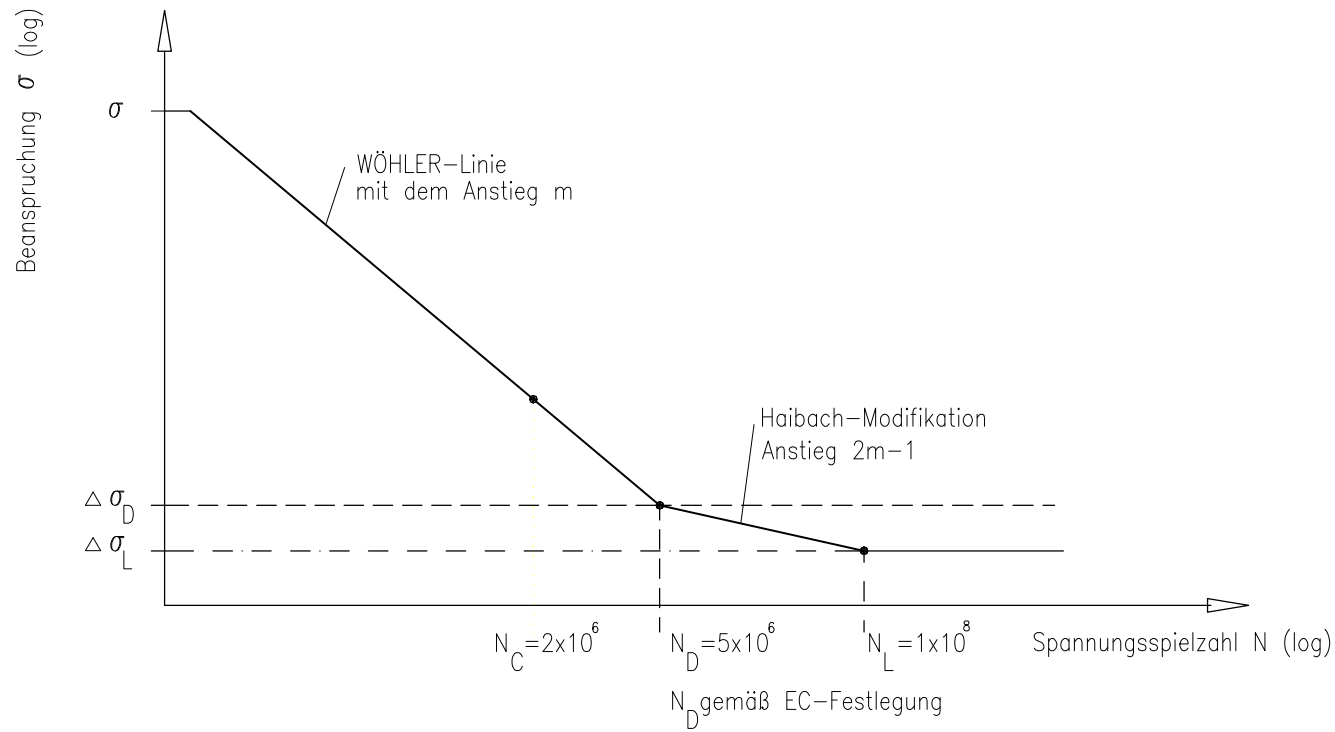


Bild 4: WÖHLER-Linie mit Modifikation nach Haibach, gemäß EC3



Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, wurde die WÖHLER-Linie von Haibach über den Punkt $\Delta\sigma_D$ hinaus verlängert und dabei mit einer geringeren Neigung versehen.

Ist die WÖHLER-Linie bis zu einer Lastwechselzahl von 5×10^6 mit der Steigung m geneigt, weist die jetzt eingeführte Verlängerung nur noch eine Neigung $(2m - 1)$ auf. Das (Bild 4) zeigt diese Form des WÖHLER-Diagramms in der Fassung, wie sie im EC 3 Eingang gefunden hat. Dabei gelten die folgenden Vereinbarungen:

N_D Spielzahl der Dauerfestigkeit bei $N_D = 5 \times 10^6$ Lastwechseln,

N_L Spielzahl des Schwellenwertes für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_L = 1 \times 10^8$ Lastwechseln,

$\Delta\sigma_D$ Dauerfestigkeit,

$\Delta\sigma_L$ Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit.

Unter diesen Bedingungen setzt sich die Schadenssumme aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil (S_D) beschreibt die Spannungsstufen oberhalb der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$, der zweite (S_L) erfasst alle Werte zwischen der Dauerfestigkeit und dem Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$.

Es gilt $S = S_D + S_L$ (6)

Für die Haibach-Modifikation gilt

$$S = S_D + S_L = \sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_D} \right) * \left[\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right]^m + \sum_{j=k+1}^l \left(\frac{n_j}{N_D} \right) * \left[\frac{\Delta\sigma_j}{\Delta\sigma_D} \right]^{2m-1} \quad (7)$$

Bei Beanspruchung $\Delta\sigma < \Delta\sigma_L$ wird angenommen, dass der schädigende Einfluss vernachlässigbar klein ist und dauerhaft ertragen wird.

Die Haibach-Modifikation liegt als theoretische Basis bezüglich der Ermüdung auch der neuen, modernen Norm Eurocode 3 (EC 3) zu Grunde.

4.4 Bruchmechanische Betrachtung

Wie bei allen technischen Bauteilen und Komponenten können auch an Strukturen im Kranbau rissartige Defekte (wie Risse, flächige Trennungen, Kerben, voluminöse Einschlüsse) unterschiedlicher Größe auftreten, die auf Materialfehlern beruhen, die aus der Fertigung herrühren oder im Betrieb entstanden sind.



Solche Defekte können zu einer Größe wachsen, bei der die Struktur durch Sprödbbruch, Zähbruch oder plastischen Kollaps versagt.

Mit Hilfe der Bruchmechanik ist es im Prinzip möglich, das Gefahrenpotential erkannter Fehler zu bewerten, um so Schlussfolgerungen für einen sicheren Weiterbetrieb der betroffenen Komponenten abzuleiten (Fehler-Analyse).

Weiterhin lassen sich auf der Grundlage von vorgegeben bzw. definierten Fehlern Anforderungen an eine zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) festlegen sowie in Ergänzung zum konventionellen Festigkeitsnachweis Anforderungen an das zulässige Beanspruchungsniveau ermitteln (Fehler-Toleranz-Analyse).

Zur Bestimmung des *Fehlerwachstums* infolge Ermüdung oder Korrosion können einschlägige Richtlinien oder Regelwerke herangezogen werden (z. B. IIW /4/).

Die Bewertung des *Versagens* ist auf der Grundlage der derzeit modernsten Methode, des SINTAP-Verfahrens, möglich /5/. Diese ist auch Grundlage der FKM-Richtlinie „Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis“ /6/.

Für ein bruchmechanisches Bewertungsvorgehen ist die Festlegung von Sicherheitsfaktoren erforderlich, wie auch sonst bei den im Kranbau geltenden Regelwerken üblich. Abzusichern sind dabei die Zeit (Lebensdauer) bis zu einer kritischen Fehlergröße bei Rissfortschritt und die Bruchmechanismen (Sprödbbruch, Zähbruch oder plastischen Kollaps).

Bei den bruchmechanischen Betrachtungen handelt es sich um sehr spezielle Probleme, mit z. Z. noch sehr aufwändigen Untersuchungen und teilweise unterschiedlichen praktischen Ergebnissen. Deshalb ist deren Anwendung nur in Sonderfällen und nur unter Beachtung des aktuellen Erkenntnisstandes in Betracht zu ziehen.



5 Ermittlung der Schädigung und Abschätzung der Restnutzungsdauer

Bei dem Nachweis der Betriebsfestigkeit wird ein σ -Vergleich durchgeführt zwischen der errechneten Bauteilspannung unter der äußeren Belastung und einer zulässigen Spannung, die sich aus Schwere und Häufigkeit der Belastung, Einstufung des Kerbfalles und einem Sicherheitsfaktor ergibt. Mit Unterschreitung der zulässigen Spannung ist die Betriebsfestigkeit des Bauteiles nachgewiesen.

Nun ist klar, dass ein gleicher Auslastungsgrad für alle Bauteile nicht erreicht werden kann. Schon aus Gründen der Stabilität und aus vielen geometrischen Zwängen heraus liegt die Auslastung bei vielen Bauteilen des Tragwerkes deutlich unter den zulässigen Spannungen.

Bei den Fragen zur Schädigung bzw. Restnutzungsdauer kehrt man die Vorgehensweise um und versucht der Spannungsreserve in der Betriebsfestigkeit eine noch ertragbare Spannungsspielzahl anhand der zukünftigen Belastung zuzuordnen.

Die Ermittlung der Restnutzungsdauer hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Von bedeutendstem Einfluss sind dabei die vom Betreiber bereitzustellenden Belastungskollektive und Häufigkeiten aus dem bisherigen und zukünftigen Betrieb.

Entsprechend der gewählten Einstufung und dem vorliegenden Kerbfall sind alle Zahlenwerte nach Gleichung (5) und (7) bekannt, um die erfolgte Schädigung S zum Untersuchungszeitpunkt ermitteln zu können.

Sollte nur das Kollektiv selbst bekannt sein und die Kenntnis der zugehörigen z. B. Katzzstellungen oder Auslegerstellung fehlen, ist es nicht möglich, zu den Häufigkeiten der Spannungswechsel in einzelnen Bauteilen des Stahltragwerkes Aussagen zu treffen.

Es werden im Folgenden zwei Möglichkeiten der Abschätzung der Restnutzungsdauer vorgestellt, zum einen die grobe Abschätzung einer oberen Schranke und zum anderen eine ausführliche Ermittlung.

5.1 Die obere Schranke des Schädigungsgrades

Um überhaupt einen Ansatz zu finden, muss bei diesem verkürzten Verfahren von der Annahme ausgegangen werden, dass mit dem Erreichen der Nennlast eine 100%ige Auslastung im Gesamttragwerk vorhanden ist. Damit kann eine erste grobe Abschätzung des Schädigungsgrades erfolgen.



Sie stellt eine obere Schranke für den vorhandenen Schädigungsgrad dar.

Für diesen Fall geht die Gleichung (7) der Schädigung S in die folgende Form über:

$$\sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_{max}} \right) * \left[\frac{F_i}{F_{max}} \right]^m = S, \quad (8)$$

mit $S \leq 1$ in der projektierten Nutzungsphase.

In dieser Gleichung bedeuten

N_{max} projektierte Lastwechselzahl gemäß Kraneinstufung,

F_{max} nominelle Hublast des Kranes, einschließlich Lastaufnahmemittel,

F_i Hublast in der Stufe i des Belastungszyklus, einschließlich Lastaufnahmemittel,

m WÖHLER-Koeffizient (für Schweißkonstruktionen $m = 3$ gesetzt).

Eine analoge Verfahrensweise findet man für die Beurteilung der Hubwerke gemäß Maschinenrichtlinie bereits umgesetzt.

In vielen Fällen kann diese grobe Abschätzung der Schädigung aus vorangegangener Betriebszeit ausreichen, um daraus Rückschlüsse auf die Restnutzungsdauer zu ziehen.

5.2 Die ausführliche Untersuchung des Schädigungsgrades

Bei Vorliegen aller Voraussetzungen wird *bauteilbezogen* auf Gleichung (7) zurückgegriffen. Aus der statischen Berechnung kann für jede Kerbstelle eines Tragwerkelementes das Spannungsniveau $\Delta\sigma_i$ bezüglich Ermüdung entnommen oder ermittelt werden.

S ist die erreichte Schädigung laut Gleichung (7) aus dem bisher durchfahrenen Belastungskollektiv.

Mithin ist $(1 - S)$ = die Schädigungsreserve. (9)

Natürlich kann diese Reserve jetzt auf der Basis eines neuen Kollektivs in eine ebenfalls neue Restlastwechselzahl umgerechnet werden.



In Anbetracht der Fülle von möglichen Nachrechnungsstellen wird sichtbar, dass hierfür eine sinnvolle Auswahl an maßgebenden Punkten am Krantragwerk getroffen werden muss. Eine solche Auswahl kann nur von entsprechend qualifizierten und verantwortungsbewusst handelnden Fachleuten vorgenommen werden.

Zur leichteren Handhabung einer solchen ausführlichen Nachrechnung soll die Anwendung der Gleichung (7) an einem einfachen Beispiel mit angenommenen Zahlenwerten veranschaulicht werden. Es wird im Anhang A 1 vorgestellt.



6 Möglichkeiten der Ausschöpfung von Tragreserven zur Verlängerung der Lebensdauer

Ausschöpfung der Tragreserven an Krananlagen ist auf folgende Weise möglich:

- Einstufung der Krananlage bzw. relevanter Bauteile in eine höhere Beanspruchungsgruppe (entsprechend DIN 15018 oder FEM 1.001)

Diese Vorgehensweise ist nur dann möglich und zulässig, wenn mit der bisherigen Kraneinstufung genügend Tragreserven gegenüber den ermüdungsrelevanten zulässigen Spannungswerten bestanden und/oder, wenn durch konstruktive Maßnahmen wie Verstärkungen oder geringere Kerbwirkungen die zulässigen Spannungen angehoben werden können.

- Verringerung des deklarierten Völligkeitsgrades des Lastkollektives
Das setzt allerdings eine genaue Kenntnis der vergangenen und der künftigen Betriebsweise voraus. Es muss gewährleistet sein, dass entgegen der Ursprungsplanung die hohen Belastungen bzw. die Nennlast für die gesamte Betriebszeit weniger häufig aufgetreten sind und Gleiches auch für den künftigen Betrieb angenommen werden kann.

Auch hier wird erreicht, dass die zulässige Lastspielzahl erhöht werden kann bei gleich bleibender Beanspruchungsgruppe (Bild 1).

- Verringerung der Belastungen aus Lastheben

Die Reduzierung der Belastungen, entweder durch die Verringerung der zulässigen Nennlast und/oder durch die genaue Ermittlung des (oft zu hoch angesetzten) Hublastbeiwertes durch Messungen oder theoretische Analysen, verringert das auftretende Beanspruchungsniveau. Eine weitere Möglichkeit der Hubwerksbeeinflussung besteht in regelbaren Hubwerksantrieben.

Dadurch werden mit der jetzt möglichen Einstufung der Krananlage in eine höhere Beanspruchungsgruppe wiederum höhere zulässige Lastspielzahlen ermöglicht. Aber auch hier ist eine genaue Kenntnis der vergangenen und der künftigen Betriebsweise Voraussetzung, d.h. die ursprünglich vorgesehenen maximalen Nennbelastungen dürfen nachweisbar nicht aufgetreten sein.



7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorliegenden Bericht soll den Betreibern von Kranen und fördertechnischen Anlagen ein Werkzeug gegeben werden, mit dem sie den Ermüdungszustand der Stahltragwerke beurteilen können.

Bei dieser komplexen Aufgabe wird in hohem Maße die Erfahrung und Verantwortung der Ausführenden vorausgesetzt. Diese komplexe Aufgabe muss von einem Team aus erfahrenen Statikern und Kransachverständigen gelöst werden, da es gilt, herkömmliche Prüfungen, praktische Tests und theoretische Berechnungen bei der Beurteilung von Anlagen so einzusetzen und zu kombinieren, dass für das untersuchte Gerät eine wirtschaftliche und sichere Aussage über den vorhandenen Zustand getroffen werden kann.

Der gegenwärtige Stand der europäischen Normung schreibt kein allgemein gültiges und zwingendes Verfahren zur Beurteilung von Restnutzungsdauern der Stahltragwerke vor.

Sollten diesbezüglich neue Regelungen erscheinen, muß dieser Bericht angepaßt werden bzw. würden dann u. U. gesetzliche Regelungen an seine Stelle treten.



8 Literaturhinweise

8.1 Normen

- /1/ IprEN 13001; Kransicherheit, Konstruktion allgemein
- /2/ DIN 15018; Krane
- /3/ FEM 1.001, 1998.10.01; Krane und schwere Hebezeuge

8.2 Literatur

- /4/ International Institute of Welding (IIW)
Document XIII-1539-96/XV-845-6, 1996
- /5/ Zerst, U.; Wiesner, C.; Kocak, M.; Hodulak, L.: SINTAP: Entwurf einer vereinheitlichten europäischen Fehlerbewertungsprozedur - eine Einführung GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1999
- /6/ Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile
Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM)
VDMA Verlag GmbH, Frankfurt, 2001
- /7/ prEN 1993-1-9: 2002
Eurocode 3: Design of steel structures
Part 1.9: Fatigue strength of steel structures



ANHANG (BEISPIELE)

A 1 Schädigungsgrad für Ausleger eines Containerkranes

Betrachtet wird der Untergurt des Auslegers in Kastenträgerbauweise eines Containerkranes in der Mitte zwischen der Zugbandaufhängung und dem Anlenkpunkt. Der Kran soll für 2.000.000 Lastwechsel ausgelegt sein.

Der betrachtete Punkt ist im Sinne des EC 3 (prEN 1993-1-9: 2002) in den Kerbfall 80 eingestuft. Das entspricht dem Kerbfall K 3 nach DIN 15018 und beschreibt hier die als Doppelkehlnaht ausgeführte Quernaht eines Schottes.

Hinter dem Kerbfall 80 verbirgt sich eine ertragbare σ -Schwingweite von

$$80 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ kN/cm}^2$$

bei 2×10^6 Spannungswechseln.

Bis zu dem angenommenen Untersuchungszeitpunkt dieser Beispielrechnung sollen in den folgenden Lastfällen die beschriebenen Spannungsspiele mit den zugeordneten Häufigkeiten ertragen worden sein. Um den Rechenaufwand hier in überschaubaren Grenzen zu halten, wird mit einer kleinen Anzahl von Kollektivstufen gerechnet.

Lastfall 1: Eigenlasten des Kranes, keine Katze auf dem Ausleger

$$\sigma_e (\text{Lf 1}) = 1 \text{ kN/cm}^2$$

Lastfall 2: Aufnahmen der Nennlast an der Auslegerspitze, Absetzen der Last an Land

$$\sigma_u (\text{Lf 2}) = -2 \text{ kN/cm}^2 = (-3 + 1)$$

$$\sigma_o (\text{Lf 2}) = 6 \text{ kN/cm}^2 = (+5 + 1)$$

daraus folgt die Spannungsschwingbreite für diesen Lastfall mit

$$\Delta\sigma (\text{Lf 2}) = 8 \text{ kN/cm}^2$$

mit einer zugeordneten Lastwechselzahl von

$$n_2 (\text{Lf 2}) = 455.000$$



Lastfall 3: Aufnahmen der halben Nennlast über dem betrachteten Auslegerpunkt und Absetzen an Land

$$\begin{aligned}\sigma_u (\text{Lf 3}) &= \sigma_e (\text{Lf 1}) = && 1 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_o (\text{Lf 3}) &= && 4 \text{ kN/cm}^2 = (3 + 1)\end{aligned}$$

daraus folgt die Spannungsschwingbreite für diesen Lastfall mit

$$\Delta\sigma (\text{Lf 3}) = 3 \text{ kN/cm}^2$$

mit einer zugeordneten Lastwechselzahl von

$$n_3 (\text{Lf 3}) = 830.000$$

Lastfall 4: Aufnahmen eines Leercontainers an Land und Absetzen an Bord in Auslegermitte

$$\begin{aligned}\sigma_u (\text{Lf 4}) &= \sigma_e (\text{Lf 1}) = && 1 \text{ kN/cm}^2 \\ \sigma_o (\text{Lf 4}) &= && 3 \text{ kN/cm}^2 = (1 + 2)\end{aligned}$$

daraus folgt die Spannungsschwingbreite für diesen Lastfall mit

$$\Delta\sigma (\text{Lf 4}) = 2 \text{ kN/cm}^2$$

mit einer zugeordneten Lastwechselzahl von

$$n_4 (\text{Lf 4}) = 1.500.000$$

Da diese Spannungsschwingbreite unter dem „Cut-off limit“ liegt (siehe /7/), liefert sie keinen Beitrag zur Schädigung.

Die Wertepaare werden jetzt in die Gleichung (7) eingesetzt und es ergibt sich:

$$\begin{aligned}S &= \frac{455.000}{2.000.000} * \left[\frac{8}{8} \right]^3 + \frac{830.000}{5.000.000} * \left[\frac{3}{5,9} \right]^3 && (10) \\ &= 0,2275 + 0,022 = 0,25.\end{aligned}$$



Das bedeutet, dass an dieser Bauteilstelle erst 25 % der projektierten Spannungs- bzw. Lastwechsel verbraucht sind.

A 2 Neuberechnung der Nutzungsdauer und Erhöhung der Tragfähigkeit eines Greiferschiffsentladers Berechnungsgrundlage DIN 15018

A 2.1 Technische Daten

Krantyp	Verladebrücke mit seilgezogener Katze und Hilfskatze, Greifer- und Stückgutbetrieb	
Baujahr		1976
Tragfähigkeit im Greiferbetrieb		32 t
Tragfähigkeit im Stückgutbetrieb		37 t
Ausladung WS		35 m
Ausladung LS		30 m
Spurweite		15 m
Gesamthubhöhe		40 m
Heben/Senken		120 / 160 m/min
Katzfahren		240 m/min

Einstufungen des Krantragwerkes nach DIN 15018

	32 t-Greiferbetrieb	37 t-Stückgutbetrieb
Ausleger, Pylone, Zugbänder	H 3, B 5	H 2, B 5
Fahrwerke, Portal, Pylonkopf	H 3, B 4	H 2, B 4
Hublastbeiwert	$\psi = 1,9$	$\psi = 1,6$
Eigenlastbeiwert	$v = 1,1$	$v = 1,1$

Die Einstufungen gelten für die maximalen Ausladungen.



A 2.2 Neuberechnung

Nach 22 Betriebsjahren ergab sich nach Auswertung der vom Betreiber aufgezeichneten Umschlagsdaten, dass die projektierte theoretische Nutzungsdauer des Krantragwerkes teilweise überschritten war.

Außerdem kam es beim Umschlag von feinkörnigem Material oft zu ungewollten Abschaltungen durch das Ansprechen der Überlastsicherung.

Mit der vorgenommenen Neuberechnung sollte die zulässige Tragfähigkeit des Entladers im Greiferbetrieb erhöht werden, um bei unveränderter Betriebsweise die Abschaltungen durch die Überlastsicherung in Zukunft zu minimieren.

Außerdem sollte der weitere sichere Betrieb der Krananlage nachgewiesen werden.

Die Neuberechnung erfolgte in 2 Schritten.

Schritt 1: Hublast 35 t mit unverändertem Hublastbeiwert $\psi = 1,9$

Das Krantragwerk wurde neu eingestuft, um einerseits die erhöhte Lastspielzahl und andererseits den tatsächlichen Umschlagsbetrieb wirklichkeitsnäher zu erfassen.

Für die in der Praxis seltener auftretenden Lastfälle mit der Katze in den Bereichen der maximalen wasserseitigen oder landseitigen Ausladung, wurde die Einstufung für den Ausleger und die Zugbänder in die Beanspruchungsgruppe B 5 und für das Portal und die Fahrwerke in B 4 beibehalten. Die Pylone wurden ebenfalls der Gruppe B 4 (vorher B 5) neu zugeordnet.

Bei den meisten Arbeitsspielen erreicht die Katze nur 75 % der maximal möglichen Ausladung. Für diese häufig auftretenden Lastfälle wurde für alle Baugruppen eine höhere Einstufung gewählt, für die Ausleger und die Zugbänder B 6 und für die Pylone, das Portal und die Fahrwerke B 5.

Die Beanspruchung der Katzen ist unabhängig von der Katzstellung. Deshalb erfolgte eine Einstufung in die höchste Beanspruchungsgruppe B 6.

Mit den hier vorgenommenen neuen Einstufungen und der auf 35 t erhöhten Tragfähigkeit konnten alle Betriebsfestigkeitsnachweise geführt werden. Außerdem ergaben sich bei den Lastspielzahlen ausreichende Reserven für einen sicheren Weiterbetrieb.



Schritt 2: Hublast 38 t

Ziel des zweiten Berechnungsschrittes war es, bei einer Tragkraftherhöhung auf 38 t und bei Beibehaltung des Hublastbeiwertes von $\psi = 1,9$ und der Einstufung nach Berechnungsschritt 1, die Betriebssicherheit des Schiffsentladers nachzuweisen.

Bei einigen Krankomponenten wurden für diese Lastannahme jedoch Spannungsüberschreitungen bzw. Unterschreitungen der erforderlichen Beulsicherheiten ermittelt, die umfangreiche Verstärkungen nach sich gezogen hätten.

Da der Hublastbeiwert mit 1,9 erfahrungsgemäß sehr hoch angesetzt war, sollten nun Messungen der dynamischen Kräfte am Entlader Aufschluss über den tatsächlichen Hublastbeiwert geben.

Es wurde ein maximaler Hublastbeiwert von $\psi = 1,5$ ermittelt.

Somit konnte die gewünschte Traglasterrhöhung auf 38 t ausgeführt werden, ohne dass Verstärkungen vorgesehen werden mussten. Die tatsächlichen Belastungen des Entladers liegen bei dieser Tragfähigkeit noch weit unterhalb der Annahmen im Berechnungsschritt 1.

A 2.3 Schlussbemerkung

Von dem hier behandelten Schiffsentlader lagen alle Konstruktionszeichnungen und statischen Berechnungen vor. Die geleisteten Arbeitsspiele und ein wirklichkeitsnahes Belastungskollektiv konnten durch die Aufzeichnungen des Betreibers über die Umschlagsmengen und die genaue Kenntnis der Arbeitsweise des Entladers ermittelt werden.

Unter diesen Voraussetzungen war der Aufwand für die Berechnungen relativ gering. Die erforderlichen Messungen am Entlader waren ebenfalls einfach durchzuführen.

Die Tragfähigkeit konnte somit von 32 t auf 38 t erhöht und gleichzeitig eine für viele Betriebsjahre ausreichende Nutzungsdauerreserve des Stahltragwerkes nachgewiesen werden.