

# PROBLEME DER ZEITGEMÄSSEN BEMESSUNG VON FÖRDERTECHNISCHEN MASCHINEN

J. SVÁB

Lehrstuhl für Bau- Förder- und Lasthebemaschinen,  
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen am 29 März, 1984

## Summary

Condition of the dimensioning of the modern material handling- and hoisting machines is the knowledge of the mechanical employments. These are either static or dynamic and both of them can be predefinite (deterministic) or in the function of the time or of the moving accidentally variable (stochastic). The inner stresses arising from the production and mounting are unknown. Neither are they definable by measuring. It means a difficulty, that in the crucial points of the structure not only the extent but the directions of the main-stresses are alternating depending on the employments with alternating size and direction. The working load of the materials are at such employments so far unknown. The modern dimensioning is practicable only with cooperation of the specialists from several scientific fields (dynamics, statics, measuring-technology, fracture-theory).

Wegen der immer größeren ökonomischen Schwierigkeiten sind nur die billigen, leichten und doch zuverlässigen fördertechnischen Maschinen verkaufbar.

Das Bestreben zur Herstellung von immer leichteren und leichteren fördertechnischen Maschinen ist nur dann erfolgreich, wenn der Konstrukteur die Beanspruchungen der Maschinen, daraus die Spannungsverteilung in den Bauelementen gut kennt und so die Festigkeitscharakteristiken der Werkstoffe gut bestimmen kann.

Die Bestimmung der Belastungen und der Spannungsverteilungen ist mit der Hilfe der zeitgemäßen Methoden der Festigkeitslehre und der Computer (z. B. mit der Methode der Finitelemente) theoretisch möglich.

Der Konstrukteur hat aber zwei große Probleme:

- die Belastungen der fördertechnischen Maschinen sind Resultierende von sehr verschiedenen Komponenten wobei ein Teil dieser Komponenten stochastisch ändernde Werte besitzt;
- die Beschädigungen der Werkstoffe infolge stochastischer Beanspruchungen sind noch nicht genügend bekannt.

Die verschiedenen nationalen und internationalen Normen über Hebe-  
maschinen, z. B. MSZ, DIN, GOSZT, ISO, COMECON, FEM rechnen mit  
verschiedenen Kombinationen der Belastungen und nehmen auch die  
klassischen Ergebnisse der Bemessung für vorgeschriebene Lebensdauer in  
Betracht.

Jede Norm bestimmt verschiedene Beanspruchungsgruppen je nach der  
Belastung- oder Beanspruchungsverteilung und nach der Beanspruchungs-  
zahl. Die schwer und oft belasteten Krane werden in die höheren, die leichter  
und selten belasteten Krane in die niedrigeren Beanspruchungsgruppen  
eingestuft. Außerdem rechnen die Normen mit verschiedenen Belastungsfällen.  
Bei normaler Betriebsbelastung müssen jene Belastungen in Betracht genom-  
men werden die im Normal-Betrieb vorkommen, im Sonderbelastungsfall nur  
mit solchen selten vorkommenden aber größeren Belastungen, die z. B. durch  
Stoß oder durch außerordentlich starken Wind entstehen. Zu den höheren  
Belastungsgruppen, oder zur Betriebsbelastung gehören niedrige, zu den  
niedrigen Belastungsgruppen oder zum Sonderbelastungsfall höhere zulässige  
Spannungen.

DIN 15018-74 bestimmt die Beanspruchungsgruppen nach idealisierten,  
auf Betrieb bezogene Spannungskollektiven. Diese hat das Laboratorium für  
Betriebsfestigkeit Darmstadt [1] mit Mehrstufen-Versuchen nach der Theorie  
von Corten-Dolen ausgearbeitet.

Die Schwierigkeiten der Bestimmung der Spannungskollektive und auch  
die Probleme der Auswertung der Spannungskollektive werden am Beispiel  
der Belastungen eines Hafen-Portalkranes vorgeführt (Abb. 1).

Der Kran hat vier Bewegungen: Heben, Drehen, Wippen und Fahren. Er  
macht in derselben Zeit oft zwei verschiedene Bewegungen, z. B. Drehen und  
Wippen.

Die Massenverteilung und die Elastizität des Stahltragwerkes verändern  
sich abhängig von der Lage des Auslegers:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}(\alpha, \varphi) \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}(\alpha, \varphi),$$

wobei  $\mathbf{M}$  Matrix der Massen

$\mathbf{S}$  Matrix der Steifigkeit,

$\alpha$  Winkel zwischen der Ausleger-Ebene und der Kranbahnrichtung,

$\varphi$  Winkel zwischen der Ausleger-Mittellinie und der senkrechten  
Ebene ist.

Die Massenkräfte sind abhängig von der Schwerkraft ( $g$ ) (Eigengewichte),  
von den Beschleunigungen der sich bewegenden Massen ( $a_i, \varepsilon_i$ ), doch auch von  
den Fliehkräften und den Coriolis-Kräften.

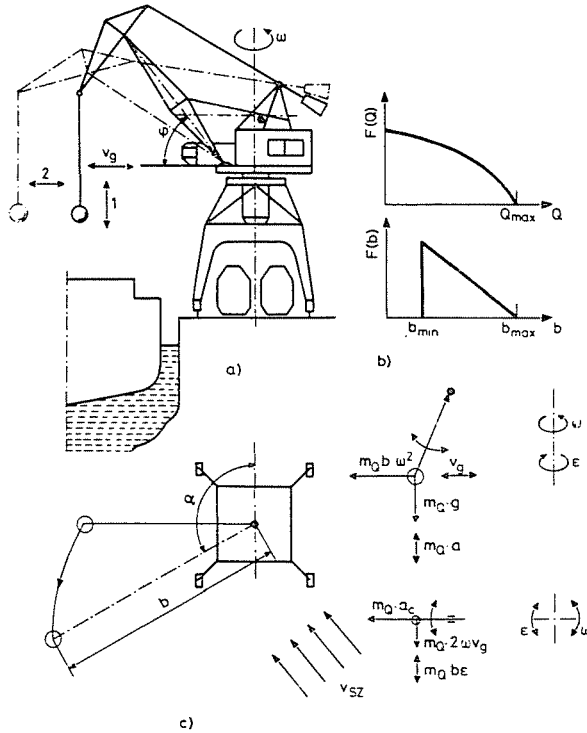


Abb. 1. Belastung eines Portalkranes.  
 a. Schema und Bewegungen des Portalkranes.  
 b. Verteilungsfunktionen der Nutzlast ( $Q$ ) und Ausladung.  
 c. Die an die Last wirkende dynamische Kräfte

Die Massenkräfte sind größer als die für starres System bestimmte Werte, da das elastische, gedämpfte System sehr zusammengesetzte, erregte Schwingung aufweist. Die Kräfte in den Bauelementen können mit Hilfe der Erregung bestimmt werden:

$$F_d = F_d[\mathbf{M}(t), \mathbf{S}(t), \mathbf{K}(t), f(t)],$$

wo  $\mathbf{K}(t)$  Matrix der Dämpfung, und  $f(t)$  Vektor der Erregung ist.

Zu den inneren Kräften zählen noch die durch begrenzte Wärmedehnung und bei Fertigung und Montage entstehenden Kräfte. Die Wärmebelastungen sind errechenbar, nicht jedoch die Belastungen, die bei der Fertigung oder Montage entstehen. Diese Belastungen sind manchmal so groß, daß die Bauteile schon unter der Wirkung von sehr niedrigen äußeren Beanspruchun-

gen beschädigt werden. Die inneren Spannungen lassen sich folglich, leider, nicht ermitteln.

Äußere Kräfte sind die Stützkkräfte, die Randkräfte der Räder, die Kräfte aus Schrägläuf, die Pufferkräfte und die Windbelastung. Die Normen rechnen nur mit den Spitzenwerten dieser Kräfte. Tatsächlich ändern jedoch diese Beanspruchungen stochastisch.

Die Stützkkräfte hängen z. B. von der Größe der Nutzlast, von der Lage des Auslegers, von den durch die Bewegungen verursachten dynamischen

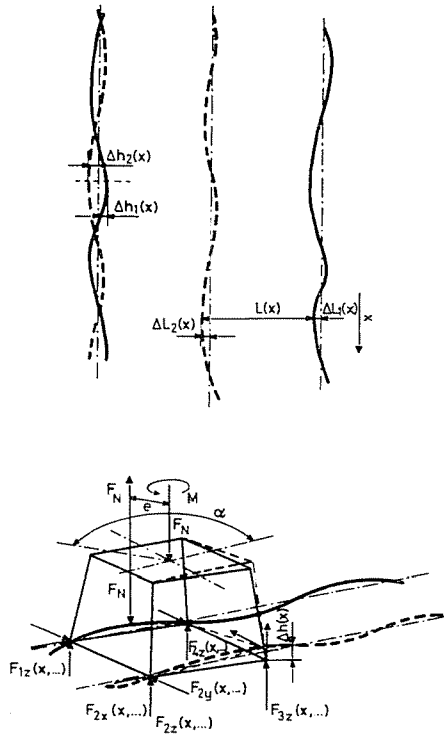


Abb. 2. Fehler des Kranbahns und die von den stammende zusätzliche Stützkkräfte

Kräften, von der Windbelastung und auch von den Fehlern der Kranbahn ab. Wo z. B. der Stützpunkt der Kranschiene höher liegt (Abb. 2), als die ideale Bahnebene, dort bewegt sich auch der Stützpunkt des Stahltragwerkes mit dem Wert  $\Delta h$  nach oben, wobei eine antimetrische Zusatzkraft entsteht die abhängig von der Federkonstante „c“ des Stahlwerkes ist:  $\Delta F = \Delta h/c$ . Die Kranbahnfehler verändern sich in Funktion der Kranbahnlänge stochastisch.

Aus den vorherigen Beispielen ist zu sehen, wie schwer die Kollektive der Hauptspannungen, oder die Zeitfunktionen der Hauptspannungen in einem kritischen Punkt eines Bauelementes theoretisch zu bestimmen sind. In den meisten Fällen verändern sich die Hauptspannungen von einander unabhängig, so kann nicht eine zusammengesetzte Spannungskollektive z. B. nach Huber-Mises bestimmt werden (Abb. 3).

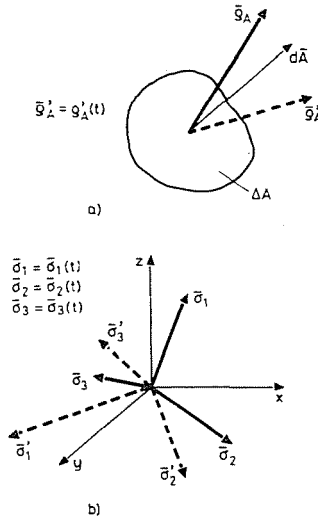


Abb. 3. Veränderung der Spannungen.

- a. Die Veränderung der an die elementare Fläche  $\Delta A$  wirkende Spannung  
 b. Veränderung der Hauptspannungen

Eine andere Möglichkeit ist die Spannungsveränderungen z. B. mit Dehnungsmeßstreifen zu bestimmen. Bei diesem Verfahren ergeben sich ebenfalls mehrere Probleme:

- man kann nur die Oberflächendehnungen messen und die Meßpunkte müssen zu bestimmten kleinen Abständen von dem Ort der Krafteinfuhr liegen;
- man kann nur die Dehnungsveränderungen messen, ohne Information über die Werte der absoluten Dehnungen bzw. der absoluten Spannungen zu erhalten. Die sich von den Eigengewichten ergebenden Spannungen der Krane haben eben so große, manchmal größere Werte, als die aus der Nutzlast und von den dynamischen Spannungen verursachten Spannungen. Auch lassen sich die von der Fertigung und Montage entstehenden Spannungen so nicht bestimmen.

Es gibt natürlich solche Verfahren, z. B. die Spannungsoptik mit Zweikomponenten-Kunststoff, mit denen alle drei Hauptspannungen bestimmt werden können, aber diese Verfahren informieren nur über einen statischen Spannungszustand.

Nur eine Möglichkeit bleibt den wahrscheinlichen Lebensdauer zu bestimmen: der Modellversuch. Zu diesem Verfahren muß man zu erst die kritischen Teile des Stahltragwerkes (z. B. kritische Knotenpunkte, Krafteinführungspunkte) oder kritische Bauelemente (z. B. Wellen, Zahnräder) durch theoretische Erwägungen auswählen. Der zweite Schritt ist die Belastungskollektive der Bauteile mit Messungen oder mit der theoretische Untersuchung der dynamischen Modelle zu bestimmen. Zu diesem Modellversuchsverfahren sind die Kenntnisse der Verteilungsfunktionen der Nutzlast, der verschiedenen Auslegerpositionen und der stochastischen Eigenschaften der Kranbahnfehler und des Windes nötig. Eine zusammengesetzte Untersuchung dieser Einflußfaktore ist nur mit dem Simulationsverfahren möglich.

Modellversuche mit 1:1 Modellen sind sehr kostspielig. Mit kleineren Modellen ergibt sich die Schwierigkeit daß z. B. die Schweißnahte nicht gleichwertig verkleinert werden kann und auch sind die mechanischen Modellgesetze noch nicht ausführlich untersucht.

Das billigste und schnellste Verfahren wäre es, wenn wir die stochastischen Kennfunktionen der zusammengesetzten Spannungen den Wissenschaftlern die sich mit der Betriebsfestigkeit beschäftigen überreichen könnten. Sie könnten dann die wahrscheinliche Lebensdauer bestimmen. Dazu müßten wir aber wissen:

- wie die zusammengesetzten Spannungen bestimmt werden könnten, wenn die Hauptspannungen unabhängig von einander sich verändern,
- was für eine stochastische Kennfunktion zum weiteren Versuch aufgestellt werden müßte: z. B. Spannung-Zeit Funktion, Frequenz-Amplituden Funktion oder Autokorrelations-Funktion.

In dem Lehrstuhl für Bau- und Fördertechnischen Maschinen der T. U. Budapest beschäftigen wir uns seit mehreren Jahren mit den dynamischen Versuchen der Krane, wobei wir mit analogen und digitalen Simulationen und außerdem hierzu ausgearbeiteten Meßverfahren die wahre Beanspruchungen der Bauteile und auch stochastische Kennzahlen der Kranbahnfehlern besser nähern können. Wir beschäftigen uns auch mit der statistischen Auswertung der Meßergebnisse. Die Zusammenarbeit mit den Kollegen, die sich mit der Beschädigungstheorie beschäftigen, könnte uns helfen, um unsere Ergebnisse in der Praxis verwertbar zu machen.

## Zusammenfassung

Die Bedingung der Bemessung der zeitgemäßen fördertechnischen Maschinen ist die genaue Kenntnis der Belastungen. Die Belastungen sind statisch oder dynamisch und beide können vorbestimmt (deterministisch) oder in der Zeit (oder in der Funktion der Bewegung) wahrscheinlich veränderlich (stochastisch) sein. Unbekannt sind die von der Fertigung und Montage stammende innere Belastungen. Diese sind auch mit Messungen nicht bestimmbar. Es macht eine Schwierigkeit, daß nicht nur die Größen, sondern auch die Richtungen der Hauptspannungen bei Einwirkung von Beanspruchungen von veränderlichen Größen und Richtungen sich ändern. Die Tragfähigkeit der Baumaterialien ist bei solchen Beanspruchungen bisher noch unbekannt. Die zeitgemäße Bemessung ist nur durch Zusammenarbeit der Spezialisten möglich, die an verschiedenen Fachgebieten arbeiten (Dynamik, Festigkeitslehre, Meßtechnik, Beschädigungstheorie).

### Literatur

1. Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Technische Mitteilungen Nr 15/65; Verwendung eines Einheitskollektive bei Betriebsfestigkeits-Versuchen.

Prof. Dr. János SVÁB H-1521 Budapest