

# Modellierung und Untersuchung eines segmentierten Fachwerksystems für Brückenkranträger

Modeling and investigation of a segmented truss structure for overhead cranes

Jan Oellerich  
Steffen Bolender  
Markus Golder  
Kai Furmans

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**B**rückenkrane werden heutzutage oft als geschweißte Profil- oder Kastenträger ausgeführt, deren Fertigung sich als sehr zeit- und kostenintensiv gestaltet. Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) wurde in diesem Zuge ein neuartiges Kranbrückenkonzept entwickelt, welches sich dadurch auszeichnet, dass die Kranbrücke aus standardisierten Einzelteilen zu einer Fachwerkstruktur gefügt und über Zuganker verspannt wird. In dem folgenden Beitrag werden Modellierungsstrategien vorgestellt, welche im Rahmen der gegenwärtigen Forschungstätigkeiten herangezogen werden, um sowohl das elastostatische als auch das dynamische Verhalten der segmentierten Tragwerksstruktur beschreiben zu können.

[Schlüsselwörter: Brückenkranträger, Tragwerksstruktur, Segmentbauweise, Modellierung, Fachwerk]

**O**verhead cranes are mostly designed as welded rolled-steel joists or box-girders while their production is characterized by high costs and a huge period of time. At the Institute for Material Handling and Logistics (IFL) a new overhead crane concept was developed which stands out due to the combining of standardized components to a truss structure. These components are prestressed by tension anchors to maintain the contacts between the single elements. This report deals with different modeling strategies which can be used in the frame of current research to determine the elastic as well as dynamic characteristics of the segmented bearing structure.

[Keywords: Overhead crane girder, support structures, segmented construction, modeling, truss]

## 1 EINLEITUNG

Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde ein neuartiges Brückenkrankenkonzept entworfen, welches

sich dadurch auszeichnet, dass die Kranbrücke aus standardisierten Einzelteilen zu einer Fachwerkstruktur zusammengesteckt und über Zuganker, welche im Ober- und Untergurt verlaufen, verspannt wird. Durch die Vorspannung wird ein Kontakt zwischen den einzelnen Fügestellen hergestellt und die Struktur ist damit in der Lage, Momente zu übertragen. Erst dadurch wird sie zu einer tragenden Struktur. Hierbei ist insbesondere das Phänomen zu beobachten, dass der Struktur Normalkräfte aufgeprägt werden, welche einen Einfluss auf die statischen und dynamischen Charakteristiken des Systems besitzen. Weiterhin kann dem neuen Konzept ein wirtschaftliches Interesse zugeschrieben werden, da die Einzelteile auf Europoolpaletten zum Einsatzort transportiert und vor Ort montiert werden. Dadurch lässt sich der Transportaufwand deutlich senken. Aufgrund der großen Abmessungen herkömmlicher Kranbrücken ist ein Transport auf öffentlichen Straßen meist mit einem hohen Aufwand verbunden, da diese oft nur im Rahmen von Schwerlasttransporten zu realisieren sind. [BOBG17]

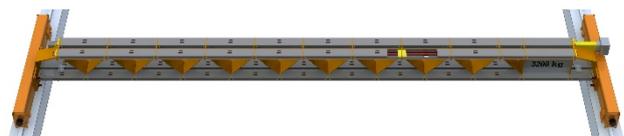


Abbildung 1. CAD-Rendering der segmentierten Kranbrücke

Konventionelle Brückenkrane lassen sich aufgrund ihrer Geometrie und Abmessungen als Balken konstanten Querschnitts und konstanter Materialeigenschaften darstellen. Dieser Umstand ermöglicht eine Modellierung des gesamten Systems als kontinuierliche Balkenstruktur, welche sich mithilfe der Kenntnisse der technischen Mechanik verhältnismäßig leicht umsetzen lässt und auf hinreichend genaue Ergebnisse führt. Aufgrund des segmentierten Aufbaus der neuartigen Kranbrücke können durch diese Vorgehensweise die Verwendung unterschiedlicher Materialien und Querschnittsänderungen jedoch nur bedingt berücksichtigt werden. [Gol04]

Die gegenwärtigen Forschungstätigkeiten des IFL beziehen sich auf die Untersuchung der zu beobachtenden Phänomene der neuartigen segmentierten Tragwerksstruktur und der Bildung eines mechanischen Ersatzmodells, um das Verhalten der Kranbrücke bei Lasteinwirkung beschreiben zu können. Diese Kenntnisse sind im Hinblick auf die folgenden Nachweisführungen sowie die spätere Markteinführung von großer Bedeutung.

Im weiteren Verlauf des Beitrags sollen insbesondere die möglichen Modellierungsstrategien zur Beschreibung des elastostatischen Verhaltens beleuchtet werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die segmentierte Kranbrücke. Für die weitere Beschreibung sind sowohl die Querstreben als auch die Segmente farblich hervorgehoben. Eine detaillierte Beschreibung des Konzepts findet sich in [BOBG17].

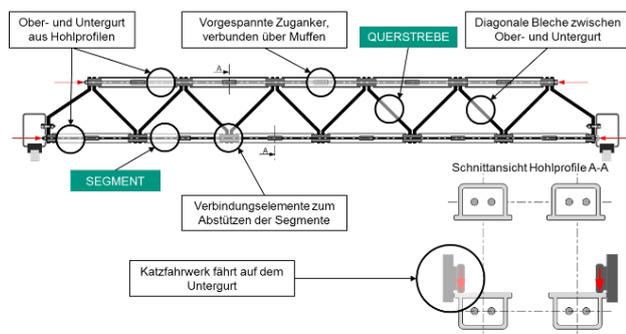


Abbildung 2. Schematische Darstellung der segmentierten Kranbrücke

## 2 MODELLIERUNGSSTRATEGIEN

Vor dem Hintergrund der Beschreibung des elastostatischen und dynamischen Verhaltens der segmentierten Kranbrücke stehen unterschiedliche Strategien zur Verfügung, um die individuellen Eigenschaften entsprechend abbilden zu können.

Im Folgenden sollen diese vorgestellt und die Potentiale der möglichen Modellierungsstrategien hervorgehoben werden. Um bereits im Vorfeld eine geeignete Vorgehensweise festzulegen, bedarf es eines hohen Maßes an Erfahrung. Da die segmentierte Kranbrücke ein neuartiges Konzept einer Tragwerksstruktur darstellt, gilt es, geeignete Modellierungsstrategien zu identifizieren und zu bewerten, um zukünftig einen Beitrag hinsichtlich der Auslegung leisten zu können.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Auswahl diskreter Elemente. Es sei darauf hingewiesen, dass zusätzlich diskrete Elemente zur Beschreibung von Dämpfungseigenschaften eingesetzt werden. Diese sind insbesondere vor dem Hintergrund einer dynamischen Betrachtung des Systems von hoher Bedeutung, da durch diese unter anderem das Ausschwingverhalten einer Struktur beschrieben werden kann.

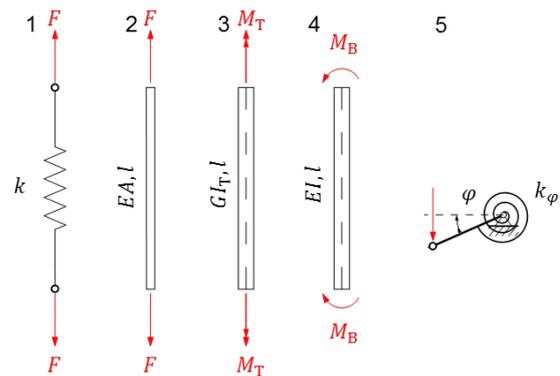


Abbildung 3. Auswahl an diskreten Elementen

Nr.	Bezeichnung
1	Zug- bzw. Druckfeder
2	Zug- bzw. Druckstab
3	Torsionsstab
4	Biegebalken
5	Drehfeder

### 2.1 DISKRETE MODELLIERUNG

Im Rahmen einer diskreten Modellierung werden einzelne Elemente eines Gesamtsystems auf ihre jeweiligen, primär vorherrschenden Eigenschaften reduziert und mit einer endlichen Anzahl an Freiheitsgraden versehen. Dies ist insbesondere sinnvoll, sofern sich die Elemente der Struktur in einem ausgeprägten Maß voneinander unterscheiden. So ist es beispielsweise zweckmäßig, eine Schraubenfeder auf ihre federnden Eigenschaften zu reduzieren. Zwar hat diese auch ein Eigengewicht, die Trägheit aufgrund der Masse ist jedoch im Vergleich zur federnden Wirkung vernachlässigbar klein.

Das Ziel der diskreten Modellierung umfasst hierbei die Beschreibung des Systemverhaltens mithilfe von Systemmatrizen. Bei schwingungsfähigen Systemen sind hierbei insbesondere die Massenmatrix  $\mathbf{M}$ , die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  und sowie die Dämpfungsmatrix  $\mathbf{B}$  zu nennen. Die allgemeine Form eines freischwingenden Systems ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0}$$

Die Matrizen werden mit Vektoren multipliziert, welche sowohl die Beschleunigungen  $\ddot{\mathbf{q}}$  als auch die Geschwindigkeiten  $\dot{\mathbf{q}}$  und Weggrößen  $\mathbf{q}$  beinhalten.

Die Dimension der quadratischen Matrizen ergibt sich durch die aufgeprägten Freiheitsgrade der Struktur. Die Einträge der Massenmatrix beinhalten die Massen bzw.

Massenträgheitsmomente der Struktur und die der Dämpfungsmatrix die Ersatzdämpfungen. Die Steifigkeitsmatrix enthält wiederum die Ersatzsteifigkeiten des Systems und kommt vor allem bei der Betrachtung des elastostatischen Verhaltens zum Tragen. Mit ihrer Hilfe lassen sich Rückschlüsse auf die auftretenden Kräfte in der Struktur bei vorgegebenen Verschiebungen ziehen. Ihre Inverse wiederum (die sogenannte Nachgiebigkeitsmatrix  $H = K^{-1}$ ) dient hingegen der Ermittlung sich einstellender Verschiebungen bei definierten Lasten.

Die segmentierte Kranbrücke zeichnet sich durch den Einsatz unterschiedlicher Profile und Elemente aus, welche innerhalb der Struktur unterschiedliche Funktionen ausüben. Weiterhin ist durch segmentierte Bauweise die Verwendung unterschiedlicher Materialien möglich. Demnach ist die diskrete Modellierung eine sinnvolle Vorgehensweise.

In einem ersten Schritt soll der Versuch unternommen werden, diese einzelnen Komponenten auf diskrete Elemente zurückzuführen und somit erste Modellbildungen vorzunehmen. Im Fokus der Betrachtung steht zunächst die Bestimmung der Steifigkeitsmatrix  $K$ , da sie eine Beschreibung des elastostatischen Verhaltens erlaubt. [Din17, S. 80 ff.]

### 2.1.1 FEDER-MODELL

Eine konventionelle Betrachtung von Fachwerken umfasst die Einführung von masselosen und geraden Stäben, die an sogenannten Knotenpunkten zusammenlaufen und somit das Gerüst für den Fachwerkaufbau bilden. Dabei wird unter anderem vorausgesetzt, dass diese an den Knotenpunkten reibungsfrei und gelenkig gelagert sind. Weiterhin werden die Stäbe lediglich auf Zug bzw. Druck beansprucht. Etwaige Durchbiegungen der Stäbe werden vernachlässigt. Weiterhin befindet sich die Lasteinwirkung bei dieser Vorgehensweise immer an den Knotenpunkten.

Es sei dabei angemerkt, dass dies nicht der Realität entspricht, da beispielsweise die Stäbe des Fachwerks des Auslegers eines Turmdrehkrans zum einen an den Knotenpunkten miteinander verschweißt werden und somit keine Drehungen möglich sind und zum anderen massebehaftet sind. Dennoch bietet diese Vorgehensweise einen ersten Zugang zum System, um die auftretenden Kräfte innerhalb der Struktur berechnen zu können. [GHSW16, S. 151 ff.]

Im Rahmen der diskreten Modellierung mit Federn werden allen Komponenten der Kranbrücke federnde Eigenschaften zugewiesen, d.h. es wird vorausgesetzt, dass alle Elemente ausschließlich auf Zug bzw. Druck beansprucht werden. Weiterhin werden in die Knotenpunkte Massepunkte gelegt, welche jeweils zwei Freiheitsgrade aufweisen und in denen die Federn zusammenlaufen. Über infinitesimale Auslenkungen der Massepunkte entlang ih-

rer Freiheitsgrade, kann ein Rückschluss dahingehend gezogen werden, mit welchen Steifigkeiten das System auf die Auslenkungen antwortet.

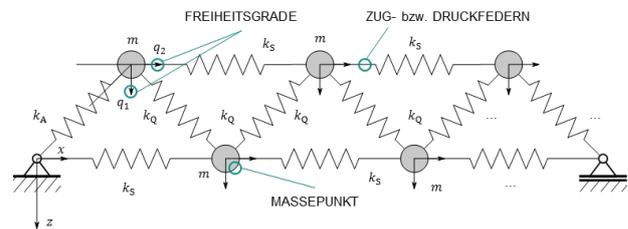


Abbildung 4. Feder-Modell

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Auslenkung eines Massepunktes entlang seiner Freiheitsgrade. Infolge der Auslenkung erfährt das System eine Deformation, der es mit einer gewissen Steifigkeit begegnet. Es sei darauf hingewiesen, dass im Zuge der diskreten Modellierung kleine Verformungen vorausgesetzt werden, da diese eine lineare Betrachtung des Systems ermöglichen.

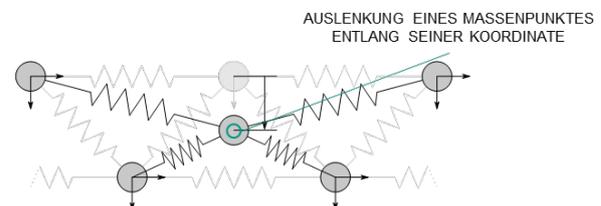
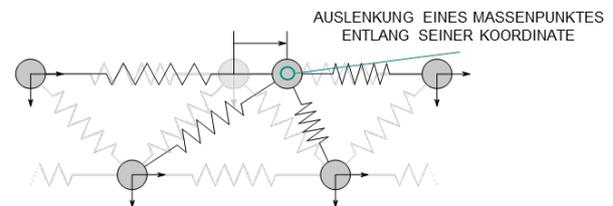


Abbildung 5. Auslenkung eines Massepunktes entlang seiner definierten Freiheitsgrade

Mithilfe der diskreten Modellierung unter Zurückführung auf ausschließlich federnde Eigenschaften der Elemente soll festgestellt werden, mit welcher Qualität hinsichtlich der Genauigkeit sich das elastostatische und im weiteren Verlauf das dynamische Verhalten abbilden lässt.

### 2.1.2 FEDER-BALKENMODELL

Sowohl die Querschnittsgeometrie als auch die Abmessungen der Länge der Segmente im Ober- und Untergurt der Kranbrücke lassen den Schluss zu, dass Anteile aufgrund von Biegung nicht vernachlässigbar sind. Dies hat einen direkten Einfluss auf das Steifigkeitsverhalten der Struktur und kann über die Reduktion der Segmente auf Balken in der Modellierung berücksichtigt werden. Diese Balken laufen dann in den Knotenpunkten zusammen, während die Querstreben weiterhin als Federn dargestellt werden.

Die Ermittlung der resultierenden Steifigkeiten erfolgt nach demselben Prinzip. Auch hier werden die Massepunkte entlang ihrer Freiheitsgrade ausgelenkt, woraufhin das System mit gewissen Steifigkeiten reagiert. Bei der Auslenkung werden alle anderen Freiheitsgrade festgehalten. Hieraus ergeben sich für die Balken wiederum Lagerungsbedingungen, die einen Einfluss auf die Durchbiegung haben. Die Vorgehensweise beinhaltet dabei die Rückführung des Balkens infolge der Deformation auf eine federnde Wirkung. Dies bedeutet ferner, dass über die Bestimmung der Biegelinie des Balkens die Steifigkeit gewonnen werden kann, sofern die Absenkung am Kraftangriffspunkt bekannt ist. Diese lässt sich analytisch über die Herleitung der Biegelinie bei definierten Lagerungsbedingungen ermitteln.

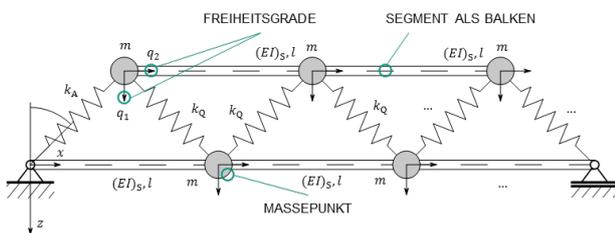


Abbildung 6. Feder-Balkenmodell

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Auslenkungen eines Massepunktes entlang seiner Freiheitsgrade. Insbesondere im oberen Teil der Darstellung ist der Biegeanteil durch die zusätzlich eingefügte Balkenwirkung der Segmente dargestellt.

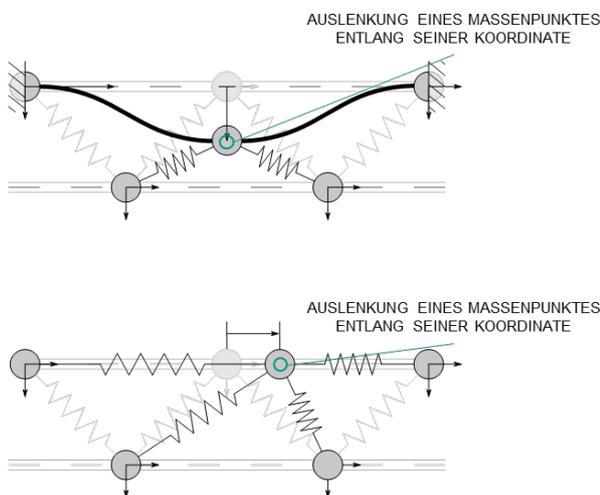


Abbildung 7. Auslenkung eines Massepunktes entlang seiner definierten Freiheitsgrade (Feder-Balkenmodell)

Das Feder-Balkenmodell stellt somit eine Erweiterung des reinen Federmodells dar und verspricht die Gewinnung genauerer Ergebnisse, da durch die Einführung der Balkenwirkung der Segmente ebenfalls die geometrischen Abmessungen des Querschnitts und der damit einhergehenden Flächenträgheitsmomente berücksichtigt werden. [GHSW17, S.89 ff.] Inwiefern

genauere Ergebnisse erzielt werden können, muss eingehend untersucht werden.

### 2.1.3 EINFLUSS DER NORMALKRAFT AUF DIE RESULTIERENDE STEIFIGKEIT EINER BALKENSTRUKTUR

Bei der Bestimmung der Biegelinie wird in der Regel vorausgesetzt, dass der Balken keiner Normalkraft ausgesetzt ist, das bedeutet, dass dieser ausschließlich quer zu seiner Schwerpunktsachse belastet wird. Die Ermittlung der Biegelinie erfolgt hierbei nach der Theorie I. Ordnung, dies bedeutet, dass das Momentengleichgewicht am unverformten System aufgestellt wird. Demnach kann ein Einfluss auf die Durchbiegung durch die Normalkraft nicht berücksichtigt werden.

Bei der Betrachtung der segmentierten Kranbrücke lässt sich beobachten, dass die Segmente im Ober- und Untergurt aufgrund der Vorspannung durch die Zuganker einer zusätzlichen Normalkraft ausgesetzt sind. Betrachtet man die Durchbiegung eines Segmentes nach der Theorie I. Ordnung, so kann ein möglicher Einfluss auf die Durchbiegung nicht abgebildet werden. Demnach wird ein erweiterter Ansatz unternommen, bei dem das Momentengleichgewicht am schwach verformten System aufgestellt wird, d.h. nach der Theorie II. Ordnung. Im Folgenden soll beispielhaft diskutiert werden, inwiefern sich die Normalkraft auf die resultierende Steifigkeit des Balkens auswirkt. [GHSW17, S.263 ff.]

Im Fokus der Betrachtung steht zunächst ein beidseitig gelenkig gelagerter Balken, welcher neben einer Belastung  $f$  quer zu seiner Schwerpunktsachse eine zusätzliche Normalkraft  $N^-$  erfährt, welche direkt in seiner Schwerpunktsachse wirkt und somit den Balken zusätzlich auf Druck beansprucht.

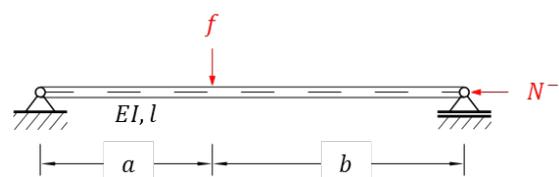


Abbildung 8. Gelenkig gelagerter Balken unter zusätzlicher axialer Belastung

Der Balken sei durch seinen E-Modul  $E$  und sein Flächenträgheitsmoment  $I$  beschrieben. Weiterhin sei seine Länge mit  $l$  gegeben. Die Kraft  $f$  greife bei  $a$  an. Im ersten Schritt wird das Momentengleichgewicht am schwach verformten System aufgestellt.

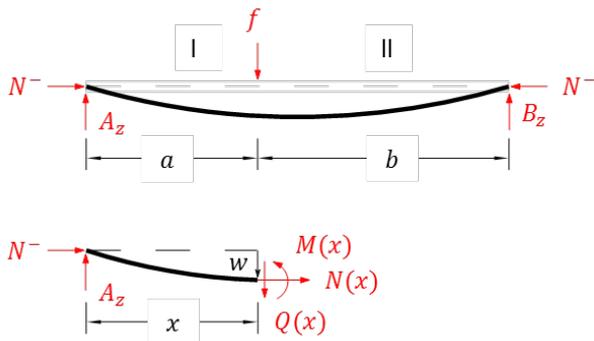


Abbildung 9. Freischnitt des Balkens im schwach verformten Zustand (Theorie II. Ordnung)

Dazu werden aufgrund der Einzelkraft die Momentengleichgewichte abschnittsweise (I und II) definiert und die Verläufe der Schnittgrößen berechnet, wobei für die Durchbiegung der Momentenverlauf  $M(x)$  entscheidend ist. Über die Rand- und Übergangsbedingungen zwischen den Bereichen kann die Biegelinie bestimmt werden. Der Momentenverlauf führt hierbei ähnlich der Knickgleichung aufgrund des Einflusses der Normalkraft auf eine inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung, welche sich durch eine geeignete Wahl der Ansatzfunktion für den Störterm auf der rechten Seite lösen lässt.

$$M(x) = A_z x + N^- w$$

$$EI w'' = -M(x)$$

$$EI w'' + N^- w = -A_z x$$

Damit folgt für die Durchbiegungen  $w_i$  in den Bereichen I und II mit  $\alpha = \sqrt{N^-/EI}$  und  $i = (I, II)$ :

$$w_I = C_1 \cos(\alpha x) + C_2 \sin(\alpha x) - \frac{A_z}{N^-} x$$

$$w_{II} = C_3 \cos(\alpha x) + C_4 \sin(\alpha x) - \left(\frac{f}{N^-} - \frac{A_z}{N^-}\right) x - \frac{f}{N^-} a$$

Die Integrationskonstanten lassen sich wiederum aus den Randbedingungen bestimmen. Diese ergeben sich zu:

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = -\frac{f}{N^- \alpha} \left( \frac{\sin(\alpha a)}{\tan(\alpha l)} - \cos(\alpha l) \right)$$

$$C_3 = -\frac{f}{N^- \alpha} \sin(\alpha a)$$

$$C_4 = -\frac{f}{N^- \alpha} \frac{\sin(\alpha a)}{\tan(\alpha l)}$$

$$A_z = f \left( 1 - \frac{a}{l} \right)$$

Die federnde Wirkung des Balkens kann nun bestimmt werden, indem man die Absenkung  $w(a) = q$  des Balkens am Kraftangriffspunkt  $a$  ermittelt. Stellt man diesen gewonnenen Ausdruck nach  $f$  um, so ergibt der Vorfaktor vor dem  $q$  gerade die Steifigkeit  $k$ . Es folgt:

$$f = k \cdot q$$

mit

$$k = \frac{N^- \cdot \alpha \tan(\alpha l) \cdot (1 + \tan^2(\alpha a))}{\tan(\alpha a) \cdot (\tan(\alpha l) - \tan(\alpha a)) + a \left( \frac{a}{l} - 1 \right) \cdot (\alpha \cdot \tan(\alpha l) \cdot (1 + \tan^2(\alpha a)))}$$

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Absenkung  $q$  der gefundenen Ersatzfeder infolge einer Kraft  $f$ . Der Balken wird nun als Feder interpretiert, welche durch die Belastung  $f$  eine Auslenkung erfährt.

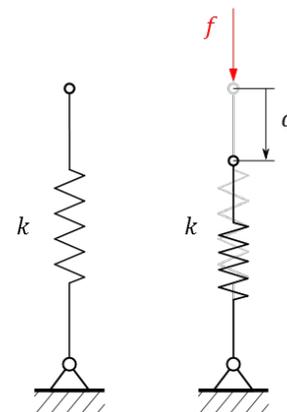


Abbildung 10. Rückführung des Balkens auf eine Feder

Durch die Betrachtung des Systems in der Theorie II. Ordnung und der Aufstellung des Momentengleichgewichts am schwach verformten System, konnte ein Ausdruck für die Steifigkeit ermittelt werden, welcher die Normalkraft  $N^-$  berücksichtigt.

Abschließend soll der Einfluss der Normalkraft auf die Steifigkeit des Balkens diskutiert werden. Dazu wird beispielhaft ein Balken mit den folgenden Kennwerten betrachtet:

- $E = 210000 \text{ Mpa}$
- $I = 10000 \text{ mm}^4$
- $a = 500 \text{ mm}$
- $l = 1000 \text{ mm}$

Der Ausdruck ergibt den dargestellten Abfall der Steifigkeit aufgrund der Normalkraft. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der Steifigkeit  $k$  über der Normalkraft  $N^-$ .

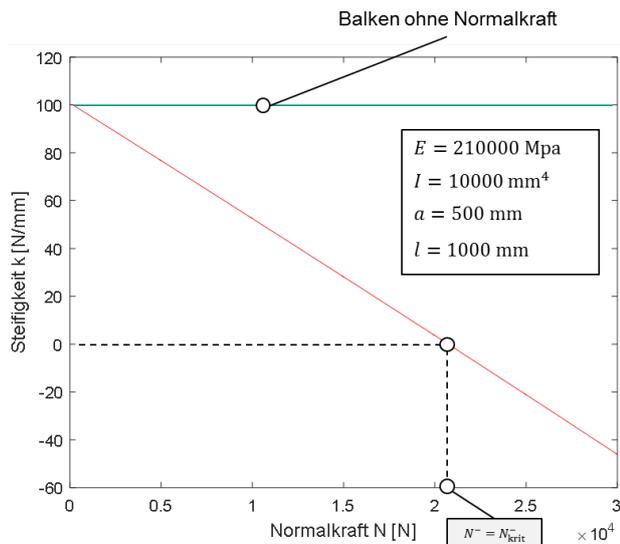


Abbildung 11. Untersuchung des Einflusses der Normalkraft auf die resultierende Steifigkeit

Es lässt sich erkennen, dass die Normalkraft einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Steifigkeit besitzt und im Falle der Druckbeanspruchung eine Verminderung der Steifigkeit zur Folge hat. Demnach liegt der Schluss nahe, die Steifigkeiten auf Basis der Theorie II. Ordnung zu ermitteln, um so den Einfluss der Normalkraft abbilden zu können.

Weiterhin wird die Steifigkeit bei zunehmender Steigerung der Normalkraft ab einer gewissen Kraft null. Diese ausgezeichnete Kraft entspricht gerade der Eulerschen Knicklast für die gewählte Lagerungsbedingung, dies bedeutet ferner, dass der Balken ab dieser Normalkraft knickt und somit auch die Eigenfrequenz zu null wird.

## 2.2 KONTINUIERLICHE MODELLIERUNG

Neben der diskreten Modellierung besteht die Möglichkeit ein System kontinuierlich abzubilden. Dabei sind die elastischen Eigenschaften und Trägheiten kontinuierlich über der Struktur verteilt. Weiterhin zeichnet sich das System dadurch aus, dass im Gegensatz zur endlichen Anzahl an Freiheitsgraden unendlich viele Freiheitsgrade vorliegen. Aufgrund der Komplexität der mathematischen Formulierungen sind nur in ausgewählten Fällen geschlossene analytische Lösungen möglich.

Im Hinblick auf die segmentierte Kranbrücke soll der Versuch unternommen werden, ein Ersatz-Flächenträgheitsmoment zu formulieren, um somit die Fachwerkstruktur in einen kontinuierlichen Balken zu überführen. Hierdurch soll eine erste Abschätzung der Trägersteifigkeit und des Trägergewichts ermöglicht werden, um abschätzen zu können wie groß die Durchbiegung sein wird.

Der kontinuierliche Balken soll sich hierbei dadurch auszeichnen, dass mit einem konstanten E-Modul sowie einem konstanten Querschnitt über die gesamte Länge des Kranträgers gerechnet werden kann.

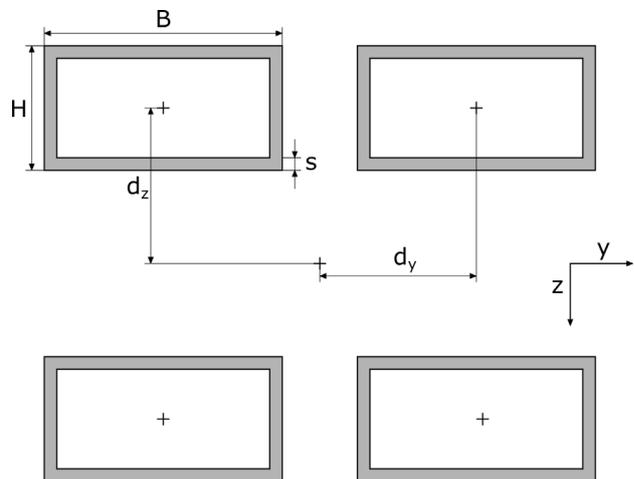


Abbildung 12. Abmessungen des Querschnitts der segmentierten Kranbrücke

Der Querschnitt und das Flächenträgheitsmoment des Balkens kann hierbei sehr einfach über die Querschnitte, bzw. die Flächenträgheitsmomente der Einzelsegmente berechnet werden.

Für den Gesamtquerschnitt  $A_{ges}$  des Kranträgers mit vier Segmenten mit der Höhe  $H$ , der Breite  $B$ , der Blechdicke  $s$  und dem Querschnitt  $A_{Seg}$  gilt:

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^4 A_{Seg_i} = \sum_{i=1}^4 B \cdot H - (B - 2 \cdot s) \cdot (H - 2 \cdot s)$$

Die Gesamtflächenträgheitsmomente  $I_{ges}$  in  $y$ - und  $z$ -Richtung lassen sich mithilfe des Satz von Steiners berechnen für vier gleiche Segmente mit Flächenträgheitsmoment  $I_{Seg}$ . Der Abstand der Schwerpunkte der einzelnen Segmente beträgt  $d_y$  in  $y$ -Richtung und  $d_z$  in  $z$ -Richtung:

$$I_{ges,y} = 4 \cdot (I_{Seg,y} + d_z^2 \cdot A_{Seg})$$

$$\text{mit } I_{Seg,y} = \frac{1}{12} \cdot (B \cdot H^3 - (B - 2 \cdot s) \cdot (H - 2 \cdot s)^3)$$

$$I_{ges,z} = 4 \cdot (I_{Seg,z} + d_y^2 \cdot A_{Seg})$$

$$\text{mit } I_{Seg,z} = \frac{1}{12} \cdot (H \cdot B^3 - (H - 2 \cdot s) \cdot (B - 2 \cdot s)^3)$$

Mithilfe des berechneten Querschnitts und Flächenträgheitsmoments lässt sich das spezifische Eigengewicht  $\mu$  des Kranträgers mit der Dichte  $\rho$  sowie die Durchbiegung  $\delta_z$  des Kranträgers bei einer mittigen Lasteinleitung durch ein Hubwerk mit dem Gewicht  $m_c$  und einer Hublast  $m_L$  berechnen:

$$\mu = A_{\text{ges}} \cdot \rho$$

$$\delta_z = \frac{(m_c + m_L) \cdot g \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_{\text{ges},y}} + 0,0130 \cdot \frac{\mu \cdot g \cdot l^4}{E \cdot I_{\text{ges},y}}$$

Die Berechnung dieser Werte sind für eine erste Abschätzung der Durchbiegung zur Einhaltung des Stabilitätsnachweises der DIN EN 13001-3-1 ausreichend. Ebenso können mithilfe der berechneten Werte die ebenfalls geforderten horizontalen und vertikalen Eigenfrequenzen abgeleitet werden. [GOL04][EN13001-3-1]

Eine Herausforderung bei dieser Vereinfachung ist jedoch der nicht konstante Querschnitt des Kranträgers. Durch die Abschrägungen am Rand wird die Durchbiegung etwas höher als mit den Vereinfachungen gerechnet, wie in Abbildung 13 zu sehen ist. Diese Abweichung kann entweder durch die Ableitung der Biegelinie oder durch Korrekturfaktoren ausgeglichen werden.

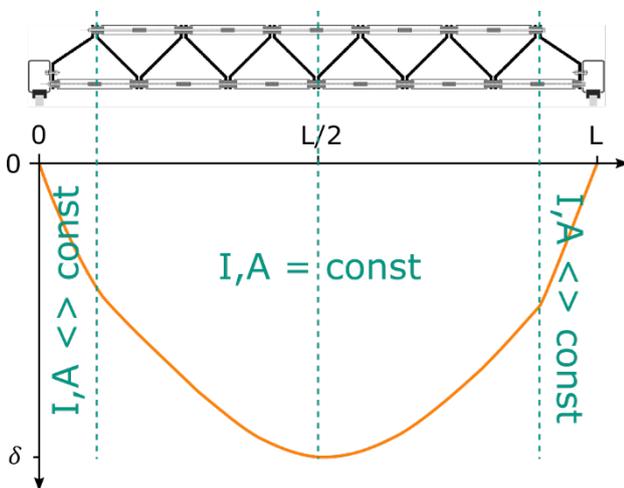


Abbildung 13. Numerisch berechnete Biegelinie der Kranbrücke für eine Beispielkonfiguration

Ein ähnliches Problem entsteht durch die Druckkräfte der Zuganker auf die Kranbrücke. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, wird die Steifigkeit des Trägers durch wirkende Normalkräfte beeinflusst. Diese Normalkräfte können ebenfalls durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

### 3 MODELLVALIDIERUNG

Um eine Aussage darüber treffen zu können, inwiefern die Modelle dazu in der Lage sind, das elastostatische und dynamische Verhalten zu beschreiben, gilt es, Messwerte zu generieren, die eine Validierung der Modelle ermöglichen. Dazu stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, welche im Folgenden vorgestellt werden sollen.

#### 3.1 GEWINNUNG REALER MESSERGEBNISSE

Um ein möglichst aussagekräftiges Bild des realen Verhaltens der segmentierten Kranbrücke bei gegebenen

Belastungen zu erhalten, ist der Aufbau eines Prüfstands in den Versuchshallen des IFL geplant, an dem sich das elastostatische und dynamische Verhalten untersuchen lässt. Die realen Messergebnisse dienen im weiteren Verlauf dazu, die erstellten Modelle zu validieren, um eine Aussage darüber treffen zu können, mit welcher Genauigkeit die Modelle das Verhalten der Kranbrücke vorhersagen und zum anderen, welches Modell zur Beschreibung besser geeignet ist. Dazu soll die Kranbrücke auf Lagerböcken gelenkig gelagert werden, eine speziell konstruierte Zugvorrichtung dient dazu, eine Kraft an den Knotenpunkten anzubringen um somit einen Kraftangriff an der Struktur nachzubilden.

Spätere Ausschwingversuche dienen dazu die Dämpfung des Systems experimentell zu ermitteln.

#### 3.2 FEM-SIMULATION

Zur Ergänzung der realen Messergebnisse sollen zusätzlich Simulationen mittels der Finiten Elementen Methode (FEM) durchgeführt werden. Gleichzeitig kann hiermit überprüft werden, inwiefern die Simulation das reale Verhalten abbilden kann. Hierbei sei insbesondere anzumerken, dass die Definition von beispielsweise Kontaktbedingungen zwischen den einzelnen Komponenten einen erheblichen Einfluss auf die Güte der Simulationsergebnisse hat. Durch die Komplexität des gesamten Systems kann ein aussagekräftiges Ergebnis der FEM-Simulationen nicht unmittelbar garantiert werden.

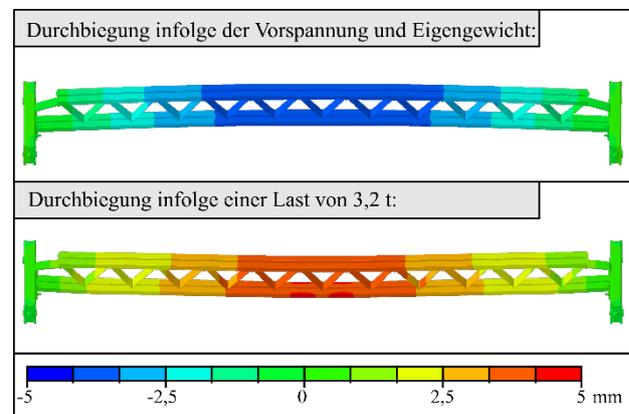


Abbildung 14. Ergebnisse einer FEM-Simulation der Durchbiegung für einen Beispielkranträger im unbelasteten und im belasteten Zustand.

### 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem Beitrag wurden unterschiedliche Modellierungsstrategien vorgestellt, welche im Rahmen der gegenwärtigen Forschungsarbeit am IFL herangezogen werden, um das elastostatische Verhalten des Kranträgers beschreiben und die dynamischen Eigenschaften untersuchen zu können. Zu den Modellierungsstrategien zählen insbeson-

dere die diskrete Modellierung und die kontinuierliche Modellierung. Vor dem Hintergrund des segmentierten Aufbaus der neuartigen Kranbrücke scheint der Einsatz einer diskreten Modellierungsstrategie sinnvoll, da so unter anderem die Verwendung unterschiedlicher Materialien berücksichtigt werden kann. Inwiefern dies bei der kontinuierlichen Modellierung möglich ist, gilt es zu untersuchen. Weiterhin wurde der Einfluss der Normalkraft auf die Steifigkeit durch die Betrachtung des Systems in der Theorie II. Ordnung analytisch untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass diese durchaus einen erheblichen Einfluss auf die Steifigkeit besitzt und bei der Betrachtung berücksichtigt werden muss. Abschließend wurden Möglichkeiten zur Modellvalidierung präsentiert, welche der Generierung von Messwerten dienen, um die Güte der Modelle beurteilen zu können. Dazu zählen ein geplanter Prüfstandaufbau sowie FEM-Simulationen.

## 5 FÖRDERHINWEIS

Dieses Projekt wird im Rahmen eines ZIM Kooperationsprojekts (Förderkennzeichen: ZF4251401LL6) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## LITERATUR

- [BOBG17] Bolender, Steffen; Oellerich, Jan; Braun, Meike; Golder, Markus: *Skalierbarer modularer Brückenkrantträger in Segmentbauweise*. Logistics Journal: Proceedings, 2017.
- [Din17] Dinkler, Dieter: *Einführung in die Strukturmechanik: Modelle und Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [EN13001-3-1] DIN EN 13001-3-1 *Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken*. Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.
- [GHSW16] Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A.: *Technische Mechanik 1: Statik*. Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [GHSW17] Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A.: *Technische Mechanik 2: Elastostatik*. Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [Gol04] Golder, Markus: *Ein Beitrag zur Kostenabschätzung für Brückenkrantträger in Kastenbauweise auf Basis ihrer Bemessungsgrundlagen und Dimensionierungsnachweise*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Fördertechnik und Logistik, 2004.

---

**M.Sc. Jan Oellerich**, Research Associate at the Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Jan Oellerich studied Mechanical and Process Engineering at the Technical University of Darmstadt from 2007 to 2015. Since 2015 he works as a research associate in the department of FLX at IFL.

E-Mail: [Jan.Oellerich@kit.edu](mailto:Jan.Oellerich@kit.edu)

**M.Sc. Steffen Bolender**, Research Associate at the Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Steffen Bolender studied Mechanical Engineering at KIT from 2009 to 2015. Since 2015 he is a research associate in the department of Warehouse and Material Handling Technology at IFL.

E-Mail: [Steffen.Bolender@kit.edu](mailto:Steffen.Bolender@kit.edu)

### Address:

Institute for Material Handling and Logistics (IFL),  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),  
Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,  
Phone: +49 (0)721/608-48667,  
E-Mail: [Jan.Oellerich@kit.edu](mailto:Jan.Oellerich@kit.edu)