

S. Böttcher, W. Günthner und M. Stephani, München

Verformungsmessungen an einem Gittermastkran

Tragkonstruktionen vieler Förderanlagen, besonders von Kranen und Verladegeräten, sind häufig als Fachwerke ausgebildet. Solche Gitterkonstruktionen werden heute mit Hilfe von Rechenanlagen und bevorzugter Anwendung der Methode finiter Elemente berechnet. Erfasst man mittels dieser Methode von vornherein jedes einzelne Element, z. B. jeden Stab, so führt die große Anzahl unbekannter Größen zu Gleichungssystemen, die nur von leistungsfähigsten Großrechnern und mit trotzdem langen Rechenzeiten zu lösen sind. Da Gitterwerke häufig aus mehreren regelmäßigen Stabverbänden, z. B. geometrisch ähnlichen Schüssen, aufgebaut sind, führt die primäre Benutzung allein solcher größerer Einheiten als »finiten Stabverband« zu einer weitaus geringeren Anzahl zu berücksichtigender finiter Elemente. Zum einen vermindert die damit durchführbare Globalberechnung des Gittersystems den Rechenaufwand erheblich, bietet andererseits aber zugleich die Möglichkeit, an gezielt auswählbaren Stabverbänden mittels der aus der Globalberechnung gewonnenen Schnittgrößen auch die Einzelstäbe zu untersuchen und zu berechnen. Solche Berechnungsverfahren sind in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Förderwesen der TU München näher bearbeitet und untersucht worden. Der vorliegende Aufsatz berichtet über aufschlußreiche Verformungsmessungen an einem ausgeführten Gittermastkran, die zur Nachprüfung des Rechenverfahrens vorgenommen wurden und an denen der Lehrstuhl für Photogrammetrie der TU München (Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. H. Ebner) mit interessanten photogrammetrischen Aufnahmeverfahren beteiligt war.

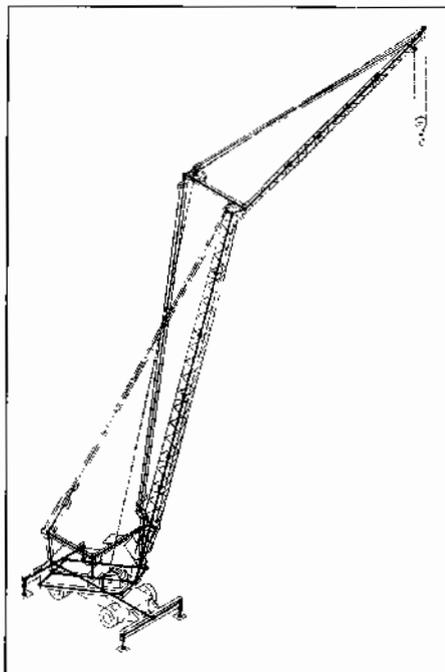
Der Einsatz hochwertiger Werkstoffe, geeigneter Rohrprofile, besserer Fertigungsverfahren einschließlich ihrer Kontrolle ließen in den letzten Jahren Fahrzeugkrane mit Gittermastauslegern für immer höhere Traglastbereiche entstehen. Eine weitere Erhöhung der Traglast begrenzen Festigkeitskennwerte der Werkstoffe und oft auch die Elastizität des gesamten Auslegersystems [1, 2]. Hier führen nur Rechenverfahren weiter, die vor allem den Einfluß der Verformung auf das Kräftefeld zu berücksichtigen erlauben [3]. Die universelle Rechenmethode mit finiten Elementen gestattet es, jedes einzelne Element (z. B. Stab-, Platten- oder Scheibenelement) in das Rechenmodell aufzunehmen.

Prof. Dr.-Ing. S. Böttcher ist Lehrstuhlinhaber, Dipl.-Ing. W. Günthner Akad. Rat des Lehrstuhls für Förderwesen, Dr.-Ing. M. Stephani ist Akad. Dir. am Lehrstuhl für Photogrammetrie der TU München.

Bei Stabwerken sind dann je Stab sechs unbekannte Schnittgrößen und je Knoten sechs unbekannte Verformungsgrößen zu berücksichtigen, bei Platten- und Scheibenelementen noch mehr. Dies führt bereits bei kleineren Gittermastkränen zu Gleichungssystemen, die zur Lösung einen leistungsfähigen Großrechner und lange Rechenzeiten benötigen. Berechnungen am Lehrstuhl für Förderwesen der TU München mit dem Programmsystem SET [4] bestätigen dies.

Nun sind Ausleger von Gittermastkränen häufig aus mehreren regelmäßigen Stabverbänden (Schüssen) aufgebaut. Faßt man einen solchen regelmäßigen Stabverband, etwa die Stäbe eines Schusses, zu einem äquivalenten Einzelelement zusammen, betrachtet dieses Einzelelement als vorgegebenes finites Turmelement, so läßt sich mit Hilfe solcher »finiten Turmelemente« der gesamte Gittermastkran mit einer geringen Anzahl von Einzelelementen darstellen [5]. Dieses Vorgehen einer Globalberechnung des Kransystems bedarf eines erheblich geringeren Rechenaufwandes. Das Verformungsverhalten der finiten Turmelemente muß dabei dem der ersetzten Stabverbände möglichst nahekommen. Dazu liegen umfangreiche Vorarbeiten

1: Ersatzsystem aus finiten Turmelementen zur statischen Globalberechnung eines Gittermast-Mobilkrans – Replacement system of finite tower elements for the global static calculation of a mobile latticed mast crane – Système de substitution avec éléments finis de mât pour le calcul statique global d'une grue mobile à mât en treillis



Deformation measurements on a latticed mast crane

Mesure de la déformation des grues à mât en treillis

am Lehrstuhl vor [5, 6]. Mit den aus der Globalberechnung gewonnenen Schnittgrößen werden bei den maximal beanspruchten Kranmastzwischenstücken eine Einzelstabberechnung durchgeführt und dabei die Dehnungen und Spannungen an jedem einzelnen Stab ermittelt.

Neben der Forderung nach einer möglichst guten Abbildung des Auslegersystems durch das Ersatzsystem ist es ferner wichtig, die Randbedingungen des Ersatzsystems – das sind die Einspannbedingungen des Auslegersystems am Kranwagen – wirklichkeitsnah zu erfassen. Sind die elastischen Verformungseigenschaften des Kranwagens in etwa bekannt, so kann bei der Globalberechnung das Ersatzsystem des Auslegers als federnd abgestützt betrachtet oder der Kranwagen durch ein entsprechendes Stab-Ersatzsystem nachgebildet werden. Bild 1 zeigt eine Möglichkeit, einen Gittermast-Mobilkran einschließlich des Kranwagens in solche »finiten Turmelemente« aufzuteilen. Für ein solches Ersatzsystem aus finiten Turmelementen wurde ein Programm für die statische Berechnung entwickelt, das die Verformungseigenschaften des Gesamtsystems und die Spannungszustände in den Einzelstäben möglichst Wirklichkeitstreue beschreiben soll. Um dieses Verfahren, Gittermasten mit Hilfe finiter Turmelemente zu berechnen, auf seine Richtigkeit bzw. Genauigkeit zu überprüfen, wurden an einem ausgeführten Gittermast-Mobilkran Messungen vorgenommen. Den Kran sowie die Lage der Meßstellen und den Meßumfang zeigt Bild 2.

Verformungen des gesamten Krans

Die Gesamtverschiebung des Auslegersystems setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, nämlich aus

- der elastischen Verformung des Auslegersystems und
- der starrkörperkinematischen Verschiebung des Auslegersystems infolge Verformung des Kranwagens, Bild 3.

Zur Überprüfung des Rechenmodells für die statische Berechnung der Verformungseigenschaften des Gittermastes müssen die beiden Verlagerungsanteile experimentell getrennt ermittelt werden können. Dies geschieht in der Weise, daß erstens die Gesamtverschiebung an wesentlichen Punkten des Auslegersystems und zweitens die Verschiebungen der Schnittstellen zwischen Auslegersystem und Kranwagen gemessen werden. Aus der letztgenannten Messung der Schnittstellenverschiebungen läßt sich die starrkörperkinematische Verschiebung des Auslegersystems errechnen. Die Differenz aus der Gesamtverschiebung des Auslegersystems und seiner starrkörperkinemati-

schen Verschiebung infolge Verformung des Kranwagens ergibt die gesuchte elastische Verformung des Auslegersystems aus der aufgebrachtten äußeren Belastung.

Kranwagen

Verschiebungen der Anlenkpunkte des Auslegersystems am Kranoberwagen ergeben sich aus der Nachgiebigkeit des Kranoberwagens, der Drehverbindung, des Unterwagens, der Abstützungen zum Boden und der Nachgiebigkeit des Bodens. Um die Führungsbeziehung bzw. starrkörperkinematische Verformung des Auslegersystems zu bestimmen, genügt es daher, die Verschiebungen der Anlenkpunkte oder, ersatzweise, die Verschiebung des Oberwagens zu messen. Letzgenannter Weg wurde gewählt.

Die zu messenden Punkte am Oberwagen führen je nach Belastung des Krans eine räumliche Bewegung aus. Da bei maximaler Belastung das Abheben einer Abstützung um mehrere Zentimeter zu erwarten war, wurden Meßwertaufnehmer mit einem Meßbereich von mindestens 15 cm vorgesehen.

Die Meßwertaufnehmer hatten folgenden weiteren Forderungen zu genügen:

- elektrische Aufnahme und Verarbeitung des Meßwertes.
- Bedienung außerhalb des unmittelbaren Gefahrenbereichs,
- schnelle Meßwertaufzeichnung.

Zu diesem Zweck wurde eine Meßrolle entwickelt, die ortsfest angeordnet ist und ein abwickelbares Band besitzt, dessen Ende mit der zu messenden Stelle verbunden ist. Eine Verschiebung der Meßrolle bewirkt eine Drehung der Meßrolle und eines mit dieser verbundenen Präzisions-Potentiometers. Die dadurch veränderte Spannungsteilung am Potentiometer wird als Meßsignal benutzt und dieses einer dazu entwickelten 10kanaligen Meßbrücke zugeleitet. Ungleiche Durchmesser der Meßrollen durch Fertigungsfehler können durch elektronische Maßnahmen kompensiert werden. Die mit dieser Meßanordnung erzielte Meßgenauigkeit reicht völlig aus; die Standardabweichung beträgt 0,15 mm.

Die räumliche Verschiebung eines Meßpunktes gegenüber seiner Ausgangslage wird von dreien recht zueinander angeordneten Aufnehmern erfaßt. Mit Hilfe der gemessenen Verschiebungen der Punkte am Kranoberwagen wird die starrkörperkinematische Verschiebung der übrigen Punkte des Auslegersystems rechnerisch ermittelt.

Auslegersystem

Um die Gesamtverformung des Auslegersystems erfassen zu können, müssen zumindest die Verschiebungen der wesentlichen Punkte - z. B. Anfangs- und Endpunkte des Auslegers, Seilabspannpunkte - bekannt sein. Bezüglich der erwarteten maximalen Verschiebung der Auslegerspitze von etwa 1 m wurde eine Meßgenauigkeit von 1% vorgegeben. Wesentliches Kriterium zur Auswahl der Meßmethode war wegen der vielen Meßstellen und zu erwartender dauernder Kranbewegungen eine schnelle Meßwertaufzeichnung. Die zuvor behandelte Spannungsmessung und die Verformungsmessung am Kranwagen konnte innerhalb weniger Minuten ausgeführt werden. Schwierigkeiten bereitete



2: Kran mit Meßstellen - Crane with measuring points - Grue avec points de mesure

Legende zu 2: 1: Kranmast-Zwischenstück mit 50 Einzel-DMS-Stellen (mit Temperaturkompensationsstreifen in Halbbrückenschaltung angeordnet) zur Normspannungsmessung und 3 DMS-Stellen (in Vollbrückenschaltung) zur Torsionsmessung; 2: Meßbläsche zwischen Last und Unterflasche; 3: 2 Meßbläschen in den Abspannseilen für den Hauptausleger; 4-6: 9 Wegaufnehmer zur Verformungsmessung des Kranoberwagens; 7-13: 37 Markierungen zur photogrammetrischen Verformungsmessung des gesamten Auslegersystems; 14: Schalenkreuzanemometer zur Windmessung

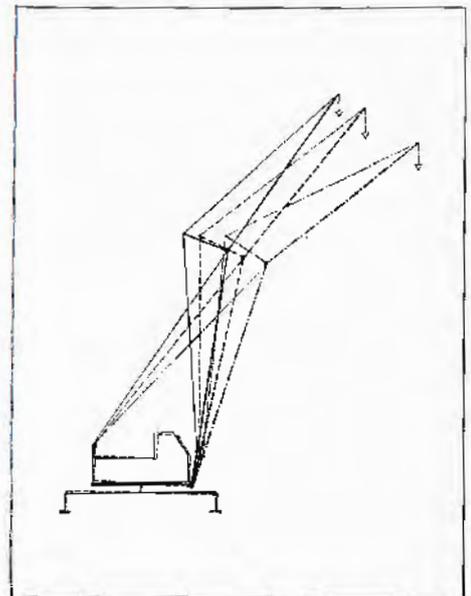
dagegen die Suche nach einem Meßverfahren für die Gesamtverschiebung des über 30 m langen bzw. hohen Auslegersystems. Dieses Problem konnte, wie eingangs bereits erwähnt, schließlich mit Hilfe photogrammetrischer Verfahren gelöst werden, über das wegen seiner an sich fachfremden, aber erfolgreichen Anwendung nachfolgend berichtet werden soll.

Photogrammetrie als Meßverfahren

Die Anwendung der Photogrammetrie (Bildmessung) bedeutet zunächst die Verlagerung der Messung vom Objekt selbst in zweckmäßig erstellte Bilder dieses Objekts. Dabei ergeben sich eine Reihe von Vorteilen, deren einer, die schnelle und vollständige Meßwertaufzeichnung, bereits erwähnt wurde. Des weiteren wäre die jederzeit mögliche Reproduzierbarkeit eines konkreten Verformungszustandes des Gittermastkrans aus dem betreffenden Bildmaterial sowie die praktisch freie Wahl der Anzahl und Verteilung der Meßpunkte zu nennen. Als Vorteil sollte besonders bei Verformungsmessungen auch die Erfassung aller Meßpunkte zu einem gegebenen Zeitpunkt, also nicht zeitlich nacheinander, herausgestellt werden.

Freilich ist jede Meßmethode optimal nur in Bezug auf die Bedingungen, unter denen die Messung stattfindet. So würde bei einer geringen Anzahl von Punkten, an denen die Deformation ermittelt werden soll, auch deren direkte geodätische Bestimmung als Alternative in Frage kommen. Allerdings kann diese sequentiell erfolgende Messung mit einem beträchtlichen zeitlichen Aufwand vor Ort verbunden sein.

Die Anforderung, die in dem hier vorliegenden Fall an die Photogrammetrie gestellt wur-



3: Schematische Darstellung der Summe aus Verschiebung und Verformung eines Auslegerkrans unter einer bestimmten Belastung - Schematic representation of the total of displacement and deformation of a jib crane under a particular load - Représentation schématique du total des déformations et déplacements d'une grue à flèche sous une charge déterminée

Legende zu 3: — Struktur des Auslegertragwerks vor der Belastung des Krans; - - - - - Starrkörperkinematische Verschiebung des Auslegertragwerks durch die Verformung des Kranwagens; — — — Gesamtverlagerung des Auslegertragwerks infolge Kranwagenverformung und elastischer Auslegerverformung

de, läßt sich einfach formulieren: Ausgehend von einer - in einem frei gewählten dreidimensionalen Koordinatensystem definierten - Ausgangsstellung des Auslegers und Kranwagens sollte deren Gesamtverformung an bestimmten Meßpunkten über räumliche Vektoren erfaßt werden.

Um diese Verformungen räumlich zu ermitteln, muß man von einer oder mehreren Stereoaufnahmen des Objektes ausgehen. Zeigen zwei oder mehr Bilder das gleiche Objekt und wurden diese Bilder von verschiedenen Standpunkten aufgenommen, so kann daraus das Objekt dreidimensional rekonstruiert werden.

Zur präzisen Rekonstruktion benötigt man sogenannte Meßbilder, die mit Meßkamern erstellt werden. Meßbilder gestatten es, auf Grund vorher bekannter geometrischer Daten, wie der exakten Brennweite, der Objektivverzeichnung u. a., die Lichtstrahlenbündel, die zur Abbildung geführt haben, mathematisch wieder herzustellen. Ist die räumliche Lage und Orientierung von mindestens zwei dieser Strahlenbündel bekannt, können durch Schnitt homologer Strahlen die Koordinaten des betreffenden Objektpunktes berechnet werden, Bild 4.

Zur Rekonstruktion der Objektpunkte benötigt man die räumliche Lage und Orientierung von zwei Strahlenbündeln, die durch insgesamt 12 unabhängige Parameter (drei Koordinaten des Aufnahmeortes und drei Drehungen der Bildebene um die Achsen des Koordinatensystems je Meßbild) beschrieben werden kann. Mathematisch wird der Zusammenhang zwischen Bild und Objekt über eine Zentralperspektive formuliert. Die notwendigen sechs Parameter je Bild lassen sich aus wenigen bekannten und unveränderlichen Objekt-

FAHRZEUGKRANE

Verformung des Auslegersystems einschließlich der Abspannseile. Sie zeigen außerdem, daß bereits bei kleineren Kranen, wie dem zu Versuchszwecken dienenden Gittermast-Mobillkran, die statische Berechnung unter Berücksichtigung der Verformungen nach geometrisch nichtlinearer Theorie erfolgen sollte, was im DIN-Blatt [8] offen gelassen ist. Stützt man das Ersatzsystem des Tragwerks an den 3 Meßpunkten am Kranoberwagen oder an irgendwelchen anderen geeigneten Punkten ab, dann lassen sich mit den gemessenen Verschiebungen dieser Punkte und den an diesen Stellen errechneten Kräften entsprechende Federsteifigkeiten für die jeweiligen Verschiebungsrichtungen ermitteln. Diese Federelemente berücksichtigen die gesamte Elastizität des Kranwagens einschließlich der Nachgiebigkeit des Bodens. Mit der so ermittelten Ersatzsteifigkeit läßt sich mit dem Stabwerkprogramm STAB81 die statische Berechnung geschlossen durchführen. Die rechten Abbildungen im Bild 6 zeigen die Ergebnisse dieser Berechnung im Vergleich mit den Meßergebnissen. Die zugrundeliegenden Versuche wurden dabei innerhalb der nachgiebigsten Stelle des zuge-

lassenen Drehbereichs durchgeführt. Interessant erscheint in diesem Zusammenhang auch noch, wie groß die Verformungsanteile einzelner Baugruppen des Krans an der Gesamtverformung des Auslegersystems sind. Aus Bild 7 kann man ersehen, daß die Längungen der Abspannseile den größten Teil der Verschiebung der Auslegerspitze bewirken. Der verbleibende Rest ergibt sich aus der elastischen Verformung der Gittermastausleger. Eine Verringerung der Nachgiebigkeit der Abspannseile führt somit in hohem Maße zu einer Verringerung der Ausladungsänderung bei Belastung. Bei dem Versuch zu Bild 7 wurde der Kran nur mit lotrechten Kräften belastet. Die Verschiebung in Y-Richtung ergibt sich ebenfalls aus der Verformung des Kranwagens. Bei den Versuchen war der Kranoberwagen um etwa 40° gegenüber dem Unterwagen gedreht. Dieses seitliche Ausweichen bei lotrechter Belastung führt zu einer nicht zu vernachlässigenden zusätzlichen Belastung im Hauptausleger. Dies ist ein weiterer Hinweis dafür, daß bei statischen Berechnungen von Fahrzeugkränen der Kranwagen mit in das rechnerische Ersatzsystem aufgenommen werden sollte.

Literaturnachweis:

- [1] Kuhn, E.: Entwicklungstendenzen im Fahrzeugkranbau. *fördern u. heben* 21 (1971) Nr. 15, S. 909.
- [2] Becker, R., u. G. Otto: Konstruktionsmerkmale moderner Fahrzeugkrane. *fördern und heben* 19 (1969) Nr. 8, S. 473/79.
- [3] Otto, G.: Der Einsatz von Computern beim Berechnen von Auslegerkonstruktionen für Fahrzeugkrane. *dhf* 17 (1971) Nr. 11, S. 673/77.
- [4] Axhausen, K., Th. Fink, C. Katz u. a.: Die Programmkette SET: Berechnungen im konstruktiven Ingenieurbau. *KfK - CAD* 173, Dez. 1980.
- [5] Kohnhäuser, E.: Untersuchung von Methoden zur statischen Berechnung von Kran-Fachwerktürmen mit Hilfe eines räumlichen Matrizen deformationsverfahrens unter Berücksichtigung von Messungen. *Diss. TU München* 1977.
- [6] Mayer, G.: Untersuchung der Torsionsbeanspruchung von Fachwerk türmen mit rechteckigem Querschnitt und parallelen Seiten. *Diss. TU München* 1972.
- [7] Tang, G.: Rechnerunterstützte Auswertung der Meß- und Rechenergebnisse mit Hilfe des LRZ-Graphiksystems. *Unveröff. Untersuchung am Lehrstuhl für Förderwesen, TU München* 1982.
- [8] DIN 15018 Teil 3: Krane, Grundsätze für Stahltragwerke von Fahrzeugkränen, Berechnung. *Hrsg. Deutscher Normenausschuß, Ausg., Januar 1983.*

Bildnachweis: Verfasser