

# Besondere Einflußfaktoren bei der statischen Berechnung von Gittermast-Auslegerkranen

Special influencing factors to consider in the static calculation of lattice boom cranes

Facteurs particuliers influençant le calcul des grues à flèche et à pylône

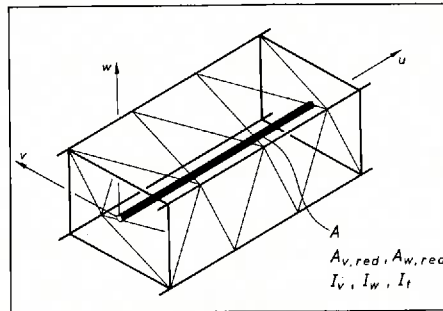
Veränderte Produktionstechniken in vielen Bereichen der Industrie sowie der große Vorteil der Mobilität bescherten den Fahrzeugkranen in den letzten zwei Jahrzehnten eine besonders stürmische Entwicklung. Die laufend steigenden Anforderungen haben bis heute Großgeräte mit einer maximalen Traglast von 1200 t und maximalen Auslegerlängen von 200 m entstehen lassen. Die dafür notwendige Leichtbauweise führte zu langen, schlanken und spitzwinklig abgespannten Auslegern, die ein ausgeprägtes nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten aufweisen. Damit jedoch stellen solche Systeme an ein Berechnungsverfahren hohe Anforderungen.

Neben dem Vorhandensein einer geeigneten Rechenmethode der Statik ist es dabei ebenso wichtig, das reale Tragsystem ausreichend genau durch das Statikmodell abzubilden. Dazu gehört – neben einer guten Beschreibung der einzelnen Bauelemente – auch, daß die Randbedingungen des Ersatzsystems genau genug erfaßt und vorgegeben werden können. Darüber hinaus muß sich der Aufwand für das Rechenverfahren in Grenzen halten, um in der Praxis angewendet werden zu können. Der vorliegende Aufsatz berichtet über einige Ergebnisse einer Forschungsarbeit am Lehrstuhl für Förderwesen der TU München [1].

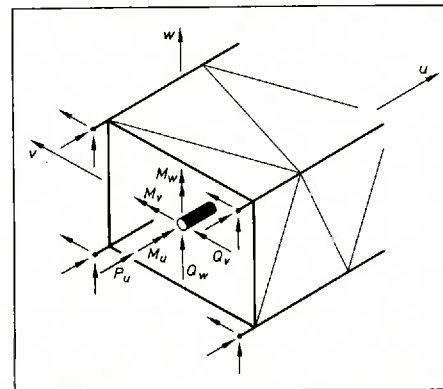
## Rechenmodell

Tragsicherheitsberechnungen, welche die Verformung eines gesamten Kransystems nach der Spannungstheorie II. Ordnung sowie den Spannungs- und Stabilitätszustand der Einzelstäbe möglichst genau erfassen, verlangen den Einsatz von Computern. Als Verfahren benutzt man heute bevorzugt die Methode der finiten Elemente.

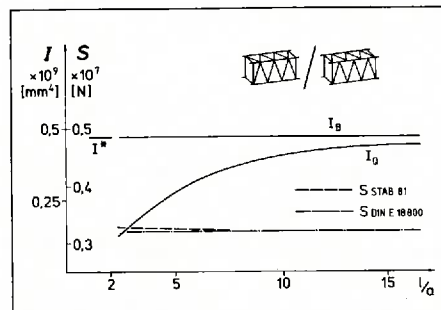
Um den dabei anfallenden Rechenaufwand zu verringern und auch noch umfangreiche Stabwerke rationell berechnen zu können, bietet sich das Zusammenfassen regelmäßiger Stabverbände (z. B. Schüsse) zu äquivalenten Ersatzelementen, den finiten Turmelementen, an



1: Flächen- und Trägheitsmomente des finiten Turmelements – Area moments and moments of inertia of the finite tower element – Moments de surface et d'inertie de l'élément fini „pylône“



2: Aufteilung der Schnittgrößen aus der Globalrechnung in äquivalente Endholmkräfte für die Lokalrechnung – Division of the sectional values from the global calculation into equivalent end spar forces for the local calculation – Division des grandeurs de coupe du calcul global en forces à l'extrémité des longerons. Sert aux calculs ponctuels



3: Trägheitsmoment und Schubsteifigkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis Turmlänge  $l$  zur Systemweite  $a$  – Moment of inertia and shear strength depending on the ratio of the tower length  $l$  to the system with  $a$  – Moment d'inertie et résistance à la poussée en fonction de la hauteur du pylône  $l$  par rapport à la largeur  $d$ -ensemble  $a$

Legende zu 3:  $J_B$ : Trägheitsmoment, errechnet für Biegung durch ein konstantes Moment;  $J_a$ : Trägheitsmoment, errechnet für Biegung durch eine Querkraft;  $J^*$ : elementares Flächenträgheitsmoment unter alleiniger Berücksichtigung der Steinerschen Anteile

[2]. Umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß die elastischen Eigenschaften der ersetzten Stabverbände ausreichend genau mit den Steifigkeitsgrößen des homogenen Balkenelements beschrieben werden können, Bild 1.

Mit Hilfe dieser vorgegebenen finiten Turmelemente läßt sich das gesamte Auslegersystem mit einer geringen Anzahl von Einzelelementen darstellen (Bild 1 in [3]). Die an diesem Ersatzsystem durchgeführte Globalberechnung liefert sowohl die Verformung des gesamten Systems als auch die Schnittgrößen an den Ersatzelementen.

In einem weiteren Berechnungsgang, der Lokalberechnung, werden an einem besonders gefährdeten Zwischenstück die zuvor errechneten Schnittgrößen in äquivalente Einzelkräfte an den Endholm des realen Mastschusses umgerechnet und die Einzelstabrechnung durchgeführt, Bild 2.

Ein dafür notwendiges Rechenprogramm kommt mit nur einem speziellen finiten Element aus, dem homogenen Balkenelement. Die genaue Berechnung von seilverspannten Auslegerkranen erfordert jedoch die Berücksichtigung einiger spezifischer Kranprobleme, die von üblichen FE-Programmen nicht zu erfassen sind. Aus diesem Grund wurde am Lehrstuhl für Förderwesen der TU München ein eigenes Stabwerk-Rechenprogramm (STAB 81) erstellt, das speziell auf die Berechnung von Krantragwerken zugeschnitten ist und den geforderten Zielsetzungen genügt [4, 5].

## Einfluß der Schubverformungen

Die einzelnen Stäbe von Stabtragwerken sind meist so schlank, daß die Schubdeformation gegenüber der Biegeverformung vernachlässigbar ist. Die reduzierte Querschnittsfläche  $A_{red}$  nach Bild 1, durch die die Schubverformung durch Querkräfte berücksichtigt wird, kann dabei „Null“ gesetzt werden.

Im Gegensatz dazu sind diese Verformungen beim finiten Turmelement von spürbarem Einfluß und dort deshalb im allgemeinen nicht vernachlässigbar [6, 7]. Dieser Effekt wirkt sich im Vergleich zu schubstarrten Elementen in einer Verringerung der Grenzbelastung aus und kann als Minderung der Biegesteifigkeit gedeutet werden [8]. Dabei kann man davon ausgehen, daß bei gegebenen Fachwerkurmabmessungen die Schubsteifigkeit  $S$  im wesentlichen von der gewählten Ausfachungsart beeinflusst wird. Für die in der Praxis häufig vorkommenden Ausfachungsarten läßt sich die Schubsteifigkeit sehr genau mit den einfachen analytischen Ansätzen nach DIN E 18800 Teil 2 errechnen, Bild 3. Für die übrigen gebräuchlichen Ausfachungsarten empfiehlt sich eine genauere Berechnung nach [1].

Prof. Dr.-Ing. S. Böttcher ist Lehrstuhlinhaber, Dr.-Ing. W. Günthner ist Akad. Rat a. Z. am Lehrstuhl für Förderwesen der Technischen Universität München

Pumpen mit konstanter Drehzahl laufen, besitzt die siebente und letzte Kreiselpumpe eine Drehzahlregelung. Diese Anordnung wird heute bevorzugt und entspricht dem Stand der Technik [42,43].

**Baggerpumpen**

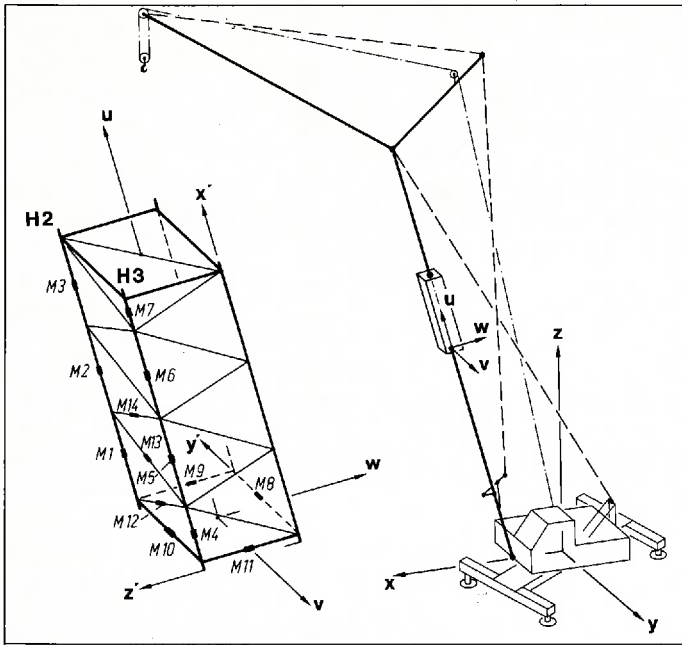
Die vor allem in der Naßbaggerei eingesetzten Baggerpumpen erreichen heute Volumenströme von 20000 m<sup>3</sup>/h bei Antriebsleistungen von 4000 kW. Bild 15 zeigt den Aufbau einer modernen Baggerpumpe, deren Laufrad wahlweise mit 3 oder 5 Schaufeln bestückt ist. Auffallend sind die über die Schaufelenden hinausragenden Deckscheiben. Sie dienen als Verschleißschutz für die sonst besonders gefährdeten Schaufelenden. Neben der wellenseitigen Stopfbuchse mit Sperrwasser ist auch auf der Saugseite ein mit Sperrwasser beaufschlagtes Dichtungssystem angeordnet. Es verhindert den stark schleißenden Rückfluß von Gemisch aus dem Pumpengehäuse in den Saugstutzen. Die Drehzahlen der großen Pumpen sind gering, sie liegen je nach Typ und Größe zwischen 200 und 500 U/min. [44,45,46].

**Literaturnachweis:**

[1] Tröltzsch, U. u. W. Weber: Die Technik – Von den Anfängen bis zur Gegenwart. Westermann Verlag, Braunschweig 1982.  
 [2] Reschenberg, H.: Alles fließt. Maschinenmarkt, Würzburg, 76 (1970) Nr. 63, S. 1420.  
 [3] v. Dyck, W.: Georg von Reichenbach. Selbstverlag des deutschen Museums, München 1912.  
 [4] Französisches Patent Nr. 300 von 1798 Montgolfier, J.M.: Der hydraulische Widder.  
 [5] Pickert, F.: Hydraulischer Vertikal-Transport durch Rohrleitungen. fördern und heben 6 (1956) 11, S. 1200–1203.  
 [6] US-Patent Nr. 449 102 von 1896. Andrews, W.C.: Hydraulische Förderung von Kohle.  
 [7] Rasper, L.: Über die Entwicklung des Naßbaggerbaues in der Bundesrepublik. Schiff und Hafen 18 (1966) 3, S. 154–159.  
 [8] Bahke, E.: Die Bedeutung des Rohrtransportes als Alternative zu konventionellen Massenguttransportmitteln. VDI-Berichte 371 „transrohr 80“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1980.  
 [9] Pelzer, A.: Hydraulische Kohlegewinnung und -förderung in der Sowjetunion. Glückauf 92 (1956) 41/42, S. 1221–1228.  
 [10] Altpeter, W.: Erfahrungen mit der hydraulischen Förderung von Hochofen-Schlackensand und anderen Feststoffen in Hüttenwerken. Stahl und Eisen 81 (1961) 15, S. 1006–1014.  
 [11] Köhler, G.: Die Kohlen-Pipeline in Merlebach/Lothringen. fördern und heben 15 (1965) 10, S. 715–716.  
 [12] Rüger, M.: Hydromechanischer Transport von Rohsalz im Kalibergbau der DDR. Hebezeuge und Fördermittel 7 (1967) 9, S. 267–273.  
 [13] Lemke, K.: Die Förderung von Kohle durch eine Rohrleitung in den Vereinigten Staaten. Glückauf 100 (1964) 10, S. 549–561.  
 [14] Snoek, P.E.: Commercial success of slurry pipelines creates opportunities for new applications in the 80's. Oil and Gas Journal 80 (1982) 11, S. 93–94, 98.  
 [15] Gottwald, E.G.: Die hydromechanische Kohlegewinnung und -förderung. Bergfreiheit 31 (1986) 6, S. 132–141.  
 [16] Prinz, B.: Hydromechanischer Abbau eines steilgelagerten Steinkohlenflözes auf der Zeche Robert Müser. Glückauf 104 (1968) 11, S. 459–467.  
 [17] Bahke, T.: Hydraulische Förderung von Kalirohsalz durch vertikale Rohrleitungen. Diss. Univ. Hannover 1978.  
 [18] Siebert, H.: Betriebserfahrungen mit der Hydrotechnik auf der Hydrogrube Hansa. Glückauf 116 (1980) 18, S. 945–952.  
 [19] Maurer, H. u. W. Mez: Hydraulic transport of coarse-grain material in the hard coal mining industry and experimental test results. Paper J3, Hydrotransport 8, Johannesburg, 25.–27. August 1982.  
 [20] Harzer, J. u. M. Kuhn: Hydraulic transportation of coarse solids as a continuous system from underground production face to the end product in the preparation plant. Paper J4 Hydrotransport 8, Johannesburg, 25.–27. August 1982.

[21] Geller, F.J. und R. Gies: Pressure gradients and degradation at the hydrotransport of coarse washery shales. Paper D4, Hydrotransport 8, Johannesburg, 25.–27. August 1982.  
 [22] Samples, R.E.: Hydraulisches Fördersystem zum Transport von Grobkohle vom Kohlenstoß bis zur Aufbereitungsanlage. Glückauf 118 (1982) 10, S. 505ff.  
 [23] Wiedenroth, W.: Hydraulischer Feststofftransport – Grundlagen und derzeitiger Stand. Stahl und Eisen 102 (1982) 11, S. 555ff.  
 [24] Weber, H.: Künftige bergtechnische Aufgaben des deutschen Steinkohlenbergbaus und Ansätze zu deren Lösung. Glückauf 117 (1981) 16, S. 1001ff.  
 [25] Henneke, J., R. Lange und W. Setzepfandt: Hydraulische Bergeförderung beim maschinellen Vortrieb des Radau-Stollens. Glückauf 116 (1980) 9, S. 426–431.  
 [26] Baumann, L.: Neue Verfahren des maschinellen Streckenvortriebs. Glückauf 118 (1982) 9, S. 441ff.  
 [27] Alexander, D.W. u. R.L. Shaw: Coarse Coal Slurry Transport at Loveridge Mine. Liquid-Solid Flows and Erosion Wear in Industrial Equipment, ASME 1983.  
 [28] Brümmer, K.-H.: Vollmechanisches Herstellen von Schächten mit hydraulischer Bohrkleinabförderung. Glückauf 115 (1979) 22, S. 1092ff.  
 [29] Brümmer, K.-H.: Gestängeloses Schachtbohren aus dem vollen Querschnitt. Unser Betrieb (1981) 29.  
 [30] N.N.: Vollschaftbohren in Rekordzeit. Glückauf 119 (1983) 18, S. 846.  
 [31] Linden, E.v.d. u. U. Beckmann: Hydraulische Erzförderung nach untertägiger Zerkleinerung. Erzmetall 36 (1983) 3, S. 117–123.  
 [32] Holzenberger, K.: Betriebsverhalten von Kreiselpumpen beim hydraulischen Feststofftransport. VDI-Berichte 371, „transrohr 80“, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf (1980).  
 [33] Wallrafen, G.: Piston Pumps for the Hydraulic Transport of Solids. bulk solids handling, Vol.3 (1983) No. 1.  
 [34] Schaaf, M.: Piston and Piston Diaphragm Pumps for Long-Distance Hydraulic Conveying. bulk solids handling, Vol. 1 (1981) No. 2.  
 [35] Schaaf, M.: Kolben- und Kolbenmembranpumpen für den hydraulischen Ferntransport von Feststoffen. VDI-Berichte 371, „transrohr 80“, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf (1980).  
 [36] Henneke, J. u. L. Baumann: Technische Verbesserungen des maschinellen Gesteinstreckenvortriebs. Glückauf 115 (1979) 5, S. 191–196.  
 [37] Wiedenroth, W.: Untersuchungen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen. Diss. T.H. Hannover 1967.  
 [38] N.N.: Kanalrad-Kreiselpumpen KWP. Typenblatt der KSB, Klein, Schanzlin & Becker AG, 6710 Frankenthal.  
 [39] N.N.: Verschleißfestes Nickel-Guß Eisen ERN. Werkstoffblatt oder KSB, Klein, Schanzlin & Becker AG, 6710 Frankenthal.  
 [40] Böhren, D.: Erhöhung der Lebensdauer von Abwasserpumpen durch Einsatz des hochverschleißbeständigen Werkstoffes Nirohard® (G – X 250 CrMo 15 3). Sonderdruck der KSB, Klein, Schanzlin & Becker AG, 6710 Frankenthal.  
 [41] N.N.: Austenitisch-ferritischer nichtrostender Stahlguß Nirodur® 9.4160. Werkstoffblatt der KSB, Klein, Schanzlin & Becker AG, 6710 Frankenthal.  
 [42] N.N.: Düchtung Panzerpumpen Baureihe DH. Druckschrift der Wilhelm Düchtling KG, Pumpen und Maschinenfabrik, 5810 Witten-Annen.  
 [43] Span, R.: Skriptum zum Vortrag. Symposium über Feststoffpumpen in Kohleaufbereitungsanlagen 16. 3. 1983 in Witten-Annen.  
 [44] Koch, J. et al.: Laderaumsaugbagger „Nordsee“. Erbaut von der O & K – Orenstein & Koppel AG. Hansa, (1979) Nr. 9.  
 [45] Welte, A.: Die Entwicklung von Fördereinrichtungen zum kontinuierlichen Transport von Feststoffen aus größeren Wassertiefen. Hansa, (1971) Nr. 4, S. 317–321.  
 [46] N.N.: Dredging Pumps. Firmenschrift der O & K – Orenstein & Koppel AG, 2400 Lübeck.

**Bildnachweis:** Verfasser



4: Lage des Meßobjekts und Bezeichnung der Meßstellen M – Position of the test object and designation of the measuring points, M – Position de l'objet à mesurer et identification des points de mesure M

| BEZ. | STAB | MEßST. | $\sigma_{y+}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |           | $\sigma_{y-}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |           | $\sigma_{w+}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |           | $\sigma_{w-}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |           |
|------|------|--------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
|      |      |        | DMS                                | MESSUNG   | DMS                                | MESSUNG   | DMS                                | MESSUNG   | DMS                                | MESSUNG   |
|      |      |        |                                    | RECHNG. 1 |                                    | RECHNG. 2 |                                    | RECHNG. 1 |                                    | RECHNG. 2 |
| H2   | 34   | M1     | 30                                 | -54,7     | 10                                 | -49,1     | 40                                 | -56,2     | 20                                 | -46,9     |
|      |      |        |                                    | -51,6     | -51,7                              | -52,9     |                                    | -50,4     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -54,6     | -55,3                              | -56,5     |                                    | -53,2     |                                    |           |
| H2   | 35   | M2     | 31                                 | -52,7     | 11                                 | -53,7     | 41                                 | -56,6     | 21                                 | -53,2     |
|      |      |        |                                    | -52,6     | -53,0                              | -54,2     |                                    | -51,5     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -57,8     | -55,8                              | -57,3     |                                    | -54,4     |                                    |           |
| H2   | 36   | M3     | 32                                 | -55,3     | 12                                 | -56,6     | 42                                 | -58,2     | 22                                 | -55,6     |
|      |      |        |                                    | -58,6     | -59,0                              | -59,5     |                                    | -55,3     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -59,7     | -63,1                              | -65,1     |                                    | -58,8     |                                    |           |
| H3   | 50   | M4     | 33                                 | -60,4     | 13                                 | -58,4     | 43                                 | -58,8     | 23                                 | -59,3     |
|      |      |        |                                    | -52,9     | -54,3                              | -55,3     |                                    | -51,9     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -64,0     | -63,8                              | -64,9     |                                    | -61,4     |                                    |           |
| H3   | 51   | M5     | 34                                 | -62,5     | 14                                 | -63,4     | 44                                 | -62,8     | 24                                 | -61,8     |
|      |      |        |                                    | -56,7     | -57,3                              | -58,7     |                                    | -55,3     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -65,8     | -66,5                              | -67,6     |                                    | -64,4     |                                    |           |
| H3   | 52   | M6     | 35                                 | -64,0     | 15                                 | -63,1     | 45                                 | -63,7     | 25                                 | -63,6     |
|      |      |        |                                    | -58,4     | -57,1                              | -58,5     |                                    | -56,9     |                                    |           |
|      |      |        |                                    | -66,4     | -66,1                              | -68,3     |                                    | -66,4     |                                    |           |
| H3   | 53   | M7     | 36                                 | -65,4     | 16                                 | -65,7     | 46                                 | -66,2     | 26                                 | -64,9     |
|      |      |        |                                    | -59,7     | -59,5                              | -60,7     |                                    | -58,5     |                                    |           |

Tabelle: Vergleich der Spannungswerte zweier Rechenmodelle mit den Meßergebnissen – Comparison of the stress values of two models of calculation with the measured results – Comparaison des grandeurs de tension de deux modèles de calcul avec résultats des mesures.

Legende zur Tabelle: RECHNG. 1: mit Kranwagen – Ersatzmodell; RECHNG. 2: ohne Kranwagen – Ersatzmodell; o: Normalspannungen an der Rohroberfläche, jeweils um 90° versetzt

Der Zusammenhang zwischen der Schubsteifigkeit  $S$  und der reduzierten Querschnittsfläche  $A_{ed}$  nach Bild 1 ergibt sich mit dem Schubmodul  $G$  zu:

$$S = G \cdot A_{ed}$$

Mit der Berücksichtigung der gegenüber einem homogenen Balkenelement erhöhten Schubnachgiebigkeit durch  $A_{ed}$  sind die elastischen Eigenschaften eines Fachwerkturnes ausreichend genau beschrieben. Ihre Werte liegen für die Globalberechnung mit Hilfe finiter Turmelemente also vor.

### Einfluß der Elastizität des Kranwagens

Die Einspannverhältnisse des Auslegersystems am Kranoberwagen bilden die Randbedingungen des Ausleger-Ersatzsystems. Sind die elastischen Verformungseigenschaften des Kranwagens in etwa bekannt, so kann bei der Globalberechnung der Kranwagen als federnes Ersatzsystem oder als Stab-Ersatzsystem nachgebildet und daran der Ausleger angeschlossen werden. Gerade bei großen elastischen Auslegersystemen, wie sie heutige Fahrzeugkrane mit Gittermastausleger darstellen, führt die starrkörperkinematische Verschiebung des Auslegers infolge Nachgiebigkeit des Kranwagens zu merklichen Verlagerungen der äußeren Lasten und damit zu anderer Beanspruchung des Tragwerks.

Diese Einflüsse konnten bereits bei einem relativ steifen Gittermast-Mobilkran bei experimentellen Untersuchungen aufgezeigt und quantifiziert werden [3]. Bild 4 veranschaulicht schematisch die Lage des Meßobjekts und die Bezeichnung der einzelnen Meßstellen.

Um den Einfluß der Elastizität des Kranwagens auf das Auslegersystem zu zeigen, wurde der Kran nur mit lotrechten Kräften belastet, wobei der Kranoberwagen gegenüber dem Unterwagen um etwa 40° gedreht war. Durch die Verformung des Kranwagens ergab sich unter der lotrechten Belastung eine Verlagerung des

Auslegers in y-Richtung. Dieses seitliche Ausweichen des Auslegers führt zu einer zusätzlichen Belastung im Auslegersystem, was sich in den Meßergebnissen deutlich niederschlägt, Tabelle.

Wird bei der statischen Berechnung des Auslegers der Einfluß des Kranwagens nicht mitberücksichtigt, dann ergeben sich für die Holme H2 und H3 in etwa gleiche Bauteilbeanspruchung: Mit der im Versuch aufgetragenen äußeren Belastung beträgt die gerechnete gemittelte Normalspannung für den Holm H2  $\sigma_N = 56,6$  N/mm<sup>2</sup>\*, für den Holm H3  $\sigma_N = 56,9$  N/mm<sup>2</sup> (s. Tab., Rechnung 2).

Durch die Verlagerung des Auslegers einschließlich der Hublast in y-Richtung wird der Holm H2 entlastet und der Holm H3 zusätzlich belastet. Die gemittelten gemessenen Normalspannungen betragen dann im Holm H2  $\sigma_N = 54,1$  N/mm<sup>2</sup>, im Holm H3  $\sigma_N = 64,5$  N/mm<sup>2</sup>.

Bei den Berechnungen mit dem Kranwagen-Ersatzmodell wird diese Belastungsänderung ausreichend genau erfaßt. Die entsprechenden Werte betragen für Holm H2  $\sigma_N = 53,7$  N/mm<sup>2</sup>, für Holm H3  $\sigma_N = 66,0$  N/mm<sup>2</sup> (s. Tabelle, Rechnung 1).

Es sei allerdings besonders vermerkt, daß die Versuche unter günstigsten Bedingungen durchgeführt wurden. Der Kranwagen wurde vor der Belastung horizontal ausgerichtet und der Kran stand auf festem Untergrund. Nachgiebiger Boden und geringfügig geneigter Kran in der Arbeitsstellung würden die Einflüsse deutlich verstärken.

Für die durchgeführten Vergleichsberechnungen wurden die im Versuch gemessenen, auch die Nachgiebigkeit des Bodens enthaltenden Ersatzsteifigkeiten des gesamten Kranwagens benutzt. Für eine Vorausberechnung wäre es

\* Die gemessenen Spannungswerte waren betragsmäßig höher. Sämtliche Meß- und Rechenergebnisse von Spannungswerten sind mit einem konstanten Faktor multipliziert. Damit werden betriebliche Daten geschützt, ohne Vergleichsmöglichkeiten und Aussagekraft der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

allerdings vorteilhaft, wenn für den Kranwagen ein vereinfachtes Stab-Ersatzmodell anhand der Konstruktionsunterlagen gebildet werden könnte.

McHugh und Overby [9] erstellen von einem Unterwagen eines Mobilkrans eine aufwendige Spannungsanalyse mit Hilfe der Finite Element Methode. Um jedoch nur die Steifigkeit eines Kranwagens zu bestimmen, scheidet eine solche Methode wegen ihres großen Aufwands aus.

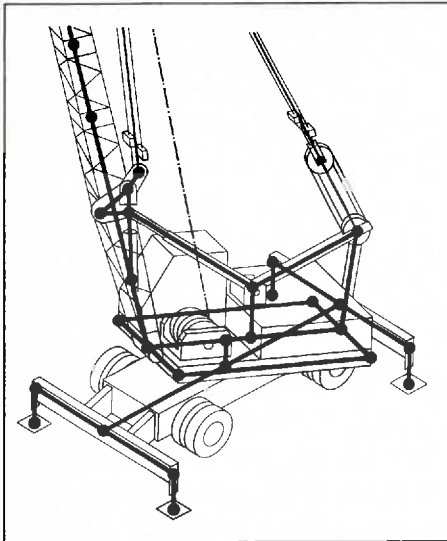
Da bei den experimentellen Untersuchungen auch die Verformung des Kranwagens mit erfaßt wurde und damit exakte Steifigkeitswerte des Kranwagens vorlagen, war es interessant zu klären, mit welcher Güte sich die Steifigkeit eines Kranwagens aus den Konstruktionsunterlagen mit vereinfachten und überschlägigen Berechnungsansätzen bestimmen läßt.

Entsprechend dem vorgestellten Stabwerk-Rechenmodell des Auslegersystems können auch die wesentlichen Einzelbauteile des Kranwagens zu Ersatzelementen zusammengefaßt und der gesamte Kranwagen mit einem Stabmodell nach Bild 5 beschrieben werden.

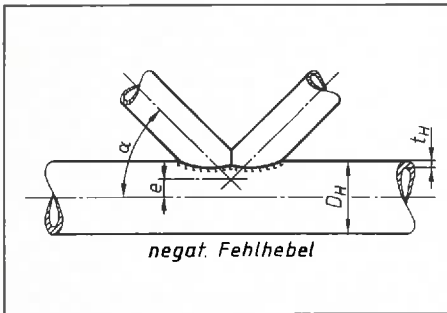
Ein Ersatzmodell nach Bild 5 muß die gesamte Nachgiebigkeit des Kranwagens beschreiben, nämlich die Nachgiebigkeit des Oberwagens, der Drehverbindung, des Unterwagens, der Abstützungen und die Nachgiebigkeit des Bodens. Zur Bestimmung der einzelnen Elemente des Ersatzmodells empfiehlt sich eine Unterteilung der Verformungsanteile nach ihrem rechnerischen Ermittlungsweg. Danach setzt sich die Gesamtverformung aus folgenden Anteilen zusammen:

- der elastischen Verformung der einzelnen Bauteile des Kranwagens einschließlich der hydraulischen Abstützungen zum Boden,
- kraftunabhängigen Verformungsanteilen durch Spiel in Führungen und Lagerungen,
- Verschiebungen der Abstützungen durch die Nachgiebigkeit des Bodens.

Für den Kranober- und -unterwagen sowie für die seitlichen Abstützungen bilden torsions- und biegesteife Kastenprofile häufig die we-



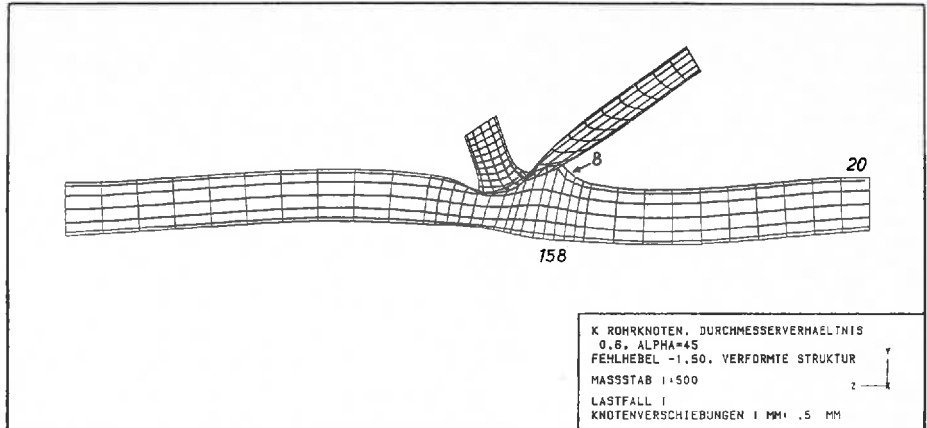
**5: Beispiel eines Stabmodells für einen Kranwagen** – Example of a model of bars for a crane carriage  
– Exemple d'une modèle à poutrelles pour une grue



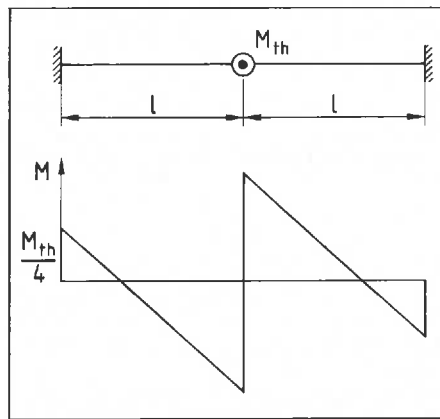
**6: Fachwerkknoten mit negativem Fehlhebel** – Joint with negative misplaced lever arm – Lorsque le axes des diagonales et des piliers du pylône en treillis ne correspondent pas à la trace théorique du longeron, il y a apparition d'un effet de levier négatif

sentlichen Einzelteilbauformen. Es hat sich gezeigt, daß durch vereinfachte Ansätze zur Berechnung dieser maßgebenden Bauteile deren elastisches Verhalten mit geringem Aufwand ausreichend genau beschrieben werden kann. Neben den elastischen Verformungsanteilen der einzelnen Baugruppen treten noch kraftunabhängige Anteile durch Spiel in Führungen und Lagerungen auf. Den größten Anteil davon trägt vermutlich das Spiel in den Abstützkästen bei. Obwohl die Drehverbindung im allgemeinen vorgespannt gelagert wird, muß man ein nichtlineares Übertragungsverhalten erwarten. Insgesamt führen diese kraftunabhängigen Anteile zu einem nichtlinearen Übertragungsverhalten des Kranwagens und zu einer Verminderung der Gesamtsteifigkeit. Eine wirklichkeitsnahe Erfassung dieses Einflusses mit Hilfe eines Ersatzsystems ist nur möglich, wenn das dafür verwendete Rechenprogramm frei wählbare nichtlineare Elemente besitzt und die kraftunabhängigen Verformungsanteile in etwa bekannt sind. Ansonsten muß mit einer mittleren verringerten Ersatzsteifigkeit gerechnet werden.

Bei einem Rechenmodell, welches den Kranwagen mit einschließt, stellen die Abstützungen zum Boden die Randbedingungen dar. Im Programmsystem STAB 81 lassen sich federnde Knotenabstützungen mit einem Bettungskoeffizient (BEK) beschreiben, der die negativ inverse Federkonstante darstellt. Dieser Bettungskoeffizient kann mit Setzungenberechnungen,



**7: Verformte FE-Struktur des Fachwerkknotens mit Holm** – Deformed Finite Element structure of the joint with spar girder – Structure déformée d'éléments finis du point nodal du treillis avec longeron



**8: Momentenverlauf eines an beiden Enden eingespannten Stabes mit mittlerer Momentenbelastung** – Shape of moment line for a member fixed at both ends with central loading – Variation du moment d'une poutrelle encastrée aux deux extrémités avec influence médiane des moments

wie sie im Grundbau benutzt werden, ausreichend genau ermittelt werden [10, 11].

Von den drei geschilderten Verformungsanteilen können die elastischen Verformungen der einzelnen Bauteile des Kranwagens und der Abstützungen sowie die Nachgiebigkeit des Bodens mit einfachen Berechnungsansätzen genau genug erfaßt werden. Schwieriger sind realistische Annahmen für kraftunabhängige Verformungsanteile durch Spiel in Führungen und Lagerungen. Einfache Messungen an einem Krantyp einer Baureihe können dafür die nötigen Werte liefern und damit eine geschlossene Berechnung von Kranauslegersystemen unter Einbeziehung der Elastizität des Kranwagens zulassen.

### Einfluß von Fehlhebeln bei Fachwerkknoten

Fallen die Achsen der Diagonalen und Pfosten bei Fachwerktürmen nicht mit der Systemlinie des Holms zusammen, dann entstehen sogenannte Fehlhebels, Bild 6. Die Zug- und Druckkräfte in den einmündenden Stäben verursachen infolge des Fehlhebels zusätzliche Momente.

In der Praxis werden zum Teil aufwendige Rohrverschneidungen in Kauf genommen, um diese Fehlhebels zu eliminieren. Nachdem auch die Meßwerte der Normalspannungen an den gegenüberliegenden Randfasern manchmal bis zu 10% von der mittleren Holmnormalspannung differierten und damit auf Biegemomen-

teneinflüsse hinweisen, wurde mit Hilfe eines aufwendigen FE-Rechenmodells der Einfluß von Fehlhebels bei Fachwerkknoten auf den Schnittgrößenverlauf im Holm näher untersucht.

Frühere Untersuchungen aus dem Bereich des Stahlrohrbaus befassen sich i. a. mit der Ermittlung der Gestaltfestigkeit des Knotens bei unterschiedlichen Fehlhebels. Dabei wird auf eine Erhöhung der Tragfähigkeit des Knotens bei negativen Fehlhebels hingewiesen, wobei der maximal zulässige Fehlhebel  $D_H/4$  nicht überschreiten soll. Dieser Effekt der Gestaltfestigkeitssteigerung läßt sich durch einen frühzeitigen Abbau der Vertikalkräfte im Bereich der Überschneidung der Diagonalen erklären, so daß der Holm keine oder nur geringe Querkraft aufnehmen muß.

Den Einfluß der Fehlhebels auf den Momentenverlauf im Holm erwähnen nur einige Autoren. Wanke [12] gibt einen Anhaltswert für das durch den Fehlhebel erzeugte Moment in der Form

$$M = (F_{Zug} \cos \alpha - F_{Druck} \cos \alpha) e/2$$

an, wobei mit  $e$  statt  $e/2$  gerechnet werden soll, wenn sich der Fehlhebel bei anderen Knoten wiederholt.

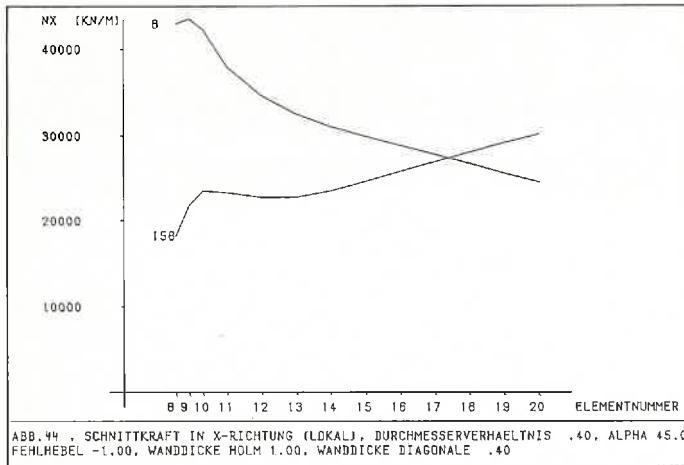
Nach Mang [13], Tafel 4, müssen die Zusatzmomente infolge des negativen Fehlhebels nicht berücksichtigt werden, so lange das Verhältnis  $e/(D_H \cdot t_H)$  einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet.

Die nachfolgend geschilderten Untersuchungen sollen daher neben einer quantitativen Aussage über den Einfluß der Knotenfehlshebels auf den Momentenverlauf im Holm vor allem die Frage klären, ob diese Momenteinflüsse bei den im Kranbau vorkommenden Belastungen berücksichtigt werden müssen.

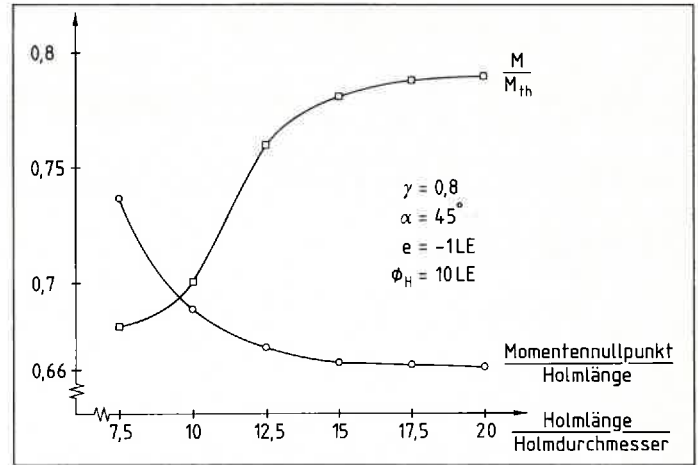
Die Berechnungen wurden mit Hilfe des FE-Programmsystems SET durchgeführt [14]. Dabei wird der Rohrknoten durch ein Faltwerk von ebenen Platten- und Schalenelementen angenähert. Die Schalenelemente übernehmen die Kräfte in der Elementebene ( $n_x, n_y, n_{xy}$ ), die Plattenelemente die Belastungen senkrecht dazu ( $q_x, q_y, m_x, m_y, m_{xy}$ ).

Bild 7 zeigt die verformte Struktur des nachgebildeten Knotens, wobei die Verschiebungen 1000-fach überhöht gezeichnet sind.

Die Knoten an den Holmenden sind fest eingespannt. An den Knoten an den Enden der Diagonalen greift jeweils eine Kraft von 100000 Kräfteinheiten (KE) als Zug- oder Druckkraft in Richtung der Rohrachse an. Der Durchmesser



**9: Schnittkraftverlauf  $n_x$  in der oberen (Elementnummer 8) und unteren (Elementnummer 158) Randfaser des Holms** – Shape of sectional force line in the upper (element number 8) and lower (element number 158) edge fiber of the spar girder – Allure de l'effort de coupe  $n_x$  dans les fibres du bord supérieur (numéro de l'élément: 8) et dans les fibres du bord inférieur (numéro de l'élément: 158) de la poutrelle



**10: Einfluß der Holmlänge auf das Moment an der Einspannstelle und auf die Lage der Momentennullstelle [1]** – Influence of the length of the spar girder on the moment at the fixing point and on the position of the point of zero moment [1] – Influence de la longueur des poutrelles sur le moment au point d'encastrement et sur la position du point fixe à moment nul [1]

des Holms beträgt 10 Längeneinheiten (LE), die Länge 75 LE.

Als Vergleich zu den durchgeführten Berechnungen soll der theoretische Momentenverlauf nach **Bild 8** herangezogen werden, der sich aus den zum Holm parallelen Komponenten  $F_D$  der Diagonalkräfte zu  $M_{th} = F_D e$  ergibt.

Bei den Berechnungen wurde der Fehlhebel  $e$  bei verschiedenen Durchmesserverhältnissen und Anlaufwinkeln  $\alpha$  variiert. Dabei ergab sich übrigens, daß selbst bei Rohrknoten ohne Fehlhebel ein Biegemoment im Holm vorhanden ist ([1], S. 135). Mit steigenden Fehlhebeln wächst der Momenteneinfluß auf den Schnittgrößenverlauf  $n_x$ . Dabei stellt sich ab einem Abstand von etwa  $3 D_H$  zur Knotenmitte ein linearer Verlauf der Schnittkraft  $n_x$  ein, **Bild 9**.

Neben Fehlhebeln hat auch die Holmlänge einen großen Einfluß auf den Schnittgrößenverlauf. Bezieht man das errechnete Einspannmoment auf das theoretische Einspannmoment nach **Bild 8**, so ergibt sich für die zugrundegelegten Werte bei langen Holmen eine asymptotische Annäherung an etwa  $0,8 M_{th}$ , **Bild 10**. Bei kurzen Holmen ist der Momenteneinfluß geringer, liegt aber über dem von *Wanke* [12] angegebenen Wert.

Andere Parameter, wie Anlaufwinkel der Diagonalen oder Wanddicken, haben keinen nennenswerten Einfluß auf den Schnittgrößenverlauf im Holm.

Die durchgeführten Berechnungen liefern eine quantitative Aussage über den Momenteneinfluß im Holm durch Knotenfehlhebel. Diese Momente sind von den Normalkräften in den Diagonalen und damit von der Querkraftbelastung am Fachwerkurm abhängig. Da diese jedoch

gegenüber der Belastung durch Längskräfte und Biegemomente bei Auslegerkränen gering ist, kann man folgern, daß unter Berücksichtigung dieser speziellen Belastung bei Auslegerkränen die zusätzlichen Momente im Holm aufgrund von Knotenfehlhebeln unberücksichtigt bleiben können.

Die lokalen Beanspruchungen im Knotenbereich lassen sich durch Überschneidungen der Diagonalen verbessern, da dadurch ein frühzeitiger Abbau der Vertikalkomponente eintritt und die Querkraftbelastung im Knotenbereich des Holms verringert wird.

### Schlußbemerkung

Eine genaue Berechnung von Gittermast-Auslegerkränen muß aufgrund ihrer Systemeigenschaften nach der nichtlinearen Theorie durchgeführt werden. Dabei sind neben der Wahl eines geeigneten Rechenmodells die Randbedingungen des Ersatzsystems wirklichkeitsnah zu erfassen und im Rechenmodell mit aufzunehmen. Berücksichtigt man ferner, daß die Neufassung des Normblatts DIN 15018, Teil 3, zur Berechnung von Fahrzeugkränen zum Teil niedrigere Teilsicherheitsbeiwerte vorsieht, so muß dieses Vorgehen zusammen mit besseren Rechenmethoden durch Berücksichtigung der elastischen Verformung des Kranwagens abgesichert sein.

### Literaturnachweis:

- [1] Günthner, W.: Statische Berechnung von Gittermast-Auslegerkränen mit Hilfe finiter Turmelemente unter Berücksichtigung der Elastizität des Kranwagens und von Messungen. Diss. TU München 1985
- [2] Kohnhäuser, E.: Ein Beitrag zur statischen Berechnung von Fachwerk-Kranen. fördern und heben (1977) Nr. 9, S. 843/46 und Nr. 12, S. 1121/24
- [3] Böttcher, S., Günthner, W. u. Stephani, M.: Verformungsmessungen an einem Gittermastkran. fördern und heben 33 (1983) Nr. 3, S. 166/70.
- [4] Günthner, W.: STAB 81 – Stabwerk-Rechenprogramm zur Berechnung von Krantragwerken. Unveröff. Rechenprogramm am Lehrstuhl f. Förderwesen, TU München 1981.
- [5] Kohnhäuser, E.: Untersuchung von Methoden zur statischen Berechnung von Kran-Fachwerkürmen mit Hilfe eines räumlichen Matrizendeformationsverfahrens unter Berücksichtigung von Messungen. Diss. TU München 1977.
- [6] Uhrig, R.: Zur Berechnung der Schnittkräfte in Stabtragwerken nach der Theorie II. Ordnung, insbesondere der Verzweigungslasten unter Berücksichtigung der Schubdeformation. Der Stahlbau 50 (1981) H. 2, S. 39/42.
- [7] Ramm, W. u. W. Uhlmann: Zur Anpassung des Stabilitätsnachweises für mehrteilige Druckstäbe an das europäische Nachweiskonzept. Der Stahlbau 50 (1981) H. 6, S. 161/72.
- [8] Petersen, Chr.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. 2. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn-Verlag 1982
- [9] McHugh, Th. u. v. Overbye: Finite Element Analysis of a Carrier Frame. SAE-PAP. (1970) S. 1/6
- [10] Schleicher, F.: Zur Theorie des Baugrunds. Der Bauingenieur (1962), S. 931/49
- [11] Simmer, K.: Grundbau 1, Bodenmechanik, Erdstatische Berechnungen. 17. Aufl., Stuttgart: Teubner-Verlag 1980
- [12] Wanke, J.: Stahlrohrkonstruktionen. Wien, New York: Springer Verlag, 1966
- [13] Mang, F.: Abschlußbericht zum Forschungsprogramm „Rechenverfahren für Hohlprofilknoten“. Stuttgart, IRB 1979, Forschungsbericht T452
- [14] Axhausen, K., Th. Fink, C. Katz u. a.: Die Programmkette SET: Berechnungen im konstruktiven Ingenieurbau, Kik-CAD 173, 174, 175, Dez. 1980