

28. Internationale Kranfachtagung 2020
„Kran 4.0: Potenziale der Digitalisierung“

**Dynamische Beanspruchungen von Fahrzeugkränen
beim Lastheben**

Manuel Stölzner, M.Sc.; Dr.-Ing. Michael Kleeberger;
Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner; Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner



Manuel Stölzner, M. Sc.
Lehrstuhl fml – TU München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Dynamische Beanspruchungen von Fahrzeugkranen beim Lastheben

Die Auslegungsberechnung von Gittermast-Fahrzeugkranen erfolgt mit quasistatischen Berechnungsansätzen, die in den europäischen Normen DIN EN 13001 und DIN EN 13000 spezifiziert sind. In bisherigen Forschungsarbeiten konnte für einige Arbeitsvorgänge bereits gezeigt werden, dass diese Berechnungsansätze nur eine Abschätzung der tatsächlich auftretenden Belastungen ermöglichen. Eine Möglichkeit zur genaueren Abbildung der dynamischen Effekte bietet die nichtlineare dynamische Finite-Elemente-Berechnung. In diesem Beitrag werden die dynamischen Kranbeanspruchungen für die Vorgänge „Lastheben vom Boden“ und „Lastheben einer schwebenden Last“ mit Hilfe der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung analysiert und Vergleiche zu den Berechnungsergebnissen gemäß den Normvorschriften durchgeführt.

1 Einleitung

Gittermast-Fahrzeugkrane werden hauptsächlich für Hubaufgaben verwendet, bei denen eine große Ausladung und eine große Hubhöhe gefordert ist. Die maximale Traglast dieser Krane kann oft über tausend Tonnen betragen, die maximale Hubhöhe der größten Krane liegt bei über 200 Metern. Sie bestehen aus langen, schlanken und elastischen Auslegersystemen und weisen oft spitzwinkelige Seilabspannungen auf. Typische Einsatzgebiete von Gittermast-Fahrzeugkranen sind beispielsweise der Kraftwerksbau oder das Aufstellen von Windenergieanlagen.

Da durch die Verwendung dieser Kransysteme ein hohes Gefährdungspotential entsteht, ist die Auslegungsberechnung ein entscheidender Bestandteil bei der Entwicklung von Kranen. Mit den verwendeten Lastannahmen sollte dabei eine möglichst exakte Abbildung der auftretenden Belastungen sichergestellt sein. In der Praxis werden Fahrzeugkrane mit Hilfe quasistatischer Berechnungsansätze ausgelegt, die in den Normen DIN EN 13001 [1] und DIN EN 13000 [2] festgelegt sind. In einigen Analysen konnte bereits gezeigt werden, dass die tatsächlich auftretenden Belastungen durch diese Berechnungsansätze nur näherungsweise beschrieben werden [3, 4, 5].

In diesem Beitrag werden die dynamischen Kranbeanspruchungen für die Arbeitsvorgänge „Lastheben vom Boden“ und „Lastheben einer schwebenden Last“ analysiert. Mit Hilfe der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung wird zunächst untersucht, wie sich die dynamischen Beanspruchungen bei den beiden Vorgängen unterscheiden. Auf Grundlage der erhaltenen Resultate erfolgt anschließend eine Bewertung der quasistatischen Berechnungsansätze gemäß den Normvorschriften. Dabei werden die Ergebnisse aus der dynamischen Berechnung mit den Ergebnissen aus den Ansätzen nach DIN EN 13000 und DIN EN 13001 miteinander verglichen. Um eine allgemeingültige Aussage zur Güte der verwendeten Lastannahmen abzuleiten, umfassen die Untersuchungen unterschiedliche Rüstzustände eines Gittermast-Fahrzeugkrans sowie verschiedene Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Hubantriebs.

2 Stand der Technik

Die Auslegungsberechnung von Kranen erfolgt gemäß der europäischen Norm DIN EN 13001 [1]. Zur Berechnung von Fahrzeugkranen verweist diese übergeordnete Norm auf die produktspezifische Fahrzeugkrannorm DIN EN 13000 [2]. Gemäß den genannten Normvorschriften erfolgt die Auslegungsberechnung mit Hilfe statischer Berechnungsansätze. Die dynamischen Lasteinwirkungen auf das Tragwerk werden dabei durch die Verwendung von Dynamikbeiwerten berücksichtigt. Diese Beiwerte können aus den Normen entnommen werden oder beruhen oftmals auf den Erfahrungen der Kranhersteller. Zur rechnerischen Durchführung des Sicherheitsnachweises schreiben alle Normen außerdem die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten vor.

2.1 Berechnung nach DIN EN 13001

Die Norm DIN EN 13001 „spezifiziert die Bedingungen und Anforderungen an die Konstruktion zur Vermeidung von mechanischen Gefährdungen bei Kranen sowie eine Methode der Überprüfung dieser Anforderungen“ [6]. Die auftretenden Kräfte werden in regelmäßige, nicht regelmäßige und außergewöhnliche Lasten eingeteilt. Die Eigenlasten, Trägheitskräfte und Fliehkräfte zählen hierbei zu den regelmäßigen Lasten.

2.1.1 Lastheben einer schwebenden Last

Der Vorgang „Heben und Senken einer schwebenden Last“ ist in der Norm DIN EN 13001 dem Lastfall A3 zuzuordnen. Die Lasten aus der Beschleunigung aller Kranantriebe werden dabei unter Verwendung des Dynamikbeiwerts Φ_5 berücksichtigt. Für „Antriebe ohne Spiel oder in Fällen, bei denen bestehendes Spiel die dynamischen Kräfte nicht beeinflusst und mit stetiger Änderung der Kräfte“ [1] gibt die Norm für Φ_5 einen Bereich vor, der zwischen 1,0 und 1,5 liegt. In Anlehnung an die Norm DIN 15018 [7] wird hier ein Dynamikbeiwert von $\Phi_5 = 1,5$ verwendet, da weder in der produktspezifischen Norm DIN EN 13000 noch in der allgemeingültigen Norm DIN EN 13001 ein genauer Wert genannt ist.

2.1.2 Lastheben vom Boden

Zur Berücksichtigung der dynamischen Lasteinwirkung beim Vorgang „Lastheben vom Boden“ sind in der Norm DIN EN 13001 die beiden Beiwerte Φ_1 und Φ_2 definiert.

Der Beiwert Φ_1 erfasst die Schwingungsanregung im Tragwerk durch die Multiplikation der Masse des Krantragwerks mit diesem Beiwert. Abhängig vom Krantyp ist ein Wert zwischen 0,95 und 1,1 zu wählen. In der kranspezifischen Norm DIN EN 13000 wird dieser Beiwert nicht erwähnt. Da in der internationalen produktspezifischen Fahrzeugkrannorm ISO 8686-2 [8] ein Wert von Eins vorgeschlagen ist, liegt dieser Wert bei den hier vorgestellten Berechnungsergebnissen zugrunde.

Beim Übergang der Last vom Boden zur schwebenden Last unterliegt der Kran dynamischen Belastungen, die durch den Beiwert Φ_2 berücksichtigt werden. Für den Sicherheitsnachweis ist die Gewichtskraft der Hublast mit diesem Wert zu multiplizieren. Die Berechnungsvorschrift für den Beiwert ist abhängig von der Steifigkeitsklasse des Krans und dessen Hubwerkstyp. Gittermast-Fahrzeugkrane werden der Steifigkeitsklasse HC1 zugeordnet, als Hubwerkstyp ist HD4 („Stufenlose Steuerung des Hubwerksantriebes

mit stetigem Hochlaufen der Geschwindigkeit“ [1]) zu wählen. Mit der charakteristischen Hubgeschwindigkeit v_h berechnet sich Beiwert durch die Gleichung

$$\phi_2 = 1.05 + 0.17v_h. \quad (1)$$

Für die Klasse HD4 ist als charakteristische Hubgeschwindigkeit v_h die Hälfte der maximal stetigen Hubgeschwindigkeit mit $v_h = 0.5 \cdot v_{h,max}$ anzusetzen. [1]

2.2 Berechnung nach DIN EN 13000

Die Norm DIN EN 13000 ist die aktuelle europäische Norm zur Fahrzeugkranauslegung. Sie „ist anzuwenden für die Konstruktion und Fertigung, für den Einbau der Sicherheitseinrichtungen und für Informationen zum Gebrauch, zur Instandhaltung und zur Prüfung von Fahrzeugkranen“ [2]. Bezüglich der Lastannahmen verweist diese Norm auf die Berechnungsrichtlinie FEM 5.004 [9]. Die auftretenden Kräfte werden in Hauptlasten, Zusatzlasten und Sonderlasten eingeteilt, wobei die „dynamische Kraftwirkungen aus Heben und Senken der Hublast“ [9] zu den Hauptlasten zählen. In dieser Berechnungsvorschrift wird nicht zwischen den Vorgängen „Lastheben vom Boden“ und „Lastheben einer schwebenden Last“ unterschieden. Der Hublastbeiwert berechnet sich mit der Gleichung

$$\Phi_{FEM} = 1.1 + 0.133 v_h. \quad (2)$$

Der Maximalwert für diesen Beiwert beträgt 1.3, für höhere Hubgeschwindigkeiten als $v_h = 1,5 \text{ m/s}$ wird der Wert nicht weiter erhöht. [9]

3 Numerische Analysen

Die Berechnungen zu diesem Artikel wurden mit dem am Lehrstuhl fml der TUM speziell für die Kranberechnungen entwickelten Programm NODYA durchgeführt. Dieses Programmsystem erlaubt statische und dynamische Analysen, geometrisch und materiell nichtlineare Berechnungen sowie Beul- und Knickanalysen. NODYA bietet neben Stab-, Balken-, Massen- und Dämpfungselementen auch ein Seilelement, das der Abbildung von Seilen dient, die über Seilrollen laufen. Zur Beurteilung der tatsächlich auftretenden Tragwerksbelastungen beim Lastheben wird die nichtlineare dynamische Finite-Elemente-Berechnung verwendet, die als realitätsnah einzustufen ist. Im anschließenden Vergleich werden die Ergebnisse der Normberechnung mit diesen Resultaten verglichen und bewertet. Da in diesem Beitrag die Qualität der quasistatischen Lastannahmen beurteilt wird und nicht die Güte der Teilsicherheitsbeiwerte, werden bei den Berechnungen keine Teilsicherheitsbeiwerte verwendet.

3.1 Analyisierte Kransysteme

Die Analysen des dynamischen Verhaltens beim Lastheben basieren auf einem Gittermast-Fahrzeugkran mit einer maximal möglichen Hublast von etwa 500 Tonnen. Die Beurteilung der dynamischen Belastungen umfasst dabei Systeme mit Hauptausleger sowie Systeme mit Haupt- und Wippausleger (vgl. Bild 1). Dabei werden unterschiedliche Auslegerlängen und Ausladungen des Krans analysiert, insgesamt liegen den hier vorgestellten Berechnungen 12 verschiedene Rüstzustände zugrunde.

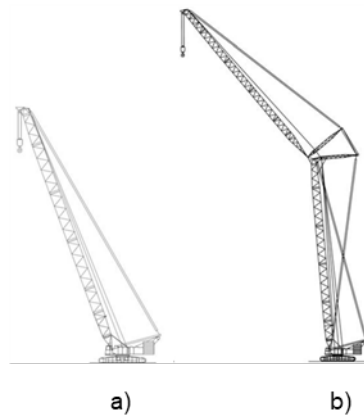


Bild 1: Analysierte Krankonfigurationen eines Gittermast-Fahrzeugkrans: a) S-System (nur Hauptausleger), b) SW-System (Hauptausleger mit Hilfsausleger) [10]

3.2 Modellierung

Bei den vorgestellten Hubvorgängen erfolgt die Analyse der dynamischen Beanspruchungen für ein Arbeitsspiel bestehend aus dem Anfahren und anschließender Phase der Beharrung bei konstanter Geschwindigkeit. Messungen an einem Gittermast-Fahrzeugkran ergaben, dass die hydraulischen Antriebe weitestgehend belastungsunempfindlich arbeiten und den durch die Kransteuerung vorgegebenen zeitlichen Verläufen für die Antriebsgrößen (z.B. Drehgeschwindigkeit einer Winde) sehr gut folgen [10]. Aus diesem Grund wird auf ein detailliertes Antriebsmodell verzichtet und die Zeitverläufe für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung werden jeweils als linear angenommen (vgl. Bild 2).

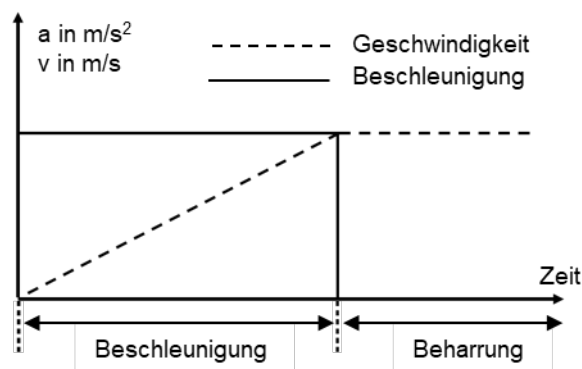


Bild 2: Zeitlicher Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung für den Vorgang Anfahren mit anschließender Beharrungsphase

Um den Einfluss unterschiedlicher Beschleunigungen und Geschwindigkeiten des Antriebs auf das dynamische Verhalten des Krans zu analysieren werden drei Beschleunigungen (0.42 rad/s^2 , 0.56 rad/s^2 , 0.7 rad/s^2) und drei Geschwindigkeiten (0.7 rad/s , 1.4 rad/s , 2.1 rad/s) der Hubwerkstrommel verwendet. Die Untersuchungen umfassen außerdem verschiedene Werte für die Einsicherung des Flaschenzugs.

Zur Modellierung der Gittermastausleger werden die Gittermastbauteile des Tragwerks durch die Verwendung der Methode der finiten Turmelemente [11] zu Einzelementen zusammengefasst, die bezüglich der Massen- und Steifigkeitseigenschaften äquivalent sind. Somit wird jedes Gittermast-Zwischenstück durch ein Balkenelement beschrieben, wodurch sich das gesamte Auslegersystem mit einer überschaubaren Anzahl an Elementen

abbilden lässt. Da das Ziel der Analysen nicht darin besteht, den Einfluss der Dämpfung auf das dynamische Verhalten des Tragwerks zu untersuchen, liegt den Berechnungen ein ungedämpftes Verhalten zugrunde.

Bei beiden untersuchten Arbeitsvorgängen befindet sich die Hublast jeweils vertikal unter der Kranspitze. Als Hublastposition wird für den Arbeitsvorgang „Lastheben einer schwebenden Last“ die Hublast direkt über dem Boden angenommen. Beim Vorgang „Lastheben vom Boden“ ist das Hubseil zu Beginn des Arbeitsvorgangs unbelastet, der Boden wird als Element mit hoher Steifigkeit modelliert.

3.3 Berechnungsergebnisse

Mit Hilfe der nichtlinearen dynamischen Finite-Elemente-Berechnung wird zunächst gezeigt, wie sich die dynamischen Beanspruchungen bei den Vorgängen „Lastheben vom Boden“ und „Lastheben einer schwebenden Last“ unterscheiden. Anschließend erfolgt ein Vergleich der erhaltenen Ergebnisse mit Resultaten gemäß den unterschiedlichen Berechnungsansätzen in den Normvorschriften.

3.3.1 Dynamische Beanspruchungen bei Hubvorgängen

Um die Beanspruchungen bei den beiden betrachteten Arbeitsvorgängen zu vergleichen, wird der maximale dynamische Anteil der Normalspannung in den Eckstielen jedes Gittermast-Zwischenstücks ausgewertet. Bild 3 zeigt einen Vergleich der dynamischen Belastungen zwischen dem Vorgang „Lastheben vom Boden“ und dem Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“ für ein exemplarisch ausgewähltes SW-System. Der Vorgang „Lastheben vom Boden“ führt in allen Gittermast-Zwischenstücken zu höheren dynamischen Belastungen als der Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“. Die Maximalwerte treten bei beiden Vorgängen jeweils in der Auslegermitte auf.

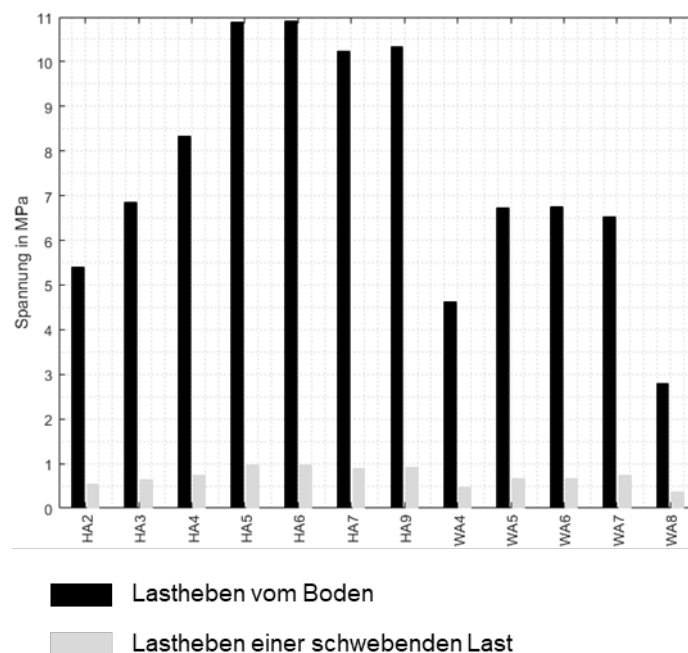


Bild 3: Dynamische Belastungen beim Lastheben für ein SW-System mit 66 Meter Hauptausleger und 48 Meter Wippausleger (S66W48)

In Bild 4 ist ein Vergleich des maximalen dynamischen Anteils der Spannungen für verschiedene Krankonfigurationen und unterschiedliche Hubgeschwindigkeiten dargestellt. Die kleineren Spannungswerte sind dabei jeweils dem Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“ zuzuordnen. Unabhängig von der Geschwindigkeit oder Beschleunigung und dem Kransystem führt das Anheben einer schwebenden Last wieder zu wesentlich kleineren Bauteilbeanspruchungen. Ohne eine Betrachtung von Überlagerungen aus anderen Arbeitsvorgängen würden diese Spannungen für die Auslegungsberechnung kaum eine entscheidende Größe darstellen. Eine Unterscheidung der Hubvorgänge gemäß DIN EN 13001 erscheint somit plausibler als der Berechnungsansatz nach DIN EN 13000, bei dem zwischen den beiden Vorgängen nicht unterschieden wird. Für das „Lastheben vom Boden“ kann aus Bild 4 eine Zunahme der Spannungen bei steigender Hubgeschwindigkeit entnommen werden, was die geschwindigkeitsabhängigen Ansätze für den Hublastbeiwert gemäß den Normen DIN EN 13001 und DIN EN 13000 bestätigen. Für den Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“ kann keine systematische Abhängigkeit der dynamischen Beanspruchungen von der Geschwindigkeit oder Beschleunigung aufgezeigt werden.

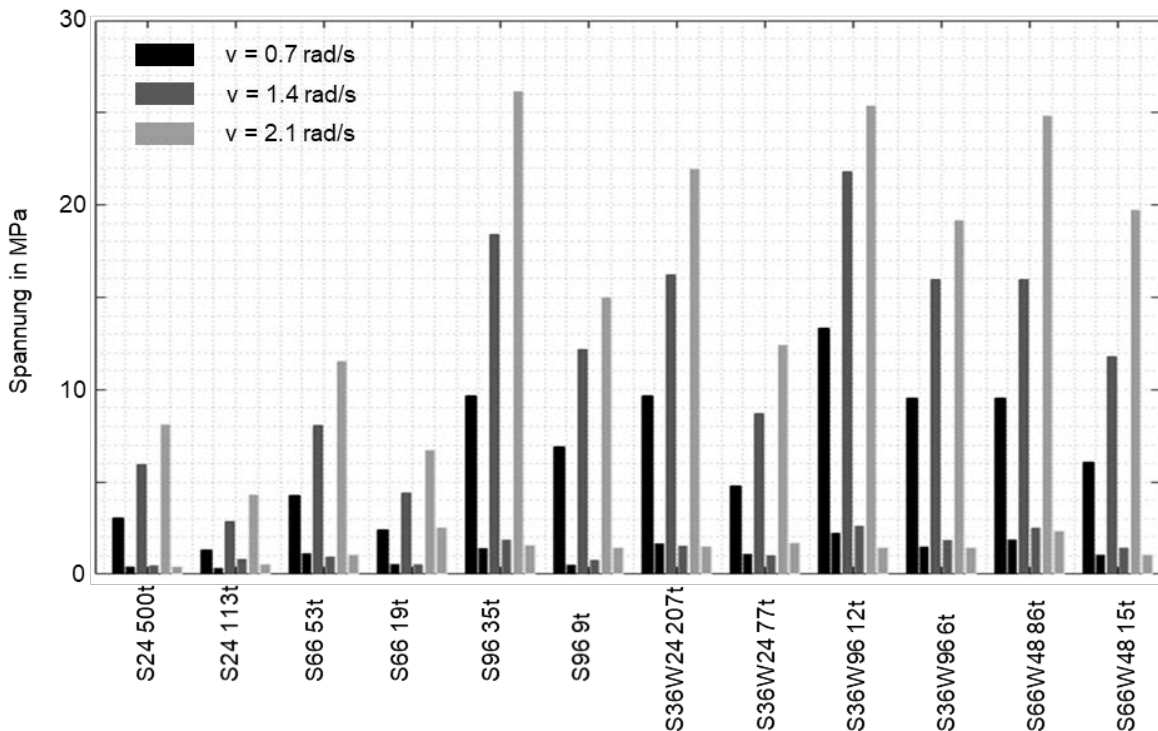


Bild 4: Dynamische Belastungen beim „Lastheben vom Boden“ und „Lastheben einer schwebenden Last“ für verschiedene Rüstzustände, unterschiedliche Ausladungen und verschiedene Geschwindigkeiten

3.3.2 Normberechnungen und dynamische Finite-Elemente-Berechnung im Vergleich

Die folgenden Analysen bewerten die Ergebnisse gemäß den Berechnungsansätzen nach DIN EN 13000 und DIN EN 13001 durch einen Vergleich mit der nichtlinearen dynamischen Finite-Elemente-Berechnung.

Lastheben einer schwebenden Last

In Bild 5 sind die Ergebnisse aus der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung und der Normberechnung gemäß DIN EN 13000 miteinander verglichen. Bei allen untersuchten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen werden die Beanspruchungen des Krans durch die Verwendung dieses Normansatzes deutlich überschätzt. Für den Arbeitsvorgang „Lastheben einer schwebenden Last“ liefert der Berechnungsansatz gemäß DIN EN 13000 somit eine zu konservativen Abschätzung der auftretenden Belastungen.

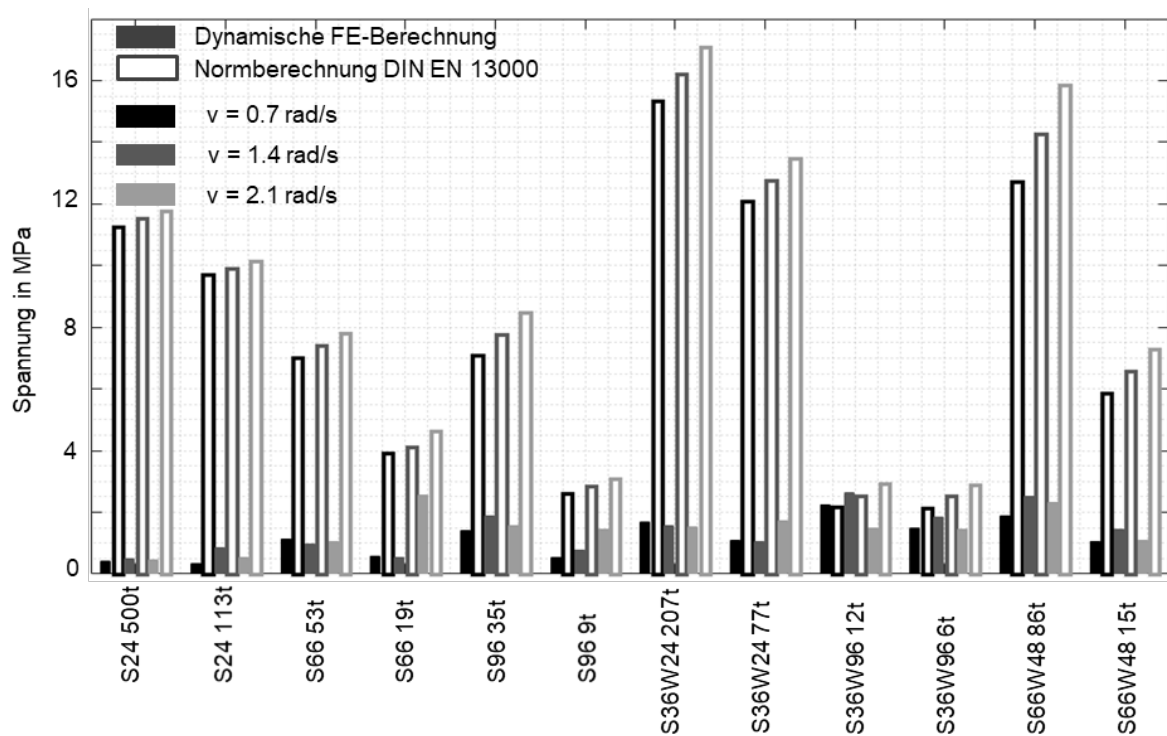


Bild 5: Vergleich der Spannungsergebnisse für die dynamische Finite-Elemente-Berechnung und die Normberechnung nach DIN EN 13000 beim Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“

Bild 6 zeigt einen Vergleich zwischen den dynamischen Beanspruchungen gemäß der Normberechnung DIN EN 13001 und der nichtlinearen dynamischen Finite-Elemente-Berechnung. Im Gegensatz zum Berechnungsansatz aus DIN EN 13000 liefert dieser Ansatz zu geringe Spannungen, weshalb Analysen nun mit einem höheren Dynamikbeiwert durchgeführt werden. Aus dem Verhältnis von maximaler dynamischer Beanspruchung zu statischer Beanspruchung werden für zwei Krankonfigurationen exemplarisch die Dynamikbeiwerte bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet und anschließend der Mittelwert bestimmt (vgl. Tabelle 1). Abhängig von den gewählten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen und dem Rüstzustand des Krans zeigt der Dynamikbeiwert teilweise große Schwankungen. Da sich bei den Untersuchungen für Φ_5 jeweils ein größerer Wert als 1,5 ergibt, wird für die weiteren Analysen jeweils der Mittelwert der berechneten Dynamikbeiwerte verwendet.

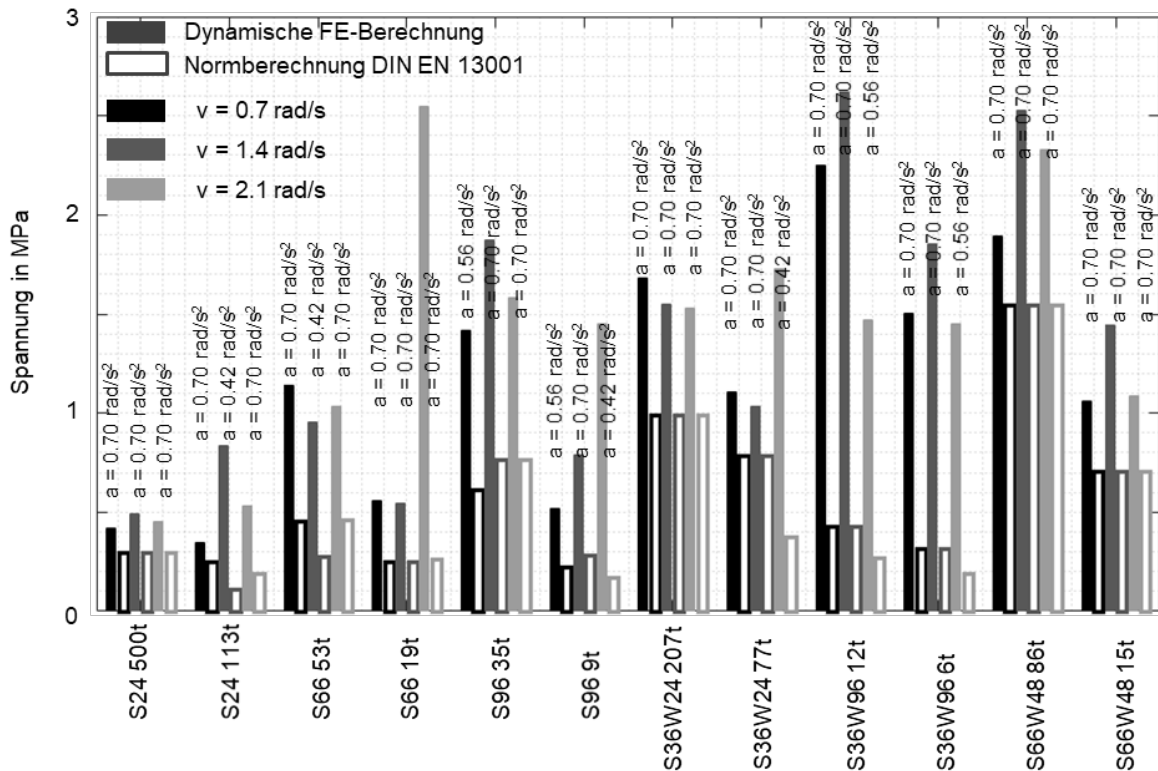


Bild 6: Vergleich der Spannungsergebnisse für die dynamische Finite-Elemente-Berechnung und die Normberechnung nach DIN EN 13001 beim Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“

Tabelle 1: Berechnete Dynamikbeiwerte Φ_5 für zwei verschiedene Krankonfigurationen und unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

Geschwindigkeit	Beschleunigung	Dynamikbeiwert Φ_5 (berechnet)	
		S66W48	S96
0.7	0.42	2.484	3.885
0.7	0.56	1.701	3.469
0.7	0.70	1.831	2.478
1.4	0.42	1.963	2.892
1.4	0.56	1.998	3.766
1.4	0.70	2.406	3.664
2.1	0.42	1.996	3.096
2.1	0.56	1.960	3.005
2.1	0.70	1.955	3.094
Mittelwert:		2.032	3.261

Bild 7 und Bild 8 zeigen für beide gewählten Rüstzustände die Ergebnisse bei Verwendung des modifizierten Dynamikbeiwerts und einen Vergleich mit der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung. Bild 7 zeigt dabei die Ergebnisse für alle Bauteile eines Krans, in Bild 8 sind die Maximalwerte für die jeweilige Geschwindigkeits-Beschleunigungskombination dargestellt. Dabei stimmen die Spannungen aus dem modifizierten Normansatz besser mit den Werten der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung überein als bei der Verwendung von $\Phi_5 = 1.5$.

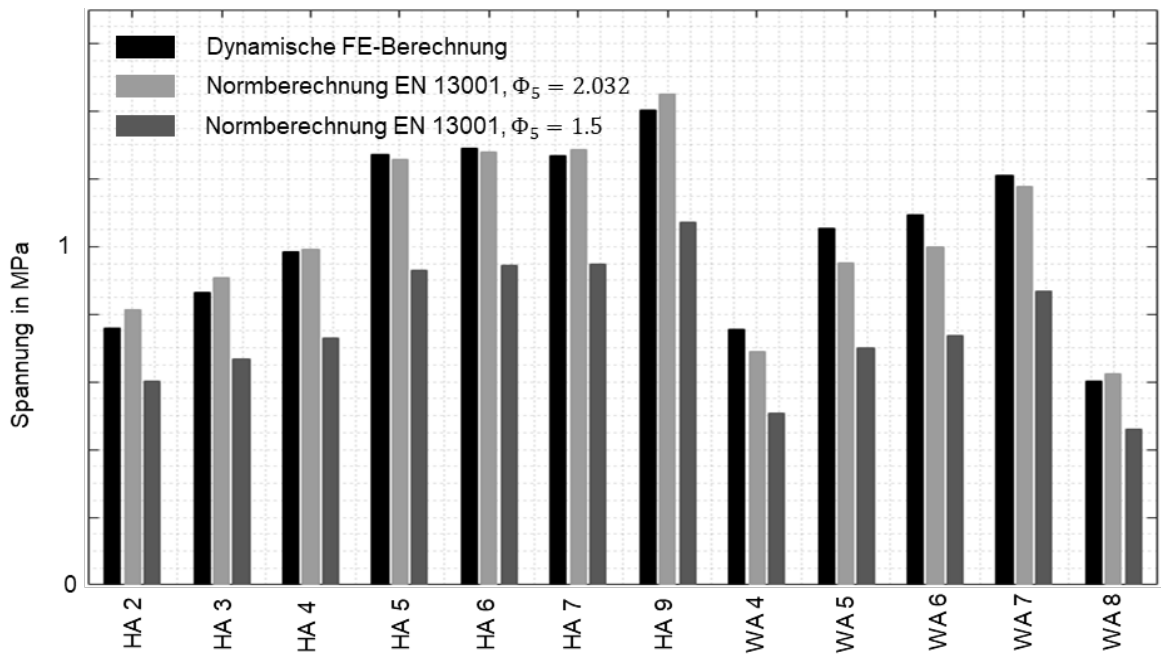


Bild 7: Vergleich der Spannungsergebnisse für eine Hauptauslegerlänge von 66 m und Hilfsauslegerlänge von 48 m beim Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“, Geschwindigkeit $v = 1.4 \text{ rad/s}$, Beschleunigung $a = 0.42 \text{ rad/s}^2$

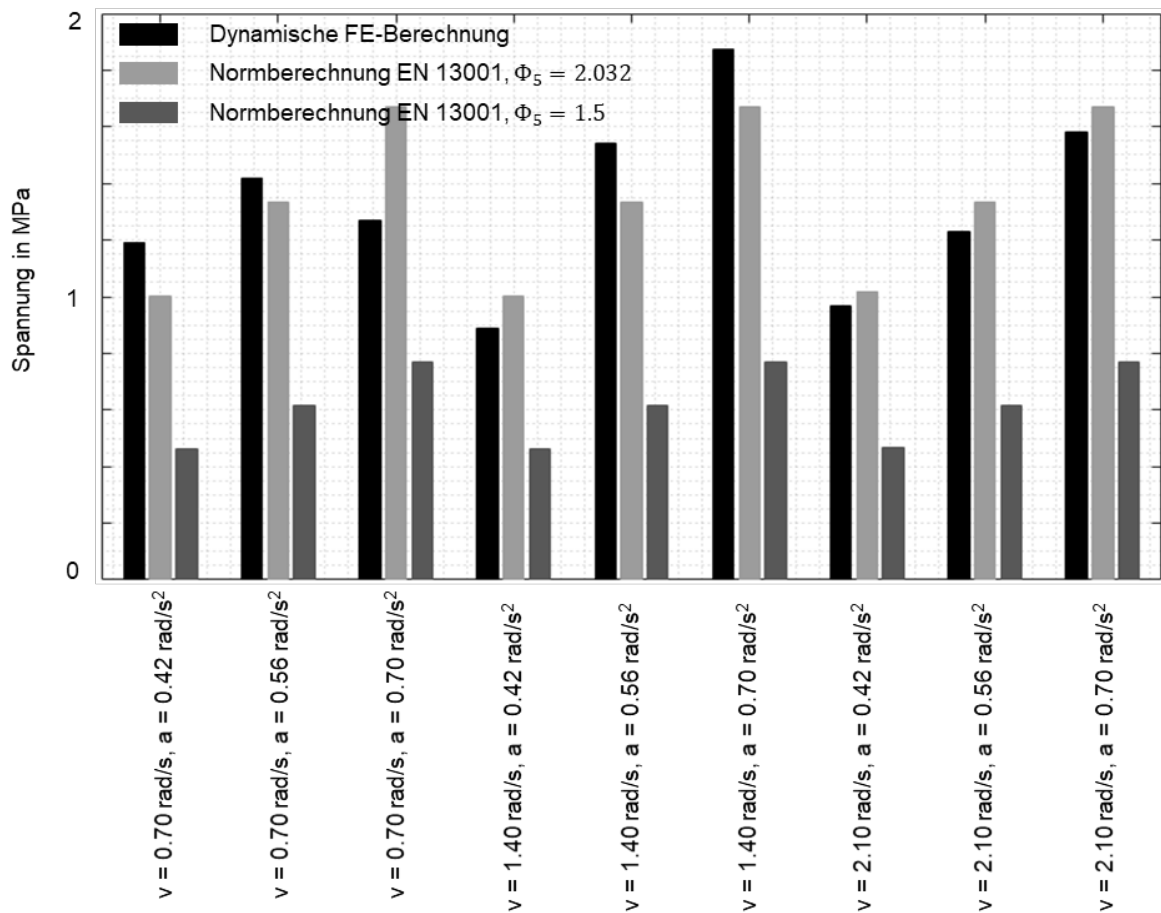


Bild 8: Vergleich der maximalen Spannungen für eine Hauptauslegerlänge von 96 m beim Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“

Lastheben vom Boden

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 gezeigt wurde, führt der Vorgang „Lastheben vom Boden“ zu wesentlich größeren dynamischen Beanspruchungen als der Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“. Bild 9 zeigt einen Vergleich zwischen den Spannungsergebnissen aus der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung und den beiden Normansätzen. Aufgrund des höheren Dynamikbeiwerts liefert der Ansatz gemäß DIN EN 13000 höhere Werte für die Spannungen als der Ansatz nach DIN EN 13001. Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung zeigt sich, dass beide Normansätze bei vielen Krankonfigurationen zu schwach sind. Dabei treten teilweise erhebliche Abweichungen zur dynamischen Berechnung auf.

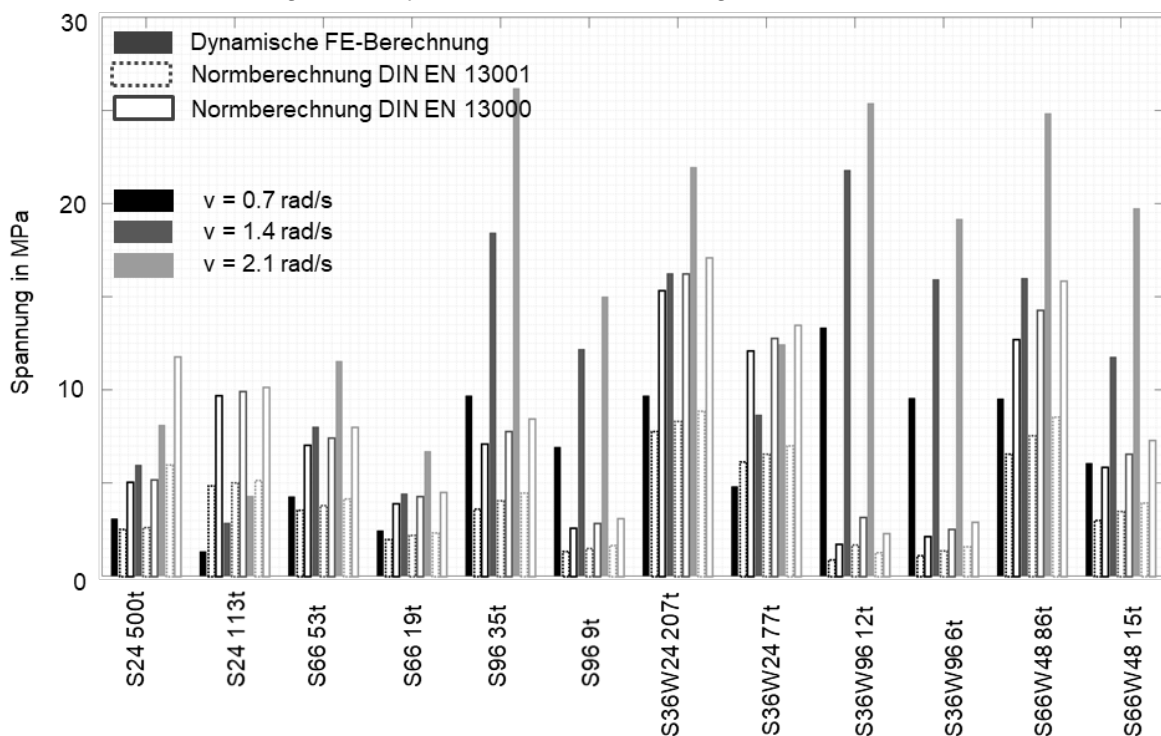


Bild 9: Vergleich der Spannungsergebnisse für die dynamische Finite-Elemente-Berechnung und die Normberechnungen nach DIN EN 13001 und DIN EN 13000 beim Vorgang „Lastheben vom Boden“

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen beim Arbeitsvorgang Lastheben analysiert. Mit Hilfe der nichtlinearen dynamischen Finite-Elemente-Berechnung konnte gezeigt werden, dass der Vorgang „Lastheben vom Boden“ zu wesentlich größeren dynamischen Bauteilbeanspruchungen führt als der Vorgang „Lastheben einer schwebenden Last“. In weiteren numerischen Untersuchungen wurden die Ergebnisse gemäß den Normberechnungen aus DIN EN 13000 und DIN EN 13001 mit der dynamischen Finite-Elemente-Berechnung verglichen und bewertet. Dabei konnten die vereinfachten Berechnungsansätze aus den Normen die dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen nur näherungsweise beschreiben. Da die beiden untersuchten Arbeitsvorgänge zu unterschiedlichen Tragwerksbelastungen führen, ist die vorgenommene Unterscheidung zwischen den

beiden Vorgängen aus DIN EN 13001 plausibel. Die Auswertung der Spannungen ergab jedoch, dass der Dynamikbeiwert für das „Lastheben einer schwebenden Last“ teilweise erheblich von dem Standardwert von 1.5 abweicht. Beim Vorgang „Lastheben vom Boden“ zeigte sich ebenfalls, dass die dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen nur näherungsweise durch die Ansätze in den Normen beschrieben werden.

Eine Schwäche der aktuellen europäischen Normansätze ergibt sich aus der Nichtberücksichtigung der Beschleunigungen quer zum Ausleger. Ein Berechnungsansatz zur Berücksichtigung dieser Querbeschleunigungen ist nur in der zurückgezogenen Norm DIN 15018 aufgeführt [7]. Dieser Ansatz wurde in dem Artikel nicht analysiert, da er in keine aktuelle Krannorm übernommen wurde. In der internationalen Norm ISO 8686-1 [12] wird das Problem zur Berücksichtigung der Querbeschleunigungen ebenfalls thematisiert. Falls Beschleunigungen quer zu den Auslegern auftreten, ist gemäß dieser Norm keine exakte Abbildung der dynamischen Effekte durch die Verwendung von Dynamikbeiwerten möglich. Stattdessen wird in diesem Fall auf die Möglichkeit von alternativen Berechnungsmöglichkeiten, wie beispielsweise eine elastokinetische Analyse verwiesen.

Quellenverzeichnis:

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen, DIN EN Norm Nr. 13001 Teil 2, 2014.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane - Fahrzeugkrane, DIN EN Norm Nr. 13000, 2014.
- [3] Celiktas, M., Kleeberger, M.: Dynamische Belastung beim Lastheben: Ein Vergleich von dynamischer und quasistatischer Berechnung, F+H Fördern und Heben 47, 1997, S. 430-431.
- [4] Schneidler, S., Kleeberger, M., Günthner, W.A.: Vergleich der dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen mit den Ergebnissen der quasistatischen Auslegung nach DIN EN 13001, Tagungsbericht 20. Kranfachtagung, Dresden, 2012.
- [5] Kleeberger, M., Schneidler S., Günthner, W.A.: Untersuchung der dynamischen Beanspruchungen von Gittermast-Fahrzeugkranen und Vergleich mit der quasistatischen Auslegung der Norm, Tagungsbericht 22. Kranfachtagung, Magdeburg, 2014.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Konstruktion allgemein – Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen, DIN EN Norm Nr. 13001 Teil 1, 2015.
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Krane – Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung von Fahrzeugkranen, DIN Norm Nr. 15018 Teil 3, 1984
- [8] ISO International Organization for Standardization Cranes-Design principles for loads and load combinations – Part 2: Mobile cranes, ISO Standard Nr. 8686 Part 2, 2018.
- [9] Federation Europeene de la Manutention: Regeln für die Berechnung von Stahltragwerken von Fahrzeugkranen für allgemeine Verwendung, FEM–Richtlinie 5.004, second edition, 1994.
- [10] Kleeberger, M.: Nichtlineare dynamische Berechnung von Gittermast-Fahrzeugkranen. Dissertation. Technische Universität München. München, 1996.
- [11] Günthner, W.A.: Statische Berechnung von Gittermast-Auslegerkranen mit Hilfe finiter Turmelemente unter Berücksichtigung der Elastizität des Kranwagens und von Messungen. Dissertation. Technische Universität München. München, 1985.
- [12] ISO International Organization for Standardization Cranes-Design: principles for loads and load combinations – Part 1: General, ISO Standard No. 8686 Part 1, 2012.