

DIN EN 13001-2

ICS 53.020.20

Ersatz für
DIN EN 13001-2:2021-12**Kransicherheit –
Konstruktion allgemein –
Teil 2: Lasteinwirkungen;
Deutsche Fassung EN 13001-2:2021**

Crane safety –
General design –
Part 2: Load actions;
German version EN 13001-2:2021

Sécurité des appareils de levage à charge suspendue –
Conception générale –
Partie 2: Charges;
Version allemande EN 13001-2:2021

Gesamtumfang 77 Seiten

DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)

Nationales Vorwort

Diese Norm enthält sicherheitstechnische Festlegungen.

Die nationalen Interessen bei der Erarbeitung wurden vom Ausschuss NA 060-22-10 AA „Lenkungsausschuss Krane und Hebezeuge“ und NA 060-22-10-21 AK „Konstruktion - allgemein (SpA CEN/TC 147/WG 2 u. SpA ISO/TC 96/SC 10)“ im Fachbereich „Krane und Hebezeuge“ des DIN-Normenausschusses Maschinenbau (NAM) wahrgenommen. Vertreter der Hersteller und Anwender von „Kranen und Hebezeugen“ sowie der Berufsgenossenschaften waren an der Erarbeitung beteiligt.

Diese Norm konkretisiert einschlägige Anforderungen von Anhang I der EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG an erstmals im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) in Verkehr gebrachte Maschinen, um den Nachweis der Übereinstimmung mit diesen Anforderungen zu erleichtern.

Ab dem Zeitpunkt ihrer Bezeichnung als Harmonisierte Norm im Amtsblatt der Europäischen Union kann der Hersteller bei ihrer Anwendung davon ausgehen, dass er die von der Norm behandelten Anforderungen der Maschinenrichtlinie eingehalten hat (so genannte Vermutungswirkung).

Für die Anwendung wird darauf hingewiesen, dass unter dem Begriff „Kran“ alle Maschinen zum zyklischen Heben oder zum zyklischen Heben von an Haken oder anderen Lastaufnahmeeinrichtungen hängenden Lasten verstanden werden. Das bedeutet, dass diese Norm auch z. B. für Winden, die diese Definition erfüllen, anzuwenden ist.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen, sofern sie nicht als DIN-ISO-Normen mit gleicher Zählnummer veröffentlicht sind, gibt es keine nationalen Entsprechungen.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 13001-2:2014-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Krane auf Schiffen, die in den Anwendungsbereich der Richtlinie 2016/1629/EU (Binnenschiffe) und des „Europäischen Standards der technischen Vorschriften für Binnenschiffe“ (ES-TRIN:2019/1) fallen:
 - 1) Lasten, die für Krane auf Schiffen relevant sind, wurden ergänzt;
- b) Unterabschnitt 4.2.2 über günstige/ungünstige Massen und der Abschnitt über Situationen mit hohem Risiko, einschließlich Anhang D, wurden geändert
 - 1) Siehe auch 4.2.1.2 f) regelmäßige Lasten wurden ergänzt
 - 2) Siehe auch 4.2.1.4 m) außergewöhnliche Lasten wurden ergänzt
- c) Unterabschnitt 4.3.6 für Lasteinwirkungen, die durch Messung ermittelt worden sind, wurde hinzugefügt;
- d) Unterabschnitt 4.3.8 über die Starrkörperfestigkeit wurde geändert;
- e) Unterabschnitt 4.2.1.5 über interne Lasten in Mechanismen wurde hinzugefügt;

- f) Anforderungen an Lasten auf Zugangswegen wurden durch eine Verweisung auf EN 13586:2004+A1:2008 ersetzt;
- g) Anhang ZA wurde grundlegend überarbeitet.

Gegenüber DIN EN 13001-2:2021-12 wurden folgende Korrekturen vorgenommen:

- a) Korrektur der Gleichung in Tabelle 7, zweite Zeile, letzte Spalte;
- b) Korrektur der Darstellung der zweiten Gleichung in Tabelle 6 für das Spurspiel α_g ;
- c) Anpassung der Übersetzung in der Einleitung und in 4.3.7, 3. Absatz.

Frühere Ausgaben

DIN EN 13001-2: 2005-04, 2007-11, 2010-02, 2011-07, 2012-06, 2014-12, 2021-12

DIN EN 13001-2 Berichtigung 1: 2006-11

— Leerseite —

Deutsche Fassung
Kransicherheit —
Konstruktion allgemein —
Teil 2: Lasteinwirkungen

Crane safety —
General design —
Part 2: Load actions

Sécurité des appareils de levage à charge suspendue —
Conception générale —
Partie 2: Charges

Diese Europäische Norm wurde korrigiert und vom CEN-CENELEC-Management-Zentrum am 21. April 2021 neu herausgegeben.

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 25. Januar 2021 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	6
3.1 Begriffe	6
3.2 Symbole und Abkürzungen	7
4 Sicherheitsanforderungen und/oder Schutzmaßnahmen	11
4.1 Allgemeines	11
4.2 Lasten	11
4.2.1 Allgemeines	11
4.2.2 Regelmäßige Lasten	13
4.2.3 Nicht regelmäßige Lasten	22
4.2.4 Außergewöhnliche Lasten	30
4.3 Lastkombinationen	38
4.3.1 Allgemeines	38
4.3.2 Situationen mit hohem Risiko	39
4.3.3 Günstige und ungünstige Massen	39
4.3.4 Teilsicherheitsbeiwerte für die Masse des Krans	40
4.3.5 Teilsicherheitsbeiwerte, die auf aus Verschiebungen ermittelte Lasten anzuwenden sind	41
4.3.6 Auf gemessene, durch das Steuerungssystem begrenzte Lasteinwirkungen anzuwendende Teilsicherheitsbeiwerte	42
4.3.7 Lastkombinationen für den Sicherheitsnachweis	42
4.3.8 Nachweis der Standsicherheit des Krans	47
Anhang A (informativ) Aerodynamische Koeffizienten (Formbeiwerte)	49
A.1 Allgemeines	49
A.2 Einzelbauteile	52
A.3 Ebene und räumliche Fachwerkbauteile	57
A.4 Tragwerksbauteile in Reihenordnung	59
Anhang B (informativ) Darstellung der Klassen der Hubwerkstypen	61
Anhang C (informativ) Berechnung des Lastbeiwerts für indirekt wirkende Hubkraftbegrenzer	64
Anhang D (informativ) Leitlinien für die Auswahl von Risikobeiwerten	66
Anhang E (informativ) Auswahl einer geeigneten Gruppe von Krannormen	68
Anhang F (informativ) Anforderungen der Richtlinie 2016/1629/EU	70
Anhang G (informativ) Liste der Gefährdungen	71
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den abzudeckenden grundlegenden Anforderungen der Richtlinie 2006/42/EG	72
Literaturhinweise	73

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13001-2:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 147 „Krane — Sicherheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis September 2021 und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis September 2021 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN 13001-2:2014.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Normungsauftrages erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

CEN/TC 147/WG 2 hat EN 13001-2:2014 überarbeitet, um das Dokument an den technischen Fortschritt, an neue Anforderungen und an die Änderungen in den in Bezug genommenen Dokumenten anzupassen. Die wesentlichen Themen und Änderungen betreffen:

- Krane auf Schiffen, die in den Anwendungsbereich der Richtlinie 2016/1629/EU (Binnenschiffe) und des „Europäischen Standards der technischen Vorschriften für Binnenschiffe“ (ES-TRIN:2019/1) fallen;
- Lasten, die für Krane auf Schiffen relevant sind, wurden ergänzt;
- der Abschnitt über günstige/ungünstige Massen und der Abschnitt über Situationen mit hohem Risiko, einschließlich Anhang D, wurden geändert;
- ein neuer Unterabschnitt 4.3.6 für Lasteinwirkungen, die durch Messung ermittelt worden sind, wurde hinzugefügt;
- Unterabschnitt 4.3.8 über die Starrkörperfestigkeit wurde geändert;
- ein neuer Unterabschnitt 4.2.1.5 über interne Lasten in Mechanismen wurde hinzugefügt;
- Anforderungen an Lasten auf Zugangswegen wurden durch eine Verweisung auf EN 13586:2004+A1:2008 ersetzt;
- Anhang ZA wurde überarbeitet.

Dieses Dokument ist Teil 2 der Normenreihe EN 13001. Die anderen Teile sind folgende:

- *Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen*
- *Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken*
- *Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben*
- *Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Laufrad/Schiene-Kontakten*
- *Teil 3-4: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise für Maschinenbauteile — Lager*

- *Teil 3-5: Grenzzustände und Sicherheitshinweise von geschmiedeten Haken und gegossene Haken*
- *Teil 3-6: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Maschinenbauteilen — Hydraulikzylinder*

Zum Zusammenhang mit anderen Europäischen Normen für Krane siehe Anhang E.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Dieses Dokument wurde erarbeitet, um als harmonisierte Norm ein Mittel für die mechanische Auslegung und den theoretischen Nachweis von Kranen bereitzustellen, um die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen der EU-Richtlinie 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie), in der geänderten Fassung, zu erfüllen. Dieses Dokument bildet außerdem Schnittstellen zwischen dem Anwender (Käufer) von Kranen und dem Konstrukteur sowie zwischen dem Konstrukteur und dem Bauteilhersteller, um eine Grundlage für die Auswahl von Kranen und Bauteilen zu schaffen.

Dieses Dokument ist eine Typ-C-Norm, wie in EN ISO 12100 angegeben.

Auf die betreffenden Maschinen und die behandelten Gefährdungen wird im Anwendungsbereich dieses Dokuments hingewiesen.

Für Maschinen, die nach den Festlegungen dieser Typ-C-Norm konzipiert und gebaut worden sind, gilt: Wenn die Festlegungen in dieser Typ-C-Norm von den Festlegungen in Typ-A- oder Typ-B-Normen abweichen, haben die Festlegungen dieser Typ-C-Norm Vorrang gegenüber den Festlegungen der anderen Normen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Lasteinwirkungen und Lastkombinationen für die Berechnung der Lastwirkungen als Grundlage für den Sicherheitsnachweis eines Krans und dessen Hauptbauteile fest. Es wird zusammen mit den anderen allgemeinen Teilen der Normenreihe EN 13001 angewendet; siehe Anhang E. Zusammen spezifizieren sie die Bedingungen und die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung zur Vermeidung von mechanischen Gefährdungen bei Kranen und bieten eine Methode der Überprüfung dieser Anforderungen.

ANMERKUNG Besondere Anforderungen für spezielle Krantypen sind in den zutreffenden Europäischen Produktnormen für den speziellen Krantyp angegeben; siehe Anhang E.

Im Folgenden ist eine Auflistung von signifikanten Gefährdungssituationen und Gefährdungsereignissen gegeben, die Risiken für Personen während des üblichen Gebrauchs und der vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung (des Krans) zur Folge haben könnten. Abschnitt 4 dieses Dokument enthält Maßnahmen zur Verringerung oder Beseitigung der Risiken durch mechanisches Versagen infolge von:

- a) Starrkörperinstabilität des Krans oder seiner Teile (Kippen);
- b) Überschreitung der Festigkeitsgrenzwerte (Fließgrenze, Bruch-, Ermüdungsfestigkeit);
- c) elastische Instabilität des Krans oder seiner Teile oder Komponenten (Knicken, Ausbeulen).

Die Gefährdungen, die in diesem Dokument behandelt werden, sind in Anhang G aufgeführt.

Dieses Dokument gilt nicht für Krane, die vor dem Datum der Veröffentlichung dieses Dokuments als Europäische Norm hergestellt wurden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 13001-1:2015, *Krane — Konstruktion allgemein — Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen*

EN 13586:2004+A1:2008, *Krane — Zugang*

ISO 4306-1:2007, *Cranes — Vocabulary — Part 1: General*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 4306-1:2007, Abschnitt 6, und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp/ui>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1.1

Hublast

Summe der am Kran angehängten Massen, die als die Summe aus Nutzlast, losen und festen Lastaufnahmemitteln und dem angehängten Teil des Tragmittels gilt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die „Hublast“ (en: hoist load) entspricht der „Bruttolast“ (en: gross load), die in ISO 4306-1:2007 definiert ist.

3.1.2

Einzelfehler-Sicherheitssystem

krafttragende Anordnung verschiedener Bauteile, die so angeordnet sind, dass bei Ausfall eines einzelnen Bauteils in der Anordnung die krafttragende Fähigkeit nicht verloren geht

3.1.3

Schiff

schwimmende Konstruktion, auf welcher der Kran montiert ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die vorstehende Definition beschränkt sich auf Schiffe, die in den Anwendungsbereich der Richtlinie 2016/1629/EU (Binnenschiffe) fallen.

3.2 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die in Tabelle 1 angegebenen Symbole und Abkürzungen.

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
A1 bis A4	Lastkombinationen aus regelmäßigen Lasten
A	Charakteristische Fläche eines Kranbauteils
A_g	Projektion der Hublast auf eine Ebene senkrecht zur Richtung der Windgeschwindigkeit
A_c	Fläche, die von der Begrenzung eines Fachwerkelements in der Ebene seiner charakteristischen Höhe d umschlossen wird
A_j	Fläche eines einzelnen Kranbauteils, projiziert auf die Ebene der charakteristischen Höhe d
b_h	Schienenkopfbreite
b	Charakteristische Breite eines Kranbauteils
B1 bis B5	Lastkombinationen aus regelmäßigen und nicht regelmäßigen Lasten
c	Federkonstante
c_o, c_a, c_{oy}, c_{oz}	Aerodynamische Koeffizienten (Formbeiwerte)
C1 bis C11	Lastkombinationen aus regelmäßigen, nicht regelmäßigen und außergewöhnlichen Lasten
CFF, CFM	Gekoppelte Radpaare des Systems F/F oder F/M
d	Charakteristische Abmessung eines Kranbauteils
d_i, d_n	Abstand zwischen Radpaar i oder n und den Führungsmitteln
eG	Breite der Lücke einer Schiene

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
f	Reibungskoeffizient
f_i	Lasten
f_q	Eigenfrequenz
f_{rec}	Term bei der Berechnung $v(z)$
F	Kraft, allgemein
F, F_y, F_z	Windlasten
$\hat{F}$	Maximale Pufferkraft
F_i, F_f	Anfangs-(i)- und End-(f)-Antriebskraft
ΔF	Veränderung der Antriebskraft
$F_{x1i}, F_{x2i}, F_{y1i}, F_{y2i}$	Tangentiale Radkräfte
F_y	Führungskraft
F_{z1i}, F_{z2i}	Vertikale Radkräfte
F/F, F/M	Abkürzungen für fest/fest und fest/lose zur Beschreibung der Möglichkeit von Querbewegungen der Kranräder
g	Fallbeschleunigung
h	Abstand zwischen dem momentanen Gleitpol und den Führungsmitteln eines schräglaufenden Krans
$h(t)$	Zeitabhängige Unebenheitsfunktion
h_s	Höhe der Stufe einer Schiene
H_1, H_2	Seitliche Radkräfte, verursacht durch Antriebskräfte, die auf einen Kran oder eine Laufkatze mit asymmetrischer Massenverteilung wirken
HC1 bis HC4	Steifigkeitsklassen
HD1 bis HD5	Klassen der Hubwerkstypen und deren Betriebsweise
i	Laufende Nummer
IFF, IFM	Unabhängige Radpaare des Systems F/F oder F/M
j	Laufende Nummer
k	Laufende Nummer
K	Widerstandsbeiwert des Geländes
K_1, K_2	Rauigkeitsbeiwerte
l	Spannweite eines Krans
l_a	Aerodynamische Länge eines Kranbauteils
l_o	Geometrische Länge eines Kranbauteils
m_H	Masse der Hublast
m	Masse des Krans und der Hublast
Δm_H	Abgesetzter oder losgelassener Teil der Hublast

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
n	Anzahl der Räder auf jeder Seite der Kranbahn
n_m	Exponent bei der Berechnung des Schirmfaktors η
p	Anzahl der Paare mit gekoppelten Rädern
q	Äquivalenter statischer Winddruck
$\bar{q}$	Mittlerer Winddruck
$q(z)$	Äquivalenter statischer Winddruck bei Sturm
$q(3)$	Winddruck bei $v(3)$
r	Radradius
R	Wiederholungsintervall (Auftretenswahrscheinlichkeit) von Wind außer Betrieb
Re	Reynoldszahl
s_g	Spiel der Führung
s_y	Querschlupf an den Führungsmitteln
s_{yi}	Querschlupf am Radpaar i
S	Lasteinwirkung
$\hat{S}$	Maximale Lasteinwirkung
S_i, S_f	Anfangs- und End-Lasteinwirkung
ΔS	Veränderung der Lasteinwirkung
t	Zeit
u	Pufferhub
$\hat{u}$	Maximaler Pufferhub
v	Fahrgeschwindigkeit des Krans
$\bar{v}$	Konstante mittlere Windgeschwindigkeit
$\bar{v}^*$	Konstante mittlere Windgeschwindigkeit, falls die Windrichtung nicht senkrecht zur Längsachse des jeweiligen Kranbauteils ist
$v(z)$	Äquivalente statische Windgeschwindigkeit für Sturm
$v(z)^*$	Äquivalente statische Windgeschwindigkeit für Sturm, falls die Windrichtung nicht senkrecht zur Längsachse des jeweiligen Kranbauteils ist
$v(3)$	Böenwindgeschwindigkeit, gemittelt über eine Zeitspanne von 3 Sekunden
v_g	Böen-Amplitude über 3 Sekunden
v_h	Hubgeschwindigkeit
$v_{h,max}$	Maximale konstante Hubgeschwindigkeit
$v_{h,CS}$	Konstante Hub-Kriechgeschwindigkeit
$v_m(z)$	Mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z über 10 Minuten für Sturm
v_{ref}	Bezugswindgeschwindigkeit für Sturm

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
w_b	Radstand (Abstand zwischen den Führungsmitteln)
z	Höhe über dem Boden
$z(t)$	Zeitabhängige Koordinate des Massenmittelpunktes
α_r	Relative aerodynamische Länge
α_w	Winkel zwischen der Richtung der Windgeschwindigkeit $\bar{v}$ oder $v(z)$ und der Längsachse des jeweiligen Kranbauteils
α	Schräglaufwinkel
α_g	Teil des Schräglaufwinkels α aufgrund des Spiels der Führung
α_G, α_s	Terme bei der Berechnung von ϕ_4
α_t	Teil des Schräglaufwinkels α aufgrund von Toleranzen
α_w	Teil des Schräglaufwinkels α aufgrund von Verschleiß
β	Winkel zwischen horizontaler Ebene und nicht-horizontaler Windrichtung
β_2	Term bei der Berechnung von ϕ_2
β_3	Term bei der Berechnung von ϕ_3
γ_f	Globaler Sicherheitsbeiwert
γ_m	Widerstandsbeiwert
γ_n	Risikobeiwert
γ_p	Teilsicherheitsbeiwert
γ_s	Zusätzlicher Sicherheitsbeiwert für die Standsicherheit
δ	Term bei der Berechnung von ϕ_1
ε_S	Konventioneller Anfahrsbeiwert
ε_M	Konventioneller Beharrungsbeiwert
η	Abschattungsfaktor
η_w	Faktor für die verbleibende Hublast im Zustand außer Betrieb
λ	Effektive Streckung
μ, μ'	Anteile der Spannweite l
F	Term bei der Berechnung der Führungskraft F_y
F_{1i}, F_{2i}	Terme bei der Berechnung von F_{y1i} und F_{y2i}
ξ	Term bei der Berechnung von ϕ_7
ξ_{1i}, ξ_{2i}	Terme bei der Berechnung von F_{x1i} und F_{x2i}
$\xi_G(\alpha_G), \xi_s(\alpha_s)$	Kurvenfaktoren
ρ	Luftdichte
φ	Dichteverhältnis (Völligkeitsgrad)
ϕ_i	Dynamik-Beiwerte
ϕ_1	Dynamik-Beiwert für die Masse des Krans

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
ϕ_2	Dynamik-Beiwert der Hublast beim Anheben einer unbehinderten Last vom Boden während des regulären Betriebs
ϕ_{2C}	Dynamik-Beiwert der Hublast beim Anheben einer unbehinderten Last vom Boden unter außergewöhnlichen Bedingungen
$\phi_{2,min}$	Term bei der Berechnung von ϕ_2
ϕ_3	Dynamik-Beiwert für Trägheits- und Gravitationseinwirkungen beim plötzlichen Loslassen eines Teils der Hublast
ϕ_4	Dynamik-Beiwert für Lasten aus Fahren über Unebenheiten
ϕ_5	Dynamik-Beiwert für Lasten aus Beschleunigung aller Kranantriebe
ϕ_6	Dynamik-Beiwert für Prüflasten
ϕ_7	Dynamik-Beiwert für Lasten aus Pufferkräften
ϕ_8	Böen-Reaktionswert
ϕ_L, ϕ_{ML}	Beiwerte für die Berechnung der Kraft bei aktiviertem Last- oder Momentbegrenzer
ψ	Abminderungsfaktor bei der Berechnung von aerodynamischen Koeffizienten (Formbeiwerten)

4 Sicherheitsanforderungen und/oder Schutzmaßnahmen

4.1 Allgemeines

Lasten und Lastkombinationen, wie in 4.2 und 4.3 angegeben, dürfen nur für spezifische Konfigurationen und Betriebsbedingungen des Krans als relevant gelten.

Die Lasteinwirkungen müssen für den Nachweis gegen Versagen durch unkontrollierte Bewegung, durch Nachgeben, durch elastische Instabilität und, wo zutreffend, durch Ermüdung berücksichtigt werden.

4.2 Lasten

4.2.1 Allgemeines

4.2.1.1 Einleitung

Die auf einen Kran wirkenden Lasten werden, wie in 4.2.1.2, 4.2.1.3 und 4.2.1.4 angegeben, in regelmäßige, nicht regelmäßige und außergewöhnliche Lasten eingeteilt. Kombinationen von regelmäßigen, nicht regelmäßigen und außergewöhnlichen Lasten in die Lastkombinationen A, B und C sind in 4.3 angegeben.

Interne Lasten in Mechanismen sind in 4.2.1.5 aufgeführt und sollten, soweit maßgeblich, berücksichtigt werden.

4.2.1.2 Regelmäßige Lasten

Regelmäßige Lasten sind Lasten, die bei üblichem Betrieb häufig auftreten.

- a) Auswirkungen aus Anheben und Gravitation, auf die Masse des Krans wirkend;
- b) Trägheit und Gravitation, vertikal auf die Hublast wirkend;
- c) Lasten aus Fahren über Unebenheiten;
- d) Lasten aus Beschleunigung aller Kranantriebe (Massenkräfte);
- e) Lasten aus Weggrößen;
- f) Lasten aus Neigungen und Bewegungen des Schiffs.

4.2.1.3 Nicht regelmäßige Lasten

- a) Lasten aus Wind in Betrieb;
- b) Schnee- und Eislasten;
- c) Lasten aus Wärmewirkungen;
- d) Lasten aus Schräglauf.

Nicht regelmäßige Lasten treten selten auf. Sie werden bei der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit in der Regel vernachlässigt.

4.2.1.4 Außergewöhnliche Lasten

- a) Lasten aus dem Anheben einer Last vom Boden unter außergewöhnlichen Verhältnissen;
- b) Lasten aus Wind außer Betrieb;
- c) Prüflasten;
- d) Lasten aus Pufferstoß;
- e) Lasten aus Kippkräften;
- f) Lasten aus Not-Aus;
- g) Lasten aus dynamischer Abschaltung durch die Hubkraftbegrenzungseinrichtung;
- h) Lasten aus dynamischer Abschaltung durch die Hubmomentbegrenzungseinrichtung;
- i) Lasten aus unbeabsichtigtem Verlust der Hublast;
- j) Lasten aus Triebwerks- oder Komponentenversagen;
- k) Lasten aus externer Anregung des Krantragwerks;
- l) Lasten aus Montage und Demontage;
- m) Lasten aus Neigungen und Bewegungen des Schiffs, während sich der Kran in Verstauposition befindet.

Außergewöhnliche Lasten treten auch selten auf und werden in der Regel ebenfalls nicht zur Berechnung der Ermüdungsfestigkeit herangezogen.

4.2.1.5 Interne Lasten in Mechanismen

Lastwirkungen in Antriebsmechanismen müssen sowohl von den globalen, externen Lasteinwirkungen auf den Kran als auch von den internen Lasten in Mechanismen hergeleitet werden. Letztgenannte Lasten hängen einerseits von der Anordnung des Mechanismus und andererseits von den physikalischen Größen ab, welche die internen Lastwirkungen bestimmen, wie beispielsweise:

- Bremsmomente;
- Trägheit von sich drehenden Komponenten;
- Reibung an den Antriebskontakten.

Interne Lastwirkungen in Mechanismen infolge außergewöhnlicher Lasten nach 4.2.4 müssen besonders berücksichtigt werden, wie beispielsweise:

- 4.2.4.4, Pufferstoß;
- 4.2.4.7, Not-Aus;
- 4.2.4.8, dynamisches Abschalten durch Hubkraftbegrenzer;
- 4.2.4.9, dynamisches Abschalten durch den Hubmomentbegrenzer;
- 4.2.4.11, vorhersehbares Versagen von redundanten Mechanismen.

Sich drehende Bauteile, die durch diese internen Belastungen Ermüdung erfahren könnten, sollten besonders berücksichtigt werden.

4.2.2 Regelmäßige Lasten

4.2.2.1 Masse des Krans

Beim Anheben der Last vom Boden oder beim Absetzen der Last oder von Teilen davon unterliegt das Krantragwerk dem Einfluss einer Schwingungsanregung, die als Lasteinwirkung berücksichtigt werden muss. Dazu muss die Gewichtskraft der Masse des Krans oder der Kranteile mit dem Beiwert ϕ_1 multipliziert werden. In Abhängigkeit von der Gravitationseinwirkung der Masse und der jeweiligen Lastkombination wird der Beiwert ϕ_1 entweder mithilfe von Gleichung (1) oder Gleichung (2) berechnet. Für Definitionen von ungünstigen und günstigen Lasteinwirkungen siehe 4.3.3.

Ist die Gravitationseinwirkung der Masse ungünstig, dann gilt Gleichung (1):

$$\phi_1 = 1 + \delta \text{ wobei } 0 \leq \delta \leq 0,1 \quad (1)$$

Ist die Gravitationseinwirkung der Masse günstig, dann gilt Gleichung (2):

$$\phi_1 = 1 - \delta \text{ wobei } 0 \leq \delta \leq 0,05 \quad (2)$$

Für Gleichung (1) und Gleichung (2) müssen die Höchstwerte für δ verwendet werden, es sei denn, andere Werte sind für den jeweiligen Krantyp durch Messungen oder Berechnungen begründet oder aus der jeweilige Europäischen Norm ermittelt.

Die Masse des Krans umfasst jene Komponenten, die sich während des Betriebs ständig am Kran befinden, abgesehen von der Lademasse selbst. Für einige Krane bzw. Anwendungen ist es notwendig, die Masse zu erhöhen, um Schüttgutansammlungen zu berücksichtigen.

4.2.2.2 Anheben einer unbehinderten Last vom Boden

4.2.2.2.1 Allgemeines

Beim Anheben einer unbehinderten Last vom Boden unterliegt der Kran den dynamischen Beanspruchungen bei Übergang der Last vom Boden auf den Kran. Dabei müssen diese dynamischen Beanspruchungen durch Multiplikation der Gewichtskraft infolge der Masse der Hublast m_H mit dem Beiwert ϕ_2 berücksichtigt werden, siehe Bild 1.

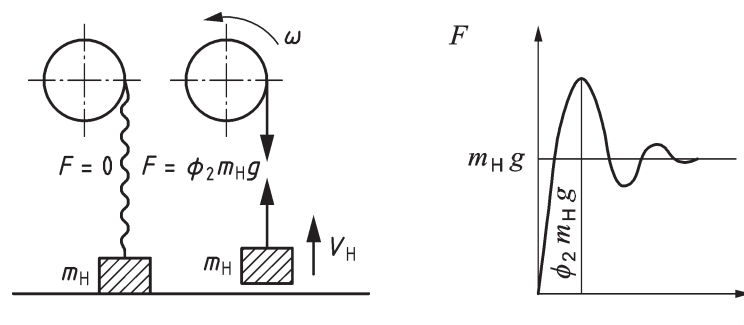


Bild 1 — Dynamische Beanspruchungen beim Anheben einer Last vom Boden

Die Masse der Hublast enthält die Massen der Nutzlast, der Lastaufnahmemittel und den hängenden Anteil der Hubseile oder -ketten.

Die Werte für ϕ_2 und ϕ_{2C} müssen entweder mithilfe der Gleichung (3) berechnet werden, wobei die festgelegten Steifigkeitsklassen und die Klassen des Hubwerkstyps angewendet werden, oder in einem Versuch oder mithilfe dynamischer Analysen ermittelt werden. Werden die Steifigkeitsklassen und die Klassen des Hubwerkstyps nicht angewendet, müssen die wahren Eigenschaften des Antriebssystems und die elastischen Eigenschaften des gesamten lasttragenden Systems berücksichtigt werden.

4.2.2.2.2 Anwendung der Steifigkeitsklassen und der Klassen des Hubwerkstyps

Für die Anwendung dieses Dokuments können Krane in die Steifigkeitsklassen von HC1 bis HC4 entsprechend den elastischen Eigenschaften des Krans und dessen Tragwerk eingeordnet werden. Die Steifigkeitsklassen von Tabelle 2 müssen anhand der charakteristischen vertikalen Lastverlagerung δ ausgewählt werden.

Der Dynamik-Beiwert ϕ_2 (bzw. ϕ_{2C} für die Lastkombination C1, siehe 4.2.4.1) wird mit Gleichung (3) ermittelt:

$$\phi_2 = \phi_{2,\min} + \beta_2 \times v_h \quad (3)$$

Dabei ist

- β_2 der Beiwert, abhängig von der Steifigkeitsklasse des Krans nach Tabelle 2,
- v_h die charakteristische Hubgeschwindigkeit der Last, in [m/s], die sich für die Berechnung von ϕ_2 und ϕ_{2C} unterscheidet, wie in Tabelle 3 angegeben,
- $\phi_{2,\min}$ der Mindestwert von ϕ_2 und ϕ_{2C} nach Tabelle 4.

Tabelle 2 — Steifigkeitsklassen

Steifigkeitsklasse	Charakteristische vertikale Lastverlagerung δ	Beiwert β_2 [s/m]
HC1	$0,8 \text{ m} \leq \delta$	0,17
HC2	$0,3 \text{ m} \leq \delta < 0,8 \text{ m}$	0,34
HC3	$0,15 \text{ m} \leq \delta < 0,3 \text{ m}$	0,51
HC4	$\delta < 0,15 \text{ m}$	0,68
Die Steifigkeitsklassen wurden in früheren Ausgaben dieses Dokuments als Hubklassen bezeichnet.		

Die charakteristische vertikale Lastverlagerung δ muss durch Messung ermittelt werden oder muss aus der Elastizität des Krantragwerks, der Seilanlage und der Kranlager mithilfe des Höchstwerts der Hublast berechnet werden, wobei die Teilsicherheitsbeiwerte und die Dynamik-Beiwerte gleich 1,0 anzusetzen sind. Produktnormen für Krane können spezifische Hinweise hinsichtlich der Auswahl der Steifigkeitsklassen geben.

Wenn die charakteristische vertikale Lastverlagerung δ von den unterschiedlichen Krankonfigurationen abhängt, darf der Höchstwert von δ für die Auswahl der Steifigkeitsklasse verwendet werden.

Für die Anwendung dieses Dokuments müssen die Hubwerksantriebe in die Klassen HD1 bis HD5 in Abhängigkeit von den Steuerungseigenschaften eingeteilt werden, da die Masse der Last vom Boden an den Kran übergeben wird. Die Klassen der Hubwerkstypen sind wie folgt festgelegt:

HD1: Kein Feinhub vorhanden oder Beginn des Hubvorgangs (Start des Hubwerksantriebes) ohne Feinhub möglich;

HD2: Beginn des Hubvorgangs nur mit Feinhub möglich, wobei eine vorgegebene Minstdauer erforderlich ist;

HD3: Beibehaltung des Feinhubes durch die Steuerung des Hubwerksantriebes, bis die Last vom Boden angehoben ist;

HD4: Stufenlose Steuerung des Hubwerksantriebes mit stetigem Hochlaufen der Geschwindigkeit;

HD5: Die stufenlose Hubwerksantriebssteuerung stellt automatisch sicher, dass der Dynamik-Beiwert ϕ_2 den Mindestbeiwert $\phi_{2,\min}$ nicht überschreitet.

Siehe Anhang B für eine Erläuterung der Klassen der Hubwerkstypen.

Die für die Lastkombinationen A, B und C verwendete charakteristische Hubgeschwindigkeit v_h ist in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 — Charakteristische Hubgeschwindigkeiten v_h zur Berechnung von ϕ_2 und ϕ_{2C}

Last- kombination (siehe 4.3.6)	Klasse des Hubwerkstyps					Mit Gleichung (3) berechneter Beiwert
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5	
A1, B1	$v_{h,max}$	$v_{h,CS}$	$v_{h,CS}$	$0,5 \times v_{h,max}$	$v_h = 0$	ϕ_2
C1	—	$v_{h,max}$	—	$v_{h,max}$	$0,5 \times v_{h,max}$	ϕ_{2C}
Legende $v_{h,max}$ für Lastkombinationen A1 und B1: die maximale stetige Hubgeschwindigkeit der Last; $v_{h,max}$ für Lastkombination C1 (siehe 4.2.4.1): die maximale Hubgeschwindigkeit, die sich aus allen Antrieben ergibt (z. B. Schwenk- und Hubbewegung), die zur Hubgeschwindigkeit der Last beitragen; $v_{h,CS}$ stetige Feinhubgeschwindigkeit.						

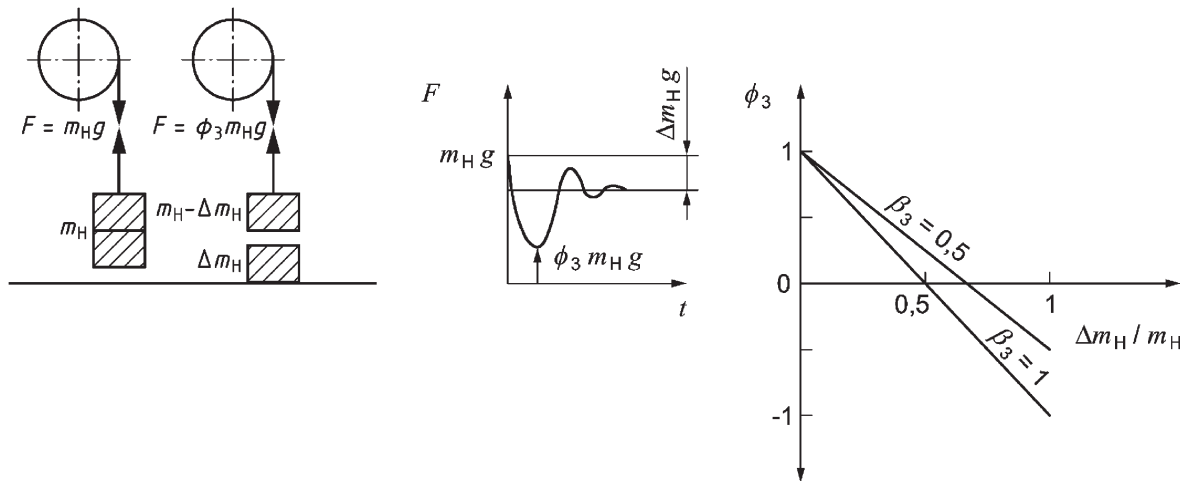
Der Mindestwert $\phi_{2,min}$ hängt von der Kombination der Klassen HC und HD ab und muss aus Tabelle 4 ausgewählt werden.

Tabelle 4 — Auswahl von $\phi_{2,min}$

Steifigkeitsklasse	Klasse des Hubwerkstyps				
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5
HC1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
HC2	1,1	1,1	1,05	1,1	1,05
HC3	1,15	1,15	1,05	1,15	1,05
HC4	1,2	1,2	1,05	1,2	1,05

4.2.2.3 Abwurf eines Teils der Hublast

Bei Kranen, die im Rahmen eines üblichen Arbeitsvorgangs einen Teil der Hublast abwerfen oder loslassen, kann die höchste dynamische Einwirkung auf den Kran durch Multiplikation der Hublast mit dem Beiwert ϕ_3 (siehe Bild 2) berücksichtigt werden. Ein negativer Wert von ϕ_3 gibt eine hebende Kraft des Krans an.



Legende

F Kraft
 t Zeit

Bild 2 — Beiwert ϕ_3

Der Beiwert ϕ_3 muss wie folgt gewählt werden:

$$\phi_3 = 1 - \frac{\Delta m_H}{m_H} (1 + \beta_3) \quad (4)$$

Dabei ist

Δm_H der abgeworfene Teil der Hublast;

m_H die Masse der Hublast;

$\beta_3 = 0,5$ bei Kranen mit Greifern oder ähnlichen Vorrichtungen für langsamen Abwurf;

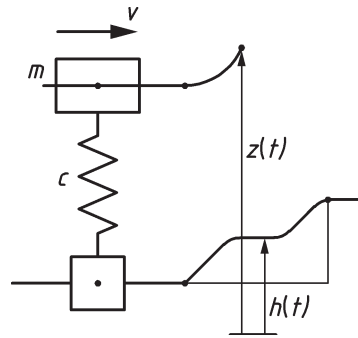
$\beta_3 = 1,0$ bei Kranen mit Magneten oder ähnlichen Vorrichtungen für schnellen Abwurf.

4.2.2.4 Lasten aus Fahren über Unebenheiten

Bei der Berechnung der dynamischen Einwirkungen auf den Kran durch Fahren mit oder ohne Last auf Fahrbahnen oder im Gelände oder auf Schienen müssen die hervorgerufenen Beschleunigungen durch Multiplikation der Gewichtskräfte aufgrund der Massen von Kran und Hublast mit dem Beiwert ϕ_4 berücksichtigt werden.

Die dynamischen Einwirkungen müssen nach einem der folgenden Verfahren bestimmt werden:

- Der Beiwert ϕ_4 wird durch Anwendung eines einfachen Einmassen-Feder-Modells für den Kran, wie nachstehend dargestellt, berechnet. Die Anwendung dieses einfachen Modells ist auf Krane beschränkt, deren tatsächliches dynamisches Verhalten dem des Modells entspricht. Falls mehr als eine Eigenschwingform eine maßgebende Antwort hervorruft und/oder eine Drehbewegung auftritt, darf der Konstrukteur zur Abschätzung der dynamischen Lasten ein für die jeweiligen Umstände geeignetes Modell verwenden.
- Die dynamischen Einwirkungen werden durch Versuche oder durch Berechnung bestimmt, wobei ein geeignetes Modell für den Kran oder die Laufkatze und die Fahrbahnoberfläche oder die Kranbahn zu verwenden ist. Die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche (Lücken, Stufen) muss festgelegt werden.
- Ein üblicher Wert für den Beiwert ϕ_4 kann einer Europäischen Norm für den speziellen Krantypen mit definierten Anforderungen der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche entnommen werden.



Legende

- m Masse des Krans und der Hublast
- v konstante horizontale Fahrgeschwindigkeit des Krans
- c Federkonstante, die die Steifigkeit des Krans in der vertikalen Richtung darstellt
- $z(t)$ Koordinate des Massenmittelpunktes
- $h(t)$ Unebenheitsfunktion, die die Stufe oder Lücke der Schiene beschreibt

Bild 3 — Einmassen-Modell eines Krans zur Bestimmung des Beiwerts ϕ_4

Der Beiwert ϕ_4 wird folgendermaßen berechnet:

$$\phi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{v^2}{gr} \xi_s \text{ beim Fahren über eine Stufe (siehe Bild 4a)} \quad (5)$$

$$\phi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{v^2}{gr} \xi_G \text{ beim Fahren über eine Lücke (siehe Bild 4b)} \quad (6)$$

Dabei ist

- v die konstante horizontale Fahrgeschwindigkeit des Krans;
- r der Radius des Laufrades;
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Fallbeschleunigung.
- $\xi_s(\alpha_s), \xi_G(\alpha_G)$ Kurvenfaktoren, die für den Zeitabschnitt, nachdem das Rad die Unebenheit passiert hat, maximal werden; sie können für $\alpha_s < 1,3$ und $\alpha_G < 1,3$ mit den in Bild 5 angegebenen Diagrammen bestimmt werden.

Dabei ist

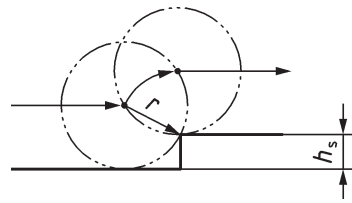
$$\alpha_s = \frac{2f_q h_s}{v} \sqrt{\frac{2r}{h_s}} \text{ (siehe Bild 5a);}$$

$$\alpha_G = \frac{f_q e_G}{v} \text{ (siehe Bild 5b);}$$

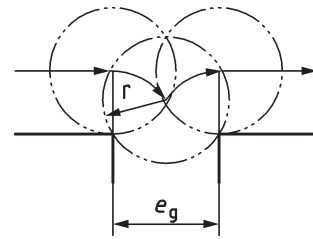
h_s die Höhe der Stufe (siehe Bild 4);

e_G die Breite der Lücke (siehe Bild 4), Lücken mit einem ebenen (Draufsicht) Winkel von 60° oder kleiner in Bezug auf den Fahrweg (z. B. Schienenstoßfugen) können vernachlässigt werden;

$f_q = \frac{\sqrt{c}}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{c}}$ die Eigenfrequenz des Einmassen-Modells des Krans (siehe Bild 3); falls sie unbekannt ist, kann sie mit 10 Hz angenommen werden.

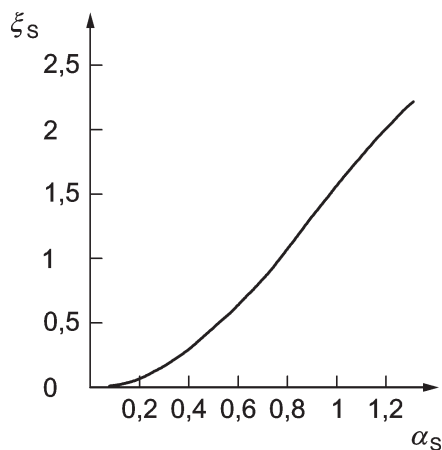


a) Fahren über eine Stufe

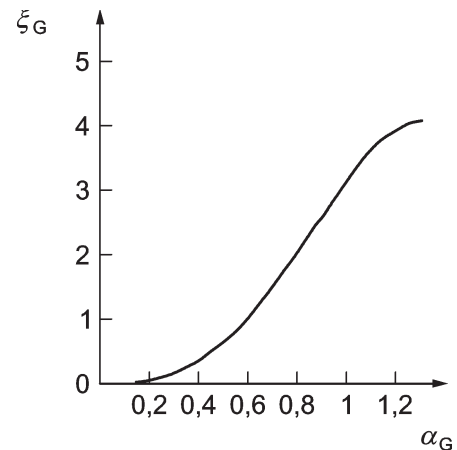


b) Fahren über eine Lücke

Bild 4 — Stufe und Lücke



a) Fahren über eine Stufe



b) Fahren über eine Lücke

Die Werte der Faktoren werden analytisch wie folgt ermittelt:

Für $\alpha_S \neq 1$ und $\alpha_G \neq 1$

$$\xi_S = \frac{\alpha_S^2}{|1 - \alpha_S^2|} \sqrt{2 + 2\cos(\pi\alpha_S)} \quad \text{oder} \quad \xi_G = \frac{\alpha_G^2}{|1 - \alpha_G^2|} \sqrt{2 - 2\cos(2\pi\alpha_G)}$$

Für $\alpha_S = 1$; $\xi_S = \frac{\pi}{2}$

Für $\alpha_G = 1$; $\xi_G = \pi$

Bild 5 — Kurvenbeiwerte $\xi_S(\alpha_S)$ und $\xi_G(\alpha_G)$

4.2.2.5 Lasten aus der Beschleunigung aller Kranantriebe

Lasten auf einen Kran durch Beschleunigungen oder Verzögerungen aufgrund von Antriebskräften müssen berechnet werden. Ein starrkörperkinetisches Modell kann angewendet werden. Zu diesem Zweck ist die Hublast an der Spitze des Auslegers oder direkt unterhalb der Laufkatze anzunehmen.

Die Lasteinwirkung $\hat{S}$ muss auf die den Antriebskräften ausgesetzten Bauteile und gegebenenfalls auch auf den Kran und die Hublast angewendet werden. Da eine Starrkörperanalyse elastische Beanspruchungen nicht direkt wiedergibt, muss die Lasteinwirkung $\hat{S}$ unter Verwendung eines Beiwertes ϕ_5 wie folgt berechnet werden (siehe Bild 6):

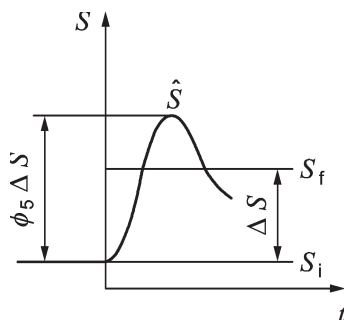
$$\hat{S} = S_i + \phi_5 \Delta S \quad (7)$$

Dabei ist

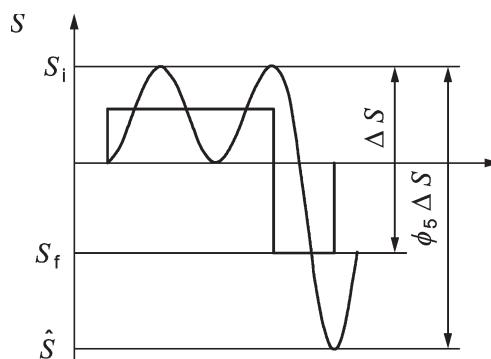
$\Delta S = S_f - S_i$ die Änderung der Lasteinwirkung aufgrund der Änderung der Antriebskraft $\Delta F = F_f - F_i$;

S_i, S_f die Anfangs-(i)- und End-(f)-Lasteinwirkungen aufgrund von F_i und F_f ;

F_i, F_f die Anfangs-(i)- und End-(f)-Antriebskräfte.



a) Für die Änderung der Antriebskräfte aus der Beharrung heraus



b) Für den Fall des Positionierens

Bild 6 — Beiwert ϕ_5

Folgende Werte von ϕ_5 müssen angewendet werden:

- | | |
|--------------------------|---|
| $\phi_5 = 1$ | bei Fliehkräften; |
| $1 \leq \phi_5 \leq 1,5$ | bei Antrieben ohne Spiel oder in Fällen, bei denen bestehendes Spiel die dynamischen Kräfte nicht beeinflusst (z. B. typisch für Getriebe) und mit stetiger Änderung der Kräfte; |
| $1,5 \leq \phi_5 \leq 2$ | bei Antrieben ohne Spiel oder in Fällen, bei denen bestehendes Spiel die dynamischen Kräfte nicht beeinflusst (z. B. typisch für Getriebe) und mit plötzlich erfolgter Änderung der Kräfte; |
| $\phi_5 = 3$ | bei Antrieben mit beträchtlichem Spiel (z. B. offenes Getriebe), falls nicht präziser aus einer dynamischen Analyse mit Hilfe eines Feder-Masse-Modells berechnet. |

Sofern eine übertragbare Kraft durch Reibung oder durch die Art des Antriebsmechanismus begrenzt wird, müssen die begrenzte Kraft und ein diesem System entsprechender Beiwert ϕ_5 verwendet werden.

Antriebskräfte F , die mit einer asymmetrischen Massenverteilung auf einen Kran oder eine Laufkatze wirken, rufen Horizontalkräfte H_1 und H_2 hervor, wie in Bild 7 dargestellt. Diese müssen als regelmäßige Lasten berücksichtigt werden, die auf Führungsmittel in den Eckpunkten des Krans wirken. Wenn eine Führungsrolle vorhanden ist, muss die horizontale Gesamtkraft im Eckpunkt auf sie aufgebracht werden. Erfolgt die Führung durch Spurkränze an den Laufrädern, können die Horizontalkräfte zwischen den Rädern in einem Eckpunkt wie folgt verteilt sein:

- | | |
|--|--|
| — 1 oder 2 Räder je Eckpunkt: | Aufbringen der Kraft auf das äußerste Rad |
| — 3 oder 4 Räder je Eckpunkt:
Räder | gleichmäßiges Verteilen der Kraft auf die beiden äußersten Räder |
| — Mehr als 4 Räder je Eckpunkt:
Räder | gleichmäßiges Verteilen der Kraft auf die drei äußersten Räder |