



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Diplomarbeit

Entwicklung eines Softwaretools zur Berechnung von Seiltrieben für Brücken- und Portalkrane nach DIN EN 13001

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs, eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Stefan KNOBLOCH, BSc

Matr.Nr.: 01125846

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Georg Kartnig**

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

Wien, 25. November 2020

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, 25. November 2020

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	6
1.2	Aufbau und inhaltliche Beschreibung der Diplomarbeit	6
2	Grundlagen	8
2.1	Begriffsdefinitionen	8
2.2	Auslegung und Festigkeitsnachweis von Seiltrieben für Brücken- und Portalkrane	11
2.2.1	Vorgehensweise nach DIN 15020.....	12
2.2.2	Vorgehensweise nach DIN EN 13001.....	16
2.2.2.1	statischer Festigkeitsnachweis	20
2.2.2.2	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	25
3	Entwicklung des Softwaretools	31
3.1	Strukturierung der Rechenapplikation	31
3.2	Funktionsweise der Rechenapplikation	32
4	Beispielhafte Demonstration des Softwaretools anhand eines Rechenbeispiels	35
4.1	Erklärungen und Vorgehensweise zum Rechenbeispiel.....	35
4.2	Angaben zum Rechenbeispiel	36
4.3	Berechnungen nach DIN 15020 (Dimensionierung)	44
4.4	Berechnungen nach DIN EN 13001 (Festigkeitsnachweis)	54
4.4.1	statischer Festigkeitsnachweis.....	55
4.4.2	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit.....	66
4.5	Ergebnisinterpretation	74
4.5.1	Ergebnisse des Rechenbeispiels für DIN 15020 und DIN EN 13001....	74
4.5.2	Verifikation der Ergebnisse	76
5	Fazit	80
5.1	Zusammenfassung	80

5.2 Ausblick 81

6 Abbildungsverzeichnis 83

7 Tabellenverzeichnis 84

8 Verzeichnis der Screenshots aus Mathcad 85

9 Literaturverzeichnis 88

10 Anhang 89

Abstract

Due to the introduction of the new standard in crane construction, called DIN EN 13001, standard-compliant dimensioning of crane components has fundamentally changed. Especially smaller crane construction companies are struggling because of the increased scope and complexity compared to the previously valid standards.

For this reason, both a guideline for the correct application of the DIN EN 13001 and a calculation program are to be developed. The software tool is supposed to reduce the effort needed for dimensioning valid crane components by a lot. In this thesis only the components of reeving systems and wire ropes for overhead and portal cranes are considered. Furthermore, it shall be investigated whether the dimensions calculated according to DIN 15020 of those components are leading to a positive result of the proof of strength according to DIN EN 13001.

In order to fulfill these objectives, the dimensions of the reeving system and the wire rope of an exemplary overhead crane were calculated according to DIN 15020 and then checked for static and fatigue strength according to DIN EN 13001. From this, a step-by-step guide for the correct application of the DIN EN 13001 was derived and a software tool using Mathcad was developed. Its proper function should be confirmed afterwards by comparing the calculated results to the actual measured dimensions of a real overhead crane.

The results were showing that a standard-compliant dimensioning of reeving system components and wire ropes for overhead and portal cranes can be made by using an automatized calculation tool, which combines the previously and currently valid standards. Therefore, the amount of work involved in converting the procedures according to the new standard in crane construction can be significantly reduced.

Kurzfassung

Durch die Einführung der neuen Norm DIN EN 13001 im Kranbau muss die normgerechte Dimensionierung von Krankomponenten grundlegend abgeändert werden. Diese Umstellung stellt vor allem für kleinere Kranbauunternehmen aufgrund des erhöhten Umfangs und der zunehmenden Komplexität im Vergleich zu den bisher gültigen Normen eine große Herausforderung dar.

Daher soll sowohl ein Leitfaden für die korrekte Anwendung der DIN EN 13001 als auch ein Berechnungsprogramm entwickelt werden, mit dem der Arbeitsaufwand für die Dimensionierung von Krankomponenten mit ausreichender Festigkeit deutlich reduziert werden kann. In dieser Arbeit werden diese Zielsetzungen bezüglich der Komponenten des Seiltriebs und der Drahtseile für Brücken- und Portalkrane definiert. Weiters soll untersucht werden, ob die Seiltrieb-Dimensionierung nach DIN 15020 weiterhin genutzt werden kann, um Abmessungen für die auf ihre Festigkeit zu überprüfenden Krankomponenten zu erhalten.

Um diese Zielsetzungen zu erfüllen, wurde mittels eines Rechenbeispiels der Seiltrieb und das Drahtseil eines Brückenkrans nach DIN 15020 dimensioniert und anschließend nach DIN EN 13001 auf die statische Festigkeit und die Ermüdungsfestigkeit überprüft. Daraus wurde sowohl ein schrittweiser Leitfaden für die sachgemäße Anwendung der DIN EN 13001 als auch eine Berechnungsapplikation in Mathcad abgeleitet. Deren ordnungsgemäße Funktion konnte anschließend anhand einer Kontrollrechnung eines realen Brückenkrans bestätigt werden.

Die Resultate der Berechnungen zeigen, dass sich eine normgerechte Dimensionierung des Seiltriebs inklusive Drahtseil für Brücken- und Portalkrane durch die Anwendung einer automatisierten Berechnung, welche die DIN 15020 und die DIN EN 13001 miteinander kombiniert, durchführen lässt und dadurch der Arbeitsaufwand bezüglich der Umstellung auf die neue Norm im Kranbau deutlich reduziert werden kann.

1 Einleitung

Innerhalb der letzten vergangenen Jahre wurde die neue Kranberechnungsnorm DIN EN 13001 vom technischen Komitee TC 147 (Chairman und Sekretariat bei British Standard) erarbeitet. Diese soll zukünftig die bisherige Norm DIN 15018 bzw. DIN 15020 ersetzen und alle Bereiche von der Beschreibung der Betriebsweise des Kranes bis zu den Nachweisen vollständig abdecken.¹

Die Problematik, die jedoch mit dieser Umstellung auf die neue Norm einhergeht, soll in diesem einleitenden Kapitel genauer betrachtet werden. Außerdem muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass in dieser Arbeit nicht die gesamte Kranbaunorm, sondern ausschließlich Seiltriebe von Brücken- und Portalkranen behandelt werden.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der wesentlich höheren Komplexität und dem höheren Umfang der neuen Kranbaunorm bedarf es eines großen Arbeitsaufwands, um alle Arbeitsschritte ordnungsgemäß umzustellen. Vor allem für kleine und mittelgroße Unternehmen ist dieser Mehraufwand bedingt durch mangelnde zeitliche und personelle Kapazitäten oft nur schwer zu bewältigen.

Das langfristige Ziel es daher, mit Hilfe dieser Diplomarbeit und weiterer Arbeiten unter der Leitung von Herrn Dr. techn. Georg Kartnig, ein der DIN EN 13001 konformes automatisiertes Berechnungstool für den Kranbau zu entwickeln. In dieser Diplomarbeit soll im speziellen evaluiert werden, ob eine solche automatisierte Berechnung für die Seiltriebs-Dimensionierung von Brücken- und Portalkranen umsetzbar ist und sich die DIN 15020 weiterhin in Kombination mit der DIN EN 13001 für die Dimensionierung von Seiltrieben und Drahtseilen anwenden lässt. Weiters soll ein Leitfaden zur korrekten Anwendung der neuen Norm erstellt werden, der detailliert die einzelnen Schritte der Festigkeitsnachweise von Drahtseilen für Brücken- und Portalkrane nach DIN EN 13001 zeigt.

1.2 Aufbau und inhaltliche Beschreibung der Diplomarbeit

Zunächst werden nach einem kurzen Überblick über Kranarten und genereller Begriffsdefinitionen die alte und neue Norm genauer vorgestellt und schrittweise auf die Vorgehensweisen zur Berechnung von Seiltrieben und Drahtseilen für Brücken-

¹ vgl. Obretinow und Wagner, „Die Europäische Krannorm (DIN EN 13001) - Verbindung zu den Eurocodes und grundlegende Änderungen gegenüber DIN 15018“, 218.

und Portalkrane eingegangen. Anschließend soll ein konkretes Beispiel eines Brückenkran-Seiltriebs mit beiden Normen berechnet und die Ergebnisse anschließend analysiert werden. Die Berechnung laut aktueller sowie alter Norm erfolgt dabei mit Hilfe einer im praktischen Arbeitsteil dieser Arbeit erstellen Mathcad-Berechnung, die automatisiert die Dimensionierung nach DIN 15020 und anschließend die Festigkeitsnachweise laut DIN EN 13001 durchführen soll. Abschließend sollen die Ergebnisse der Berechnungsapplikation anhand eines realen Krans überprüft werden, um Aussagen über die richtige Funktionsweise des Berechnungsprogramms treffen zu können.

Anmerkung:

In dieser Arbeit wird detailliert und umfangreich auf urheberrechtlich geschützte Normen eingegangen. Um die Urheberrechte aufgrund unerlaubter Vervielfältigung nicht zu verletzen, mussten daher jegliche Textabschnitte, Gleichungen, Tabellen und Abbildungen, welche den Rahmen einer gesetzlich zulässigen Zitation überschreiten würden, in Form von Verweisen auf die jeweiligen Normen dargestellt werden. Dies wirkt sich leider negativ auf die Lesbarkeit dieser Arbeit aus.

2 Grundlagen

Um den Unterscheid zwischen den beiden Normen zu verdeutlichen und einen Überblick über die genormten Berechnungen von Seiltrieben zu geben, folgt eine Übersicht über die Vorgehensweisen nach DIN 15020 und DIN EN 13001.

2.1 Begriffsdefinitionen

Bevor näher auf die Abläufe der Kranbaunormen eingegangen wird, sollen zunächst grundlegende Begriffe genauer erläutert werden.

Brückenkran:

Der Brückenkran ist die am häufigsten anzutreffende Kranform für den Umschlag von Stückgütern in Werkstätten, Montagehallen und Lagern. Er trägt seinen Namen aufgrund des Brückenträgers, welcher sich auf den beiden Kopfträgern abstützt und dort durch seine Laufräder eindimensional horizontal beweglich gelagert ist. Durch den Einsatz von Laufkatzen auf dem Brückenträger entsteht eine rechteckige Arbeitsfläche des Krans. Je nach Anforderung werden die Brückenträger in Ein- oder Zweiträgerbauart ausgeführt.²

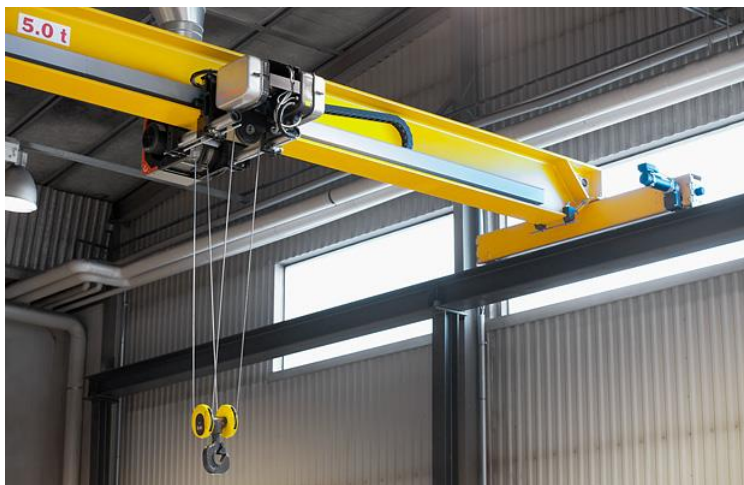


Abbildung 1: Profilträgerbrückenkran für bis zu 5 Tonnen Traglast³

Portalkran:

Im Gegensatz zu Brückenkränen stützt sich der Brückenträger eines Portalkrans auf Portalstützen ab, die sich auf ebenerdigen Kranbahnen bewegen können. Sie werden häufig im Freien für Anwendungen mit langen Fahrwegen und vergleichsweise

² vgl. Griemert und Römisch, *Fördertechnik*, 131–132.

³ <https://www.konecranes.com/de-de/fachlexikon/brueckenkran>.

geringem Brückenfahren eingesetzt. Die beiden bekanntesten Bauformen sind Bockkrane und Verladebrücken. Wird die Brücke einseitig auf einer hoch liegenden Kranbahn geführt, spricht man von Halbportalkranen.⁴



Abbildung 2: schienengebundener Einträger-Portalkran⁵

Lastaufnahmeeinrichtungen:

- **Tragmittel:**
Als Tragmittel werden alle zum Hebezeug gehörenden Komponenten zum Aufnehmen der Last bezeichnet. (z.B. Drahtseil, Lasthaken, usw.)
- **Lastaufnahmemittel:**
Einrichtungen, die zum Aufnehmen der Nutzlast dienen, jedoch nicht zum Hebezeug gehören und mit dem Tragmittel verbunden werden können, werden als Lastaufnahmemittel bezeichnet. (z.B. Lasthebemagnet, Blockzange, usw.)
- **Anschlagmittel:**
Um die Verbindung zwischen Tragmittel und Nutzlast herzustellen, können sogenannte Anschlagmittel verwendet werden. (z.B. Anschlagseil oder -kette)⁶

⁴ vgl. Griemert und Römisch, *Fördertechnik*, 147f.

⁵ https://img.directindustry.de/images_di/photo-m2.

⁶ vgl. DIN 15003:1970-2, Hebezeuge; Lastaufnahmeeinrichtungen, Lasten und Kräfte, Begriffe, 1.

Lasten und Kräfte:

- **Tragfähigkeit:**
Die Tragfähigkeit bezeichnet die maximale Masse, die betrieblich aufgenommen werden darf.
- **Nutzlast:**
Als Nutzlast wird die Differenz zwischen der Tragfähigkeit und der Masse der Lastaufnahme- und Anschlagmittel bezeichnet.
- **Prüflast:**
Das Produkt aus der Tragfähigkeit und dem von der Art der Prüfung abhängigen Prüflastfaktor ergibt die Prüflast. Diese Last wird während der Prüfung des Hebezeugs, Tragmittels, Lastaufnahmemittels oder Anschlagmittels angebracht.⁷

Seiltrieb:

- **Seilrolle:**
Seilrollen werden für das Leiten und Umlenken von Seilen eingesetzt. Sie sind über eine Wälz- oder Gleitlagerung drehbar gelagert.
- **Seiltrommel:**
Seiltrommeln haben die Aufgabe, das Seil anzutreiben und zu speichern. Ähnlich den Seilrollen verfügen sie über Seilrillen deren Radius passend zum Seildurchmesser gewählt werden muss. In der Regel werden Seiltrommeln aus Gründen der Seilschonung nur einlagig bewickelt.⁸
- **Ausgleichsrolle:**
Ausgleichsrollen dienen der Kompensation von ungleichen Seilbewegungen bzw. Seildehnungen bei Seiltrieben mit mehreren Seiltrommeln oder Zwillingstrommeln und sichern somit die waagrechte Lage der Hakenflasche.⁹

Drahtseil:

- **Herstellung und Aufbau:**
Drahtseile werden hergestellt, indem Stahldrähte mit einer hohen Zugfestigkeit schraubenlinienförmig um einen Kerndraht zu einer Litze geschlagen werden.

⁷ vgl. DIN 15003:1970-2, Hebezeuge; Lastaufnahmeeinrichtungen, Lasten und Kräfte, Begriffe, 1.

⁸ vgl. Böge u. a., *Handbuch Maschinenbau*, 974–976.

⁹ vgl. Griemert und Römisch, *Fördertechnik*, 11.

Die Litzen werden wiederum um eine Einlage zum Seil geschlagen. Bei der Einlage handelt es sich entweder um eine Stahleinlage (kann Litze oder Seil sein), um pflanzliche oder synthetische Faserstoffe oder um eine Kombination der genannten Materialien. Die Seileinlage dient dabei der elastischen Stützung der Außenlitzen sowie der Speicherung von Schmierstoff im Seilinneren.¹⁰

- Seilinnenschmierung:

Neben den Relativbewegungen zwischen dem Seil und den Seilrollen (Schlupf) treten auch gegenseitige Verschiebungen der Litzen und Drähte innerhalb Seile auf, die eine Biegung jener erst möglich macht. Werden spezielle Schmierstoffe zur Herabsetzung der Reibung zufolge von Draht- und Litzenverschiebungen eingesetzt, wird dies als Seilinnenschmierung bezeichnet.¹¹

- Drehungsfreiheit:

Ein Seil wird drehungsfrei oder drehungsarm bezeichnet, wenn sich die Drehmomente der einzelnen Litzenlagen unter Zugspannung aufheben. Dies wird durch unterschiedliche Drillrichtungen und/oder Querschnitte der Litzen realisiert.¹²

2.2 Auslegung und Festigkeitsnachweis von Seiltrieben für Brücken- und Portalkrane

Die im Jahr 1974 erschienene DIN 15020 stellte für einige Jahrzehnte eine kompakte und übersichtliche Möglichkeit zur Auslegung von Seiltrieben dar. Im Jahr 2013 erschien mit der DIN EN 13001-3-2:2013 jedoch eine neuere und gleichzeitig wesentlich komplexere Norm, mit der Seiltriebe rechnerisch auf ihre Festigkeit überprüft werden können. Die DIN EN 13001-3-2 unterscheidet dabei unterschiedliche Lastfälle und Szenarien.¹³

In den folgenden Kapiteln wird genau auf die unterschiedlichen Normen eingegangen und deren Abläufe schrittweise beschrieben.

¹⁰ vgl. Dubbel, *Taschenbuch für den Maschinenbau*, U16.

¹¹ vgl. Feyrer und Wehking, *FEYRER*, 38.

¹² vgl. ebenda, 121.

¹³ vgl. Böge u. a., *Handbuch Maschinenbau*, 978.

2.2.1 Vorgehensweise nach DIN 15020

Bezüglich des Geltungsbereiches der DIN 15020 ist zu sagen, dass sie bis zum Zeitpunkt der Ablösung durch die DIN 13001 bis auf wenige Ausnahmen für alle Seiltriebe von Kranen und Serienhebezeugen anzuwenden war.¹⁴ Um eine ausreichende Sicherheit des Hebezeugbetriebs, sowie eine ausreichend hohe Aufliegezeit (Benutzungsdauer von Drahtseilen) der verwendeten Drahtseile zu erreichen, wird in der DIN 15020 ein Verfahren zur rechnerischen Auslegung des Seiltriebes empfohlen. Sie dient somit der Dimensionierung von Drahtseilen, Seiltrommeln, Seilrollen und Ausgleichsrollen.¹⁵

Ermittlung des erwarteten Lastkollektivs

Zuerst muss der Einfluss der Tragmittelmasse auf die Tragfähigkeit ermittelt werden, um danach die geeignete Berechnung des kubischen Mittelwerts k der Belastungen wählen zu können. Sollte die Tragmittelmasse nicht mehr als 5 % der Tragfähigkeit betragen, kann diese bezüglich k vernachlässigt werden.

Weiters muss definiert werden, wie stark die Tragfähigkeit des Krans über dessen gesamter Laufzeit ausgelastet wird. Mittels des kubischen Mittelwerts der Belastungen k wird dem Kran in Tabelle 8 („Belastungskollektiv“) der DIN 15020 ein Belastungskollektiv zugeordnet.¹⁶ Folgendes Beispiel zeigt ein Belastungskollektiv, welches laut Norm als „mittel“ einzustufen ist:

- Tragmittelmasse $\approx$ 10 % der Tragfähigkeit
- 1/6 der Laufzeit: volle Auslastung der maximalen Tragfähigkeit
- 1/6 der Laufzeit: 2/3 der maximalen Nutzlast + Tragmittelmasse
- 1/6 der Laufzeit: 1/3 der maximalen Nutzlast + Tragmittelmasse
- 3/6 der Laufzeit: ohne Nutzlast, nur Tragmittelmasse

Ermittlung der Betriebsweise (Triebwerkgruppe)

Um die gewünschte Benutzungsdauer zu erreichen, müssen die Seiltriebe je nach erwartetem Lastkollektiv und der mittleren täglichen Benutzungsdauer (über 1 Jahr gemittelt) in sogenannte Triebwerkgruppen eingestuft werden. Dies erfolgt nach

¹⁴ vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 2.

¹⁵ vgl. ebenda.

¹⁶ vgl. ebenda, 10f.

Tabelle 1 („Triebwerkgruppen nach Laufzeitklassen und Lastkollektiven“) der DIN 15020.

Unter der Voraussetzung, dass die Aufliegezeit wesentlich von Einflüssen, die außerhalb des Seiltriebs liegen, abhängig ist, darf für die Berechnung eine der niedrigeren Triebwerkgruppen gewählt werden. Dafür muss jedoch sichergestellt werden, dass der Seiltrieb sorgfältig überwacht wird, eine Sicherung gegen Überlast vorhanden ist und erfahrungsgemäß keine Unfälle verursacht werden. Außerdem darf die Betriebsweise um 1 Triebwerkgruppe niedriger eingestuft werden, falls die Dauer eines Arbeitsspiels mindestens 12 Minuten beträgt.¹⁷

Berechnung des Mindestseildurchmessers d_{min}

Der erforderliche Minstdurchmesser d_{min} für Drahtseile berechnet sich nach Formel 1 der DIN 15020 aus dem Beiwert c und der Seilzugkraft S .¹⁸ Der berechnete Minstdurchmesser kann anschließend auf einen verfügbaren Drahtseildurchmesser d aufgerundet werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass der maximale Durchmesser (entspricht dem 1,25-fachen des Minstdurchmessers) nicht überschritten wird.¹⁹

Der Beiwert c beinhaltet dabei einen Sicherheitsbeiwert sowie Geometrie- und Festigkeitsgrößen des Drahtseils. Sollten genauere Informationen zu dem verwendeten Drahtseil vorliegen, kann der Beiwert c angepasst werden, während der Sicherheitsbeiwert jedoch beibehalten wird.²⁰

Für die Ermittlung eines ausreichend hohen Beiwerts c , müssen zuerst die Arten des Transports unterschieden werden. Im Falle des Transports von gefährlichen Gütern wie beispielsweise feuerflüssigen Massen oder Reaktor-Brennelementen, muss eine höhere Sicherheit und somit ein größerer Drahtseildurchmesser als bei üblichen Transporten gewählt werden. Für Serienhebezeuge kann, „wenn unter Beibehaltung von Drahtseil-, Seiltrommel- und Seilrollen-Durchmesser die Seilzugkraft auf 2/3 des Wertes für übliche Transporte herabgesetzt wird“, diese Klassifizierung vernachlässigt werden.²¹

¹⁷ vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 2.

¹⁸ vgl. ebenda.

¹⁹ vgl. ebenda, 4.

²⁰ vgl. ebenda, 9.

²¹ vgl. ebenda, 3.

Des Weiteren muss unterschieden werden, ob es sich um drehungsfreie/ drehungsarme oder nicht drehungsfreie Drahtseile handelt. Falls durch die Wahl der Seilkonstruktion eine ausreichende Aufliegezeit vorliegt, kann diese Unterscheidung vernachlässigt und der Wert c für nicht drehungsfreie Drahtseile gewählt werden.

Anhand dieser Kriterien sowie der vorliegenden Triebwerkgruppe kann mit Tabelle 2 („Beiwerte c “) der DIN 15020 der Beiwert c bestimmt werden.²²

Die Seilzugkraft S setzt sich zusammen aus:

- der statischen Seilzugkraft (Last + Eigengewicht des Tragemittels)
- den Beschleunigungskräften, falls diese einen höheren Wert als 10 % der statischen Seilzugkraft betragen
- der resultierenden Kraft aus Seiltriebwirkungsgrad und Eigengewicht der Tragemittel, falls diese einen höheren Wert als 5 % der statischen Seilzugkraft betragen

Je nachdem, ob zusätzlich zur statischen Seilzugkraft eine der weiteren Kraftkomponenten berücksichtigt werden muss, werden diese aufsummiert.²³

Bestimmung des Seiltriebwirkungsgrads η_s

Der Seiltriebwirkungsgrad η_s kann nach Formel 5 der DIN 15020 berechnet werden. Dabei stellt i die Anzahl der festen Seilrollen zwischen Seiltrommel und Flaschenzug und n die Anzahl der Seilstränge in einem Flaschenzug dar.²⁴

η_R bezeichnet den Wirkungsgrad einer Seilrolle und besitzt je nach Art der Lagerung einen der folgende Werte:

- Gleitlagerung: $\eta_R = 0,96$
- Wälzlagerung: $\eta_R = 0,98$

Der Wirkungsgrad des Flaschenzugs wird mit η_F bezeichnet und kann nach Formel 6 der DIN 15020 berechnet oder aus Tabelle 7 („Wirkungsgrad von Flaschenzügen“) der

²² vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 4.

²³ vgl. ebenda.

²⁴ vgl. ebenda, 9.

DIN 15020 entnommen werden. Ausgleichsrollen können aufgrund ihrer Vergleichsweise geringen Rotationsbewegung vernachlässigt werden.²⁵

Berechnung der Minstdurchmesser D_{min} für Seiltrommeln, Seilrollen und Ausgleichsrollen

Um den passenden Minstdurchmesser D_{min} für Seiltrommeln, Seilrollen und Ausgleichsrollen für den zuvor ermittelten Drahtdurchmesser d_{min} zu berechnen, müssen zuvor die Beiwerte h_1 und h_2 bestimmt werden.

h_1 ist laut Tabelle 4 („Beiwerte h_1 “) der DIN 15020 abhängig von der vorherrschenden Triebwerkgruppe, der Art der Rolle bzw. Trommel und davon, ob es sich um ein drehungsfreies/drehungsarmes Seil oder ein nicht drehungsfreies Seil handelt.²⁶

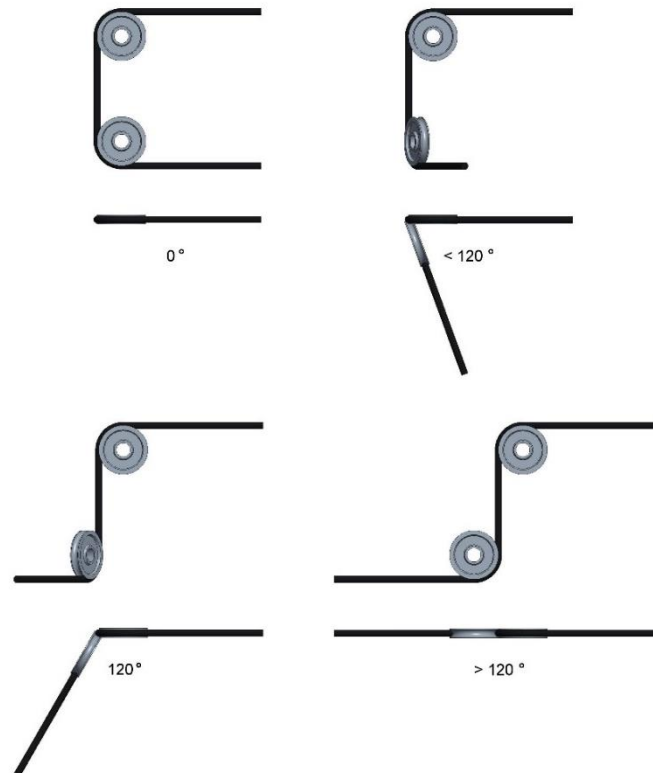


Abbildung 3: Unterscheidung zwischen gleichsinniger Biegung und Gegenbiegung nach DIN 15020²⁷



Abbildung 4: Grenz-Umschlingungswinkel für relevante Biegewechsel eines Drahtseils nach DIN 15020²⁸

²⁵ vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 9.

²⁶ vgl. ebenda, 4.

²⁷ Eigene Darstellung.

²⁸ Eigene Darstellung.

Für die Bestimmung des Beiwerts h_2 muss das höchstbelastete Drahtseil auf vorliegende Biegewechsel w untersucht werden. Diese sind abhängig von der Art der Biegung, dem Typ der Rolle bzw. Trommel sowie dem Umschlingungswinkel α . Beträgt der Winkel zwischen den Ebenen von 2 aufeinander durchlaufenen Seilrollen mehr als 120° , liegt Gegenbiegung vor (siehe Abbildung 3). Unabhängig davon, ob es sich um gleichsinnige Biegung oder Gegenbiegung handelt, können Seilrollen mit einem Umschlingungswinkel von $\alpha \leq 5^\circ$ bezüglich der Biegewechsel eines Drahtseils vernachlässigt werden (siehe Abbildung 4). Mittels Tabelle 5 („Beiwerte h_2 “) der DIN 15020 können die Biegewechselzahl w sowie die Werte h_2 für Seiltrommeln, Seilrollen und Ausgleichsrollen bestimmt werden.²⁹

Mit den ermittelten Beiwerten h_1 und h_2 sowie dem Mindestdrahtseildurchmesser d_{min} können schließlich auch die Durchmesser D_{min} für Seiltrommeln, Seilrollen und Ausgleichsrollen nach Formel 3 der DIN 15020 berechnet werden.³⁰

Dimensionierung des Rillen-Nennhalbmessers r

Um eine möglichst hohe Aufliegezeit der Drahtseile zu erreichen, soll die Pressung zwischen Drahtseil und Seilrille geringgehalten werden. Dafür wird laut Formel 4 bzw. Tabelle 6 („Rillen-Nennhalbmesser“) der DIN 15020 ein Mindestradius r der Seilrille empfohlen. Dieser beträgt das 0,525-fache des gewählten Drahtseildurchmessers d .³¹

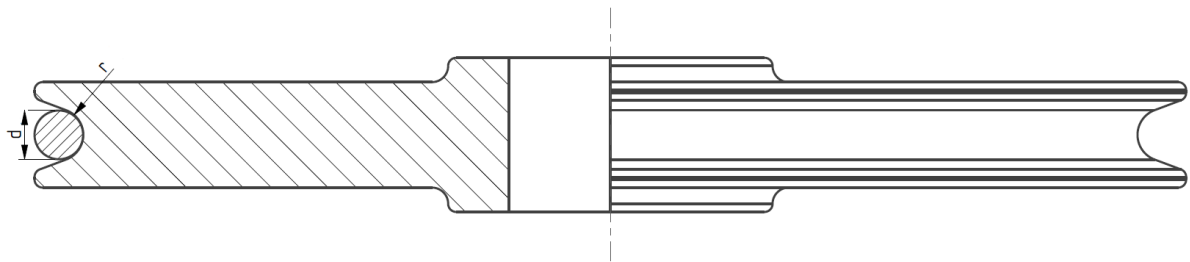


Abbildung 5: Drahtseil mit Durchmesser d in Seilrille mit Rillenhalmesser r ³²

2.2.2 Vorgehensweise nach DIN EN 13001

Die DIN EN 13001 bietet gemeinsam mit den spezifischen Produktnormen eine Möglichkeit, um für unterschiedliche Krantypen allgemeine Bedingungen,

²⁹ vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 5f.

³⁰ vgl. ebenda, 4.

³¹ vgl. ebenda, 5.

³² Eigene Darstellung.

Anforderungen und Methoden zur Vermeidung von Gefahren zu spezifizieren.³³ Das gesamte Normenwerk der DIN EN 13001 besteht aus folgenden Teilen:

- Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen
- Teil 2: Lasteinwirkungen
- Teil 3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis
 - Teil 3-1: von Stahltragwerken
 - **Teil 3-2: von Drahtseilen in Seiltrieben**
 - Teil 3-3: von Laufrad/Schiene-Kontakten
 - Teil 3-4: für Maschinenbauteile - Lager
 - Teil 3-5: von geschmiedeten Haken
 - Teil 3-6: von Maschinenbauteilen - Hydraulikzylinder
 - Teil 3-7: für Maschinenbauteile - Verzahnungen und Getriebe
 - Teil 3-8: für Maschinenbauteile - Wellen

Während die DIN EN 13001 das Fundament für die Durchführung der Festigkeitsnachweise bildet, werden je nach Krantyp mit Hilfe der jeweiligen Produktnorm die Berechnungen spezifisch angepasst. Existiert eine Produktnorm, die zu der zu überprüfenden Anwendung passt, ist sie inklusive aller Normen, auf die verwiesen wird, anzuwenden.³⁴ Die Produktnormen besitzen somit die oberste Priorität und verweisen für allgemein gültige Bereiche auf den jeweiligen Teil der DIN EN 13001.

Da in dieser Diplomarbeit ausschließlich Seiltriebe und Drahtseile für Brücken- und Portalkrane behandelt werden, müssen daher die Nachweise nach „EN 15011: Krane — Brücken- und Portalkrane“, sowie nach allen Normen, auf die verwiesen wird, durchgeführt werden. Das sind vor allem die DIN EN 13001-3-2, sowie die DIN EN 13001-2.

³³ vgl. Wagner, Scholten, und Haensel, „Neue Möglichkeiten im Festigkeitsnachweis – Die zukünftige Krannorm DIN EN 13001“, 2.

³⁴ vgl. DIN EN 13001-1:2015-6, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen, 27.

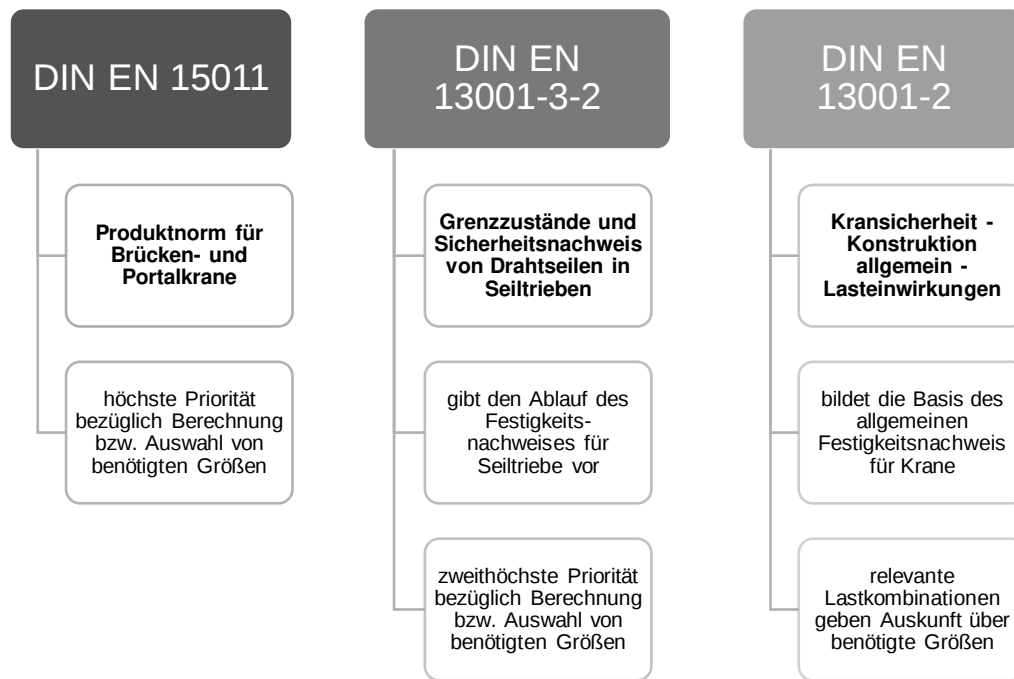


Abbildung 6: Übersicht der hauptsächlich verwendeten Normen für den Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001³⁵

Im neuen Festigkeitsnachweis werden verschiedenste Lastkombinationen unterschieden, die neben regelmäßigen Abläufen auch außergewöhnliche Szenarien beschreiben. Die insgesamt 20 unterschiedlichen Lastfälle werden deshalb in 3 Kategorieneingeteilt. Es handelt sich um die Lastfälle A (regelmäßige Lasten), B (nicht regelmäßige Lasten) und C (außergewöhnliche Lasten). Je nach Lastkombination werden dabei unterschiedliche Massen, Dynamik-Beiwerte und Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt. In den Tabellen 12a und 12b („Lasten, Lastkombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte“) der DIN EN 13001-2 werden diese Lastkombinationen definiert und näher beschrieben.³⁶

Für die Berechnung des Seiltriebs von Brückenkranen, die nicht im Freien betrieben werden, können bereits vor Beginn der Berechnungen einige Lastkombinationen vernachlässigt werden. Darunter fallen beispielsweise Lasten, welche aus Wind und anderen Wettereinflüssen resultieren, sowie Szenarien, die keine relevanten Auswirkungen auf die Komponenten des Seiltriebs haben. Folgende relevante Lastfälle müssen betrachtet werden (siehe Tabelle 1 bis Tabelle 7):

³⁵ Eigene Darstellung.

³⁶ DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen, 39f.

Tabelle 1: Lastkombination A1

Lastkombination	A1
Beschreibung	regelmäßige Beschleunigungen beim Heben und Senken der Last
Dynamik-Beiwert	Φ_2 ...für Lasten durch Anheben einer Last vom Boden

Tabelle 2: Lastkombination A3

Lastkombination	A3
Beschreibung	hängende Last, jede Kombination von Verzögerungen und Beschleunigungen im Normalbetrieb
Dynamik-Beiwert	Φ_5 ...für Lasten aus Beschleunigung

Tabelle 3: Lastkombination A4

Lastkombination	A4
Beschreibung	Fahren mit Last auf unebener Fahrbahn, keine Hubbewegung
Dynamik-Beiwert	Φ_4 ...für Lasten aus Fahren über Unebenheiten

Tabelle 4: Lastkombination C1

Lastkombination	C1
Beschreibung	außergewöhnliche Hubgeschwindigkeit beim Anheben einer Last vom Boden
Dynamik-Beiwert	Φ_{2C} ...für Lasten durch Anheben einer Last vom Boden unter außergewöhnlichen Bedingungen

Tabelle 5: Lastkombination C3

Lastkombination	C3
Beschreibung	Kran unter festgelegten Prüfbedingungen
Dynamik-Beiwert	Φ_6 ...für Prüflasten

Tabelle 6: Lastkombination C6

Lastkombination	C6
Beschreibung	Kran mit Last während der Betätigung des Not-Aus
Dynamik-Beiwert	Φ_5 ...für Lasten aus Beschleunigung des Not-Aus

Tabelle 7: Lastkombination C7

Lastkombination	C7
Beschreibung	Lasten durch Auslösen des Überlastschutzes
Dynamik-Beiwert	Φ_L ...für Lasten durch Aktivierung des Überlastschutzes

Es ist per Definition davon auszugehen, dass nur die Lastfälle der Kategorie A bei jedem Arbeitsspiel auftreten. Daher können alle anderen Lastfälle für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit vernachlässigt werden.³⁷ Andererseits müssen alle Lastfälle für den Nachweis der statischen Festigkeit untersucht werden.

2.2.2.1 statischer Festigkeitsnachweis

Für eine ausreichende statische Festigkeit darf die Seilkraft $F_{Sd,s}$ bei keinem einzigen relevanten Lastfall die Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ überschreiten. Die Mindestseilbruchkraft F_u ist für den gewählten Seildurchmesser und das gewählte Drahtseil dem zugehörigen Datenblatt zu entnehmen. Wie anhand der Gleichungen (2) und (3) zu sehen ist, sind für den Nachweis (1) mehrere Beiwerte (fett hervorgehoben) zu ermitteln. Neben den in 2.2.2 bereits erwähnten Dynamik-Beiwerten werden auch Seilkrafterhöhungsfaktoren, Teilsicherheits- und Risikofaktoren berücksichtigt.

$$F_{Sd,s} \leq F_{Rd,d} \quad (1)^{38}$$

für alle relevanten Lastfälle

$$F_{Sd,s} = \frac{m_H * g}{n_m} * \Phi * f_{S1} * f_{S2} * f_{S3} * \gamma_p * \gamma_p \quad (2)^{39}$$

$F_{Sd,s}$ Seilkraft für den Nachweis der statischen Festigkeit

³⁷ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 19.

³⁸ ebenda, 10.

³⁹ ebenda, 11.

$$F_{Rd.s} = \frac{F_u}{\gamma_{rb}} \quad (3)^{40}$$

$F_{Rd.s}$ Grenzzustandkraft für den Nachweis der statischen Festigkeit

Während die Seilkrafterhöhungsfaktoren f_{s1} , f_{s2} und f_{s3} sowie der Risikobeiwert γ_n für alle Lastfälle konstant sind, unterscheiden sich der Dynamik-Beiwert ϕ und der Teilsicherheitsbeiwert γ_p je nach Lastfall. Nachdem alle benötigten Größen bestimmt wurden, kann die statische Festigkeit überprüft werden.

Bestimmung der Dynamik-Beiwerte ϕ_2 und ϕ_{2c}

Der Dynamik-Beiwert ϕ_2 für den Lastfall des Anhebens einer Last vom Boden kann mit Formel 3 der DIN EN 13001-2 bestimmt werden. Dafür werden zusätzlich die charakteristische Hubgeschwindigkeit v_h , mit der die Last angehoben wird, sowie der Mindestwert $\phi_{2,min}$ und der Steifigkeitsbeiwert β_2 benötigt. Die Bestimmung dieser Größen erfordert weiters den Hubwerkstyp und die Steifigkeitsklasse des zu untersuchenden Krans.

Der Hubwerkstyp ist abhängig von den vorhandenen Geschwindigkeitsstufen und der Steuerung des Hubwerks. Die unterschiedlichen Hubwerkstypen sind in 4.2.2.2 der DIN EN 13001-2 definiert.

Die Steifigkeitsklasse lässt sich dagegen auf mehrere Arten bestimmen:

- Messung der charakteristischen vertikalen Lastverlagerung δ
- Berechnung des theoretischen Beiwerts ϕ_{2t}
 - Durchführung einer dynamischen Simulation
 - vereinfachte Berechnung nach Formel 1 der EN 15011
 - Berechnung der Seilkraftentwicklung $\phi_h(t)$ nach Anhang C der EN 15011

Bei der Berechnung von $\phi_h(t)$ wird anhand eines Masse-Feder-Systems der Seilkraftverlauf während des Anhebens einer Last vom Boden mit Schlaffseil unter Berücksichtigung der Elastizität der Kranbrücke und der Hubseile ermittelt. Der Maximalwert der Funktion im Intervall von 0 bis 3 Sekunden wird anschließend für ϕ_{2t} gewählt.⁴¹

⁴⁰ DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 17.

⁴¹ vgl. DIN EN 15011:2014-09, Krane – Brücken- und Portalkrane, 17.

Je nachdem welche Vorgehensweise gewählt wurde, kann mittels Tabelle 2 („Steifigkeitsklassen“) der DIN EN 13001-2 (anhand von δ) bzw. Tabelle 2 („Bestimmung der Hubklasse“) der EN 15011 (anhand von Φ_{2t}) die Steifigkeitsklasse bestimmt werden.

Mit bekanntem Hubwerkstyp und Steifigkeitsklasse lassen sich nun

- der Steifigkeitsbeiwert β_2 aus Tabelle 2 („Steifigkeitsklassen“) der DIN EN 13001-2,
- die charakteristische Hubgeschwindigkeit v_h aus Tabelle 3 („Charakteristische Hubgeschwindigkeiten v_h zur Berechnung von ϕ_2 und ϕ_{2C} “) der DIN EN 13001-2 und
- der Mindestwert $\Phi_{2,min}$ aus Tabelle 4 („Auswahl von $\Phi_{2,min}$ “) der DIN EN 13001-2

bestimmen.

Für den Lastfall C1, der sich durch eine ungewöhnlich hohe Hubgeschwindigkeit vom Lastfall A1 unterscheidet, wird anstatt Φ_2 der Beiwert Φ_{2C} benötigt. Dafür muss die entsprechende charakteristische Hubgeschwindigkeit aus Tabelle 3 der DIN EN 13001-2 gewählt werden. Danach lässt sich Φ_{2C} analog zu Φ_2 bestimmen.

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_4

Die Beschleunigungen, die aus dem Fahren über Unebenheiten resultieren, werden durch den Dynamik-Beiwert Φ_4 berücksichtigt. Bei bekannter Geometrie von Laufrad und Stufe bzw. Lücke, konstanter horizontaler Fahrtgeschwindigkeit des Krans und Eigenfrequenz des Einmassen-Modells des Krans, kann Φ_4 nach Formel 5 (für Stufen) bzw. Formel 6 (für Lücken) der DIN EN 13001-2 berechnet werden.

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_5

Die Erhöhung der Belastung durch Beschleunigungen beim Heben und Senken von Lasten werden durch den Dynamik-Beiwert Φ_5 ausgedrückt. Der Beiwert Φ_5 ist laut EN 15011 als das Produkt der Beiwerte Φ_A und Φ_P definiert.

Für die Bestimmung von Φ_P muss zuerst die Lastpositionierklasse nach Tabelle B.1 („Auswahl der Klasse P“) der EN 15011 ermittelt werden. Diese ist abhängig von der

Anzahl der Geschwindigkeitsstufen des Antriebs. Danach ist der passende Wert für Φ_P aus Tabelle 5 („Beiwert Φ_P “) der EN 15011 zu wählen.

Für Φ_A wird in Tabelle 4 („Beiwert Φ_5 für Hebezeug“) der EN 15011 neben der Geschwindigkeitssteuerung auch zwischen Heben und Senken unterschieden. Hier ist für einen allgemeinen Festigkeitsnachweis des Krans der höhere bzw. kritische Wert auszuwählen.

Der Dynamik-Beiwert Φ_5 wird sowohl für regelmäßig auftretende Beschleunigungen als auch für das Szenario einer Betätigung des Not-Aus angewendet. Je nach Lastfall muss laut Formel 4 der DIN EN 13001-3-2 der Einfluss von Beschleunigungen und Verzögerungen der Last, abhängig vom Dynamik-Beiwert Φ_5 , dem dementsprechenden Beschleunigungswert a und der Erdbeschleunigung g , berechnet werden.

Bestimmung der Dynamik-Beiwerte $\Phi_{6,stat}$ und $\Phi_{6,dyn}$

Die statische Prüfung sieht eine Prüflast vor, deren Masse mindestens 125 % der Nenntragfähigkeit beträgt. Da jedoch bei der statischen Prüfung keine Antriebe zum Einsatz kommen, kann für den Dynamik-Beiwert $\Phi_{6,stat} = 1$ angenommen werden.

Auch bei der dynamischen Kranprüfung wird eine Prüflast oberhalb der Nenntragfähigkeit gefordert (mindestens 110 %). Der Dynamik-Beiwert $\Phi_{6,dyn}$ ist dabei abhängig von Φ_2 und kann nach Formel 16 der DIN EN 13001-2 berechnet werden.⁴²

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_L

Je nach Art der Wirkung des Hubkraftbegrenzers unterscheidet sich sein zugehöriger Beiwert Φ_L . Für direkt wirkende Hubkraftbegrenzer differenziert die EN 15011 weiter zwischen hydraulischen ($\Phi_L \leq 1,4$) und pneumatischen bzw. Systemen mit Rutschkupplung ($\Phi_L \leq 1,6$). Der entsprechende Beiwert für indirekt wirkende Hubkraftbegrenzer kann nach Anhang C der DIN EN 13001-2 berechnet, oder mit einem Wert von $\Phi_L \geq 1,25$ nach 4.2.4.7 der DIN EN 13001-2 festgesetzt werden.

Ähnlich wie zuvor bei Lastfall A4 ist die Überprüfung der Belastung bei einer möglichen Aktivierung des Hubkraftbegrenzers (Lastfall C7) nicht in der DIN EN 13001-3-2

⁴² vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen, 30.

angeführt, besitzt nach eigener Einschätzung jedoch Relevanz für einen statischen Festigkeitsnachweis des Seiltriebs.

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors f_{S1}

Der Seilkrafterhöhungsfaktor f_{S1} wird nach 5.2.3 der DIN 13001-3-2 berechnet. Es handelt sich dabei um den Kehrwert des Wirkungsgrads η_{tot} des gesamten Seiltriebs. Die Berechnung des Wirkungsgrads unterscheidet sich nur leicht von jener der DIN 15001. Während der Wirkungsgrad einer einzelnen Seilrolle mit Wälzlager als konstanter Wert gegeben ist, muss dieser beim Einsatz eines Gleitlagers berechnet werden. Dafür wird das Verhältnis zwischen Lagerdurchmesser und Seilrollendurchmesser benötigt.

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors f_{S2}

Um einen Winkel zwischen dem Seilstrang und der Wirkrichtung der Kraft zu berücksichtigen, muss der Seilkrafterhöhungsfaktor f_{S2} gemäß Formel 8 der DIN EN 13001-3-2 bestimmt werden. Dabei ist der innerhalb des Betriebsbereiches auftretende maximale Winkel β_{max} (siehe Abbildung 7) zu wählen.⁴³

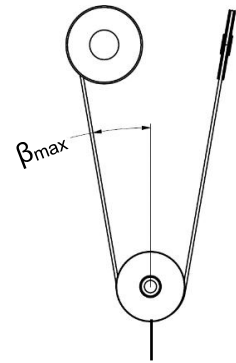


Abbildung 7: Winkel β_{max} ⁴⁴

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors f_{S3}

Mit dem Seilkrafterhöhungsfaktor f_{S3} wird die Einwirkung von horizontalen Kräften (z.B. Windkräfte oder Beschleunigungen durch Katz- oder Kranfahrten) auf die Hublast bei Anwendung von mehreren nicht parallelen Seilstränge berücksichtigt. Der Faktor ist bei bekannter horizontaler Kraft und Seilwinkel nach Formel 9 der DIN EN 13001-3-2 zu berechnen. Für frei schwingende Lasten dürfen horizontale Kräfte vernachlässigt und $f_{S3} = 1$ angenommen werden.⁴⁵

Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_p und des Risikobeiwerts γ_n

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_p ist vom Lastfall und der Last abhängig und kann für alle Lastfälle der Tabelle 12a („Lasten, Lastkombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte“)

⁴³ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 13.

⁴⁴ Eigene Darstellung.

⁴⁵ vgl. ebenda, 14.

der DIN EN 13001-2 entnommen werden. Die Werte für alle Lastfälle, die bei der Berechnung des Seiltriebs berücksichtigt werden, sind in Tabelle 8 angeführt.

Tabelle 8: Teilsicherheitsbeiwert in Abhängigkeit des Lastfalls

Lastfall	A1	A3	A4	C1	C3	C6	C7
γ_p	1,34	1,34	1,22	1,10	1,10	1,10	1,10

Krane, welche ein erhöhtes Risiko im Falle eines Unfalls darstellen, werden gemäß Tabelle D.1 („Klassen für erhöhte Risiken“) der DIN EN 13001-2 in eine Risikoklasse eingeteilt. Abhängig von der Risikoklasse und dem Bau- oder Anlagenteil muss der passende Risikobeiwert γ_n gemäß Tabelle D.2 („Auswahl der Risikobeiwerte“) der DIN EN 13001-2 gewählt werden. Liegt kein erhöhtes Risiko vor, kann $\gamma_n = 1$ gewählt werden.⁴⁶

Bestimmung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rb} für den statischen Festigkeitsnachweis

Zur Bestimmung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rb} für den statischen Festigkeitsnachweis muss zunächst der kleinste relevante Durchmesser D des Seiltriebs bestimmt werden. Dazu werden der Seilrollendurchmesser und jeweils das 1,125-fache des Ausgleichsrollen- und des Seiltrommeldurchmessers herangezogen. Danach kann γ_{rb} nach Formel 14 der DIN EN 13001-3-2 berechnet werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass das Verhältnis zwischen dem kleinsten relevanten Durchmesser D und dem Seildurchmesser d einen Wert von 11,2 nicht unterschreitet.⁴⁷

2.2.2.2 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Anmerkung:

*Für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit wurden die Symbole mancher Größen gegenüber der Norm leicht verändert. Während in der Norm einige Variablenbezeichnungen ein hochgestelltes * beinhalten, besitzen sie in dieser Arbeit ein tiefgestelltes f (z.B. $\Phi^* \triangleq \Phi_f$). Dies hat den Grund, dass in der*

⁴⁶ vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lastenwirkungen, 61.

⁴⁷ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 17f.

Berechnungsapplikation, aufgrund des verwendeten Programms, keine Sonderzeichen für Variablenbezeichnungen verwendet werden können.

Ähnlich zum statischen Festigkeitsnachweis wird beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit (4) für jeden relevanten Lastfall die Seilkraft $F_{Sd.f}$ inklusive aller vorgesehenen Beiwerte und Faktoren berechnet und mit der Grenzseilkraft $F_{Rd.f}$ verglichen. Die zur Bestimmung von $F_{Sd.f}$ (5) und $F_{Rd.f}$ (6) benötigten Beiwerte und Faktoren sind fett hervorgehoben. Bei diesem Nachweis werden nur Lastfälle mit regelmäßigen Lasten berücksichtigt und deren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit über die gesamte Einsatzzeit des Krans ermittelt.

$$F_{Sd.f} \leq F_{Rd.f} \quad (4)^{48}$$

für alle relevanten Lastfälle mit regelmäßigen Lasten

$$F_{Sd.f} = \frac{m_H * g}{n_m} * \Phi_f * f_{s2.f} * f_{s3.f} * \gamma_n \quad (5)^{49}$$

$F_{Sd.f}$ Seilkraft für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

$$F_{Rd.f} = \frac{F_u}{\gamma_{rf} * \sqrt[3]{s_r}} * f_f \quad (6)^{50}$$

$F_{Rd.f}$ Grenzseilkraft für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Bis auf den Dynamik-Beiwert Φ_f sind alle gesuchten Faktoren und Beiwerte vom Lastfall unabhängig und müssen daher nur einmalig ermittelt werden.

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_f

Je nachdem, wie vielen Biegewechsel das Drahtseil während eines Lastspiels durchläuft, hat der Dynamik-Beiwert Φ_f einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Drahtseils. Deshalb wird dieser in Abhängigkeit der Biegewechselzahl w , welche nach Tabelle A.1 („Biegewechselzahlen“) der DIN EN 13001-3-2 bestimmt wird, nach Formel 19 der DIN EN 13001-3-2 berechnet. Wie

⁴⁸ DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 18.

⁴⁹ ebenda, 19.

⁵⁰ ebenda, 21.

bereits in 2.2.2 erwähnt werden nur die zugehörigen Dynamik-Beiwerte ϕ der relevanten Lastfälle A berücksichtigt.⁵¹

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors $f_{S2.f}$

Auch für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit muss der Einfluss von nicht parallelen Seilsträngen auf die Seilkraft untersucht werden. Dazu kann der Seilkrafterhöhungsfaktor $f_{S2.f}$ nach 6.2.3 der DIN EN 13001-3-2 allgemein oder auch näherungsweise berechnet werden, falls „der Kran in allen Höhen des vorwiegend genutzten Arbeitsbereiches ungefähr gleich verteilt arbeitet“.⁵² Der vorwiegend genutzte Arbeitsbereich wird dabei als der Bereich zwischen den Koordinaten Z_1 und Z_2 definiert (siehe Abbildung 8).

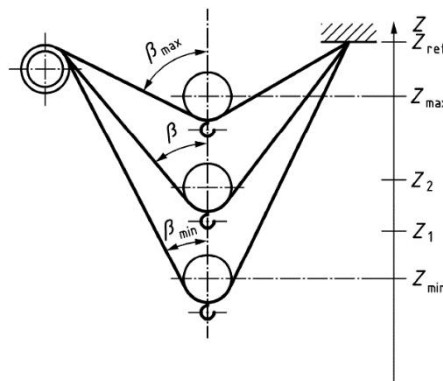


Abbildung 8: Hubpositionen⁵³

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors $f_{S3.f}$

Als Beiwert $f_{S3.f}$ kann für Anwendungen mit mehreren nicht parallelen Seilsträngen laut 6.2.4 der DIN EN 13001-3-2 der bereits ermittelte Beiwert f_{S3} verwendet werden. Für den Fall, dass mögliche Horizontalkräfte nicht während Hubbeschleunigungen wirken oder „ein erheblicher Unterschied bei der Beschleunigungszeit besteht“, gilt $f_{S3.f} = 1$.⁵⁴

Bestimmung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rf} für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Der minimale Seilwiderstandsbeiwert γ_{rf} für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit „kombiniert einen Sicherheitsbeiwert (der die Unsicherheit der Werte der

⁵¹ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 20.

⁵² ebenda.

⁵³ ebenda, 21.

⁵⁴ ebenda.

Ermüdungsfestigkeit und die möglichen Konsequenzen von Ermüdungsschäden berücksichtigt) und einen Faktor, der die Mindestseilbruchkraft auf die Ermüdungsfestigkeit am Bezugspunkt vermindert“.⁵⁵ Er ist mit einem Wert von $\gamma_{rf} = 7$ definiert.

Bestimmung des Seilkraftverlaufsparameters s_r

Die Bestimmung des Seilkraftverlaufsparameters s_r inklusive aller dafür benötigten Größen erfolgt nach 6.3.2 bis einschließlich 6.3.4 der DIN EN 13001-3-2. Dieser Beiwert berücksichtigt die Häufigkeit des Auftretens der unterschiedlich hohen Belastungen über die Seillebensdauer (Seilkraftspektrum k_r) sowie die relative Gesamtzahl der Biegewechsel v_r .⁵⁶

Die Anzahl der Arbeitsspiele und der eingesetzten Seile über die Bemessungslebensdauer des Krans können nach DIN EN 13001-1 beziehungsweise Anhang B der DIN EN 13001-3-2 gewählt werden.

Bestimmung des Faktors weiterer Einflüsse f_f

Der Faktor f_f ist das Produkt der Faktoren f_{f1} , f_{f2} , f_{f3} , f_{f4} , f_{f5} , f_{f6} und f_{f7} , welche weitere Einflüsse auf die Grenzseilkraft darstellen und nach 6.4 und 6.5 der DIN EN 13001-3-2 definiert sind.⁵⁷

- f_{f1} : Dieser Beiwert berücksichtigt den Einfluss der Durchmesser von Rollen und Trommeln. Er ist abhängig vom Verhältnis von kleinstem relevantem Durchmesser D des Seiltriebs zu Seildurchmesser d sowie der Gesamtanzahl der Biegewechsel w_{tot} . Der kleinste relevante Durchmesser D ist bereits durch die Bestimmung von γ_{rb} (siehe 2.2.2.1) bekannt. Der Beiwert f_{f1} muss mindestens einen Wert von 0,75 besitzen, während für das Verhältnis der Durchmesser D/d ein Wert von 11,2 nicht unterschritten werden darf.⁵⁸
- f_{f2} : Hiermit werden nichtlineare Beziehungen zwischen der Einzeldrahtzugfestigkeit und der Grenzseilkraft berücksichtigt. Für Steifigkeitsklassen bis 1770 N/mm² darf $f_{f2} = 1$ gewählt werden.⁵⁹

⁵⁵ DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 21.

⁵⁶ vgl. ebenda, 22f.

⁵⁷ vgl. ebenda, 23.

⁵⁸ vgl. ebenda.

⁵⁹ vgl. ebenda, 24.

- f_{f3} : Der Einfluss eines schräg auf- oder ablaufenden Seils auf Rollen oder Trommel wird mit dem Faktor f_{f3} berücksichtigt. Dabei müssen alle Kontaktpunkte berücksichtigt werden, die der am stärksten durch Biegewechsel beanspruchte Teil des Drahtseils während einer Hubbewegung durchläuft. Dazu müssen alle Winkel δ innerhalb des betrachteten Seiltriebs bekannt sein.⁶⁰

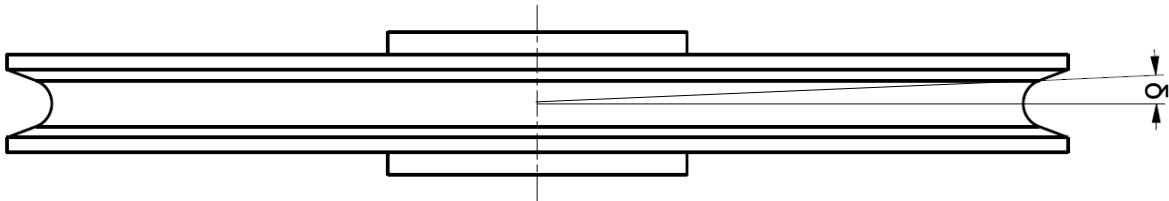


Abbildung 9: Auf- und Ablaufwinkel (Seilablenkungswinkel)⁶¹

- f_{f4} : Falls die verwendeten Seile eine Innenschmierung aufweisen, darf $f_{f4} = 1$ verwendet. Ansonsten gilt $f_{f4} = 0,5$.⁶²
- f_{f5} : Sollte eine mehrlagig gewickelt Seiltrommel verwendet werden, wird dessen Einfluss als Faktor f_{f5} in die Berechnung der Grenzseilkraft aufgenommen. Neben der Gesamtanzahl der Hubbewegungen und dem Seilkraftspektrum, welche bereits für den Seilkraftverlaufparameter s_r bestimmt wurden, wird zwischen einer geführten oder ungeführten Seilwicklung der Trommel unterschieden. Der Faktor f_{f5} kann schließlich mittels Tabelle 8 („Faktor f_{f5} “) der DIN EN 13001-3-2 bestimmt werden.
- f_{f6} : Mit dem Verhältnis von Rillenradius r_g zu Seildurchmesser d werden neben dem Faktor f_{f6} auch mögliche Anforderungen bezüglich des Öffnungswinkels ω der Seilrille festgelegt. Beide Werte können Tabelle 6 („Faktor f_{f6} “) der DIN EN 13001-3-2 entnommen werden.

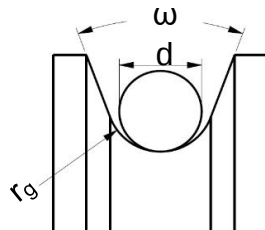


Abbildung 10: vereinfachte Darstellung einer Seilrille mit Drahtseil⁶³

⁶⁰ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 24.

⁶¹ Eigene Darstellung.

⁶² vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 25.

⁶³ Eigene Darstellung.

- f_{f7} : Verschiedene Drahtseil-Geometrien weisen unterschiedliche Ermüdungsverhalten infolge von Biegewechsel auf. Je nach Seilart und Anzahl der Außenstränge muss deshalb mittels Tabelle 7 („Seilartfaktoren“) der DIN EN 13001-3-2 der Seilartfaktor festgelegt werden, dessen Kehrwert als Faktor f_{f7} bezeichnet wird.⁶⁴

⁶⁴ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 26.

3 Entwicklung des Softwaretools

In Abschnitt 2.2 wurde bereits die schrittweise Anwendung der DIN 15020 und der DIN EN 13001 für die Dimensionierung bzw. den Nachweis der statischen und der Ermüdungsfestigkeit gezeigt. Es wird schnell deutlich, dass hierbei eine Vielzahl von Zwischenergebnissen, Beiwerten und Faktoren zu bestimmen sind, bevor eine Dimensionierung eines Seiltriebs und Drahtseils mit ausreichender Festigkeit bestimmt werden kann. Weiters kommt hinzu, dass während der Berechnung, je nach Angabe oder Zwischenergebnis, unterschiedliche Rechenwege, Beiwerte, Faktoren, etc. gewählt werden müssen. Dies geschieht oft anhand von Tabellen, die für die Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 über mehrere Normen verteilt sind. Folglich können sich bei einer Optimierung der Dimensionen von Seiltriebskomponenten die einzelnen Berechnungszyklen bezüglich der zu verwendenden Gleichungen, Beiwerte, etc. bedingt durch die unterschiedlichen Angaben voneinander unterscheiden. Dies führt bei einer Berechnung ohne Computerunterstützung zu einer hohen Fehleranfälligkeit und einem sehr hohen Zeitaufwand.

Daher wurde im Programm „Mathcad Prime 5.0“ ein passendes Berechnungstool entwickelt. Damit können anhand aller relevanten Angaben sowohl die Dimensionierung des Seiltriebs nach DIN 15020 (Bestimmung des Minstdurchmessers von Drahtseil, Seiltrommel, Seilrolle und Ausgleichsrolle), als auch die beiden Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 (statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit) automatisiert berechnet werden. In den folgenden Kapiteln wird dieses Berechnungstool anhand von Screenshots aus Mathcad schrittweise erklärt und eine Beispielrechnung durchgeführt.

3.1 Strukturierung der Rechenapplikation

Wie in Mathcad üblich, müssen vor den Berechnungen zuerst alle benötigten Variablen definiert werden. Daher startet die Rechenapplikation mit einer Auflistung aller Angaben, die sowohl für die DIN 15020 als auch für die DIN EN 13001 benötigt werden. Somit wird bereits zu Beginn der Berechnungen klar ersichtlich, welche Informationen und Spezifikationen bezüglich des Krans und seiner Arbeitsweise benötigt werden.

Wurden alle Angaben korrekt definiert, wird im nächsten Abschnitt die DIN 15020 schrittweise nach Norm berechnet und anschließend die berechneten

Minstdurchmesser für Drahtseil, Seilrolle, Seiltrommel und Ausgleichsrolle als Ergebnisse ausgegeben. Anschließend besteht die Möglichkeit die soeben berechneten Parameter manuell anzupassen, bevor diese mittels der Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 überprüft werden. Dieser manuelle Zwischenschritt hat den Grund, dass die Ergebnisse der DIN 15020 nur als Richtwerte dienen sollen und keineswegs verpflichtend für einen gültigen Nachweis nach DIN EN 13001 zu übernehmen sind. Außerdem muss je nach gewähltem Seildurchmesser d_r die Mindestbruchkraft F_u des gewählten Drahtseils angegeben werden. Diese kann dem Datenblatt für das Drahtseil entnommen werden.⁶⁵

Im letzten Abschnitt der Rechenapplikation werden die Nachweise der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit durchgeführt. Jeweils am Ende der schrittweisen Berechnungen werden die Ergebnisse in Textform dargestellt. Zusätzlich zur Information, ob der Nachweis erfüllt wurde, kann die Auslastung der Grenzseilkräfte entnommen werden. Diese ist zwar nicht in der DIN EN 13001 vorgeschrieben, liefert jedoch die Information, ob eine mögliche Überdimensionierung vorliegt.

3.2 Funktionsweise der Rechenapplikation

Wie bereits erwähnt, wurde für die Erstellung dieses Berechnungstools das Programm „Mathcad Prime 5.0“ verwendet. Damit können neben Zahlenwerten auch strings (Zeichenketten) als Variablen definiert werden. Solche Zeichenketten finden in der Berechnung vor allem für Angaben und Textausgaben ihre Anwendung. Speziell für Angaben in Textform sind jedoch nur bestimmte Eingaben definiert, weshalb diese in der Berechnung mit Fußnoten gekennzeichnet wurden (siehe Mathcad-Screenshot 1).

- Art der Lagerung des Seiltriebs: (4) $LA := \text{“Wälzlager”}$

(4): mögliche Eingaben: Wälzlager: $LA = \text{“Wälzlager”}$
 Gleitlager: $LA = \text{“Gleitlager”}$

Mathcad-Screenshot 1: beispielhafte Darstellung einer Text-Angabe mit limitierten Eingabemöglichkeiten inklusive Fußnote

Gleiches gilt für gekennzeichnete Variablen mit Zahlenwerten (siehe Mathcad-Screenshot 2).

⁶⁵ siehe Anhang A

- Risikoklasse: (3)

$RK := 0$

(3): kein besonderes Risiko:

erhöhtes Risiko (z.B.: Transport von Flüssigmetall):

sehr hohes Risiko (z.B.: Krane in Kernkraftwerken):

$RK=0$

$RK=1$

$RK=2$

Mathcad-Screenshot 2: beispielhafte Darstellung einer Zahlenwert-Angabe mit limitierten Eingabemöglichkeiten inklusive Fußnote

In der Berechnung werden neben dem Lösen von Gleichungen, die unverändert aus den Normen übernommen werden konnten, auch eine Vielzahl von Kriterien überprüft und Tabellen ausgewertet. Dies wurde anhand von Programmierungsblöcken umgesetzt. Mit „if“- und „else“-Anweisungen können je nach Angabe oder Zwischenergebnis die zutreffenden Werte bzw. Gleichungen ausgewählt werden. Die Bedingungen für diese Anweisungen werden dabei mit Vergleichsoperatoren aufgestellt und miteinander verknüpft.

Mathcad-Screenshot 3 zeigt ein Beispiel für eine Tabellenauswertung. Dazu soll Tabelle 9, mit der die fiktive Größe ψ abhängig von den Größen x und y bestimmt werden kann, automatisch ausgewertet werden. Die beiden Möglichkeiten ($x=1$ & $y=a$ sowie $x=2$ & $y=b$), die das Ergebnis $\psi=10$ zur Folge hätten, können dabei mit einem „oder“-Vergleichsoperator zusammengefasst werden. Für dieses Beispiel soll $x=1$ und $y=b$ angenommen werden, was einem Ergebnis von $\psi=30$ entspricht.

Tabelle 9: Bestimmung der fiktiven Größe ψ

		x	
		<u>1</u>	2
y	a	10	20
	<u>b</u>	30	10

$x := 1$

$y := \text{"b"}$

$$\psi := \left\| \begin{array}{l} \text{if } ((x=1) \wedge (y=\text{"a"})) \vee ((x=2) \wedge (y=\text{"b"})) \\ \quad \psi \leftarrow 10 \\ \text{if } (x=2) \wedge (y=\text{"a"}) \\ \quad \psi \leftarrow 20 \\ \text{if } (x=1) \wedge (y=\text{"b"}) \\ \quad \psi \leftarrow 30 \end{array} \right\| = 30$$

Mathcad-Screenshot 3: Programmierungsblock zur Auswertung von Tabelle 9

Wie bereits erwähnt, können auch Kriterien überprüft werden, um die anzuwendende Formel für eine zu berechnende Variable zu definieren.

$$k := \begin{cases} \text{if } \alpha \leq 0.05 \\ \left\| \left\| k \leftarrow \sqrt[3]{(\beta_1 + \gamma_-)^3 \cdot t_1 + (\beta_2 + \gamma_-)^3 \cdot t_2 + (\beta_3 + \gamma_-)^3 \cdot t_3 + \gamma_-^3 \cdot t_\Delta} \right\| \right. \\ \text{if } \alpha > 0.05 \\ \left\| \left\| k \leftarrow \delta \cdot \sqrt[3]{(\beta_1 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_1 + (\beta_2 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_2 + (\beta_3 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_3 + (\gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_\Delta} \right\| \right. \end{cases} = 0.606$$

Mathcad-Screenshot 4: Bestimmung des kubischen Mittelwerts der Belastungen nach DIN 15020 als Beispiel für eine kriteriumsabhängige Wahl der anzuwendenden Gleichung

Ein Beispiel dafür ist im Mathcad-Screenshot 4 zu sehen. Überschreitet die Hilfsgröße α einen Wert von 0,05, wird sie für die Berechnung des kubischen Mittelwerts der Belastungen k berücksichtigt.

Treten während einer Berechnung Zwischenergebnisse auf, die laut Norm unzulässig sind, wird an dieser Stelle abgebrochen und der Grund des Abbruchs in Textform ausgegeben. In solchen Fällen müssen die entsprechenden Angaben korrigiert werden. In dem im Mathcad-Screenshot 5 gezeigten Beispiel sollte der kleinste relevante Durchmesser D größer gewählt werden.

$$f_{f1} := \begin{cases} \text{if } f_{f1} \geq 0.75 \\ \left\| \left\| f_{f1} \leftarrow f_{f1_} \right\| \right. \\ \text{else} \\ \left\| \left\| f_{f1} \leftarrow \text{"D/d zu klein"} \right\| \right. \end{cases} = \text{"D/d zu klein"}$$

Mathcad-Screenshot 5: Bestimmung des Faktors f_{f1} nach DIN EN 13001-3-2 als Beispiel für ein mögliches Abbruchkriterium

Die rote Umrahmung in den Screenshots zeigt an, welches Ereignis durch die Programmierung ausgewählt wird.

In Abschnitt 4 wird anhand eines Rechenbeispiels detailliert auf die einzelnen Schritte der Berechnung eingegangen.

4 Beispielhafte Demonstration des Softwaretools anhand eines Rechenbeispiels

Um die Applikation möglichst verständlich zu beschreiben, werden im folgenden Kapitel der Seilzug und das Drahtseil eines beispielhaften Krans Schritt für Schritt nach DIN 15020 dimensioniert und anschließend nach DIN EN 13001 auf ihre Festigkeit überprüft. Es wird außerdem die These überprüft, ob sich die DIN 15020 weiterhin für eine erste grobe Dimensionierung des Seiltriebs eignet, welche anschließend nach DIN EN 13001 überprüft werden soll. Abschließend folgen die Verifikation und die Validierung der Applikation. Dafür werden die berechneten Dimensionen mit den tatsächlichen Abmessungen eines realen Krans verglichen und die Ergebnisse der Festigkeitsnachweise analysiert.

4.1 Erklärungen und Vorgehensweise zum Rechenbeispiel

Für einen Einträgerlaufkran mit einer maximalen Tragfähigkeit von 5 Tonnen (siehe Abbildung 11) soll anhand einer automatisierten Mathcad-Berechnung der Seiltrieb sowie das Drahtseil dimensioniert und nach DIN 13001 überprüft werden. Diagramme und Tabellen, die beispielsweise zur Bestimmung von Hilfsgrößen oder anzuwendender Formeln dienen, werden dabei mittels Programmierungsblocken automatisch ausgewertet. Voraussetzung dafür ist die lückenlose Eingabe aller benötigten Angaben zu Beginn der Berechnung. Um alle notwendigen Angaben zu erhalten, müssen neben den zukünftigen Anforderungen bezüglich des Krans auch die Anordnung der Komponenten innerhalb des Seiltriebs sowie der Drahtseiltyp bekannt sein. Der Seildurchmesser sowie die Durchmesser von Seilrolle, Ausgleichsrolle und Seiltrommel werden anhand der Dimensionierung nach DIN 15020 bestimmt, und können vor den Festigkeitsnachweisen nach DIN EN 13001 bei Bedarf manuell überschrieben werden.



Abbildung 11: beispielhafte Darstellung des zu berechnenden Brückenkrans (max. Tragfähigkeit von 5 t)⁶⁶

⁶⁶ <https://www.abuskrane.at/produkte/eintraegerlaufkrane/>.

Alle Eingabegrößen können nachträglich zu jedem beliebigen Zeitpunkt angepasst werden, ohne dafür die Berechnung verändern zu müssen. Einige Werte (z.B. Mindestbruchkraft des Drahtseils F_u) müssen manuell aus technischen Datenblättern bzw. Normen entnommen und in die Berechnung eingegeben werden.

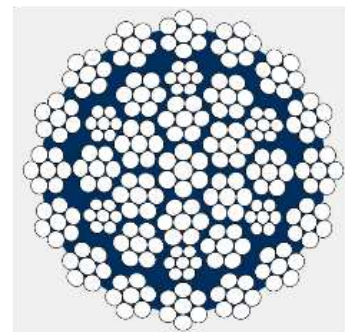
4.2 Angaben zum Rechenbeispiel

Es folgen alle relevanten Angaben, die sowohl für die Dimensionierung nach DIN 15020 als auch für die Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 benötigt werden. Die Angaben beschreiben dabei einen Einträger-Brückenkran, der für universelle Tätigkeiten in einer Werkstatt eingesetzt werden soll.

Als Drahtseil wurde das drehungsfreie Seil „Starlift“ der Firma CASAR ausgewählt (siehe Mathcad-Screenshot 6). Es wurde davon ausgegangen, dass während einer geschätzten Lebensdauer des Krans von 20 Jahren insgesamt 3 Seile verwendet werden. Die Anzahl der eingesetzten Seile kann mit Hilfe von Anhang B der DIN EN 13001-3-2 in Abhängigkeit der Kranart abgeschätzt werden.

Seil:

- gewähltes Seil: CASAR - Starlift
- Seilsteifigkeitsklasse: $R_r := 1960 \text{ MPa}$
- Seilart: ⁽¹⁾ $SA := \text{„df“}$
- Seilgeometrie: ⁽²⁾ $SG := 3$
- Anzahl der Seilaußenstränge: $n_{SA} := 16$
- Seilinnenschmierung: * $SIS := \text{„ja“}$
- Anzahl eingesetzter Seile während der gesamten Kran-Lebensdauer (ca. 20 Jahre): $l_r := 3$



Quelle: www.casar.de

Mathcad-Screenshot 6: gewählte Angaben des Drahtseils

Neben der Steifigkeitsklasse R_r , der Anzahl der Seilaußenstränge n_{SA} und einer möglichen Seilinnenschmierung SIS („ja“ oder „nein“), muss das Drahtseil nach seiner Geometrie klassifiziert werden. Zuerst wird zwischen drehungsfrei („df“) und nicht drehungsfrei („ndf“) unterschieden. Weiters werden aufgrund unterschiedlichen

Ermüdungsverhaltens infolge von Biegewechselbeanspruchungen die unterschiedlichen Arten des Seilaufbaus kategorisiert (siehe Tabelle 10).⁶⁷

Tabelle 10: Unterscheidungen der Drahtseile nach Seilgeometrie⁶⁸

einlagig oder parallel geschlossen	SG = 1
einlagig oder parallel geschlossen (6-10 Außenstränge und Kunststoffimprägnierung)	SG = 2
drehungsfrei und unverdichtet	SG = 3
drehungsarm und verdichtet	SG = 4

Im Mathcad-Screenshot 7 sind alle relevanten Massen und Lasten des Krans in Kilogramm bzw. metrischen Tonnen aufgeführt.

Massen und Lasten:

- maximale Hublast (Tragfähigkeit): $m_H := 5 \text{ tonne}$
- Masse Anschlagmittel: $m_A := 0 \text{ kg}$
- Masse Lastaufnahmemittel: $m_L := 0 \text{ kg}$
- maximale Nutzlast: $m_N := m_H - (m_A + m_L) = 5 \text{ tonne}$
- Masse Laufkatze: $m_{tr} := 220 \text{ kg}$
- Masse Tragmittel: $m_T := 50 \text{ kg}$
- Risikoklasse: (3) $RK := 0$

Mathcad-Screenshot 7: gewählte Angaben bezüglich Massen und Lasten

Zusätzlich muss im Falle eines erhöhten Betriebsrisikos eine Risikoklasse RK laut Tabelle 11 gewählt werden.

⁶⁷ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 26.

⁶⁸ vgl. ebenda.

Tabelle 11: Einteilung des Krans nach Betriebsrisiko⁶⁹

kein besonderes Risiko	RK = 0
erhöhtes Risiko (mittlere Folgen bzgl. Verlust von Menschenleben, erhebliche wirtschaftliche, soziale und umweltbezogenen Folgen)	RK = 1
sehr hohes Risiko (bedeutende Folgen bzgl. Verlust von Menschenleben, sehr schwerwiegende wirtschaftliche, soziale und umweltbezogenen Folgen)	RK = 2

Für das Rechenbeispiel wurde ein Seiltrieb, bestehend aus 3 Seilrollen (davon eine feste Umlenkrolle) und einer Seiltrommel, gewählt (siehe Mathcad-Screenshot 8). Durch diese Anordnung ergibt sich eine Anzahl von 7 relevanten Biegewechseln pro Hubbewegung.⁷⁰

Als Angaben bezüglich einer möglichen mehrlagigen Wicklung *MS* und den Einsatz einer geführten Seilwicklung *GS* wurden 2 valide Eingabewerte „ja“ und „nein“ definiert. Bezüglich der Seiltrommel im Rechenbeispiel wurde eine einlagige Wicklung mit Seilführung gewählt (*GS*=„ja“, *MS*=„nein“).

Neben der Art der verwendeten Lager im Seiltrieb („Wälzlager“ oder „Gleitlager“) muss jedenfalls der Gleitlagerdurchmesser $d_{bearing}$ angegeben werden. Dieser kann bei der Verwendung einer Wälzlagerung beliebig gewählt werden und hat keinen weiteren Einfluss auf die Berechnung. Er wird jedoch aufgrund der Gestaltung der Berechnung benötigt, um keinen Rechenabbruch zu verursachen.

Um Seilkrafterhöhungen durch nicht parallele Seile bestimmen zu können, muss außerdem der Winkel β_{max} sowie Höhenkoordinaten z des Arbeitsbereichs definiert werden. Beide Größen sind im Mathcad-Screenshot 8 skizziert.

Sofern bekannt, müssen nach DIN EN 13001-3-2 auch alle Winkel δ_i angegeben werden, unter denen das Drahtseil auf Seiltrommel und Seilrollen auf- und abläuft. Für diese Berechnung wurde angenommen, dass der Punkt des Drahtseils, welcher am stärksten durch Biegewechsel beansprucht wird, während eines Lastspiels alle 3 Seilrollen und die Seiltrommel durchläuft (am häufigsten verwendeter Arbeitsbereich).

⁶⁹ vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen, 61.

⁷⁰ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 30.

Die Reihenfolge der Benennung der positiv gezählten Winkel ist dabei nicht von Bedeutung. Sollten bei der Berechnung eines anderen Krans mehr als 7 Winkel vorliegen, müssen diese in den Angaben und an der entsprechenden Stelle in der Berechnung ergänzt werden.

Sollte die Last an mehreren nicht parallelen Seilen befestigt sein, muss die Variable S_{np} mit „ja“ definiert und die auf die Last wirkende Horizontalkraft F_h sowie der Seilwinkel γ_{fs3} angegeben werden. Für frei schwingende Lasten und parallele Seile muss der Variable S_{np} der Wert „nein“ zugewiesen werden. Die Größen F_h und γ_{fs3} werden somit in der Berechnung nicht weiter berücksichtigt.

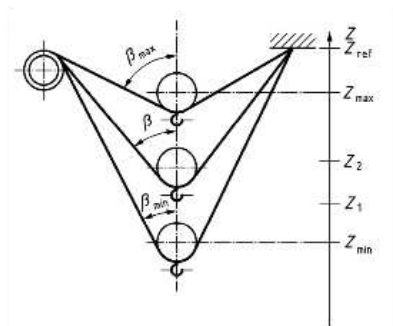
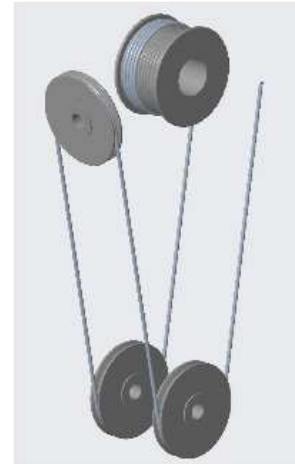
Der Hubwerkstyp bezieht sich auf den Moment, in dem die Last den Boden verlässt und ist nach DIN EN 13001-3-2 definiert.⁷¹ Daher sind für den Hubwerkstyp nur die Eingaben „HD1“, „HD2“, „HD3“, „HD4“ und „HD5“ definiert. Im Rechenbeispiel wird die Feinhubgeschwindigkeit von der Steuerung so lange beibehalten, bis die Last den Boden verlassen hat. Dies entspricht dem Hubwerkstyp *HD3*. Zusätzlich wird festgelegt, welche Geschwindigkeitssteuerung vorliegt (siehe Tabelle 12). Auch die ungefähre Gesamtanzahl der Hubbewegungen C während der gesamten Lebenszeit des Krans, sowie seine geplante mittlere Laufzeit pro Tag sind anzugeben. Die Zahl der Hubbewegungen kann dabei mithilfe von Tabelle 2 („Klassen U der Gesamtzahlen von Arbeitsspielen C “) der DIN EN 13001-1 je nach Kranklasse (U-Klasse) abgeschätzt werden. Beispiele für Kranarten der unterschiedlichen Kranklassen sind in Anhang B der DIN EN 13001-3-2 aufgelistet.

Zuletzt muss angegeben werden, ob ein „direkt“ oder „indirekt“ wirkender Hubkraftbegrenzer vorhanden ist.

⁷¹ vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lastenwirkungen, 13.

Seiltrieb:

- Anzahl Seilrollen gesamt: $n_r := 3$
- Anzahl Seiltrommeln gesamt: $n_t := 1$
- Anzahl Ausgleichsrolle gesamt: $n_a := 0$
- Anzahl der Seilstränge: $n_m := 4$
- Anzahl fester Umlenkrollen: $n_s := 1$
- relevante Biegewechsel/Hubbewegung: $w := 7$
- max. Hubhöhe: $l := 10 \text{ m}$
- geführte Seilwicklung (Seiltrommel): * $GS := \text{"ja"}$
- mehrlagige Seilwicklung: * $MS := \text{"nein"}$
- Art der Lagerung des Seiltriebs: (4) $LA := \text{"Wälzlager"}$
- Gleitlagerdurchmesser: (5) $d_{bearing} := 0 \text{ mm}$
- max. Winkel zw. Seilsträngen und Kraft: $\beta_{max} := 10 \text{ deg}$
- Winkel zw. Seilsträngen und Kraft bei z_2 : $\beta(z_2) := 6 \text{ deg}$
- Referenzhöhe: $z_{ref} := 10 \text{ m}$
- vorwiegend genutzter Arbeitsbereich:
(für: $Z_{min} = 0 \text{ m}$)
 $z_2 := 7 \text{ m}$
 $z_1 := 1 \text{ m}$



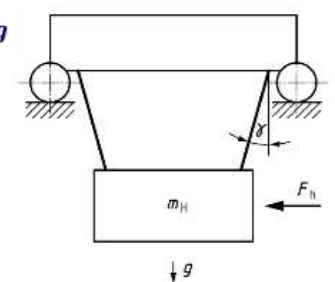
Quelle: DIN EN 13001-3-2

- Auf- und Ablaufwinkel des Seils an Seilrollen und -Trommel:

$$\begin{aligned} \delta_1 &:= 0 \text{ deg} & \delta_2 &:= 0 \text{ deg} & \delta_3 &:= 0 \text{ deg} \\ \delta_4 &:= 0 \text{ deg} & \delta_5 &:= 0 \text{ deg} & \delta_6 &:= 0 \text{ deg} \\ \delta_7 &:= 0 \text{ deg} \end{aligned}$$



- Last an mehreren nicht parallelen Seilen (z.B. Seilpyramide): * $S_{np} := \text{"nein"}$
- Horizontalkraft: $F_h := 0 \text{ N}$
- Winkel zwischen Schwerkraft und projiziertem Seil in der aus F_h und g gebildeten Ebene: $\gamma_{fs3} := 0 \text{ deg}$



Quelle: DIN EN 13001-3-2

Mathcad-Screenshot 8: gewählte Angaben des Seiltriebs

- max. kont. Hubgeschwindigkeit: $v_{h,max} := 0.5 \frac{m}{s}$
- kont. Feinhubgeschwindigkeit: $v_{h,CS} := 0.125 \frac{m}{s}$
- Beschl. Heben/Senken (lt. VDI 3573): $a := 1 \frac{m}{s^2}$
- Beschl. bei Not-Aus (Annahme): $a_{NA} := 3 \frac{m}{s^2}$
- Hubwerktyp (lt. DIN EN 13001-2): (6) $HD := \text{"HD3"}$
- Geschwindigkeitssteuerung: (7) $\kappa_G := 2$
- mittlere Laufzeit pro Tag in Stunden: $t_m := 2$
- gewählte Gesamtzahl von Arbeitsspielen: $C := 5 \cdot 10^5$
- Art des Hubkraftbegrenzers: (8) $H := \text{"indirekt"}$

Mathcad-Screenshot 9: gewählte Angaben des Hubwerks

Tabelle 12: Einteilung der Steuerungen nach Anzahl der Geschwindigkeitsstufen

einstufige Geschwindigkeitssteuerung	$K_G = 1$
zweistufige Geschwindigkeitssteuerung	$K_G = 2$
mehrstufige Geschwindigkeitssteuerung	$K_G = 3$
stufenlose Geschwindigkeitssteuerung	$K_G = 4$

Als Brückenträger des Krans wurde der I-Träger „IPBI 360“ mit einer Länge von 8 m lt. DIN 1025-3 gewählt. Alle relevanten Angaben bezüglich des Trägers konnten direkt aus der DIN 1025-2 übertragen werden (siehe Mathcad-Screenshot 10).

Brückenträger: (I-Träger lt. DIN 1025-3)

- gewählter I-Träger: IPBI 360
- Flächenträgheitsmoment: $I_y := 33090 \text{ cm}^4$
- Länge: $l_{cr} := 8 \text{ m}$
- Masse: $m_g := 112 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot l_{cr} = 896 \text{ kg}$
- E-Modul: $E := 210 \text{ GPa}$

Mathcad-Screenshot 10: gewählte Angaben bezüglich des Brückenträgers⁷²

Um die Langzeitbeanspruchung des Krans zu berechnen, muss angegeben werden, mit welchen Lasten der Kran betrieben wird (siehe Mathcad-Screenshot 11). Für das Rechenbeispiel wurde definiert, dass 50 Prozent der Laufzeit nur die Last von Lastaufnahme- und Anschlagmittel auf den Kran wirkt. Dies stellt die Laufzeit dar, die für Leerfahrten des Krans benötigt wird. Die restliche Laufzeit teilt sich in 3 gleich große Teile auf, in denen maximale, hohe und geringe Lasten bewegt werden (siehe Mathcad-Screenshot 11). In Abbildung 12 ist die gewählte Lastverteilung grafisch dargestellt. Sie entspricht nach DIN 15020 dem Lastkollektiv „mittel“.

Sollten während der Kranfahrt Unebenheiten (Stufen oder Lücken) überfahren werden, müssen diese bezüglich ihrer Geometrie angegeben werden (siehe Mathcad-Screenshot 12). Je nachdem ob bzw. welche Unebenheit vorliegt, wird der Variable λ ein bestimmter Wert zugewiesen (siehe Tabelle 13). In der Beispielrechnung wurde angenommen, dass außer gewöhnlichen Schienenstoßfugen, die laut DIN EN 13001-2 vernachlässigt werden können, keine Unebenheiten vorliegen.⁷³

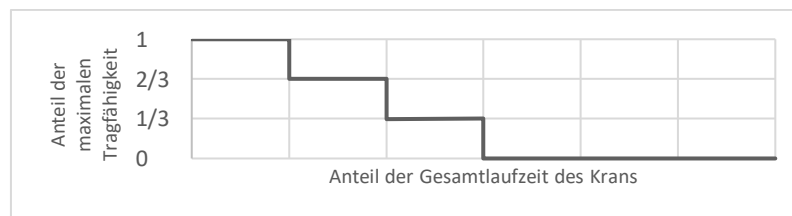


Abbildung 12: Lastkollektiv "mittel" nach DIN 15020

⁷² vgl. DIN 1025-3:1994-3, Warmgewalzte I -Träger; Breite I-Träger, leichte Ausführung, IPBI-Reihe Maße, Masse, statische Werte, 2.

⁷³ vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lastenwirkungen, 16.

Auslastung des Krans:

Belastung 1 (maximale Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_1 := 1$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_1 := \frac{1}{6}$

Belastung 2 (hohe Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_2 := \frac{2}{3}$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_2 := \frac{1}{6}$

Belastung 3 (geringe Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_3 := \frac{1}{3}$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_3 := \frac{1}{6}$

Belastung 4 (nur Gewicht von Lastaufnahme- und Anschlagmittel):

Auslastung der Tragfähigkeit: Anteil an Gesamtlaufzeit:

$$\gamma_- := \frac{m_A + m_L}{m_H} = 0.3$$

$$t_\Delta := 1 - (t_1 + t_2 + t_3) = 0$$

Mathcad-Screenshot 11: anteilige Auslastung des Krans über die Gesamtlaufzeit

Unebenheiten der Fahrbahn:

- Art der Unebenheit: (5) $\lambda := 1$
- Eigenfrequenz des (Einmassen-)Kranmodells: $f_q := 10 \text{ Hz}$
- Stufenhöhe: $h_s := 2 \text{ mm}$
- Lückenbreite: $e_G := 40 \text{ mm}$
- Kranfahrt-Geschwindigkeit: $v_{kran} := 90 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
- Radius des Laufrades: $r_{kran} := 100 \text{ mm}$

Mathcad-Screenshot 12: gewählte Angaben bezüglich Unebenheiten während der Kranfahrt

Tabelle 13: Unterscheidungen nach Art der Unebenheiten während der Kranfahrt

keine Unebenheiten	$\lambda = 1$
Stufe	$\lambda = 2$
Lücke	$\lambda = 3$

Angaben bezüglich der Durchmesser D der Seilrollen, Ausgleichsrollen, und Seiltrommeln, sowie die Mindestbruchkraft F_u des Drahtseils werden erst nach den Ergebnissen der Berechnungen der DIN 15020 gemacht.

4.3 Berechnungen nach DIN 15020 (Dimensionierung)

Wie bereits erwähnt, beinhaltet die DIN 15020, anstatt eines rechnerischen Festigkeitsnachweises, die Dimensionierung des Seiltriebs. Sie kann daher als Ausgangspunkt für den später folgenden Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001 genutzt werden, falls keine oder nur wenige Erfahrungswerte verfügbar sind.

Bestimmung des Lastkollektivs

Wie bereits in 4.2 erwähnt, wird der Kran mit maximaler, mittlerer und geringer Last sowie ohne Last betrieben. Eine nahezu ausschließliche Nutzung unter Volllast würde in einem unzulässig hohen Lastkollektiv resultieren (Ausgabe: „Belastung zu hoch“) und somit einen Kran mit einer höheren Tragfähigkeit erfordern.

Dadurch, dass die Masse der Lastaufnahmemittel m_L nur einen sehr geringen Anteil der Tragfähigkeit m_H beträgt, kann sie in der Berechnung des kubischen Mittelwerts k der Belastungen vernachlässigt werden (siehe Mathcad-Screenshot 13). Dieser liegt zwischen 0,53 und 0,67. Somit wird dem Kran das Lastkollektiv „2“ („mittel“ laut DIN 15020) zugeordnet.

Hilfsgröße

$$\alpha := \frac{m_T}{m_H} = 0.01$$

Hilfsgröße

$$\delta := \frac{m_H}{m_T + m_H} = 0.99$$

kubischer Mittelwert der Belastungen

$$k := \begin{cases} \text{if } \alpha \leq 0.05 \\ \left| \sqrt[3]{(\beta_1 + \gamma_-)^3 \cdot t_1 + (\beta_2 + \gamma_-)^3 \cdot t_2 + (\beta_3 + \gamma_-)^3 \cdot t_3 + \gamma_-^3 \cdot t_\Delta} \right| \\ \text{if } \alpha > 0.05 \\ \left| \sqrt[3]{\delta \cdot ((\beta_1 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_1 + (\beta_2 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_2 + (\beta_3 + \gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_3 + (\gamma_- + \alpha)^3 \cdot t_\Delta)} \right| \end{cases} = 0.606$$

Lastkollektiv

$$LK := \begin{cases} \text{if } k < 0.53 \\ \left| LK \leftarrow 1 \right| \\ \text{if } 0.53 \leq k < 0.67 \\ \left| LK \leftarrow 2 \right| \\ \text{if } 0.67 \leq k \leq 0.85 \\ \left| LK \leftarrow 3 \right| \\ \text{if } k > 0.85 \\ \left| LK \leftarrow \text{„Belastung zu hoch“} \right| \end{cases} = 2$$

Mathcad-Screenshot 13: Bestimmung des Lastkollektivs

Bestimmung der Triebwerksgruppe TG

Damit die zu dimensionierenden Teile der Höhe der Belastung für eine ausreichende Nutzungsdauer standhalten, muss der Kran bezüglich seiner Betriebsweise (Triebwerksgruppe) kategorisiert werden. Die Triebwerksgruppe ist abhängig vom Lastkollektiv, welches im Rechenspiel den Wert „2“ besitzt, und der mittleren täglichen Laufzeit t_m , die hier mit 2 Stunden pro Tag angenommen wurde. Durch den im Mathcad-Screenshot 14 dargestellten Programmierungsblock wird die diesbezügliche Tabelle aus der Norm abgebildet und der Triebwerksgruppen-Variable automatisch der zutreffende Wert zugewiesen.

Triebwerkgruppe

```

TG := | if ((LK = 1) ∧ ((tm ≤ 0.125) ∨ (0.125 < tm ≤ 0.25))) ∨ ((LK = 2) ∧ (tm ≤ 0.125)) | = "1Am"
      | | TG ← "1Em" |
      | if ((LK = 1) ∧ (0.25 < tm ≤ 0.5)) ∨ ((LK = 2) ∧ (0.125 < tm ≤ 0.25)) ∨ ((LK = 3) ∧ (tm ≤ 0.125)) |
      | | TG ← "1Dm" |
      | if ((LK = 1) ∧ (0.5 < tm ≤ 1)) ∨ ((LK = 2) ∧ (0.25 < tm ≤ 0.5)) ∨ ((LK = 3) ∧ (0.125 < tm ≤ 0.25)) |
      | | TG ← "1Cm" |
      | if ((LK = 1) ∧ (1 < tm ≤ 2)) ∨ ((LK = 2) ∧ (0.5 < tm ≤ 1)) ∨ ((LK = 3) ∧ (0.25 < tm ≤ 0.5)) |
      | | TG ← "1Bm" |
      | if ((LK = 1) ∧ (2 < tm ≤ 4)) ∨ ((LK = 2) ∧ (1 < tm ≤ 2)) ∨ ((LK = 3) ∧ (0.5 < tm ≤ 1)) |
      | | TG ← "1Am" |
      | if ((LK = 1) ∧ (4 < tm ≤ 8)) ∨ ((LK = 2) ∧ (2 < tm ≤ 4)) ∨ ((LK = 3) ∧ (1 < tm ≤ 2)) |
      | | TG ← "2m" |
      | if ((LK = 1) ∧ (8 < tm ≤ 16)) ∨ ((LK = 2) ∧ (4 < tm ≤ 8)) ∨ ((LK = 3) ∧ (2 < tm ≤ 4)) |
      | | TG ← "3m" |
      | if ((LK = 1) ∧ (tm > 16)) ∨ ((LK = 2) ∧ (8 < tm ≤ 16)) ∨ ((LK = 3) ∧ (4 < tm ≤ 8)) |
      | | TG ← "4m" |
      | if ((LK = 3) ∧ (tm > 16) ∨ (8 < tm ≤ 16)) ∨ ((LK = 2) ∧ (tm > 16)) |
      | | TG ← "5m" |
  
```

Mathcad-Screenshot 14: Bestimmung der Triebwerkgruppe

Bestimmung des Seiltrieb-Wirkungsgrads η_s

Je nachdem ob es sich bei den vorliegenden Seilrollen-Lagern um Gleit- oder Wälzlager handelt, wird der passende Seilrollen-Wirkungsgrad η ausgewählt. Sollten genauere Werte für den Seilrollen-Wirkungsgrad η der Lager bekannt sein, dürfen diese anstatt den Werten aus der Norm verwendet werden.⁷⁴ Der Wirkungsgrad η_s des gesamten Seiltriebs kann anschließend anhand der Anzahl der Seilstränge n_m und festen Seilrollen n_s berechnet werden.

Im Rechenbeispiel wurden Wälzlager für die Lagerung der Seilrollen gewählt.

⁷⁴ vgl. DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung, 9.

Wirkungsgrad einer Seilrolle

$$\eta := \left\| \begin{array}{l} \text{if } LA = \text{"Wälzlager"} \\ \quad \eta \leftarrow 0.98 \\ \text{if } LA = \text{"Gleitlager"} \\ \quad \eta \leftarrow 0.96 \end{array} \right\| = 0.98$$

Seiltrieb-Wirkungsgrad

$$\eta_S := \eta^{n_s} \cdot \frac{1}{n_m} \cdot \frac{1 - \eta^{n_m}}{1 - \eta} = 0.951$$

Mathcad-Screenshot 15: Bestimmung des Seiltrieb-Wirkungsgrads

Bestimmung der Seilkraft S

Die Seilkraft S in einem Seiltrieb setzt sich nach DIN 15020 aus mehreren möglichen Komponenten zusammen. Je nach Größe des Einflusses der einzelnen Anteile, werden diese berücksichtigt oder vernachlässigt. Für den Beispielkran beträgt die aus der Beschleunigung resultierende Kraft S_a mehr als 10 % der statischen Seilkraft S_m und muss deshalb berücksichtigt werden. Auch die zusammengesetzte Seilkrafterhöhung S_η aus Seiltrieb Wirkungsgrad und Masse der Tragmittel darf nicht vernachlässigt werden, da sie über 5 % der statischen Seilkraft beträgt.

Die Abkürzungen der Seilkraftkomponenten wurden selbst definiert und entstammen nicht der DIN 15020.

max. Seilkraft

max. Seilkraftanteil durch Hublast

$$S_m := \frac{m_H \cdot g}{n_m} = 12.258 \text{ kN}$$

max. Seilkrafterhöhung durch Beschleunigung

$$S_a := \frac{m_H \cdot a}{n_m} = 1.25 \text{ kN}$$

max. Seilkrafterhöhung durch Seiltrieb Wirkungsgrad und Masse der Tragmittel

$$S_\eta := \frac{(m_H + m_T) \cdot g}{n_m \cdot \eta_S} - S_m = 0.761 \text{ kN}$$

$$S := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \left(\frac{S_a}{S_m} > 0.1 \right) \wedge \left(\frac{S_\eta}{S_m} > 0.05 \right) \\ \quad S \leftarrow S_a + S_\eta + S_m \\ \text{if } \left(\frac{S_a}{S_m} > 0.1 \right) \wedge \left(\frac{S_\eta}{S_m} \leq 0.05 \right) \\ \quad S \leftarrow S_a + S_m \\ \text{if } \left(\frac{S_a}{S_m} \leq 0.1 \right) \wedge \left(\frac{S_\eta}{S_m} > 0.05 \right) \\ \quad S \leftarrow S_\eta + S_m \\ \text{if } \left(\frac{S_a}{S_m} \leq 0.1 \right) \wedge \left(\frac{S_\eta}{S_m} \leq 0.05 \right) \\ \quad S \leftarrow S_m \end{array} \right\| = 14.269 \text{ kN}$$

Mathcad-Screenshot 16: Bestimmung der Seilkraft

Bestimmung des Beiwerts c

Aufgrund der leicht abweichenden Einstufung von Risiken bezüglich der für den Kran vorgesehenen Transporte in DIN 15020 und DIN EN 13001, werden die 3 möglichen Risikogruppen in „übliche Transporte“ ($\triangleq$ Risikoklasse 0) und „gefährliche Transporte“ ($\triangleq$ Risikoklasse 1 & 2) zusammengefasst.

$$TA := \left\| \begin{array}{l} \text{if } RK = 0 \\ \quad TA \leftarrow 1 \\ \text{if } (RK = 1) \vee (RK = 2) \\ \quad TA \leftarrow 2 \end{array} \right\| = 1$$

Mathcad-Screenshot 17: Zusammenfassen der Risikoklassen aus DIN EN 13001

Sowohl für drehungsfreie als auch für nicht drehungsfreie Seile wird anhand von Drahtseilwerkstoff R_r , Risiko des Transports TA und der Triebwerksgruppe TG jeweils ein Wert c für drehungsfreie (c_{df}) und nicht drehungsfreie Seile (c_{ndf}) ausgewählt.

```

cndf := if (TG = "1Em") ∧ (Rr = 2450 MPa) ∧ (TA = 1)                                     = 0.085
    || cndf ← 0.056
    if (((TG = "1Dm") ∧ (Rr = 2450 MPa)) ∨ ((TG = "1Em") ∧ (Rr = 2160 MPa))) ∧ (TA = 1)
        || cndf ← 0.06
        if (((TG = "1Dm") ∧ (Rr = 2160 MPa)) ∨ ((TG = "1Em") ∧ (Rr = 1960 MPa))) ∧ (TA = 1)
            || cndf ← 0.063
            if ((TG = "1Cm") ∧ ((Rr = 2160 MPa) ∨ (Rr = 2450 MPa))) ∧ (TA = 1)
                || cndf ← 0.067
                if (((TG = "1Dm") ∧ (Rr = 1960 MPa)) ∨ ((TG = "1Em") ∧ (Rr = 1770 MPa))) ∧ (TA = 1)
                    || cndf ← 0.067
                    if (((TG = "1Cm") ∧ (Rr = 1960 MPa)) ∨ ((TG = "1Dm") ∧ (Rr = 1770 MPa))) ∧ (TA = 1)
                        || cndf ← 0.071
                        if (((TG = "1Bm") ∧ (Rr = 1960 MPa)) ∨ ((TG = "1Cm") ∧ (Rr = 1770 MPa))) ∧ (TA = 1)
                            || cndf ← 0.075
                            if (TG = "1Bm") ∧ (Rr = 1770 MPa) ∧ (TA = 1)
                                || cndf ← 0.08
                                if (TG = "1Am") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                    || cndf ← 0.085
                                    if ((TG = "1Bm") ∧ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                        || cndf ← 0.085
                                        if (TG = "1Am") ∧ (Rr = 1570 MPa) ∧ (TA = 1)
                                            || cndf ← 0.09
                                            if (TG = "2m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                                || cndf ← 0.095
                                                if (TG = "1Am") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 2)
                                                    || cndf ← 0.095
                                                    if (TG = "3m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                                        || cndf ← 0.106
                                                        if (TG = "2m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 2)
                                                            || cndf ← 0.106
                                                            if (TG = "4m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                                                || cndf ← 0.118
                                                                if (TG = "3m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 2)
                                                                    || cndf ← 0.118
                                                                    if (TG = "5m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 1)
                                                                        || cndf ← 0.132
                                                                        if (TG = "4m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 2)
                                                                            || cndf ← 0.132
                                                                            if (TG = "5m") ∧ ((Rr = 1960 MPa) ∨ (Rr = 1770 MPa) ∨ (Rr = 1570 MPa)) ∧ (TA = 2)
                                                                                || cndf ← 0.15

```

Mathcad-Screenshot 18: Bestimmung des Beiwerts c für nicht drehungsfreie Seile

$$\begin{aligned}
 c_{df} := & \left| \begin{array}{l} \text{if } (TG = \text{"1Em"}) \wedge (R_r = 1960 \text{ MPa}) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.067 \right. \\ \text{if } (((TG = \text{"1Dm"}) \wedge (R_r = 1960 \text{ MPa})) \vee ((TG = \text{"1Em"}) \wedge (R_r = 1770 \text{ MPa}))) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.071 \right. \\ \text{if } (((TG = \text{"1Cm"}) \wedge (R_r = 1960 \text{ MPa})) \vee ((TG = \text{"1Dm"}) \wedge (R_r = 1770 \text{ MPa}))) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.075 \right. \\ \text{if } (((TG = \text{"1Bm"}) \wedge (R_r = 1960 \text{ MPa})) \vee ((TG = \text{"1Cm"}) \wedge (R_r = 1770 \text{ MPa}))) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.08 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"1Bm"}) \wedge (R_r = 1770 \text{ MPa}) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.085 \right. \\ \text{if } (((TG = \text{"1Am"}) \wedge (R_r = 1960 \text{ MPa})) \vee ((TG = \text{"1Bm"}) \wedge (R_r = 1570 \text{ MPa}))) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.09 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"1Am"}) \wedge ((R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.095 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"2m"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.106 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"1Am"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 2) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.106 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"3m"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.118 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"2m"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 2) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.118 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"4m"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.132 \right. \\ \text{if } (TG = \text{"5m"}) \wedge ((R_r = 1960 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1770 \text{ MPa}) \vee (R_r = 1570 \text{ MPa})) \wedge (TA = 1) \\ \quad \left| c_{df} \leftarrow 0.150 \right. \end{array} \right| = 0.09
 \end{aligned}$$

Mathcad-Screenshot 19: Bestimmung des Beiwerts c für drehungsfreie Seile

Zuletzt wird überprüft, ob ein drehungsfreies oder nicht drehungsfreies Drahtseil vorliegt und anschließend der entsprechende Beiwert c bestimmt.

$$c := \left| \begin{array}{l} \text{if } SA = \text{"df"} \\ \quad \left| c \leftarrow c_{df} \cdot \frac{\text{mm}}{\sqrt{N}} \right. \\ \text{if } SA = \text{"ndf"} \\ \quad \left| c \leftarrow c_{ndf} \cdot \frac{\text{mm}}{\sqrt{N}} \right. \end{array} \right| = 0.09 \frac{\text{mm}}{\sqrt{N}}$$

Mathcad-Screenshot 20: Auswahl des Beiwerts c nach Art des Drahtseils

Bestimmung des Seildurchmessers d_r

Nachdem sowohl die Seilkraft S als auch der Beiwert c bekannt sind, kann der Mindestseildurchmesser d_{min} bestimmt werden. Da ein überdimensionierter Seildurchmesser die Auftriegszeit des Seils negativ beeinflusst, darf der Seildurchmesser nicht mehr als das 1,25-fache des Mindestdurchmessers betragen. In der Berechnung wird der Mindestdurchmesser daher automatisch auf die nächste ganze Zahl aufgerundet und diese als Seildurchmesser d_r gewählt. Das Aufrunden ist jedoch nicht in der Norm vorgeschrieben. Sollte laut dem Nachweis der DIN EN 13001 ein größerer Seildurchmesser benötigt werden bzw. der automatisch bestimmte Durchmesser des gewählten Drahtseils nicht verfügbar sein, kann später in der Berechnung ein anderer Wert manuell zugewiesen werden.

Mindestseildurchmesser

$$d_{min} := c \cdot \sqrt{S} = 10.751 \text{ mm}$$

maximaler Seildurchmesser

$$d_{max} := d_{min} \cdot 1.25 = 13.438 \text{ mm}$$

Mindestseildurchmesser gerundet (gewählt)

$$d_r := \text{round}\left(\frac{d_{min} + 0.5 \text{ mm}}{\text{mm}}, 0\right) \text{ mm} = 11 \text{ mm}$$

Mathcad-Screenshot 21: Bestimmung des Seildurchmessers

Bestimmung des Seiltrommeldurchmessers D_{drum}

Neben dem bereits berechneten Mindestseildurchmesser d_{min} werden für die Berechnung der Mindestdurchmesser D_{min} von Seilrollen, Seiltrommeln und Ausgleichsrollen jeweils die dazu passenden Beiwerte h_1 sowie h_2 benötigt. Für ein drehungsfreies Drahtseil und die Triebwerksgruppe „1Am“ ergibt sich für den Beiwert h_1 der Seiltrommel ein Wert von 18. Für Seiltrommeln darf für den Beiwert h_2 der Wert 1 gewählt werden. Das gilt ebenso für Ausgleichsrollen, Serienhebezeuge und Greifer.

Nach der Berechnung des Mindestdurchmessers der Seiltrommel wird das Ergebnis auf die nächste ganze Zahl aufgerundet und als neuer Seiltrommeldurchmesser D_{drum} festgelegt. Wie bereits bezüglich der Bestimmung des Drahtseildurchmessers d_r erwähnt, ist das Aufrunden des Mindestdurchmessers auf ganze Millimetermaße auch

für Seilrollen, Ausgleichsrollen und Seiltrommeln nicht in der DIN 15020 vorgeschrieben.

Beiwert h_1 für Seiltrommeln

```


$$h_{1t} := \begin{cases} \text{if } (SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"1Em"}) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 10 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"1Dm"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"1Em"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 11.2 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"1Cm"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"1Dm"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 12.5 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"1Bm"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"1Cm"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 14 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"1Am"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"1Bm"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 16 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"2m"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"1Am"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 18 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"3m"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"2m"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 20 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"4m"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"3m"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 22.4 \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (TG = \text{"5m"}) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"4m"}))) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 25 \\ \text{if } (SA = \text{"df"}) \wedge (TG = \text{"5m"}) \\ \quad h_{1t} \leftarrow 28 \end{cases} = 18$$


```

Beiwert h_2 für Seiltrommeln

$h_{2t} := 1$

Mindestseiltrommeldurchmesser

$D_{min_t} := d_{min} \cdot h_{1t} \cdot h_{2t} = 193.513 \text{ mm}$

Mindestseiltrommeldurchmesser gerundet

$D_{drum} := \text{round}\left(\frac{D_{min_t} + 0.5 \text{ mm}}{\text{mm}}, 0\right) \text{ mm} = 194 \text{ mm}$

Mathcad-Screenshot 22: Bestimmung des Seiltrommeldurchmessers

Bestimmung des Seilrollendurchmessers D_{sheave}

Äquivalent zur vorherigen Berechnung des Mindestseiltrommeldurchmessers D_{min_t} werden die Beiwerte h_1 , h_2 und anschließend der Mindestseilrollendurchmesser D_{min_r} bestimmt und aufgerundet. Der Beiwert h_2 ist diesmal jedoch von der Anzahl der relevanten Biegewechsel w abhängig. Sollte im Seiltrieb keine einzige Seilrolle vorhanden sein, wird dennoch vorerst ein Mindestdurchmesser für sie in der Berechnung bestimmt. In der später folgenden Berechnung der Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 werden vernachlässigbare Größen automatisch anhand der Angaben ausgefiltert.

Beiwert h1 für Seilrollen

```

h1r := if (SA = "ndf") ∧ (TG = "1Em")
      || h1r ← 11.2
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "1Dm")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "1Em"))
      || h1r ← 12.5
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "1Cm")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "1Dm"))
      || h1r ← 14
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "1Bm")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "1Cm"))
      || h1r ← 16
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "1Am")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "1Bm"))
      || h1r ← 18
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "2m")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "1Am"))
      || h1r ← 20
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "3m")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "2m"))
      || h1r ← 22.4
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "4m")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "3m"))
      || h1r ← 25
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "5m")) ∨ ((SA = "df") ∧ (TG = "4m"))
      || h1r ← 28
      if (SA = "df") ∧ (TG = "5m")
      || h1r ← 31.5
  
```

= 20

Beiwert h2 für Seilrollen

```

h2r := if w ≤ 5
      || h2r ← 1
      if 5 < w ≤ 9
      || h2r ← 1.12
      if 9 < w
      || h2r ← 1.25
  
```

= 1.12

Mindestseilrollendurchmesser

$$D_{min,r} := d_{min} \cdot h_{1r} \cdot h_{2r} = 240.817 \text{ mm}$$

Mindestseilrollendurchmesser gerundet

$$D_{sheave} := \text{round}\left(\frac{D_{min,r} + 0.5 \text{ mm}}{\text{mm}}, 0\right) \text{ mm} = 241 \text{ mm}$$

Mathcad-Screenshot 23: Bestimmung des Seilrollendurchmessers

Bestimmung des Ausgleichsrollendurchmessers D_{comp}

Nachdem die Beiwerte h_1 und h_2 ausgewählt und der Minstdurchmesser $D_{min,a}$ der Ausgleichsrollen berechnet wurde, wird auch er auf das nächste ganze Millimetermaß gerundet. Da in diesem Rechenbeispiel keine Ausgleichsrolle vorhanden ist, kann diese Größe in den Ergebnissen vernachlässigt werden.

Beiwert h1 für Ausgleichrollen

```

h1a := if (SA = "ndf") ∧ ((TG = "1Em") ∨ (TG = "1Dm"))
      || h1a ← 10
      if (SA = "ndf") ∧ ((TG = "1Cm") ∨ (TG = "1Bm"))
      || h1a ← 12.5
      if (SA = "df") ∧ ((TG = "1Em") ∨ (TG = "1Dm"))
      || h1a ← 12.5
      if (SA = "ndf") ∧ ((TG = "1Am") ∨ (TG = "2m"))
      || h1a ← 14
      if (SA = "df") ∧ ((TG = "1Cm") ∨ (TG = "1Bm"))
      || h1a ← 14
      if (SA = "ndf") ∧ ((TG = "3m") ∨ (TG = "4m"))
      || h1a ← 16
      if (SA = "df") ∧ ((TG = "1Am") ∨ (TG = "2m"))
      || h1a ← 16
      if ((SA = "ndf") ∧ (TG = "5m")) ∨ ((SA = "df") ∧ ((TG = "3m") ∨ (TG = "4m")))
      || h1a ← 18
      if (SA = "df") ∧ (TG = "5m")
      || h1a ← 20
  
```

= 16

Beiwert h2 für Ausgleichsrollen

$$h_{2a} := 1$$

Ausgleichsrollendurchmesser

$$D_{min,a} := d_{min} \cdot h_{1a} \cdot h_{2a} = 172.012 \text{ mm}$$

Ausgleichsrollendurchmesser gerundet

$$D_{comp} := \text{round}\left(\frac{D_{min,a} + 0.5 \text{ mm}}{\text{mm}}, 0\right) \text{ mm} = 173 \text{ mm}$$

Mathcad-Screenshot 24: Bestimmung der Ausgleichsrollendurchmessers

Ergebnisse der Seiltriebdimensionierung nach DIN 15020

Die Ergebnisse der Seiltriebdimensionierung im Mathcad-Screenshot 25 zeigen die gerundeten Minstdurchmesser für Drahtseil, Seiltrommel, Ausgleichsrollen und Seilrollen, die den Beanspruchungen der relevanten Angaben aus 4.2 standhalten und für eine ausreichend lange Aufliegezeit des Drahtseils sorgen.

Der Mindestausgleichsrollendurchmesser kann aufgrund der fehlenden Ausgleichsrolle in der Beispielrechnung vernachlässigt werden.

Mindestseildurchmesser:	$d_r = 11 \text{ mm}$
Mindestseiltrommeldurchmesser:	$D_{\text{drum}} = 194 \text{ mm}$
Mindestseilrollendurchmesser:	$D_{\text{sheave}} = 241 \text{ mm}$
Mindestausgleichsrollendurchmesser:	$D_{\text{comp}} = 173 \text{ mm}$

Mathcad-Screenshot 25: Ergebnisse der Seiltriebdimensionierung nach DIN 15020

4.4 Berechnungen nach DIN EN 13001 (Festigkeitsnachweis)

Wie bereits erwähnt dienen die Ergebnisse der DIN 15020 zur vorläufigen Dimensionierung des Drahtseils und der Komponenten des Seiltriebs und sind keinesfalls zwingend für die DIN EN 13001 zu übernehmen. Sollte die Dimensionierung nach DIN 15020 für die zuvor definierten Angaben zu einem negativen Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001 führen, müssen die Durchmesser von Drahtseil, Seilrollen, Ausgleichsrollen und Seiltrommeln größer gewählt werden. In diesem Rechenbeispiel wurden die nach DIN 15020 berechneten Minstdurchmesser für Seilrollen D_{sheave} und Seiltrommel D_{drum} lediglich auf volle Zentimetermaße aufgerundet, während der Drahtseildurchmesser d_r übernommen wurde (siehe Mathcad-Screenshot 26).

Die Bestimmung des Rillenradius r_g wurde vorgezogen und erfolgt nach Tabelle 6 („Faktor f_{t6} “) der DIN EN 13001-3-2, während die Mindestseilbruchkraft F_u dem Datenblatt des Herstellers entnommen wurde (siehe Abbildung 13).

Seildurchmesser:	$d_r = 11 \text{ mm}$	$d_{max} = 13.438 \text{ mm}$
Mindestseilbruchkraft:	$F_u := 92.1 \text{ kN}$	
Rillenradius der Seilrolle:	$r_g := \text{round}\left(\frac{d_r \cdot 0.53 + 0.05 \text{ mm}}{\text{mm}}, 1\right) \text{ mm} = 5.9 \text{ mm}$	
Seiltrommeldurchmesser:	$D_{drum} := 200 \text{ mm}$	
Seilrollendurchmesser:	$D_{sheave} := 250 \text{ mm}$	
Ausgleichsrollendurchmesser:	$D_{comp} = 173 \text{ mm}$	

Mathcad-Screenshot 26: gewählte Werte der Seiltriebdimensionierung für den Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001

Nominal Dia- meter // Nenn- durchmesser		Weight // Gewicht		Minimum Breaking Force // Mindestbruchkraft							
				1770 N/mm ²				1960 N/mm ²			
mm	inch	kg/m	lb/ft	kN	t [metric]	lbs	t (2000 lbs)	kN	t [metric]	lbs	t (2000 lbs)
7		0,22	0,15	34,1	3,48	7.666	3,83	37,8	3,85	8.498	4,25
8	5/16	0,29	0,19	44,5	4,54	10.004	5,00	49,3	5,03	11.083	5,54
9		0,37	0,25	55,4	5,65	12.454	6,23	61,3	6,25	13.781	6,89
10		0,46	0,31	69,2	7,06	15.557	7,78	76,6	7,81	17.220	8,61
11	7/16	0,55	0,37	83,1	8,47	18.682	9,34	92,1	9,39	20.705	10,35
12		0,66	0,44	99,9	10,19	22.458	11,23	110,7	11,29	24.886	12,44
	1/2	0,72	0,48	111,7	11,39	25.111	12,56	114,1	11,64	25.651	12,83
13		0,77	0,52	117,3	11,96	26.370	13,19	129,8	13,24	29.180	14,59
14		0,89	0,60	135,9	13,86	30.552	15,28	150,5	15,35	33.834	16,92
15		1,04	0,70	154,3	15,94	35.138	17,57	173,0	17,64	39.997	19,45

Abbildung 13: Ausschnitt des Datenblatts des gewählten Drahtseils

4.4.1 statischer Festigkeitsnachweis

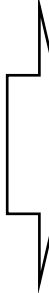
Wie bereits in 2.2.2.1 beschrieben, sind für die Berechnung der Seilkraft $F_{Sd,s}$ und der Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ für den Nachweis der statischen Festigkeit eine Vielzahl von Faktoren und Beiwerten zu bestimmen. Diese sind:

- Dynamik-Beiwerte: ϕ_2 , ϕ_{2C} , ϕ_4 , ϕ_5 , ϕ_{5NA} , ϕ_{6stat} , ϕ_{6dyn} und ϕ_L
- Seilkrafterhöhungsfaktoren: f_{s1} , f_{s2} und f_{s3}
- Risikobeiwert: γ_n
- Teilsicherheitsbeiwert: γ_p
- minimaler Seilwiderstandsbeiwert für den statischen Festigkeitsnachweis: γ_{rb}

Obwohl die Dynamik-Beiwerte ϕ für regelmäßige Lasten (Lastfälle A) im Normalfall einen kleineren Wert besitzen sollten als jene für nicht regelmäßige Lasten und Sonderlasten (Lastfälle B und C), müssen sie dennoch für den statischen Festigkeitsnachweis berücksichtigt und somit bestimmt werden. Sie können jedoch für den später folgenden Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ohne Änderungen übernommen werden.

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_2

Um den Dynamik-Beiwert Φ_2 zu berechnen, müssen zuerst die Steifigkeitsverhältnisse des Systems analysiert werden. In dieser Berechnung wurde die Variante nach Anhang C der DIN EN 15011 gewählt. Dazu wird mittels eines Masse-Feder-Modells der Abhebevorgang der Last vom Boden simuliert und der Einfluss der Systemsteifigkeit ermittelt, um den Beiwert Φ_{2t} zu erhalten. Neben der Definition einiger benötigter Größen, die sich ohne weitere nennenswerte Zwischenschritte aus den Angaben berechnen lassen, muss der sogenannte Abhebezeitpunkt τ_a iterativ bestimmt werden (siehe Mathcad-Screenshot 27).

Seilquerschnittsfläche	Steifigkeit des Trägers in der Mitte		Schätzwerte Nebenbedingungen Gleichungslöser	
$A_r := d_r^2 \cdot \frac{\pi}{4} = (9.503 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^2$	$c_g := \frac{48 \cdot E \cdot I_y}{l_{cr}^3} = (6.515 \cdot 10^6) \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$			$\tau_a := 11$
Steifigkeit eines Seils (1m Seillänge)	Ersatzmasse (Kran und Laufkatze)			$\tau_a = \tau_{a,rig} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma} - \frac{\sin(p_D \cdot \tau_a)}{p_D \cdot \gamma}$
$c_{rm} := R_r \cdot A_r = (1.863 \cdot 10^5) \text{ N}$	$m_e := \frac{17}{35} \cdot m_g + m_{kr} = 655.2 \text{ kg}$			
Steifigkeit des Seils	Massenverhältnis			
$c_r := \frac{n_m \cdot c_{rm}}{l} = (7.451 \cdot 10^4) \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$	$\mu := \frac{m_e}{m_H} = 0.131$			
Steifigkeitsverhältnis	Winkelgeschwindigkeit	$\tau_a := \text{Find}(\tau_a) = 20.556$		
$\gamma := \frac{c_g}{c_r} = 87.437$	$\omega := \sqrt{\frac{c_r}{m_H}} = 3.86 \frac{1}{\text{s}}$			
Frequenzparameter	Parameter des Abhebezeitpunkts			
$p_D := \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\mu}} = 25.979$	$\tau_{a,rig} := \frac{g}{v_{h,CS} \cdot \omega} = 20.324$			

Mathcad-Screenshot 27: Berechnung des Abhebezeitpunkts (Bestimmung von Φ_{2t})

Anschließend können die Abhebekoordinate Z_{cr} und -geschwindigkeit $Z_{cr,p}$ sowie weitere Hilfsgrößen, die für die Funktion $\Phi_{h,t}(t)$ des Masse-Feder-Modells benötigt werden, berechnet werden (siehe Mathcad-Screenshot 28).

Abhebekoordinate	Abhebegeschwindigkeit
$Z_{cr} := \frac{v_{h,CS}}{\omega \cdot (\gamma + 1)} \cdot \left(\tau_a - \frac{1}{p_D} \cdot \sin(p_D \cdot \tau_a) \right) = 7.527 \text{ mm}$	$Z_{cr,p} := \frac{v_{h,CS}}{\gamma + 1} \cdot (1 - \cos(p_D \cdot \tau_a)) = 0.002 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Hilfsgrößen	
$p := \sqrt{\frac{\mu + \gamma + 1}{2 \cdot \mu} - \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot (\mu + \gamma + 1)^2 - 4 \cdot \mu \cdot \gamma} = 0.994$	$z_0 := \frac{m_H \cdot g - c_g \cdot Z_{cr}}{\mu \cdot m_H \cdot \omega^2} = -0.516 \text{ mm}$
$q := \sqrt{\frac{\mu + \gamma + 1}{2 \cdot \mu} + \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot (\mu + \gamma + 1)^2 - 4 \cdot \mu \cdot \gamma} = 25.979$	

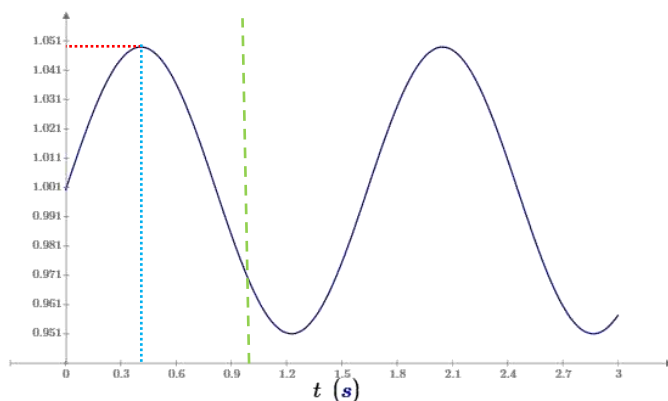
Mathcad-Screenshot 28: Berechnung von Abhebekoordinate und -geschwindigkeit sowie Hilfsgrößen (Bestimmung von Φ_{2t})

Nachdem die Funktion aufgestellt wurde, kann sie graphisch ausgegeben und für jeden Zeitpunkt t ausgewertet werden. Für die graphische Darstellung wurde eine Auflösung von 0,001 Sekunden-Schritten und ein Zeitintervall von 0-3 Sekunden gewählt. Da laut EN 150011 das Funktionsmaximum innerhalb dieses Zeitintervalls bzw. der ersten Periode ermittelt werden muss, wurde der Zeitpunkt $t_{\max}$ des Funktionsmaximums bestimmt.⁷⁵ Dazu wurde das Intervall von 0-1 Sekunden, in dem das Funktionsmaximum graphisch erkannt wurde, nach dem Funktionsmaximum durchsucht. Die Auswertung der Funktion bei $t_{\max}$ liefert anschließend den Beiwert Φ_{2t} .

dynamischer Seilkraftbeiwert

$t := 0 \text{ s}, 0.01 \text{ s} \dots 3 \text{ s}$

$$\phi_{h,t}(t) := 1 + v_{h,CS} \cdot \left(\frac{\omega}{g} \right) \cdot \frac{(1-q^2) \cdot p \cdot \sin(p \cdot \omega \cdot t) - (1-p^2) \cdot q \cdot \sin(q \cdot \omega \cdot t)}{p^2 - q^2} \downarrow \\ - z_0 \cdot \left(\frac{\omega^2}{g} \right) \cdot \frac{(\cos(q \cdot \omega \cdot t) - \cos(p \cdot \omega \cdot t))}{p^2 - q^2} \downarrow \\ - Z_{cr,p} \cdot \left(\frac{\omega}{g} \right) \cdot \frac{(p \cdot \sin(p \cdot \omega \cdot t) - q \cdot \sin(q \cdot \omega \cdot t))}{p^2 - q^2}$$



$t := 1 \text{ s}$

$t_{\max} := \text{maximize}(\phi_{h,t}, t) = 0.406 \text{ s}$

$\phi_{h,t,1} := \phi_{h,t}(t_{\max}) = 1.049$

$\phi_{h,t}(t) \text{ (1)}$

Mathcad-Screenshot 29: Funktion des Masse-Feder-Modells inklusive Auswertung (Bestimmung von Φ_{2t})

Für den Fall, dass aufgrund fehlender Informationen die Berechnung eines Modells nicht möglich sein sollte, wurde zusätzlich die Variante der Abschätzung von Φ_{2t} mittels Formel 1 der EN 150011 in die Berechnung hinzugefügt (siehe Mathcad-Screenshot 30). Aufgrund der erwarteten höheren Genauigkeit der Modellrechnung, wird jedoch deren Ergebnis als Φ_{2t} definiert.

⁷⁵ vgl. DIN EN 15011:2014-09, Krane – Brücken- und Portalkrane, 17.

alternativ:

$$Z_a := \frac{n_m \cdot F_u}{m_H \cdot g} = 7.513$$

$$\phi_{h.t.2} := 1 + \frac{2.8 \cdot v_{h.CS} \cdot \frac{s}{m}}{0.45 + \left(\frac{R_r \cdot \frac{1}{MPa} \cdot l \cdot \frac{1}{m}}{1500 \cdot Z_a} \right)^{\frac{1}{2}}} = 1.198$$

Masse-Feder-Modell
 $\phi_{h.t.1} = 1.049$

Formel
 $\phi_{h.t.2} = 1.198$

$$\phi_{2t} := \phi_{h.t.1}$$

Mathcad-Screenshot 30: Bestimmung von ϕ_{2t} mittels vereinfachter Gleichung

Anhand des Beiwerts ϕ_{2t} und der maximalen kontinuierlichen Hubgeschwindigkeit $v_{h,max}$ des Krans lassen sich nun die Steifigkeitsklasse HC und der Beiwert β_2 ermitteln (siehe Mathcad-Screenshot 31). Die für diesen Kran resultierende Steifigkeitsklasse HC1 entspricht der geringstmöglichen Steifigkeit, welche sich positiv auf eine geringe Seilkraft $F_{Sd,s}$ auswirkt.

$$HC := \begin{cases} \text{if } \phi_{2t} \leq 1.07 + 0.24 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} \\ \quad HC \leftarrow \text{"HC1"} \\ \text{if } 1.07 + 0.24 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} < \phi_{2t} \leq 1.12 + 0.41 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} \\ \quad HC \leftarrow \text{"HC2"} \\ \text{if } 1.12 + 0.41 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} < \phi_{2t} \leq 1.17 + 0.58 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} \\ \quad HC \leftarrow \text{"HC3"} \\ \text{if } 1.17 + 0.58 \cdot v_{h,max} \cdot \frac{s}{m} < \phi_{2t} \\ \quad HC \leftarrow \text{"HC4"} \end{cases} = \text{"HC1"} \quad \beta_2 := \begin{cases} \text{if } HC = \text{"HC1"} \\ \quad \beta_2 \leftarrow 0.17 \frac{s}{m} \\ \text{if } HC = \text{"HC2"} \\ \quad \beta_2 \leftarrow 0.34 \frac{s}{m} \\ \text{if } HC = \text{"HC3"} \\ \quad \beta_2 \leftarrow 0.51 \frac{s}{m} \\ \text{if } HC = \text{"HC4"} \\ \quad \beta_2 \leftarrow 0.68 \frac{s}{m} \end{cases} = 0.17 \frac{s}{m}$$

Mathcad-Screenshot 31: Bestimmung der Steifigkeitsklasse und des Beiwerts β_2

Der Dynamik-Beiwert ϕ_2 bzw. ϕ_{2C} berücksichtigt auch die Hubgeschwindigkeit, die zum Zeitpunkt des Abhebens der Last vorliegt. Diese wird daher im nächsten Schritt für die Lastfälle A1 und C1 bestimmt (siehe Mathcad-Screenshot 32). Während in diesem Rechenbeispiel die Last im Normalbetrieb (A1) mit dem Feinhub angehoben wird, kann für den Lastfall C1 keine Hubgeschwindigkeit zugeordnet werden. Dieser Lastfall ist nämlich für den gewählten Hubwerkstyp HD3 per Definition nicht möglich, weil die Steuerung des Hubwerksantriebs den Feinhub automatisch während des Aufhebens der Last beibehält. Um die Berechnung kompatibel für alle Hubwerkstypen zu gestalten, wird in solchen Fällen dennoch ein Beiwert ϕ_{2C} bestimmt, der allerdings keinen Einfluss auf das Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweis besitzt. Dafür wird die Geschwindigkeit v_{hc} auf 0 m/s gesetzt werden, womit laut Mathcad-Screenshot

33 gilt: $\Phi_{2C} < \Phi_2$. Somit kann der Lastfall C1 keinesfalls als kritischer Lastfall ausgewählt werden.

$$v_h := \left\| \begin{array}{l} \text{if } HD = \text{"HD1"} \\ \quad v_h \leftarrow v_{h,max} \\ \text{if } (HD = \text{"HD2"}) \vee (HD = \text{"HD3"}) \\ \quad v_h \leftarrow v_{h,CS} \\ \text{if } HD = \text{"HD4"} \\ \quad v_h \leftarrow 0.5 \cdot v_{h,max} \\ \text{if } HD = \text{"HD5"} \\ \quad v_h \leftarrow 0 \frac{m}{s} \end{array} \right\| = 0.125 \frac{m}{s}$$

$$v_{hc} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } (HD = \text{"HD2"}) \vee (HD = \text{"HD4"}) \\ \quad v_{hc} \leftarrow v_{h,max} \\ \text{if } HD = \text{"HD5"} \\ \quad v_{hc} \leftarrow 0.5 \cdot v_{h,max} \\ \text{if } (HD = \text{"HD1"}) \vee (HD = \text{"HD3"}) \\ \quad v_{hc} \leftarrow 0 \frac{m}{s} \end{array} \right\| = 0 \frac{m}{s}$$

Mathcad-Screenshot 32: Bestimmung der Hubgeschwindigkeiten für die Lastfälle A1 und C1

Je nach Kombination von Steifigkeits- und Hubklasse erhält man den Mindestwert $\Phi_{2,min}$, der letztendlich mit dem Produkt des Beiwerts β_2 und der Lastfall-spezifischen Hubgeschwindigkeit v_h bzw. v_{hc} zum Dynamik-Beiwert Φ_2 bzw. Φ_{2C} addiert wird (siehe Mathcad-Screenshot 33).

$$\Phi_{2,min} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } (HC = \text{"HC1"}) \vee (HD = \text{"HD3"}) \vee (HD = \text{"HD5"}) \\ \quad \Phi_{2,min} \leftarrow 1.05 \\ \text{if } (HC = \text{"HC2"}) \wedge ((HD = \text{"HD1"}) \vee (HD = \text{"HD2"}) \vee (HD = \text{"HD4"})) \\ \quad \Phi_{2,min} \leftarrow 1.1 \\ \text{if } (HC = \text{"HC3"}) \wedge ((HD = \text{"HD1"}) \vee (HD = \text{"HD2"}) \vee (HD = \text{"HD4"})) \\ \quad \Phi_{2,min} \leftarrow 1.15 \\ \text{if } (HC = \text{"HC4"}) \wedge ((HD = \text{"HD1"}) \vee (HD = \text{"HD2"}) \vee (HD = \text{"HD4"})) \\ \quad \Phi_{2,min} \leftarrow 1.2 \end{array} \right\| = 1.05$$

Dynamik-Beiwert Φ_2 für Lastfälle A und B

Dynamik-Beiwert Φ_{2C} für Lastfälle C

$$\Phi_2 := \Phi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h = 1.071$$

$$\Phi_{2C} := \Phi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_{hc} = 1.05$$

Mathcad-Screenshot 33: Bestimmung der Dynamik-Beiwerte Φ_2 und Φ_{2C}

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_4

Für die Berechnung des Dynamik-Beiwerts Φ_4 für das Überfahren von Stufen oder Lücken bedarf es bezüglich der Beispielrechnung keiner weiteren Erklärungen. Sie wurde so aufgebaut, dass beide Arten von Unebenheiten berechnet werden können und im letzten Rechenschritt der zutreffende Wert der Variable Φ_4 zugewiesen wird (siehe Mathcad-Screenshot 34). In der Beispielrechnung liegen neben

vernachlässigbarer Schienenstoßfugen keine weiteren Unebenheiten vor, womit $\Phi_4 = 1$ gilt.⁷⁶

$$\alpha_s := \frac{2 \cdot f_q \cdot h_s}{v_{kran}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r_{kran}}{h_s}} = 0.267$$

$$\alpha_G := \frac{f_q \cdot e_G}{v_{kran}} = 0.133$$

$$\zeta_s := \frac{\alpha_s^2}{|1 - \alpha_s^2|} \cdot \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\pi \cdot \alpha_s)} = 0.14$$

$$\zeta_G := \frac{\alpha_G^2}{|1 - \alpha_G^2|} \cdot \sqrt{2 - 2 \cdot \cos(\pi \cdot \alpha_G)} = 0.008$$

$$\phi_{4_s} := 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{v_{kran}^2}{g \cdot r_{kran}} \cdot \zeta_s = 1.792$$

$$\phi_{4_G} := 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{v_{kran}^2}{g \cdot r_{kran}} \cdot \zeta_G = 1.043$$

$$\phi_4 := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \lambda = 1 \\ \quad \phi_4 \leftarrow 1 \\ \text{if } \lambda = 2 \\ \quad \phi_4 \leftarrow \phi_{4_s} \\ \text{if } \lambda = 3 \\ \quad \phi_4 \leftarrow \phi_{4_G} \end{array} \right\| = 1$$

Mathcad-Screenshot 34: Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_4

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_5 bzw. $\Phi_{5,NA}$

Die Faktoren Φ_A und Φ_P zur Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_5 für vertikale Beschleunigungen und Verzögerungen der Last sind ausschließlich von der Art des Hubwerkantriebs κ_G (Anzahl der Geschwindigkeitsstufen) und der vertikalen Beschleunigung bzw. Verzögerung a abhängig. Weiters wird zwischen Heben und Senken unterscheiden, wobei in der Berechnung automatisch der kritische (höhere) Wert ausgewählt wird (siehe Mathcad-Screenshot 35).

$$\phi_{Ah} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \kappa_G = 4 \\ \quad \phi_{Ah} \leftarrow 1.05 \\ \text{if } \kappa_G = 3 \\ \quad \phi_{Ah} \leftarrow 1.15 \\ \text{if } (\kappa_G = 2) \vee (\kappa_G = 1) \\ \quad \phi_{Ah} \leftarrow 1.20 \end{array} \right\| = 1.2$$

$$\phi_{As} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } \kappa_G = 4 \\ \quad \phi_{As} \leftarrow 1.10 \\ \text{if } \kappa_G = 3 \\ \quad \phi_{As} \leftarrow 1.20 \\ \text{if } \kappa_G = 2 \\ \quad \phi_{As} \leftarrow 1.35 \\ \text{if } \kappa_G = 1 \\ \quad \phi_{As} \leftarrow 1.30 \end{array} \right\| = 1.35$$

$$\phi_A := \max(\phi_{Ah}, \phi_{As}) = 1.35$$

Mathcad-Screenshot 35: Bestimmung des Faktors Φ_A für die Ermittlung von Φ_5

⁷⁶ vgl. DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lastenwirkungen, 16.

Während in der Norm für beide Lastfälle A3 und C6 der Dynamik-Beiwert Φ_5 verwendet und die entsprechende Beschleunigung nachträglich miteingerechnet wird, wurden in dieser Berechnung 2 unterschiedliche Beiwerte definiert.

Wird anstatt dem Beschleunigungswert des Normalbetriebs a die Verzögerung im Fall einer Not-Aus-Betätigung a_{NA} eingesetzt, erhält man den Beiwert $\Phi_{5,NA}$. Dieser ist im Mathcad-Screenshot 36 ersichtlich und aufgrund der großen Verzögerung a_{NA} deutlich höher als Φ_5 .

$$\phi_P := \begin{cases} \text{if } (\kappa_G = 4) \vee (\kappa_G = 3) \vee (\kappa_G = 2) \\ \quad \phi_P \leftarrow 1 \\ \text{if } \kappa_G = 1 \\ \quad \phi_P \leftarrow 1.15 \end{cases} = 1$$

$$\phi_5 := 1 + \phi_A \cdot \phi_P \cdot \frac{a}{g} = 1.138$$

$$\phi_{5,NA} := 1 + \phi_A \cdot \phi_P \cdot \frac{a_{NA}}{g} = 1.413$$

Mathcad-Screenshot 36: Bestimmung von Φ_5 und $\Phi_{5,NA}$

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_6

Obwohl die Beiwerte Φ_{6stat} und Φ_{6dyn} für statische und dynamische Prüflasten, wie im Mathcad-Screenshot 37 gezeigt, definiert sind, werden sie später in der Berechnung mit den Faktoren 1,1 bzw. 1,25 beaufschlagt, um die Höhe der jeweiligen Prüflasten zu berücksichtigen (siehe Mathcad-Screenshot 43).

$$\phi_{6dyn} := 0.5 \cdot (1 + \phi_2) = 1.036$$

mit Prüflast: 110% Nennt Tragfähigkeit

$$\phi_{6stat} := 1$$

mit Prüflast: 125% Nennt Tragfähigkeit

Mathcad-Screenshot 37: Bestimmung von Φ_{6stat} und Φ_{6dyn}

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_L

Wie in 2.2.2.1 beschrieben, muss für die Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_L für die Einwirkung des Hubkraftbegrenzers zwischen direkt und indirekt wirkenden Hubkraftbegrenzern unterschieden werden.

$$\phi_L := \left\| \begin{array}{l} \text{if } H = \text{"direkt"} \\ \quad \phi_L \leftarrow 1.6 \\ \text{if } H = \text{"indirekt"} \\ \quad \phi_L \leftarrow 1.4 \end{array} \right\| = 1.4$$

Mathcad-Screenshot 38: Bestimmung von ϕ_L

Bestimmung des Seilkrafterhöhungsfaktors f_{S1}

Im Mathcad-Screenshot 39 ist zu sehen, dass, je nach Angaben bezüglich Lagerung und Seiltriebgestaltung, der Wirkungsgrad η_{tot} des gesamten Seiltriebs bzw. dessen Kehrwert f_{S1} automatisch berechnet wird.

Gleitlager Wirkungsgrad einer Einzelrolle $\eta_{Sg} := 0.985 \cdot \left(1 - 0.15 \cdot \frac{d_{bearing}}{D_{sheave}} \right) = 0.985$ $\eta_- := \left\ \begin{array}{l} \text{if } LA = \text{"Wälzlager"} \\ \quad \eta_- \leftarrow \eta_{Sw} \\ \text{if } LA = \text{"Gleitlager"} \\ \quad \eta_- \leftarrow \eta_{Sg} \end{array} \right\ = 0.985$ $\eta_{tot} := \frac{(\eta_-)^{n_s}}{n_m} \cdot \frac{1 - (\eta_-)^{n_m}}{1 - \eta_-} = 0.963$ $f_{S1} := \frac{1}{\eta_{tot}} = 1.038$	Wälzlager Wirkungsgrad einer Einzelrolle $\eta_{Sw} := 0.985$
---	---

Mathcad-Screenshot 39: Bestimmung von f_{S1}

Bestimmung der Seilkrafterhöhungsfaktoren f_{S2} und f_{S3}

Während der Seilkrafterhöhungsfaktor f_{S2} für nicht parallele Stränge abhängig vom maximalen Winkel zwischen Seil und Wirkrichtung der Last mit einer einzelnen Formel berechnet werden kann, werden für die Bestimmung von f_{S3} unterschiedliche Kriterien untersucht (siehe Mathcad-Screenshot 40). In diesem Fall kann die Last frei schwingen und der Faktor f_{S3} darf auf den Wert 1 gesetzt werden. Sollten jedoch

mehrere nicht parallele Seile vorliegen, wird f_{S3} berechnet und auf einen Maximalwert von 2 begrenzt.⁷⁷

Sollte fälschlicherweise angegeben werden, dass die Richtung der Seilkraft mit der Wirkrichtung der Last übereinstimmt ($\gamma_{fS3} = 0^\circ$), obwohl nicht parallele Seilstränge vorliegen, würde dies zu einer Division durch Null und dadurch zu einem Abbruch der Berechnung führen. Deshalb würde eine mögliche Eingabe $\gamma_{fS3} = 0^\circ$ nachträglich auf $\gamma_{fS3} = 0,1^\circ$ überschrieben werden.

$$f_{S2} := \frac{1}{\cos(\beta_{max})} = 1.015$$

$$\gamma_{fS3_} := \begin{cases} \text{if } \gamma_{fS3} = 0 \\ \quad \gamma_{fS3_} \leftarrow 0.1 \text{ deg} \\ \text{if } \gamma_{fS3} > 0 \\ \quad \gamma_{fS3_} \leftarrow \gamma_{fS3} \end{cases} = 0.1 \text{ deg}$$

$$f_{S3_} := 1 + \frac{F_h}{m_H \cdot g \cdot \tan(\gamma_{fS3_})} = 1$$

$$f_{S3} := \begin{cases} \text{if } (f_{S3_} \leq 2) \wedge (S_{np} = \text{"ja"}) \\ \quad f_{S3} \leftarrow f_{S3_} \\ \text{if } (f_{S3_} > 2) \wedge (S_{np} = \text{"ja"}) \\ \quad f_{S3} \leftarrow 2 \\ \text{if } S_{np} = \text{"nein"} \\ \quad f_{S3} \leftarrow 1 \end{cases} = 1$$

Mathcad-Screenshot 40: Bestimmung von f_{S2} und f_{S3}

Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts γ_p und Risikobeiwerts γ_n

Für den Beispielkran sind keine Lasten und Umstände vorgesehen, die ein erhöhtes Betriebsrisiko darstellen. Daher entspricht der Risikobeiwert γ_n dem Wert 1.

Ausgenommen vom Lastfall A4, besitzen die 3 Gruppen A, B und C der Lastkombinationen jeweils den selben Teilsicherheitsbeiwert γ_p . Der Beiwert für A4 wird deshalb später in der Berechnung mit einem Faktor korrigiert (siehe Mathcad-Screenshot 43).

⁷⁷ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 14.

$$\gamma_n := \begin{cases} \text{if } RK = 2 \\ \quad \gamma_n \leftarrow 1.6 \\ \text{if } RK = 1 \\ \quad \gamma_n \leftarrow 1.25 \\ \text{if } RK = 0 \\ \quad \gamma_n \leftarrow 1 \end{cases} = 1$$

Lastkombinationen A (ausgenommen A4)	$\gamma_{p,A} := 1.34$
Lastkombinationen B	$\gamma_{p,B} := 1.22$
Lastkombinationen C	$\gamma_{p,C} := 1.1$

Mathcad-Screenshot 41: Bestimmung von γ_p und γ_n

Bestimmung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rb}

Im ersten Schritt wurde das 1,125-fache des Seiltrommeldurchmessers D_{drum} als kleinster relevanter Durchmesser D definiert. Abhängig davon, ob Ausgleichsrollen und/oder Seilrollen im Seiltrieb vorhanden sind, werden diese für die Bestimmung von D berücksichtigt oder vernachlässigt. Anschließend wird der kleinste relevante Durchmesser D für die Berechnung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts für den statischen Festigkeitsnachweis γ_{rb} herangezogen (siehe Mathcad-Screenshot 42). Dieser ist jedoch mit einem Mindestwert von 2,07 begrenzt, wodurch die zuvor errechnete Hilfsgröße $\gamma_{rb_}$ erhöht wird. Übersteigt $\gamma_{rb_}$ einen Wert von 3,07 bzw. unterschreitet das Verhältnis $\frac{D}{d_r}$ einen Wert von 11,2, wird die Berechnung an dieser Stelle unterbrochen. Es wird stattdessen ein Hinweis ausgegeben, dass der kleinste relevante Durchmesser D größer gewählt werden soll.

$$\begin{aligned}
 D &:= \left\| \begin{array}{l} \text{if } (n_a = 0) \wedge (n_r = 0) \\ \quad \left\| D \leftarrow 1.125 \cdot D_{\text{drum}} \right\| \\ \quad \text{if } (n_a = 0) \\ \quad \quad \left\| D \leftarrow \min(D_{\text{sheave}}, 1.125 \cdot D_{\text{drum}}) \right\| \\ \quad \text{if } (n_r = 0) \\ \quad \quad \left\| D \leftarrow \min(1.125 \cdot D_{\text{drum}}, 1.125 \cdot D_{\text{comp}}) \right\| \\ \quad \text{if } (n_a > 0) \wedge (n_r > 0) \\ \quad \quad \left\| D \leftarrow \min(D_{\text{sheave}}, 1.125 \cdot D_{\text{drum}}, 1.125 \cdot D_{\text{comp}}) \right\| \end{array} \right\| = 225 \text{ mm} \\
 \\
 \gamma_{rb_} &:= 1.35 + \frac{5}{\left(\frac{D}{d_r}\right)^{0.8} - 4} = 2.046 \\
 \\
 \gamma_{rb} &:= \left\| \begin{array}{l} \text{if } 3.07 \geq \gamma_{rb_} \geq 2.07 \\ \quad \left\| \gamma_{rb} \leftarrow \gamma_{rb_} \right\| \\ \quad \text{if } \gamma_{rb_} < 2.07 \\ \quad \quad \left\| \gamma_{rb} \leftarrow 2.07 \right\| \\ \quad \text{if } \frac{D}{d_r} \leq 11.2 \\ \quad \quad \left\| \gamma_{rb} \leftarrow \text{"D zu klein gew\u00e4hlt"} \right\| \end{array} \right\| = 2.07
 \end{aligned}$$

Mathcad-Screenshot 42: Bestimmung von γ_{rb}

Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises

Nachdem alle für den statischen Festigkeitsnachweis benötigten Faktoren bestimmt wurden, können die Seilkraft $F_{Sd,s}$ und die Granzseilkraft $F_{Rd,s}$ berechnet werden. Zuerst muss jedoch der kritische Lastfall für den Beispielkran gefunden werden.

Die Berechnungen der unterschiedlichen Lastfälle unterscheiden sich lediglich durch die Dynamik-Beiwerte Φ und die Teilsicherheitsbeiwerte γ_p . Wie bereits erwähnt, teilen sich die Lastfälle der Gruppen A, B und C jeweils den selben Beiwert γ_p . In dieser Berechnung liegen jedoch keine relevanten Lastfälle B vor, weshalb nur die Dynamik-Beiwerte Φ der Lastfälle A und C miteinander verglichen werden. Der Beiwert Φ_4 muss dabei zusätzlich mit einem Faktor multipliziert werden, da für ihn ein spezifischer Teilsicherheitsbeiwert γ_p vorgesehen ist (siehe Tabelle 8). Auch die Dynamik-Beiwerte Φ_{6dyn} und Φ_{6stat} werden mit einem Faktor beaufschlagt, um den Einfluss der Prüflasten des Lastfalls C3 zu berücksichtigen. Als kritischer Lastfall wurde in dieser Beispielrechnung die Betätigung des Not-Aus-Schalters (Lastfall C6) identifiziert,

welcher jedoch nicht zu einer Überschreitung der Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ führt. In 4.5.1 wird später noch genauer auf die Ergebnisse eingegangen.

$$\phi_{s,A} := \max\left(\phi_2, \phi_4 \cdot \frac{1.22}{1.34}, \phi_5\right) = 1.138 \quad \left| \quad \phi_{s,C} := \max\left(\phi_{2c}, \phi_{5,NA}, \phi_{6dym} \cdot 1.1, \phi_{6stat} \cdot 1.25, \phi_L\right) = 1.413$$

$$F_{Sd,s,A} := \frac{m_H \cdot g}{n_m} \cdot \phi_{s,A} \cdot f_{S1} \cdot f_{S2} \cdot f_{S3} \cdot \gamma_{p,A} \cdot \gamma_n = 19.704 \text{ kN} \quad \left| \quad F_{Sd,s,C} := \frac{m_H \cdot g}{n_m} \cdot \phi_{s,C} \cdot f_{S1} \cdot f_{S2} \cdot f_{S3} \cdot \gamma_{p,C} \cdot \gamma_n = 20.089 \text{ kN}$$

$$F_{Sd,s} := \max(F_{Sd,s,A}, F_{Sd,s,C}) = 20.089 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,s} := \frac{F_u}{\gamma_{rb}} = 44.493 \text{ kN}$$

$$F_{Sd,s} = 20.089 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,s} = 44.493 \text{ kN}$$

Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises:

$NW_s = \text{„Nachweis erfüllt“}$

Auslastung der statischen Festigkeit:

$$\frac{F_{Sd,s}}{F_{Rd,s}} = 0.452$$

Mathcad-Screenshot 43: Bestimmung von $F_{Sd,s}$ und $F_{Rd,s}$ und Überprüfung des statischen Festigkeitsnachweises

Für eine verbesserte Übersichtlichkeit, soll auf einen Blick erkennbar sein, ob der Nachweis erfüllt wurde oder nicht. Dafür wird zusätzlich zu den Kräftewerten eine Textausgabe definiert, welche je nach Ergebnis das Ereignis „Nachweis erfüllt“ oder „Nachweis nicht erfüllt“ ausgibt. Weiters soll die Auslastung der Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ Auskunft darüber geben, ob der Nachweis deutlich oder nur knapp erfüllt wurde. Sie dient jedoch rein informativen Zwecken und ist laut DIN EN 13001 nicht vorgeschrieben.

4.4.2 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Neben der Bestimmung des maximalen Dynamik-Beiwerts aller relevanten Lastfälle A werden folgende Größen für die Berechnung der Seilkraft $F_{Sd,f}$ sowie der Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit benötigt:

- Dynamik-Beiwert: ϕ_f
- Seilkrafterhöhungsfaktoren: f_{S2}, f_{S3}
- minimaler Seilwiderstandsbeiwert (Nachweis der Ermüdungsfestigkeit): γ_{rf}
- Seilkraftverlaufsparemeter: s_r
- Faktor weiterer Einflüsse auf die Grenzseilkraft: $f_i (f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}, f_{i4}, f_{i5}, f_{i6}, f_{i7})$

Der Risikobeiwert γ_n kann wie in 4.4.1 bestimmt, übernommen werden.

Bestimmung des Dynamik-Beiwerts ϕ_f

Bei dem kritischen regelmäßigen und somit für die Ermüdungsfestigkeit relevanten Lastfall handelt es sich in dieser Beispielrechnung um Lasten durch Beschleunigungen und Verzögerungen der Hublast im Normalbetrieb (Lastfall A3). Die Biegewechselzahl liegt mit einem Wert von $w = 7$ zudem deutlich über dem Grenzwert von 1, wodurch diese in die Berechnung des Dynamik-Beiwerts ϕ_f miteinfließt (siehe Mathcad-Screenshot 44).

$$\begin{aligned}\phi_{f,max} &:= \max(\phi_2, \phi_4, \phi_5) = 1.138 \\ \phi_{f-} &:= \sqrt[3]{\frac{(w-1) + \phi_{f,max}^3}{w}} = 1.022 \\ \phi_f &:= \begin{cases} \text{if } w = 0.5 \\ \quad \phi_f \leftarrow \phi_{f,max} \\ \text{if } w \geq 1 \\ \quad \phi_f \leftarrow \phi_{f-} \end{cases} = 1.022\end{aligned}$$

Mathcad-Screenshot 44: Bestimmung von ϕ_f

Bestimmung der Seilkrafterhöhungsfaktoren $f_{S2,f}$ und $f_{S3,f}$

Der Einfluss des Winkels zwischen Seil und Wirkrichtung der Hublast wurde in diesem Beispiel vereinfacht berechnet. Für den Fall, dass der Kran den in 2.2.2.2 erwähnten Voraussetzungen für diese Berechnung nicht entspricht, müsste $f_{S2,f}$ abhängig von der normalisierte Hubhöhenverteilung innerhalb des Arbeitsbereichs berechnet werden.⁷⁸

Obwohl die Hublast an dem Beispielkran frei schwingen kann und keine nicht parallelen Seilstränge vorliegen, wird der Beiwert $f_{S2,f}$ zwecks der allgemeinen Gültigkeit der Berechnungsapplikation als Variable definiert.

Dem Seilkrafterhöhungsfaktor $f_{S3,f}$ wird laut DIN EN 13001-3-2 der Wert von f_{S3} zugewiesen.⁷⁹

⁷⁸ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 20.

⁷⁹ vgl. ebenda, 21.

$$f_{S2,f} := 1 + \left(\frac{1}{\cos(\beta(z_2))} - 1 \right) \cdot \left(\frac{z_{ref} - z_2}{z_{ref} - z_1} \right)^{0.9} = 1.002 \quad f_{S3,f} := f_{S3} = 1$$

Mathcad-Screenshot 45: Bestimmung von $f_{S2,f}$ und $f_{S3,f}$

Bestimmung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rf}

Der minimale Seilwiderstandsbeiwert für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit γ_{rf} ist laut DIN EN 13001-3-2 mit einem Wert von $\gamma_{rf} = 7$ definiert.⁸⁰

$$\gamma_{rf} := 7$$

Mathcad-Screenshot 46: Bestimmung von γ_{rf}

Bestimmung des Seilkraftverlaufsparmeters s_r

Für die Berechnung des Seilkraftverlaufsparmeters s_r wird zuerst der Seilkraftspektrumsfaktor k_r ermittelt. Die Summenformel (Formel 27 der DIN EN 13001-3-2) wird dafür in der Berechnung so umgeformt, dass die Angaben, welche bereits für die Dimensionierung nach DIN 15020 eingesetzt wurden, verwendet werden können (siehe Mathcad-Screenshot 47). Dafür muss jedoch vereinfachend angenommen werden, dass Hubbewegungen mit unterschiedlich hohen Hublasten im Mittel die gleiche zeitliche Dauer sowie Anzahl von Biegewechsel pro Arbeitsspiel besitzen.

Somit wird vorausgesetzt, dass:

$$\frac{F_{Sd,f,i}}{F_{Sd,f}} = \frac{m_i}{m_H} = \beta_i \quad (7)$$

und

$$\frac{w_i}{w_{tot}} = \frac{T_i}{T_{tot}} = t_i \quad (8)$$

$$k_r = \sum_i^{i_{max}} \left(\frac{F_{Sd,f,i}}{F_{Sd,f}} \right)^3 \cdot \frac{w_i}{w_{tot}}$$

$$k_r := \beta_1^3 \cdot t_1 + \beta_2^3 \cdot t_2 + \beta_3^3 \cdot t_3 + \gamma_-^3 \cdot t_{\Delta} = 0.222$$

Mathcad-Screenshot 47: Bestimmung von k_r

⁸⁰ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 21.

Bevor der Seilkraftverlaufparameter s_r berechnet werden kann, wird zuvor die Anzahl der Biegewechsel am Bezugspunkt w_D mit dem konstanten Wert von $5 \cdot 10^5$ definiert.⁸¹ Weiters werden in den Zwischenschritten die Gesamtanzahl der Hubbewegungen i_{max} bzw. der Biegewechsel w_{tot} des Drahtseils berechnet, um die relative Gesamtanzahl der Biegewechsel v_r zu erhalten (siehe Mathcad-Screenshot 48). In dieser Berechnung wird vom ungünstigsten Fall ausgegangen, bei dem der am häufigsten gebogene Teil des Seils bei jeder Hubbewegung die maximale Anzahl an Biegewechsel im Seiltrieb durchläuft. Sollte der am häufigsten verwendete Arbeitsbereich des Krans geringer sein, kann die Anzahl der Biegewechsel w dementsprechend verringert werden.

$$\begin{aligned} w_D &:= 5 \cdot 10^5 \\ i_{max} &:= \frac{C}{l_r} = 1.667 \cdot 10^5 \\ w_{tot} &:= w \cdot i_{max} = 1.167 \cdot 10^6 \\ v_r &:= \frac{w_{tot}}{w_D} = 2.333 \\ s_r &:= k_r \cdot v_r = 0.519 \end{aligned}$$

Mathcad-Screenshot 48: Bestimmung von s_r

Bestimmung des Faktors weiterer Einflüsse f_f

Wie bereits in 2.2.2.2 erwähnt, handelt es sich bei dem Faktor f_f um das Produkt der Faktoren f_{f1} , f_{f2} , f_{f3} , f_{f4} , f_{f5} , f_{f6} und f_{f7} , welche demzufolge zu ermitteln sind.

Neben dem Kriterium, dass der Faktor f_{f1} einen Wert von 0,75 nicht unterschreiten darf, muss auch ein Mindestwert von 11,2 für das Referenzverhältnis D/d eingehalten werden. Dieser Mindestwert wurde jedoch bereits für die Berechnung des minimalen Seilwiderstandsbeiwerts γ_{rb} (siehe 4.4.1) definiert. Ein unzulässiges Verhältnis D/d würde daher bereits beim statischen Festigkeitsnachweis zu einem Abbruch der Berechnung führen. Für eine entsprechend hohe Anzahl der Gesamtbiegewechsel w_{tot} kann dennoch ein größeres Referenzverhältnis D/d benötigt werden, was mit der Ausgabe „D/d zu klein“ angezeigt werden würde (siehe Mathcad-Screenshot 49).

⁸¹ vgl. DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben, 23.

$$R_{Dd} := 10 \cdot 1.125^{\log\left(\frac{w_{tot}}{8000}, 2\right)} = 23.318$$

$$f_{f1_} := \frac{\frac{D}{d_r}}{R_{Dd}} = 0.877$$

$$f_{f1} := \begin{cases} \text{if } f_{f1_} \geq 0.75 \\ \quad f_{f1} \leftarrow f_{f1_} \\ \text{else} \\ \quad f_{f1} \leftarrow \text{"D/d zu klein"} \end{cases} = 0.877$$

$$f_{f2} := \begin{cases} \text{if } R_r > 1770 \frac{N}{mm^2} \\ \quad \left(\frac{1770 \frac{N}{mm^2}}{R_r} \right)^{0.6} \\ \text{else} \\ \quad f_{f2} \leftarrow 1 \end{cases} = 0.941$$

Mathcad-Screenshot 49: Bestimmung von f_{f1} und f_{f2}

Der gewählte Drahtseilwerkstoff besitzt eine hohe Mindestbruchspannung R_r , dessen nichtlineare Beziehungen zur Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ deshalb mit dem Faktor f_{f2} berücksichtigt wird (siehe Mathcad-Screenshot 49).

$$\delta := \sqrt[3]{\frac{\delta_1^3 + \delta_2^3 + \delta_3^3 + \delta_4^3 + \delta_5^3 + \delta_6^3 + \delta_7^3}{(n_r \cdot 2) + n_t}} = 0 \text{ deg} \quad \dots + \delta_{i-1}^3 + \delta_i^3$$

$$f_{f3} := \begin{cases} \text{if } (\delta \leq 0.5 \text{ deg}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 1 \\ \text{if } (0.5 \text{ deg} < \delta \leq 1 \text{ deg}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 1 + \frac{0.95 - 1}{0.5 \text{ deg}} \cdot (\delta - 0.5 \text{ deg}) \\ \text{if } (1 \text{ deg} < \delta \leq 2 \text{ deg}) \wedge (SA = \text{"ndf"}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 0.95 + \frac{0.86 - 0.95}{1 \text{ deg}} \cdot (\delta - 1 \text{ deg}) \\ \text{if } (1 \text{ deg} < \delta \leq 2 \text{ deg}) \wedge (SA = \text{"df"}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 0.95 + \frac{0.84 - 0.95}{1 \text{ deg}} \cdot (\delta - 1 \text{ deg}) \\ \text{if } (2 \text{ deg} < \delta \leq 3 \text{ deg}) \wedge (SA = \text{"ndf"}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 0.86 + \frac{0.84 - 0.86}{1 \text{ deg}} \cdot (\delta - 2 \text{ deg}) \\ \text{if } (3 \text{ deg} < \delta \leq 4 \text{ deg}) \wedge (SA = \text{"ndf"}) \\ \quad f_{f3} \leftarrow 0.84 + \frac{0.82 - 0.84}{1 \text{ deg}} \cdot (\delta - 3 \text{ deg}) \\ \text{if } ((SA = \text{"ndf"}) \wedge (\delta > 4 \text{ deg})) \vee ((SA = \text{"df"}) \wedge (\delta > 2 \text{ deg})) \\ \quad f_{f3} \leftarrow \text{"nicht definiert"} \end{cases} = 1$$

Mathcad-Screenshot 50: Bestimmung von f_{f3}

Die Auf- und Ablaufwinkel δ_i des Seils bezüglich Seilrollen und Seiltrommel sind möglichst gering zu halten und meist nur durch Messungen am Seiltrieb genau bestimmbar. Deshalb wurden in der Beispielrechnung alle relevanten Winkel δ_i mit 0° angenommen. Während kleine Winkel zu einer Verminderung der Grenzseilkraft für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit führen würden, ist der Faktor f_{f3} für größere Winkel nicht definiert und es würde zum Abbruch der Berechnung kommen. Sollten aufgrund einer höheren Anzahl von Seilrollen oder -trommeln weitere Winkel benötigt werden, müssen diese, wie im Mathcad-Screenshot 50 gezeigt, in die Berechnung von δ eingefügt werden.

Die Faktoren f_{f4} und f_{f5} können direkt und ohne Zwischenrechnungen durch die automatisierte Auswertung der entsprechenden Tabellen der DIN EN 13001-3-2 bestimmt werden (siehe Mathcad-Screenshot 51).

$$f_{f5} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } (i_{max} \cdot k_r \leq 500) \vee ((GS = \text{"ja"}) \wedge (500 < i_{max} \cdot k_r \leq 2000)) \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 1 \\ \text{if } ((GS = \text{"nein"}) \wedge (500 < i_{max} \cdot k_r \leq 1000)) \vee ((GS = \text{"ja"}) \wedge (2000 < i_{max} \cdot k_r \leq 5000)) \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 0.9 \\ \text{if } ((GS = \text{"nein"}) \wedge (1000 < i_{max} \cdot k_r \leq 2000)) \vee ((GS = \text{"ja"}) \wedge (5000 < i_{max} \cdot k_r)) \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 0.8 \\ \text{if } (GS = \text{"nein"}) \wedge (2000 < i_{max} \cdot k_r \leq 5000) \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 0.7 \\ \text{if } (GS = \text{"nein"}) \wedge (5000 < i_{max} \cdot k_r) \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 0.6 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right\| = 0.8$$

$$f_{f5} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } MS = \text{"ja"} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow f_{f5_} \\ \text{if } MS = \text{"nein"} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f5} \leftarrow 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right\| = 1$$

$$f_{f4} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } SIS = \text{"ja"} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f4} \leftarrow 1 \\ \text{if } SIS = \text{"nein"} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} f_{f4} \leftarrow 0.5 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right\| = 1$$

Mathcad-Screenshot 51: Bestimmung von f_{f4} und f_{f5}

Der Einfluss des Verhältnisses von Rillenradius r_g zu Seildurchmesser d_r ist in dieser Berechnung generell als sehr gering zu erwarten, da der Rillenradius r_g abhängig vom Seildurchmesser d_r automatisiert bestimmt wird (siehe Mathcad-Screenshot 26). Dies geschieht in der Berechnung direkt zwischen der Dimensionierung nach DIN 15020 und dem statischen Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001. Durch die Wahl dieses

Rillenradius r_g folgt allerdings die Forderung nach einem maximalen Öffnungswinkel der Seilrillen ω_g von 60° (siehe Mathcad-Screenshot 52).

$$f_{f6} := \left\| \begin{array}{l} \text{if } 0.53 > \frac{r_g}{d_r} \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow \text{"Rillenradius zu klein"} \right\| \\ \text{if } 0.53 \leq \frac{r_g}{d_r} < 0.55 \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 1 + \frac{0.92 - 1}{0.02} \cdot \left(\frac{r_g}{d_r} - 0.53 \right) \right\| \\ \text{if } 0.55 \leq \frac{r_g}{d_r} < 0.6 \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 0.92 + \frac{0.86 - 0.92}{0.05} \cdot \left(\frac{r_g}{d_r} - 0.55 \right) \right\| \\ \text{if } 0.6 \leq \frac{r_g}{d_r} < 0.7 \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 0.86 + \frac{0.79 - 0.86}{0.1} \cdot \left(\frac{r_g}{d_r} - 0.6 \right) \right\| \\ \text{if } 0.7 \leq \frac{r_g}{d_r} < 0.8 \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 0.79 + \frac{0.76 - 0.79}{0.1} \cdot \left(\frac{r_g}{d_r} - 0.7 \right) \right\| \\ \text{if } 0.8 \leq \frac{r_g}{d_r} < 1 \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 0.76 + \frac{0.73 - 0.76}{0.2} \cdot \left(\frac{r_g}{d_r} - 0.8 \right) \right\| \\ \text{if } 1 \leq \frac{r_g}{d_r} \\ \quad \left\| f_{f6} \leftarrow 0.73 \right\| \end{array} \right\| = 0.975$$

$$\omega_g := \left\| \begin{array}{l} \text{if } 0.53 \leq \frac{r_g}{d_r} < 0.6 \\ \quad \left\| \omega_g \leftarrow \text{"Öffnungswinkel der Seilrillen maximal } 60^\circ" \right\| \\ \text{else} \\ \quad \left\| \omega_g \leftarrow \text{"keine Einschränkungen bzgl. Öffnungswinkel der Seilrillen"} \right\| \end{array} \right\|$$

$$\omega_g = \text{"Öffnungswinkel der Seilrillen maximal } 60^\circ"$$

Mathcad-Screenshot 52: Bestimmung von f_{f6} und ω_g

Im Beispielkran wird ein drehungsfreies und unverdichtetes Drahtseil eingesetzt. Demzufolge wird dem Seilartfaktor t bzw. dem Faktor f_{f7} der Wert 1 zugewiesen (siehe Mathcad-Screenshot 53).

$$t := \left| \begin{array}{l} \text{if } (SG = 1) \wedge (n_{SA} = 3) \\ \quad t \leftarrow 1.25 \\ \text{if } (SG = 1) \wedge (n_{SA} = (5 \vee 4)) \\ \quad t \leftarrow 1.15 \\ \text{if } ((SG = 1) \wedge (n_{SA} \geq 6)) \vee SG = 3 \\ \quad t \leftarrow 1 \\ \text{if } SG = 2 \\ \quad t \leftarrow 0.95 \\ \text{if } SG = 4 \\ \quad t \leftarrow 0.9 \end{array} \right| = 1$$

$$f_{f7} := \frac{1}{t} = 1$$

Mathcad-Screenshot 53: Bestimmung von f_{f7}

Der Faktor weiterer Einflüsse f_f kann somit, wie im Mathcad-Screenshot 54 gezeigt, berechnet werden.

$$f_f := f_{f1} \cdot f_{f2} \cdot f_{f3} \cdot f_{f4} \cdot f_{f5} \cdot f_{f6} \cdot f_{f7} = 0.804$$

Mathcad-Screenshot 54: Bestimmung von f_f

Ergebnisse des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit

Nach der Bestimmung aller benötigten Beiwerte und Faktoren muss nur noch in die Gleichungen für die Berechnung der Seilkraft $F_{Sd,f}$ und der Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit eingesetzt werden (siehe Mathcad-Screenshot 55). Analog zum statischen Festigkeitsnachweis wird auch hier zusätzlich eine Textausgabe bezüglich des Nachweis-Ergebnisses sowie die Auslastung der zulässigen Festigkeit definiert.

$$F_{Sd,f} := \frac{m_H \cdot g}{n_m} \cdot \phi_f \cdot f_{S2,f} \cdot f_{S3,f} \cdot \gamma_n = 12.554 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,f} := \frac{F_u}{\gamma_{rf} \cdot \sqrt[3]{s_r}} \cdot f_f = 13.169 \text{ kN}$$

$$F_{Sd,f} = 12.554 \text{ kN}$$

$$F_{Rd,f} = 13.169 \text{ kN}$$

$$NW_f := \begin{cases} \text{if } F_{Rd,f} \geq F_{Sd,f} \\ \quad \parallel NW_f \leftarrow \text{"Nachweis erfüllt"} \\ \text{if } F_{Rd,f} < F_{Sd,f} \\ \quad \parallel NW_f \leftarrow \text{"Nachweis nicht erfüllt"} \end{cases}$$

Ergebnis des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit:

$NW_f = \text{"Nachweis erfüllt"}$

Auslastung der Ermüdungsfestigkeit:

$$\frac{F_{Sd,f}}{F_{Rd,f}} = 0.953$$

Mathcad-Screenshot 55: Bestimmung von $F_{Sd,f}$ und $F_{Rd,f}$ und Überprüfung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit

4.5 Ergebnisinterpretation

Um zu entscheiden, ob es sinnvoll ist, die DIN 15020 und die DIN EN 13001 für die Auslegung von Seiltrieben in Brücken- und Portalkranen kombiniert per Rechenapplikation zu berechnen, sollen die Ergebnisse des Rechenbeispiels analysiert werden. Außerdem soll das Tool mittels Berechnung eines realen Krans auf ihre Funktion und Richtigkeit überprüft werden.

4.5.1 Ergebnisse des Rechenbeispiels für DIN 15020 und DIN EN 13001

Nachdem alle Angaben vollständig gewählt wurden, konnte das Ergebnis der Dimensionierung nach DIN 15020 direkt aus der Berechnung entnommen werden. In Tabelle 14 sind zusätzlich die gerundeten Werte aufgelistet, die in Folge für beide Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 verwendet wurden. Die Aufrundung der Durchmesser von Seiltrommel und Seilrollen auf ganze Zentimetermaße erfolgte aufgrund einer vermutlich besseren Verfügbarkeit der Komponenten in diesen Dimensionen. Vorab kann hier angemerkt werden, dass beide Festigkeitsnachweise auch ohne diese Aufrundungen positiv ausfallen würden.

Tabelle 14: berechnete und gewählte Dimensionierung des Seiltriebs des Rechenbeispiels

	berechnete Dimensionierung nach DIN 15020 (gerundet)	gewählte Dimensionierung für positive Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001
Mindestseil- durchmesser d_r	11 mm	11 mm
Mindestseiltrommel- durchmesser D_{drum}	194 mm	200 mm
Mindestseilrollen- durchmesser D_{sheave}	241 mm	250 mm

Anschließend an die minimale Korrektur der Durchmesser D_{sheave} und D_{drum} , wurden jeweils am Ende der Berechnungen die Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 auf ihr Ergebnis überprüft. Dieses beinhaltet neben der Aussage, ob der Nachweis erfüllt wurde oder nicht, auch die Auslastung der Grenzseilkräfte. So kann beurteilt werden, ob eventuell überdimensioniert wurde.

Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises:

$NW_s = \text{“Nachweis erfüllt”}$ ✓

Auslastung der statischen Festigkeit:

$$\frac{F_{Sd,s}}{F_{Rd,s}} = 0.452$$

Ergebnis des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit:

$NW_f = \text{“Nachweis erfüllt”}$ ✓

Auslastung der Ermüdungsfestigkeit:

$$\frac{F_{Sd,f}}{F_{Rd,f}} = 0.953$$

Mathcad-Screenshot 56: Ergebnisse der Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 des Rechenbeispiels

Sowohl die statische Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ als auch die Ermüdungs-Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ wird unterschritten, womit beide positive Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 erbracht werden (siehe Mathcad-Screenshot 56). Während für die statische Festigkeit noch deutliche Sicherheitsreserven zu sehen sind, fällt das Ergebnis des Ermüdungsfestigkeitsnachweises wesentlich knapper aus. Als Konsequenz könnte in diesem Fall untersucht werden, ob die Verwendung mehrerer Drahtseile über die Gesamtlebensdauer des Krans I_r bei gleichzeitig kleiner dimensionierten Komponenten zu wirtschaftlichen Vorteilen und dennoch zu positiven Nachweisen führen würde.

Sowohl durch die wesentlich umfangreicheren Berechnungen und die Berücksichtigung einer Vielzahl an Einflussfaktoren als auch die unterschiedliche Herangehensweise der DIN EN 13001, können die Ergebnisse von alter und neuer Norm kaum miteinander verglichen werden. Obwohl die Durchmesser von Seil, Seiltrommel und Seilrolle aus der Berechnung der DIN 15020 fast identisch übernommen werden konnten, muss dennoch betont werden, dass auch viele weitere Angaben einen teilweise sehr starken Einfluss auf die Ergebnisse der Nachweise nach DIN EN 13001 besitzen. Dennoch kann die DIN 15020 gut eingesetzt werden, um bei fehlenden Erfahrungswerten Startwerte für die Dimensionierung zu bestimmen, die anschließend für den Festigkeitsnachweis eingesetzt werden können.

4.5.2 Verifikation der Ergebnisse

Obwohl die Berechnungsapplikation streng nach den aktuellen Normen im Kranbau aufgebaut wurde, soll diese auf ihre Richtigkeit anhand einer Kontrollrechnung eines realen Krans überprüft werden.

Dafür wurden die zu berechnenden Komponenten eines Brückenkrans der TU Wien vermessen, alle relevanten Spezifikationen aufgenommen und als Angaben in die Mathcad-Berechnung importiert. Für ein erfolgreiches Überprüfungsergebnis des Berechnungstools sollten sowohl die Dimensionierung als auch die positiven Nachweise der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit für die tatsächlich gemessenen Maße erreicht werden.

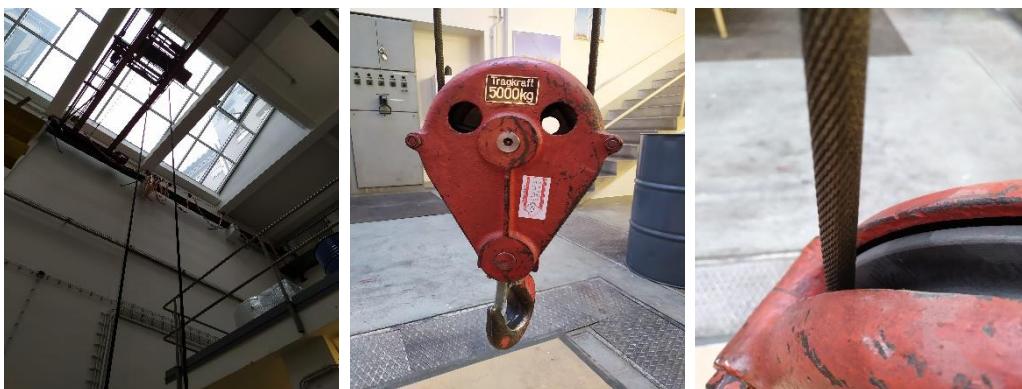


Abbildung 14: Brückenkran am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung der TU Wien

In Tabelle 15 sind alle Spezifikationen und Abmessungen aufgelistet, die bezüglich des Brückenkrans am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung der TU Wien ermittelt werden konnten. Für alle anderen benötigten Angaben wurden möglichst realistische Annahmen getroffen. So wurden

beispielsweise die mittlere tägliche Benutzungsdauer t_m und die Gesamtanzahl der Arbeitsspiele C gegenüber dem Rechenbeispiel aus Kapitel 4 verringert, da von einer geringeren Nutzung als bei einem industriell genutzten Kran ausgegangen werden kann. Die vollständigen Angaben der Überprüfungsrechnung des Brückenkrans sind in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 15: ermittelte Spezifikationen des Brückenkrans der TU Wien

Drahtseildurchmesser	14 mm
Seilart	drehungsfrei
Seilrollendurchmesser	260 mm
Seiltrommeldurchmesser	300 mm
Anzahl der Seilaußenstränge	18
Tragfähigkeit	5 t
Masse Anschlag- und Lastaufnahmemittel	0 kg
Anzahl der Seilrollen	1
Anzahl der Seiltrommeln	1
Anzahl der Seilstränge	2
geführte Seilwicklung	Ja
maximale Hubhöhe	10 m
Anzahl der Geschwindigkeitsstufen	2
Hubwerktyp	HD2
maximale kontinuierliche Hubgeschwindigkeit	4,5 m/min
kontinuierliche Feinhubgeschwindigkeit	0,5 m/min

Ergebnisse der Dimensionierung:

Die Dimensionierung nach DIN 15020 lieferte Ergebnisse, die sich mit den tatsächlich gemessenen Dimensionen decken bzw. konform sind. Im Mathcad-Screenshot 57 werden Berechnungsergebnisse und Messwerte gegenübergestellt. Keiner der gemessenen Durchmesser liegt dabei unter den berechneten Mindestdurchmessern, wodurch die Richtigkeit der Berechnungsapplikation bekräftigt wird.

Ergebnisse aus Seiltriebdimensionierung laut DIN 15020			Messwerte
Mindestseildurchmesser:	$d_r = 14 \text{ mm}$	$\leq$	$d_r = 14 \text{ mm}$ ✓
Mindestseiltrommeldurchmesser:	$D_{drum} = 211 \text{ mm}$	$\leq$	$D_{drum} := 300 \text{ mm}$ ✓
Mindestseilrollendurchmesser:	$D_{sheave} = 237 \text{ mm}$	$\leq$	$D_{sheave} := 260 \text{ mm}$ ✓

Mathcad-Screenshot 57: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Dimensionierungen des Brückenkrans der TU Wien

Ergebnisse des Festigkeitsnachweises:

Obwohl der zu überprüfende Kran bereits vor dem Erscheinen der DIN EN 13001 entwickelt wurde, ist davon auszugehen, dass die Kranhersteller bereits damals neben der DIN 15020 zusätzliche interne Berechnungsmodelle für die Auslegung von Seiltrieben für Krane eingesetzt haben. Die Ergebnisse des Festigkeitsnachweises sollen zeigen, ob die Dimensionierung des Krans für die getroffenen Angaben nach DIN EN 13001 zulässig ist bzw. ob die Rechenapplikation plausible Werte liefert.

$$F_{Sd.s} = 38.986 \text{ kN}$$

$$F_{Rd.s} = 65.512 \text{ kN}$$

Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises:

$NW_s = \text{"Nachweis erfüllt"}$ ✓

Auslastung der statischen Festigkeit:

$$\frac{F_{Sd.s}}{F_{Rd.s}} = 0.595$$

Mathcad-Screenshot 58: Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises des Brückenkrans der TU Wien

$$F_{Sd.f} = 25.794 \text{ kN}$$

$$F_{Rd.f} = 32.264 \text{ kN}$$

Ergebnis des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit:

$NW_f = \text{"Nachweis erfüllt"}$ ✓

Auslastung der Ermüdungsfestigkeit:

$$\frac{F_{Sd.f}}{F_{Rd.f}} = 0.799$$

Mathcad-Screenshot 59: Ergebnis des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit des Brückenkrans der TU Wien

Sowohl der statische Festigkeitsnachweis als auch der Ermüdungsfestigkeitsnachweis wurden, wie im Mathcad-Screenshot 58 und Mathcad-Screenshot 59 zu sehen ist, erfüllt. Anmerkend ist jedoch zu sagen, dass besonders für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit eine Vielzahl der benötigten Angaben nicht bekannt waren und daher in Form von realistischen Annahmen gewählt werden mussten.

5 Fazit

5.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit lag auf der Minimierung des Aufwands für die korrekte Anwendung der neuen Kranbaunorm DIN EN 13001 in Bezug auf Seiltriebe und Drahtseile für Brücken- und Portalkrane. Neben der schrittweisen Beschreibung einer ordnungsgemäßen Durchführung der Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001, wurde ein Berechnungstool in Mathcad erstellt, um die benötigten Berechnungen automatisiert durchführen zu können.

Es wurde außerdem gezeigt, dass die Ergebnisse der Dimensionierung des Seiltriebs und des Drahtseils nach DIN 15020, deren Berechnung ebenfalls automatisiert wurde, als Ausgangspunkt für die Berechnungen der DIN EN 13001 verwendet werden können. Je nach Resultat der Festigkeitsnachweise können nachträgliche Änderungen an den Spezifikationen des Seiltriebs vorgenommen und deren Auswirkungen sofort untersucht werden. So können der Seiltrieb und seine Komponenten iterativ optimiert werden. In Abbildung 15 ist der Ablauf einer Dimensionierung nach DIN EN 13001 unter Anwendung der entwickelten Berechnungsapplikation dargestellt.

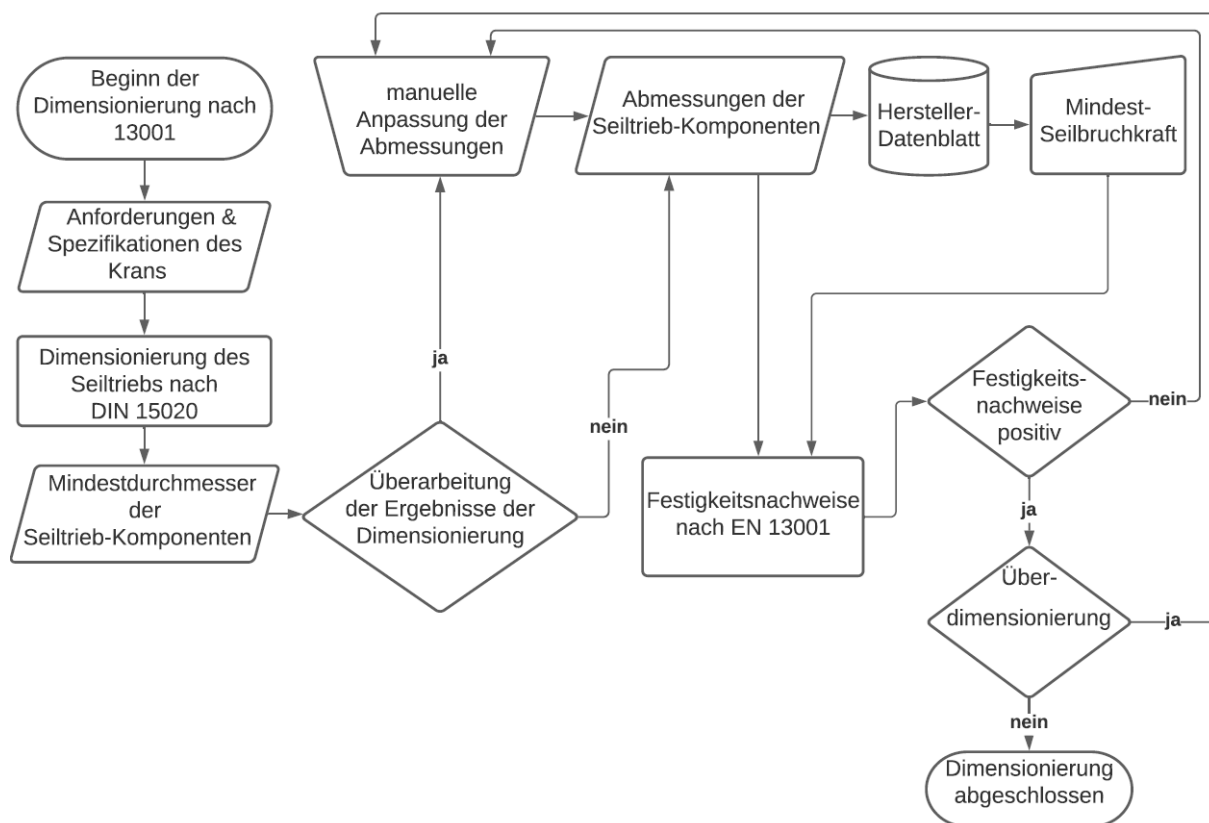


Abbildung 15: Flussdiagramm des Ablaufs einer Seiltrieb-Dimensionierung nach DIN EN 13001 mittels Berechnungsapplikation

Die detaillierte Beschreibung des Rechentools erfolgte in Form eines Rechenbeispiels, in welchem der Seiltrieb eines Brückenkrans mit einer maximalen Tragfähigkeit von 5 Tonnen zu dimensionieren war. Für die gewählten Spezifikationen des Krans bzw. des Seiltriebs konnte gezeigt werden, dass die automatisierte Berechnung ordnungsgemäß funktioniert und sowohl die statische Festigkeit als auch die Ermüdungsfestigkeit des Drahtseils erreicht wird, ohne signifikante Anpassungen der Ergebnisse der Dimensionierung nach DIN 15020 vorzunehmen.

Zur Überprüfung der Applikation wurde außerdem ein realer Brückenkran der TU Wien nachträglich dimensioniert, die Festigkeiten überprüft und anschließend die Rechenergebnisse mit den tatsächlichen Abmessungen verglichen. Da die Berechnungen beider Normen valide Ergebnisse lieferten, konnte die korrekte Funktion der Applikation bestätigt werden.

Obwohl eine funktionierende Berechnungssapplikation für die Seiltriebs-Dimensionierung entwickelt werden konnte, muss gesagt werden, dass diese in ihren Anwendungsmöglichkeiten stark eingeschränkt ist und daher zukünftig erweitert und bezüglich ihrer Benutzeroberfläche weiterentwickelt werden soll.

5.2 Ausblick

Neben dieser Diplomarbeit werden unter der Leitung von Herrn Univ. Prof. Dr. techn. Georg Kartnig weitere vergleichbare Berechnungstools für Brücken- und Portalkrane entwickelt. Diese befassen sich mit den Sicherheitsnachweisen von Stahltragwerken, Laufrad/Schiene-Kontakten, Maschinenteilen und geschmiedeten Haken. Die Gesamtheit dieser Applikationen soll später zu einem Berechnungsprogramm zusammengeführt werden, welches in der Lage ist, die Sicherheitsnachweise aller genannten Baugruppen eines Brücken- oder Portalkrans nach DIN EN 13001 zu berechnen. Dafür sollen die einzelnen Programme mittels passend gewählter Programmiersprache einheitlich aufbereitet und mit einer bedienungsfreundlichen Benutzeroberfläche versehen werden.

Auch die Integration von Datenbanken ist angedacht, um die Bedienung des Programms zu vereinfachen. So könnten beispielsweise Hersteller-Datenblätter oder Bauteilnormen automatisch durchsucht und deren Daten für Berechnungen importiert werden. Auch Mess- und Erfahrungswerte könnten in die Programme miteingebunden

werden, um überall dort, wo es laut Norm zulässig ist, allgemein gültige Approximationen durch exakte Werte zu ersetzen.

In Hinblick auf einen späteren kommerziellen Einsatz eines solchen Programms, wäre es außerdem förderlich, die Dimensionierungen bezüglich wirtschaftlicher Faktoren zu optimieren. So könnten beispielsweise die Kosten der unterschiedlichen Komponenten und Betriebsweisen gegenübergestellt und in weiterer Folge eine kostenoptimierte Konfiguration, welche jedenfalls den Festigkeitsanforderungen der DIN EN 13001 entsprechen muss, des Krans ermittelt werden.

Durch die Integration von Schnittstellen zu CAE-Programmen ließe sich somit der Entwicklungsaufwand von normgerechten und wirtschaftlich optimierten Krankomponenten reduzieren.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Profilträgerbrückenkran für bis zu 5 Tonnen Traglast	8
Abbildung 2: schienengebundener Einträger-Portalkran	9
Abbildung 3: Unterscheidung zwischen gleichsinniger Biegung und Gegenbiegung nach DIN 15020	15
Abbildung 4: Grenz-Umschlingungswinkel für relevante Biegewechsel eines Drahtseils nach DIN 15020	15
Abbildung 5: Drahtseil mit Durchmesser d in Seilrille mit Rillenhalmesser r	16
Abbildung 6: Übersicht der hauptsächlich verwendeten Normen für den Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001	18
Abbildung 7: Winkel $\beta_{\max}$	24
Abbildung 8: Hubpositionen	27
Abbildung 9: Auf- und Ablaufwinkel (Seilablenkungswinkel)	29
Abbildung 10: vereinfachte Darstellung einer Seilrille mit Drahtseil	29
Abbildung 11: beispielhafte Darstellung des zu berechnenden Brückenkrans (max. Tragfähigkeit von 5 t)	35
Abbildung 12: Lastkollektiv "mittel" nach DIN 15020	42
Abbildung 13: Ausschnitt des Datenblatts des gewählten Drahtseils	55
Abbildung 14: Brückenkran am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung der TU Wien	76
Abbildung 15: Flussdiagramm des Ablaufs einer Seiltrieb-Dimensionierung nach DIN EN 13001 mittels Berechnungsapplikation	80

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lastkombination A1	19
Tabelle 2: Lastkombination A3	19
Tabelle 3: Lastkombination A4	19
Tabelle 4: Lastkombination C1	19
Tabelle 5: Lastkombination C3	19
Tabelle 6: Lastkombination C6	20
Tabelle 7: Lastkombination C7	20
Tabelle 8: Teilsicherheitsbeiwert in Abhängigkeit des Lastfalls	25
Tabelle 9: Bestimmung der fiktiven Größe ψ	33
Tabelle 10: Unterscheidungen der Drahtseile nach Seilgeometrie	37
Tabelle 11: Einteilung des Krans nach Betriebsrisiko	38
Tabelle 12: Einteilung der Steuerungen nach Anzahl der Geschwindigkeitsstufen ..	41
Tabelle 13: Unterscheidungen nach Art der Unebenheiten während der Kranfahrt.....	43
Tabelle 14: berechnete und gewählte Dimensionierung des Seiltriebs des Rechenbeispiels	75
Tabelle 15: ermittelte Spezifikationen des Brückenkrans der TU Wien	77

8 Verzeichnis der Screenshots aus Mathcad

Mathcad-Screenshot 1: beispielhafte Darstellung einer Text-Angabe mit limitierten Eingabemöglichkeiten inklusive Fußnote	32
Mathcad-Screenshot 2: beispielhafte Darstellung einer Zahlenwert-Angabe mit limitierten Eingabemöglichkeiten inklusive Fußnote	33
Mathcad-Screenshot 3: Programmierungsblock zur Auswertung von Tabelle 9.....	33
Mathcad-Screenshot 4: Bestimmung des kubischen Mittelwerts der Belastungen nach DIN 15020 als Beispiel für eine kriteriumsabhängige Wahl der anzuwendenden Gleichung	34
Mathcad-Screenshot 5: Bestimmung des Faktors f_{t1} nach DIN EN 13001-3-2 als Beispiel für ein mögliches Abbruchkriterium	34
Mathcad-Screenshot 6: gewählte Angaben des Drahtseils	36
Mathcad-Screenshot 7: gewählte Angaben bezüglich Massen und Lasten.....	37
Mathcad-Screenshot 8: gewählte Angaben des Seiltriebs.....	40
Mathcad-Screenshot 9: gewählte Angaben des Hubwerks	41
Mathcad-Screenshot 10: gewählte Angaben bezüglich des Brückenträgers	42
Mathcad-Screenshot 11: anteilige Auslastung des Krans über die Gesamtlaufzeit.....	43
Mathcad-Screenshot 12: gewählte Angaben bezüglich Unebenheiten während der Kranfahrt.....	43
Mathcad-Screenshot 13: Bestimmung des Lastkollektivs.....	45
Mathcad-Screenshot 14: Bestimmung der Triebwerkgruppe.....	46
Mathcad-Screenshot 15: Bestimmung des Seiltrieb-Wirkungsgrads	47
Mathcad-Screenshot 16: Bestimmung der Seilkraft.....	47
Mathcad-Screenshot 17: Zusammenfassen der Risikoklassen aus DIN EN 13001.....	48
Mathcad-Screenshot 18: Bestimmung des Beiwerts c für nicht drehungsfreie Seile.....	49
Mathcad-Screenshot 19: Bestimmung des Beiwerts c für drehungsfreie Seile.....	50
Mathcad-Screenshot 20: Auswahl des Beiwerts c nach Art des Drahtseils	50
Mathcad-Screenshot 21: Bestimmung des Seildurchmessers.....	51
Mathcad-Screenshot 22: Bestimmung des Seiltrommeldurchmessers.....	52
Mathcad-Screenshot 23: Bestimmung des Seilrollendurchmessers.....	53
Mathcad-Screenshot 24: Bestimmung der Ausgleichsrollendurchmessers	53

Mathcad-Screenshot 25: Ergebnisse der Seiltriebdimensionierung nach DIN 15020.....	54
Mathcad-Screenshot 26: gewählte Werte der Seiltriebdimensionierung für den Festigkeitsnachweis nach DIN EN 13001.....	55
Mathcad-Screenshot 27: Berechnung des Abhebezeitpunkts (Bestimmung von Φ_{2t})	56
Mathcad-Screenshot 28: Berechnung von Abhebekoordinate und -geschwindigkeit sowie Hilfsgrößen (Bestimmung von Φ_{2t})	56
Mathcad-Screenshot 29: Funktion des Masse-Feder-Modells inklusive Auswertung (Bestimmung von Φ_{2t}).....	57
Mathcad-Screenshot 30: Bestimmung von Φ_{2t} mittels vereinfachter Gleichung	58
Mathcad-Screenshot 31: Bestimmung der Steifigkeitsklasse und des Beiwerts β_2 ..	58
Mathcad-Screenshot 32: Bestimmung der Hubgeschwindigkeiten für die Lastfälle A1 und C1	59
Mathcad-Screenshot 33: Bestimmung der Dynamik-Beiwerte Φ_2 und Φ_{2C}	59
Mathcad-Screenshot 34: Bestimmung des Dynamik-Beiwerts Φ_4	60
Mathcad-Screenshot 35: Bestimmung des Faktors Φ_A für die Ermittlung von Φ_5	60
Mathcad-Screenshot 36: Bestimmung von Φ_5 und $\Phi_{5,NA}$	61
Mathcad-Screenshot 37: Bestimmung von Φ_{6stat} und Φ_{6dyn}	61
Mathcad-Screenshot 38: Bestimmung von Φ_L	62
Mathcad-Screenshot 39: Bestimmung von f_{S1}	62
Mathcad-Screenshot 40: Bestimmung von f_{S2} und f_{S3}	63
Mathcad-Screenshot 41: Bestimmung von γ_p und γ_n	64
Mathcad-Screenshot 42: Bestimmung von γ_{rb}	65
Mathcad-Screenshot 43: Bestimmung von $F_{Sd,s}$ und $F_{Rd,s}$ und Überprüfung des statischen Festigkeitsnachweises.....	66
Mathcad-Screenshot 44: Bestimmung von Φ_f	67
Mathcad-Screenshot 45: Bestimmung von $f_{S2,f}$ und $f_{S3,f}$	68
Mathcad-Screenshot 46: Bestimmung von γ_{rf}	68
Mathcad-Screenshot 47: Bestimmung von k_r	68
Mathcad-Screenshot 48: Bestimmung von s_r	69
Mathcad-Screenshot 49: Bestimmung von f_{f1} und f_{f2}	70
Mathcad-Screenshot 50: Bestimmung von f_{f3}	70
Mathcad-Screenshot 51: Bestimmung von f_{f4} und f_{f5}	71

Mathcad-Screenshot 52: Bestimmung von f_{t6} und ω_g	72
Mathcad-Screenshot 53: Bestimmung von f_{t7}	73
Mathcad-Screenshot 54: Bestimmung von f_t	73
Mathcad-Screenshot 55: Bestimmung von $F_{Sd,f}$ und $F_{Rd,f}$ und Überprüfung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit	74
Mathcad-Screenshot 56: Ergebnisse der Festigkeitsnachweise nach DIN EN 13001 des Rechenbeispiels	75
Mathcad-Screenshot 57: Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Dimensionierungen des Brückenkrans der TU Wien	78
Mathcad-Screenshot 58: Ergebnis des statischen Festigkeitsnachweises des Brückenkrans der TU Wien	78
Mathcad-Screenshot 59: Ergebnis des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit des Brückenkrans der TU Wien	78

9 Literaturverzeichnis

- Böge, Alfred, Wolfgang Böge, Dieter Arndt, Werner Bahmann, Lutz Barfels, Jürgen Bauer, Herbert Bernstein, u. a., Hrsg. *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 23., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- DIN 1025-3:1994-3, Warmgewalzte I-Träger; Breite I-Träger, leichte Ausführung, IPB-Reihe Maße, Masse, statische Werte (1994).
- DIN 15003:1970-2, Hebezeuge; Lastaufnahmeeinrichtungen, Lasten und Kräfte, Begriffe (1970).
- DIN 15020-1:1974-2, Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung (1974).
- DIN EN 13001-1:2015-6, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen (2015).
- DIN EN 13001-2:2014-12, Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen (2014).
- DIN EN 13001-3-2:2015-10, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben (2015).
- DIN EN 15011:2014-09, Krane – Brücken- und Portalkrane (2014).
- Dubbel, Heinrich. *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Herausgegeben von Karl-Heinrich Grote, Beate Bender, und Dietmar Göhlich. 25., neu Bearbeitete und Aktualisierte Auflage. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2018.
- Eigene Darstellung, o. J.
- Feyrer, Klaus, und Karl-Heinz Wehking. *FEYRER: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- Griemert, Rudolf, und Peter Römisch. *Fördertechnik: Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen*. 12., überarbeitete und erweiterte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- https://img.directindustry.de/images_di/photo-m2, o. J.
- <https://www.abuskrane.at/produkte/eintraegerlaufkrane/>, o. J.
- <https://www.casar.de/Portals/0/Documents/Product-Specs/starlift.pdf>, o. J.
- <https://www.konecranes.com/de-de/fachlexikon/brueckenkran>, o. J. Zugriffen 2. Oktober 2020.
- Obretinow, Roland, und Gerhard Wagner. „Die Europäische Krannorm (EN 13001) - Verbindung zu den Eurocodes und grundlegende Änderungen gegenüber DIN 15018“. *Stahlbau* 69 (2000): 218–27.
- Wagner, Gerhard, Jan Scholten, und Henning Haensel. „Neue Möglichkeiten im Festigkeitsnachweis – Die zukünftige Krannorm EN 13001“. *Tagungsband 11. Kranfachtagung, Dresden*, 2003.

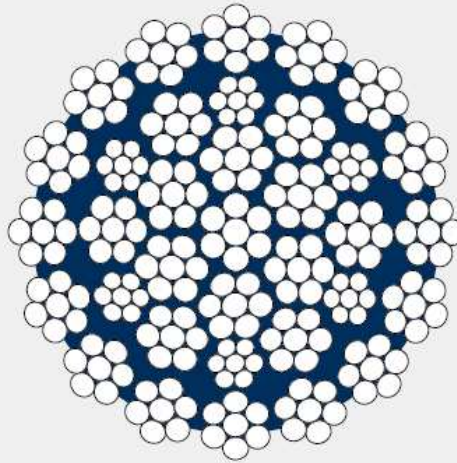
10 Anhang

Anhangsverzeichnis

A.	Datenblatt: Drahtseil	90
B.	Angaben der Berechnung eines Brückenkrans der TU Wien.....	92

A. Datenblatt: Drahtseil

CASAR STARLIFT



PROPERTIES // EIGENSCHAFTEN



Swivel // Wirbel



Lubricated // Gefettet



Tolerance // Toleranz

APPLICATIONS // ANWENDUNGEN

A very flexible rope with a core in a special design avoiding crossovers between the strands of core and preventing internal rope destruction. Hoist rope for mobile cranes, electrical hoists and other applications, where rotation resistant ropes are required.

Ein sehr flexibles Seil mit einer speziell konstruierten Stahlseilseele, die Überkreuzungen zwischen den Litzen vermeidet sowie die Gefahr von Zerstörungen im Seilinneren herabsetzt. Hubseil für Mobilkrane, Elektrozüge und andere Anwendungen, bei denen drehungsfreie Seile erforderlich sind.

OVERVIEW // ÜBERBLICK TECHNISCHE DATEN

Diameter Range // Durchmesserbereich [mm]	7 – 50	50,8 – 72
RCN	23–2	23–2
Number of Outer Strands // Anzahl der Außenlitzen	16	16
Number of Wires // Gesamtdrahtzahl	245	349
Number of Outer Load Bearing Wires // Anzahl der tragenden Drähte in den Außenlitzen	112	112
Average Fill Factor // Mittlerer Füllfaktor	0,653	
Average Nominal Metallic Area Factor C // Mittlerer metallischer Querschnittsfaktor C	0,513	
Average Spin Factor // Mittlerer Verseilfaktor	0,76	

- Temperature range of use: –50°C to +75°C
- Available in ordinary lay and Lang's lay
- Available in right hand and left hand
- Available in galvanized and ungalvanized

- Einsatztemperaturbereich: –50°C bis +75°C
- In Kreuzschlag und Gleichschlag erhältlich
- In rechtsgängig und linksgängig erhältlich
- In verzinkter und blanker Ausführung erhältlich

Datenblatt: CASAR Starlift, Seite 1⁸²

⁸² <https://www.casar.de/Portals/0/Documents/Product-Specs/starlift.pdf>.

Nominal Dia- meter // Nenn- durchmesser		Weight // Gewicht		Minimum Breaking Force // Mindestbruchkraft							
				1770 N/mm ²				1960 N/mm ²			
				kN	t [metric]	lbs	t [2000 lbs]	kN	t [metric]	lbs	t [2000 lbs]
7		0,22	0,15	34,1	3,48	7.666	3,83	37,8	3,85	8.498	4,25
8	5/16	0,29	0,19	44,5	4,54	10.004	5,00	49,3	5,03	11.083	5,54
9		0,37	0,25	55,4	5,65	12.454	6,23	61,3	6,25	13.781	6,89
10		0,46	0,31	69,2	7,06	15.557	7,78	76,6	7,81	17.220	8,61
11	7/16	0,55	0,37	83,1	8,47	18.682	9,34	92,1	9,39	20.705	10,35
12		0,66	0,44	99,9	10,19	22.458	11,23	110,7	11,29	24.886	12,44
	1/2	0,72	0,48	111,7	11,39	25.111	12,56	114,1	11,64	25.651	12,83
13		0,77	0,52	117,3	11,96	26.370	13,19	129,8	13,24	29.180	14,59
14		0,89	0,60	135,9	13,86	30.552	15,28	150,5	15,35	33.834	16,92
15		1,04	0,70	156,3	15,94	35.138	17,57	173,0	17,64	38.892	19,45
16	5/8	1,17	0,79	178,1	18,16	40.038	20,02	197,2	20,11	44.332	22,17
17		1,31	0,88	200,1	20,40	44.984	22,49	221,6	22,60	49.818	24,91
18		1,47	0,99	222,6	22,70	50.042	25,02	246,5	25,14	55.415	27,71
19	3/4	1,66	1,12	250,9	25,58	56.405	28,20	277,8	28,33	62.452	31,23
20		1,82	1,23	277,7	28,32	62.429	31,21	307,5	31,36	69.129	34,56
21		2,02	1,35	306,3	31,23	68.859	34,43	339,2	34,59	76.255	38,13
22		2,19	1,47	337,0	34,36	75.761	37,88	373,2	38,06	83.899	41,95
	7/8	2,25	1,51	337,0	34,36	75.761	37,88	373,2	38,06	83.899	41,95
23		2,41	1,62	366,5	37,37	82.392	41,20	405,9	41,39	91.250	45,62
24		2,63	1,77	400,5	40,84	90.036	45,02	443,5	45,22	99.703	49,85
25		2,83	1,90	431,9	44,04	97.095	48,55	478,3	48,77	107.526	53,76
	1	2,97	2,00	445,8	45,46	100.220	50,11	493,7	50,34	110.988	55,49
26		3,08	2,07	468,2	47,74	105.256	52,63	519,5	52,97	116.788	58,39
27		3,30	2,22	508,3	51,83	114.270	57,14	562,9	57,40	126.545	63,27
28		3,56	2,39	548,8	55,96	123.375	61,69	607,7	61,97	136.616	68,31
	1 1/8	3,76	2,52	571,6	58,29	128.501	64,25	632,9	64,54	142.282	71,14
29		3,83	2,57	585,8	59,74	131.693	65,85	648,6	66,14	145.811	72,91
30		4,11	2,76	627,1	63,95	140.978	70,49	694,4	70,81	156.107	78,05
31		4,34	2,91	665,6	67,87	149.633	74,82	736,9	75,14	165.662	82,83
32	1 1/4	4,64	3,11	710,5	72,45	159.727	79,84	786,7	80,22	176.857	88,43
33		4,94	3,32	753,1	76,80	169.304	84,65	833,9	85,04	187.468	93,73
34		5,23	3,52	803,9	81,98	180.724	90,36	890,2	90,78	200.125	100,06
35	1 3/8	5,61	3,77	848,2	86,49	190.683	95,34	939,3	95,78	211.163	105,58
36		5,86	3,93	906,1	92,40	203.699	101,85	1.003,4	102,32	225.573	112,79
38	1 1/2	6,61	4,44	1.005,5	102,53	226.045	113,02	1.113,5	113,55	250.325	125,16
40		7,24	4,87	1.111,9	113,38	249.965	124,98	1.231,3	125,56	276.807	138,40
	1 5/8	7,71	5,18	1.183,9	120,73	266.154	133,08	1.311,0	133,69	294.735	147,37
42		8,00	5,38	1.234,1	125,84	277.437	138,72	1.366,6	139,36	307.224	153,61
44		8,80	5,91	1.352,7	137,94	304.099	152,05	1.497,9	152,74	336.741	168,37
	1 3/4	8,77	5,90	1.380,5	140,77	310.349	155,17	1.528,7	155,89	343.665	171,83
46		9,62	6,46	1.473,9	150,30	331.346	165,67	1.632,1	166,43	366.911	183,46
48	1 7/8	10,50	7,06	1.608,1	163,98	361.515	180,76	1.780,7	181,58	400.317	200,16
50		11,39	7,65	1.740,0	177,43	391.167	195,58	1.926,7	196,47	433.139	216,57
	2	11,63	7,82	1.796,1	183,15	403.779	201,89	1.988,8	202,80	447.100	223,55
52		12,38	8,32	1.832,5	186,86	411.962	205,98	2.029,2	206,92	456.182	228,09
54	2 1/8	13,36	8,98	1.976,4	201,54	444.312	222,16	2.188,5	223,17	491.994	246,00
56		14,33	9,63	2.141,3	218,35	481.383	240,69	2.371,1	241,79	533.044	266,52
	2 1/4	14,68	9,87	2.230,1	227,41	501.346	250,67	2.469,5	251,82	555.166	277,58
58		15,41	10,35	2.285,4	233,05	513.778	256,89	2.530,8	258,07	568.946	284,47
60		16,53	11,11	2.455,9	250,43	552.108	276,05	2.719,5	277,31	611.368	305,68
	2 3/8	16,71	11,23	2.482,6	253,16	558.106	279,05	2.749,0	280,33	618.009	309,00
62		17,65	11,86	2.623,1	267,48	589.696	294,85	2.904,7	296,20	653.002	326,50
64	2 1/2	18,81	12,64	2.799,3	285,45	629.308	314,65	3.099,8	316,09	696.863	348,43
66		20,04	13,47	2.978,8	303,76	669.661	334,83	3.298,5	336,36	741.532	370,77
	2 5/8	20,45	13,74	3.040,0	310,00	683.428	341,71	3.366,3	343,27	756.777	378,39
68		21,31	14,32	3.173,9	323,65	713.521	356,76	3.514,6	358,39	790.113	395,06
70	2 3/4	22,58	15,18	3.336,5	340,23	750.075	375,04	3.694,7	376,76	830.601	415,30
72		23,95	16,10	3.545,6	361,55	797.082	398,54	3.926,2	400,37	882.645	441,32

Datenblatt: CASAR Starlift, Seite 2⁸³⁸³ <https://www.casar.de/Portals/0/Documents/Product-Specs/starlift.pdf>.

B. Angaben der Berechnung eines Brückenkrans der TU Wien

Angaben:

Seil:

- gewähltes Seil: keine Angabe
- Seilsteifigkeitsklasse: $R_r := 1960 \text{ MPa}$
- Seilart: ⁽¹⁾ $SA := \text{"df"}$
- Seilgeometrie: ⁽²⁾ $SG := 3$
- Anzahl der Seilaußenstränge: $n_{SA} := 18$
- Seilinnenschmierung: * $SIS := \text{"ja"}$
- Anzahl eingesetzter Seile während der gesamten Kran-Lebensdauer (ca. 20 Jahre): $l_r := 2$

Massen und Lasten:

- maximale Hublast (Tragfähigkeit): $m_H := 5 \text{ tonne}$
- Masse Anschlagmittel: $m_A := 0 \text{ kg}$
- Masse Lastaufnahmemittel: $m_L := 0 \text{ kg}$
- maximale Nutzlast: $m_N := m_H - (m_A + m_L) = 5 \text{ tonne}$
- Masse Laufkatze: $m_{tr} := 220 \text{ kg}$
- Masse Tragmittel: $m_T := 50 \text{ kg}$
- Risikoklasse: ⁽³⁾ $RK := 0$

* : Alle mit * gekennzeichneten Angaben sind mit "ja" oder "nein" zu definieren.

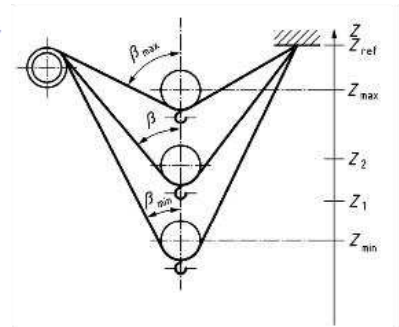
(1): nicht drehungsfrei: $SA = \text{"ndf"}$, drehungsfrei: $SA = \text{"df"}$

(2): einlagig o. parallel geschl.: $SG=1$
 einlagig o. parallel geschl. (6-10 Außenstränge mit Kunststoffimprägnierung): $SG=2$
 drehungsfrei und unverdichtet $SG=3$
 drehungsarm, verdichtet $SG=4$

(3): kein besonderes Risiko: $RK=0$
 erhöhtes Risiko (z.B.: Transport von Flüssigmetall): $RK=1$
 sehr hohes Risiko (z.B.: Krane in Kernkraftwerken): $RK=2$

Seiltrieb:

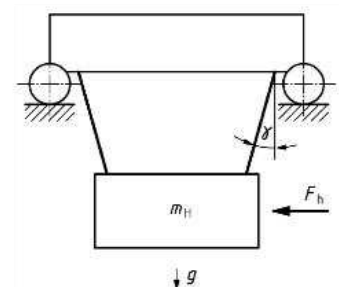
- Anzahl Seilrollen gesamt: $n_r := 1$
- Anzahl Seiltrommeln gesamt: $n_t := 1$
- Anzahl Ausgleichsrolle gesamt: $n_a := 0$
- Anzahl der Seilstränge: $n_m := 2$
- Anzahl fester Umlenkrollen: $n_s := 0$
- relevante Biegewechsel/Hubbewegung: $w := 3$
- max. Hubhöhe: $l := 10 \text{ m}$
- geführte Seilwicklung (Seiltrommel): * $GS := \text{"ja"}$
- mehrlagige Seilwicklung: * $MS := \text{"nein"}$
- Art der Lagerung des Seiltriebs: (4) $LA := \text{"Wälzlager"}$
- Gleitlagerdurchmesser: (5) $d_{bearing} := 0 \text{ mm}$
- max. Winkel zw. Seilsträngen und Kraft: $\beta_{max} := 10 \text{ deg}$
- Winkel zw. Seilsträngen und Kraft bei z_2 : $\beta(z_2) := 6 \text{ deg}$
- Referenzhöhe: $z_{ref} := 10 \text{ m}$
- vorwiegend genutzter Arbeitsbereich:
(für: $Z_{min} = 0 \text{ m}$)
 $z_2 := 7 \text{ m}$
 $z_1 := 1 \text{ m}$



- Auf- und Ablaufwinkel des Seils an Seilrollen und -Trommel: $\delta_1 := 0 \text{ deg}$ $\delta_2 := 0 \text{ deg}$ $\delta_3 := 0 \text{ deg}$
 $\delta_4 := 0 \text{ deg}$ $\delta_5 := 0 \text{ deg}$ $\delta_6 := 0 \text{ deg}$
 $\delta_7 := 0 \text{ deg}$



- Last an mehreren nicht parallelen Seilen (z.B. Seilpyramide): * $S_{np} := \text{"nein"}$
- Horizontalkraft: $F_h := 0 \text{ N}$
- Winkel zwischen Schwerkraft und projiziertem Seil in der aus F_h und g gebildeten Ebene: ($\gamma_{fs3} > 0^\circ$!) $\gamma_{fs3} := 0 \text{ deg}$



Hubwerk:

- max. kont. Hubgeschwindigkeit: $v_{h,max} := 4.5 \frac{m}{min}$
- kont. Feinhubgeschwindigkeit: $v_{h,CS} := 0.5 \frac{m}{min}$
- Beschl. Heben/Senken (lt. VDI 3573): $a := 1 \frac{m}{s^2}$
- Beschl. bei Not-Aus (Annahme): $a_{NA} := 3 \frac{m}{s^2}$
- Hubwerktyp (lt. DIN EN 13001-2): ⁽⁶⁾ $HD := \text{"HD2"}$
- Geschwindigkeitssteuerung: ⁽⁷⁾ $\kappa_G := 2$
- mittlere Laufzeit pro Tag in Stunden: $t_m := 1$
- gewählte Gesamtzahl von Arbeitsspielen: $C := 2.5 \cdot 10^5$
- Art des Hubkraftbegrenzers: ⁽⁸⁾ $H := \text{"indirekt"}$

Brückenträger: (I-Träger lt. DIN 1025-3)

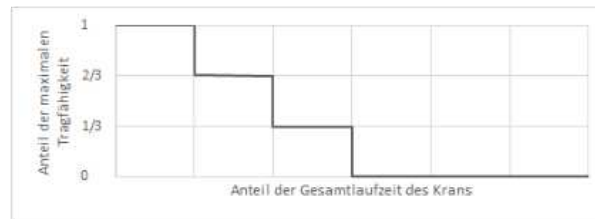
- gewählter I-Träger: IPB I 360
- Flächenträgheitsmoment: $I_y := 33090 \text{ cm}^4$
- Länge: $l_{cr} := 8 \text{ m}$
- Masse: $m_g := 112 \frac{kg}{m} \cdot l_{cr} = 896 \text{ kg}$
- E-Modul: $E := 210 \text{ GPa}$

⁽⁶⁾: mögliche Eingaben für den Hubwerkstyp HD: "HD1", "HD2", "HD3", "HD4", "HD5"

⁽⁷⁾: 1-stufig: $\kappa_G = 1$; 2-stufig: $\kappa_G = 2$;
 mehrstufig: $\kappa_G = 3$; stufenlos: $\kappa_G = 4$

⁽⁸⁾: direkt wirkender Hubkraftbegrenzer: $H = \text{"direkt"}$
 indirekt wirkender Hubkraftbegrenzer: $H = \text{"indirekt"}$

Auslastung des Krans:



Belastung 1 (maximale Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_1 := 1$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_1 := \frac{1}{6}$

Belastung 2 (hohe Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_2 := \frac{2}{3}$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_2 := \frac{1}{6}$

Belastung 3 (geringe Last):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\beta_3 := \frac{1}{3}$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_3 := \frac{1}{6}$

Belastung 4 (nur Gewicht von Lastaufnahme- und Anschlagmittel):

Auslastung der Tragfähigkeit: $\gamma_- := \frac{m_A + m_L}{m_H} = 0$ Anteil an Gesamtlaufzeit: $t_\Delta := 1 - (t_1 + t_2 + t_3) = 0.5$

Unebenheiten der Fahrbahn:

- Art der Unebenheit: ⁽⁹⁾ $\lambda := 1$
- Eigenfrequenz des (Einmassen-)Kranmodells: $f_q := 10 \text{ Hz}$
- Stufenhöhe: $h_s := 2 \text{ mm}$
- Lückenbreite: $e_G := 20 \text{ mm}$
- Kranfahrt-Geschwindigkeit: $v_{\text{kran}} := 90 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
- Radius des Laufrades: $r_{\text{kran}} := 100 \text{ mm}$

(9): keine Unebenheiten: $\lambda = 1$
 Stufe: $\lambda = 2$
 Lücke: $\lambda = 3$