



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Erarbeiten eines Berechnungsprogrammes für die EN 13001

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurin (Dipl.-Ing. oder DI) eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Lauritz MÖRSEN

Mat.Nr.: 01126242

unter der Leitung von

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

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, E307

Wien, Juni 2021

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit 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.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Stadt und Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract/Kurzfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Motivation.....	2
2.2	Zielsetzung.....	3
2.3	Vorgehensweise.....	4
3	Aktueller Stand der Softwarelösungen.....	5
3.1	KRASTA.....	5
3.2	EN-Kran	5
3.3	Fazit.....	6
4	Grundlagen zur Anwendung der EN 13001	7
4.1	Begriffsdefinition.....	7
4.1.1	Beiwerte	7
4.1.2	Lastkombination	7
4.1.3	Massenverteilungsklassen	7
4.1.4	Methode der zulässigen Spannungen	8
4.1.5	Methode der Grenzzustände	8
4.1.6	Nennspannungskonzept.....	9
4.1.7	Wöhlerlinie	9
4.1.8	Kerbfälle.....	10
4.1.9	Lineare Schadensakkumulation	10
4.2	Methodik	11
4.2.1	Kranmodell und Lasten	11
4.2.2	Lasteinwirkung	13
4.2.3	Grenzzustände.....	14
4.2.4	Nachweis	14
4.3	Vergleich DIN 15018 und EN 13001.....	15
4.3.1	Nachweis	15
4.3.2	Kranmodell und Lasten	17
4.3.3	Grenzzustände für den statischen Festigkeitsnachweis	18
5	Beschreibung des Berechnungsprogrammes.....	19
5.1	Allgemein Anmerkungen zum Tool.....	19
5.2	Funktionsweise des Programmcodes.....	20

6	Anwendung des Berechnungsprogrammes	22
6.1	Technische Daten des Krans	22
6.2	Kranmodell und Lasten	23
6.2.1	Identifikation der Lasten	23
6.2.2	Berechnung der dynamischen Beiwerte	24
6.2.3	Berechnung der Lasten	37
6.2.4	Risikobeiwerte.....	42
6.2.5	Modellierung der Lastfälle	43
6.2.6	Berechnung der Lastfälle	43
6.3	Zulässige Grenzzustände.....	45
6.3.1	Grenzzustände von Bauteilen	45
6.3.2	Grenzzustände von Schraubenverbindungen.....	46
6.3.3	Grenzzustände von Schweißnähten.....	51
6.3.4	Grenzzustände des Betriebsfestigkeitsnachweis.....	52
6.4	Nachweise	55
7	Ergebnisse	57
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	60
9	Literaturverzeichnis	62
10	Abbildungsverzeichnis	63
11	Anhang A: Nachweisführung mittels DIN 15018-1	65

1 Abstract

The European Union strives for a harmonization of national technical standards. As a result, the technical committee 147 (TC 147) was established in the early 90s to develop a new set of standards for cranes that are applicable in all member states. In 2012 a preliminary version of the European norm for cranes EN 13001 was published. While the standard is still in a revision process, the new standard forces professional crane producers to conduct a transition from the previously used standard DIN 15018 towards the new European standard.

As such, this master thesis seeks to support professionals by providing an automatized calculation application that enables the users to validate the lawfulness of their crane structures under the new normative framework. In addition, the thesis provides insights on the use of the EN 13001 and a comparison of the old and new set of standards. In other words, this piece of work can be considered a user manual to the application of the new standards with the clear target to foster an efficient transition.

Overall, the new standard requires more effort in its application due to the increased complexity of the verification processes. However, as it allows for the use of computer-supported product development methods such as CAx and FEM, a critical barrier for innovation has been removed.

Im Rahmen des Normenharmonisierungsprozesses der Europäische Union wurde Anfang der 90er Jahre das technische Komitee 147 (TC 147) gegründet, um eine neue Norm für Krane zu entwickeln. Im Jahr 2012 wurde eine vorläufige Version der europäischen Norm für Krane (EN 13001) veröffentlicht. Dies zwingt professionelle Kranhersteller dazu, einen Übergang von der bisher verwendeten Norm DIN 15018 zur neuen europäischen Norm durchzuführen.

Um kleine und mittelgroße Kranbauer bei der Übergangsphase zu unterstützen, wurde bei dieser Diplomarbeit ein Berechnungsprogramm erarbeitet, welches durch einen transparenten und flexiblen Ansatz die Übergangsphase erleichtern soll. Durch die automatisierte Berechnungsanwendung ist es den Anwendern möglich die Rechtmäßigkeit ihrer Kranstrukturen unter den neuen normativen Rahmenbedingungen zu validieren.

Darüber hinaus wurde ein Vergleich der alten und der neuen Kran Norm durchgeführt. Auf Grund des gesteigerten Umfangs und Komplexität der Norm ist die Anwendung nun deutlich aufwendiger. Allerdings sind nun die Ergebnisse von modernen, computerunterstützten Entwicklungsmethoden wie CAx und FEM zulässig. Dadurch steht Kranbauern nun die Möglichkeit offen auch Simulationsergebnisse beim Festigkeitsnachweis einfließen zu lassen.

2 Einleitung

2.1 Motivation

Ende 1988 gründete das europäische Komitee für Standardisierung (CEN) das technische Komitee (TC) für die Sicherheit von Krananlagen und Hebezeuge. Die Zielsetzung des Komitees ist die Veröffentlichung von regulatorischen Dokumenten, die alle technisch relevanten Aspekte in den betreffenden Einsatzgebieten in den Mitgliedstaaten regeln. [1]

Zwar wurde auch von dem CENELEC, der europäischen Standardisierungsorganisation für elektrotechnisches Equipment, die IEC/TC 44 für die elektrotechnischen Bereiche des Kranbaus gegründet. Für den Inhalt dieser Arbeit sind diese Normen jedoch nicht relevant. Der Vollständigkeit halber sollen sie an dieser Stelle aber nicht unerwähnt bleiben. [1]

Das CEN/TC 147 ist in verschiedene Arbeitsgruppen gegliedert. Abbildung 2-1 zeigt die Struktur der Arbeitsgruppen. Diese werden weiters in Untergruppen für allgemein gültige Normen, den WGs, und Produktnormen, den WGP, unterteilt. Stand heute sind drei (WG1 bis WG3) der fünf Arbeitsgruppen aktiv. [2]

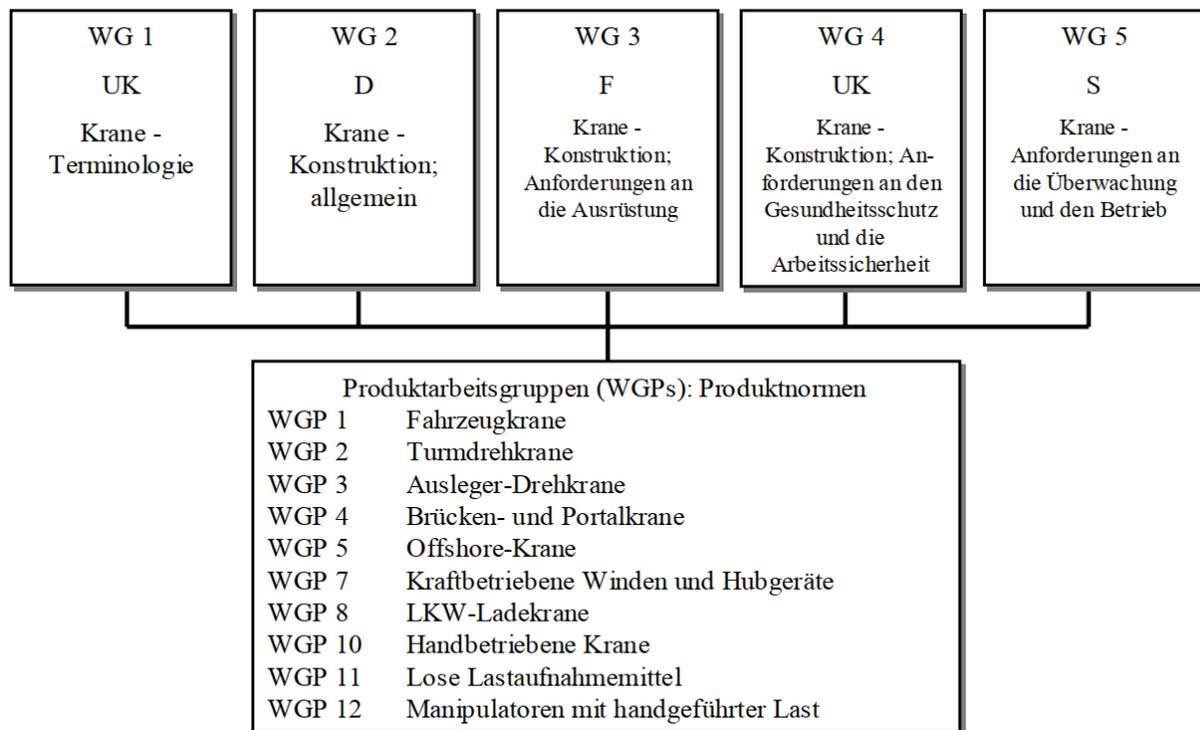


Abbildung 2-1: Struktur des CEN/TC 147 [3]

Der Fokus der Arbeit liegt auf den von der EN 13001 abgedeckten Bereichen, für welche sich die Arbeitsgruppe WG 2 Krane – Konstruktion; allgemein verantwortlich zeigt. Die Norm soll dabei als allgemein gültige Grundlage für alle Krantypen und Hebezeuge gelten und somit eine Basis unabhängig von den Produktnormen darstellen. Sie löst damit bestehende nationale Normen wie die DIN 15018 für Stahltragwerke oder DIN 15020 für Stahlseile ab.

Die EN 13001 ist in drei Teile unterteilt. Der dritte Teil ist in weitere Unterteile gegliedert, welche auf verschiedene Bereiche der Krankonstruktion eingehen [4]:

Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen

Teil 2: Lasteinwirkungen

Teil 3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise

Teil 3.1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken

Teil 3.2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen und Seiltrieben

Teil 3.3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Laufrad - Schiene Kontakte

Teil 3.4: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis für Maschinenbauteile - Lager

Teil 3.5: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von geschmiedeten Haken

Durch den ganzheitlichen Ansatz der Norm hat sich der Umfang erhöht, wodurch die Behandlung der gesamten Norm den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen würde. Daher wird das Themengebiet auf jenes der Stahltragwerke beschränkt und deckt damit die Teile EN 13001-1, EN 130001-2 und EN 13001-3-1 ab.

Neben der Struktur hat die Arbeitsgruppe auch inhaltlich Anpassungen vorgenommen. Die zwei größten Veränderungen betreffen dabei die Einführung moderner Nachweiskonzepte sowie die Berücksichtigung von Simulationsergebnissen. Die Sicherheitsnachweise orientieren sich dabei an anderen Eurocode Richtlinien, wie beispielsweise der Stahlbaunorm EN 1993 für Stahltragwerke. Die Zulässigkeit von Simulationsergebnissen (z.B. FEM-Analysen) war ein großes Anliegen der Arbeitsgruppe. Gemeinsam stellen beide Änderungen das Fundament der europäischen Norm dar und sind Folge einer konsequenten Modernisierung der älteren, nationalen Normen.

Die mit der Modernisierung einhergehenden Vorteile im Bereich der Anwendung sind auch mit einem erhöhten Umfang und gesteigerter Komplexität verbunden. Ziel der Arbeit ist es daher die Automatisierbarkeit des Festigkeitsnachweises zu prüfen und damit den Übergang von alter zu neuer Norm zu vereinfachen. Dabei soll insbesondere der Wissenstransfer im Vordergrund stehen, weshalb die Analyse der Methodik der neuen Norm ein elementarer Bestandteil dieser Arbeit ist.

2.2 Zielsetzung

Um die im letzten Abschnitt angesprochene Automatisierung zu bewerkstelligen, soll ein Programm entwickelt werden, welches zur normgerechten Berechnung dient. Da der angesprochene Wissenstransfer im Vordergrund steht, dient das Dokument als Leitfaden, welcher einerseits zur Vertiefung des Verständnisses für die Anwendung der Norm und andererseits für die Verwendung des Berechnungsprogrammes dient.

2.3 Vorgehensweise

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Softwarelösungen für die Nachweisführung gemäß EN 13001 von Kranen beschrieben. Kapitel 4 erklärt die Grundlagen sowie die Methodik beziehungsweise die grundsätzliche Vorgehensweise der Norm. Außerdem werden inhaltliche Unterschiede zwischen DIN 15018 und EN 13001 erörtert. In Kapitel 5 wird der Aufbau des Berechnungsprogrammes beschrieben während Kapitel 6 die konkrete Anwendung der Software anhand eines Einträgerbrückenkranes zeigt. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse analysiert und verifiziert. Anschließend wird in Kapitel 8 die Durchführung der Berechnung qualitativ eingeordnet und bietet einen Ausblick auf zukünftige Herausforderungen.

3 Aktueller Stand der Softwarelösungen

Im deutschsprachigen Raum gibt es derzeit zwei Programme deren Funktionsumfang die EN 13001 für Stahltragwerke abdeckt. Dabei werden Dienstleistungen von Ingenieurbüros außenvorgelassen, da diese zwar normgerechte Lösungen anbieten, diese aber für jeden Kunden individuell vorgenommen werden und damit nicht der Definition einer automatisierten Lösung entsprechen. Die genauere Betrachtung der zur Verfügung stehenden Programme soll einerseits die Notwendigkeit für die Erarbeitung einer unabhängigen digitalen Lösung zeigen. Andererseits sollen das Anforderungsprofil und Alleinstellungsmerkmale identifiziert werden.

Der Vergleich der beiden Programme wird strukturell in „Vorliegende Funktionsumfang“ und „Potenzielle Schwachstellen“ gegliedert.

3.1 KRASTA

KRASTA ist ein Statik Programm der Firma Kühne BSB, welches aus Universitätsprojekten der TU Darmstadt und der RU Bochum hervorging. Es wird besonders im deutschsprachigen Raum und den Niederlanden verwendet.

Vorliegender Funktionsumfang

Die Software bietet die Möglichkeit, mechanische Systeme ganzheitlich abzubilden und zu berechnen. Die grafische Darstellung erleichtert den Einstieg und ermöglicht die intuitive Modellierung des zugrunde liegenden mechanischen Systems. Neben der klassischen, statischen Berechnung von Stabsystemen bietet KRASTA darüber hinaus die Möglichkeit einen Betriebsfestigkeitsnachweis nach EN 13001-3-1 durchzuführen. Der statische Nachweis kann nicht innerhalb des Programms durchgeführt werden, womit eine vollumfängliche Festigkeitsberechnung nicht möglich ist.

Potenzielle Schwachstellen

Die Verwendung des Programms für den Betriebsfestigkeitsnachweis setzt dezidiertes Wissen über die Norm voraus, wie beispielsweise die Spannungsverlaufsklassen oder die vorliegenden Kerbfälle.

Zudem muss für den Nachweis ein komplettes mechanisches Stabsystem im Programm hinterlegt werden. Durch die Lizenz- und Opportunitätskosten, welche durch anfängliche Kompatibilitätsprobleme und die Integration von KRASTA in die digitale Infrastruktur entstehen, ist die kommerzielle Nutzung von KRASTA vor allem dann sinnvoll, wenn es für den gesamten Auslegungsprozess verwendet wird.

3.2 EN-Kran

Bei EN-Kran handelt es sich um eine Software entwickelt von Gerhard Wagner von der RU Bochum. Professor Wagner war maßgeblich an der Entwicklung der EN 13001 beteiligt.

Vorliegender Funktionsumfang

Das Programm ist spezialisiert auf die Normgerechte Festigkeitsnachweisführung für Ein- und Zweiträgerbrückenkrane. Die Software ist dabei sowohl konform mit der EN 13001 als auch mit der betreffenden Produktnorm für Brücken- und Portalkräne EN 15011. Für die Berechnung benötigt das Programm die zu berechnenden Krantdaten. Die Berechnung erfolgt danach automatisch und setzt nur begrenztes Wissen in Bezug auf die Anwendung der Norm voraus.

Potenzielle Schwachstellen

Im aktuellen Zustand ist eine verlässliche Nutzung, welche auch den rechtlichen Anforderungen für einen Kranbauer standhält, nicht möglich. Beispielsweise stimmen die Balkenquerschnittsdaten, welche in der Datenbank hinterlegt sind und für die Berechnung genutzt werden, nicht mit den entsprechenden Normen überein. Diese Art von Problemen sind dem frühen Entwicklungsstadium der Software geschuldet und werden vermutlich durch weitere Iterationsschleifen behoben. Allerdings sind die Ergebnisse dadurch zu hinterfragen und bedürfen einer externen Kontrollberechnung des Konstrukteurs.

Ein weiterer Aspekt, der je nach Anwender problematisch sein kann, ist das vorliegende Black-Box Prinzip. Einerseits bietet dies den Vorteil, dass bei der Verwendung keine intensive Auseinandersetzung mit der Norm erfolgen muss, um die Nachweise normkonform durchführen zu können. Andererseits ist es so nicht möglich den Umgang mit der Norm zu erlernen und mögliche Innovations- und Optimierungspotentiale auszunutzen.

Schlussendlich fokussiert sich das Programm auf das Anwendungsgebiet von Brückenkranen. Eine Erweiterung für weitere Krantypen ist von Nutzerseite nicht möglich und von Entwicklerseite nicht geplant.

3.3 Fazit

Sowohl KRASTA als auch EN-Kran bieten für spezifische Problemstellungen sehr gute Lösungen. KRASTA bietet für Nutzer der eigenen Software eine komfortable Ergänzung für die Betriebsfestigkeitsberechnung nach EN 13001, während EN-Kran für Brückenkranebauer die Möglichkeit bietet, ihre bestehenden Konstruktionen effizient auf Normkonformität zu überprüfen.

Allerdings setzen beide Lösungen auf eine geschlossene Softwarelösung, ohne die Norm per se zu erklären. Da kein normspezifisches Wissen für die Anwendung notwendig ist, ist dieser Ansatz nachvollziehbar und bietet entsprechend Komfort in der Anwendung. Durch den fehlenden Wissenstransfer entsteht allerdings eine Abhängigkeit gegenüber dem Softwareprovider. Ein weiterer Aspekt, den beide Produkte gemein haben, ist die Inflexibilität. KRASTA benötigt für den Nachweis ein vollständiges Stabmodell des Krans. Kombiniert mit den anfallenden Kosten bietet KRASTA gerade für kleinere Kranbauer mit limitierten Ressourcen nicht die Flexibilität, verschiedene Programme zu kombinieren. EN-Kran ist wiederum eine spezialisierte Lösung, welche nur für Brückenkrane anwendbar ist. Folglich sind sowohl die Transparenz als auch die Flexibilität valide Alleinstellungsmerkmale für das finale Berechnungsprogramm und Zielsetzung dieser Arbeit.

4 Grundlagen zur Anwendung der EN 13001

In diesem Abschnitt werden für die Norm spezifische Begriffe definiert. Anschließend wird auf die grundsätzliche Methodik der Norm eingegangen und Unterschiede zwischen alter und neuer Norm erörtert.

4.1 Begriffsdefinition

Es werden jene Begriffe definiert, die für die Norm relevant sind und nicht dem allgemeinen Sprachgebrauch eines Ingenieurs entsprechen.

4.1.1 Beiwerte

Beiwerte sind ein elementarer Bestandteil der Norm. Sie dienen dazu notwendige Sicherheiten über Überhöhungsfaktoren in die Berechnung einfließen zu lassen und werden mit den vorliegenden, auf das System wirkenden, Lasten multipliziert. Man unterscheidet zwischen Teilsicherheitsbeiwerten, Risikobeiwerten, Widerstandsbeiwerten und Dynamikbeiwerten. Teilsicherheitsbeiwerte dienen zur Berücksichtigung von Effekten, die bei Lastüberlagerung entstehen. Risikobeiwerten kommen bei Kranen zum Einsatz, deren Betrieb besonders kritisch ist, wie das Verladen von radioaktiven Brennstäben in einem Atomkraftwerk. Sie sorgen für eine Erhöhung der Lasten, um der erhöhten Gefahr bei Versagen gerecht zu werden. Widerstandbeiwerte berücksichtigen die Schwankungen bei der Werkstoffqualität und werden für die Grenzwertberechnung auf Basis der Werkstoffkennwerte herangezogen. Da für die Berechnung des Krans ein statisches System vorausgesetzt wird, werden die dynamische Effekte, die durch den Betrieb entstehen können, über die Dynamikbeiwerte berücksichtigt.

4.1.2 Lastkombination

Da in den seltensten Fällen alle Lasten gleichzeitig auf den Kran wirken, werden in der Norm Lastkombination definiert, welche realen Anwendungsfällen nachempfunden sind. Die Lastkombinationen sind nach Häufigkeit in die Kategorien A, regelmäßig auftretende Kombination, bis C, außergewöhnlich auftretenden Kombination, gegliedert. Je nach Krantyp und Anwendungsgebiet kommen jeweils andere Lastkombinationen zum Einsatz. Sie dienen als Grundlage für den Sicherheitsnachweis. Während der Kran für den statischen Nachweis allen vorliegenden Lastkombinationen genügen muss, ist für den Betriebsfestigkeitsnachweis eine regelmäßig auftretenden Lastkombination, A, zu verwenden.

4.1.3 Massenverteilungsklassen

Hublasten können je nach Krantyp and Bauart sowohl günstig als auch ungünstig auf die Belastung des Krans wirken. Diese unterschiedlichen Wirkungsweisen können maßgeblichen Einfluss darauf haben, wie sich der Kran bei bestimmten Lastkombinationen verhält. Die europäische Norm berücksichtigt dies indem bestimmte Beiwerte, wie der Beiwert für Gravitationseinwirkung der Masse, über die Massenverteilung definiert werden. Die Definition ob und in welcher Stellung ein Kran eine günstige oder ungünstige Belastung aufweist, obliegt

dem Konstrukteur. Zum besseren Verständnis illustriert die Norm das Prinzip anhand eines Turmkranes in Abbildung 4-1.

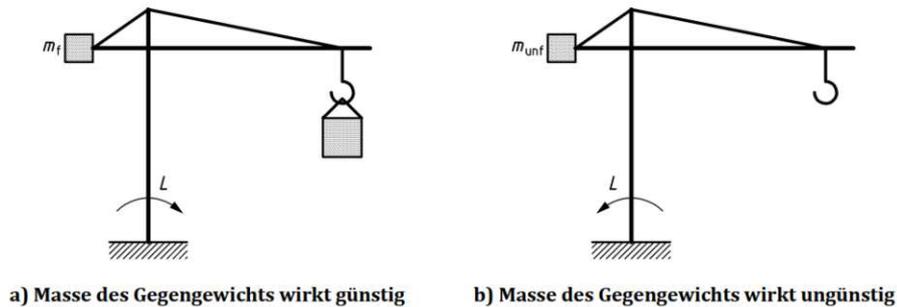


Abbildung 4-1 Massenverteilungsklasse [4]

4.1.4 Methode der zulässigen Spannungen

Die Methode der zulässigen Spannungen ist eine Methode für den statischen Festigkeitsnachweis. Wie in Abbildung 4-2 sichtbar werden dafür im ersten Schritt die wirkenden Kräfte ermittelt. Daraus werden dann die Schnittkräfte und im weiteren Verlauf die vorliegenden Spannungen ermittelt. Diese werden mit den für die Situation passenden zulässigen Spannungen verglichen. Das Verfahren kommt in der DIN 15018 zum Einsatz. In der alten Norm werden die zulässigen Werte jedoch direkt vorgegeben, während die EN 13001 eine Berechnung auf Basis der Werkstoffkennwerte vorsieht.

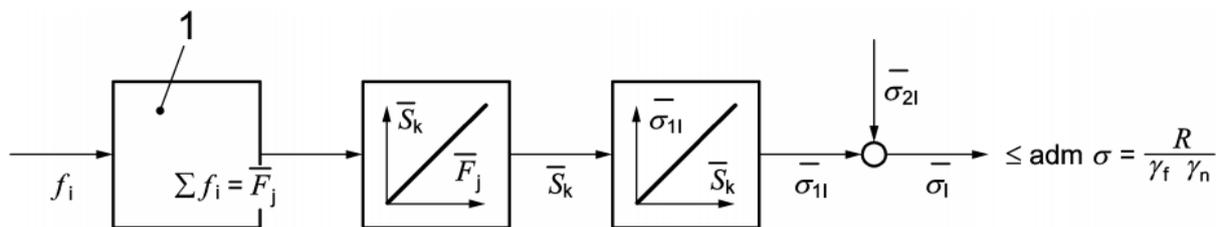


Abbildung 4-2 Methode der zulässigen Spannungen [5]

4.1.5 Methode der Grenzzustände

Die Methode der zulässigen Spannungen ist ein Spezialfall der Methode der Grenzzustände. So wird der Zusammenhang zwischen Schnittkräften und Kräften bei der Methode der zulässigen Spannungen als linear angenommen. Diese Annahme ist in den meisten Fällen nicht korrekt. Um diesen Umstand gerecht zu werden, führt die Methode der Grenzzustände Teilsicherheitsbeiwerte ein, um eine differenziertere Darstellung der vorliegenden mechanischen Gegebenheiten zu ermöglichen. Daher ist diese Methode für alle System uneingeschränkt anwendbar.

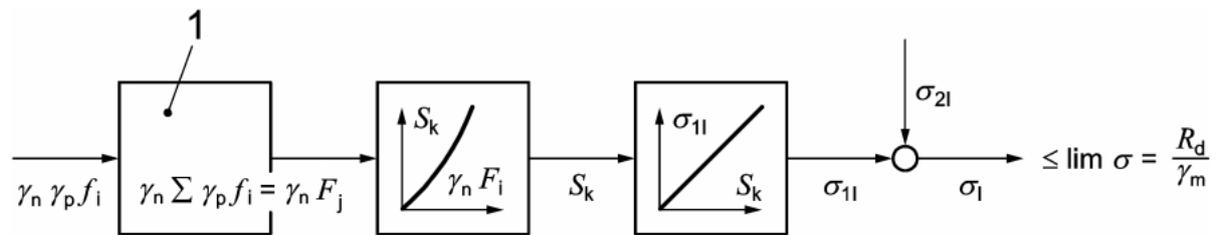


Abbildung 4-3 Methode der Grenzzustände [5]

4.1.6 Nennspannungskonzept

Das Nennspannungskonzept ist eine Vorgehensweise aus der technischen Mechanik. Bei der Anwendung werden beispielsweise Kerbeinflüsse bei der Ermittlung von Spannungsbelastungen nicht berücksichtigt. Der Einfluss dieser konstruktiven und geometrischen Besonderheiten findet über Korrekturfaktoren wie Form- und Kerbwirkungszahlen Eingang in die Rechnung.

4.1.7 Wöhlerlinie

Die Wöhlerlinie, auch als Wöhlerkurve bezeichnet, ist das Resultat von Wöhlerversuchen. Dabei werden mehrere Versuchskörper mit verschiedenen Lasthorizonten zyklisch belastet. Abbildung 4-4 zeigt dabei einen sinusförmigen Schwingungsverlauf, welcher in dieser Form bei den Wöhlerversuchen zur Anwendung kommt.

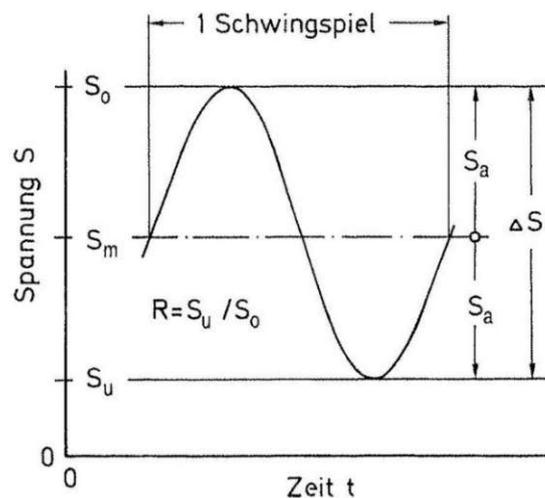


Abbildung 4-4 Zyklische Belastung [6]

Der Versuch läuft, bis die Probe versagt oder eine vordefinierte Anzahl von Schwingungen, die sogenannte Grenzschningspielzahl, überstanden hat. Letztere werden als Durchläufer bezeichnet. Bei dem resultierenden Diagramm werden die Lastspielzahl auf der x-Achse und die Nennspannungsamplitude auf der y-Achse doppellogarithmisch aufgetragen. Abbildung 4-5 zeigt ein Beispiel einer Wöhlerlinie. Wenn das Bauteil aufgrund der hohen Spannungsamplitude relativ wenige Schwingenspiele aushält handelt es sich um Kurzzeitfestigkeit (Bereich K). Bei Zeitfestigkeit (Bereich Z) wird davon ausgegangen, dass die Struktur für den Zeitraum der Lebensdauer die vorliegende Belastung aushalten kann. Dieser Fall wird auch Betriebsfestigkeit genannt. Befindet sich die Spannungsamplitude unter

diesem Bereich wird davon ausgegangen, dass das Bauteil unendlich viele Schwingspiele aushalten kann und somit Dauerfestigkeit (Bereich D) vorliegt. [6]

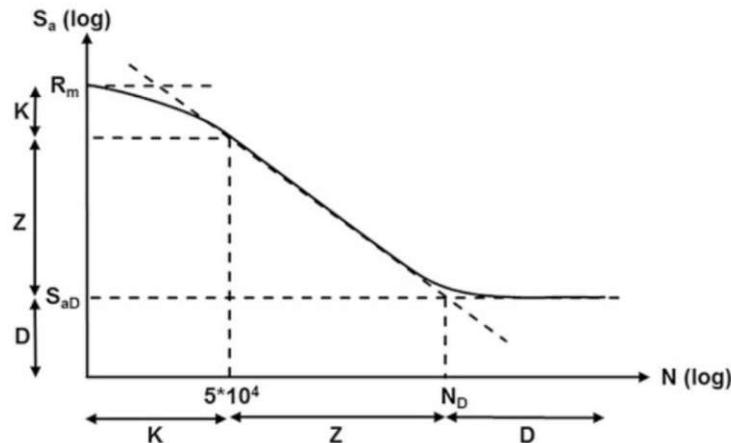


Abbildung 4-5 Wöhlerlinie [6]

4.1.8 Kerbfälle

Die Nachweisführung wird im Stahlbau durch die Verwendung von Kerbfällen erleichtert. Dabei handelt es sich um häufig auftretende Konstruktionsdetails deren Verhalten unter dynamischer Belastung bekannt ist. In der EN 13001 werden häufig auftretenden Kerbfälle von Stahltragtragwerken im Kranbau im Anhang der EN 13001-3-1 aufgelistet. Darin werden sowohl die inverse Steigung der Wöhlerkurve m als auch der Wert der charakteristischen Ermüdungsspannung $\Delta\sigma_c$ angegeben, welche die Konstruktion der Wöhlerkurve und damit die Führung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit ermöglicht.

4.1.9 Lineare Schadensakkumulation

Die lineare Schadensakkumulation ist ein Verfahren, um die Lebensdauer eines Bauteils basierend auf einem vorliegenden Lastkollektiv abzuschätzen. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass jede Schwingung im Ausmaß einer Spannungsamplitude eine Teilschädigung am Bauteil hervorruft. Die Teilschädigung ist der Quotient der vorliegenden Lastspielzahl und der maximal ertragbaren Lastspielzahl, welche durch die Wöhlerkurve definiert wird.

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Summiert man diese Schädigungen erhält man eine Gesamtschädigung.

$$D = \sum d_i < 1$$

Diese darf den Wert 1 nicht überschreiten. Diese Vorgangsweise geht auf Arvid Palmgren und Milton Miner zurück, weshalb sie auch als Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner bezeichnet wird. [6]

Bei der Anwendung wird das Spannungskollektiv herangezogen. Die Spannungsamplituden werden über den Lastspielzahlen aufgetragen. Daraus entsteht die in Abbildung 4-6 zu sehende Stufenoptik. Die Wöhlerlinie markiert für jede Amplitude die maximal zulässige Spielzahl.

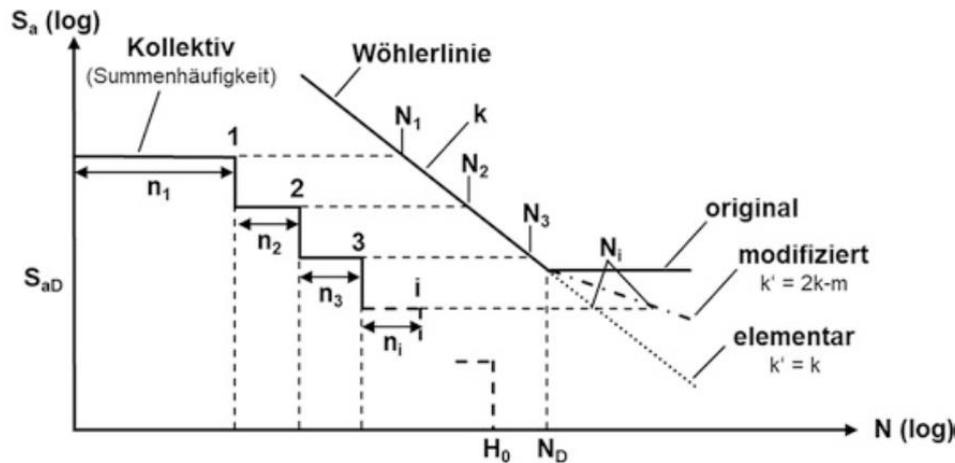


Abbildung 4-6 Lineare Schadensakkumulation [6]

4.2 Methodik

In diesem Abschnitt wird die prinzipielle Vorgehensweise bei der Anwendung der Norm behandelt. Grundsätzlich kann der Prozess in vier Teile gegliedert werden: 1. Kranmodell und Lasten, 2. Lasteinwirkungen, 3. Grenzzustände und 4. der Nachweis. Diese werden im Folgenden erläutert. [5]

4.2.1 Kranmodell und Lasten

Um den Festigkeitsnachweis erbringen zu können, müssen alle relevanten Lasten ermittelt und in ein entsprechendes, mechanisches Modell übertragen werden.

4.2.1.1 Lastermittlung

Im ersten Schritt müssen alle auf das Tragwerk wirkenden Lasten ermittelt werden. Sie werden entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens in drei Gruppen gegliedert: Regelmäßige, unregelmäßige und außergewöhnliche Lasten. Diese Aufteilung ist insbesondere in Hinblick auf die Lastkombinationen wichtig.

Weiters kann zwischen statischen und dynamischen Belastungen unterschieden werden. Dies ist deshalb relevant, da der Nachweis mit einem elasto-statischen Kranmodell geführt wird. Statische Belastungen entstehen zur Folge der auf die Bauteile und Verbindungselemente wirkenden Gravitation und können direkt in das Kranmodell übertragen werden. Dynamische Belastungen werden über ein starrkörper-kinetisches Modell ermittelt. Die resultierenden Trägheitskräfte werden mit äquivalenten, statischen Kräften in das Modell integriert.

4.2.1.2 Dynamikbeiwerte

Dynamische Effekte, die nicht direkt über das starrkörper-kinetische Modell berücksichtigt werden, finden über Dynamikbeiwerte auch Faktoren genannt Einzug in die Berechnung. Darunter fallen unter anderem das Fahren über Unebenheiten oder das Anheben einer Last vom Boden. Sie werden anschließend, gemäß den Vorgaben in der Norm, mit den statischen Kräften des Modells multipliziert.

4.2.1.3 Teilsicherheitsbeiwerte

Da sich die Berechnung auf idealisierte Kraftverhältnisse stützt, müssen Abweichungen mit Teilsicherheitsbeiwerten berücksichtigt werden. Je häufiger eine Last auftritt, desto größer sind die Konsequenzen von Abweichungen in der Praxis und desto größer ist daher der Beiwert. Die Beiwerte sind daher für jede Lastart anders und geben die Möglichkeit, komplexere, nicht lineare Zusammenhänge zwischen nominell wirkenden Kräften und relevanten Schnittgrößen herzustellen.

4.2.1.4 Risikobewerte

Für Krane, bei denen ein Bauteilversagen besonders fatale Folgen haben kann, wird über den Risikobewert zusätzliche Sicherheit gewährleistet. Die Risikoklasse sowie der entsprechende Beiwert sind in der Norm zu finden. Anders als beispielsweise die Teilsicherheitsbeiwerte wird der Beiwert global für alle Kräfte angewendet.

4.2.1.5 Lastkombinationen

Da das gleichzeitige Auftreten aller Kräfte nicht der Realität entspricht und zur Überdimensionierung führen würde, werden die Lasten in verschiedenen Lastkombinationen zusammengefasst. Abhängig von den Kräften, die in die jeweilige Lastkombination einfließen, fallen diese in die Kategorien regelmäßig, unregelmäßig und außergewöhnlich wie in Abbildung 4-7 zu sehen. Diese Einteilung ist analog zu jener der Lasten. Unregelmäßige und außergewöhnliche Lastkombinationen werden ausschließlich für den statischen Festigkeitsnachweis herangezogen. Für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis werden nur Lastkombinationen der Kategorie A (regelmäßig) verwendet, da dies sonst zu einer konservativen Auslegung führen würde. Bei der Anwendung ist darauf zu achten, dass bewegliche Teile stets in ihrer statisch ungünstigsten Stellung, also jene Stellung, die die höchste Belastung hervorruft, angeordnet sind.

beispielsweise im Stahlbau dürfen die plastischen Reserven des Werkstoffes nicht ausgenutzt werden.

4.2.3 Grenzzustände

Die Grenzzustände für die Sicherheitsnachweise basieren auf den Werkstoffeigenschaften der Bauteile beziehungsweise der Verbindungselemente. Anders als in der DIN 15018 werden die Werte nicht explizit in der Norm vorgegeben, sondern unter der Verwendung des Widerstandsbeiwertes aus den Werkstoffkennwerten ermittelt. Der Widerstandsbeiwert erfüllt den Zweck, Imperfektionen im Werkstoff zu berücksichtigen, und gleicht so die bei Werkstoffversuchen üblicherweise auftretende Streuung aus.

4.2.4 Nachweis

Für einen kompletten Sicherheitsnachweis muss sowohl ein statischer Festigkeitsnachweis als auch ein Betriebsfestigkeitsnachweis erbracht werden. Die Nachweise sind dabei für alle Bauteile und alle belasteten Verbindungen zu führen.

4.2.4.1 Statischer Festigkeitsnachweis

Beim statischen Festigkeitsnachweis wird sichergestellt, dass es zu keinem Versagen der Bauteile und Bauteilverbindungen zufolge statischer Lasten kommt. Wie bereits zuvor erwähnt ist anders als im Stahlbau die Beweisführung nur im elastischen Bereich zulässig. Um der Norm zu genügen dürfen die vorliegenden Kräfte beziehungsweise Spannungen nicht größer als die zuvor ermittelten Grenzwerte der Verbindung beziehungsweise des Bauteils sein. Der Nachweis muss für alle relevanten Lastkombinationen geführt werden.

4.2.4.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Der Ermüdungs- oder Betriebsfestigkeitsnachweis wird geführt, wenn sich der Kran im Betrieb überwiegend in einem nicht ruhenden Zustand befindet. Grundsätzlich ist eine Simulation der Belastung möglich, meist wird aber auf vordefinierte Beanspruchungsgruppen und Lastkollektive zurückgegriffen. Um die Grenzwerte des Bauteils zu bestimmen, werden Wöhlerkurven herangezogen. Die EN 13001-3-1 gibt für häufig auftretende Kerbfälle die inverse Steigung der Wöhlerkurve m und den Wert der charakteristischen Ermüdungsspannung $\Delta\sigma_c$ an. $\Delta\sigma_c$ bezeichnet die Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Lastspielen und konstanter Spannungsamplitude. Dadurch ist es möglich, einen Referenzpunkt auf der Wöhlerlinie zu finden und mit der inversen Steigung die Konstruktion der Kurve zu komplettieren, wie in Abbildung 4-8 zu sehen. Beide Achsen werden logarithmisch dargestellt.

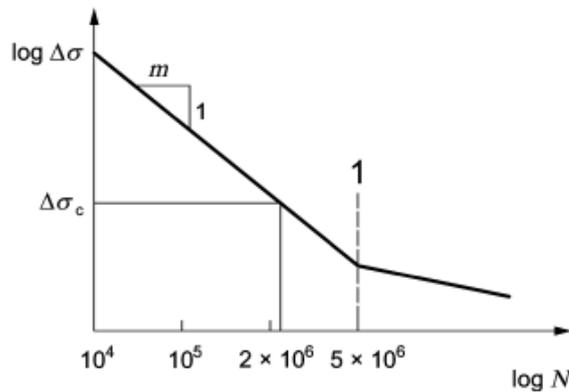


Abbildung 4-8 Wöhlerlinie bei Betriebsfestigkeitsnachweis [7]

Für den Nachweis wird die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren und Miner herangezogen. Der Nachweis gilt dann als erbracht, wenn die akkumulierten Spannungsamplituden, aufgetragen über die Lastspielzahl, die Bauteilzeitfestigkeitsgrenze nicht überschreitet.

4.3 Vergleich DIN 15018 und EN 13001

Die DIN 15018 ist der Vorgänger der EN 13001 und ist als Standard für Kranbauer anerkannt und verbreitet. Folglich sind viele Kranbauer mit der Umstellung von alter auf neuer Norm konfrontiert. Um jene Hersteller bei der Umstellung zu unterstützen werden im folgenden Abschnitt beide Dokumente miteinander verglichen.

4.3.1 Nachweis

Die gravierendsten Änderungen wurden im Bereich der Nachweise vorgenommen. Beim statischen Festigkeitsnachweis wurde die Methode der zulässigen Spannungen weitestgehend durch die Methode der Grenzzustände abgelöst. Der Betriebsfestigkeitsnachweis wurde hingegen komplett überarbeitet. Die ertragbare Belastung wird für jedes Konstruktionsdetail über eine Bauteil-Wöhlerlinie beschrieben, die den Grenzfall des Spannungskollektivs bildet.

4.3.1.1 Statischer Festigkeitsnachweis

Der statische Festigkeitsnachweis wurde in der DIN 15018 mit der Methode der zulässigen Spannungen geführt. Das Verfahren setzt dabei einen linearen Zusammenhang zwischen äußeren Kräften und Schnittgrößen voraus. Die auf das Tragwerk wirkenden Kräfte werden zu verschiedenen Lastfällen zusammengefasst. Etwaige Risiken werden über einen globalen Sicherheitsfaktor γ_f berücksichtigt.

Die EN 13001 verwendet das modernere Nachweiskonzept der Methode der Grenzzustände. Die vorliegenden Lasten werden mit spezifischen Teilsicherheitsbeiwerten γ_p multipliziert und geben so die Möglichkeit jede Last individuell zu modellieren und auch nicht-lineare Relationen zwischen Außenkräften und Schnittgrößen darzustellen. Die Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen zudem die Massenverteilung des Krans. Zusätzlich kann auf globalem Level

auch ein Risikobeiwert γ_n eingesetzt werden. Da die Methode der zulässigen Spannungen ein Spezialfall der Methode der Grenzzustände ist, besteht die Gültigkeit für Kransysteme mit linearem Zusammenhang zwischen Lasten und Schnittkräften weiterhin. Allgemein ist jedoch nur noch die Methode der Grenzzustände zulässig.

Die maximal erlaubten Grenzwerte werden mit Hilfe des Werkstoffwiderstandsbeiwert γ_m aus den Werkstoffkennwerten ermittelt. Der Beiwert ermöglicht die Berücksichtigung der Streuung der Werkstoffkennwerte.

Die grundsätzliche Vorgehensweise des Nachweises ist analog zur alten Norm. Je nach Situation können globale Spannungen auch mit lokalen Spannungen kombiniert werden.

4.3.1.2 Betriebsfestigkeitsnachweis

Während der statische Festigkeitsnachweis in seinen Grundzügen gleichgeblieben ist, wurde der Betriebsfestigkeitsnachweis grundsätzlich überarbeitet. In der DIN 15018 wird das Kransystem auf Basis des Spannungsspielbereichs $N1 - N4$ und des Spannungskollektivs $S_0 - S_3$ in eine entsprechende Beanspruchungsgruppe $B1 - B6$ eingeteilt. Weiters gibt die Norm Kerbfälle für Details vor. Kombiniert mit dem Grenzspannungsverhältnis ergeben sich die zulässigen Grenzwerte, die dann mit den maximalen, regelmäßig auftretenden Spannungen, auch als Oberspannungen bezeichnet, verglichen werden.

Spannungsspielbereich	N 1	N 2	N 3	N 4
Gesamte Anzahl der vorgesehenen Spannungsspiele N	über $2 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^5$	über $2 \cdot 10^5$ bis $6 \cdot 10^5$	über $6 \cdot 10^5$ bis $2 \cdot 10^6$	über $2 \cdot 10^6$
	Gelegentliche nicht regelmäßige Benutzung mit langen Ruhezeiten	Regelmäßige Benutzung bei unterbrochenem Betrieb	Regelmäßige Benutzung im Dauerbetrieb	Regelmäßige Benutzung im angestregtem Dauerbetrieb
Spannungskollektiv	Beanspruchungsgruppe			
S_0 sehr leicht	B 1	B 2	B 3	B 4
S_1 leicht	B 2	B 3	B 4	B 5
S_2 mittel	B 3	B 4	B 5	B 6
S_3 schwer	B 4	B 5	B 6	B 6

Abbildung 4-9 Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 15018-1 [10]

Die EN 13001 verfolgt einen anderen Ansatz und geht davon aus das die Teilschädigung eines Bauteils zur Gänze von der Schwingbreite, der auf das Bauteil oder die Verbindung wirkenden Spannungen abhängig ist. Für eine Reihe an häufig auftretenden Kerbfällen definiert die Norm Bauteilwöhlerlinien, welche die maximale ertragbare Belastung beschreiben. Um den Betriebsfestigkeitsnachweise zu führen, werden die regelmäßigen Lasten für das Detail, das berechnet wird, in ein Spannungszeitverlauf aufgeschlüsselt und in ein Spannungskollektiv transformiert. Mit der bekannten Wöhlerliniensteigung m kann dann der Kollektivbeiwert $k_{(m)}$ ermittelt werden, der multipliziert mit der relativen Spielzahl v den Spannungszeitverlaufparameter $s_{(m)}$ ergibt. Aus der Referenzschwingbreite $\Delta\sigma_c$ der Wöhlerliniensteigung m und einem optionalen Sicherheitsbeiwert ergibt γ_{Mf} wird dann über

die Palmgren-Miner Schadensrechnung der zulässige Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Rd}$ errechnet.

4.3.2 Kranmodell und Lasten

Während die Einteilung der Lasten im Wesentlichen gleichgeblieben ist, haben sich durch die Umstellung der Nachweismethoden auch Veränderungen bei der Ermittlung der Lasten ergeben. Zudem bieten die Produktnormen die Möglichkeit für bestimmte Krantypen spezifischere Annahmen zu treffen.

4.3.2.1 Lastannahmen und Dynamikbeiwerte

Sowohl in der DIN 15018 als auch in der EN 13001 bildet ein elasto-statisches Modell auf Basis der äußeren und inneren Kräfte die Grundlage für den Festigkeitsnachweis. Das bedeutet, dass dynamische Kräfte wie beispielsweise Trägheitskräfte, die aus anwendungstypischen Bewegungen resultieren, durch äquivalente, statische Kräfte ersetzt werden. Daraus ergibt sich, dass die grundsätzliche Vorgehensweise im Wesentlichen unverändert bleibt.

Die Lasten werden entsprechend der Häufigkeit des Auftretens drei Gruppen zugeordnet. Die Einteilung erfolgt analog zur alten Norm. Ausnahmen bilden die Windlasten, deren außerbetriebliche Kraftereinwirkung Teil der außergewöhnlichen Lasten geworden sind, sowie das Anheben der Hublast mit maximaler Geschwindigkeit, welche ebenfalls den außergewöhnlichen Lasten zugeordnet wurde. Weiters wurden verschiedene Hubbelastungen eingeführt. Dies ist das Ergebnis einer deutlich differenzierteren Betrachtung des Hubprozesses, die sich auch in der Berechnung des Dynamikbeiwerts niederschlägt.

Dynamikbeiwerte werden genauso wie aus der alten Norm gewohnt verwendet um dynamische Effekte in den Kraftannahmen des starrkörperkinetischen Modells ausreichend zu berücksichtigen. Allerdings wurde die Anzahl der Beiwerte im Vergleich zur DIN 15018 von zwei auf sieben erhöht (siehe Abbildung 4-10), um eine differenziertere Abschätzung physikalischer Einflüsse beim instationären Betrieb zu ermöglichen. Die Vervielfachung der Beiwerte und die damit verbundenen Berechnungen führen zu erheblichem Mehraufwand bei der Auslegung eines Krans. Abbildung 4-7 stellt detailliert die Beziehung der Beiwerte und der Lasten im Berechnungsprozess dar.

Regelmäßige Lasten	Faktor
Beschleunigung aus Anheben und Gravitation, auf die Masse des Krans wirkend	ϕ_1
Trägheit und Gravitation, vertikal auf die Hublast wirkend Anheben einer unbehinderten Last vom Boden Abwurf eines Teils der Hublast	
	ϕ_2
	ϕ_3
Lasten aus Fahren über Unebenheiten	ϕ_4
Massenkräfte aus Antrieben	ϕ_5
Außergewöhnliche Lasten	Faktor
Prüflasten	ϕ_6
Lasten aus Pufferstoß	ϕ_7

Abbildung 4-10 Dynamikbeiwerte [3]

4.3.2.2 Produktnormen

Ein wesentlicher Unterschied, den die Umstellung des Regelgerüsts im Kranbau auf europäischer Ebene bringt, ist die konsequente Verfügbarkeit von Produktnormen für Krantypen dargestellt in Abbildung 4-11. Dies bietet die Möglichkeit, spezifischere, weniger konservative Auslegungen von Kransystemen vornehmen zu können. Sollte die Aufgabenstellung dennoch nicht von den spezifischeren Normen abgedeckt sein, kann auf die allgemeineren Vorgaben aus der Grundnorm EN 13001 eingegangen werden.

EN 13000	<i>Krane — Fahrzeugkrane</i>
EN 14439	<i>Krane — Sicherheit — Turmdrehkrane</i>
EN 14985	<i>Krane — Ausleger-Drehkrane</i>
EN 15011	<i>Krane — Brücken- und Portalkrane</i>
EN 13852-1	<i>Krane — Offshore-Krane — Teil 1: Offshore-Krane für allgemeine Verwendungszwecke</i>
EN 13852-2	<i>Krane — Offshore-Krane — Teil 2: Schwimmende Krane</i>
EN 14492-1	<i>Krane — Kraftgetriebene Winden und Hubwerke — Teil 1: Kraftgetriebene Winden</i>
EN 14492-2	<i>Krane — Kraftgetriebene Winden und Hubwerke — Teil 2: Kraftgetriebene Hubwerke</i>
EN 12999	<i>Krane — Ladekrane</i>
EN 13157	<i>Krane — Sicherheit — Handbetriebene Krane</i>
EN 13155	<i>Krane — Sicherheit — Lose Lastaufnahmemittel</i>
EN 14238	<i>Krane — Handgeführte Manipulatoren</i>
EN 15056	<i>Krane — Anforderungen an Spreader zum Umschlag von Containern</i>

Abbildung 4-11 Liste der Produktnormen [5]

4.3.3 Grenzzustände für den statischen Festigkeitsnachweis

Ein weiterer Aspekt, im Vergleich zur DIN 15018, sind die Grenzzustände. Die DIN-Norm gibt im Einklang mit der Methode der zulässigen Spannungen spezifische Werte an, die nicht überschritten werden dürfen. Die EN 13001 bietet dazu ein Verfahren auf Basis der Werkstoffkennwerte, welche über Beiwerte angepasst werden und anschließend als nicht zu überschreitende Grenzzustände fungieren.

5 Beschreibung des Berechnungsprogrammes

Im folgenden Abschnitt wird die Funktionsweise des Berechnungsprogrammes erläutert. Die Basis des Programmes ist dabei das Programm Mathcad des Herstellers PTC. Die Zielsetzung ist eine automatisierte Durchführung des statischen und Betriebsfestigkeitsnachweis nach der EN 13001 für Einträgerbrückenkrane.

5.1 Allgemein Anmerkungen zum Tool

Abbildung 5-1 zeigt die Struktur der Software, welche sich im Ablauf an der EN 13001 orientiert. Um umfangreichen Implementierungsvorgänge zu vermeiden, werden auch externe Programme und Informationen in den Prozess eingebunden. Dies wird im Blockschaltbild durch rechteckige Formen bei Programmen und gestrichelten Linien bei Informationsflüssen angedeutet. Interne Prozess werden durch Rauten und interne Informationsflüsse durch durchgezogene Linien gekennzeichnet.

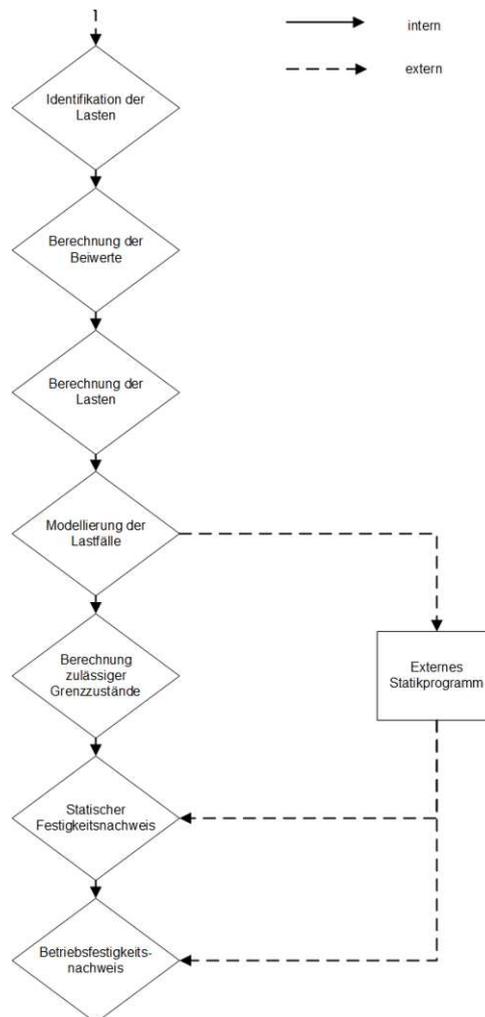


Abbildung 5-1 Blockschaltbild des Berechnungsprogrammes

Farbmarkierungen innerhalb des Programmes

Um die Verwendung des Tools intuitiv zu gestalten, wurden entsprechend Tabelle 5-1 Farbkodierungen eingeführt, welche auf Inhalte hindeuten, die für den Nutzer relevant sind:

Farbcode	Bedeutung
	Angaben
	Ergebnisse
	Daten für externe Programme

Tabelle 5-1 Farbcodes

Es wird zwischen Angaben, Ergebnissen und Daten für externe Programme unterschieden. Angaben müssen vom Nutzer manuell eingegeben werden und können quantitativ oder qualitativ sein. Quantitative Angaben enthalten Zahlenwert und Einheiten, während qualitative Eingaben in Textform eingetragen werden. Letztere werden mit Anführungszeichen versehen, um sie für das Programm erkennbar zu machen. Da die qualitativen Angaben Berechnungsschleifen aktivieren, müssen sie exakt der Schreibweise, die im Programm hinterlegt ist, entsprechen. Daher werden unterhalb der Texteingabemöglichkeiten die verfügbaren Optionen aufgelistet. Es ist darauf zu achten, sowohl die Schreibweise als auch die Groß- und Kleinschreibung einzuhalten.

Ergebnisse stellen entweder Endergebnisse oder Zwischenergebnisse dar, welche automatisch weiterverwendet werden.

Da das Berechnungsprogramm, wie in Abbildung 5-1 zu sehen, im Verbund mit externen Programmen arbeitet, werden nach der Modellierung der Lastfälle Daten generiert, die als Eingangsgrößen für ein externes Statik Programm dienen. Daher werden jene Ergebnisse, welche einer externen Nutzung zugeführt werden, mit einem separaten Farbcode hervorgehoben.

Abschnitte

Für eine übersichtlichere Gestaltung des Berechnungsprogrammes werden Teile der Berechnung durch sogenannte Abschnitte verborgen. Diese sind mit einem „+“ am linken Seitenrand gekennzeichnet. Dadurch wird eine Benutzeroberfläche erzeugt, die nur jene Inhalte darstellt, die für den Nutzer relevant sind. Außerdem lassen sich so ungewollte Veränderungen im Programm vermeiden. In dieser Form ist es dem Nutzer sowohl möglich, das Verständnis des Nachweisprozesses zu vertiefen als auch potentielle Adaptionen durchzuführen. Es wird grundsätzlich davon abgeraten, den Code ohne Wissen über die Funktionsweise des Programms oder die Norm zu verändern.

5.2 Funktionsweise des Programmcodes

Um den automatischen Ablauf des Nachweises sicherzustellen, wird auf die vorhandenen Funktionen der Mathcad Bibliothek zurückgegriffen. Diese werden in kleineren Teilprogrammen eingesetzt, um beispielsweise den Abruf von normierten Querschnittsdaten durchzuführen. Im Folgenden werden die essentiellen Funktionen des Programmes erläutert.

READEXCEL & match Funktionen

Der Festigkeitsnachweis nach EN 13001 vertraut zu einem wesentlichen Grad auf normierten Werkstoffkennwerten. Um die Daten effizient in das Programm einbinden zu können, müssen die Kennwerte in einem für Mathcad verwendbaren Datenformat abgespeichert sein. Mathcad bietet über den Befehl READEXCEL die Möglichkeit Microsoft Excel Dateien in Form von Matrizen in das Programm zu importieren. Ein Wert innerhalb der Matrix wird über eine Spalten- und eine Zeilennummer definiert. Mit dem „match“ Befehl kann die Zeilennummer des normierten Teils ermittelt werden. In Abbildung 5-4 wird der Vorgang anhand von Walzprofilträgern der DIN 1025-3 illustriert. Zuerst wird das gewünschte, normierte Profil als Variable „Brückenträger“ definiert und über den READEXCEL Befehl als Matrix eingeführt. Der „match“-Befehl gibt die Zeilennummer aus, welche anschließend mit dem entsprechenden Spaltenindex die Position des gewünschten Kennwertes in der Matrix definiert. Der Spaltenindex ist für die jeweiligen Kennwerte bekannt, da der Aufbau der Matrix der Exceldatei entspricht.

Durch diese Vorgehensweise kann flexibel auf Änderungen in der Angabe reagiert werden. In einer weiteren Ausbaustufe kann über diesen Weg eine Iterationsschleife für die Optimierung des Tragwerks realisiert werden. Außerdem kann das Prinzip beliebig auf andere Trägerprofile erweitert werden. Die Umsetzung erfordert lediglich eine Erweiterung der Datenbank analog zum vorliegenden Programmcode.

Brückenträger: HEA 260	$Brückenträger := "HEA260"$
Kopfträger: QPRO 200x16	$Kopfträger := "QPRO200x16"$
Walzprozess des Kopfträgers	$Walzung := "Warm"$
	Optionen: Warm / Kalt


```

A := READEXCEL (".\Walzprofile.xlsx", "Sheet1!A1:O47")

idx := match (Brückenträger, A(0))0 = 9

mBr := (A(7))idx ·  $\frac{kg}{m}$  · l = 429.66 kg

```

Abbildung 5-2 Beispiel einer READEXCEL/match Struktur

6 Anwendung des Berechnungsprogrammes

In diesem Kapitel werden der statische und der Betriebsfestigkeitsnachweis nach EN 13001 für einen Einträgerbrückenkran durchgeführt. Der Abschnitt versteht sich als Bedienungsanleitung für die Anwendung des Berechnungsprogrammes zur Nachweisführung gemäß der Norm EN 13001 und der Produktnorm EN 15011. Es empfiehlt sich das Berechnungsprogramm in Mathcad parallel zu öffnen, um den Prozess besser folgen zu können. Das Programm ist in verschiedene thematische Blöcke (siehe Abbildung 5-1) gegliedert. Zu Beginn jedes Blocks werden die Eingangsgrößen definiert, welche für die Rechenoperationen notwendig sind. Die Software kann flexibel auf andere Ausformungen von Brückenkränen angepasst werden. Bei ausreichendem Verständnis der Norm und des Programmes kann die Struktur auch für die Nutzung von anderen Krantypen adaptiert werden.

6.1 Technische Daten des Krans

Der Festigkeitsnachweis wird für einen Brückenkran der ABUS Kransysteme geführt, welcher in ähnlicher Ausführung am IKP der TU Wien verwendet wird. Abbildung 6-1 und Tabelle 6-1 zeigen die technischen Daten des Krans. Weiters wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Werkstattkran handelt und die Spurführung über Führungsrollen an den Enden des rechten Kopfträgers erfolgt.

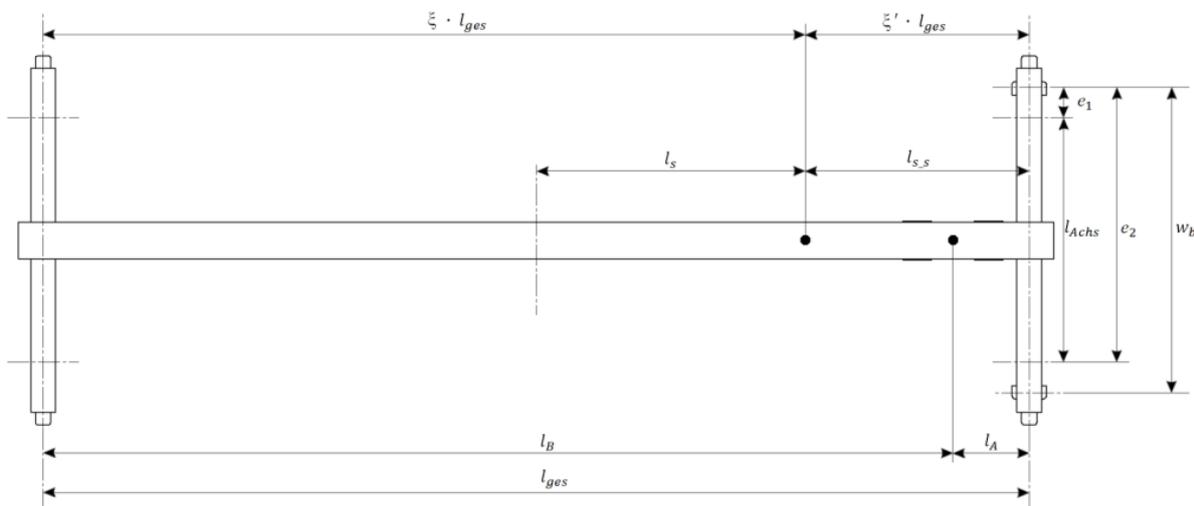


Abbildung 6-1 Technische Zeichnung eines Werkstattkrans

Bezeichnung	Variable	Kurzzeichen	Menge	Einheit
Brückenträger	<i>Brückenträger</i>	HEA260		
Kopfträger	<i>Kopfträger</i>	QPRO200x16		
Werkstoff	<i>Werkstoff</i>	S235		
E-Modul	E_{mat}		206	$\frac{kN}{mm^2}$
Hublast	Q		1	t
Masse Krankatze	m_{Ka}		41	kg
Masse Kran	m_{Kr}		2860	kg

Fahrgeschwindigkeit	v_{Kr}	40	$\frac{m}{min}$
Katzfahrgeschwindigkeit	v_{Ka}	20	$\frac{m}{min}$
Maximale Hubgeschwindigkeit	v_{hmax}	5	$\frac{m}{min}$
Feinhubgeschwindigkeit	v_{hCS}	1.3	$\frac{m}{min}$
Länge Kranbrücke	l	6,3	m
Achsabstand	l_{Ko}	2,3	m
Abstand Führungsrollen	w_B	1,9	m
Abstand Katze – Kopfträger bei maximaler Auslenkung	l_A	0.45	m

Tabelle 6-1 Technische Daten des Brückenkrans

6.2 Kranmodell und Lasten

Wie bereits in vorangegangenen Abschnitten beschrieben, müssen im ersten Schritt alle relevanten Lasten ermittelt werden und in ein elasto-statisches Modell integriert werden. Die Wahl der Lasten hängt dabei stark vom Krantyp sowie dem Betrieb ab. Dem Aufbau des Kranmodells liegen die allgemeinen Regeln der Festigkeitslehre zu Grunde.

6.2.1 Identifikation der Lasten

Die EN 13001 definiert drei Lastgruppen: Regelmäßige, unregelmäßige und außergewöhnliche Lasten. Die Gruppen hängen mit dem Auftreten der Lasten im Betrieb zusammen und sind in EN 13001-2 in Abschnitt 4.2.1.2. bis 4.2.1.4 aufgelistet (siehe Abbildung 4-7). [4] Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen Werkstattkran, der im Inneren einer Halle betrieben wird. Daher können alle Lasten, die sich auf Schiffe beziehen, ignoriert werden. Da der Kran durch die Halle vor Witterungs- und Wettereinflüssen geschützt ist, können sowohl die Lasten aus Wind in Betrieb und die Schnee- und Eislasten vernachlässigt werden. Zusätzlich gehen wir im Beispiel davon aus, dass die Wärmewirkung ebenfalls vernachlässigt werden kann. Aus der Kategorie der außergewöhnlichen Lasten werden die Prüflasten und der Pufferstoß berücksichtigt. Damit ergeben sich die relevanten Lasten für das Kranmodell gemäß Tabelle 6-2.

Regelmäßige Lasten	Nicht regelmäßige Lasten	Außergewöhnliche Lasten
Masse des Krans	Lasten aus Schräglauf	Prüflasten
Masse der Hublast		Pufferstoß
Fahren über Unebenheiten		
Beschleunigung aus Antrieben		

Tabelle 6-2 Relevante Lasten des Hallenkrans

6.2.2 Berechnung der dynamischen Beiwerte

Im Folgenden werden die dynamischen Beiwerte berechnet. Im Gegensatz zur Norm werden die Beiwerte als ein thematischer Block behandelt. Dies ist der programmtechnischen Umsetzung geschuldet.

Dem Festigkeitsnachweis liegt ein statisches Modell zugrunde. Die Belastung durch den instationären Betrieb werden über Dynamikbeiwerte berücksichtigt, die die vorliegenden Lasten erhöhen. Insgesamt definiert die EN 13001-2 sieben Dynamikbeiwerte (siehe Abbildung 4-10). Dabei kommt das Konzept der Produktnormen zum Tragen, welche die Berechnung der einzelnen Beiwerte spezifischer ausführen als die allgemeine Norm. Im vorliegenden Fall wird die Produktnorm für Brückenkräne die EN 15011 zusätzlich zur allgemein gültigen Norm EN 13001 zur Auslegung des Kransystems herangezogen. Die Berechnungsvariante aus der Produktnorm ist im Zweifelsfall jener aus der allgemeinen Norm vorzuziehen, da sie genauer auf den jeweiligen Krantyp angepasst ist.

φ_1 Beschleunigungen aus Anheben und Gravitation, auf die Masse des Krans wirkend

Bezeichnung	Variable	Zustandsgröße
Lasteinwirkung	Lasteinwirkung	"ungünstig"

Tabelle 6-3 Angaben für φ_1 Beiwert

Der Einfluss der Schwingungsbeanspruchung, die durch das Anheben und Absetzen auf das Krantragwerk wirkt, wird über den Beiwert φ_1 berücksichtigt (siehe Tabelle 6-3). Er wird mit der Gewichtskraft entsprechend der Lastkombination multipliziert. Dabei wird die Lasteinwirkung berücksichtigt und führt (bei ungünstiger Krankonfiguration) zu einer Erhöhung der Belastung. Umgekehrt wirkt sich eine günstige Situation positiv auf die Belastbarkeit des Kranes aus.

Die EN 13001-2 sieht für die Berechnung von φ_1 zwei Fälle vor, die von der Gravitationseinwirkung der Masse abhängen. Damit wird berücksichtigt ob sich die Hublast günstig oder ungünstig auf die Belastung des Tragwerks auswirkt wie in Abbildung 4-1 schematisch anhand eines Turmdrehkrans zu sehen. In EN 13001-2 4.2.2.1 werden die Formeln für die Berechnung von φ_1 bei günstiger und ungünstiger Lasteinwirkung definiert:

$$\text{Ungünstig: } \varphi_1 = 1 + \delta$$

$$\text{Günstig: } \varphi_1 = 1 - \delta$$

Für die Berechnung von δ , welches der maßgebende Faktor für den Beiwert ist, verweist die EN 13001-2 auf Messungsergebnisse des Krantyps oder auf die vorhandenen Produktnormen. In der Produktnorm für Brückenkräne EN 15011 5.2.1.3.1 wird der Faktor δ , analog zum Beiwert φ_1 , in Abhängigkeit von der Gravitationseinwirkung definiert:

$$\text{Ungünstig: } \delta = 0,1$$

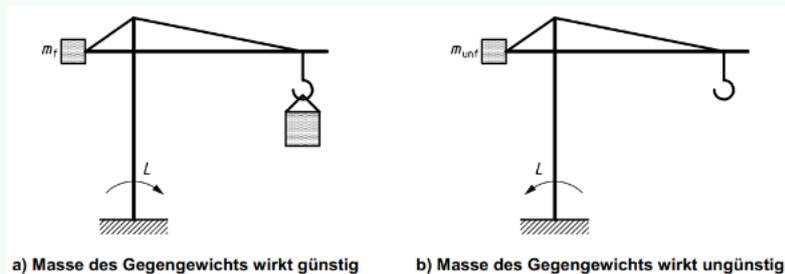
$$\text{Günstig: } \delta = 0,05$$

Da das Tragwerk des Werkstattkrans ungünstig durch die Hublast beeinflusst wird, ergibt sich der Beiwert zu:

$$\varphi_1 = 1,1$$

Der direkte Zusammenhang zwischen Lasteinwirkung und Beiwert ist im Berechnungsprogramm ebenfalls umgesetzt und nur von der Angabe der Lasteinwirkung durch den Nutzer abhängig.

Bestimmung Beiwert φ_1 : Einwirkungen aus Heben und Schwerkraft auf die Masse des Krans (EN 15011 5.2.1.3.1)



Lasteinwirkung

Lasteinwirkung := "ungünstig"

Optionen: günstig / ungünstig

$$\phi_1 = 1.1$$

Abbildung 6-2 Berechnung des Beiwertes φ_1 im Berechnungsprogramm

φ_2 Trägheit und Gravitation bei Anheben einer unbehinderten Last vom Boden

Die dynamische Beanspruchung, resultierend aus dem Vorgang des Anhebens einer Hublast, wird mit dem Beiwert φ_2 berücksichtigt. Das zugrunde liegende Modell betrachtet die Schwingung, welche durch das elastische Verhalten des Hubmittels beim Übergang von unbelastetem zu belastetem Zustand entsteht, wie in Abbildung 6-3 zu sehen. Der Beiwert wird mit der Hublast multipliziert.

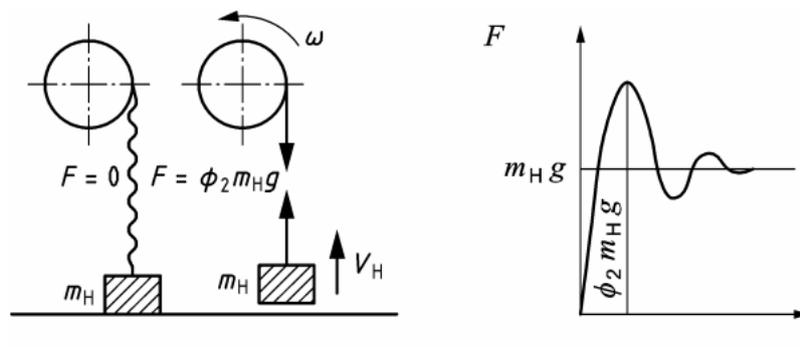


Abbildung 6-3 φ_2 Modell [4]

Für die Ermittlung des Dynamikfaktors gibt die Norm drei Optionen an:

1. Das Näherungsverfahren nach EN 13001-2 4.2.2.2 auf Basis der Steifigkeitsklasse HC und des Hubwerktyps HD des Krans
2. Analytische Berechnung gemäß EN 15011 Anhang C auf Basis eines elastischen Modells eines Brückenkrans
3. Messung der Hubseilkraft

Nachfolgend wird die Anwendung der Methode 1 und 2 näher erläutert. Für die Messung nach Methode 3 muss ein Kran mit denselben technischen Eigenschaften zur Verfügung stehen.

1. Näherungsverfahren nach EN 13001-2

Bezeichnung	Variable	Kurzzeichen	Menge	Einheit
Steifigkeitsklasse	HC	"HC2" / "HC3"		
Hubwerkstyp	HD	"HD2"		
Anwendbare Hubgeschwindigkeit	$v_{hmax} v_{hcs}$		1,3 5	$\frac{m}{s}$

Tabelle 6-4 Angaben für das φ_2 Näherungsverfahren nach EN 13001-2

Das Näherungsverfahren berechnet φ_2 über einen Mindestwert $\varphi_{2,min}$ und addiert diesen zu der charakteristischen Hubgeschwindigkeit beim Anheben v_h und einem Beiwert für die vorliegende Steifigkeit des Krans β_2 . Die Werte sind dabei von der Steifigkeitsklasse und von der Hubwerksklasse abhängig.

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 * v_h$$

Durch die Steifigkeitsklasse kann über EN 13001-2 4.2.2.2 Tabelle 2 (siehe Abbildung 6-4) der Steifigkeitsbeiwert β_2 ermittelt werden. Die Steifigkeitsklassen entsprechen dabei den Hubklassen aus der alten DIN 15018-1.

Steifigkeitsklasse	Charakteristische vertikale Lastverlagerung δ	Beiwert β_2 [s/m]
HC1	$0,8 \text{ m} \leq \delta$	0,17
HC2	$0,3 \text{ m} \leq \delta < 0,8 \text{ m}$	0,34
HC3	$0,15 \text{ m} \leq \delta < 0,3 \text{ m}$	0,51
HC4	$\delta < 0,15 \text{ m}$	0,68

Die Steifigkeitsklassen wurden in früheren Ausgaben dieser Norm als Hubklassen bezeichnet.

Abbildung 6-4 φ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von β_2 [4]

Die Hubwerksklasse ist davon abhängig, welche Feinhubgeschwindigkeit und Abstufung für den Anhebevorgang getriebetechnisch realisierbar ist. Mit EN 13001-2 4.2.2.2 Tabelle 3 (siehe Abbildung 6-5) wird anschließend für die Lastkombination A1 und B1 sowie C1 die zu verwendende Hubgeschwindigkeit für die Näherungsformel definiert.

Last- kombination (siehe 4.3.6)	Klasse des Hubwerkstyps					Mit Formel (3) berechneter Beiwert
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5	
A1, B1	$v_{h,max}$	$v_{h,CS}$	$v_{h,CS}$	$0,5 \cdot v_{h,max}$	$v_h = 0$	ϕ_2
C1	–	$v_{h,max}$	–	$v_{h,max}$	$0,5 \cdot v_{h,max}$	ϕ_{2C}

Legende

$v_{h,max}$ für Lastkombinationen A1 und B1: die maximale stetige Hubgeschwindigkeit der Last;
 $v_{h,max}$ für Lastkombination C1 (siehe 4.2.4.1): die maximale Hubgeschwindigkeit, die sich aus allen Antrieben ergibt (z. B. Schwenk- und Hubbewegung), die zur Hubgeschwindigkeit der Last beitragen;
 $v_{h,CS}$ stetige Feinhubgeschwindigkeit.

Abbildung 6-5 ϕ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von v_h [4]

In EN 13001-2 4.2.2.2 Tabelle 4 (Abbildung 6-6) wird, abhängig von der Steifigkeitsklasse, der Mindestwert für den Beiwert ϕ_2 festgelegt. Anschließend müssen die Werte in die Formel für ϕ_2 eingesetzt werden, um den Beiwert zu erhalten.

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

Abbildung 6-6 ϕ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von $\phi_{2,min}$ [4]

2. Analytisches Berechnungsverfahren nach EN 15011 Anhang C

Bezeichnung	Variable	Kurzzeichen	Menge	Einheit
Hubwerksklasse	HD	"HD2"		
Seilradius	r_r		7	mm
Seillänge	l_r		5	m
Anzahl der Seilstränge	n_r		2	
Elastizitätsmodul Seil	E_r		1960	$\frac{N}{mm^2}$

Tabelle 6-5 Angaben für das analytische ϕ_2 Berechnungsverfahren nach EN 15011 Anhang C

Die Produktnorm für Brückenkrane bietet neben dem Näherungsverfahren der allgemein gültigen Norm ein spezialisiertes Schwingungsmodell, um den Beiwert ϕ_2 analytische zu ermitteln. Das Verfahren wird gemäß EN 15011 Anhang C durchgeführt. Die Funktion C.1 modelliert das Schwingungsverhalten des elastischen Modells in Abbildung 6-7.

Funktion C1: $\varphi_h(t)$

$$\begin{aligned}
 &= 1,0 + \dot{Z}_{hl} * \left(\frac{\omega}{g}\right) * \frac{(1 - q^2) * p * \sin(p * \omega * t) - (1 - p^2) * q * \sin(q * \omega * t)}{p^2 - q^2} \\
 &- z_0 \left(\frac{\omega^2}{g}\right) * \frac{\cos(q * \omega * t) - \cos(p * \omega * t)}{p^2 - q^2} - \dot{Z}_{cr} * \left(\frac{\omega}{g}\right) \\
 &* \frac{p * \sin(p * \omega * t) - q * \sin(q * \omega * t)}{p^2 - q^2}
 \end{aligned}$$

Die Funktion C1 wird auch als zeitlicher Seilkraftverlauf $\varphi_h(t)$ bezeichnet. Der zeitliche Seilkraftverlauf entspricht dem Verhalten des Systems bei Anheben der Last. Der Beiwert φ_2 entspricht dem maximalen Wert der Funktion und wird mittels einer Kurvendiskussion festgestellt werden.

Für die Anwendung sind neben Materialkenngrößen des Trägers, wie das Flächenträgheitsmoment und der Elastizitätsmodul, auch Kennwerte vom Seil wie Radius, Länge und E-Modul notwendig.

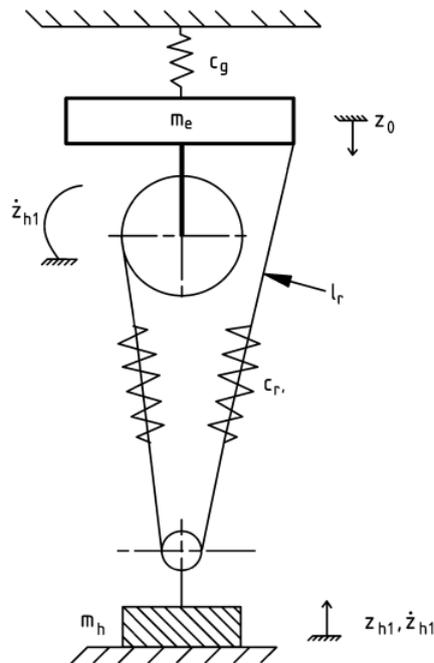


Abbildung 6-7 Elastisches Modell eines Brückenkrans [8]

Da im Zweifelsfall die Vorgehensweise der Produktnorm jener der allgemeinen Norm vorzuziehen ist, wurde der analytische Ansatz im Berechnungsprogramm umgesetzt. Nachdem der Nutzer die entsprechenden Angaben wie in Abbildung 6-8 bereitgestellt hat, wird die Kurvendiskussion der Funktion C1 durchgeführt. Der Maximalwert entspricht dann dem Beiwert φ_2 (siehe Abbildung 6-9).

Bestimmung Beiwert φ_2 : Dynamische Wirkungen beim Heben einer auf dem Boden ruhenden Last (EN 15011 5.2.1.3.2)

Seilradius	$r_r := 7 \text{ mm}$
Seillänge	$l_r := 5 \text{ m}$
Seilumwicklungen	$n_r := 2$
Elastizitätsmodul Seil	$E_r := 1960 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

- HD1: Kein Feinhub vorhanden oder Beginn des Hubvorgangs (Start des Hubwerksantriebes) ohne Feinhub möglich;
- HD2: Beginn des Hubvorgangs nur mit Feinhub möglich, wobei eine vorgegebene Mindestdauer erforderlich ist;
- HD3: Beibehaltung des Feinhubes durch die Steuerung des Hubwerksantriebes, bis die Last vom Boden angehoben ist;
- HD4: Stufenlose Steuerung des Hubwerksantriebes mit stetigem Hochlaufen der Geschwindigkeit;
- HD5: Stufenlose Steuerung des Hubwerksantriebes stellt automatisch sicher, dass der Dynamik-Beiwert ϕ_2 den Mindestbeiwert $\phi_{2,\text{min}}$ nicht überschreitet.

Hubwerksklasse **HD := "HD2"**

Abbildung 6-8 Angabe für die Berechnung von φ_2

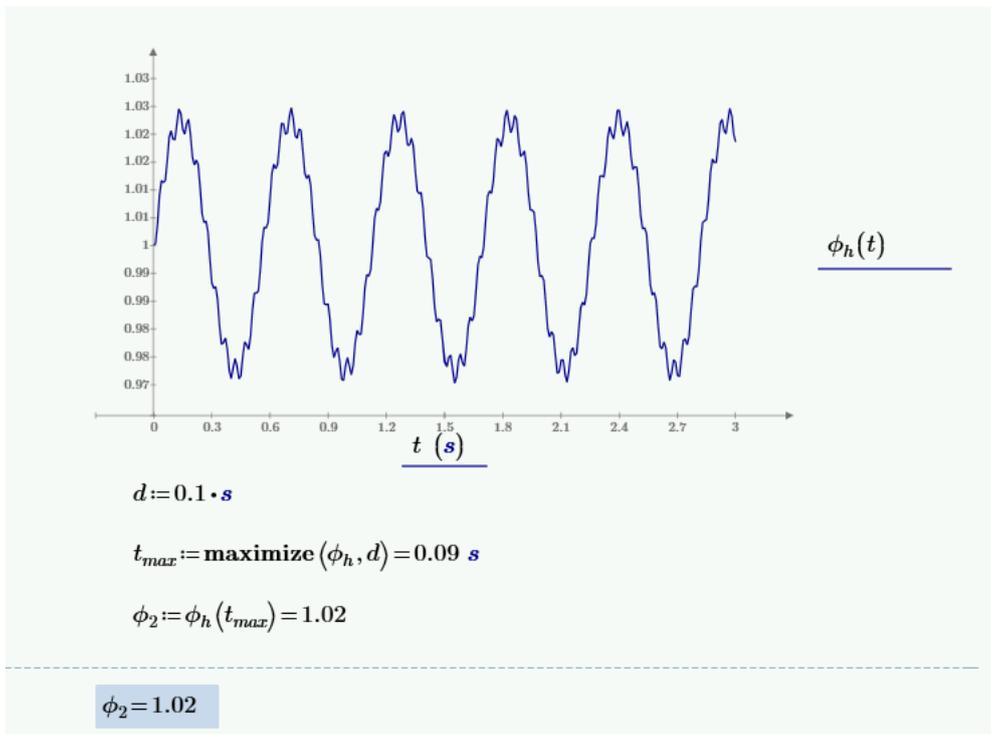


Abbildung 6-9 Kurvendiskussion zur Ermittlung von φ_2

$\varphi_2 = 1.02$

φ_3 Abwurf eines Teils der Hublast

Bezeichnung	Variable	Zustandsgröße	Menge	Einheit
Abgeworfene Hublast	Δm_H		200	kg
Geschwindigkeit des Abwurfs	Abwurf	"Schnell"		

Tabelle 6-6 Angaben für die Berechnung von φ_3

Je nach Anwendungsbereich des Krans muss der Abwurf von Teilen der Hublast und die damit einhergehenden dynamische Belastung bei der Durchführung des Sicherheitsnachweis berücksichtigt werden. Abbildung 6-10 zeigt eine schematische Skizze des Vorgangs und deren schwingungstechnische Auswirkung. Die zusätzliche Belastung findet über den Beiwert φ_3 den Weg in die Berechnung und wird mit der Hublast multipliziert.

Da die Produktnorm für Brückenkrane keine Methode vorgibt, wird die allgemeine Norm herangezogen. Für die Berechnung des Beiwerts gibt die EN 13001-2 4.2.2.3 die Formel 4 an:

$$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m_H}{m_H} (1 + \beta_3)$$

Der Quotient von abgeworfener Last Δm_H und gesamter Hublast m_H sowie der Beiwert β_3 sind die beschreibenden Größen. β_3 gibt die Geschwindigkeit des Abwurfs an und wird über die Art des Lastaufnahmemittels definiert. Beispielsweise wird der Abwurf durch einen Magneten als schneller Abwurf interpretiert und resultiert in einem $\beta_3 = 1$, während die Verwendung von Greifern oder einer ähnlichen Vorrichtung einem langsamen Abwurf entspricht und $\beta_3 = 0,5$ zur Folge hat.

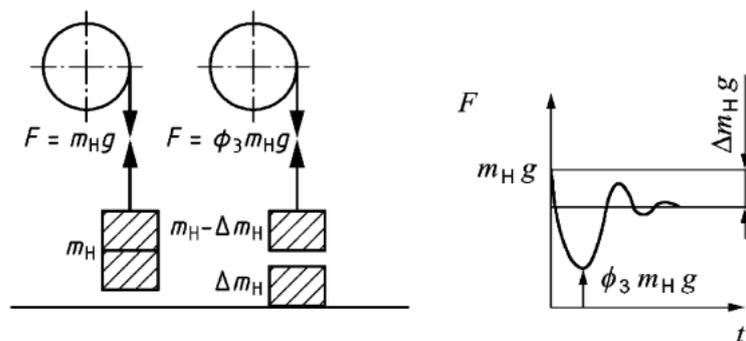


Abbildung 6-10 Abwerfen der Hublast [4]

Bei dem vorliegenden Fall wird von einem Hakenbetrieb ausgegangen. Daher ist ein Abwerfen der Last während des Betriebs nicht vorgesehen und der Beiwert nicht relevant. Aus Gründen der Vollständigkeit wurde die Vorgehensweise dennoch in das Berechnungsprogramm aufgenommen, wie in Abbildung 6-11 zu sehen. Der Nutzer muss lediglich die Abwurfgeschwindigkeit und die abzuwerfende Hublast definieren. Für die Abwurfgeschwindigkeit kann gemäß der Norm zwischen schnellen und langsamen Abwurf unterschieden werden.

Bestimmung Beiwert ϕ_3 : Abwurf eines Teils der Hublast (EN 13001-2 4.2.2.3)

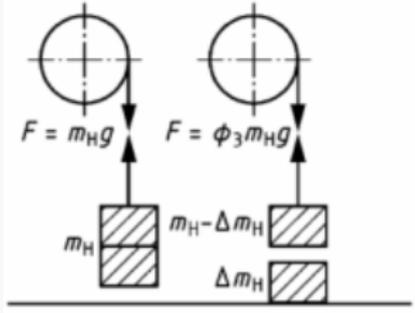
Abgeworfener Hublastteil

$\Delta m_H := 200 \text{ kg}$

Abwurfmittel

Abwurf := "Schnell" +

Optionen: Schnell (z.B: Magnet) / Langsam (z.B. Greifer)



$\phi_3 = 0.58$

Abbildung 6-11 Berechnung ϕ_3 im Berechnungsprogramm

ϕ_4 Fahren über Unebenheiten

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Eigenfrequenz des Einmassen-Feder-Modells	f_q	10	Hz
Radradius	r_{Rad}	100	mm
Stufenhöhe	h_s	2	mm
Minimale Lückenbreite	e_{g_min}	50	mm

Tabelle 6-7 Angaben Fahren über Unebenheiten

Beim Fahren über Stufen oder Lücken kommt es zu Stößen, welche durch die entstehende Beschleunigung eine zusätzliche Belastung für den Kran bewirkt. Der dynamische Effekt wird über ein Einmassen-Feder-Modell angenähert, wie in Abbildung 6-12 zu sehen. Bei sauber bearbeiteten Schliffverbindungen von Schienenstößen ohne Einkerbungen sowie durchgehenden Schienensträngen kann die resultierende Belastung für den Kran als vernachlässigbar betrachtet werden, wodurch $\phi_4 = 1$ angenommen werden kann.

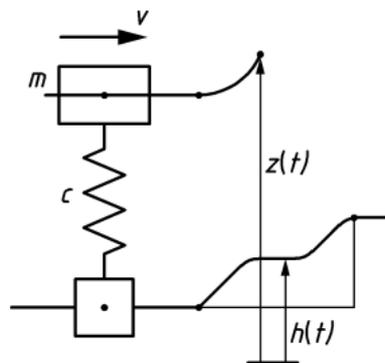


Abbildung 6-12 Einmassen-Feder-Modell [4]

Die Norm unterscheidet in der Betrachtung zwischen Lücken und Schienen wie in Abbildung 6-13 zu sehen.

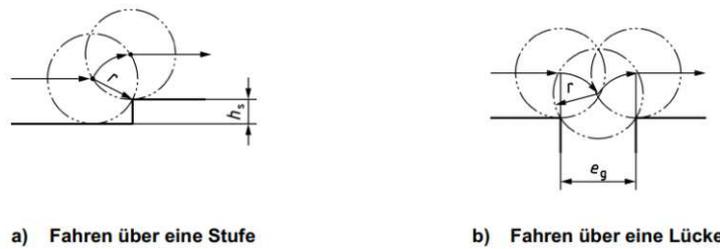


Abbildung 6-13 Unterscheidung zwischen Stufen und Lücken nach EN 13001-2 [4]

Für beide Fälle werden zwei verschiedene Formel für den Beiwert definiert:

$$\text{Stufe: } \varphi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 * \frac{v^2}{g * r} * \xi_S$$

$$\text{Lücke: } \varphi_4 = 1 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 * \frac{v^2}{g * r} * \xi_G$$

Die Berechnung erfolgt für Lücken und Stufen analog und wird in der EN 13001-2 4.2.2.4 5 und 6 definiert. Die maßgebenden Elemente sind die Geschwindigkeit des Krans sowie der sogenannte Kurvenfaktor ξ_S beziehungsweise ξ_G . Der Kurvenfaktor wird aus der Schwingung des Feder-Modells ermittelt und ist direkt nach passieren der Stufe beziehungsweise Lücke am größten. Der Faktor kann analytisch über das Schwingungsmodell, siehe Abbildung 6-14, ermittelt werden. Über den Faktor α wird die Stufenhöhe h_s beziehungsweise die Lückenbreite e_g im Schwingungsmodell berücksichtigt.

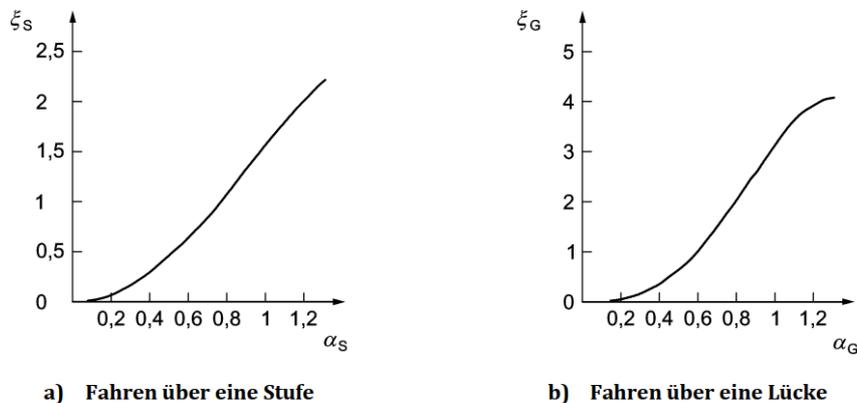


Abbildung 6-14 Schwingungsverhalten des Einmassen-Feder-Modells [4]

Im Berechnungsprogramm sind die Formel für Lücken und Stufen und der jeweiligen Kurvenfaktoren bereits hinterlegt, sodass der Nutzer lediglich die Eigenfrequenz des Modells, den Radradius, sowie die Stufenhöhe oder Lückenbreite angeben muss (siehe Abbildung 6-15).

Bestimmung Beiwert ϕ_4 : Lasten aus Fahren über Unebenheiten (DIN EN 13001-2 4.2.2.4)



DIN EN 13001-2
Bild 4

a) Fahren über eine Stufe b) Fahren über eine Lücke

Eigenfrequenz des Einmassenmodells $f_q := 10 \text{ Hz}$

Radradius (Annahme) $r_{Rad} := 100 \text{ mm}$

Stufenhöhe $h_s := 2 \text{ mm}$

Minimale Lückenbreite $e_{g_min} := \sqrt{r_{Rad}^2 - (r_{Rad} \cdot \sin(60^\circ))^2} = 50 \text{ mm}$

Abschnitt

$\phi_4 = 1.74$

Abbildung 6-15 Berechnung von ϕ_4 im Berechnungsprogramm

Im Fall des Einträgerbrückenkrans gehen wir, wie in Abbildung 6-15 zu sehen, von einer Stufenhöhe von 2 mm und einem Raddurchmesser von 200 mm aus. Dadurch ergibt sich der Beiwert zu:

$$\phi_4 = 1,74$$

ϕ_5 Beschleunigung der Antriebe

Bezeichnung	Variable	Kurzzeichen
Getriebeart	G	G_1
Getriebespiel	Sp	Sp_1

Tabelle 6-8 Angaben für die Berechnung von ϕ_5

Kräfte, die durch Antriebsbeschleunigungen beziehungsweise Verzögerungen hervorgerufen werden, können über ein starrkörperkinetisches Modell ermittelt werden. Die zusätzlich auftretenden elastischen Effekte fließen über den Beiwert ϕ_5 in das Modell ein. Die EN 13001-2 empfiehlt die Berechnung des Beiwertes mit einem Schwingungsmodell und definiert zulässige Wertebereiche für den Beiwert in Abhängigkeit von der Getriebeart.

Die Produktnorm EN 15011 5.2.1.3.4 4 beschreibt den Beiwert präziser als das Produkt des Verstärkungsbeiwertes ϕ_A und dem Positionierbewegungsbeiwert ϕ_P und gibt genaue Werte für die Teilbeiwerte in tabellarischer Form (Abbildung 6-16 und 6-17) an.

$$\phi_5 = \phi_P * \phi_A$$

Während der Verstärkungsbeiwert von der Antriebsart abhängig ist, wird der Positionierbewegungsbeiwert über die Lastpositionierklasse P definiert. Die Herleitung der Positionierklasse kann in EN 15011 Anhang B gefunden werden und hängt mit der Anzahl der Positionierbewegungen zusammen.

Antriebsart	Beiwert ϕ_A	
	Getriebetypisches Spiel	Erhebliches Spiel, z. B. offene Zahnräder
Stufenlose Geschwindigkeitssteuerung	1,2	1,5
Geschwindigkeitssteuerung mit mehreren Stufen	1,6	2,0
Zweistufige Geschwindigkeitssteuerung	1,8	2,2
Einstufige Geschwindigkeitssteuerung	2,0	2,4

Abbildung 6-16 Ermittlung von ϕ_A nach EN 15011 [8]

Lastpositionierklasse nach EN 13001-1	ϕ_P
P_0 und P_1	1,0
P_2	1,15
P_3	1,3

Abbildung 6-17 Ermittlung von ϕ_P nach EN 15011 [8]

Wie in Abbildung 6-18 zu sehen muss der Nutzer analog zur Norm die Getriebeart sowie das Getriebespiel eingeben. Die Auswahl der Teilbeiwerte ϕ_P und ϕ_A erfolgt automatisch. Die Beschleunigungszeit wird an dieser Stelle auch abgefragt, da sie thematisch mit den Antrieben zusammenhängt. Allerdings wird diese erst bei der Ermittlung der Lasten verwendet, um die Kräfte, die auf das Führungsmedium wirken, zu ermitteln.

Bestimmung von Beiwert ϕ_5 : Lasten durch Beschleunigung der Antriebe EN 15011
5.2.1.3.4

Getriebeart	$G := "G1"$
Getriebespiel	$Sp := "Sp1"$
Beschleunigungszeit	$t_{aF} := 4 \text{ s}$

Beschleunigungszeit basierend auf VDI 3573 (3s-4s)
Positionierklasse P: Siehe EN 15011-2 Anhang B
Getriebeart G: Spiel Sp:
G0: Einstufiges Getriebe Sp1: Getriebetypisch
G1: Zweistufiges Getriebe Sp2: Erhebliches Spiel
G2: Mehrstufiges Getriebe
G3: Stufenlos

$\phi_5 = 1.6$	
Führungsrollen	Spurkranzführung
$H = 0.76 \text{ kN}$	$H_{1,S} = 0.31 \text{ kN}$
	$H_{2,S} = 0.44 \text{ kN}$

Abbildung 6-18 Berechnung von ϕ_5 im Berechnungsprogramm

Mit einem zweistufigen Getriebe sowie einem getriebetypischen Spiel ergibt sich der Verstärkungsbeiwert zu 1,6 und ein Positionierbewegungsbeiwert von 1. Damit ergibt sich der Beiwert zu:

$$\phi_5 = 1,6$$

φ_6 Prüflastbeiwert

Krane werden regelmäßig Prüfungen unterzogen. Dabei wird zwischen einer dynamischen und einer statischen Prüfung unterschieden. Für die statische Prüfung wird eine Prüflast (125% der Nennlast) 100 bis 200mm über dem Boden aufgebracht. Die Prüfung erfolgt ohne Nutzung des Kranantriebs. Die Krankatze befindet sich dabei in der ungünstigsten Stellung. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn nach einer ausreichenden Zeitdauer, die für den Abschluss aller Messungen notwendig ist, keine Brüche, Risse oder anderen Schäden am Kran festgestellt werden können. Für die Auslegung gilt $\varphi_6 = 1$ um etwaige dynamische Effekte miteinzukalkulieren. Für die dynamische Prüfung wird der Kran mit 110% seiner Nennlast belastet. Anschließend werden alle Bewegungskombinationen, die im Betrieb vorkommen können, durchgeführt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn alle Komponenten einwandfrei funktioniert haben und anschließend keine Schäden oder gelockerte Verbindungen festgestellt werden können. Für die Auslegung wird φ_2 als Ausgangsgröße verwendet und in der folgenden Formel eingesetzt:

$$\varphi_6 = 0,5 * (1 + \varphi_2)$$

Der Prüflastbeiwert für die dynamische Prüfung beträgt somit:

$$\varphi_6 = 1,01$$

φ_7 Pufferstoßbeiwert

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Pufferhub	u	22,5	mm
Pufferkraft	F_p	10.5	kN

Tabelle 6-9 Angaben Pufferstoßbeiwert

Pufferkräfte entstehen bei der Kollision des Kranes mit dem Puffer, einem Objekt, das am Ende der Fahrbahn montiert wird. Der angebrachte Puffer federt den Aufprall ab. Die Kräfte hängen neben der Aufprallkraft stark von der Pufferkennlinie ab. Daher berücksichtigt der Beiwert φ_7 den Einfluss des Puffers. Die Norm definiert drei Fälle (Abbildung 6-19): eine lineare Kennlinie, eine gekrümmte Kennlinie und eine viereckige Fläche unter der Kennlinie. Der erste Fall entspricht dabei einem Federpuffer und hat den Beiwert $\varphi_7 = 1,25$ zur Folge, während der dritte Fall einem Hydraulikpuffer darstellt und $\varphi_7 = 1,6$ ergibt.

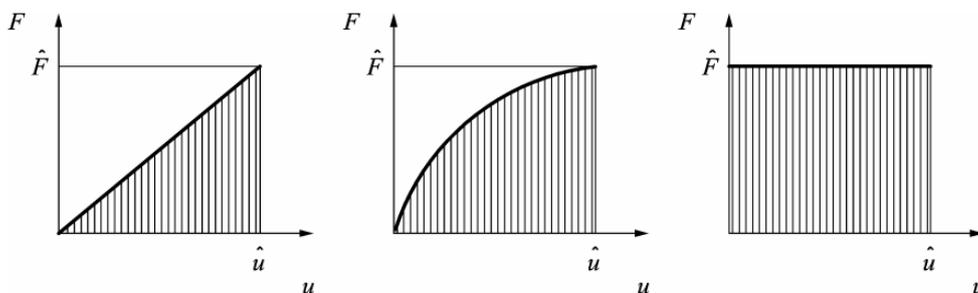


Abbildung 6-19 Federkennlinien [4]

Puffer aus beispielsweise Polyurethan-Elastomer entsprechen einer gekrümmten Pufferkennlinie. Um den Beiwert zu ermitteln, muss die Fläche unter der Kurve relativ zur Gesamtfläche der Maximalwerte ermittelt werden. Der Flächeninhalt wird über Integration bestimmt.

$$\xi = \frac{1}{F_p * u} * \int_0^u F_p * du$$

Diese kann dann in die Formel des Beiwerts eingefügt werden:

$$\varphi_7 = 1,25 + 0,7 * (\xi - 0,5)$$

Falls die Kennlinie nicht durch den Hersteller bereitgestellt wird, kann über Curve Fitting Programme die Kurve angenähert werden. Die Berechnungssoftware enthält dafür ein rudimentäres Programm, welches auf Basis von 5 Kurvenpunkten die Kurve und die Fläche ermitteln kann (siehe Abbildung 6-20).

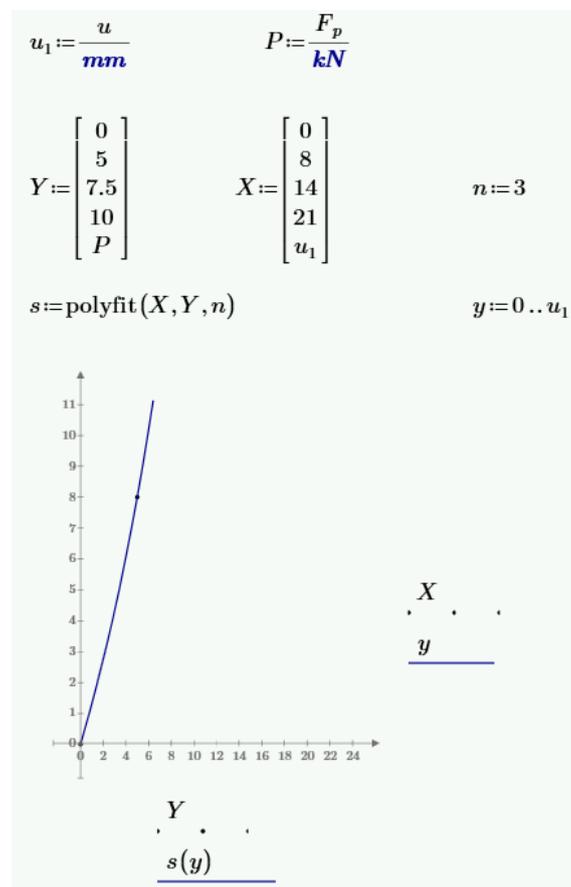


Abbildung 6-20 Curve-Fit Programm

Abbildung 6-21 zeigt die Umsetzung der Pufferstoßbeiwertberechnung im Berechnungsprogramm. Der Nutzer muss lediglich den Pufferhub und die Pufferkraft angeben, wodurch der Beiwert automatisch ermittelt wird. An dieser Stelle wird auch die kinetische Energie des Systems angegeben, welche auf Basis der Kranmasse und der Krangeschwindigkeit berechnet wird. Dies ist zur Berechnung der Pufferkräfte notwendig.

Berechnung der Pufferkräfte (EN 13001-2 4.2.4.4.)	
Kinetische Energie	$E_{kin} = 208.41 \text{ J}$
Pufferhub	$u := 22.5 \text{ mm}$
Pufferkraft	$F_p := 10.5 \text{ kN}$
$\phi_7 = 1.3$	$f_p = 6.84 \text{ kN}$

Abbildung 6-21 Berechnung ϕ_7 Tool

Auf Basis der Angaben des Brückenkranbeispiels ergibt sich der Pufferstoßbeiwert zu:

$$\phi_7 = 1,3$$

Der Beiwert liegt somit zwischen dem Ergebnis des Federpuffers und des Hydraulikpuffers, wodurch das Ergebnis sinnvoll erscheint.

6.2.3 Berechnung der Lasten

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Lasten erläutert, die für die weitere Nachweisführung notwendig sind. Die Lasten ergeben sich aus der Trägheit oder der Gravitation der Massen des Krans. Die Bestimmung der Lasten erfolgt gemäß der Einteilung in Abbildung 4-7 nach der Häufigkeit des Auftretens. Es werden alle für den Hallenkran relevanten Lasten nach Tabelle 6-2 berechnet. Im Bereich der regelmäßigen Lasten bedeutet dies die Berechnung der Einflüsse der Fallbeschleunigung und dynamischen Effekte auf die Masse des Kranes und der Hublast, sowie die Stoßwirkung beim Fahren über Unebenheiten und die Beschleunigungen aus Antrieben. In der Kategorie der Unregelmäßigen Lasten werden die Schräglaukräfte berechnet während Prüflasten und Pufferstöße in außergewöhnliche Lasten eingeteilt und kalkuliert werden.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die genaue Umsetzung der Lastermittlung innerhalb des Berechnungsprogramm von dem externen Programm abhängt, welches zur Berechnung des Stabtragwerks herangezogen wird. Ist das externe Programm beispielsweise in der Lage, den Stäben des Stabtragwerks normierte Walzprofilträgerdaten inklusive Gewicht zuzuordnen, empfiehlt es sich die Kranmasse um die entsprechende Trägermasse zu reduzieren, um die Nutzung des externen Programmes zu erleichtern. Auf die genaue Umsetzung für das Berechnungsprogramm wird im Abschnitt „Berechnung der Lastfälle“ eingegangen.

6.2.3.1 Regelmäßige Lasten

Lasten aus Gravitation und Beschleunigung der Kranmasse

Beim Anheben der Hublast vom Boden entstehen Schwingungen, die auf den Kran einwirken. Diese Schwingungen beziehen sich auf die gesamte Masse des Krans, welche alle dauerhaft am Kran befindlichen Komponenten umfasst. Die Last setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Dem Gravitationsteil und dem Trägheitsteil, der aus dem Vorgang des Anhebens resultiert.

Der Einfluss der Gravitation wird mit der Gravitationskonstante \vec{g} berechnet. Die Gravitationskonstante ist als Vektor dargestellt, da die Last einer Kraft entspricht und eine vektorielle Größe ist. Die Auswirkung der Trägheit wird über den dynamischen Beiwert φ_1 berücksichtigt. Somit ist die Last das Produkt der Kranmasse m_{Kr} , exklusive Hublast, mit der Gravitationskonstante \vec{g} und dem Beiwert φ_1 .

$$\vec{f}_g = m_{Kr} * \varphi_1 * \vec{g}$$

Lasten aus Gravitation und Beschleunigung der Hublast

Analog wird die vertikale Last aus Trägheit und Gravitation der Hublast ermittelt. Die Kraft ist daher das Produkt aus der Hublast Q , der Gravitationskonstante \vec{g} und dem Beiwert φ_2 .

$$\vec{f}_{hub} = Q * \varphi_2 * \vec{g}$$

Lasten aus Fahren über Unebenheiten

Das Fahren über Unebenheiten führt zu Schwingungen die sich sowohl auf die Masse des Krans als auch auf die Hublast auswirken. Der Einfluss der Schwingungen auf das Krantragwerk wird durch den Dynamikfaktor φ_4 berücksichtigt.

Für die Last wird der Gravitationsanteil beziehungsweise die Gewichtskräfte des Krans und der Hublast mit dem Dynamikfaktor φ_4 multipliziert.

$$\vec{f}_g = (Q + m_{Kr}) * \varphi_4 * \vec{g}$$

Lasten aus Beschleunigung der Kranantriebe

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Beschleunigungszeit	t_{aF}	4	s

Tabelle 6-10 Angaben über Berechnung der Horizontalkräfte

Der instationäre Betrieb eines Krans führt dazu, dass der Kran regelmäßig Trägheitskräften ausgesetzt ist, die durch Beschleunigung oder Verzögerung des Krans entstehen. Diese Kräfte können über ein starrkörperkinetisches Modell ermittelt werden und wirken in Antriebsrichtung. Bei einer asymmetrischen Lastverteilung treten Horizontalkräfte an der Stelle der Spurführung auf. Dadurch ergibt sich die Kräfteverteilung entsprechend Abbildung 6-22.

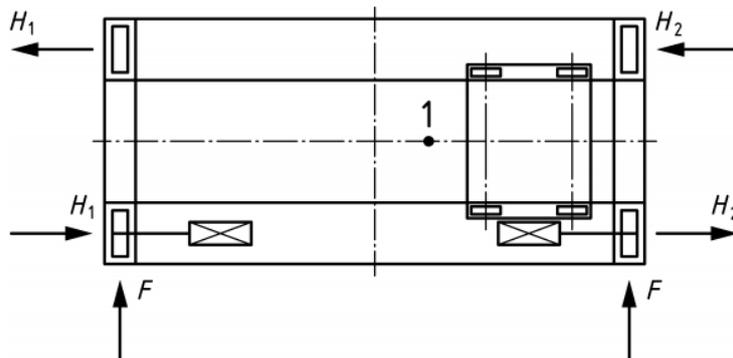


Abbildung 6-22 Kräfte aus Antrieben [4]

Abbildung 6-22 stellt eine Spurkranführung dar. Erfolgt die Führung einseitig über Führungsrollen treten die Kräfte nur an einem Kopfträger auf.

Die Massenkräfte aus der Beschleunigung, in der Skizze mit F gekennzeichnet, werden durch die Multiplikation der Kranmasse inklusive Hublast mit der Kranfahrtbeschleunigung berechnet. Orientierungswerte für die Fahrtbeschleunigungen können aus der VDI 3573 entnommen werden. [9] Dynamische Effekte, die durch die Starrkörperanalyse nicht wiedergegeben werden, werden durch die Multiplikation mit dem Beiwert φ_5 einbezogen.

$$\vec{F} = \frac{(Q * m_{Kr}) * \varphi_5 * \vec{a}}{2}$$

Die Horizontalkräfte H_1 und H_2 liegen nur bei asymmetrischer Lastverteilung vor. Beim Brückenkran liegen die größten Werte bei maximaler Auslenkung der Krankatze vor. Die Berechnung erfolgt über ein Momentengleichgewicht um den Schwerpunkt, dargestellt durch 1 in Abbildung 6-22.

Für die Berechnung ist, wie in Abbildung 6-18 zu sehen, lediglich die Angabe der Beschleunigungszeit durch den Nutzer notwendig. Diese wurde im vorliegenden Fall aus der VDI 3573 entnommen. Alle weitere Berechnung werden automatisch vorgenommen.

6.2.3.2 Unregelmäßige Lasten

Lasten aus Schräglauf

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Schienenbreite	b_h	45	mm
Laufspiel	s_g	16	mm
Radlasten Rad 1 / Kopfträger 1	$Z_{1.1}$	5,23	kN
Radlasten Rad 2 / Kopfträger 1	$Z_{1.2}$	5,23	kN
Radlasten Rad 1 / Kopfträger 2	$Z_{2.1}$	9,38	kN
Radlasten Rad 2 / Kopfträger 2	$Z_{2.2}$	5,23	kN

Tabelle 6-11 Angaben über Berechnung der Schräglaufkräfte

Bei der Fahrt wird der Kran durch die Führungsmittel in der Spur gehalten. Dadurch wird die natürliche, freie Fahrt der Räder korrigiert. Die dadurch entstehenden Schräglaufkräfte belasten den Kran zusätzlich. In der EN 13001-2 4.2.3.4 wird ein vereinfachtes Verfahren für starre Systeme verwendet. In der EN 15011 findet sich ein genaueres Verfahren, welches auf die Besonderheiten der Brücken- und Portalkräne angepasst ist und auch die Berechnung von elastischen Systemen zulässt.

Bevor das Verfahren zum Einsatz kommt muss der Schräglaufwinkel eruiert werden. Der Winkel setzt sich dabei aus drei Anteilen zusammen: Spurspielanteil, Toleranzanteil und Verschleißanteil. Bei der Berechnung spielen die in Abbildung 6-23 definierten Bezeichnungen eine elementare Rolle. Das Spurspiel s_g , die Schienenbreite b_h und der Führungsmittelachsabstand w_b . Die Formeln sind in EN 15011 5.2.1.4.2 Tabelle 6 zusammengefasst.

Abbildung 6-25 zeigt die Ermittlung der Schräglaufkräfte durch die Anwendung des Berechnungsprogrammes. Die Radlasten können entweder aus der Kranmasse errechnet oder von einem Statikprogramm übernommen werden. Die Krankatze muss dabei in die für das Tragwerk ungünstigste Katzstellung gebracht werden. Zusätzlich muss der Nutzer sowohl die Schienenbreite als auch das Laufspiel angeben.

Berechnung der Schräglaufkräfte gemäß EN 15011 5.2.1.4

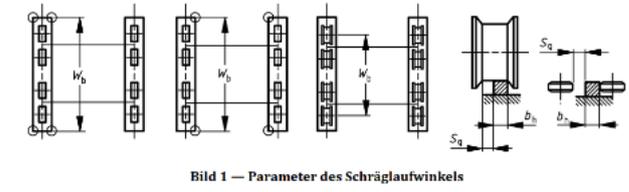


Bild 1 — Parameter des Schräglaufwinkels

Schienenbreite	$b_h := 45 \text{ mm}$
Laufspiel	$s_g := 16 \text{ mm}$
Radlast Rad 1/ Kopfträger 1	$Z_{1,1} := 5.23 \text{ kN}$
Radlast Rad 2/ Kopfträger 1	$Z_{1,2} := Z_{1,1} = 5.23 \text{ kN}$
Radlast Rad 1/ Kopfträger 2	$Z_{2,1} := 9.38 \text{ kN}$
Radlast Rad 2/ Kopfträger 2	$Z_{2,2} := Z_{2,1} = (9.38 \cdot 10^3) \text{ N}$

$Y_F = (3.99 \cdot 10^3) \text{ N}$	
$Y_{1,1} = (1.43 \cdot 10^3) \text{ N}$	
$Y_{1,2} = 0$	
$Y_{2,1} = (2.56 \cdot 10^3) \text{ N}$	+
$Y_{2,2} = 0$	

Abbildung 6-25 Berechnung Schräglaufkräfte Tool

6.2.3.3 Außergewöhnliche Lasten

Prüflasten

Krane werden regelmäßig auf ihre Sicherheit geprüft. Dabei wird die Hublast durch die Prüflast ersetzt. Es wird zwischen dynamischer und statischer Prüflast unterschieden. Die statische Prüflast beträgt 125% der Nennlast. Die dynamische Prüflast ergibt sich durch Multiplikation des Prüflastbeiwertes φ_6 mit der Hublast. Dabei gilt die Bedingung, dass die dynamische Prüflast mindestens 110% der Nenntragfähigkeit betragen muss.

$$\overrightarrow{f_{P_dyn}} = 1,1 * Q * \varphi_{6_dyn} * \vec{g}$$

$$\overrightarrow{f_{P_sta}} = 1,25 * Q * \varphi_{6_sta} * \vec{g}$$

Lasten aus Pufferstoß

Beim Aufprall des Krans auf den Puffer wirkt der Pufferstoß auf das Krantragwerk. Die Kraft, die beim Stoß wirkt, hängt stark von der Art des Puffers ab. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die gesamte kinetische Energie, die vor dem Moment des Aufpralls vorliegt, in Deformationsenergie umgewandelt wird. Diese kann über die Betriebsgeschwindigkeit berechnet werden. Über die Energie und entsprechende Pufferkennlinie, die vom Hersteller des Puffers zur Verfügung gestellt wird, kann die Gesamtkraft ermittelt werden, welche an den Pufferstellen auftritt. Die Kraft wird anschließend mit dem Pufferbeiwert φ_7 beaufschlagt.

Die Hublast wird beim Ereignis des Pufferstoßes nicht berücksichtigt, da der Stoß zu schnell abgeschlossen ist. Die Schwingung, die sich durch den Stoß bei der Hublast einstellt, wirkt sich erst nach Abschluss des Stoßes auf den Kran aus. Der Pufferstoß F_p bezieht sich auf den gesamten Kran. Da die Kraft \vec{f}_p jeweils an den Kopfträgern angreift wird die Kraft des Pufferstoß gleichmäßig aufgeteilt.

$$\vec{f}_p = \frac{F_p}{2} * \varphi_7$$

Da die kinetische Energie, aus der zu Beginn angeben Krangeschwindigkeit berechnet wird und die Puffereigenschaften über den Beiwert berücksichtigt werden, sind keine weiteren Angaben von Nutzerseite notwendig.

6.2.4 Risikobeiwerte

Risikobeiwerte werden in der EN 13001-2 im Anhang D definiert. In Tabelle D.1 (siehe Abbildung 6-26) wird zunächst die Risikoklasse qualitativ definiert. Die Unterteilung erfolgt dabei in Risikoklasse 1 und 2 und orientiert sich an der Schwere der Auswirkungen eines Bauteil- beziehungsweise Kranversagens. Da die Einordnung nicht klar definiert werden kann, obliegt sie letzten Endes der individuellen Einschätzung des verantwortlichen Ingenieurs. Tabelle D.2 gibt basierend auf der Risikoklasse und der Art der Verbindung den absoluten Wert des Beiwerts an. Der Risikobeiwert wird global mit allen Lasten multipliziert und erhöht somit die Gesamtsicherheit des Krans.

Da es sich bei dem vorliegenden Beispiel um einen einfachen Werkstattkran ohne besonderes Risikopotential handelt, ist eine Beaufschlagung mit einem Risikobeiwert nicht notwendig. Die Angabe der Abbildung 6-26 können im vorliegenden Fall ignoriert werden und der Risikobeiwert ergibt sich somit zu:

$$\varphi_n = 1$$

Der Vollständigkeit halber wurde der Umgang mit den Risikobeiwerten dennoch behandelt.

Bauteil oder Anlagenteil, für das der Risikobeiwert angewendet wird	Beispiele	Risikobeiwert			
		Risikoklasse I		Risikoklasse II	
		Statische Festigkeit	Ermüdungsfestigkeit	Statische Festigkeit	Ermüdungsfestigkeit
Seil- und Kettenanlagen in Hubwerken		1,25	1,25	1,6	1,6
Seil- und Kettenanlagen in Triebwerken, die große Teile des Krans aufhängen und bewegen	Auslegerhubwerk eines Schiffsentladers	1,25	1,25	1,6	1,6
Tragwerksbauteile, an denen keine Fehler durch Sichtprüfung erkennbar sind und deren Ausfall zum Verlust der Hublast führen würde	Schraubverbindungen	1,1	1,1	1,25	1,25
Tragwerksbauteile, an denen keine Fehler durch Sichtprüfung erkennbar sind und deren Ausfall zum Zusammenbrechen des gesamten Krans oder eines Hauptteils des Krans führen würde	Unterbau und Auflager einer Führungsrolle; Endanschlag für eine Laufkatze	1,1	1,1	1,4	1,4

Abbildung 6-26 Auswahl des Risikobeiwertes nach EN 13001-2 [4]

6.2.5 Modellierung der Lastfälle

Da während des Kranbetriebes nicht alle Lasten zugleich auftreten werden die jeweiligen Lasten für den Sicherheitsnachweis in Lastkombination eingeteilt. Die Norm gibt in EN 13001-2 4.3.6 Lastkombinationen vor (siehe Abbildung 4-7) entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens an. Es steht dem Konstrukteur allerdings frei andere Kombination anzunehmen, wenn diese den praktischen Anforderungen des Kranes besser entsprechen. Neben den zu verwendenden Lasten werden zudem die Teilsicherheitsbeiwerte, sowie die zu verwendenden dynamischen Beiwerte angegeben.

Die Auswahl der relevanten Lastkombination hängt von den im System befindlichen Lasten ab. Im vorliegenden Fall des Werkstattkrans sind für den statischen Festigkeitsnachweis und mit den vorliegenden Lasten die Lastkombinationen A1, A4, B5, C3 und C4 zu überprüfen. Für das Beispiel wird der statische Festigkeitsnachweis nur mit der Lastkombination A4, da der dynamische Beiwert φ_4 größer ist als φ_1 und φ_2 und somit die Belastung für A1 niedriger wäre. Der Betriebsfestigkeitsnachweis wird mit einer Lastkombination A durchgeführt. Dabei werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf 1 gesetzt.

6.2.6 Berechnung der Lastfälle

Um dem Nutzer der Berechnungssoftware die größtmögliche Flexibilität zu geben werden die Lasteinwirkungen für die einzelnen Lastfälle in einem externen Statikprogramm ermittelt. Die Festigkeitsberechnung wird nach den allgemeinen Regeln der Festigkeitslehre durchgeführt. Daher kann auf bewährte Programme mit passendem Funktionsumfang zurückgegriffen werden. Das Berechnungsprogramm bietet in Abbildung 6-27, gemeinsam mit der bisherigen Dokumentation, die notwendigen Eingaben für eine Stabstatiksoftware. Die Ergebnisse des Programmes können anschließend wieder in das Programm eingefügt werden, um den Sicherheitsnachweis fertigzustellen.

Für die Berechnung des Einträgerbrückenkrans wurde das Statik Programm R-Stab der Firma Dlubal verwendet. Die Software bietet die Möglichkeit, das Stabsystem bestehend aus Knoten und Stäben grafisch zu modellieren. Die Lasten auf das System können in Lastkombinationen, ähnlich zur Norm, zusammengefasst werden. Auf eine detaillierte Beschreibung der Statik Berechnung in R-Stab wird an dieser Stelle verzichtet, da dies nicht Gegenstand der Arbeit ist.

Für den Berechnung der Lastfälle ist es dennoch wichtig zu verstehen, welche Optionen das gewählte Statikprogramm bietet. Da R-Stab in der Lage ist den Stäben des statischen Systems physikalische Werte wie das Gewicht zu hinterlegen, muss das Gewicht der Träger bei der Belastung ausgenommen werden. Daher zeigt Abbildung 6-27 die Berechnung der Eingaben für den Lastfall B5 nur für die Masse der Krankkatze.

Zusätzlich gibt R-Stab die Option Teilsicherheitsbeiwerte separat für einzelne Lastkombinationen einzugeben. Daher werden diese in Abbildung 6-27 ebenfalls separat angegeben.

Kräfteermittlung Lastkombination B5 (EN 13001-2 Tabelle 12)			
Relevante Beiwerte			
$\gamma_{p_B} = 1.16$	$\phi_4 = 1.74$	$\gamma_{p_hB5} := 1.16$	$\gamma_{p_sB5} := 1.16$
Beiwert Masse des Krans			
$\gamma_L := 1.16 \cdot \phi_4 = 2.02$			
Gewichtskraft der Krankkatze			
$f_{Ka} := m_{tr} \cdot g = 0.4 \text{ kN}$	$\gamma_L = 2.02$		
Hublast			
$f_{Hub} := Q \cdot g \cdot \phi_4 = 16.14 \text{ kN}$	$\gamma_{p_hB5} = 1.16$		
Lasten aus Schräglauf			
$Y_F = 3.99 \text{ kN}$	$\gamma_{p_sB5} = 1.16$		
$Y_{1.1} = 1.43 \text{ kN}$			
$Y_{1.2} = 0 \frac{1}{N} \cdot \text{kN}$			
$Y_{2.1} = 2.56 \text{ kN}$			
$Y_{2.2} = 0 \frac{1}{N} \cdot \text{kN}$			

Abbildung 6-27 Programmeingaben für den Lastfall B5

In der vorliegenden Form bietet das Berechnungsprogramm die Möglichkeit der Integration in die existierende digitale Infrastruktur eines Unternehmens, ohne kostspielige und langwierige Umstellungen vornehmen zu müssen. Insbesondere für bereits existierende Stabstatik Modelle kann ohne großen Aufwand die Normkonformität verifiziert werden. Softwareseitig wird damit zudem eine potenzielle Fehlerquelle eliminiert, da die am Markt verfügbare CAx-Software ihre Verlässlichkeit bereits in der Praxis bewiesen haben.

6.3 Zulässige Grenzzustände

Um den statischen Festigkeitsnachweis gemäß EN 13001 zu führen, müssen für alle Bauteile, Schweiß- und Schraubverbindungen zulässige Grenzwerte ermittelt werden. Anders als bei der Anwendung der Methode der zulässigen Spannungen bei der DIN 15018, werden die Grenzwerte nicht explizit vorgeben. Stattdessen werden die Grenzzustände anhand der Werkstoffkennwerte, Fließgrenze und Bruchfestigkeit, ermittelt. Diese werden mit allgemeinen γ_m und spezifischen Widerstandsbeiwerten γ_s angepasst, sodass sie einen zulässigen Grenzwert darstellen. Die Widerstandsbeiwerte berücksichtigen die Streuung der Versuchsergebnisse bei der Ermittlung der Werkstoffkennwerte und beziehen so die praktisch vorliegende Heterogenität der Werkstoffe in den Auslegungsprozess mit ein. Der allgemeine Widerstandsbeiwert wird gemäß EN 13001-2 4.3.6 Tabelle 12 auf $\gamma_m = 1,1$ festgelegt.

6.3.1 Grenzzustände von Bauteilen

Bezeichnung	Variable	Kurzzeichen	Menge	Einheit
Werkstoff	<i>Stahlsorte</i>	"S235"		
Materialdicke	d		17	mm

Tabelle 6-12 Angaben zur Berechnung der Grenzzustände von Bauteilen

Für die Bestimmung der Grenzzustände von Bauteilen wird zu Beginn anhand des Bauteilwerkstoffes und der Bauteildicke die Fließgrenze und die Bruchfestigkeit ermittelt. Die Auswahl erfolgt mit EN 13001-3-1 Tabelle 2. Im Berechnungsprogramm ist die Tabelle in Form hinterlegt und wird, wie im Kapitel „Funktionsweise des Programmcodes“ beschrieben über eine for-Schleife abgerufen.

Für den Festigkeitsnachweis müssen die ermittelten Werkstoffkennwerte mit dem Gesamtwiderstandsbeiwert γ_R dividiert werden. Dieser ist das Produkt des allgemeinen mit dem spezifischen Widerstandsbeiwert:

$$\gamma_R = \gamma_s * \gamma_m$$

Der Grenzwert der Bemessungsnormalspannung ergibt sich durch den Quotienten der Fließgrenze mit dem Gesamtwiderstandsbeiwert. Für Schubspannungsgrenzwerte wird im Nenner ein $\sqrt{3}$ ergänzt.

$$f_{Rd\sigma} = \frac{f_y}{\gamma_R}$$

$$f_{Rd\tau} = \frac{f_y}{\gamma_R * \sqrt{3}}$$

Diese Zusammenhänge sind im Berechnungsprogramm hinterlegt. Der Nutzer muss initial nur die Stahlsorte und die Materialdicke angeben wie in Abbildung 6-28 zu sehen.

Definition der Grenzwerte für den Allgemeinen Festigkeitsnachweis (EN 13001-3-1 5.2.2)	
Stahlsorte	Stahlsorte := "S235"
Materialdicke	d := 17 mm
Abschnitt	
$f_{Rd\sigma} = 215.31 \frac{N}{mm^2}$	$f_{Rd\tau} = 124.31 \frac{N}{mm^2}$

Abbildung 6-28 Berechnung Bauteilgrenzwerte Tool

6.3.2 Grenzzustände von Schraubenverbindungen

Schraubenverbindungen sind neben Schweiß- und Steckbolzenverbindungen eine gängige Variante zum Verbinden zweier oder mehrerer Bauteile. Es wird zwischen drei verschiedenen Schraubenverbindungsarten unterschieden: Schub- und Auflagerverbindungen, gleitfeste Verbindungen und Zugbelastete Verbindungen.

Die Unterscheidung liegt in der Belastung und Ausführung. Sowohl bei Schub- und Auflagerverbindungen als auch gleitfeste Verbindungen treten Kräfte normal zur Schraubenachse auf. Dabei wird die Scherkraft bei Ersteren direkt von der Schraube beziehungsweise des Schraubenschafftes getragen, während bei gleitfesten Verbindungen die Haftreibung zwischen Schraubenkopf und Auflagefläche die Hauptbelastung aufnimmt. Dafür müssen gleitfeste Verbindungen vorgespannt werden, um eine entsprechende Flächenpressung zu erzeugen. Zugbelastete Verbindungen werden ausschließlich durch Zugkräfte belastet. Da Zug- und Scherkräfte auch in kombinierter Form auftreten können, besteht die Möglichkeit, dass die zuvor benannten Verbindung in Kombination vorkommen.

Die Berechnung der einzelnen Grenzwerte erfolgt auf Basis der Schraubenqualität. EN 13001-3-1 Tabelle 5 (siehe Abbildung 6-29) bietet für verschiedenen Güteklasse die Werte für Zugfestigkeit und Streckgrenze der Schrauben. Zudem sind bei gleitfesten oder zugbelasteten Verbindungen ausschließlich hochfeste Schrauben, also Güteklasse 8.8, 10.9 oder 12.9, erlaubt.

Güteklasse (Schraubenqualität)	4.6	5.6	8.8	10.9	12.9
$f_{yb} \text{ N/mm}^2$	240	300	640	900	1 080
$f_{ub} \text{ N/mm}^2$	400	500	800	1 000	1 200

Abbildung 6-29 Schraubenwerkstoffkennwerte nach EN 13001-3-1 [7]

Anders als bei der Ermittlung der Grenzwerte anderer Verbindungsarten, sind für die Schraubengrenzwerte eine Vielzahl von Angaben notwendig. Der Grund sind die unterschiedlichen Ausformungen der Schraubenverbindung abhängig von der Situation. In anderen Worten: Da die konstruktive Situation stets spezifische Lösungen erfordert, wird dementsprechend der Einsatz von anderen Schraubentypen notwendig. Somit müssen

Parameter wie die Schrauben-, Klemm- oder Schaftlänge zusätzlich berücksichtigt werden. Gleiches gilt für den Gleitreibungskoeffizienten von gleitfesten Verbindungen, da dieser abhängig von dem verwendeten Material variieren kann. Um etwaige Streuungen bei den Werkstoffkennwerten zu berücksichtigen wird ebenfalls ein Gesamtwiderstandsbeiwert verwendet, welcher als Produkt von allgemeinen und speziellen Widerstandsbeiwert errechnet und in den entsprechenden Abschnitten in der Norm angegeben wird.

$$\gamma_R = \gamma_S * \gamma_m$$

Schub- und Auflagerverbindungen:

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Anzahl der Schnitte	m_S	1	
Anzahl der Schrauben	n_{Sp}	4	
Schaftquerschnitt	A_b	314	mm^2
Dicke des verbundenen Teils	t	10	mm
Schraubennendurchmesser	d_S	22	mm
Lochdurchmesser	d_0	22	mm

Tabelle 6-13 Angaben bei Schub- und Auflagerverbindungen

Für Schub- und Auflagerverbindungen werden drei zu überprüfende Grenzwerte definiert: Bemessungsscherkraft, Bemessungsauflegerkraft und die Grenzspannung in den verbundenen Teilen.

Die Bemessungsscherkraft gibt an, welche Scherkraft die Schraube mit ihrem Querschnitt aushalten kann. Die Formel ist in EN 13001-3-1 5.2.3.1.2 5 gegeben und ähnelt der Bauteilschubspannung ergänzt durch die Querschnittsfläche des Schraubenschaftes.

$$F_{vRd} = \frac{f_{yb} * A_b}{\gamma_{Rbs} * \sqrt{3}}$$

Der Grenzwert der Auflagerkraft entspricht der Lochleibung aus anderen Normen wie der EN 1993-1-8 und stellt die Belastbarkeit der Schraubenbohrung dar. Daher dient die Fließgrenze des Bauteilwerkstoffes als Berechnungsgrundlage. Die Formel EN 13001-3-1 5.2.3.1.3 6 ähnelt der Bauteilnormalspannungsformel und wird durch den Schaftdurchmesser der Schraube und die Dicke des verbundenen Teils im Zähler ergänzt.

$$F_{bRd} = \frac{f_y * d_S * t}{\gamma_{Rbb}}$$

Mit dem Grenzwert der Spannung in den verbundenen Teilen wird überprüft, ob der Restquerschnitt A_n die auftretende Belastung aushält, ohne zu versagen. Da es sich um den Querschnitt des Bauteils handelt, wird mit der Bauteilfließgrenze gerechnet, welche im Zähler mit dem Restquerschnitt multipliziert wird, siehe EN 13001-3-1 5.2.3.1.4 8.

$$F_{cSRd} = \frac{f_y * A_n}{\gamma_{Rc}}$$

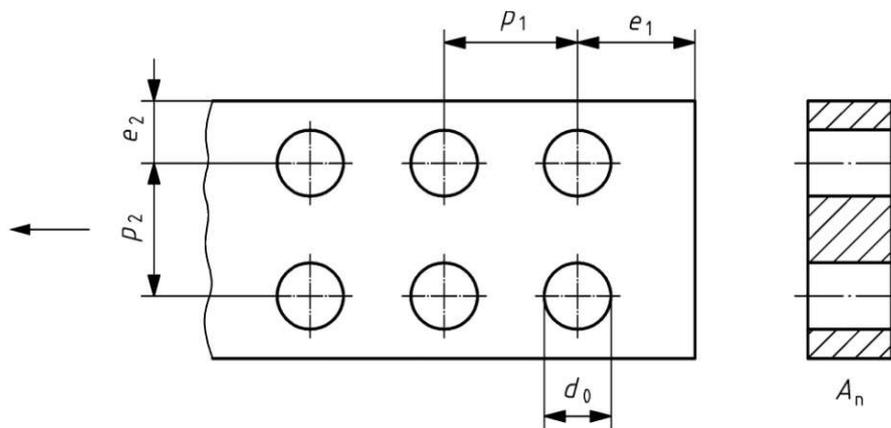


Abbildung 6-30 Schub- und Auflagerverbindungen [7]

Gleitfeste Verbindungen

Bezeichnung	Variable	Menge	Einheit
Spannungsquerschnitt	A_{sb}	245	mm^2
Gleitreibungskoeffizient	μ	0,3	
Äußere Zugkraft	F_{cr}	42,65	kN

Tabelle 6-14 Angaben Gleitfeste Verbindungen

Die Funktionsweise der gleitfesten Verbindung auf der Flächenpressung die durch eine aufgebraute Vorspannkraft gewährleistet wird. Durch den Druck der Schraube werden die Flächen der zu verbindenden Teile zusammengepresst, sodass die angreifende Scherkraft durch die Reibungskraft ausgeglichen wird. Somit wird die Schraube nicht durch Schubspannungen belastet. Kritisch ist dabei, dass die die Vorspannkraft, unabhängig von äußeren Zugkräften, groß genug ist, um eine ausreichende Pressung zu gewährleisten. Überschreitet die angreifende Scherkraft die entgegenwirkende Reibungskraft, wird die Schraube entsprechend einer Schubverbindung beansprucht.

Der Grenzwert der Bemessungsgleitkraft basiert auf dem Produkt von Gleitreibungskoeffizient (EN 13001-3-1 5.2.3.2 9), welcher von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt, und der Nettovorspannkraft. Die Nettovorspannkraft ergibt sich aus der Bemessungsvorspannkraft, von der die äußere Zugkraft abgezogen wird. Die Vorspannkraft wird über 70% der Fließgrenze und den Spannungsquerschnitt der Schraube definiert.

$$F_{sRd} = \frac{\mu * (F_{pd} * F_{cr})}{\gamma_{Rs}}$$

Zugbelastete Verbindung

Bezeichnung	Variable	Anzugstechnik	Menge	Einheit
Spannungsquerschnitt	A_{sb}		245	mm^2
Anzugstechnik	<i>Festziehen</i>	"Anzugsdrehmoment"		
Schraubenkopfkontaktfläche	d_w		30	mm
Schraubenklemmlänge	l_k		27,5	mm
Schraubennendurchmesser	d_s		22	mm
Belastete Schaftlänge	l_1		20	mm
Spannungsquerschnitt	A_{sb}		245	mm^2

Tabelle 6-15 Angaben Gleitfeste Verbindungen

Bei der zugbelasteten Verbindung wird die Schraube durch eine äußere Zugkraft belastet. Um trotzdem eine funktionierende Verbindung zu garantieren, wird die Schraube vorgespannt. Der Nachweis überprüft daher zwei Aspekte. Zum einen wird kontrolliert, ob die Schraube die angreifenden Kräfte aushält. Zum anderen wird sichergestellt, dass keine Lücke zwischen den zu verbindenden Teilen vorliegt.

Elementar für die Berechnung der Zugverbindung ist der Verspannungsfaktor ϕ . Die Berechnung wird anhand von Näherungsformel in EN 13001-3-1 Anhang G durchgeführt. Diese ist im Berechnungsprogramm hinterlegt. Über die minimale und maximale Vorspannkraft werden in EN 13001-3-1 5.2.3.3 10 und 11 die Grenzwerte für die Zugkraft in Bezug auf die Fließgrenze und das Klaffen ermittelt.

$$F_{t1Rd} = \frac{\frac{F_y}{\gamma_{Rb}} - F_{p,max}}{\phi}$$

$$F_{t2Rd} = \frac{F_{p,min}}{\gamma_{Rb} * (1 - \phi)}$$

Im Berechnungsprogramm werden die Angaben für die Schraubenverbindungen gesammelt abgefragt (siehe Abbildung 6-31) um diese thematisch zu bündeln und den Code übersichtlich zu halten. Die Berechnung der einzelnen Grenzwerte wird entsprechend der Erläuterungen in diesem Abschnitt durchgeführt und gesammelt in Abbildung 6-32 dargestellt. Damit sind alle Grenzwerte auf einen Blick sichtbar.

Definition der Grenzwerte von Schraubenverbindungen (EN 13001-3-1 5.2.3)	
Schraubenqualität	Schraubenqualität := "8.8"
Grenzwerte Schrauben für M20 8.8	
$f_{yb} = (6.4 \cdot 10^8) \text{ Pa}$	$f_{ub} = (8 \cdot 10^8) \text{ Pa}$
Schraubenanzahl	$n_S := 4$
Anzahl Schnitte	$m_S := 1$
Belastete Schaftlänge	$l_1 := 20 \text{ mm}$
Belastete Gewindelänge	$l_2 := 7.5 \text{ mm}$
Schraubenklemmlänge	$l_K := 27.5 \text{ mm}$
Schraubenkopf Kontaktfläche	$d_w := 30 \text{ mm}$
Schraubennennendurchmesser	$d_S := 20 \text{ mm}$
Spannungsquerschnitt	$A_{sb} := 245 \text{ mm}^2$
Schaftquerschnitt	$A_b := 314 \text{ mm}^2$
Gleitreibungskoeffizient	$\mu := 0.3$
Dicke des verbundenen Teils	$t := 10 \text{ mm}$
Lochdurchmesser	$d_0 := 22 \text{ mm}$
Äußere Zugkraft	$F_{cr} := 42.65 \text{ kN}$
Art der Schraubenanziehung	Festziehen := "Anzugsdrehmoment"

Abbildung 6-31 Angaben für die Berechnung der Grenzwerte der Schraubverbindungen

Schub - und Auflageverbindungen	
Grenzwert Schraubenscherkraft	
$F_{vRd} = 81.14 \text{ kN}$	
Grenzwert der Bemessungsauflagerkraft	
$F_{bRd} = 45.45 \text{ kN}$	
Grenzwert Bemessungszugspannung im verbundenen Teil	
$F_{csRd} = 265.91 \text{ kN}$	
Gleitfeste Verbindungen	
Grenzwert der Bemessungsgleitkraft	
$F_{sRd} = 16.06 \text{ kN}$	
Zugverbindungen	
Grenzwert Bemessungszugkraft Schraube im Bezug auf Fließgrenze	
$F_{t1Rd} = 41.8 \text{ kN}$	
Grenzwert Bemessungszugkraft Schraube auf Klaffen	
$F_{t2Rd} = 175.05 \text{ kN}$	

Abbildung 6-32 Grenzwerte von Schraubenverbindungen

6.3.3 Grenzzustände von Schweißnähten

Bezeichnung	Variable	Zustandsgröße	Menge	Einheit
Art des Schweißwerkstoffs	<i>Schweißwerkstoff</i>	"Gleichwertig"		
Fließgrenze des Schweißwerkstoff	f_{uw}		690	$\frac{N}{mm^2}$
Schweißnaht	<i>Schweißnaht</i>	"Nicht Durchgeschweißt"		

Tabelle 6-16 Angaben der Grenzzustände der Schweißnähte

Neben den Grenzwerten für Schraubenverbindungen und Bauteilen müssen auch die Grenzwerte für Schweißnähte ermittelt werden, da sie ein kritisches Verbindungselement für den Kran darstellen. Als Basis für die Berechnung dienen die Werkstofffließgrenze beziehungsweise die Werkstoffbruchfestigkeit.

Die Art der Schweißnaht und andere Parameter wie beispielsweise spezielle Kerbfälle werden durch den Beiwert α_w berücksichtigt. Der Beiwert wird anhand der EN 13001-3-1 5.2.5 Tabelle 8 definiert und mit den Werkstoffkennwerten multipliziert (siehe Abbildung 6-33).

Art des Schweißwerkstoffs	Spannungsrichtung	Art der Schweißnaht	Art der Spannung	Nummer der Gleichung	α_w		
					$f_y \leq 420$ N/mm ²	$f_y > 420$ $f_y < 930$ N/mm ²	$f_y \geq 930$ N/mm ²
Gleichwertig (f_y bezieht sich auf die verschweißten Teile)	Spannung normal zur Schweißnaht- richtung	Durchgeschweißte Naht	Zug oder Druck	21	1,0		0,93
		Nicht durchgeschweißte Naht ^a	Zug oder Druck	21	0,90	0,85	
	Spannung parallel zur Schweißnaht- richtung	Alle Schweißnähte	Schub	21	0,60		0,55
Nicht gleichwertig (f_y bezieht sich auf den Schweißwerkstoff)	Spannung normal zur Schweißnaht- richtung	Durchgeschweißte Naht	Zug oder Druck	22	0,80	0,85	0,90
		Nicht durchgeschweißte Naht ^a	Zug oder Druck	22	0,70	0,75	0,80
	Spannung parallel zur Schweißnaht- richtung	Alle Schweißnähte	Schub	22	0,45	0,50	0,50

Die Werte von α_w gelten für Schweißnähte der Bewertungsgruppe C nach EN ISO 5817:2007 oder besser.
Der Nachweis der verbundenen Teile, in Übereinstimmung mit 5.3.1, ist immer zusätzlich zum Nachweis der Schweißnaht, in Übereinstimmung mit 5.3.4, erforderlich. Bei verbundenen Teilen aus unterschiedlichen Werkstoffen ist der Nachweis für jedes Teil separat zu erbringen.
Siehe EN ISO 17659 für die Definition einer durchgeschweißten Naht und einer nicht durchgeschweißten Naht.
Gleichwertige Schweißwerkstoffe: Schweißwerkstoffe, deren Bruchfestigkeit gleich oder besser als die der verbundenen Teile ist
Nicht gleichwertige Schweißwerkstoffe: Schweißwerkstoffe, deren Bruchfestigkeit geringer als die der verbundenen Teile ist
Die geschweißten Verbindungsstellen zusammengesetzter Bauteile, wie z. B. Flansch-Steg-Verbindungen, können ohne Berücksichtigung der Normalspannung parallel zur Schweißnahtachse angeordnet werden, Bedingung ist jedoch, dass die Schweißnähte so ausgelegt sind, dass sie die Scherkräfte, die zwischen diesen Teilen erzeugt werden, aufnehmen können.

^a Eine asymmetrische Schweißnaht wird nicht empfohlen. Wird sie dennoch verwendet, müssen verbundene Bauteile so gestützt werden, dass die Einwirkung einer Lastenexzentrizität auf die Schweißnaht vermieden wird.

Abbildung 6-33 Auswahl der Schweißnahtkennwerte [7]

Für die Grenzwerteermittlung der Schweißnähte im Berechnungsprogramm muss der Nutzer die Art des Schweißwerkstoffes, den Fließgrenze des Schweißwerkstoff und die Art der Schweißnaht angeben. Mit der Art des Schweißwerkstoffes wird geprüft, ob der Schweiß- und Bauteilwerkstoff gleich sind. Als Art der Schweißnaht wird die praktische Verarbeitung der Schweißnaht abgefragt. Die Abfrage der Tabelle geschieht danach automatisch wie in Abbildung 6-34 zu sehen.

Definition der Grenzwerte für Schweißverbindungen (EN 13001-3-1 5.2.5)

Art des Schweißwerkstoffs	Spannungsrichtung	Art der Schweißnaht	Art der Spannung	Nummer der Gleichung	α_w		
					$f_y \leq 420$ N/mm ²	$f_y > 420$ $f_y < 930$ N/mm ²	$f_y \geq 930$ N/mm ²
Gleichwertig (f_y bezieht sich auf die verschweißten Teile)	Spannung senkrecht zur Schweißnaht-richtung	Durchgeschweißte Naht	Zug oder Druck	21	1,0		
		Nicht durchgeschweißte Naht*	Zug oder Druck	21	0,90		
	Spannung parallel zur Schweißnaht-richtung	Alle Schweißnahten	Schub	21	0,60		
Nicht gleichwertig (f_y bezieht sich auf den Schweißwerkstoff)	Spannung senkrecht zur Schweißnaht-richtung	Durchgeschweißte Naht	Zug oder Druck	22	0,80	0,85	0,90
		Nicht durchgeschweißte Naht*	Zug oder Druck	22	0,70	0,75	0,80
	Spannung parallel zur Schweißnaht-richtung	Alle Schweißnahten	Schub	22	0,45	0,50	0,50

Art des Schweißwerkstoffs	Schweißwerkstoff := "Gleichwertig"
Fließgrenze des Schweißwerkstoff	$f_{wt} := 690 \frac{N}{mm^2}$
Art der Schweißnaht	Schweißnaht := "Nicht Durchgeschweißte"

$f_{wt} = 184,09 \frac{N}{mm^2}$	$f_{wt} = 122,73 \frac{N}{mm^2}$
----------------------------------	----------------------------------

Abbildung 6-34 Grenzwert Schweißnaht Tool

6.3.4 Grenzzustände des Betriebsfestigkeitsnachweis

Bezeichnung	Variable	Zustandsgröße	Menge	Einheit
Gesamtlastspielzahl	N_t		$5 * 10^5$	
Wöhlersteigung	m_d		5	
Charakteristische Ermüdungsfestigkeit	$\Delta\sigma_c / \Delta\tau_c$		140	$\frac{N}{mm^2}$
Zugänglichkeit für Inspektionen	Zugänglichkeit	"ohne Demontage"		
Betriebssicherheit	Betriebssicherheit	"Unsicher mit Gefährdung"		

Tabelle 6-17 Angaben der Grenzzustände für die Betriebsfestigkeit anhand von Walzprofilen

Der Betriebsfestigkeitsnachweis beruht auf den Verfahren der linearen Schadensakkumulation. Dabei werden die Schädigungen, die durch die Wirkung der Spannungskollektive bei einem Kranbauteil oder einem Verbindungselement potenziell auftreten, betrachtet, um eine Abschätzung über die Lebensdauer abgeben zu können. Das Spannungskollektiv, wie in Abbildung 6-35 zu sehen, setzt sich aus Spannungsamplituden und den entsprechenden Spannungsspielen zusammen. Die Intensität, definiert durch die wirkenden Amplituden, und die Dauer der Belastung, definiert durch die Spannungsspiele, sind die maßgebenden Größen für den Grenzzustand. Um des Spannungskollektivs für die Berechnung zu veranschaulichen, kann dasselbe Bauteil bei einer kurzen und hohen Belastung oder bei einer sehr niedrigen, aber langanhaltenden Belastung herangezogen werden. Beim ersten Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung zu einem schnellen Bauteilversagen führt, während das Bauteil im zweiten Fall Dauerfestigkeit vorliegt.

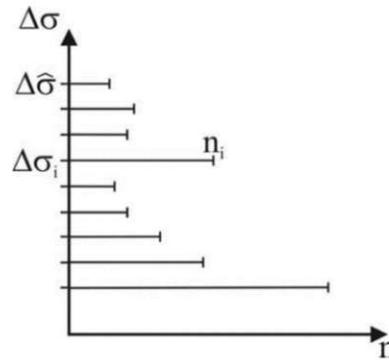


Abbildung 6-35 Spannungskollektiv [3]

Auf Grund des Nennspannungskonzepts können Bauteil Wöhlerlinien als Referenz für das Versagen angenommen werden. [3] Die Steigung m und die charakteristische Ermüdungsspannung $\Delta\sigma_c$, die mit der Referenzzahl der Spannungsspiele N_{ref} die Position und Form der Wöhlerlinie definieren, können aus den EN 13001-3-1 Anhang D und H entnommen werden. Wie in Abbildung 6-36 zu sehen werden die Werte anhand des vorliegenden Kerbfalls definiert.

Detail Nr.	Konstruktionsdetail				Anforderungen
1.2	<p>$m = 5$</p> <p>Ränder von Platten, Flachstäbe, Walzprofile unter Normalspannungen</p>				Allgemeine Anforderungen: - gewalzte Oberflächen - Brennschneiden der Flanken - keine geometrischen Kerbeffekte (z. B. Aussparungen)
	$\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$ N/mm ²				
	- Oberflächenbeschaffenheit nach EN 10163 (alle Teile), Klassen A3 oder D3 - Walzhaut vor dem Schneiden entfernt - maschinengesteuertes Schneiden		- Oberflächenbeschaffenheit nach EN 10163 (alle Teile), Klassen A3 oder C3 - maschinengesteuertes Schneiden		- Oberflächenbeschaffenheit nach EN 10163 (alle Teile), Klassen A1 oder C1 (Reparaturschweißen zulässig)
	- Randqualität nach EN ISO 9013:2002, Tabelle 5, Bereich 1		- Randqualität nach EN ISO 9013:2002, Tabelle 5, Bereich 2	- Randqualität nach EN ISO 9013:2002, Tabelle 5, Bereich 3	- Randqualität nach EN ISO 9013:2002, Tabelle 5, Bereich 3
		Rz ≤ 20 µm	20 < Rz ≤ 40 µm	40 < Rz ≤ 60 µm	60 < Rz ≤ 100 µm
	180 ≤ f_y ≤ 220	160	160	160	140
	220 < f_y ≤ 320	180	180	160	
	320 < f_y ≤ 500	200	180	160	
	500 < f_y ≤ 650	225	200	180	
	650 < f_y ≤ 900	250	200	180	
	900 < f_y	280	250	180	

Abbildung 6-36 Beispielhafter Kerbfall entnommen aus dem EN 13001-3-1 Anhang D [7]

Der spezifische Widerstandsbeiwert γ_{mf} , von der Funktion analog zum Widerstandsbeiwert aus dem statischen Festigkeitsnachweis, wird aus EN 13001-3-1 6.1 Tabelle 9 entnommen

werden und ist von davon abhängig wie leicht ein Bauteil zugänglich ist sowie der Gefährdung der Bauteile abhängig.

Für das vorliegende Spannungskollektiv wird der Spannungskollektivbeiwert nach EN 13001-3-1 6.3.3 32 berechnet. Dabei entspricht die maximale Schwingbreite $\Delta\hat{\sigma}$ der höchsten auf das Bauteil oder die Verbindung wirkenden Spannungsamplitude. Diese entspricht zudem $\Delta\sigma_{sd}$. Anschließend kann durch Multiplikation des Spannungskollektivbeiwerts mit der relativen Gesamtzahl der Schwingbreiten der Spannungsverlaufparameter s_m ermittelt werden. Der Grenzzustand ergibt sich aus EN 13001-3-1 6.5.2 36 und folgt der Schädigungsberechnung nach Palmgren-Miner.

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{mf} * \sqrt[m]{s_m}}$$

Der Betriebsfestigkeitsnachweis ist im Berechnungsprogramm in zwei Teile gegliedert: Der Auswahl der Wöhlerlinie inklusive Widerstandsbeiwert und der Ermittlung des Spannungskollektivs. Dabei ist Ersteres ablauftechnisch bei der Ermittlung der Grenzwerte angeordnet, während Letzteres mit dem Nachweis zusammenfällt. Die Angaben, die für die Auswahl der Wöhlerlinie notwendig sind, müssen manuell aus dem Anhang der Norm entnommen werden, wie Abbildung 6-37 zeigt. Die Auswahl des Kerbfalls kann aufgrund der Komplexität nicht automatisiert werden.

Definition der Grenzwerte für Betriebsfestigkeitsnachweis (EN 13001-3-1 6)	
Gesamtlastspielzahl	$N_t := 5 \cdot 10^5$
Wöhlersteigung Walzprofil (EN 13001-3-1 Anhang D 1.1)	$m_d := 5$
Charakteristische Ermüdungsfestigkeit Walzprofil	$\Delta\sigma_c := 140 \frac{N}{mm^2}$
	$\Delta\tau_c := 140 \frac{N}{mm^2}$
Wöhlersteigung Schweißverbindung (EN 13001-3-1 Anhang D 3.19)	$m_{Naht} := 3$
Charakteristische Ermüdungsfestigkeit Schweißverbindung	$\Delta\sigma_{c_Naht} := 140 \frac{N}{mm^2}$
	$\Delta\tau_{c_Naht} := 140 \frac{N}{mm^2}$
Zugänglichkeit für Inspektion	<i>Zugänglichkeit := "ohne Demontage"</i>
Betriebssicherheit	<i>Betriebssicherheit := "Unsicher mit Gefährdung"</i>
$\gamma_{mf} = 1.15$	

Abbildung 6-37 Definition Wöhlerlinie

Für das vorliegende Beispiel wurde ein mittleres Lastkollektiv angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Hälfte der $5 \cdot 10^5$ Lastspiele Leerfahrten sind. Die andere Hälfte wird

in Vollast, ein- und zwei-drittel Last unterteilt. Abbildung 6-40 zeigt, dass die entsprechenden Spannungen von einer externen Quelle, im vorliegenden Fall R-Stab, eingebracht werden.

6.4 Nachweise

Zur Erfüllung des Sicherheitsnachweis muss die Bedingung

$$f_{sd} \leq f_{Rd}$$

erfüllt werden. f steht dabei stellvertretend für den Grenzwert einer Kraft F , einer Spannung σ oder einer Spannungsamplitude $\Delta\sigma$. Die vorliegenden Spannungen und Kräfte können aus dem jeweiligen Statikprogramm entnommen werden. Im Fall des statischen Festigkeitsnachweis wird der Nachweis direkt realisiert, wie in Abbildung 6-39 zu sehen. Damit ist gemeint, dass die eingetragenen Spannungswerte aus externen Programmen unmittelbar über die entsprechenden Ungleichungen mit den Grenzwerten verglichen werden. Das Programm gibt einen binären Wahrheitswert aus. Der Wert 1 bedeutet, dass die Ungleichung erfüllt wurde, während der Wert 0 das Gegenteil angibt. Dementsprechend ist der Nachweis erfüllt, wenn alle Ungleichung den Wert 1 ausgeben. Beim Betriebsfestigkeitsnachweis werden die Spannungswerte indirekt für den Nachweis genutzt, da sie einerseits in Amplitudenwerte umgerechnet werden und andererseits, wie in Abschnitt 4.2.4.2 beschrieben, der Grenzwert über die Eingabewerte definiert wird. Analog zum statischen Festigkeitsnachweise wird die Normkonformität über eine Ungleichung überprüft.

Dadurch, dass keiner der Grenzwerte überschritten wurde, ist der Festigkeitsnachweis für den Kran positiv abgeschlossen worden.

Statischer Nachweis	
Die Spannungen und Kräfte werden mit einem externen Programm ermittelt (im gegebenen Fall RStab)	
Lastfall A1	
Bauteile (EN 13001-3-1 5.3.1)	
Brückenträger	
Zug/Druckspannung	$\sigma_{Br} := 3.87 \frac{kN}{cm^2} = 38.7 \frac{N}{mm^2}$
Scherspannung	$\tau_{Br} := 0.79 \frac{kN}{cm^2} = 7.9 \frac{N}{mm^2}$
Vergleichsspannung	$\sigma_{V_Br} := \sqrt{\sigma_{Br}^2 + 3 \cdot \tau_{Br}^2} = 41.05 \frac{N}{mm^2}$
Statische Spannungsnachweise	
$\sigma_{Br} \leq f_{Rd\sigma} = 1$	$\tau_{Br} \leq f_{Rd\tau} = 1$
$\sigma_{V_Br} \leq f_{Rd\sigma} = 1$	

Abbildung 6-38 Statischer Festigkeitsnachweis

Betriebsfestigkeitsnachweis		
Bauteile (EN 13001-3-1 6.4)		
Maximal Zug/Druck Spannung Volllast	$\sigma_{1max} := 27.5 \frac{N}{mm^2}$	Werte aus RSTAB/ Modul Stahl
Maximal Zug/Druck Spannung 2-Drittel-Last	$\sigma_{2max} := 21.6 \frac{N}{mm^2}$	
Maximal Zug/Druck Spannung 1-Drittel-Last	$\sigma_{3max} := 15.8 \frac{N}{mm^2}$	
Maximale Zug/Druck Spannung Leer	$\sigma_{4max} := 10.1 \frac{N}{mm^2}$	
$\Delta\sigma_{Rd} = 224.23 \frac{N}{mm^2}$		$\Delta\sigma_{Sd} = 17.4 \frac{N}{mm^2}$
$\Delta\sigma_{Sd} \leq \Delta\sigma_{Rd} = 1$		

Abbildung 6-39 Betriebsfestigkeitsnachweis

7 Ergebnisse

Der Sicherheitsnachweis für den Kran wurde mit sowohl mit der alten (DIN 15018) als auch mit der neuen Norm (EN 13001) erfolgreich durchgeführt, um die Ergebnisse der neuen Norm zu validieren. Die Berechnung gemäß DIN 15018 ist in Anhang A zu finden. Durch den Umstand, dass der Kranhersteller ABUS Kransysteme den Kran erfolgreich in der Praxis einsetzt wurden die Ergebnisse außerdem verifiziert. Um tiefere Erkenntnisse zu generieren, werden Lasten und Grenzwerte gegenübergestellt. In Tabelle 7-1 werden die Lasteinwirkungen der DIN 15018 und der EN 13001 verglichen. Dabei die Lasten in den verschiedenen Normen unterschiedlich benannt wurden, werden in Tabelle 7-1 freie Formulierungen verwendet.

Lasten	DIN 15018	EN 13001
Lastfall H / A1		
Eigenlasten f_G	20,65 kN	25,19 kN
Hublast f_{Hub}	10,51 kN	13,1 kN
Kräfte aus Antrieben f_F	4,2 kN	1,02 kN
Horizontalkräfte aus Antrieben f_{H1}	1,71 kN	0,42 kN
Horizontalkräfte aus Antrieben f_{H2}	2,44 kN	0,59 kN
Lastfall HZ / B5		
Eigenlasten f_G	20,65 kN	37,87 kN
Hublast f_{Hub}	10,21 kN	18,72 kN
Schräglauflkraft Y_F	3,64 kN	4,63 kN
Schräglauflkraft Y_1	2,90 kN	2,97 kN
Schräglauflkraft Y_2	0 kN	0 kN
Schräglauflkraft Y_3	0,73 kN	1,66 kN
Schräglauflkraft Y_4	0 kN	0 kN
Lastfall HS2 / C3		
Eigenlasten f_G	20,65 kN	25,19 kN
Kräfte aus Antrieben f_F	4,2 kN	0,84 kN
Horizontalkräfte aus Antrieben f_{H1}	1,71 kN	0,34 kN
Horizontalkräfte aus Antrieben f_{H2}	2,44 kN	0,49 kN
Prüflast f_P	12,34 kN	12,76 kN
Lastfall HS1 / C4		
Eigenlasten f_G	18,77 kN	20,65 kN
Hublast f_{Hub}	9,28 kN	10,2 kN
Pufferstoß f_P	6,6 kN	7,53 kN

Tabelle 7-1 Vergleich der Lasten

Betrachtet man die Lasten in Tabelle 7-1 fällt auf, dass die Wirkung von Hub- und Eigenlasten im Fall der EN 13001 höher sind. Dies kann auf die Teilsicherheitsbeiwerte der Methode der Grenzzustände zurückgeführt werden, welche zusätzlich zu den dynamischen Beiwerten mit den Lasten multipliziert werden.

Die Lasten aus Antrieben sind deutlich geringer als jene der alten Norm. Dies liegt in der Berechnungsmethode begründet. In der DIN 15018 wird die Wirkung durch eine Näherungsformel anhand der Radlasten abgeschätzt. In der neuen Norm ergibt sich die Antriebskraft aus der Beschleunigung des Motors. Damit basieren die Kräfte auf den vorliegenden kinematischen Verhältnissen, wodurch ein genaueres Modell der Realität entsteht.

Der Lastfall B5 stellt den Lastfall mit den höchsten Eigen- und Hublasten dar. Dies liegt neben den Teilsicherheitsbeiwerten an den großen dynamischen Beiwert aus dem Fahren über Unebenheiten. Es zeigt sich, dass durch die neuen Dynamikfaktoren eine differenzierte Fallunterscheidung möglich ist, welche in diesem Fall in erhöhten Lasten resultiert. Der Unterschied in der Größenordnung der Schräglaufräfte ist marginal und auf die Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte zurückzuführen. Man kann somit davon ausgehen, dass das in der Produktnorm eigenführte starre Verfahren jenem der alten Norm entspricht. Im Umkehrschluss haben die Änderungen in der Norm in Bezug auf elastische Effekte von Tragwerken für Brücken- und Portalkräne dieses Typs keine Auswirkungen.

Die Prüflast des Lastfalls C3 ist unverändert, während die Kräfte aus dem Pufferstoß geringfügig größer sind. Letzteres ist auf die genauere Betrachtung der Pufferkennlinie zurückzuführen, wodurch eine genauere Abschätzung der real wirkenden Kräfte möglich ist.

Insgesamt ist die Belastung des Tragwerksmodells in der neuen Norm als höher einzustufen. Durch die zusätzlichen Sicherheits- und Dynamikbeiwerte wird die linke Seite der Sicherheitsnachweisungleichung erhöht. Im Gegenzug wird auf der rechten Seite der Ungleichung ein geringerer Widerstandsbeiwert einberechnet.

Tabelle 7-2 zeigt dies anschaulich anhand der Bauteilgrenzwerte. In jeder Kategorie ist die Bemessungsgrenzspannung deutlich über jener der zulässigen Spannungen.

Bezeichnung	DIN 15018	Bezeichnung	EN 13001
Bauteile			
Lastfall H		Lastfall A	
Zulässige Zugspannung $zul \sigma_z$	$160 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsnormalspannung $f_{Rd\sigma}$	$215 \frac{N}{mm^2}$
Zulässige Druckspannung $zul \sigma_d$	$140 \frac{N}{mm^2}$		
Zulässige Schubspannung $zul \tau$	$92 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsschubspannung $f_{Rd\tau}$	$124 \frac{N}{mm^2}$
Lastfall HZ		Lastfall B	
Zulässige Zugspannung $zul \sigma_z$	$180 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsnormalspannung $f_{Rd\sigma}$	$215 \frac{N}{mm^2}$
Zulässige Druckspannung $zul \sigma_d$	$160 \frac{N}{mm^2}$		
Zulässige Schubspannung $zul \tau$	$104 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsschubspannung $f_{Rd\tau}$	$124 \frac{N}{mm^2}$

Tabelle 7-2 Vergleich der Grenzwerte für Bauteile

Für Schweißnähte, illustriert in Tabelle 7-3, bietet sich ein ähnliches Bild. Einzig die zulässige Schubspannung hat sich marginal verringert. Dies ist jedoch damit zu erklären, dass Schweißnähte bei Schubbelastungen keine Erhöhung des Grenzwertes zulassen, da sonst direkt das Versagen der Schweißverbindung eintritt. Da sich die Betrachtung von Schraubverbindungen von Spannungen zu Kräften verändert hat, macht ein Vergleich keinen Sinn. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine ähnliches Sicherheitskonzept verfolgt wurde.

Bezeichnung	DIN 15018	Bezeichnung	EN 13001
Schweißverbindungen			
Lastfall H		Lastfall A	
Zulässige Zugspannung $zul \sigma_z$	$113 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsnormalspannung $f_{wRd\sigma}$	$184 \frac{N}{mm^2}$
Zulässige Druckspannung $zul \sigma_d$	$130 \frac{N}{mm^2}$		
Zulässige Schubspannung $zul \tau$	$113 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsschubspannung $f_{wRd\tau}$	$123 \frac{N}{mm^2}$
Lastfall HZ		Lastfall B	
Zulässige Zugspannung $zul \sigma_z$	$127 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsnormalspannung $f_{wRd\sigma}$	$184 \frac{N}{mm^2}$
Zulässige Druckspannung $zul \sigma_d$	$145 \frac{N}{mm^2}$		
Zulässige Schubspannung $zul \tau$	$127 \frac{N}{mm^2}$	Bemessungsschubspannung $f_{wRd\tau}$	$123 \frac{N}{mm^2}$

Tabelle 7-3 Vergleich der Grenzwerte für Schweißnähte

Ein Vergleich wie bei den statischen Grenzwerten ist auf Grund des geänderten Nachweiskonzepts für den Betriebsfestigkeitsnachweis nicht möglich. Um jedoch ein Gefühl für die Größenordnung zu bekommen, werden hier die Sicherheiten, also der Quotient aus Grenzwert und vorliegendem Wert beispielhaft verglichen.

Beim Brückenträger, dem entsprechend der Berechnung einzigen höheren belasteten Teil, ergeben sich die Sicherheiten zu:

$$S_{Br_DIN15018} = 17,76$$

$$S_{Br_DIN13001} = 12,89$$

Das neue Nachweisverfahren hat basierend auf den Ergebnissen eine konservativere Lebensdauerabschätzung der Bauteile zur Folge.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die europäische Kranrichtlinie EN 13001-1 unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von ihrem Vorgänger, der DIN 15018. Die Methode der Grenzzustände bietet die Möglichkeit, deutlich differenziertere Betrachtungen der Kranbelastung anzustellen. Die zusätzlichen Dynamikbeiwerte erlauben es, kinematische Gegebenheiten genauer in das Kranmodell einzubinden. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch beim Zeitfestigkeitsnachweise verfolgt. Zum einen stellt die Verwendung der Schadenshypothese nach Palmgren und Miner eine Modernisierung im Einklang mit den Eurocode dar. Zum anderen wurden die Kerbfälle deutlich feiner gegliedert, um besser auf einzelne konstruktive Situationen eingehen zu können.

Diese veränderte, deutlich detailliertere Vorgehensweise macht den Nachweis jedoch auch deutlich aufwendiger. Dies spiegelt sich auch im Umfang der Norm wider, welcher nun ein Vielfaches der alten Norm beträgt. Folglich ist an eine regelmäßige Anwendung der Norm nur in Kombination mit einem weitgehend automatisierten Berechnungsprozess zu denken, wodurch die Notwendigkeit für diese Arbeit gegeben ist.

Abschließend stellt sich die Frage inwiefern die EN 13001 den Kranbau beeinflusst. Für eine vollwertige Antwort muss zusätzlich zu den Ergebnissen der Berechnung, noch ein Schlüsselvorteil der neuen Richtlinie berücksichtigt werden: Die zulässige FEM-Simulation. Im Vergleich zur alten Norm ist neben einer manuellen Berechnung, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurde, auch eine Abschätzung der vorliegenden Belastungen auf Basis von Finite Elemente Simulationen (FEM) zulässig, sofern diese sich nachweislich als zuverlässig erwiesen haben. Dadurch gelingt es dem CEN/TC 147, ein innovationshemmendes Element aus dem Normenkatalog zu entfernen und bietet Ingenieuren die Möglichkeit, ihren fachlichen Wissensvorsprung in einen kompetitiven Marktvorteil umzuwandeln. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich ein solcher Effekt erst nach einer Übergangsphase einstellen wird, welche durch Automatisierungslösungen geprägt sein wird.

Diese Arbeit bietet mit einer, auf Transparenz und Flexibilität ausgelegten, Automatisierungslösung für den Festigkeitsnachweis eines Einträgerbrückenkrans den Grundstein für eine Umstellung von der DIN 15018 auf die EN 13001. Bei der Erstellung des Programmes wurden diverse Themengebiete identifiziert, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollumfänglich behandelt werden konnten und sich für weitere Untersuchungen anbieten:

1. Normenteile

Das Normengerüst der CEN/TC 147 sieht vor, dass die ersten zwei Teile der EN 13001 als Grundlage für das Unterkapitel des dritten Teils gelten. Folglich müssen ähnliche Projekte für die anderen Teile der EN 13001-3 durchgeführt werden, um eine ganzheitliche Lösung für einen etwaigen Nutzer anbieten zu können.

2. Krantypen

Um den Umfang in einem angemessenen Rahmen zu halten, wurde diese Arbeit auf Brückenkräne beschränkt. Grundsätzlich sollte aber auch eine Anwendung für andere

Krantypen geprüft werden. Die Produktnormen der EN sollten diesbezüglich Anhaltspunkte liefern können.

3. Datenbanken

Um die Automatisierung des Tools weiter voranzutreiben, können Datenbanken für normierte Werkstoffe oder Bauteile angelegt werden. Dies kann je nach Umsetzung den Berechnungs- und Designprozess effizienter machen und eine erhebliche Zeitersparnis darstellen.

4. Optimierungsschleifen

Das Tool ist in seiner jetzigen Form auf die Nachweisführung für Einträgerbrückenkrane zugeschnitten. Aussagen über die Sicherheit werden nicht getroffen. Die Implementierung von Iterationsschleifen könnte daher für den Konstrukteur einen Mehrwert darstellen, da somit der optimale Träger beziehungsweise das optimale Verbindungselement ermittelt werden kann.

5. Schnittstellen

In der aktuellen Form werden die Eingaben für die Festigkeitsberechnung in ein externes Statikprogramm übertragen. Die Belastungen werden wiederum, auch manuell, in das Tool überführt. Eine Automatisierung dieses Prozesses wäre eine logische Weiterentwicklung des Berechnungsprogrammes. Dafür sind entsprechende Schnittstelle für den Datentransfer zwischen den Programmen zu schaffen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] K. Pokorny, *Current Status of Standardization CEN/TC 147*, NAM, 2018
- [2] European Committee for Standardization, https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:29:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:6129,22&cs=1D1FC8771E26B5A3C374688143513E661 (abgerufen am 12.2.2020)
- [3] G. Wagner, J. Scholten, und H. Haensel, *Neue Möglichkeiten im Festigkeitsnachweis-Die zukünftige Krannorm EN 13001*, 11. Kranfachtagung (Krane – Einsatzverfahren und Entwicklungstendenzen), Institut für Maschinenelement und Fördertechnik, Bochum, 2003
- [4] DIN EN 13001-2:2014, *Kransicherheit - Konstruktion allgemein - Teil 2: Lasteinwirkungen* (EN 13001-2:2014)
- [5] DIN EN 13001-1:2015, *Krane - Konstruktion allgemein - Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen* (EN 13001-1:2015)
- [6] A. Dörnhöfer, *Betriebsfestigkeitsanalyse elektrifizierter Fahrzeuge*, Springer Nature, 2019, S. 7–37
- [7] DIN EN 13001-3-1:2012, *Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken* (EN 13001-3-1:2012)
- [8] DIN EN 15011:2011, *Krane - Brücken- und Portalkrane* (EN 15011:2011)
- [9] VDI 3573:2018: *Arbeitsgeschwindigkeiten von schienengebunden Kranen* (VDI 3573:2018)
- [10] DIN 15018-1:1984, *Grundsätze für Stahltragwerke - Berechnung* (DIN 15018:1984)

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Struktur des CEN/TC 147 [3]	2
Abbildung 4-1 Massenverteilungsklasse [4].....	8
Abbildung 4-2 Methode der zulässigen Spannungen [5].....	8
Abbildung 4-3 Methode der Grenzzustände [5]	9
Abbildung 4-4 Zyklische Belastung [6].....	9
Abbildung 4-5 Wöhlerlinie [6].....	10
Abbildung 4-6 Lineare Schadensakkumulation [6]	11
Abbildung 4-7 Lastkombinationen [4].....	13
Abbildung 4-8 Wöhlerlinie bei Betriebsfestigkeitsnachweis [7].....	15
Abbildung 4-9 Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 15018-1 [10]	16
Abbildung 4-10 Dynamikbeiwerte [3]	18
Abbildung 4-11 Liste der Produktnormen [5].....	18
Abbildung 5-1 Blockschaltbild des Berechnungsprogrammes.....	19
Abbildung 5-2 Beispiel einer READEXCEL/match Struktur.....	21
Abbildung 6-1 Technische Zeichnung eines Werkstattkran	22
Abbildung 6-2 Berechnung des Beiwertes φ_1 im Berechnungsprogramm	25
Abbildung 6-3 φ_2 Modell [4]	25
Abbildung 6-4 φ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von β_2 [4]	26
Abbildung 6-5 φ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von vh [4].....	27
Abbildung 6-6 φ_2 Berechnung gemäß EN 13001-2 Ermittlung von φ_2, min [4].....	27
Abbildung 6-7 Elastisches Modell eines Brückenkrans [8].....	28
Abbildung 6-8 Angabe für die Berechnung von φ_2	29
Abbildung 6-9 Kurvendiskussion zur Ermittlung von φ_2	29
Abbildung 6-10 Abwerfen der Hublast [4]	30
Abbildung 6-11 Berechnung φ_3 im Berechnungsprogramm	31
Abbildung 6-12 Einmassen-Feder-Modell [4].....	31
Abbildung 6-13 Unterscheidung zwischen Stufen und Lücken nach EN 13001-2 [4]	32
Abbildung 6-14 Schwingungsverhalten des Einmassen-Feder-Modells [4].....	32
Abbildung 6-15 Berechnung von φ_4 im Berechnungsprogramm.....	33
Abbildung 6-16 Ermittlung von φ_A nach EN 15011 [8].....	34
Abbildung 6-17 Ermittlung von φ_p nach EN 15011 [8]	34
Abbildung 6-18 Berechnung von φ_5 im Berechnungsprogramm.....	34
Abbildung 6-19 Federkennlinien [4]	35
Abbildung 6-20 Curve-Fit Programm	36
Abbildung 6-21 Berechnung φ_7 Tool	37
Abbildung 6-22 Kräfte aus Antrieben [4]	38
Abbildung 6-23 Schräglaufwinkel Parameter [8]	40
Abbildung 6-24 Schräglaufkräfte [8].....	40
Abbildung 6-25 Berechnung Schräglaufkräfte Tool.....	41
Abbildung 6-26 Auswahl des Risikobeiwertes nach EN 13001-2 [4]	43
Abbildung 6-27 Programmeingaben für den Lastfall B5.....	44

Abbildung 6-28 Berechnung Bauteilgrenzwerte Tool	46
Abbildung 6-29 Schraubenwerkstoffkennwerte nach EN 13001-3-1 [7]	46
Abbildung 6-30 Schub- und Auflagerverbindungen [7].....	48
Abbildung 6-31 Angaben für die Berechnung der Grenzwerte der Schraubverbindungen	50
Abbildung 6-32 Grenzwerte von Schraubenverbindungen.....	50
Abbildung 6-33 Auswahl der Schweißnahtkennwerte [7]	51
Abbildung 6-34 Grenzwert Schweißnaht Tool.....	52
Abbildung 6-35 Spannungskollektiv [3].....	53
Abbildung 6-36 Beispielhafter Kerbfall entnommen aus dem EN 13001-3-1 Anhang D [7] ...	53
Abbildung 6-37 Definition Wöhlerlinie	54
Abbildung 6-38 Statischer Festigkeitsnachweis	55
Abbildung 6-39 Betriebsfestigkeitsnachweis.....	56

11 Anhang A: Nachweisführung mittels DIN 15018-1

DIN 15018 - 1
Belastungen für RSTAB

Eigenlasten

$$m_{Ka} := 41 \text{ kg}$$

$$F_{Ka} := m_{Ka} \cdot g = 402.073 \text{ N}$$

Hublasten

$$P := 946 \text{ kg}$$

$$F_P := P \cdot g = (9.277 \cdot 10^3) \text{ N}$$

Brückenträgermasse

$$m_{Br} := 112.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 8 \cdot \text{m} = 896.8 \text{ kg}$$

Kopfträgermasse

$$m_{Ko} := 74.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 2.5 \text{ m} = 186.25 \text{ kg}$$

Gesamtlast

$$m_{ges} := 2.86 \cdot 10^3 \text{ kg} \quad F_{Kr} := g \cdot (m_{ges} - P) = 18.77 \text{ kN}$$

Maximal ausgelenkte Katzpositon

$$l_A := 0.45 \text{ m}$$

Beiwerte

Eigenlastbeiwert

$$\phi := 1.1$$

$$F_{Kr} \cdot \phi = 20.647 \text{ kN}$$

DIN 15018-1 Tabelle 1 für $v < 90 \text{ m/min}$

Hublastbeiwert

$$v_H := 5 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

DIN 15018-1 Tabelle 2 für H3 (aus Tabelle 23)

$$\psi := 1.1 + 0.0066 \cdot v_H \cdot \frac{\text{min}}{\text{m}} = 1.133$$

$$F_P \cdot \psi = 10.511 \text{ kN}$$

Massenkräfte aus Antrieben

$$R_{\min,1} := 7 \text{ kN}$$

$$R_{\min,2} := 7 \text{ kN}$$

$$l_{ges} := 6.3 \text{ m}$$

$$K_r := 1.5 \cdot 0.2 \cdot (R_{\min_1} + R_{\min_2}) = (4.2 \cdot 10^3) \text{ N}$$

$$a := 1.9 \text{ m}$$

$$l_s := 1.88 \text{ m}$$

$$H_{2,S} := \frac{K_r \cdot l_s}{\left(1 + \frac{l_{ges} - l_s}{l_{ges}}\right) \cdot a} = (2.442 \cdot 10^3) \text{ N}$$

$$H_{1,S} := \frac{l_{ges} - l_s}{l_{ges}} \cdot H_{2,S} = (1.713 \cdot 10^3) \text{ N}$$

Kräfte aus Schräglauf

$$n := 2 \quad m_L := 0 \quad s_g := 16 \text{ mm} \quad b_n := 45 \text{ mm}$$

$$\alpha_F := 0.75 \cdot \frac{s_g}{a} = 0.006$$

$$\alpha_0 := 0.001$$

$$\alpha_v := 0.03 \cdot \frac{b_n}{a} = 7.105 \cdot 10^{-4}$$

$$\alpha := (\alpha_F + \alpha_v + \alpha_0) \cdot 1000 = 8.026$$

$$f := 0.3 \cdot (1 - e^{-0.25 \cdot \alpha}) = 0.26$$

$$R_{ges} := (4 \cdot R_{\min_1}) = 28 \text{ kN}$$

$$\xi := \frac{\left(l_s + \frac{l_{ges}}{2}\right)}{l_{ges}} = 0.798$$

$$\xi' := 1 - \xi = 0.202$$

$$e_1 := 0 \text{ mm}$$

$$e_2 := 1900 \text{ mm}$$

$$h := \frac{m_L \cdot \xi \cdot \xi' \cdot l_{ges}^2 + (e_1^2 + e_2^2)}{(e_1 + e_2)} = 1.9 \text{ m}$$

$$\lambda := 1 - \frac{(e_1 + e_2)}{n \cdot h} = 0.5$$

$$\lambda_{11y} := \frac{\xi'}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) = 0.399 \quad \lambda_{21y} := \frac{\xi}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_1}{h}\right) = 0.101$$

$$\lambda_{12y} := \frac{\xi'}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_2}{h}\right) = 0 \quad \lambda_{22y} := \frac{\xi}{n} \cdot \left(1 - \frac{e_2}{h}\right) = 0$$

$$S := \lambda \cdot f \cdot R_{ges} = 3.635 \text{ kN}$$

$$X_{11y} := \lambda_{11y} \cdot f \cdot R_{ges} = 2.902 \text{ kN}$$

$$X_{12y} := \lambda_{12y} \cdot f \cdot R_{ges} = 0 \text{ N}$$

$$X_{21y} := \lambda_{21y} \cdot f \cdot R_{ges} = 732.834 \text{ N}$$

$$X_{22y} := \lambda_{22y} \cdot f \cdot R_{ges} = 0 \text{ N}$$

$$X_{11y} + X_{12y} + X_{21y} + X_{22y} = (3.635 \cdot 10^3) \text{ N}$$

Pufferkräfte

$$F_p := 2 \cdot 6.6 \text{ kN}$$

Aus Angabe

$$\frac{F_p}{2} = 6.6 \text{ kN}$$

Prüfkraft

$$F_{Pruf} := 1.33 \cdot F_p = 12.339 \text{ kN}$$

Festigkeitsberechnung Lastfall H

Werkstoff S235

Streckgrenze

$$\sigma_S := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Elastizitätsmodul

$$E_{Mat} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Schubmodul

$$G_{Mat} := 81000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Zug- & Vergleichsspannung

$$\sigma_{z_zul} := 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Druckspannung

$$\sigma_{d_zul} := 140 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{zul} := 92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Allgemeiner Nachweis Brückenträger

Spannungswerte aus RStab

$$\sigma_{d_Br} := 3.08 \frac{kN}{cm^2} = 30.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Br} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Br} := \sigma_{d_Br} = 30.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Br} := 0.64 \frac{kN}{cm^2} = 6.4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Br} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Br} := \sqrt{\sigma_{d_Br}^2 + 3 \cdot \tau_{Br}^2} = 32.734 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Kopfträger

$$\sigma_{d_Ko} := 1.35 \frac{kN}{cm^2} = 13.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Ko} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Ko} := 1.28 \frac{kN}{cm^2} = 12.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Ko} := 0.19 \frac{kN}{cm^2} = 1.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ko} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Ko} := \sqrt{\sigma_{d_Ko}^2 + 3 \cdot \tau_{Ko}^2} = 13.895 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schweißverbindung

Zulässige Zugspannung für
Querbeanspruchung

$$\sigma_{wz_zul} := 113 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung für
Querbeanspruchung

$$\sigma_{wd_zul} := 130 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{w_zul} := 113 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Vergleichsspannung

$$\sigma_{wV_zul} := 160 \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannung erzeugende Kraft

$$N_{Naht} := 4.2 \text{ kN}$$

Zugspannung erzeugende Kraft

$$V_{z_Naht} := 15.58 \text{ kN}$$

Biegespannung erzeugendes Moment

$$M_{y_Naht} := 8.38 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Gewählte Schweißnaht

$$a := 5 \text{ mm}$$

Schweißnaht Länge

$$l_{Naht} := 300 \text{ mm}$$

Schweißnaht Breite

$$b_{Naht} := 200 \text{ mm}$$

$$A_{a_v} := b_{Naht} \cdot a = (1 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{a_h} := l_{Naht} \cdot a = (1.5 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$I_{y_Naht} := 2 \cdot \frac{a \cdot l_{Naht}^3}{12} + 2 \cdot \left(\frac{b_{Naht} \cdot a^3}{12} + \left(\frac{l_{Naht}}{2} + \frac{a}{2} \right)^2 \cdot A_{a_v} \right) = (6.902 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^4$$

$$W_{y_Naht} := \frac{I_{y_Naht}}{\left(\frac{l_{Naht}}{2} + \frac{a}{2} \right)} = (4.526 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$A_a := 2 \cdot A_{a_v} + 2 \cdot A_{a_h} = (5 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{z_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} - \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 15.401 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{z_Naht} \leq \sigma_{wz_zul} = 1$$

$$\sigma_{d_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} + \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 21.633 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{d_Naht} \leq \sigma_{wd_zul} = 1$$

$$\tau_{Naht} := \frac{N_{Naht}}{A_{a_h}} + \frac{N_{Naht}}{A_{a_v}} = 7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{Naht} \leq \tau_{w_zul} = 1$$

$$\sigma_{zd_Naht} := \frac{\sigma_{z_zul}}{\sigma_{wz_zul}} \cdot \sigma_{d_Naht} = 30.63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} := \sqrt{\sigma_{zd_Naht}^2 + 2 \cdot \tau_{Naht}^2} = 32.19 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} \leq \sigma_{wV_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schraubenverbindung

Zulässige Scherspannung

$$\tau_{a_zul} := 70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Leibungsspannung

$$\sigma_{l_zul} := 160 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zulässige Zugspannung

$$\sigma_{z_zul} := 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Querkraft Schraubenverbindung	$F_Q := 4.2 \text{ kN}$
Zugkraft Schraubenverbindung	$V_z := 15.58 \text{ kN}$
Anzahl der Schrauben	$n := 4$
Schraubennennendurchmesser	$d_p := 20 \text{ mm}$
Schraubenquerschnitt	$A_p := \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} = 314.159 \text{ mm}^2$
Schnitte	$m_s := 1$
Kleinste tragende Länge	$s := 10 \text{ mm}$
Scherspannung	$\tau_a := \frac{F_Q}{n \cdot m_s \cdot A_p} = 3.342 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
	$\tau_a \leq \tau_{a_zul} = 1$
Lochleibung	$\sigma_l := \frac{F_Q}{d_p \cdot s \cdot n} = 5.25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
	$\sigma_l \leq \sigma_{l_zul} = 1$
Zugkraft	$\sigma_z := \frac{V_z}{n \cdot A_p} = 12.398 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
	$\sigma_z \leq \sigma_{z_zul} = 1$
Festigkeitsberechnung Lastfall HZ	
Werkstoff S235	
Streckgrenze	$\sigma_S := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Elastizitätsmodul	$E_{Mat} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Schubmodul	$G_{Mat} := 81000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Zulässige Zug- & Vergleichsspannung

$$\sigma_{z_zul} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung

$$\sigma_{d_zul} := 160 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{zul} := 104 \frac{N}{mm^2}$$

Allgemeiner Nachweis Brückenträger

Spannungswerte aus RStab

$$\sigma_{d_Br} := 3.03 \frac{kN}{cm^2} = 30.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Br} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Br} := \sigma_{d_Br} = 30.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Br} := 0.63 \frac{kN}{cm^2} = 6.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Br} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Br} := \sqrt{\sigma_{d_Br}^2 + 3 \cdot \tau_{Br}^2} = 32.205 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Kopfträger

$$\sigma_{d_Ko} := 1.33 \frac{kN}{cm^2} = 13.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Ko} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Ko} := 1.26 \frac{kN}{cm^2} = 12.6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Ko} := 0.19 \frac{kN}{cm^2} = 1.9 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ko} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Ko} := \sqrt{\sigma_{d_Ko}^2 + 3 \cdot \tau_{Ko}^2} = 13.701 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schweißverbindung

Zulässige Zugspannung für Querbeanspruchung

$$\sigma_{wz_zul} := 127 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung für Querbeanspruchung

$$\sigma_{wd_zul} := 145 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{w_zul} := 127 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Vergleichsspannung

$$\sigma_{wV_zul} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannung erzeugende Kraft

$$N_{Naht} := 4.2 \text{ kN}$$

Zugspannung erzeugende Kraft

$$V_{z_Naht} := 15.32 \text{ kN}$$

Biegespannung erzeugendes Moment

$$M_{y_Naht} := 8.26 \text{ kN} \cdot m$$

$$\sigma_{z_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} - \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 15.187 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Naht} \leq \sigma_{wz_zul} = 1$$

$$\sigma_{d_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} + \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 21.315 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Naht} \leq \sigma_{wd_zul} = 1$$

$$\tau_{Naht} := \frac{N_{Naht}}{A_{a_h}} + \frac{N_{Naht}}{A_{a_v}} = 7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Naht} \leq \tau_{w_zul} = 1$$

$$\sigma_{zd_Naht} := \frac{\sigma_{z_zul}}{\sigma_{wz_zul}} \cdot \sigma_{d_Naht} = 30.211 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} := \sqrt{\sigma_{zd_Naht}^2 + 2 \cdot \tau_{Naht}^2} = 31.791 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} \leq \sigma_{wV_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schraubenverbindung

Zulässige Scherspannung

$$\tau_{a_zul} := 80 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Leibungsspannung

$$\sigma_{l_zul} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Zugspannung

$$\sigma_{z_zul} := 110 \frac{N}{mm^2}$$

Querkraft
Schraubenverbindung

$$F_Q := 4.2 \text{ kN}$$

Zugkraft
Schraubenverbindung

$$V_z := 15.32 \text{ kN}$$

Scherspannung

$$\tau_a := \frac{F_Q}{n \cdot m_s \cdot A_p} = 3.342 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_a \leq \tau_{a,zul} = 1$$

Lochleibung

$$\sigma_l := \frac{F_Q}{d_p \cdot s \cdot n} = 5.25 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_l \leq \sigma_{l,zul} = 1$$

Zugkraft

$$\sigma_z := \frac{V_z}{n \cdot A_p} = 12.191 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_z \leq \sigma_{z,zul} = 1$$

Festigkeitsberechnung Lastfall HS1

Werkstoff S235

Streckgrenze

$$\sigma_S := 240 \frac{N}{mm^2}$$

Elastizitätsmodul

$$E_{Mat} := 210000 \frac{N}{mm^2}$$

Schubmodul

$$G_{Mat} := 81000 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Zug- & Vergleichsspannung

$$\sigma_{z,zul} := 1.1 \cdot 180 \frac{N}{mm^2} = 198 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung

$$\sigma_{d,zul} := 1.1 \cdot 160 \frac{N}{mm^2} = 176 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{zul} := 1.1 \cdot 104 \frac{N}{mm^2} = 114.4 \frac{N}{mm^2}$$

Allgemeiner Nachweis Brückenträger

Spannungswerte aus RStab

$$\sigma_{d,Br} := 2.75 \frac{kN}{cm^2} = 27.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d,Br} \leq \sigma_{d,zul} = 1$$

$$\sigma_{z,Br} := \sigma_{d,Br} = 27.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z,Br} \leq \sigma_{z,zul} = 1$$

$$\tau_{Br} := 0.57 \frac{kN}{cm^2} = 5.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Br} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_{Br}} := \sqrt{\sigma_{d_{Br}}^2 + 3 \cdot \tau_{Br}^2} = 29.218 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_{Br}} \leq \sigma_{z_{zul}} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Kopfträger

$$\sigma_{d_{Ko}} := 1.12 \frac{kN}{cm^2} = 11.2 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_{Ko}} \leq \sigma_{d_{zul}} = 1$$

$$\sigma_{z_{Ko}} := 1.23 \frac{kN}{cm^2} = 12.3 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_{Ko}} \leq \sigma_{z_{zul}} = 1$$

$$\tau_{Ko} := 0.17 \frac{kN}{cm^2} = 1.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ko} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_{Ko}} := \sqrt{\sigma_{d_{Ko}}^2 + 3 \cdot \tau_{Ko}^2} = 11.581 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_{Ko}} \leq \sigma_{z_{zul}} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schweißverbindung

Zulässige Zugspannung für
Querbeanspruchung

$$\sigma_{wz_{zul}} := 1.1 \cdot 127 \frac{N}{mm^2} = 139.7 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung für
Querbeanspruchung

$$\sigma_{wd_{zul}} := 1.1 \cdot 145 \frac{N}{mm^2} = 159.5 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{w_{zul}} := 1.1 \cdot 127 \frac{N}{mm^2} = 139.7 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Vergleichsspannung

$$\sigma_{wV_{zul}} := 1.1 \cdot 180 \frac{N}{mm^2} = 198 \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannung erzeugende Kraft

$$N_{Naht} := 6.6 \text{ kN}$$

Zugspannung erzeugende Kraft

$$V_{z_{Naht}} := 13.93 \text{ kN}$$

Biegespannung erzeugendes Moment

$$M_{y_{Naht}} := 7.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{z_{Naht}} := \frac{M_{y_{Naht}}}{W_{y_{Naht}}} - \frac{V_{z_{Naht}}}{A_a} = 13.786 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_{Naht}} \leq \sigma_{wz_{zul}} = 1$$

$$\sigma_{d_{Naht}} := \frac{M_{y_{Naht}}}{W_{y_{Naht}}} + \frac{V_{z_{Naht}}}{A_a} = 19.358 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_{Naht}} \leq \sigma_{wd_{zul}} = 1$$

$$\tau_{Naht} := \frac{N_{Naht}}{A_{a_h}} + \frac{N_{Naht}}{A_{a_v}} = 11 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Naht} \leq \tau_{w_{zul}} = 1$$

$$\sigma_{zd_Naht} := \frac{\sigma_{z_zul}}{\sigma_{wz_zul}} \cdot \sigma_{d_Naht} = 27.437 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} := \sqrt{\sigma_{zd_Naht}^2 + 2 \cdot \tau_{Naht}^2} = 31.54 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} \leq \sigma_{wV_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schraubenverbindung

Zulässige Scherspannung

$$\tau_{a_zul} := 80 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Leibungsspannung

$$\sigma_{l_zul} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Zugspannung

$$\sigma_{z_zul} := 110 \frac{N}{mm^2}$$

Querkraft
Schraubenverbindung

$$F_Q := 6.6 \text{ kN}$$

Zugkraft
Schraubenverbindung

$$V_z := 13.93 \text{ kN}$$

Scherspannung

$$\tau_a := \frac{F_Q}{n \cdot m_s \cdot A_p} = 5.252 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_a \leq \tau_{a_zul} = 1$$

Lochleibung

$$\sigma_l := \frac{F_Q}{d_p \cdot s \cdot n} = 8.25 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_l \leq \sigma_{l_zul} = 1$$

Zugkraft

$$\sigma_z := \frac{V_z}{n \cdot A_p} = 11.085 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_z \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

+

Festigkeitsberechnung Lastfall HS2

Werkstoff S235

Streckgrenze

$$\sigma_S := 240 \frac{N}{mm^2}$$

Elastizitätsmodul

$$E_{Mat} := 210000 \frac{N}{mm^2}$$

Schubmodul

$$G_{Mat} := 81000 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Zug- & Vergleichsspannung

$$\sigma_{z_zul} := 1.1 \cdot 180 \frac{N}{mm^2} = 198 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung

$$\sigma_{d_zul} := 1.1 \cdot 160 \frac{N}{mm^2} = 176 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{zul} := 1.1 \cdot 104 \frac{N}{mm^2} = 114.4 \frac{N}{mm^2}$$

Allgemeiner Nachweis Brückenträger

Spannungswerte aus RStab

$$\sigma_{d_Br} := 1.45 \frac{kN}{cm^2} = 14.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Br} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Br} := \sigma_{d_Br} = 14.5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Br} := 1 \frac{kN}{cm^2} = 10 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Br} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Br} := \sqrt{\sigma_{d_Br}^2 + 3 \cdot \tau_{Br}^2} = 22.589 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Br} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Kopfrträger

$$\sigma_{d_Ko} := 1.48 \frac{kN}{cm^2} = 14.8 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Ko} \leq \sigma_{d_zul} = 1$$

$$\sigma_{z_Ko} := 1.4 \frac{kN}{cm^2} = 14 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

$$\tau_{Ko} := 0.21 \frac{kN}{cm^2} = 2.1 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ko} \leq \tau_{zul} = 1$$

$$\sigma_{V_Ko} := \sqrt{\sigma_{d_Ko}^2 + 3 \cdot \tau_{Ko}^2} = 15.24 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Ko} \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schweißverbindung

Zulässige Zugspannung für Querbeanspruchung

$$\sigma_{wz_zul} := 1.1 \cdot 127 \frac{N}{mm^2} = 139.7 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Druckspannung für Querbeanspruchung

$$\sigma_{wd_zul} := 1.1 \cdot 145 \frac{N}{mm^2} = 159.5 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Schubspannung

$$\tau_{w_zul} := 1.1 \cdot 127 \frac{N}{mm^2} = 139.7 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Vergleichsspannung

$$\sigma_{wV_zul} := 1.1 \cdot 180 \frac{N}{mm^2} = 198 \frac{N}{mm^2}$$

Schubspannung erzeugende Kraft

$$N_{Naht} := 4.2 \text{ kN}$$

Zugspannung erzeugende Kraft

$$V_{z_Naht} := 17.30 \text{ kN}$$

Biegespannung erzeugendes Moment

$$M_{y_Naht} := 9.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{z_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} - \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 16.868 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Naht} \leq \sigma_{wz_zul} = 1$$

$$\sigma_{d_Naht} := \frac{M_{y_Naht}}{W_{y_Naht}} + \frac{V_{z_Naht}}{A_a} = 23.788 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{d_Naht} \leq \sigma_{wd_zul} = 1$$

$$\tau_{Naht} := \frac{N_{Naht}}{A_{a_h}} + \frac{N_{Naht}}{A_{a_v}} = 7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Naht} \leq \tau_{w_zul} = 1$$

$$\sigma_{zd_Naht} := \frac{\sigma_{z_zul}}{\sigma_{wz_zul}} \cdot \sigma_{d_Naht} = 33.716 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} := \sqrt{\sigma_{zd_Naht}^2 + 2 \cdot \tau_{Naht}^2} = 35.139 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{V_Naht} \leq \sigma_{wV_zul} = 1$$

Allgemeiner Nachweis Schraubenverbindung

Zulässige Scherspannung

$$\tau_{a_zul} := 80 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Leibungsspannung

$$\sigma_{l_zul} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Zulässige Zugspannung

$$\sigma_{z_zul} := 110 \frac{N}{mm^2}$$

Querkraft
Schraubenverbindung

$$F_Q := 4.2 \text{ kN}$$

Zugkraft
Schraubenverbindung

$$V_z := 17.3 \text{ kN}$$

Scherspannung

$$\tau_a := \frac{F_Q}{n \cdot m_s \cdot A_p} = 3.342 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_a \leq \tau_{a_zul} = 1$$

Lochleibung

$$\sigma_l := \frac{F_Q}{d_p \cdot s \cdot n} = 5.25 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_l \leq \sigma_{l_zul} = 1$$

Zugkraft

$$\sigma_z := \frac{V_z}{n \cdot A_p} = 13.767 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_z \leq \sigma_{z_zul} = 1$$

Dauerfestigkeitsnachweis

Lastspiele

$$N_t := 5 \cdot 10^5$$

Die Anzahl der Lastspiele entspricht N2. Mit dem Spannungskollektiv S2 ergibt daraus die Beanspruchungsgruppe zu B4

Brückenträger entspricht Kerbfall W0 (W01)

Schweißnaht entspricht Kerbfall K4 (444)

$$\sigma_{D_zul} := 169.7 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Br_min} := 0.77 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\sigma_{Br_max} := 8.59 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\tau_{Br_max} := 1.36 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\tau_{Br_min} := 0.19 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\chi_{\sigma_Br} := \frac{\sigma_{Br_min}}{\sigma_{Br_max}} = 0.09$$

$$\chi_{\tau_Br} := \frac{\tau_{Br_min}}{\tau_{Br_max}} = 0.14$$

$$\sigma_{Dz_zul_0} := \frac{5}{3} \cdot \sigma_{D_zul} = 282.833 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Bz} := 180 \frac{N}{mm^2}$$

Grenzwerte für Bauteile

$$\sigma_{Dz_zul} := \frac{\sigma_{Dz_zul_0}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_{Dz_zul_0}}{0.75 \cdot \sigma_{Bz}}\right) \cdot \chi_{\sigma_Br}} = 257.552 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{z_Br} \leq \sigma_{Dz_zul} = 1$$

$$\tau_{D_Br} := \frac{\sigma_{Dz_zul}}{\sqrt{3}} = 148.698 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Br} \leq \tau_{D_Br} = 1$$

+

$$\left(\frac{\sigma_{z_Br}}{\sigma_{Dz_zul}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{Br}}{\tau_{D_Br}}\right)^2 \leq 1.1 = 1$$

Schweißnaht

$$\sigma_{wD_zul} := 54 \frac{N}{mm^2}$$

$$N_{w_max} := -1.94 \text{ kN}$$

$$V_{z_w_max} := -75.72 \text{ kN}$$

$$M_{y_w_max} := 38.25 \text{ kN} \cdot m$$

$$N_{w_min} := -1.94 \text{ kN}$$

$$V_{z_w_min} := -7.13 \text{ kN}$$

$$M_{y_w_min} := 3.95 \text{ kN} \cdot m$$

$$\sigma_{wz_min} := \frac{M_{y_w_min}}{W_{y_Naht}} + \frac{V_{z_w_min}}{A_a} = 7.302 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wd_min} := \frac{M_{y_w_min}}{W_{y_Naht}} - \frac{V_{z_w_min}}{A_a} = 10.154 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{w_min} := \frac{N_{w_min}}{A_{a_h}} + \frac{N_{w_min}}{A_{a_v}} = -3.233 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wz_max} := \frac{M_{y_w_max}}{W_{y_Naht}} + \frac{V_{z_w_max}}{A_a} = 69.374 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wd_max} := \frac{M_{y_w_max}}{W_{y_Naht}} - \frac{V_{z_w_max}}{A_a} = 99.662 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{w_max} := \frac{N_{w_max}}{A_{a_h}} + \frac{N_{w_max}}{A_{a_v}} = -3.233 \frac{N}{mm^2}$$

$$\chi_{wd} := \frac{\sigma_{wd_min}}{\sigma_{wd_max}} = 0.102$$

$$\chi_{wz} := \frac{\sigma_{wz_min}}{\sigma_{wz_max}} = 0.105$$

$$\chi_{w\tau} := \frac{\tau_{w_min}}{\tau_{w_max}} = 1$$

$$\sigma_{wDz_zul_0} := \frac{5}{3} \cdot \sigma_{wD_zul} = 90 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wDd_zul_0} := \frac{2}{1} \cdot \sigma_{wD_zul} = 108 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wB} := 127 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wDz_zul} := \frac{\sigma_{wDz_zul_0}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_{wDz_zul_0}}{0.75 \cdot \sigma_{wB}}\right) \cdot \chi_{wz}} = 90.525 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wz_max} \leq \sigma_{wDz_zul} = 1$$

$$\sigma_{wDd_zul} := \frac{\sigma_{wDd_zul_0}}{1 - \left(1 - \frac{\sigma_{wDd_zul_0}}{0.9 \cdot \sigma_{wB}}\right) \cdot \chi_{wz}} = 108.63 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{wd_max} \leq \sigma_{wDd_zul} = 1$$

$$\tau_{wD} := \frac{\sigma_{wDz_zul}}{\sqrt{2}} = 64.011 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{w_max} \leq \tau_{wD} = 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{wd_max}}{\sigma_{wDd_zul}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{w_max}}{\tau_{wD}}\right)^2 \leq 1.1 = 1$$

Zug auf vorgespannte Schrauben

$$l_k := 10 \text{ mm} + 17.5 \text{ mm} = 27.5 \text{ mm}$$

$$d := 20 \text{ mm}$$

$$v := \frac{l_k}{d} = 1.375$$

$$\Phi := 0.415$$

DIN 15018-1 Bild 12

$$S_1 := 15600 \text{ N}$$

DIN 15018-1 Tabelle 22

$$S_2 := 60850 \text{ N}$$

$$F_{V_zul} := 145600 \text{ N}$$

$$Z_{1_zul} := \frac{S_1}{\Phi} = 37.59 \text{ kN}$$

$$F_Q = (4.2 \cdot 10^3) \text{ N}$$

$$S_R := 1.4$$

$$Z_{2_zul} := \frac{S_2}{\Phi} = 146.627 \text{ kN}$$

$$\mu := 0.3$$

$$F_V := \frac{F_Q \cdot S_R}{\mu \cdot m_s \cdot n} = 4.9 \text{ kN}$$

$$F_V \leq F_{V_zul} = 1$$

$$F_V \leq Z_{1_zul} = 1$$