



33. Internationale Kranfachtagung Magdeburg

KRAN 4.0: Zukunft der Digitalisierung

5. und 6. März 2025



INSTITUT FÜR ENGINEERING
VON PRODUKTEN UND SYSTEMEN

33. Internationale Kranfachtagung 2025
Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

am 5. und 6. März 2025 in Magdeburg

Eine Veranstaltung von:



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Professur für Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Engineering von Produkten und Systemen (IEPS)



IBAF Engineering GmbH

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung
am 5. und 6. März 2025 in Magdeburg

Herausgeber:

André Katterfeld, Klaus Richter, Friedrich Krause, Dagmar Pfeiffer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-948749-51-4

DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/117821>

Alle Rechte vorbehalten.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Lizenz:



© 03/2025 Institut für Engineering von Produkten und Systemen (IEPS)
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>G. Wagner</i>	
Schneller Algorithmus zur Optimierung von Kastenträgern für Brückenkrane unter Beachtung aller Anforderungen der EN 13001 und EN 15011 sowie zusätzlicher Anforderungen	5
<i>C. Seeßelberg, R. Thoß</i>	
Ermüdungsschäden an hochbeanspruchten Kranbahnen im Baubestand: Ursachen und Handlungsoptionen	17
<i>T. Schöneck, I. Maximow</i>	
Anwendung der neuen ISO/DIS 16625:2024 bei der Auslegung und Nachweisführung von Seiltrieben in Kranen und Hebezeugen	31
<i>M. Anders, C. Eiwán</i>	
„Rope Type Factors“ und Seilauswahl in der kommenden ISO 16625 – was steckt dahinter?	49
<i>B. Schulz, T. Foppe</i>	
Sicherheit in der digitalen Ära: Bedeutung und Auswirkung von Cybersecurity für die Kranbranche – Eine Erklärung von NIS2 und CRA	65
<i>L. Mohr</i>	
Smarte Lasermesssysteme für Krananlagen: Präzise multifunktionelle Lasermessanlagen mit Mehrlagen- und Solid-State Messsensorik	77
<i>D. Brunnengräber</i>	
Kollisionsvermeidung zwischen Kranen, Lastaufnahmemitteln und Transportfahrzeugen	93
<i>R. Schmidt, D. Sopauschke, K. Richter</i>	
Sichere 3D-Kranassistenz mit Pro-Kran-Assist	107
<i>A. Meier</i>	
Sichere Kranpositionierung unter rauen Bedingungen	121
<i>K. Geiger et al.</i>	
PSIORI CraneLink: Internet-basierte Kranfernsteuerung mit AR- und AI-Assistenten	137

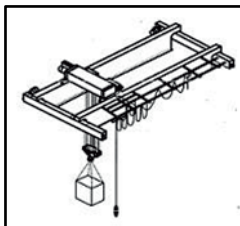
<i>A. Ortner-Pichler, M. Cichocki, C. Landschützer</i> FutureWoodTrans: Entwicklung eines automatisierten Be-, Um- und Entladesystems in der autonomen Forstwirtschaft	151
<i>N. Esser</i> Predictive Maintenance Lösung für Krane – Monitoren von Systemen auf Krane	169
<i>M. Lehnert, H.-M. Wulfmeyer</i> Vorbereitende Instandhaltung von Industriekranen mit Predictive Maintenance	177
<i>R. Maisenhelder, C. Rüttling</i> Effiziente Instandhaltung durch automatisierte Zustandsüberwachung von Krangetrieben	189
<i>A. Goedeke, S. Voigt, C. Kral, R. Träger, Q. Huss</i> Lebensdaueranalyse und messtechnische Überwachung von Kranbahnträgern und Kranen	197

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Schneller Algorithmus zur Optimierung von Kastenträgern für Brückenkranne unter Beachtung aller Anforderungen der EN 13001 und EN 15011 sowie zusätzlicher Anforderungen

Gerhard Wagner



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wagner
Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Maschinenbau
Institut Product and Service Engineering
Baumaschinen- und Fördertechnik
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Schneller Algorithmus zur Optimierung von Kastenträgern für Brückenkranen unter Beachtung aller Anforderungen der EN 13001 und EN 15011 sowie zusätzlicher Anforderungen

Wenn vorhandene Standardlösungen nicht anwendbar sind, müssen die Brückenträger neu dimensioniert werden. Ein simples Computerprogramm, das alle Variablen eines Querschnittes so lange variiert, bis alle Anforderungen erfüllt sind, würde auch auf leistungsstarken Rechnern unzumutbare Rechenzeiten benötigen. Dieser Beitrag stellt einen Algorithmus vor, der in wenigen Sekunden die kostengünstigste Lösung liefert.

1 Tabellenlösungen

Für Standardkranen verfügen Kranbauer meist über Tabellenwerke, die für gegebene Spannweitenbereiche je Tragfähigkeit eine Standard-Katze und eine Kastenträgerbauform vorgeben. Diese Tabellen gelten für bestimmte Klassifizierungen der EN 13001-1 [1] und Grenzwerte der Verformungen und Frequenzen der Biegeschwingungen.

Sobald für ein gegebenes Projekt diese Tabellen nicht mehr anwendbar sind, weil zum Beispiel

- spezielle Kundenwünsche,
- bauliche Gegebenheiten (zum Beispiel Begrenzung der Brückenträgerhöhe),
- größere Hubgeschwindigkeiten,
- mehrere Katzen,
- andere Klassifizierungen

zu berücksichtigen sind, muss der Brückenträger neu dimensioniert werden.

2 Variable der Kastenträgerbauformen

Je Querschnittstyp (Bild 1), der sich aus der Katzbauform (Unterflanschkatze, Winkelkatze, Zweischienekatze) ergibt, sind festzulegen

- Blechdaten (Dicke, Breite, Werkstoffe) für Obergurt, Stege und Untergurt,
- Schottbreite, Schottdicke und Schottabstand,
- Beulsteifen (Anzahl, Position, Abmessungen),
- Katzschienen (Form, Position, Unterbau),
- Schweißnähte.

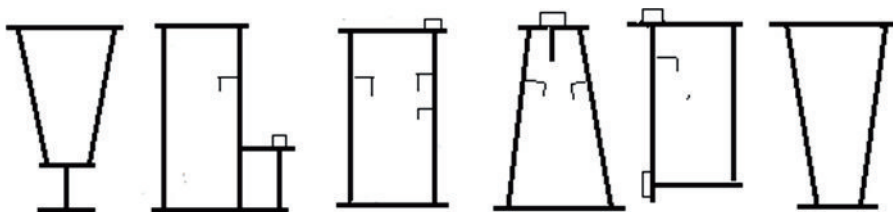


Bild 1: Querschnittstypen

3 Erforderliche Nachweise

Für den gewählten Brückenträger sind für alle relevanten Lasten und Lastfallkombinationen gemäß Tabelle 10 der EN 13001-2 [2] die Nachweise der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit gemäß der DIN EN 13001-3-1 [3] zu erbringen.

Es müssen zunächst für die Brückenmitte die sechs Schnittgrößen (Biegemomente M_y und M_z , Querkräfte Q_y und Q_z , Normalkraft N_x und Torsion T_x) für die vier faktorlosen Grundlastfälle (vertikal: Eigengewicht, Hublast Anfahren Massen; horizontal: Anfahren Massen, Anfahren Last) berechnet werden. Durch Superposition und Multiplikation mit den relevanten Teilsicherheitsbeiwerten und Dynamik-Beiwerten erhält man dann die Schnittgrößen für 7 bis 10 Lastfälle, für die die Nachweise zu führen sind.

Nachweise der statischen Festigkeit:

- Spannungsnachweis in den 4 Eckpunkten der Gurtbleche
- Spannungsnachweis in den 4 Eckpunkten der Stegbleche
- Beulnachweise (5 ohne Beulsteifen, bis zu 10 bei 5 Beulsteifen)
- Schweißnahtnachweise (Steg unter Schiene oder Unterflansch)
- Flanschbiegung bei Unterflanschkatzen

Nachweise der Ermüdungsfestigkeit:

- für ausgewählte Details (zumindest Naht unter Schiene oder Flanschbiegung)

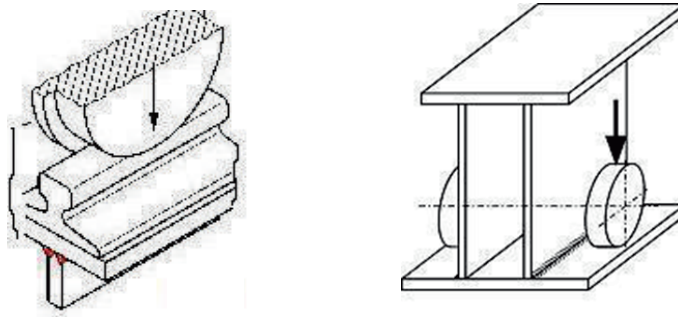


Bild 2: Beispiel: Details für Ermüdungsnachweise

Nachweise der Funktionalität (Verformungen, Durchbiegungen und Frequenzen):

Der hier skizzierte Ablauf der Nachweise ist mit einer Handberechnung nicht machbar. Auch bei Nutzung eines reinen Stabstatikprogramms verbleibt ein großer Aufwand für die Nachweise.

Mit geeigneter Software, wie beispielsweise EN-KRAN [4], werden nach Eingabe der Projektdaten die Berechnungen und Nachweise selbsttätig ausgeführt.

4 Try and error

Werden bei einer Berechnung mit einer Nachweis-Software nicht alle Nachweise erfüllt, so kann man den ausgegebenen Ergebnissen entnehmen, für welche Lastfälle in welchen Querschnittspunkten die Grenzzustände (zulässige Spannungen) überschritten wurden oder welche anderen Anforderungen nicht erfüllt wurden.

Ein Konstrukteur kann dies benutzen, um ausgehend von einer bekannten Tabellenlösung durch Änderungen der Variablen des Querschnittstyps eine Lösung zu finden, die alle Bedingungen erfüllt.

Ein einfaches Beispiel eines Zweiträgerkrans:

Statt der Standardkatze wird eine Katze mit größerer Hubgeschwindigkeit und größerem Eigengewicht (Antriebe, Wartungsplattform) eingesetzt.

Aus der vertikalen Belastung resultieren größere Biegemomente und Torsion sowohl bei den Lastfällen aus Eigengewicht als auch bei den regelmäßigen Lastfällen der Hublast (infolge des Beiwertes Φ_2).

Gleiches gilt für die horizontalen Belastungen.

Ein Rechenlauf mit unverändertem Brückenquerschnitt wird zumindest Überschreitungen von zulässigen Spannungen ergeben.

Der Konstrukteur wird nun eventuell Folgendes versuchen:

- Schrittweise Erhöhung der Stegbleche, bis die Spannungen in den Eckpunkten keine Überschreitung der zulässigen Spannungen ergeben. Aber eventuell tritt nun Beulen der Stegbleche auf.
- Dickeres Stegblech unter der Katzschiene oder Beulsteife oder Werkstoff ändern. Was ist kostengünstiger?
- Versuch, statt der Erhöhung der Stegbleche die Gurticken zu erhöhen. Was ist günstiger?
- Versuch, statt der Gurticken die Gurtbreiten zu erhöhen. Was ist günstiger?

Wenn schließlich bei diesen try and error Rechenläufen eine Lösung gefunden wurde, die alle Nachweise und Anforderungen erfüllt, ist fraglich, ob dies auch die kostengünstigste Lösung bezüglich Materialkosten (Werkstoffqualität und Gewicht) und Fertigungskosten für Beulsteifen abbildet.

Noch problematischer wird dieses Suchen nach einer Lösung, wenn wesentlich stärker von bekannten Ausgangswerten abgewichen wird oder keine vergleichbare Tabellenlösung vorhanden ist.

Es ist also wünschenswert, über ein Tool zu verfügen, das selbsttätig für beliebige Projektdaten im Rahmen von vorgegebenen konstruktiven Richtlinien die kostengünstigste Lösung ermittelt, die alle Anforderungen erfüllt.

5 Ablauf einer Berechnung

Bevor man auf den Gedanken kommt, man könnte doch einfach alle denkbaren Querschnittsformen mit einem leistungsstarken Computer durchrechnen lassen, um die günstigste Lösung zu finden, ist es lohnend, sich den Ablauf einer einzelnen Berechnung anzusehen.

Wenn alle Projektdaten und die Daten der Katze und Kopfträger bekannt sind, läuft die Berechnung (eines Zweiträgerkrans) in folgender Reihenfolge:

- Berechnen der Querschnittswerte Fläche, Flächenträgheitsmomente, Widerstandsmomente, Schwerpunkt, Schubmittelpunkt und Hauptachsenlage der Kranbrückenträger
- Bestimmung der Längen der Kopfträgerabschnitte und der Fehlhebel, die sich aus den Abmessungen der Brückenträger und der Katzspur ergeben

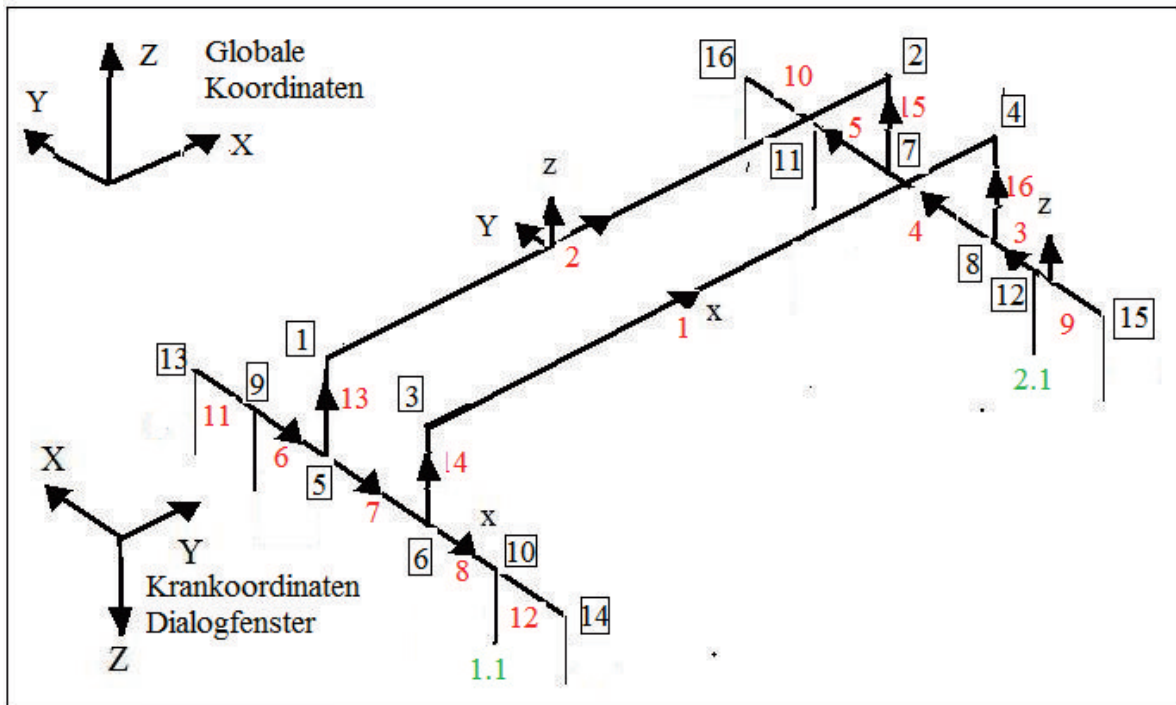


Bild 3: Statisches System

- Errechnen der Element-Steifigkeitsmatrix (12 x 12 Elemente) aller Stäbe für das Formänderungsgrößenverfahren
- Bilden der Gesamtsteifigkeitsmatrix (16 Knoten) und Partitionieren unter Berücksichtigung der Lagerbedingungen und Fehlhebel
- Errechnen der Lastfallmatrix und Lastreduktion aller Grundlastfälle
- Gleichungslösung (Inverse) und Berechnen der Schnittgrößen in Brückenmitte aus den Knotenverschiebungen
- Durchführung aller Nachweise, wie in Kapitel 3 beschrieben

6 Optimierung

6.1 Mögliche Varianten

Um nicht bei jeder Suche eines geeigneten, optimalen Brückenquerschnitts die möglichen zur Verfügung stehenden Werte neu eingeben zu müssen, ist es bequem, generell einen Datenbereich vorzugeben: Beispiel der 12 Variablen eines Zweiträgerkrans:

Tabelle 1: Variable

1	Steghöhe HS	500 mm – 1800 mm	Stufung 25 mm	Anzahl: 52
2	Obergurtbreite BO	300 mm – 600 mm	Stufung 20 mm	Anzahl: 15
3	Untergurtbreite BU	300 mm – 600 mm	Stufung 20 mm	Anzahl: 15
4	Schienenstegdicke TS1	6 mm – 20 mm	Normdicken	Anzahl: 6
5	Stegdicke gegenüber TS2	5 mm – 15 mm	Normdicken	Anzahl: 6
6	Obergurtdicke TO	6 mm – 20 mm	Normdicken	Anzahl: 6
7	Untergurtdicke TU	6 mm – 20 mm	Normdicken	Anzahl: 6
8	Werkstoff Obergurt	S235, S275, S355		Anzahl: 3
9	Werkstoff Untergurt	S235, S275, S355		Anzahl: 3
10	Werkstoff Schienensteg 1	S235, S275, S355		Anzahl: 3
11	Werkstoff Steg gegenüber	S235, S275, S355		Anzahl: 3
12	Beulsteifen	Ohne, Steg1, Steg1 + Steg2,		Anzahl: 9

Hieraus ergeben sich (Multiplikation der Anzahl) 11.053.972.800 Varianten. Selbst wenn man nur einen Werkstoff verwendet, verbleiben 409.406.400 Varianten. Selbst wenn auf einem schnellen Laptop das Durchrechnen einer Variante (gemäß Ablauf unter Kapitel 5) nur 1/1000 Sekunde benötigt, würde diese Berechnung (brute force) mehrere Tage Rechenzeit benötigen und wäre somit nicht praktikabel.

Man müsste also die Anzahl der Varianten weiter einschränken, indem man zum Beispiel die Stufungen vergrößert, Ober- und Untergurtbreite gleichsetzt oder in Abhängigkeit von Spannweite und Tragfähigkeit die Bereiche der Abmessungen und der Beulsteifenkombinationen vorgibt.

6.2 Günstigste Lösung

Das Berechnen aller Varianten wird eine große Anzahl von Lösungen finden, die alle Anforderungen der Nachweise erfüllen. Hieraus ist die kostengünstigste Lösung auszuwählen. Diese ergibt sich aus den reinen Materialkosten (Gewicht der Bleche multipliziert mit den spezifischen Kosten des Werkstoffs) und den spezifischen Fertigungskosten. Letztere kann man einfach berücksichtigen, indem man zu den Materialkosten (je Meter) der Beulsteifen den Lohnaufwand (je Meter) für den Einbau der

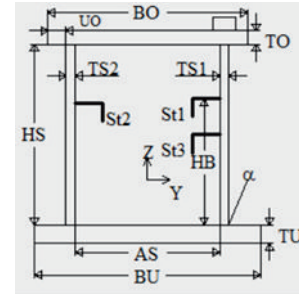
Beulsteifen addiert.

7 Schnelle Optimierung

7.1 Abhängige Variablen

In Abhängigkeit von den zu variierenden Abmessungen BO, BU, HS, TS1, TS2, TO, TU müssen einige andere Abmessungen generiert werden:

- Schottabstand: Beispiel: $AS = BU - 100$
- Steifenposition: Beispiel: HB in % von HS
- Überstand oben: Beispiel: $UO > \text{Schienenbreite} / 2$
- Beulsteifengröße abhängig von Stegdicken, um Mindeststeifigkeit zu erzielen



7.2 Start mit kleinstmöglichen Variablen

Im Iterationsschritt 0 wird eine Berechnung mit den kleinstmöglichen Werten der Variablen durchgeführt.

Für das Beispiel der Tabelle 1 also für $HS = 500 \text{ mm}$, $BO = 300 \text{ mm}$, $BU = 300 \text{ mm}$ und so weiter.

Für diese „Lösung 0“ ergeben sich zwei charakteristische Größen:

- Kosten K_0 (Material + Fertigungskosten)
- Gesamtabweichung von allen Zielgrößen $\sum A_0$ (Summe aller relativen Abweichungen A_i, A_j, \dots die in den folgenden Kapiteln erläutert werden)

Führt man zur Bestimmung der jeweils gewählten Werte einen Variablenindex $\text{varind}(j)$ ein, mit $j = \text{Zeile in Tabelle 1}$, so gilt für diese „Lösung 0“ für alle $\text{varind}(j) = 1$. Der maximale Wert eines Variablenindex ist die Anzahl der Wahlmöglichkeiten, die in der letzten Spalte der Tabelle steht.

7.2.1 Abweichungen von zulässigen Spannungen

Für jeden Querschnittspunkt i ist der Absolutwert der größten Bemessungs-Vergleichsspannung σ_{Sd} (v. Mises) aus allen Lastfällen gemäß [2] zu ermitteln. Mit den Grenzwerten der Bemessungsspannungen f_{Rd} gemäß [3] ergibt sich eine relative Abweichung A_i zu

$$A_i = \max\left(\frac{(|\sigma_{Sd}| - f_{Rd})}{f_{Rd}}, 0.0\right) \quad (1)$$

Wenn die Bemessungs-Vergleichsspannung kleiner ist als der Grenzwert, wird die Abweichung A_i auf null gesetzt.

7.2.2 Abweichungen von zulässigen Beul-Spannungen

Für jedes Beulfeld j ist der Absolutwert der größten Bemessungsspannung $\sigma_{Sd,x}$ aus allen Lastfällen gemäß [2] zu ermitteln. Mit den Grenzwerten der Bemessungsspannung $f_{b,Rd,x}$

gemäß [3] ergibt sich eine relative Abweichung A_j zu

$$A_j = \max\left(\frac{(|\sigma_{Sd,x}| - f_{b,Rd,x})}{f_{b,Rd,x}}, 0.0\right) \quad (2)$$

Für das Beulfeld unter der Katzschiene ist zusätzlich die Abweichung der Querspannung $\sigma_{Sd,y}$ vom entsprechenden Grenzwert der Bemessungsspannung $f_{b,Rd,y}$ und anschließend die Abweichung der Summengleichung (Gleichung 60 in [3]) vom Grenzwert 1,0 zu bestimmen.

7.2.3 Abweichungen von Grenzwerten der Bemessungsschwingbreite

Für jedes Detail k , für das der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit zu führen ist, ist die größte maximale Bemessungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Sd}$ gemäß [3] aus allen regelmäßigen Lastfallkombinationen gemäß [2] zu ermitteln. Mit dem Grenzwert der Bemessungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Rd}$ gemäß [3] ergibt sich eine relative Abweichung A_k zu

$$A_k = \max\left(\frac{(\Delta\sigma_{Sd} - \Delta\sigma_{Rd})}{\Delta\sigma_{Rd}}, 0.0\right) \quad (3)$$

7.2.4 Abweichungen von Grenzwerten der Funktionalität

Analog lassen sich auch die Abweichungen A_b der Durchbiegung (f_3 Gesamtdurchbiegung und f_4 Durchbiegung nur infolge Hublast) in Brückenmitte bewerten:

$$A_b = \max\left(\frac{(f_i - f_{grenz})}{f_{grenz}}, 0.0\right) \quad (4)$$

Da für die Eigenfrequenzen v der Zielwert oberhalb einer Grenzfrequenz v_{grenz} liegt, kehren sich die Formeln entsprechend um:

$$A_f = \max\left(\frac{(v_{grenz} - v)}{v_{grenz}}, 0.0\right) \quad (5)$$

7.3 Iterationen

Die Iterationen sind für jede Querschnittsform (Beulsteifenanzahl) getrennt durchzuführen.

Bei jedem Iterationsschritt I wird eine Schleife über alle 11 Variablen j (Tabelle 1) ausgeführt, wobei immer ausgehend von der letzten „Lösung I “ für die jeweilige Variable j der Wert des Variablenindex $varind(j)$ um 1 erhöht wird. Für diese „Lösung $I+1,j$ “ wird nun die Berechnung durchgeführt und die Summe der relativen Abweichungen $\Sigma A_{I+1,j}$ und die Kosten $K_{I+1,j}$ ermittelt.

Das Verhältnis der Verbesserung $V_{I+1,j}$ bezogen auf den zusätzlichen Kostenaufwand $K_{I+1,j}$ ist ein Maß für die Effizienz dieser Lösung:

$$\frac{V_{I+1,j}}{K_{I+1,j}} = \frac{\Sigma A_{I+1,j} - \Sigma A_I}{K_{I+1,j} - K_I} \quad (6)$$

Als neue „Lösung I+1“ wird nun diejenige „Lösung I+1,j“ gewählt, bei der die Gleichung 6 den größten Wert liefert. Bei jedem Iterationsschritt wird also nur eine Variable erhöht.

Mit den Iterationen ist so lange fortzufahren, bis $\sum A_{i+1,j}$ den Wert Null erreicht und somit alle Anforderungen erfüllt sind.

7.4 Ergebnis

Warum ist dieser Algorithmus so schnell?

Selbst wenn sich die beste Lösung erst mit den letzten Werten der Tabelle 1 ergeben würde, so wären nur 127 (Summe der Anzahl der Variablen) \cdot 12 (Anzahl) = 1524 Berechnungen erforderlich. Die realistische Anzahl ist jedoch weit geringer, insbesondere, wenn bei manchen Variablen der Maximalwert erreicht wurde oder wenn die beste Lösung innerhalb der Tabelle zu finden ist. Die Ergebnisse sind also in wenigen Sekunden verfügbar.

Beispiel für einen Kran, Spannweite 20 m und 200 kN Tragfähigkeit und Optimierung mit den Daten der Tabelle 1. Die Software EN-KRAN [4], in der das Optimierungstool integriert ist, liefert diese Ergebnisse (Bild 4):

Gewicht	178 kg/m	194 kg/m	204 kg/m
Fiktive Kosten	3252 €	3518 €	3635 €
Material	S275, Steg 1: S355	S275	S275, Steg 1: S355

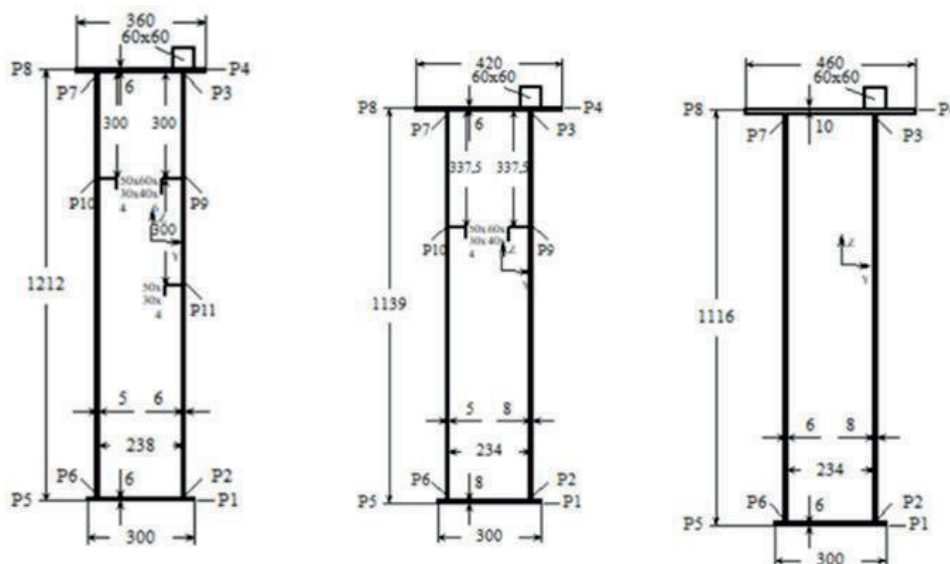


Bild 4: Beispiel

Zusammenfassung

Gibt man in einer Nachweis- und Auslegungssoftware für Brückenkrane einen Datenbereich vor, aus dem die Variablen der Brückenträger auszuwählen sind, so lässt sich die kostengünstigste Lösung mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Algorithmus, einem regelbasierten Expertensystem, schnell erzeugen. Dabei wird ausgehend von den kleinsten Werten des Datenbereichs in jedem Iterationsschritt diejenige Variable bestimmt, deren Erhöhung die effizienteste Verbesserung liefert, bis alle Anforderungen der Normen oder Kunden erfüllt sind.

Quellenverzeichnis:

- [1] DIN EN 13001-1, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen, 2015
- [2] DIN EN 13001-2, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen, 2021
- [3] DIN EN 13001-3-1, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken, 2019
- [4] EN-KRAN Software zur Berechnung von Brückenkranen, Testversion verfügbar als Download unter <https://enkran.de>

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Ermüdungsschäden an hochbeanspruchten Kranbahnen im Baubestand: Ursachen und Handlungsoptionen

Christoph Seeßelberg

Reiner Thoß



Prof. Dr.-Ing. Christoph Seeßelberg

Hochschule München

Fakultät Bauingenieurwesen

Karlstraße 6

80333 München

seesselb@hm.edu



Dipl.-Ing. Reiner Thoß

Statiker, Kransachverständiger

Lützener Straße 1

07743 Jena

rth40@t-online.de

Ermüdungsschäden an hochbeanspruchten Kranbahnen im Baubestand: Ursachen und Handlungsoptionen

Die Industrie-Infrastruktur der 60er, 70er und 80er Jahre gelangt an das Ende ihrer Nutzungsphase: Ermüdungsschäden und dadurch erzwungene Betriebsstillstände nehmen zu. Davon betroffen sind besonders auch Kranbahnträger. Es wird gezeigt, dass sehr viele Ermüdungsschäden nicht an den Orten zu beobachten sind, für die bei der Planung damals ein ordnungsgemäßer Ermüdungsnachweis geführt wurde. Stattdessen treten Risse oft an suboptimal konstruierten Details auf, für die sich ein Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept gar nicht führen lässt. Eine rechnerisch bestimmte Restnutzungsdauer besitzt daher nur eine beschränkte Aussagekraft. Präventive Maßnahmen wie z. B. Rissinspektionen in kürzeren Intervallen oder Ertüchtigung der Schweißnähte können helfen, die finale Nutzungsphase der Kranbahnträger planbarer und überraschungsfreier zu gestalten. Bei Ermüdungsschäden müssen natürlich auch deren tiefere Ursachen, die z. B. in abnormen Radlasten aus den Kranen liegen könnten, abgestellt werden. Das ist jedoch nicht Thema des vorliegenden Beitrags.

1 Vorbemerkung

Die Industrie-Infrastruktur der 60er, 70er und 80er Jahre kommt in die Jahre. Das gilt besonders auch für die stets dynamisch belasteten Kranbahnträger, die dem bauaufsichtlich geregelten Bereich zugeordnet sind. Die 25-jährige Nutzungsdauer, für die Kranbahnträger zumeist ermüdungsmäßig ausgelegt wurden, ist oft weit überschritten. Eine ermüdungsmäßige Restnutzungsdauer ist meist unbekannt. Ermüdungsschäden und dadurch erzwungene Betriebsstillstände nehmen mit zunehmender Überschreitung der ermüdungsmäßig abgesicherten Nutzungsdauer zu, was für viele Industriebetriebe mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verbunden ist. Dies gilt umso mehr in solchen Betrieben, in denen die Krananlagen als „Arterien der Produktion“ anzusehen sind. Steht der Kran still, kann nicht mehr produziert werden. Verschärfend wirken sich darüber hinaus noch folgende Umstände aus:

- Vor 1980 gebaute Kranbahnen wurden in der Regel noch nach DIN 120 oder nach TGL-Vorschriften bemessen. Diese Normen gelten heute besonders im Hinblick auf die Ermüdungssicherheit als unsichere Altnormen, für die es keinen Bestandsschutz gibt ([1], Abs. 19.1.3).
- Inspektionen von Kranbahnen werden im betrieblichen Alltag oft vernachlässigt, Schäden werden infolgedessen oft erst viel zu spät bemerkt.
- Über 50 % der neuen Kranbrücken werden auf Bestandskranbahnen gestellt – und das bei häufig steigenden Hublasten – manchmal ohne ausreichenden Standsicherheitsnachweis.
- Kranbahnträger wurden einst für einen Güterumschlag ausgelegt, der produktionsbedingt in den letzten Jahrzehnten oft stark überschritten wurde. In einem metallzeugenden Betrieb beispielsweise war die Krananlage in den 60er Jahren für einen Materialumschlag von 600 000 t/Jahr ausgelegt worden, während sie derzeit 2,1 Mio. t/Jahr bewältigen muss.

Im Zentrum dieses Beitrags stehen Ermüdungsschäden. Um sie zu vermeiden, werden im bauaufsichtlichen Bereich Ermüdungsnachweise nach DIN EN 1993-1-9 geführt, deren vier

Grundlagen Bild 1 zeigt. Eine für die folgenden Überlegungen relevante Grundlage ist das Nennspannungskonzept, das zwar aufwändige kerbfallspezifische Wöhlerversuche voraussetzt, dafür aber in der Praxis der Tragwerksplanung besonders effizient anwendbar ist, weil der Ermüdungsnachweis mit den einfach zu ermittelnden Nennspannungen (z. B. $\sigma = M_y / I \cdot z$) geführt werden kann, ohne dass die ermüdungsrelevanten Kerbspannungen (z. B. an Schweißnähten oder Schraubenlöchern) bekannt sein müssen.

Im Hinblick auf die Ermüdungssicherheit werden nach Thelen/Warkenthin [2] zwei Nutzungsphasen unterschieden, die reguläre Nutzung ($D < 1$) und die weiterführende Nutzung ($D \geq 1$), siehe Bild 2. Die reguläre Nutzungsdauer kann von der ursprünglich projektierten Nutzungsdauer (meist 25 Jahre) abweichen, wenn der tatsächliche Kranbetrieb schwerer oder weniger schwer ist als bei der Planung angenommen. Als Restnutzungsdauer einer Kranbahn in der regulären Nutzungsphase bezeichnen wir den Nutzungszeitraum von heute bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Schädigung D des kritischsten Kerbdetails nach Palmgren-Miner voraussichtlich 100% erreichen wird ([1], Abs. 19.5).

Nach dem Ende der regulären Nutzungsphase einer Kranbahn wird diese i.d.R. weiterführend genutzt (Bild 2). Die Wahrscheinlichkeit von Ermüdungsschäden nimmt dabei zu. Die weiterführende Nutzung von Kranbahnen ist in den Baunormen weder erlaubt noch verboten. Ca. 50% der Kranbahnen befinden sich vermutlich in der weiterführenden Nutzung.

Bild 3 zeigt die Schädigung D nach Palmgren-Miner für verschiedene Kerbdetails an einer 60 Jahre alten Kranbahn. Das ungünstigste Kerbdetail weist schon eine Schädigung von 151 % auf: Rechnerisch lagen also die ersten 40 Nutzungsjahre im Bereich $D < 100\%$. Tatsächlich war die Kranbahn an allen nachgewiesenen Kerbdetails auch nach 60 Nutzungsjahren noch rissfrei.

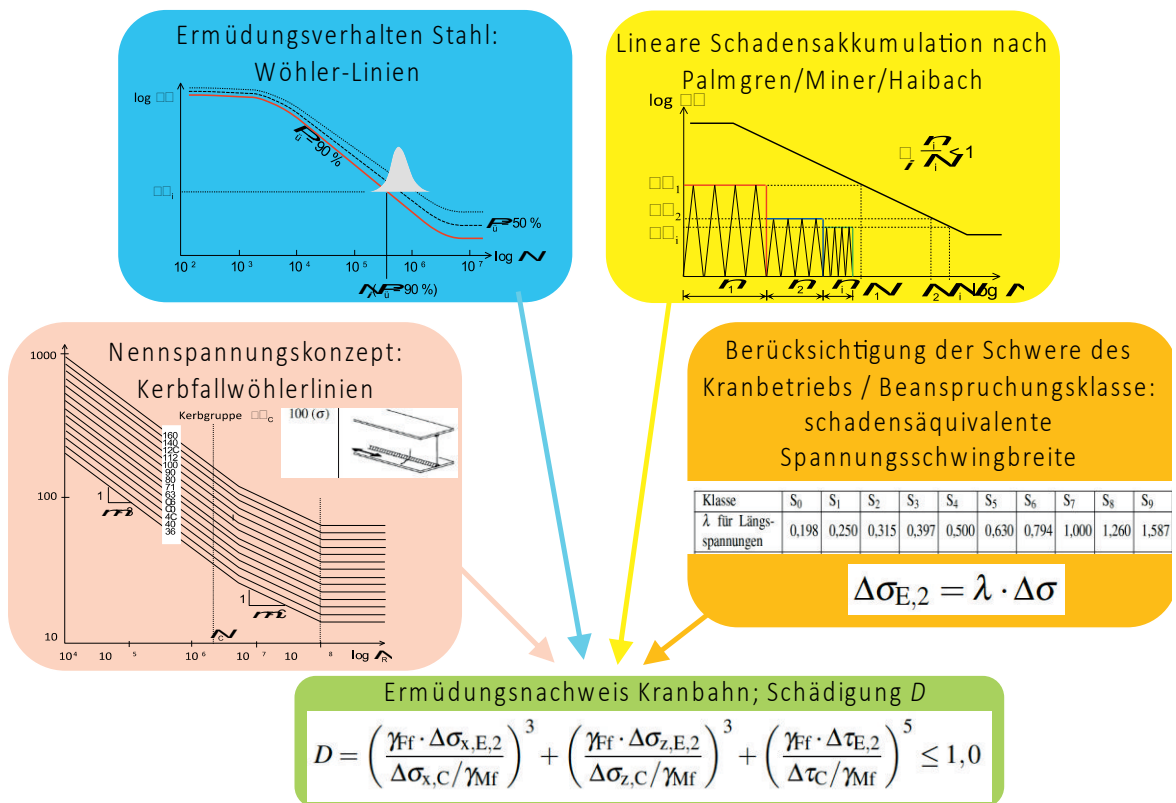


Bild 1: Die vier Fundamente der Ermüdungsrechnung beim Nachweis von Kranbahnträgern

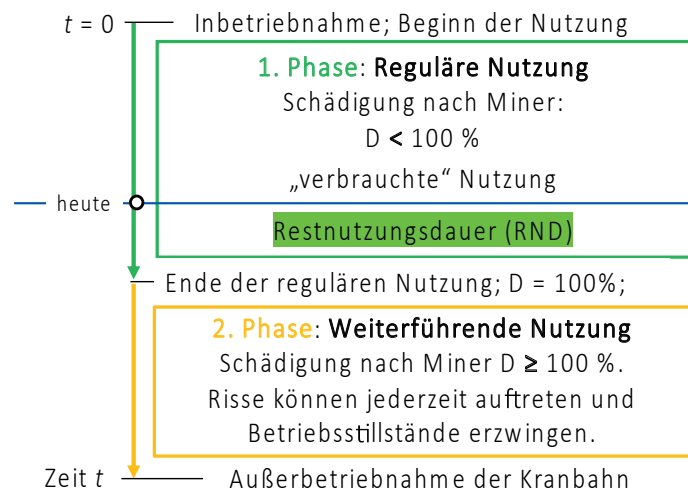


Bild 2: Ermüdungsbedingte Nutzungsphasen und Restnutzungsdauer (RND) einer Kranbahn nach Thelen/Warkenthin [2]

Das ist kein seltenes Ereignis, denn die Ermüdungsfestigkeit ist eine stark streuende Größe: Wenn bei 10 exakt gleichen Probekörpern im Wöhlerversuch der erste bei n Lastwechseln versagt, wird der 10. Probekörper auch bei $3 \cdot n$ Lastwechseln noch rissfrei sein. Die Ermüdungsnachweise im Bauwesen nach DIN EN 1993-1-9 erfolgen gegen die 95% Fraktile (d. h. 5% Versagenswahrscheinlichkeit).

2 An welchen Stellen versagen Kranbahnen zuerst?

Es wäre zu erwarten, dass der erste Riss einer Kranbahn am kritischsten der nachgewiesenen Kerbdetails auftritt (Bild 3). Häufig ist das jedoch nicht der Fall. Der erste Riss tritt oft an einer anderen Stelle auf. Was sind die Gründe dafür? Tatsächlich gibt es viele kritische Konstruktionsdetails an Kranbahnträgern, die sich einem Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept entziehen.

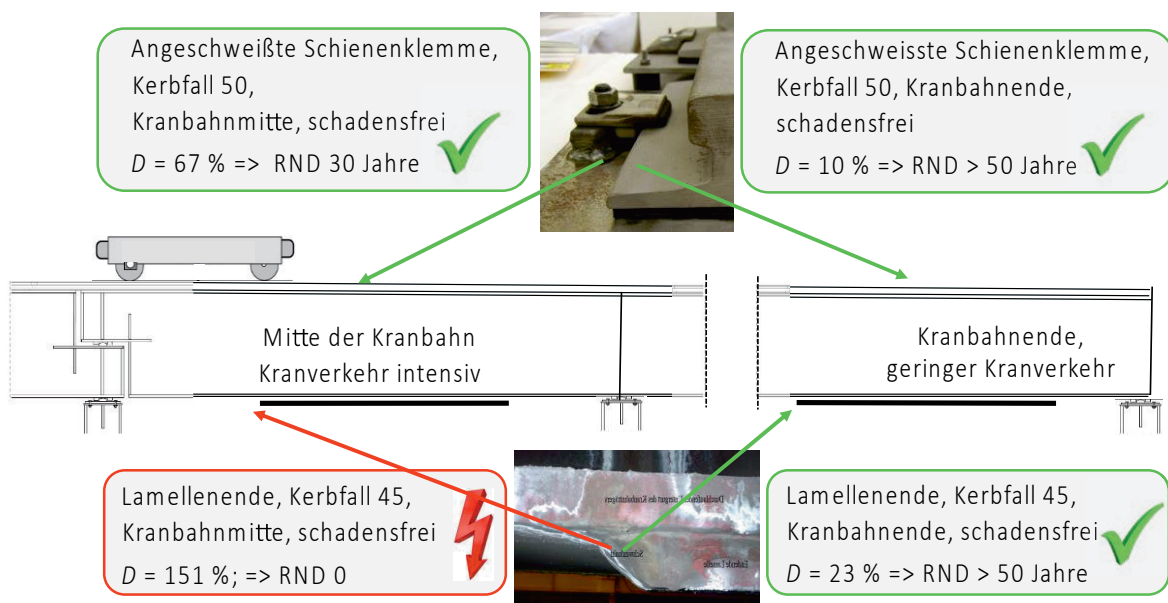


Bild 3: Beispiel: Restnutzungsdauer (RND) für Kerbdetails an einer 60 Jahre alten Kranbahn

Denn ein Nachweis mit dem Nennspannungskonzept ist nur führbar, wenn mindestens folgende Sachverhalte gleichzeitig erfüllt sind:

- Es liegt für das nachzuweisende Konstruktionsdetail eine Kerbfallwöhlerlinie vor (siehe Abs. 2.1).
- Die Nennspannungen am Kerbdetail sind berechenbar (siehe Abs. 2.2).
- Aus der Einwirkungsnorm DIN EN 1991-3 ergeben sich für den Ermüdungsnachweis des Konstruktionsdetails Ermüdungslasten (siehe Abs. 2.3).
- Es treten keine Zwängungsspannungen auf, die nicht bereits in den Versuchen zur Bestimmung der Kerbfallwöhlerlinie berücksichtigt sind (siehe Abs. 2.4).

Doch manchmal sind diese Voraussetzungen nicht alle erfüllt.

2.1 Für das Konstruktionsdetail liegt keine Wöhlerlinie vor

Bild 4 zeigt ein Auflager, für dessen Kerbdetails es keine geeigneten Kerbfallwöhlerlinien gibt: Die Anhäufung von Schweißnähten mit ihren Eigenspannungszuständen, die stark unterschiedlichen Blechdicken/Steifigkeiten und mehrachsige Spannungszustände führen zu einer Situation, die mit dem Nennspannungskonzept nicht mehr geeignet erfasst werden kann. Während die gezeigte Kranbahn bis auf wenige Zentimeter des Steges und den Obergurt komplett durchgerissen (!) ist, sind die ermüdungsmäßig nachgewiesenen Kerbdetails der anderen Bereiche der Kranbahn noch frei von Rissen.

Die Forderung, in solchen Fällen den Ermüdungsnachweis statt mit dem Nennspannungskonzept mit alternativen Methoden (z. B. Strukturspannungskonzept oder Kerbspannungskonzept) durchzuführen, ist im Alltag des Tragwerksplaners kaum umsetzbar:

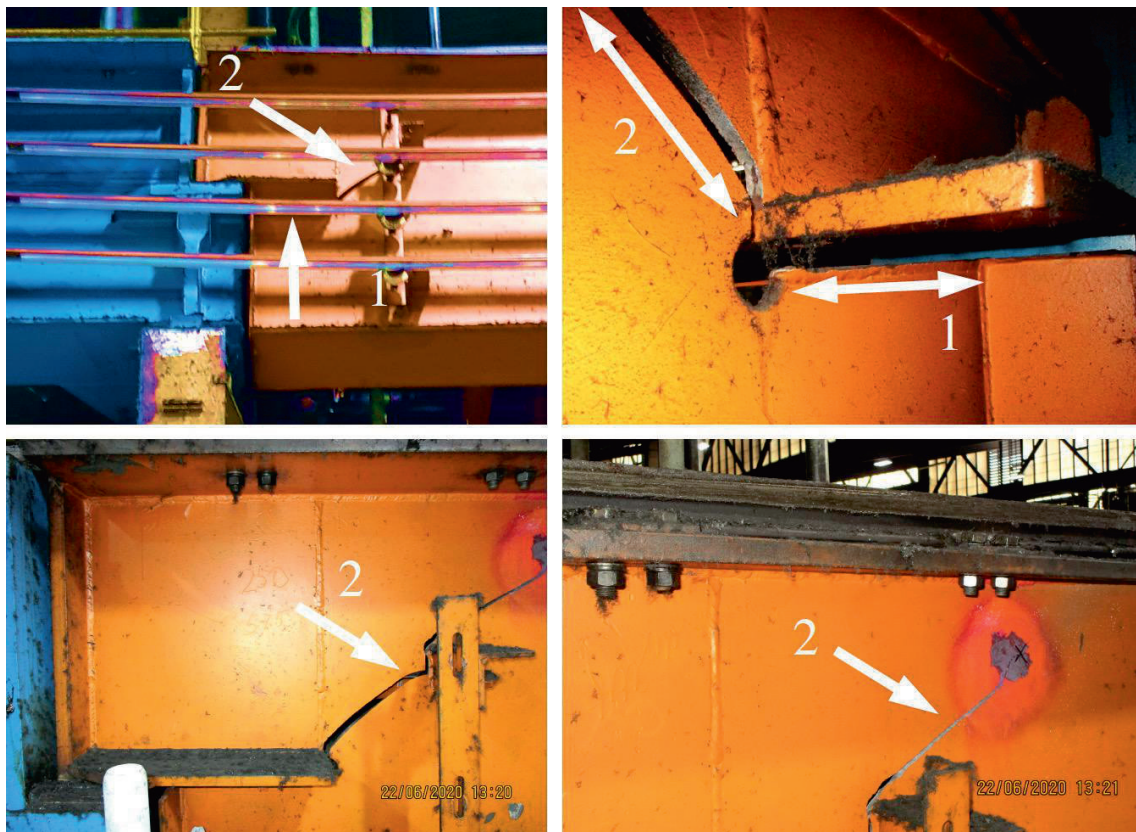


Bild 4: Ermüdungsrisse im Auflagerbereich einer Kranbahn S6, Baujahr 1967

Der Aufwand ist hoch und es sind komplexe Erfahrungen notwendig, die den Tragwerksplanern und Tragwerksplanerinnen in der Praxis kaum zur Verfügung stehen.

Mit der altbekannten Forderung nach „ermüdungsgerechter Konstruktion“ jenseits rechnerischer Nachweise wird berücksichtigt, dass man (leider) längst nicht alles berechnen kann.

Immerhin stehen mit der FKM-Richtlinie und der zukünftigen zu den Eurocodes 2. Generation gehörenden prDIN EN 1993-1-14 (09/2023) „Bemessung mithilfe von Finite-Element-Berechnung“, Abs. 8.2 relevante Regelwerke für die FEM-Berechnung der Strukturspannungen zur Verfügung. Die zukünftige Norm prDIN EN 1993-1-9 (03/2023) enthält neue Hinweise zu den Nachweisen nach dem Strukturspannungskonzept oder dem Kerbspannungskonzept.

2.2 Die Nennspannung ist nicht berechenbar

Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung des Nennspannungskonzepts ist manchmal nicht gegeben: Die Nennspannungen müssen berechenbar sein. Beispiel: Eine Kranbahnkonsole, für die ein Ermüdungsnachweis geführt werden soll, ist bezogen auf ihre Länge so hoch, dass die Balkentheorie keine zutreffenden Ergebnisse mehr liefert.

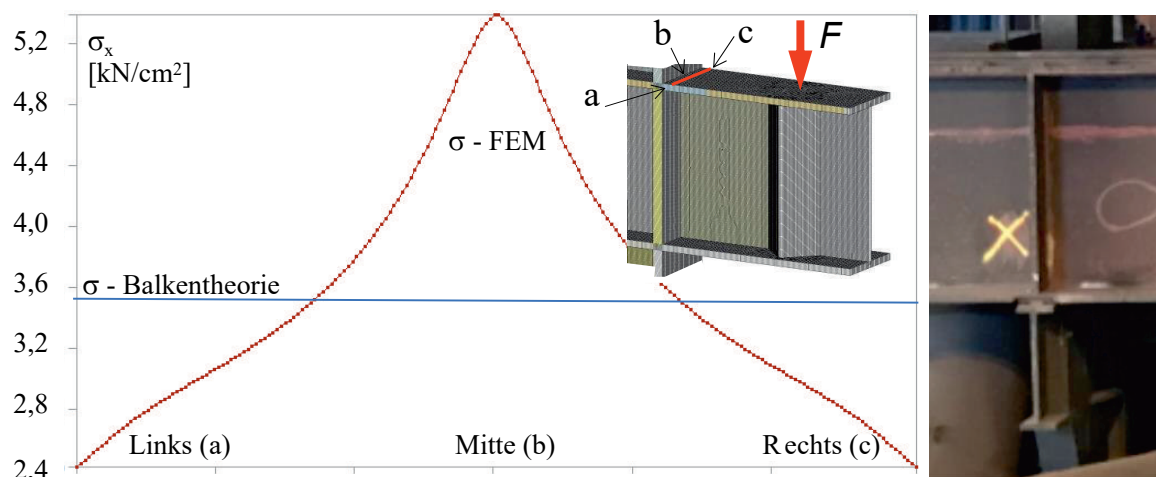


Bild 5: Normalspannungen im Obergurt einer Kranbahnkonsole – Nennspannung und mit FEM berechnete Spannungen in der Blechachse [1]



Bild 6: Plötzlich abgerissene Kranbahnkonsole (Blick auf die gerissenen Schweißnähte zur Stütze); Die Beulverformung entstand nach dem Abreißen der darüber liegenden Schweißnähte.

Bild 5 stellt beispielhaft die mit der Balkentheorie ermittelten Nennspannungen den mittels FEM berechneten Spannungen in der Achse des Obergurtbleches der Konsole gegenüber: die mit der FEM berechneten Spannungen sind über 50% höher. Führt man den Ermüdungsnachweis mit den nach Balkentheorie berechneten „Nennspannungen“ durch, so ergibt sich eine um den Faktor 4 zu hohe Nutzungsdauer. Ein solcher Nachweis ist wertlos.

Bild 6 zeigt eine kastenförmige Kranbahnkonsole, deren plötzliches Abreißen zum Absturz der beiden darauf aufgelagerten einfeldrigen Kranbahnträger führte. Ein langer Betriebsstillstand war die Folge.

2.3 Für das Konstruktionsdetail sind keine Ermüdungslasten definiert

Für den Ermüdungsnachweis eines Kranbahnträgers sind gemäß DIN EN 1991-3 im Regelfall nur die vertikalen Radlasten aus Kranbetrieb zu berücksichtigen. Für Bauteile wie z. B. Horizontalträger, die i.d.R. durch horizontale Radlasten beansprucht werden, existieren keine Ermüdungslasten – ein Ermüdungsnachweis kann nicht geführt werden. Bild 7 zeigt Ermüdungsschäden am Horizontalverband einer Kranbahn. Eine Ursache für die Schäden war eine ungünstige Konstruktion, bei der sich die Systemlinien aus den Verbandsstäben nicht in einem Punkt trafen, so dass beträchtliche Nebenspannungen zu verzeichnen waren (siehe Abs. 2.4). Hier kann man zwar von einem Konstruktionsfehler sprechen. In Anbetracht der Tatsache, dass die Kranbahn (S6) jedoch 50 Jahre genutzt wurde, bevor es zu dem Schaden kam, würde das auch eine mildere Bewertung der Konstruktionsleistung rechtfertigen.

Auch für das in Bild 8 gezeigte Detail (Fuß einer A-Profilschiene mit angeschweißter Kragge zur Fixierung der Schiene) sind keine Lasten definiert, mit denen ein Ermüdungsnachweis geführt werden könnte. Die nicht ermüdungsgerechte, schlechte Schweißnahtqualität führt neben anderen Ursachen zu einem Ermüdungsriss im Schienenfuß.



Bild 7: Gerissene Knotenbleche an einem Horizontalträger; links unten: herausgefallenes Stück [1]

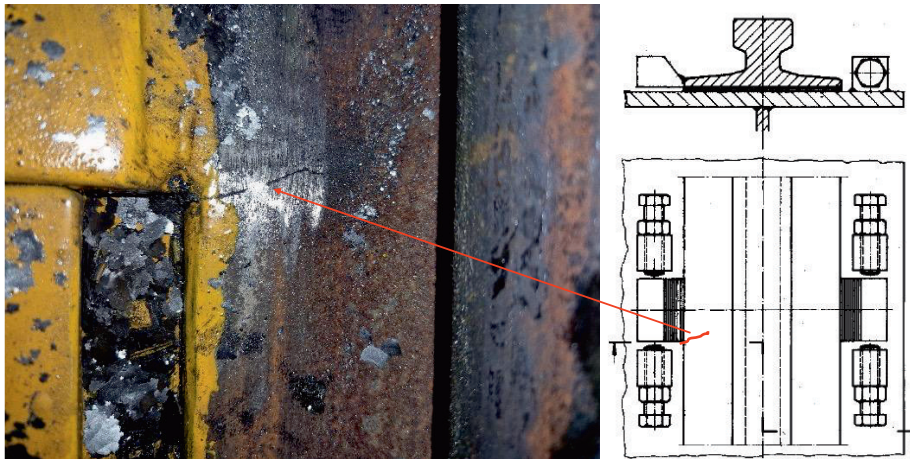


Bild 8: Riss im Schienenfuß infolge schlechter Schweißnahtqualität an angeschweißter Kragge

2.4 Zwängungsspannungen infolge ungünstiger Konstruktion

Wenn alle auftretenden Zwängungsspannungen bereits in den Versuchen für die Kerbfallwöhlerlinie berücksichtigt sind, steht einem Nachweis mit dem Nennspannungskonzept nichts entgegen. Beispiele zeigen jedoch, dass oft Zwängungsspannungen auftreten, die noch nicht in einer Kerbfallwöhlerlinie „eingepreist“ sind:

Beispiel 1: Die überstehende, mit Kehlnähten an den Obergurt angeschweißte Gurtlamelle (Bild 9) kann sich infolge Schweißverzug nach oben durchbiegen. Durch die direkte Radlasteinleitung wird die aufgewölbte Lamelle bei jeder Kranüberfahrt wieder nach unten gedrückt. Dadurch können in den seitlichen Kehlnähten große Spannungen auftreten, die zu Ermüdungsschäden führen [3], S. 118 und [4]. Die Konstruktion von Kranbahnträgern mit überstehenden Lamellenblechen am befahrenen Obergurt ist daher auf keinen Fall zu empfehlen. Die seitlichen Kehlnähte sind ermüdungsmäßig nicht nachweisbar.

Beispiel 2: Auch am Auflager können bei nicht ermüdungsgerechter Konstruktion Zwängungsspannungen hervorgerufen werden, die zu Schäden führen. Bild 10 zeigt das Auflager einer Kranbahn der Beanspruchungsklasse S6. Der im Bild unten dargestellte Kniehebeleffekt führt zu unplanmäßigen Schraubenzugkräften. Das Fehlen der Schraube, mit der beide Stirnplatten verbunden sein sollten, bewirkt darüber hinaus wegen der Längskräfte im Kranbahnträger Schraubenbiegung.

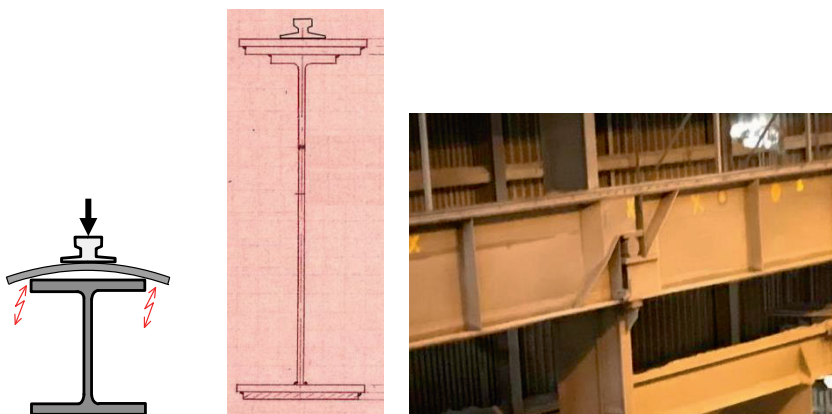


Bild 9: Überstehende Lamellen am befahrenen Obergurt, links: Aufwölbung als Schweißverzug aus den seitlichen Kehlnähten, rechts: Kranbahn aus 1974 mit überstehenden Lamellen

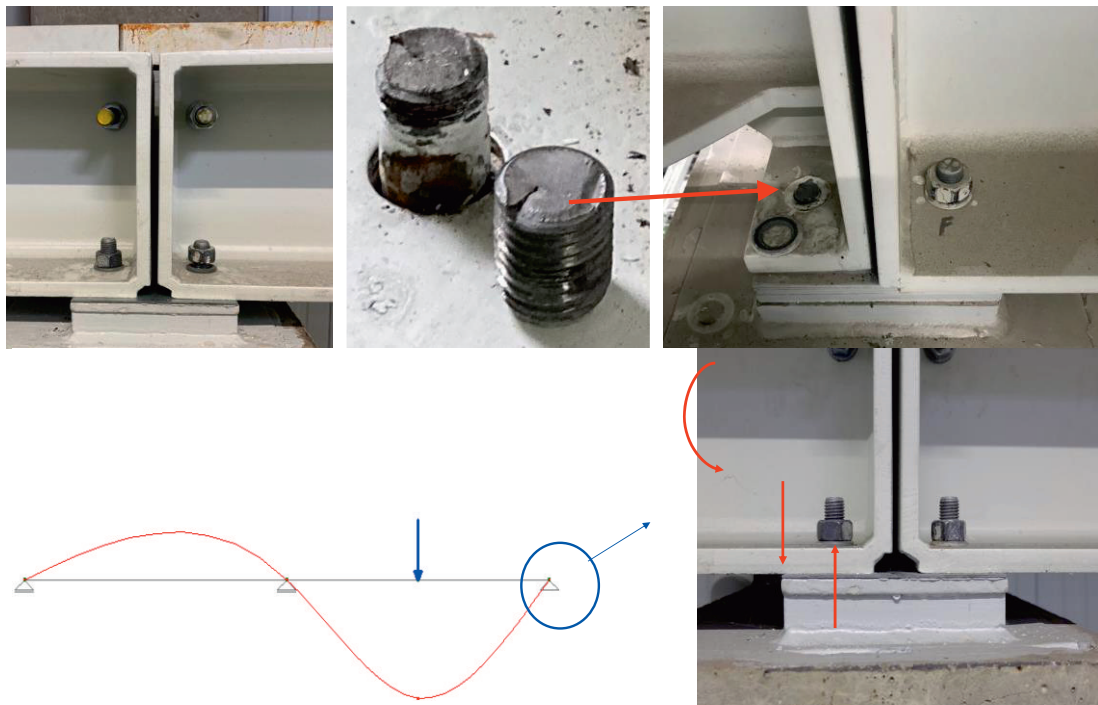


Bild 10: Gelöste Schrauben (links) und abgerissene Schrauben (rechts oben) am Endauflager eines Kranbahnträgers

So haben sich die Schrauben erst gelockert und sind dann abgerissen. Die gezeigte Auflagerkonstruktion wäre evtl. bei einer Krananlage für leichten Betrieb noch akzeptabel gewesen, bei einer Beanspruchungsklasse S6 ist es nicht mehr.

3 Handlungsoptionen für Bestandskranbahnen

Welche Maßnahmen können – nach der fachgerechten Reparatur evtl. bereits entstandener Risse - präventiv ergriffen werden?

3.1 Zuverlässigkeit berechneter Restnutzungsdauern (RND)

Zunächst wird die Restnutzungsdauer (RND) nachgefragt. Unter RND versteht man die verbleibende reguläre Nutzungszeit (Bilder 2 und 3), bis für das kritischste Kerbdetail die Schädigung $D = 1,0$ nach Palmgren/Miner erreicht wird. Wenn sich die Kranbahn bereits in der Phase der weiterführenden Nutzung ($D \geq 1$) befindet, kann eine rissfreie Kranbahn zwar im Regelfall weitergenutzt werden, eine sichere RND ist aber nicht mehr angebar. Mit Hilfe der Bruchmechanik wäre das möglich, aber es ist sehr aufwändig.

Die RND einer Kranbahn in der regulären Nutzungsphase lässt sich mit den Mitteln der Ermüdungsrechnung (Bild 1) bestimmen, siehe [5]. Sehr aussagekräftig ist die RND jedoch nicht, selbst wenn die Beanspruchungsklasse auf Grund der tatsächlichen Krannutzung neu bestimmt wurde. Wie in Kap. 2 dargestellt, versagt die Kranbahn oft nicht an den ermüdungsmäßig nachgewiesenen Kerbdetails, sondern an anderen Stellen, die nicht ermüdungsmäßig kalkulierbar sind und für die deshalb auch keine RND ermittelbar ist. Deshalb sind berechnete RND's bestenfalls als Tendaussage zu werten, mehr nicht. Aussagen über die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Ermüdungsschäden können aus der bisherigen Schadenshäufigkeit abgeleitet werden.

3.2 Regelmäßige Inspektion auf Risse in der weiterführenden Nutzung

Eine Inspektion der dem bauaufsichtlichen Bereich zugeordneten Kranbahnträger ist nach DIN EN 1993-6 NA, Tab. NA.3 in bestimmten Zeitintervallen notwendig, siehe auch [1], Abs. 15.1.5, siehe ¹⁾. Weitere Details enthält die VDI-Richtlinie 6200 [6]. Kranbahnen im Bestand wurden häufig noch nach DIN 120, TGL oder DIN 4132 geplant und errichtet. Diese Normen enthalten keine Vorgaben für Inspektionsintervalle. Es empfiehlt sich, die Inspektionen auch dann nach DIN EN 1993-6 durchzuführen, wenn die Kranbahnen nach älteren Normen geplant wurden. Details siehe [1], Abs. 7.4. Die Inspektion beinhaltet u. a. eine handnahe, 100% Sichtinspektion. In der zur zweiten Generation der Eurocodes zählenden Entwurfsnorm prDIN EN 1993-6, Ausgabe 02/2024, Anhang B [7] sind inhaltliche Vorgaben für die Inspektion von Kranbahnträgern ergänzt. Es ist möglich, Anhang B bereits jetzt anzuwenden.

Die in den Bildern 4, 6 und 7 gezeigten Schadensfälle mit teilweise über Jahrzehnte gewachsenen Rissen zeigen beispielhaft, dass die pflichtgemäßen Inspektionen nach Eurocode und nach BetrSichV nicht in jedem Betrieb durchgeführt wurden. Manchmal wurde erst reagiert, wenn der zunächst unbemerkt gebliebene Riss eine kritische Länge erreichte und Nutzungseinschränkungen oder Betriebsstillstände notwendig machte.

Die bauaufsichtlich festgelegte Intervalldauer bei Kranbahnen ist DIN EN 1993-6NA, Tab. NA3 (siehe auch DIN EN 1993-1-10) zu entnehmen. Im Regelfall beträgt das Intervall 6 – 8 Jahre. Die BetrSichV verlangt i.d.R. jährliche Inspektionen der Krananlage ¹⁾. Die Intervalldauern nach DIN EN 1993-6 gelten nur für Kranbahnen in der regulären Nutzungsphase (Bild 2). Wie aber sind die bauaufsichtlichen Intervalldauern bei Kranbahnen in der weiterführenden Nutzung zu wählen? Die Intervalldauer ließe sich mit bruchmechanischen Mitteln bestimmen: bis zur nächsten Inspektion darf ein Riss nur so weit wachsen, dass er die kritische Risslänge mit ausreichender Sicherheit nicht erreicht [8]. Diese Vorgehensweise ist sehr aufwändig. Einfacher und praxistauglich ist der Hinweis in der schweizerischen Baunorm SIA 269/3 – Erhaltung von Tragwerken – Stahlbau [10], Abs. 5.5.4: Es wird empfohlen, Inspektionsintervalle von ermüdungsmäßig beanspruchten Tragwerken auf Grund der Kosten-Nutzen-Analyse unter Berücksichtigung der Tragsicherheit zwischen 6 Monaten und 3 Jahren zu wählen. Alternativ kann natürlich auch auf die jährliche wiederkehrende Prüfung nach BetrSichV abgestellt werden, deren Prüfumfang jedoch erweitert werden müsste, um die bauaufsichtlich notwendigen Prüfungen einzuschließen.

¹ Parallel zu der Inspektionspflicht in den Baunormen verlangt die Betriebssicherheitsverordnung, Anhang 3, Abschnitt 1, i. d. R. jährlich wiederkehrende Prüfungen an Kranen. Die DGUV-Regel 309-001 (Prüfung von Kranen: 2023) präzisiert in Ziffer 3.1.1, dass die Kranbahn in die wiederkehrende Prüfung des Kranes einzubeziehen ist [9]. Der Prüfumfang bei Kranbahnträgern ist allerdings bei den Prüfungen im bauaufsichtlichen Bereich weitergehend als bei denen nach BetrSichV, während die Prüfintervalle länger sind. So wird in den Baunormen z. B. eine handnahe 100% Sichtinspektion gefordert.

3.3 Hochfrequente Hämmerverfahren (HFH) zur Schweißnahtertüchtigung

Spätestens seit der Einführung der DASt Richtlinie 026 [11] ist deutlich geworden, dass hochfrequente Hämmerverfahren (HFH) geeignet sind, im Rahmen einer Nachbehandlung die Ermüdungsfestigkeit einiger Schweißnähte deutlich zu erhöhen. Dieser günstige Effekt wird u. a. durch die Einbringung von Druckeigenspannungen in die Schweißnaht erreicht. Mit HFH behandelte Schweißnähte dürfen deshalb in einen günstigeren Kerbfall eingestuft werden [11]. Nun ist [11] nur auf Neukonstruktionen anzuwenden. Forschungsergebnisse der Hochschule München [12], [13] zeigen jedoch, dass auch die Ermüdungssicherheit vorgeschädigter, nicht gerissener Schweißnähte signifikant erhöht wird, wenn sie mit einem HFH-Verfahren nachbearbeitet werden (Bild 11). Das Verfahren ist nur auf Kerbdetails, bei denen der Rissausgang am Nahtübergang erwartet wird, anwendbar, nicht auf solche, bei denen der Riss an der Nahtwurzel startet.

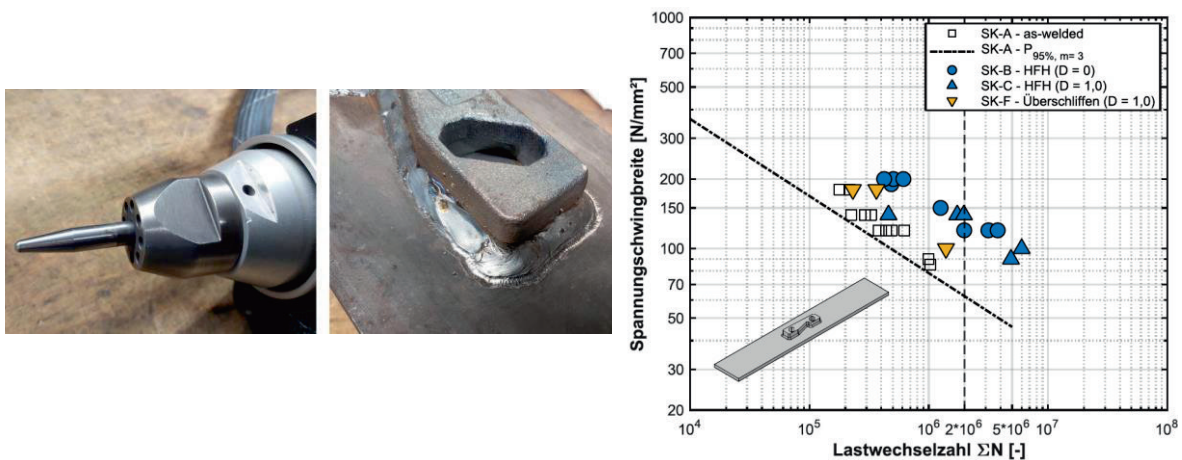


Bild 11: Ergebnisse Wöhlerversuch Schweißnaht Schienenklemme mit Vorschädigung $D = 1$, jedoch ohne Risse, mit HFH nachbehandelt, [20]

3.4 Abwägung: Sanierung und Weiternutzung oder Neubau

Kranbahnen in der Phase der weiterführenden Nutzung (Bild 2) werden üblicherweise noch lange weitergenutzt. Mit zunehmender Nutzung und zunehmendem Schädigungswert D der kritischen Kerbdetails steigt die Wahrscheinlichkeit von Rissen und schadensbedingten Betriebsstillständen. Eine sichere RND kann nicht angegeben werden. Kann die Bestandskranbahn saniert und weitergenutzt werden oder sollte sie ausgetauscht werden? Zur Beantwortung dieser Frage ist das betriebswirtschaftliche Risiko eines Betriebsstillstandes abzuwägen gegen die notwendigen Investitionen für einen Neubau der Kranbahn [14]. Natürlich ist eine Weiternutzung der Krananlage nur nach Reparatur aller relevanten Schäden und im Kontext einer Risikobeurteilung nach DIN EN ISO 12 100 möglich.

Fazit und Zusammenfassung

Ermüdungsschäden und dadurch erzwungene Betriebsstillstände nehmen bei Kranbahnen im Bestand, die häufig bereits länger als 25 Jahre genutzt werden, zu. Es wurde gezeigt, dass überraschenderweise viele Ermüdungsschäden gar nicht an den Orten auftreten, für die bei der Planung der Kranbahn einmal ein Ermüdungsnachweis geführt wurde. Stattdessen treten Risse oft an suboptimal konstruierten Details auf, für die ein Ermüdungsnachweis gar nicht geführt werden konnte. Auch eine nur mit den Mitteln einer Ermüdungsrechnung bestimmbare Restnutzungsdauer ist deshalb nur sehr beschränkt aussagekräftig. Es zeigt sich einmal mehr, dass ermüdungsgerechtes Konstruieren zur Vermeidung von Ermüdungsschäden mindestens genauso wichtig ist wie der rechnerische Ermüdungsnachweis. Präventive Maßnahmen an bislang rissfreien Bestandskranbahnen wie z. B. Rissinspektionen in kürzeren Intervallen, besonders an kerbintensiven Stellen oder die Ertüchtigung der Schweißnähte z. B. mit hochfrequentem Hämmern können helfen, die weiterführende Nutzungsphase alter Kranbahnträger planbarer und überraschungsfreier zu gestalten.

Quellenverzeichnis:

- [1] Seeßelberg, C.: Kranbahnen planen, konstruieren, berechnen, fertigen, inspizieren, ertüchtigen; Beuth Verlag, 6. Auflage, Berlin 2020
- [2] Thelen, G.; Warkenthin, W: Restnutzungsdauer der Tragwerke von Kranen und Umschlaggeräten. Vortrag im Rahmen der Dresdener Fördertechniktagung 1999
- [3] Lohse, W.: Stahlbau 2, 20. Auflage, Teubner Verlag Stuttgart, 2005
- [4] Eichenmüller, W.: Schäden an geschweißten Kranbahnträgern. In: Schweißen und Schneiden (1967), Nr. 5, S. 222 – 225
- [5] Seeßelberg, C. (2019) Kranbahnen im Baubestand: Bewertung, Ertüchtigung, Weiternutzung. Stahlbau 88, Sonderheft Kranbahnen, S. 23-38
- [6] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): VDI-Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken – regelmäßige Überprüfungen. Ausgabe 2010 (2)
- [7] prDIN EN 1993-6 (02/2024) Eurocode 3 – 2. Generation – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen
- [9] Thoß, R. (2021) Kranbahnen aus der Sicht des Kransachverständigen. Stahlbau 90, Sonderheft Kranbahnen, S. 54–60
- [8] KÜHN, B.: Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch, RWTH Aachen, Dissertation, 2005
- [10] SIA 169/3, Erhaltung von Bauwerken – Stahlbau, Ausgabe 2011, Schweizer Norm, Zürich 2011
- [11] DAST: DAST-Richtlinie 026 Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren. 2019

-
- [12] Dürr, A.; Winkler, M. (2024) Ertüchtigungsmaßnahmen für Kranbahnen zur Lebensdauerverlängerung. Stahlbau 93, H. 4, S. 238–251
- [13] Dürr, A.; Winkler, M. (2024) Nachhaltige Erhaltung von bestehenden Industrieanlagen – Lebensdauerverlängerung von zyklisch beanspruchten Stahlkonstruktionen im Industriebau. Abschlussbericht des Forschungsprojekts. München 2024
- [14] Dürr, A.; Bartenbach, J.; Kretzschmar, P.; Rieche, M.; Sdorra, A.; Wunderlich, M. (2021) Besonderheiten beim Austausch von Kranbahnträgern für schweren Kranbetrieb. Stahlbau 90, Sonderheft Kranbahnen, S. 75–91

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Anwendung der neuen ISO/DIS 16625:2024 bei der Auslegung und Nachweisführung von Seiltrieben in Kranen und Hebezeugen

Tobias Schöneck

Ivo Maximow



Dipl.-Ing. Tobias Schöneck (Referent)

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Maschinenbau

Professur Förder- und Materialflusstechnik

09107 Chemnitz

Anwendung der neuen ISO/DIS 16625:2024 bei der Auslegung und Nachweisführung von Seiltrieben in Kranen und Hebezeugen

Die Auslegung und Nachweisführung von Seiltrieben in Kranen und Hebezeugen basiert aktuell auf der EN 13001-3-2:2014 auf europäischer Ebene. Auf internationaler Ebene steht die Neufassung der ISO 16625 bereit, welche einen neuen fundamentalen Ansatz zum rechnerischen Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von laufenden Seilen aufzeigt. Hierbei wird das Ermüdungsverhalten von Stahldrahtseilen über Wöhler-Kennlinien in Abhängigkeit zum Verhältnis aus Seilrollendurchmesser D und Seildurchmesser d präziser abgebildet. Im Vergleich zur EN 13001-3-2:2014 sind hierdurch deutlich mehr Seile während der Nutzungsdauer eines Kranes erforderlich. Der Beitrag bezieht sich auf die Auslegung eines Seiltriebs mit anschließender Nachweisführung nach der neuen ISO/DIS 16625:2024.

1 Einleitung

Für das Heben von Lasten in Kranen werden Seiltriebe oder Kettenzüge als Hebezeuge eingesetzt. Bei Ersterem stellt das Drahtseil ein relevantes Maschinenelement dar, welches zugleich hochbeansprucht und sicherheitsrelevant ist (siehe Bild 1). Im Vergleich zu ortsfesten Seilen werden Drahtseile zum Heben und Senken von Lasten im Betrieb als Laufseile bezeichnet. Dabei führen das Laufen über Seilrollen oder das Auf- und Abwickeln auf Trommeln zu einer hohen Anzahl von Seilbiegungen. Diese haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer eines Seiles unter Berücksichtigung der angehängten Last.



Bild 1: Beispiel eines Zweibrückenkrans mit Seilzug (links) [1] und eines Elektroseilzugs als Hebezeug (rechts) [2]

Für die Auslegung von Seiltrieben steht die EN 13001-3-2:2014 auf europäischer Ebene zur Verfügung (DIN EN 13001-3-2:2015 als deutsche Fassung). Weitere nationale Normen für die Berechnung und Auslegung von Seiltrieben sind die DIN 15020-1:1974 und die VDI-Richtlinie 5020:2024, welche eine Aktualisierung der DIN 15020 darstellt. Als internationale Norm wird zudem die ISO 16625:2013 für die vereinfachte Auswahl von Drahtseilen, Trommeln und Seilscheiben für Krane und Hebezeuge unter Berücksichtigung eines Auslegungsfaktors Z_p als Multiplikator für die maximale Seilkraft S zur Bestimmung der Mindestseilbruchkraft F_{\min} bereitgestellt. [3] [4] [5] [6] [7]

In den vergangenen Jahren erfolgte die vollständige Überarbeitung der ISO 16625 mit einer umfassenden Erweiterung für die Nachweisführung von Seiltrieben. Die neue Version soll

zukünftig die bisherige Ausgabe ersetzen und inhaltlich die EN 13001-3-2:2014 ablösen. Neben geringfügigen Anpassungen bei der Ermittlung von den wirkenden Seilkräften $F_{Sd,s}$ und $F_{Sd,f}$ sowie von der Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ im Nachweis der statischen Festigkeit liegt die wesentliche Neuerung bei der Berechnung der Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ im Nachweis der Ermüdungsfestigkeit bei laufenden Seilen. Diese wirkt sich erheblich auf die Anzahl der erforderlichen Seile während der Nutzungsdauer eines Kranes aus. [3] [4] [5] [6] [7]

Das Bild 2 zeigt zur Veranschaulichung einen Vergleich zwischen der EN 13001-3-2:2014 und der neuen ISO/DIS 16625:2024. Hierbei wird der Nachweis für einen Seiltrieb der Triebwerksgruppe A_{c3} mit einem Seildurchmesser d von 14 mm (Seilklasse 8x19, Seilfestigkeitsklasse 2160 N/mm²) geführt. Die Seilkraft $F_{Sd,f}$ beträgt rund 15.577 N bei einer Hublast von 6.300 kg, welche in allen Fällen eingehalten wird. Daraus ergibt sich die Anzahl der erforderlichen Seile, welche bei der ISO/DIS 16625:2024 um ein Vielfaches höher ist. D. h., dass bei bestehenden Seiltrieben durch das neue Nachweisverfahren mehr Seile einzusetzen sind, was zu höheren Wartungskosten für die Betreiber führt. Deshalb bezieht sich der Beitrag auf die Auslegung von Seiltrieben nach der neuen ISO/DIS 16625:2024 für die Vorgabe einer Anzahl von Seilen und eine überprüfende Nachweisführung. Dies gilt ausschließlich für das vertikale Heben und eine einlagige Wicklung auf einer Trommel.

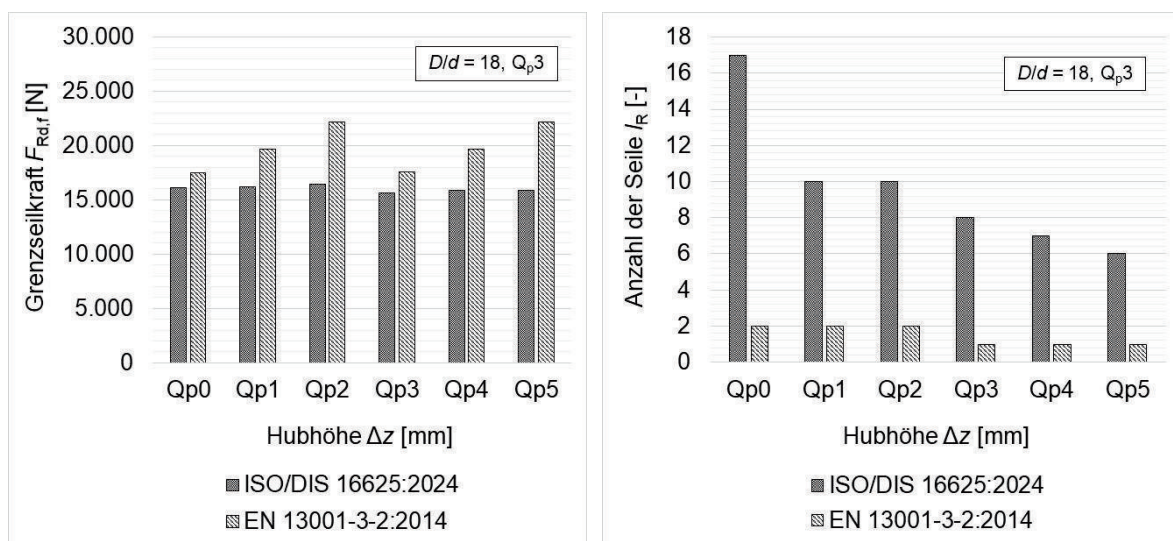


Bild 2: Vergleich der Grenzseilkräfte $F_{Rd,f}$ des Nachweises zur Ermüdungsfestigkeit (links) und der Anzahl erforderlicher Seile l_R während der Nutzungsdauer eines Kranes (rechts) für einen Seiltrieb der Triebwerksgruppe A_{c3} mit einer 4/1-Einscherung

2 Grundlagen der neuen ISO/DIS 16625:2024

2.1 Nachweis der statischen Festigkeit

Der Nachweis der statischen Festigkeit für laufende Drahtseile in Kranen und Hebezeugen gilt erfüllt, wenn die Gleichung (1) eingehalten wird. Dabei muss die Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ einen gleichen oder größeren Betrag als die Seilkraft $F_{Sd,s}$ aufweisen.

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

Die Ermittlung der wirkenden Seilkraft $F_{Sd,s}$ für den Nachweis der statischen Festigkeit ist bei der ISO/DIS 16625:2024 nahezu analog der EN 13001-3-2:2014. Es sind ausschließlich die Dynamikbeiwerte für einzelne Lastfälle der Lastkombination C mit vernachlässigbaren Auswirkungen angepasst. Die Grenzseilkraft $F_{Rd,s}$ unterliegt einer geringfügigen Änderung. Hierbei sieht die ISO/DIS 16625:2024 die Bestimmung der Grenzseilkraft mit dem unteren Wert der Seilkraft erhöhenden Faktoren f_{S4} und f_{S5} nach Gleichung (2) vor. Der Faktor f_{S4} kann zwischen 0,8 und 1 variieren und hängt von der Seilendverbindung ab. Die Berechnung von f_{S5} ist dagegen eine Funktion des D/d -Verhältnisses. Nach der Norm liegen die Werte für empfohlene D/d -Verhältnisse zwischen 0,886 für $D/d = 11,2$ und 0,955 für $D/d = 31,5$. Bei der Verwendung von Keilendklemmen oder Drahtseilklemmen als Seilendverbindungen kann stets der Wert f_{S4} von 0,8 als niedrigster Wert für die Grenzauslegungskraft des Seils herangezogen werden.

$$F_{Rd,s} = \frac{F_{\min}}{\gamma_{rb}} \cdot \min(f_{S4}; f_{S5}) \quad (2)$$

mit F_{\min} ... Mindestseilbruchkraft
 γ_{rb} ... Minimaler Seilwiderstandsbeiwert (statisch)

2.2 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für laufende Drahtseile in Kranen und Hebezeugen gilt erfüllt, wenn die Gleichung (3) eingehalten wird. Dabei muss die Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ einen gleichen oder größeren Betrag als die Seilkraft $F_{Sd,f}$ aufweisen.

$$F_{Sd,f} \leq F_{Rd,f} \quad (3)$$

Die wirkende Seilkraft $F_{Sd,f}$ für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ist im Vergleich der EN 13001-3-2:2014 ebenfalls nur geringfügig verschieden. Erneut ist eine Anpassung der Dynamikbeiwerte hierfür ausschlaggebend mit vernachlässigbaren Auswirkungen.

Die erhebliche Neuerung im Verfahren liegt in der Ermittlung der Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit. Hierfür definiert die ISO/DIS 16625:2024 einen neuen Referenzpunkt (Golder-Punkt) im Biegewechsel-Seilzugkraft-Diagramm. Der Punkt stellt einen virtuellen Schnittpunkt einzelner Wöhler-Kennlinien zu einem Drahtseil für mehrere D/d -Verhältnisse dar, welche über die Donandt-Kraft hinaus verlängert werden. Dessen Lage hat sich durch eine Regressionsrechnung nach der „Methode Stuttgart“ auf Basis einer Vielzahl von Lebensdauerversuchen von Drahtseilen rechnerisch bestimmen lassen. Der Referenzpunkt ist gekennzeichnet durch eine niedrige Biegewechselzahl w_{ref} bei zeitgleich sehr hoher Seilkraft F_{ref} . Bild 3 zeigt ein Beispiel für mehrere Wöhler-Kennlinien zu einem Drahtseil der Seilkategorie 8x19 (links) und die schematische Darstellung des neuen Ansatzes der ISO/DIS 16625:2024 (rechts). [5]

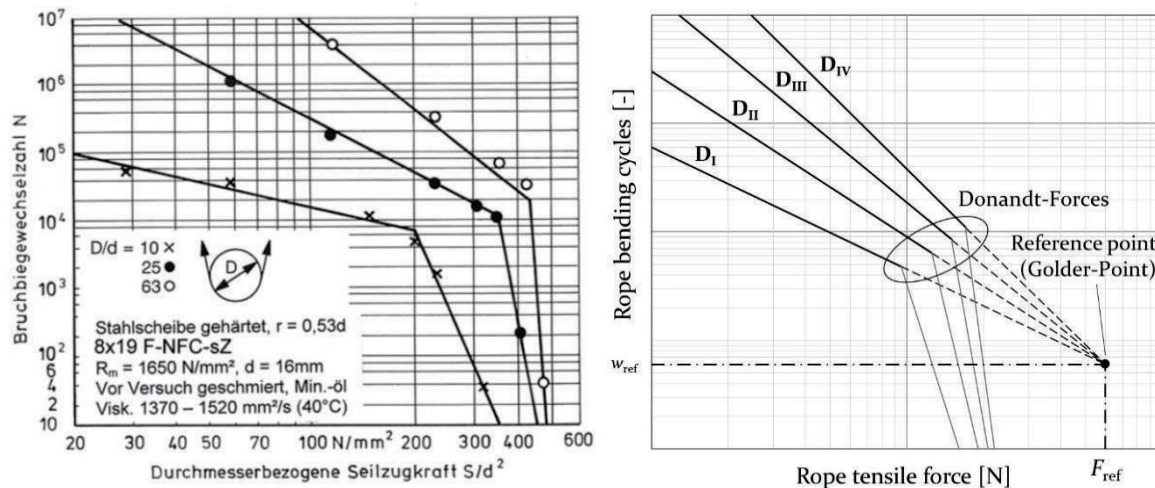


Bild 3: Lebensdauerdiagramm eines 8x19-Stahldrahtseiles für verschiedene D/d -Verhältnisse (links) [8] und schematisches Diagramm in Anlehnung der ISO/DIS 16625:2024 mit einem neuen Referenzpunkt (Golder-Punkt) als Schnittpunkt der Verlängerungen von Lebensdauerkurven für verschiedene D/d -Verhältnisse (rechts) - nach [4] [7]

Mit Hilfe des Golder-Punktes lässt sich nach Gleichung (4) für eine beliebige Seilzugkraft F eine dazugehörige Biegewechselzahl w ermitteln. Dabei wird die Referenzkraft F_{ref} über die verschiedenen Einflussfaktoren f_{F1} bis f_{F4} nach Gleichung (5) und die Biegewechselzahl w_{ref} über den Einflussfaktor f_{w1} zur Seilart („Rope type factor“) und den Einflussfaktor f_{w2} zum Seildurchmesser („Rope diameter factor“) nach Gleichung (6) berechnet. Der Faktor γ_{ref} erhöht hierbei die Mindestseilbruchkraft F_{min} auf die Referenzseilzugkraft, wodurch eine Überlebenswahrscheinlichkeit von mindestens 97,7% erreicht wird. Weiterhin ist die Bestimmung der Steigung m der linearen Wöhler-Kennlinie in der doppellogarithmischen Darstellungsweise des Diagramms über Gleichung (7) erforderlich, welche ausschließlich vom D/d -Verhältnis abhängig ist. [4] [7]

$$w = \left(\frac{F_{ref}}{F}\right)^m \cdot w_{ref} \quad (4)$$

$$F_{ref} = \frac{F_{min}}{\gamma_{ref}} \cdot f_{F1} \cdot f_{F2} \cdot f_{F3} \cdot f_{F4} \quad (5)$$

$$w_{ref} = 600 \cdot f_w = 600 \cdot f_{w1} \cdot f_{w2} \quad (6)$$

$$m = 2,6 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right) - 1,6 \quad (7)$$

Die Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ist final durch die Gleichung (8) unter Beachtung des Seilkraftverlaufparameters s_r und von zwei Seilwiderstandsbeiwerten berechenbar.

$$F_{Rd,f} = \min\left\{\frac{F_{ref}}{\gamma_{rf} \cdot m \sqrt{s_r}}; \frac{F_{min}}{\gamma_{rFD}}\right\} \quad (8)$$

mit γ_{rf} ... Minimaler Seilwiderstandsbeiwert (Ermüdung) mit $\gamma_{rf} = 1,25$

γ_{rFD} ... Minimaler Seilwiderstandsbeiwert zur Vermeidung der Überschreitung der Donandt-Kraft (abhängig vom D/d -Verhältnis)

Als wichtige Kenngröße wird der Seilverlaufparameter s_r nach Gleichung (9) durch das Lastkollektiv in Form des Seilkraftspektrumsfaktors k_r und der relativen Gesamtanzahl von Beanspruchungszyklen ν_r ermittelt, welche sich über Gleichung (10) aus der Gesamtanzahl der Biegewechsel eines Seiles w_{tot} und der Referenzbiegewechselzahl w_{ref} ergibt.

$$s_r = k_r \cdot \nu_r \quad (9)$$

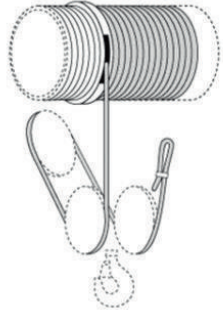
$$\nu_r = \frac{w_{\text{tot}}}{w_{\text{ref}}} \quad (10)$$

3 Definition eines Anwendungsbeispiels

3.1 Kranbeispiel

Für die Auslegung eines Seiltriebs nach ISO/DIS 16625:2024 wird das Anwendungsbeispiel nach Tabelle 1 definiert. Hierbei handelt es sich um einen Seiltrieb der Triebwerksgruppe A_{c3} mit einer 4/1-Einscherung (siehe Bild 4).

Tabelle 1: Technische Daten des Anwendungsbeispiels

Triebwerksgruppe	-	A _{c3} (2m/M5)	Einscherung	-	4/1
Nominale Hublast	m_{Hr}	6,3 t	Biegewechselzahl je Hubbewegung	W_{max}	9
Hubhöhe	z_{max}	10 m	 <p>Bild 4: Darstellung einer 4/1-Einscherung [9]</p>		
Max. Hubgeschwindigkeit	$v_{h,\text{max}}$	8 m/min			
Kriechgeschwindigkeit	$v_{h,\text{CS}}$	1,33 m/min			
Beschleunigung	a_{vert}	0,25 m/s ²			
Beschleunigung bei Not-Aus	a_{NA}	0,5 m/s ²			
Hubwerksklasse	-	HD3			
Steifigkeitsklasse	-	HC1			
Winkel zwischen Seilsträngen und Richtung der wirkenden Kraft	β_{max}	10°			
Auf- und Ablaufwinkel	δ	0,5°			

Des Weiteren sollen Drahtseile der Seilklassen 6x19 und 8x19 mit einer unterschiedlichen Seilfestigkeitsklasse R_r und Anzahl von Außenlitzen mit Einfluss auf den Seilartfaktor f_{w1} als Versionen für einen Vergleich betrachtet werden (siehe Tabelle 2). Ergänzend erfolgt die Variation der Klasse Q_p für die genannte Triebwerksgruppe in Tabelle 3, woraus sich die jeweilige Gesamtzahl der Arbeitsspiele C ableitet. Zuletzt sollen die Unterschiede des Einflusses der Anzahl der Seile auf die erforderlichen D/d -Verhältnisse aufgezeigt werden. In Tabelle 4 sind zwei anwendungsnahe Fälle definiert. Es ist zu beachten, dass ein Seil über mindestens zwei Wartungsintervalle eines Kranes sicher betrieben werden können muss. Dies schreibt die neue ISO/DIS 16625:2024 zwingend vor. Da das Wartungsintervall für Krane ein Jahr beträgt, ist eine Ermüdungsfestigkeit von zwei Jahren einzuhalten.

Tabelle 2: Ausgewählte Seilvarianten für die Auslegung und Nachweisführung

Seilklasse nach EN 12385-4		6x19	8x19
Seilart nach EN 12385-2		nicht drehungsfrei/ parallel geschlossen	nicht drehungsfrei/ parallel geschlossen
Seilschmierung		Innenschmierung	Innenschmierung
Seilendbefestigung		Keilendklemme	Keilendklemme
Einlage		Stahleinlage	Stahleinlage
Anzahl der Außenlitzen	-	6	8
Seilfestigkeitsklasse R_r	N/mm ²	1960	2160
Faktor für Mindestseilbruchkraft K	-	0,356	0,356
Seilartfaktor f_{w1}	-	0,8	1,0

Tabelle 3: Gesamtzahl der Arbeitsspiele C für die Triebwerksgruppe A_c3 (2m/M5)

Klasse Q_p	Gesamtzahl der Arbeitsspiele während der Lebensdauer eines Kranes C
Q_{p0}	1.000.000
Q_{p1}	500.000
Q_{p2}	250.000
Q_{p3}	125.000
Q_{p4}	63.000
Q_{p5}	31.500

Tabelle 4: Fallvarianten zur Darstellung des Einflusses der Anzahl der Seile

	Fall 1	Fall 2
Nutzungsdauer des Kranes in Jahren	20	20
Anzahl der Seile l_R	10	5
Wechselintervall in Jahren	2	4

3.2 Lastkollektiv

Für die Auslegung und Nachweisführung von Seiltrieben ist das Lastkollektiv maßgeblich. Dabei bildet der Seilkraftspektrumsfaktor k_r unterschiedliche Beanspruchungszustände in einem Kennwert ab. In der EN 13001-3-2:2014 erfolgt die Berechnung über Gleichung (11). Das Verhältnis aus der i -ten Belastung $F_{Sd,i}$ und der höchsten Seilkraft $F_{Sd,f}$ geht hierbei in die dritte Potenz ein und wird mit dem i -ten Anteil der relevanten Biegewechsel w_i je Hubbewegung an der Gesamtzahl von Biegewechseln des Seiles w_{tot} multipliziert. Bild 5 verdeutlicht beispielhaft die Lastkollektive Q_{p2} und Q_{p3} .

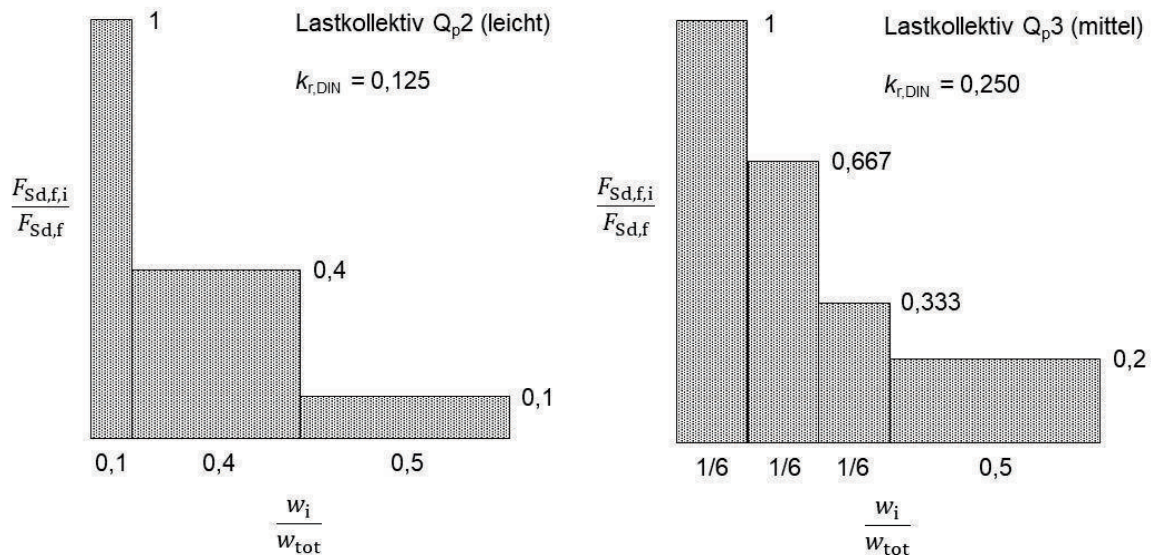


Bild 5: Darstellung des Lastkollektivs Q_{p2} (links) und des Lastkollektivs Q_{p3} (rechts) nach ISO 4301-1:2016 mit Hilfe der Belastungsanteile $F_{Sd,f,i}/F_{Sd,f}$ und der jeweiligen Biegegewichtelanteile w_i/w_{tot}

$$k_r = \sum_i \left(\frac{F_{Sd,f,i}}{F_{Sd,f}} \right)^3 \cdot \frac{w_i}{w_{tot}} \quad \text{nach EN 13001-3-2:2014} \quad (11)$$

$$k_r = \sum_i \left(\frac{F_{Sd,f,i}}{F_{Sd,f}} \right)^m \cdot \frac{w_i}{w_{tot}} \quad \text{nach ISO/DIS 16625:2024} \quad (12)$$

Tabelle 5: Lastspektrumsfaktor K_p und Seilkraftspektrumsfaktor $k_{r,ISO}$ in Abhängigkeit der Klassen Q_p für übliche D/d -Verhältnisse laut Normtabellen der EN 13001-3-2:2014 und ISO/DIS 16625:2024

Klasse Q_p		Q_{p0}	Q_{p1}	Q_{p2}	Q_{p3}	Q_{p4}	Q_{p5}
Lastspektrumsfaktor K_p		0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	1,0000
Seilkraftspektrumsfaktor $k_{r,DIN} = K_p$		0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	1,0000
Seilkraftspektrumsfaktor $k_{r,ISO}$ für unterschiedliche D/d -Verhältnisse	11,2	0,1514	0,1544	0,2794	0,4333	0,6585	1,0000
	12,5	0,1317	0,1376	0,2549	0,4078	0,6383	1,0000
	14	0,1150	0,1238	0,2337	0,3850	0,6197	1,0000
	16	0,0991	0,1109	0,2130	0,3620	0,6004	1,0000
	18	0,0874	0,1018	0,1978	0,3446	0,5854	1,0000
	20	0,0786	0,0951	0,1862	0,3310	0,5735	1,0000
	22,4	0,0703	0,0890	0,1755	0,3180	0,5620	1,0000
	25	0,0634	0,0840	0,1665	0,3069	0,5522	1,0000
	28	0,0572	0,0796	0,1585	0,2967	0,5431	1,0000
	31,5	0,0515	0,0757	0,1513	0,2872	0,5347	1,0000
63	0,0292	0,0614	0,1242	0,2479	0,5016	1,0000	

Bei der ISO/DIS 16625:2024 wird der Seilkraftspektrumsfaktor mit der Steigung der Wöhler-Kennlinie laut Gleichung (12) als Potenz ermittelt. Daraus resultiert eine Abhängigkeit vom D/d -Verhältnis. Deshalb differenziert sich der Seilkraftspektrumsfaktor innerhalb einer Klasse Q_p gegenüber der EN 13001-3-2:2014. D. h., dass im Vergleich der Normen sich die Kennwerte nicht einheitlich darstellen. Diese sind auch nicht zueinander transformierbar, sondern müssen aus dem jeweiligen Lastkollektiv direkt abgeleitet werden. Bei einer fehlerhaften Anwendung werden die Ergebnisse der Auslegung und Nachweisführung nachteilig beeinträchtigt. In Tabelle 5 liegt eine Übersicht der Seilkraftspektrumsfaktoren vor. Es besteht im Anwendungsbeispiel die Annahme, dass das Seilkraftspektrum gleich dem Lastspektrum des Kranes entspricht ($k_{r,DIN} = K_p$).

4 Auslegung des Seiltriebs

4.1 Methodischer Ansatz

Das Ziel der Auslegung ist die Ermittlung eines geeigneten Seildurchmessers d und eines D/d -Verhältnisses für einen sicheren Betrieb des Seiltriebs über die Nutzungsdauer des Kranes mit einer vorgegebenen Anzahl von Seilen. Es schließt sich eine Nachweisführung zur Kontrolle zwingend an. In Bild 6 ist die Vorgehensweise prinzipiell dargestellt.

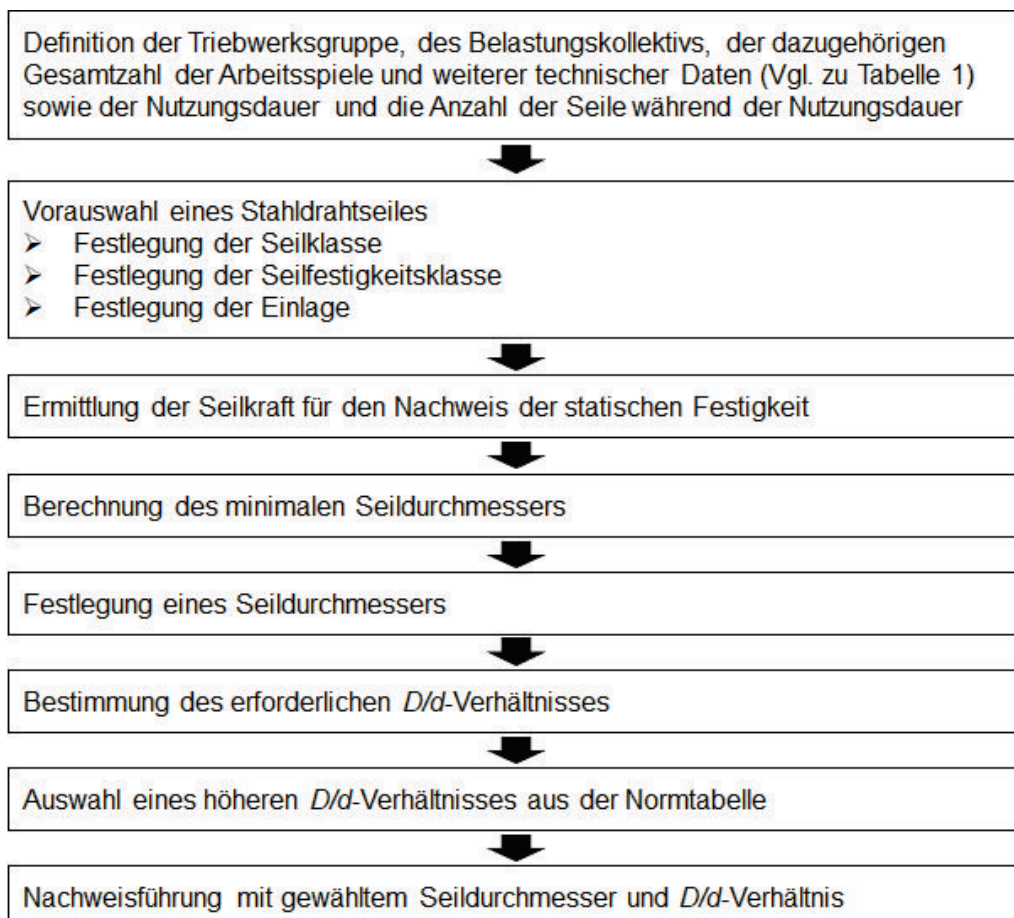


Bild 6: Methodik zur Auslegung eines Seiltriebs durch die Ermittlung eines geeigneten Seildurchmessers und D/d -Verhältnisses zur Einhaltung der Ermüdungsfestigkeit auf Basis einer definierten Anzahl von Seilen während der Nutzungsdauer

4.2 Herleitung der Gleichungen

Nach der Definition grundlegender Parameter für das ausgewählte Hebezeug der Klasse A_{c3} und das Drahtseil ist zunächst der minimale Seildurchmesser d zu ermitteln. Dies erfolgt auf Basis der Gleichungen zum Nachweis der statischen Festigkeit. Hierbei wird die maximale Seilkraft $F_{Sd,s,max}$ unter Beachtung aller Lastkombinationen und Dynamikbeiwerte gemäß Gleichung (13) zur Ermittlung der Mindestseilbruchkraft F_{min} über Gleichung (14) herangezogen. Diese lässt sich ebenfalls in Abhängigkeit der Seilfestigkeitsklasse, des Seildurchmessers und des Faktors K für die Mindestbruchkraft mit Hilfe der Gleichung (15) ausdrücken. [11] [12] [13]

$$F_{Sd,s,max} = \max\{F_{Sd,s}(\phi)\} \quad (13)$$

$$F_{min} \geq \frac{\gamma_{rb} \cdot F_{Sd,s,max}}{f_{s4}} \quad (14)$$

$$F_{min} = K \cdot d^2 \cdot R_r \quad (15)$$

Aus den Gleichungen (14) und (15) lässt sich die Gleichung (16) zur Ermittlung des minimalen Seildurchmessers d_{min} herleiten. Dabei wird beim Einflussfaktor f_{s4} der niedrigste Wert angenommen. Es ergeben sich für die betrachteten Seilklassen die Kennwerte nach Tabelle 6 mit der Auswahl von Varianten des Seildurchmessers für die weitere Auslegung.

$$d_{min} \geq \sqrt{\frac{\gamma_{rb} \cdot F_{Sd,s,max}}{f_{s4} \cdot K \cdot R_r}} \quad \text{mit } f_{s4} = 0,8 \quad (16)$$

Tabelle 6: Minimaler Seildurchmesser d_{min} und gewählte Varianten zum Seildurchmesser d

Seil	$F_{Sd,s,max}$ in N	d_{min} in mm	d in mm					
6x19	22.659	9,0	10	12	14	16	18	20
8x19		8,6						

Fortführend erfolgt die Berechnung der minimalen D/d -Verhältnisse für die ausgewählten Seildurchmesser. Die Methode basiert auf dem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung der Anzahl von Seilen während der Nutzungsdauer eines Kranes im Anhang E der ISO/DIS 16625:2024. In Gleichung (17) ergibt sich die Anzahl der Seile aus der maximalen Anzahl der Biegewechsel je Hubbewegung w_{max} , der Arbeitsspiele C und der Gesamtanzahl der Biegewechsel eines Seiles w^* .

$$l_R = \frac{w_{max} \cdot C}{w^*} \quad (17)$$

Beim vereinfachten Verfahren werden der Dynamikfaktor Φ^* sowie die Seileinflussfaktoren f_{s2}^* und f_{s3}^* vernachlässigt, da diese nur eine geringfügige Auswirkung haben. Deshalb erfolgt die Abbildung der Seilkraft bzw. -belastung in Gleichung (18) nur über die Hublast m_{Hr} und den Faktor n_m für die Flaschenzugeinscherung. Der Seilwiderstandsbeiwert γ_{rf} findet ebenfalls keine Berücksichtigung. Da der Seilkraftspektrumsfaktor k_r durch die Summation von Gliedern in einzelner Abhängigkeit zum D/d -Verhältnis nicht einsetzbar ist, wird der Lastspektrumsfaktor K_p mit einer Potenz von $(m/3)$ verwendet. Der Ansatz führt zu konservativen Ergebnissen.

$$w^* = \left(\frac{F_{ref}}{\frac{m_{HR} \cdot g}{n_m}} \right)^m \cdot \frac{w_{ref}}{(K_p)^{\frac{m}{3}}} \quad (18)$$

Die Umstellung der Gleichung (17) nach w^* und das Gleichsetzen mit Gleichung (18) lässt die Gleichung (19) formulieren. Zur Vereinfachung erfolgt das Ausdrücken der Klammern in die Konstanten A nach Gleichung (20) und B nach Gleichung (21). Hierdurch lässt sich die Gleichung (19) in kompakter Form mit Gleichung (22) darstellen.

$$\left(\frac{w_{max} \cdot C}{l_R \cdot w_{ref}} \right) = \left(\frac{F_{ref} \cdot n_m}{m_{HR} \cdot g \cdot \sqrt[3]{K_p}} \right)^m \quad (19)$$

$$A = \frac{F_{ref} \cdot n_m}{m_{HR} \cdot g \cdot \sqrt[3]{K_p}} \quad (20)$$

$$B = \frac{C \cdot w_{max}}{w_{ref} \cdot l_R} = v_r \quad (21)$$

$$m = \log_A B \quad (22)$$

Durch das Gleichsetzen der Gleichung (7) mit der Gleichung (22) lässt sich nach einer Umstellung das gesuchte D/d -Verhältnis nach Gleichung (23) ermitteln.

$$\frac{D}{d} = 10^{\frac{1}{2,6} \cdot (\log_A B + 1,6)} \quad (23)$$

Es ist zu beachten, dass bei der Vorgehensweise die Berechnung der Referenzkraft F_{ref} vom Faktor f_{s4} abhängt, welcher das Verhältnis aus dem Rillenradius r_G der Seilrolle und dem Seildurchmesser d berücksichtigt. Laut DIN 15061-1:1977 beträgt das Verhältnis der empfohlenen Rillennadien zum Seildurchmesser ca. 0,53. Dadurch wird der Faktor $f_{s4} = 1$ gemäß ISO/DIS 16625:2024 gesetzt. Der Faktor f_{w2} zum Berechnen der Biegewechselzahl w_{ref} im Golder-Punkt lässt sich für die jeweiligen Seildurchmesser ermitteln. [10]

In Bild 7 werden die Ergebnisse zu den minimalen D/d -Verhältnissen für 10 Seile (links) und 5 Seile (rechts) während der Nutzungsdauer des Kranes für die Seilklassen 6x19 und 8x19 veranschaulicht. Es zeigt sich, dass bei der Zunahme des Seildurchmessers die D/d -Verhältnisse nicht linear abnehmen und bei hohen Seildurchmessern an ein konstantes D/d -Verhältnis approximieren. Zudem liegt nur ein geringfügiger Unterschied zwischen den Seilklassen vor. Die Ergebnisse beziehen sich auf den vollen Hubbereich von 10 m, wo die Anzahl der Biegewechsel w_{max} je Hubbewegung maximal ist. In Tabelle 7 erfolgt die Auswahl der nächsthöheren D/d -Verhältnisse aus der Normtabelle. Es ist zu beachten, dass es sich durch das vereinfachte Verfahren bei kleinen Seildurchmessern auch um zwei Stufen handeln kann. Dies lässt sich durch die anschließende Nachweisführung feststellen.

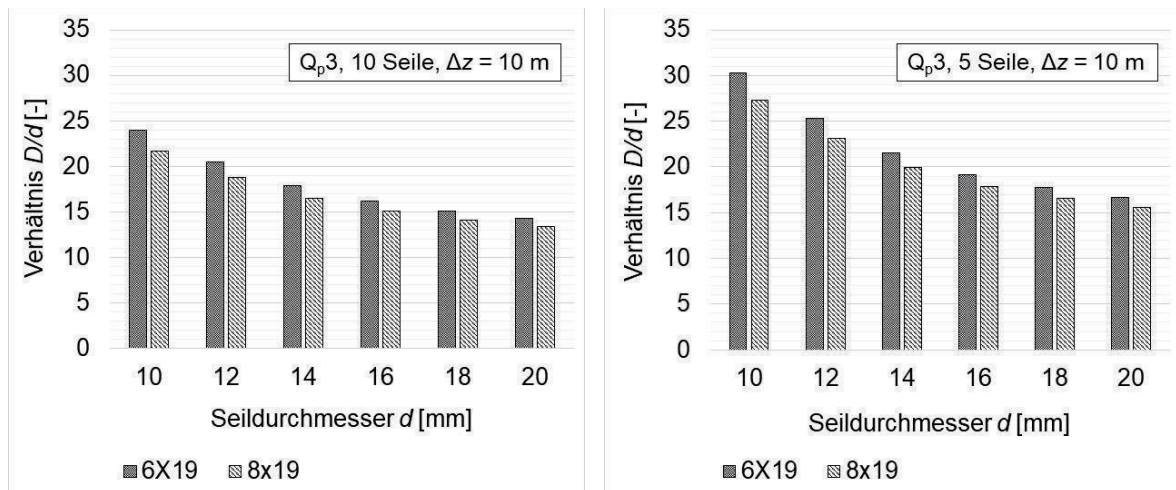


Bild 7: Ergebnisse der minimalen D/d -Verhältnisse beim Einsatz von 10 Seilen (links) und beim Einsatz von 5 Seilen (rechts) für die Klasse Q_p3 bei Hubzyklen mit voller Hubhöhe über 10 m

Tabelle 7: Ergebnisse der minimalen D/d -Verhältnisse zu den gewählten Seildurchmessern d und Auswahl geeigneter D/d -Verhältnisse aus der Normtabelle für die betrachtete Seile

Seil	d	mm	10	12	14	16	18	20
6x19	D/d_{min}	mm	23,9	20,5	17,8	16,1	15,1	14,2
	D/d	mm	28	22,4	20	18	16	16
8x19	D/d_{min}	mm	21,6	18,8	16,5	15,1	14,1	13,4
	D/d	mm	25	20	18	16	16	14

5 Nachweisführung des Seiltriebs

Bei der Nachweisführung werden die ausgewählten D/d -Verhältnisse für die jeweiligen Seildurchmesser d berücksichtigt. Hierbei muss die wesentliche Bedingung zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit nach Gleichung (3) eingehalten werden. Die Seilkraft $F_{Sd,f}$ beträgt 15.577 N im vorliegenden Fall. Demnach sollte die Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ einen gleichen oder größeren Wert unter Beachtung der vorgegebenen Anzahl von Seilen haben. Bild 8 zeigt die Einhaltung der Bedingung (links) durch die ausgewählten D/d -Verhältnisse (rechts) für die Klasse Q_p3 bei 10 Seilen, während Bild 9 die Ergebnisse für 5 Seile verdeutlicht. Falls die Grenzseilkraft unterhalb der Seilkraft liegt, ist das nächstgrößere D/d -Verhältnis auszuwählen. Hierüber lässt sich die Grenzseilkraft steuern. Die Diagramme zeigen, dass bei zunehmendem Seildurchmesser die D/d -Verhältnisse über zwei aufeinanderfolgende Seildurchmesser häufiger gleichbleiben. Es lässt sich daraus ableiten, dass zu große Seildurchmesser keinen technischen Vorteil hinsichtlich einer kompakteren Bauweise des Seiltriebs mehr generieren. Im dargelegten Fall zeigt sich ein Seildurchmesser d mit 14 mm als sehr gut geeignet.

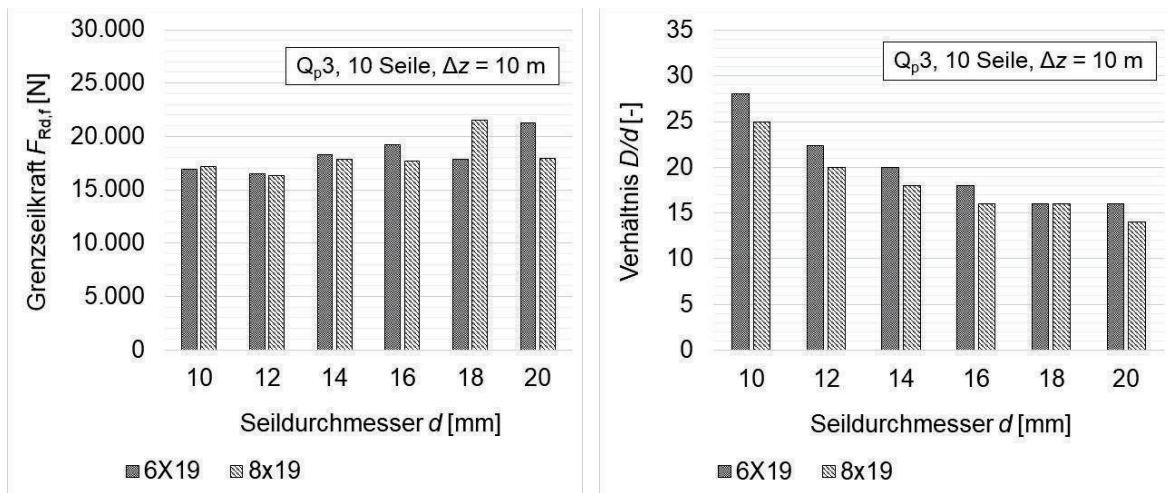


Bild 8: Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit (links) und dazugehörige gewählte D/d -Verhältnisse (rechts) beim Einsatz von 10 Seilen für die Klasse Q_{p3} bei Hubzyklen mit voller Hubhöhe über 10 m

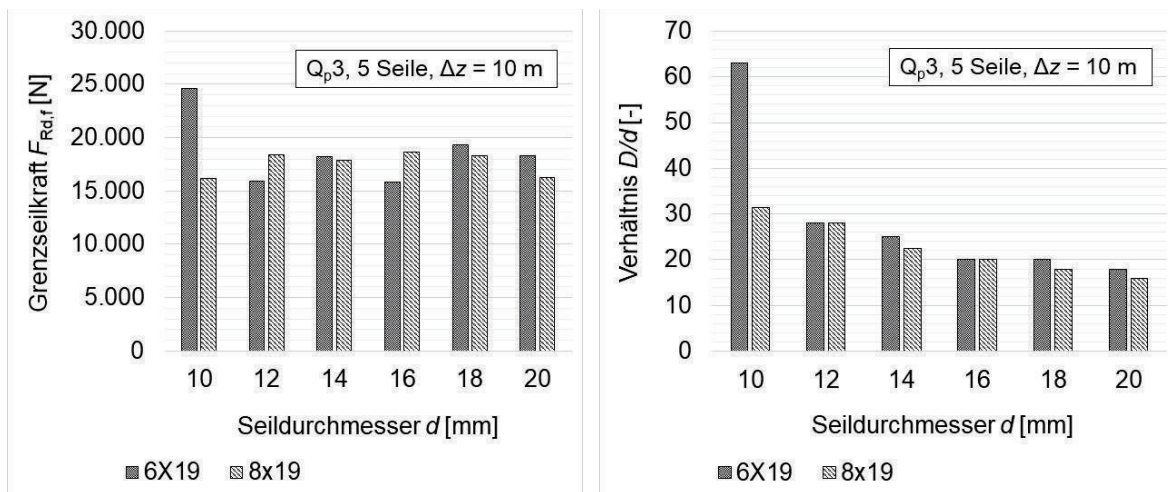


Bild 9: Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit (links) und dazugehörige gewählte D/d -Verhältnisse (rechts) beim Einsatz von 5 Seilen für die Klasse Q_{p3} bei Hubzyklen mit voller Hubhöhe über 10 m

Die Ergebnisse zum Einsatz des Seildurchmessers $d = 14$ mm sind im Bild 10 in Abhängigkeit zur Klasse Q_p und damit respektive zu den Arbeitsspielen C veranschaulicht. Dabei erfolgt ausschließlich der Vergleich der D/d -Verhältnisse. Bei einer niedrigen Klasse Q_p sind größere D/d -Verhältnisse erforderlich. Zudem werden bei einer geringeren Anzahl von Seilen ebenfalls höhere D/d -Verhältnisse benötigt. Die Ergebnisse stellen erneut die D/d -Verhältnisse zur Einhaltung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit dar.

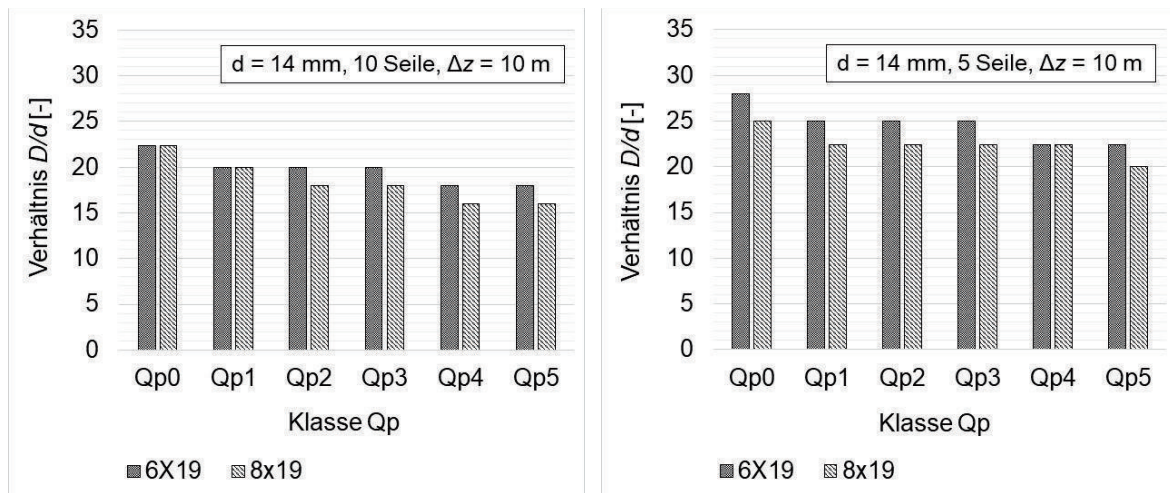


Bild 10: Gewählte D/d -Verhältnisse in Abhängigkeit der Klasse Q_p für den Seildurchmesser $d = 14$ mm beim Einsatz von 10 Seilen (links) und beim Einsatz von 5 Seilen (rechts) bei Hubzyklen mit voller Hubhöhe über 10 m

Die vorgelagerten Ergebnisse beziehen sich stets auf eine Hubbewegung über den vollen Hubbereich von 10 m. Falls die Hubbewegungen vorrangig innerhalb eines Teilbereiches der Hubhöhe stattfinden, so ergibt sich eine geringere Anzahl von Biegewechseln w_{\max} je Hubbewegung im relevanten Hubbereich. Daraus resultieren kleinere D/d -Verhältnisse, welche für einen sicheren Betrieb des Seiltriebs ausreichend sind. Jedoch ist zu beachten, dass der eingegrenzte Hubbereich tatsächlich eingehalten wird. Bild 11 zeigt die Ergebnisse für die Seilklassen 6x19 und 8x19. Grundsätzlich kann abgeleitet werden, dass die größere Anzahl von Außenlitzen bei der Seilklasse 8x19 zu einer Verringerung des D/d -Verhältnisses im Vergleich zur Seilklasse 6x19 führt. Hierbei wirkt sich auch die höhere Seilfestigkeitsklasse positiv aus. Beides verschiebt den Golder-Punkt vorteilhaft.

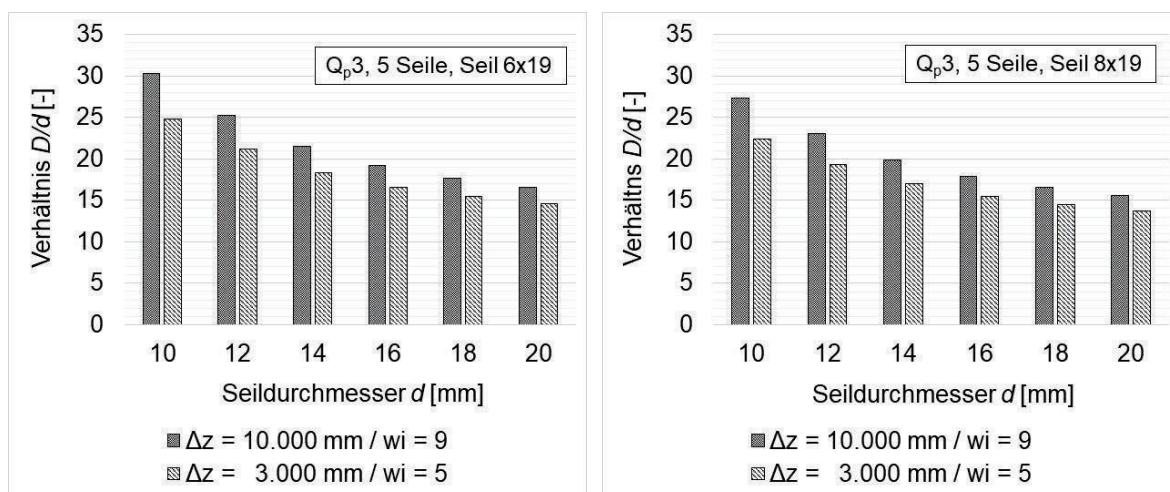


Bild 11: Gewählte D/d -Verhältnisse für die Seilklasse 6x19 (links) und die Seilklasse 8x19 (rechts) beim Einsatz von jeweils 5 Seilen für die Klasse Q_{p3} bei Hubzyklen mit voller Hubhöhe über 10 m und bei reduzierter Hubhöhe über 3 m im Hubbereich von 1 m bis 4 m

Zusammenfassung

Der Beitrag zielt auf die Anwendung des neuen Verfahrens in der ISO/DIS 16625:2024 zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit ab. Hierbei werden Wöhler-Kennlinien zu variierenden D/d -Verhältnissen für ein Drahtseil mit definiertem Seildurchmesser über die jeweilige Donand-Kraft hinaus verlängert, sodass sich in der theoretischen Betrachtung ein virtueller Schnittpunkt (Golder-Punkt) ergibt. Dieser ist durch eine niedrige Biegewechselzahl bei zeitgleich hoher Seilkraft gekennzeichnet. Mit Hilfe des Punktes und des kalkulierbaren Anstiegs m der betreffenden Wöhler-Kennlinie für ein D/d -Verhältnis lässt sich für ein Lastkollektiv einer Triebwerksgruppe die dazugehörige Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ in einer neuen Form berechnen. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Auslegung eines Seiltriebs über die ISO/DIS 16625:2024 zu einer deutlich höheren Anzahl erforderlicher Seile während der Nutzungsdauer eines Kranes im Vergleich zur bisherigen EN 13001-3-2:2014 führt. Im Beitrag erfolgt die systematische Berechnung von geeigneten D/d -Verhältnissen für die Vorgabe einer frei gewählten Anzahl von 10 Seilen und 5 Seilen. Hierfür ist ein konkretes Anwendungsbeispiel der Triebwerksgruppe A_c3 mit einer Hublast von 6,3 t, einer Hubhöhe von 10 m und einer Einscherung von 4/1 definiert. Für die wirkenden Seilkräfte ergibt sich ein geeigneter Seildurchmesser von $d = 14$ mm. Hierfür lässt sich über die dargelegte Methode ein minimales D/d -Verhältnis von 20 für ein Seil der Seilklasse 6x19 mit einer Seilfestigkeitsklasse 1960 N/mm² und ein D/d -Verhältnis von 18 für ein Seil der Seilklasse 8x19 mit einer Seilfestigkeitsklasse 2160 N/mm² ermitteln. Es leitet sich aus dem Ergebnis ab, dass durch die Auswahl eines höherwertigen Seiles mit einer größeren Anzahl von Außenlitzen eine Reduktion des D/d -Verhältnisses und somit des Seilrollendurchmessers D für eine kompaktere Bauweise des Seiltriebs möglich ist.

Quellenverzeichnis:

- [1] Konecranes GmbH: Brückenkran. Fachlexikon. Homepage des Unternehmens (www.konecranes.com/de-de/fachlexikon/brueckenkran), Abruf in 09/2024
- [2] Demag Cranes & Components GmbH: Seilzug DVR. Krane, Hebezeuge und Antriebstechnik. Homepage des Unternehmens (www.demagcranes.de), Abruf in 09/2024
- [3] VDI 5020:2024: Berechnung von Seiltrieben in Hebezeugen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2024
- [4] ISO/DIS 16625:2024: Cranes and hoists — Selection of wire ropes, drums and sheaves. Revised Draft
- [5] Reinl, J.; Golder, M.: Wire ropes in Crane Applications – Current State of the Standardization Work of ISO/WD 16625. innoTRAC Journal. Volume 1 (2020), pp. 37–46. URL: <https://doi.org/10.14464/innotrac.v1i0.456>
- [6] Anders, M.; Briem, U.; Novak, G.; Steinbach, G.: New German Guideline VDI 5020 for rope drive design. 27 Sept. 2022, Proceedings of OIPEEC Conference 2022 and 7th International Stuttgart Ropedays. S. 303-316

- [7] Schöneck et al.: Theoretical comparison of ISO/WD 16625:2023 with DIN EN 13001-3-2:2015 for the selection and verification of wire ropes for cranes and hoists. Volume 3 of the InnoTRAC Journal, 2024. ISSN 2701-3693 (S. 19 - S. 38) and DOI: <https://doi.org/10.14464/innotrac.v3i1.801>
- [8] Feyrer, K.; Wehking, K.-H.: FEYRER-Drahtseile. Bemessung – Betrieb – Sicherheit. 3. Auflage. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2018. ISBN 978-3-642-54296-1 (eBook)
- [9] STAHL CraneSystems GmbH: Beispiel einer 4/1-Einscherung. Homepage des Unternehmens (www.stahlcranes.com), Abruf in 09/2024
- [10] DIN 15061-1:1977: Hebezeuge – Rillenprofile für Seilrollen. Beuth-Verlag, Berlin
- [11] VDI-Richtlinie 2358:2012: Drahtseile für Fördermittel. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL). Fachbereich Technische Logistik
- [12] DIN EN 12385-2:2008: Stahldrahtseile – Sicherheit. Teil 2: Begriffe, Bezeichnung und Klassifizierung. Deutsche Fassung EN 12385-2:2002+A1:2008
- [13] DIN EN 12385-4:2008: Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit. Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke. Deutsche Fassung EN 12385-4:2002+A1:2008

Liste der allgemein verwendeten Normen im Rahmen der Veröffentlichung (in Ergänzung zu vorgenannten Normen und Richtlinien):

- [14] DIN EN 13001-1:2015: Krane – Konstruktion allgemein. Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen. Deutsche Fassung EN 13001-1:2015
- [15] DIN EN 13001-2:2021: Krane – Konstruktion allgemein. Teil 2: Lastenwirkungen. Deutsche Fassung EN 13001-2:2021
- [16] DIN EN 13001-3-2:2015: Krane – Konstruktion allgemein. Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben. Deutsche Fassung EN 13001-3-2:2014
- [17] DIN EN 13001-3-2/A1:2017: Krane – Konstruktion allgemein. Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben. Deutsche Fassung EN 13001-3-2:2014/prA1:2017
- [18] FEM 9.511:1986: Berechnungsgrundlagen für Serienhebezeuge. Einstufung der Triebwerke
- [19] ISO 4301-1:1986: Cranes and lifting appliances – Classification – Part 1: General
- [20] ISO 4301-1:2016: Cranes – Classification – Part 1: General
- [21] ISO 8686-1:2012: Cranes – Design principles for loads and load combinations – Part 1: General
- [22] ISO 16625:2013: Cranes and hoists – Selection of wire ropes, drums and sheaves

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

„Rope Type Factors“ und Seilauswahl in der kommenden ISO 16625 – was steckt dahinter?

Martin Anders

Christoph Eiwán



Dr.-Ing. Martin Anders (Referent)
Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und
Arbeitssysteme
01062 Dresden



Dipl.-Ing. (FH) Christoph Eiwán
Liebherr-Werk Biberach GmbH
Memminger Straße 120
88400 Biberach an der Riß

„Rope Type Factors“ und Seilauswahl in der kommenden ISO 16625 – was steckt dahinter?

Die Revision der ISO 16625 [1], eine Norm für den Sicherheitsnachweis von Stahldrahtseilen unter Verwendung der Methode der Grenzzustände, basiert auf einem neuen Ansatz zum Nachweis der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung konkreter Annahmen zu deren zyklischer Beanspruchung. Beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit fließen eine Vielzahl von Einflussfaktoren nach dem Stand der Technik ein. Neben den jeweiligen Bruchkräften werden die spezifischen Ermüdungsfestigkeitseigenschaften verschiedener Seilkonstruktionen durch einen Seiltypfaktor („Rope Type Factor“) berücksichtigt. Der Beitrag erklärt die Hintergründe und die Vorgehensweise, die zur Festlegung der Faktoren geführt haben.

1 Einleitung

Für eine kompakte Einführung in die Thematik wird auf die aktuelle Fassung der ISO 16625 [1], einige Verweise sowie auf die Betriebs- und Lebensdauer von Drahtseilen mit den entsprechenden Einflussgrößen eingegangen.

1.1 Betriebs- und Lebensdauer laufender Drahtseile

Ein laufendes Drahtseil ist prinzipiell als ein Maschinenelement anzusehen, das niemals dauerfest ist. Auch bei geringen Belastungen wird das Drahtseil irgendwann versagen. Aufgrund seiner Konstruktion aus einzelnen Drähten, die im Kontakt zueinander und zu Seiltriebelementen stehen und sich relativ zueinander verschieben, ist Verschleiß durch Reibung, plastische Verformung oder Ermüdungsbrüche nicht zu vermeiden. In Analogie zu anderen Maschinenelementen, bei denen Lastwechsel zur Ermüdung führen, beanspruchen sogenannte Biegewechsel die laufenden Drahtseile. Eine Minimierung der Ermüdung wird durch entsprechende Seilkonstruktionen bzw. Macharten, durch Fertigungsparameter und nicht zuletzt durch den Einsatz von Seilkonservierungsmitteln erreicht. Die Standzeit eines Drahtseiles stellt ein wesentliches Leistungsmerkmal für eine Vielzahl von Anwendungen dar. Üblicherweise wird bei laufenden Drahtseilen zwischen der Betriebs- und Lebensdauer unterschieden. Die Betriebsdauer ist dabei die Anzahl der Biegewechsel bis zum Erreichen definierter Ablegekriterien. Die Anzahl Biegewechsel bis zum Seilversagen (Litzenbruch) stellt den Begriff der Lebensdauer dar.

1.1.1 Einflussgrößen

Der Aufbau, die Beanspruchung und die Funktion der Drahtseile sind die Ursachen für deren zeitfesten Charakter. Es gibt bei laufenden Drahtseilen keine Parameter, bei denen sie dauerfest betrieben werden können. Die Einflüsse auf die ertragbare Biegewechselzahl sind vielfältig und beginnen bereits bei der Fertigung der Seildrähte. Die Parameter der Fertigungsschritte bestimmen die Qualität der Seildrähte und bei ihrer Weiterverarbeitung auch die des Drahtseiles. Die Eigenschaften des fertigen Produktes in Bezug auf Aufbau und Festigkeit lassen nur einen bedingten und stark streuungsbehafteten Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Lebensdauer zu. Zusammen mit den Eigenschaften des Seiltriebs, in dem das Drahtseil verwendet wird, lassen sich die Einflussgrößen in rechnerisch erfassbare und nicht erfassbare Einflüsse einteilen (siehe Bild 1).

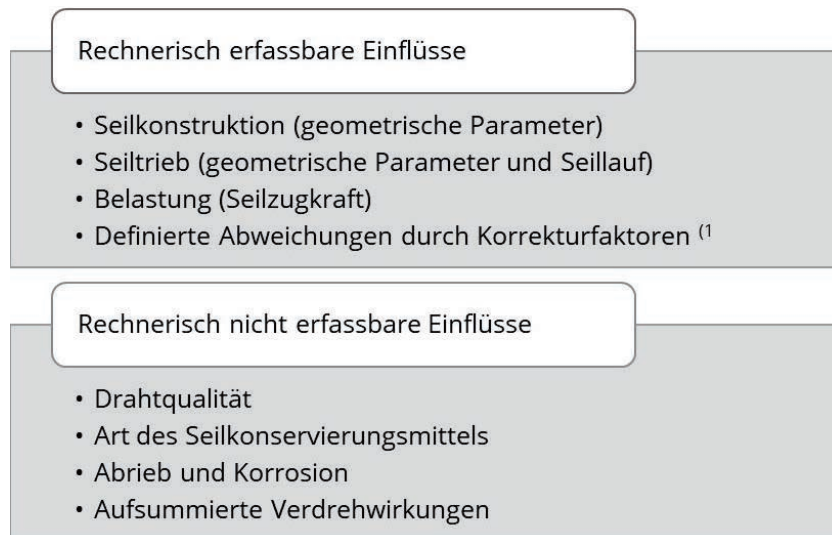


Bild 1: Einteilung der Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Drahtseilen

⁽¹⁾ Versuchsreihen liefern durch Regression der Ergebnisse bspw. Faktoren zur Berücksichtigung von Seilablenkung, Rillenformen, Beanspruchungsfolge (Seiltrieb), Mehrlagenwicklung und Verdrehungen [2]

Diese vergleichsweise grobe Einteilung umfasst die Überbegriffe der Einflussgrößen, die eine Vielzahl von einzelnen Parametern beinhalten. Stellt man die detaillierten Einflussparameter in den Hintergrund und betrachtet ein jeweiliges Drahtseil, sind Einflüsse auf die Betriebs- und Lebensdauer auf zwei maßgebende Größen reduzierbar. Diese sind die Seilzugkraft, in der Vergangenheit ausgedrückt durch einen Designfaktor als Quotient der Seilbruchkraft und der Seilzugkraft, und das Verhältnis der Seilrollen zum Seildurchmesser im betrachteten Seiltrieb. Diese beiden Größen definieren in Kombination wesentlich die ertragbare Anzahl an Biegewechseln.

1.1.2 Regressionsmethoden nach dem Stand der Technik

Die Lebensdauer von dynamisch belasteten Bauteilen vorherzusagen, ist in vielen Bereichen Bestandteil von ganzheitlichen Analysen von Maschinen und Anlagen. Analog zu Bauteilen, die mit Methoden der Betriebsfestigkeit betrachtet werden, wurden für Drahtseile Methoden entwickelt, mit der eine Abschätzung der Betriebsdauer (Ablegereife) und der Lebensdauer (Tragfähigkeit) möglich ist. Anstatt von Schwingspielen spricht man bei laufenden Drahtseilen von Biegewechseln. Seitens der Beanspruchung gibt es bei dieser Analogie den wesentlichen Unterschied, dass nicht nur eine Spannung die maßgebende Größe darstellt, sondern die zwei Parameter Seilzugspannung sowie das Verhältnis Seilrollen- zu Seildurchmesser ebenfalls zu berücksichtigen sind. Die Vielzahl und Komplexität der Einflussgrößen führt bei laufenden Drahtseilen zu vergleichsweise größeren Streuungen der Biegewechselzahlen in Anwendungen und Versuchen als bei Betriebsfestigkeitsbetrachtungen von Bauteilen. Die beiden nachfolgend vorgestellten Methoden Stuttgart und Leipzig sind heute in der Drahtseilbranche als Stand der Technik anerkannt. Sie werden in der Praxis angewendet und stellen ein Modell für das Ermüdungsverhalten laufender Drahtseile im Rahmen der zugrundeliegenden Versuchsparameter dar.

Methode Stuttgart

Die Methode Stuttgart ist eine von *Feyrer* [2] aufgestellte versuchsbasierte Betriebsfestigkeitsberechnung mit einer multiplen Regression. Eine Vielzahl von Dauerbiegeversuchen

an der Universität Stuttgart ist die Grundlage der Regressionsrechnung. In die Gleichung zur Berechnung ertragbarer Biegewechselzahlen fließen die Parameter Seilzugkraft, Seilrollen- und Seildurchmesser, Drahtfestigkeit, die entsprechenden Regressionskonstanten sowie spezielle Biegewechselfaktoren zur Berücksichtigung diverser Seil- und Seiltriebeigenschaften ein. Den aus den Versuchen ermittelten Konstanten liegen bestimmte Bedingungen zugrunde, die klar beschrieben sind. Bei abweichenden Bedingungen wird die berechnete Biegewechselzahl durch entsprechende Korrekturfaktoren angepasst. Diesen Korrekturfaktoren liegen wiederum ebenfalls Versuche zugrunde. Die Methode ist innerhalb der Drahtseilbranche die bekannteste und häufigste angewendete Methode zur Abschätzung der Betriebs- und Lebensdauer von Drahtseilen in Seiltrieben.

Methode Leipzig

Die Methode Leipzig ist eine von *Steinbach* [3] erarbeitete versuchsbasierte Betriebsfestigkeitsberechnung mit Hilfe eines mechanischen Modells für die Beanspruchungen der Seilaußendrähte, die bis heute weiterentwickelt wird [4]. Grundlage der Methode sind umfangreiche Versuchsreihen am ehemaligen Institut für Bergbausicherheit in Leipzig. Die Basis für die Berechnung ertragbarer Biegewechselzahlen sind die kombiniert schwingenden Zug-, Biege- und Druckspannungen der Seildrähte, die sich aus den konstruktiven Gegebenheiten der Seilkonstruktion und der Beschaffenheit der Seiltriebelemente sowie aus den wirkenden Belastungen in Form der Seilzugkräfte ergeben. Die auf die Nennfestigkeit des Seildrahtes bezogene Zusammenfassung der schwingenden Spannungen wird als „Anstrengung“ der Seildrähte bezeichnet und ist die Modellgröße zur Berechnung der ertragbaren Biegewechselzahlen mithilfe von Wöhlerlinienparametern. Diese Parameter wurden aus einer Vielzahl von Versuchen durch statistische Auswertung ermittelt.

1.2 Die kommende ISO 16625 mit der Methode der Grenzzustände

Die Methode der Grenzzustände mit Teilsicherheitsbeiwerten stellt die Grundlage der Tragwerksplanung nach dem Stand der Technik dar. Diese wurde im Rahmen der Normenreihe DIN EN 13001 für Krane im Teil 3-2 [5] bereits im Sicherheitsnachweis von Drahtseilen umgesetzt. Der in der gesamten Normenreihe durchgeführte Wechsel von einem zeitbasierten Ansatz hin zu einem zyklenbasierten Ansatz ist grundsätzlich sinnvoll und nachvollziehbar. Die Anzahl an Arbeitszyklen, als Annahme für die Lebensdauer der Anlage, ist dabei der Ausgangspunkt für die Nachweise der Ermüdungsfestigkeit von Komponenten und Bauteilen des Krans. Kritische Betrachtungen in [6] und [7] zeigen in DIN EN 13001-3-2 [5] jedoch Schwachpunkte beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit auf, die die Sicherheit von Seiltrieben im Einzelfall beeinträchtigen können. Im Wesentlichen handelt es sich um folgende Aspekte:

- Die fehlende Kopplung zwischen den zulässigen Durchmesserhältnissen D/d und der Schwere des Betriebs ist als problematisch einzustufen. Damit sind Konstellationen möglich, die nur eine sehr geringe Betriebsdauer erwarten lassen. Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis wird zwar durch die Berücksichtigung des D/d -Verhältnisses beeinflusst, aufgrund der ungenauen Formulierung ergeben sich jedoch Ergebnisse, die auf der unsicheren Seite liegen.
- Die Festlegung der bestimmenden Größe „Gesamtzahl der Biegewechsel während

der Bemessungslebensdauer eines Seiles“ ist kritisch zu hinterfragen. Diese wird aus der Gesamtzahl von Arbeitszyklen des Krans und einer angenommenen Anzahl Seile mithilfe einer Orientierungshilfe im Anhang B der Norm ermittelt. Die sich ergebenden Werte liegen z. T. um ein Vielfaches (bis Faktor 10) über den real ertragbaren Biegewechselzahlen, welche aus den Grenzen des Nachweises rechnerisch abgeschätzt werden (vgl. [6]). Die sich ergebenden hohen Biegewechselzahlen können durch Anwender der Norm fehlinterpretiert werden, weshalb die Festlegung ungenügender Inspektionsintervalle nicht auszuschließen ist.

Der neue Ansatz, der im Rahmen der Revision der ISO 16625 [1] erarbeitet wurde, behebt diese Schwachpunkte (vgl. [8] bis [12]). Der Ansatz wird ebenfalls über die Methode der Grenzzustände formuliert, berücksichtigt aber die D/d -Verhältnisse gemäß der Regression von Feyrer [2] und stellt damit wieder einen realistischen Zusammenhang zum Betriebs- und Lebensdauerverhalten laufender Drahtseile her.

2 Berücksichtigung der Seilkonstruktionen

Im Folgenden wird kurz auf die Berücksichtigung verschiedener Seilaufbauten in bisherigen laufzeitbasierten Normen sowie innerhalb der Regressionsmethoden eingegangen.

2.1 In den bisherigen laufzeitbasierten Normen

Die Berücksichtigung verschiedener Seilkonstruktionen wurde in bisherigen laufzeitbasierten Normen nur eingeschränkt implementiert. Implizit steckte einerseits über die Berücksichtigung von Drahtnennfestigkeiten eine gewisse Berücksichtigung in der Mindestbruchkraft der Drahtseile. Andererseits gab es bereits eine grobe Unterscheidung zwischen nicht drehungsarmen und drehungsarmen Seilen. Beide Einflüsse ergaben bspw. in DIN 15020 (1974) [13] einen entsprechenden „Beiwert c“ zur Ermittlung eines Seilmindestdurchmessers. In ISO 4308-1 (2003) [14] und in Nachfolge in der ISO 16625 (2013) wurde bereits der Begriff „Rope type factor“ verwendet. Dieser beeinflusste, anders als in DIN 15020, den zu berechnenden minimalen Seilrollen- und Seiltrommelmindestdurchmesser, nachdem ein „C-Value“ den Seilmindestdurchmesser definierte. In den bisherigen Normen wurde damit indirekt auch eine qualitativ korrekte Berücksichtigung der Betriebsdauer der Seile erreicht.

2.2 In den Regressionsmethoden

In den beiden unter 1.1.2 genannten Regressionsmethoden für die Betriebs- und Lebensdauer laufender Drahtseile wird der Seilaufbau direkt berücksichtigt und ist durch die dahinterstehenden Versuche evaluiert worden.

Bei der Methode Stuttgart sind für verschiedene Seilklassen und Schlagarten die Regressionskonstanten ermittelt worden, welche tabellarisch für eine Abschätzung der Biegewechselzahl für Seilbruch und Ablegereife ausgewählt werden (vgl. [2] - Tab. 3.17). Mit diesen Konstanten wird die jeweilige Wöhlerlinie der Seilkategorie definiert. Bei speziellen Seilkonstruktionen, die nicht explizit aufgeführt sind, muss eine Näherung mit der nächstähnlichen Klasse erfolgen, um die Anzahl der ertragbaren Biegewechsel abzuschätzen.

Bei der Methode Leipzig wird der explizite Aufbau des Drahtseiles durch die Ermittlung der Zug-, Druck- und Biegespannungen in den Außendrähten der Außenlitzen berücksichtigt. In die Spannungsermittlung fließen, wenn auch teilweise mit vereinfachten Näherungsansätzen, alle relevanten Parameter ein. Zum Beispiel führt eine Seilkonstruktion mit mehr Außenlitzen zu einer höheren ertragbaren Biegewechselzahl aufgrund einer geringeren Druckspannung im Außendraht, die sich aus der gestiegenen Kontaktanzahl zwischen Drahtseil und Seilrolle ergibt. Die Methode (Spannungsermittlung) ist daher unabhängig von Seilklassen und für verschiedenste Seilkonstruktionen valide. Für eine explizite Darstellung des mechanischen Modells der Methode Leipzig wird an dieser Stelle auf [3] und [4] verwiesen.

3 Ermittlung der „Rope Type Factors“

Die Konstruktionsdetails der Drahtseile beeinflussen grundsätzlich deren ertragbare Biegewechselzahlen bis zum Erreichen der Betriebs- und Lebensdauern. Da die Neufassung der ISO 16625 [1] nun ein zyklensbasierter Standard ist, kann mit der Anzahl an Arbeitszyklen, die für die Auslegungsdauer eines Kranes bzw. Hubwerkes angenommen wird, auch eine Annahme über die Anzahl der Biegewechsel für das eingesetzte Seil berechnet werden, die das Seil ertragen muss.

Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit basiert auf einem synthetischen Wöhlerliniensystem nach den Gleichungen (1) und (2), in dem die (ertragbaren) Biegewechsel in Abhängigkeit der Seilzugkraft und dem Durchmesser Verhältnis von Seilrollen- zu Seildurchmesser (D/d) beschrieben werden (vgl. [1], die Nomenklatur der nachfolgenden Gleichungen entspricht ISO 16625 [1]).

$$w = \left(\frac{F_{\text{ref}}}{F} \right)^m \times w_{\text{ref}} \quad (1)$$

mit

$$m = 2,6 \times \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) - 1,6 \quad (2)$$

Neu bei diesem Ansatz, auch im Sinne eines Standards, ist die Beschreibung eines theoretischen Referenzpunktes, der durch eine Referenzkraft F_{ref} und eine Referenzbiegewechselzahl w_{ref} als Schnittpunkt aller Wöhlerlinien mit verschiedenen D/d -Verhältnissen beschrieben ist (siehe Bild 2). Dieser Schnittpunkt ist für verschiedene Seilkonstruktionen unterschiedlich, wobei die Neigungen der Wöhlerlinien nur vom D/d -Verhältnis abhängen und somit unabhängig von der Seilkonstruktion sind (siehe Gleichung (2)). Die Gleichungen (3) bis (6) beschreiben die Anpassung (horizontale und vertikale Korrektur) des Referenzpunktes anhand der verschiedenen Einflussfaktoren, sowohl die Einflüsse auf die Referenzkraft als auch die auf die Referenzbiegewechselzahl.

$$F_{\text{ref}} = \frac{F_{\text{min}}}{\gamma_{\text{ref}}} \times f_{\text{F}} \quad (3)$$

mit,

$$f_F = f_{F1} \times f_{F2} \times f_{F3} \times f_{F4} \quad (4)$$

Die Einflüsse $f_{F,i}$ auf die Referenzkraft in Gleichung (4) bestehen in der Berücksichtigung von Drahtnenntfestigkeit, Seilablenkwinkel, Seilkonservierungsstoff und Rillenform.

$$w_{\text{ref}} = 600 \times f_w \quad (5)$$

mit,

$$f_w = f_{w1} \times f_{w2} \quad (6)$$

Die Einflüsse $f_{w,i}$ auf die Referenzbiegewechselzahl in Gleichung (6) beinhalten den eigentlichen „Rope type factor“ f_{w1} und einen weiteren Faktor f_{w2} für den Einfluss des Seildurchmessers.

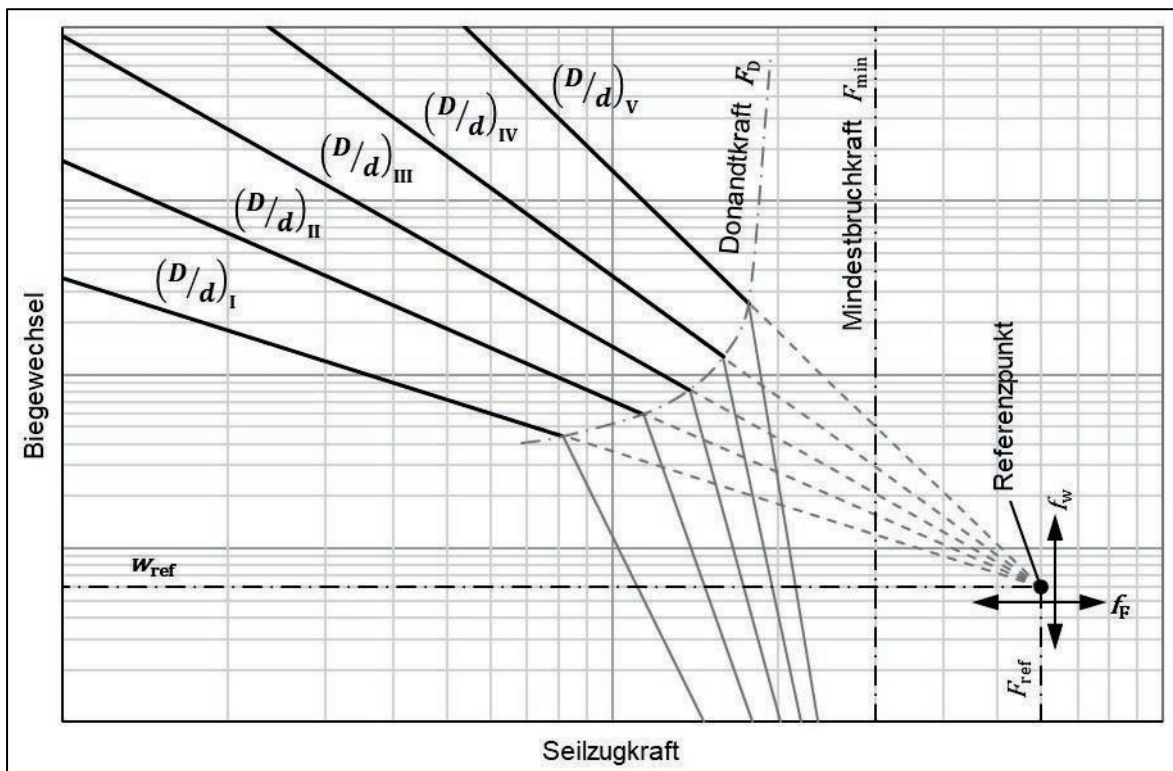


Bild 2: Darstellung des synthetischen Wöhlerliniensystems nach ISO 16625 [1]

Für die Evaluierung des Ansatzes der ISO 16625 [1] wurde das Wöhlerliniensystem mit den beiden Systemen der genannten Regressionsmethoden unter Berücksichtigung des Ermüdungsnachweises in eine Darstellung gebracht. Damit war eine Justierung des „Rope type factors“ und weiterer im Standard berücksichtigter Parameter und Faktoren möglich, nicht zuletzt des Referenzpunktes selbst. Das Ziel dabei war es, die dem Nachweis zugrundeliegenden Biegezahl mit belastbaren Testergebnissen abzugleichen. Da die beiden unabhängigen Regressionsmethoden auf einer Vielzahl von Dauerbiegeversuchen basieren, konnte dies erreicht werden.

Im Sinne eines Standards und vor dem Hintergrund der Komplexität des neuen Ansatzes der ISO 16625 [1] wurde zunächst die Untergliederung des „Rope type factors“ auf die Anzahl Außenlitzen sowie auf die separate Behandlung von nicht-drehungsfreien und drehungsarmen Litzenseilen beschränkt. Damit wird die Konstruktion des Seils berücksichtigt, die primär die ertragbare Anzahl an Biegewechseln beeinflusst.

Konkret wurden für die einzelnen Stufen des Faktors Referenzseile ausgewählt und die Anzahl der Biegewechsel bis zur Ablegereife mit den beiden Regressionsmethoden Stuttgart und Leipzig in einem breiten Bereich von Seilzugkräften (bzw. Sicherheitsfaktoren) und Durchmesserhältnissen (Definitionsbereich D/d von 10 bis 63) verglichen. Die rechnerisch abgeschätzten Biegewechselzahlen bis zum Erreichen der Ablegereife wurden zunächst mit der Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % ermittelt. Tabelle 1 zeigt die dabei verwendeten Seilkonstruktionen und die entsprechenden „Rope type factors“, wie sie in der aktuellen Fassung der ISO 16625 [1] spezifiziert sind.

Tabelle 1: Referenzdrahtseile für die Ermittlung der „Rope type factors“

Seiltyp	Anzahl Außenlitzen bzw. RCN 0	Seilkonstruktion für Ermittlung von f_{w1}	„Rope type factor“ f_{w1}
nicht-drehungsfreie Drahtseile	< 6, (Bsp. RCN.21)	4 x 29 F	0,4 ¹⁾
	6, (Bsp. RCN.04)	6 x 36 WS - IWRC	0,8
	8	8 x 19 S - IWRC	1,0
	10	10 x 36 WS - IWRC	1,1
drehungsarme Drahtseile	< 6, (Bsp. RCN.21)	---	0,4 ¹⁾
	11-18 (Bsp. RCN.23)	35(W) x 7	0,7

¹⁾ Vergleichsrechnung nur gegen Versuchsdaten „Methode Leipzig“

In den folgenden Bildern 3 bis 5 sind die Ergebnisse in Form von Vergleichsdiagrammen dargestellt und zeigen neben den Resultaten der Regressionsmethoden die ertragbaren Biegewechselzahlen, die sich bei Erreichen des Grenzzustands der ISO 16625 [1] ergeben, d. h. die Grenzseilkraft $F_{Rd,f}$ wäre gleich der Bemessungsseilkraft $F_{Sd,f}$ (vgl. [1]).

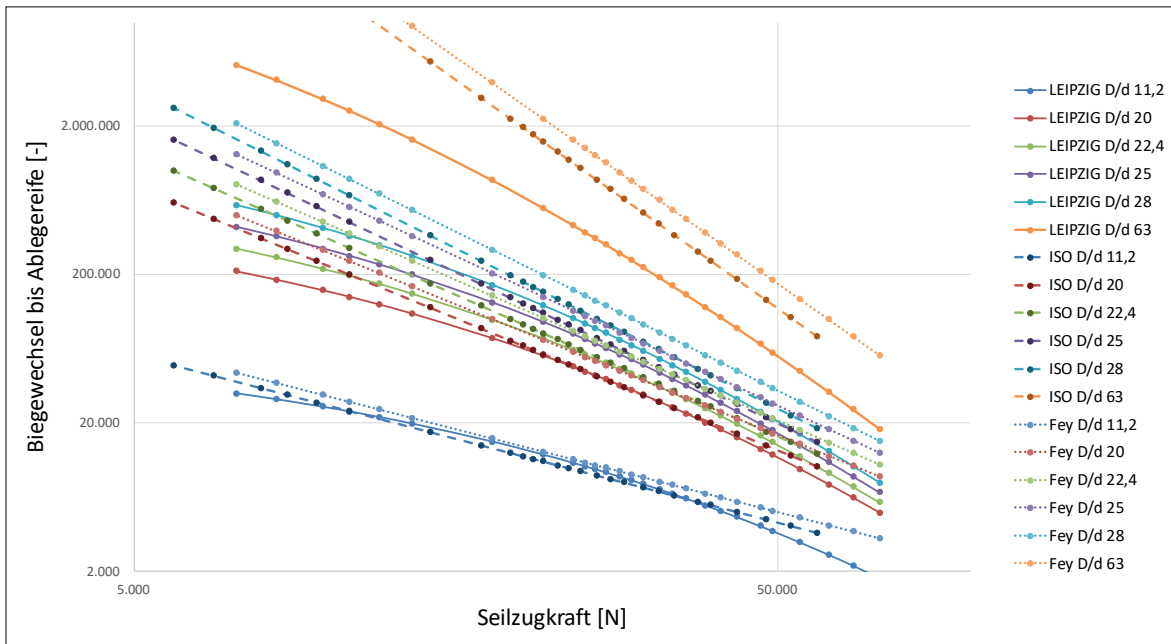


Bild 3: Vergleichsdiagramm (Lebensdauerkurven) für 8-litzige Seile; LEIPZIG mit $NE^{(10\%)}$ und Fey (Stuttgart) mit NA10, d. h. jeweils bis Abergereife mit Ausfallwahrscheinlichkeit 10 %

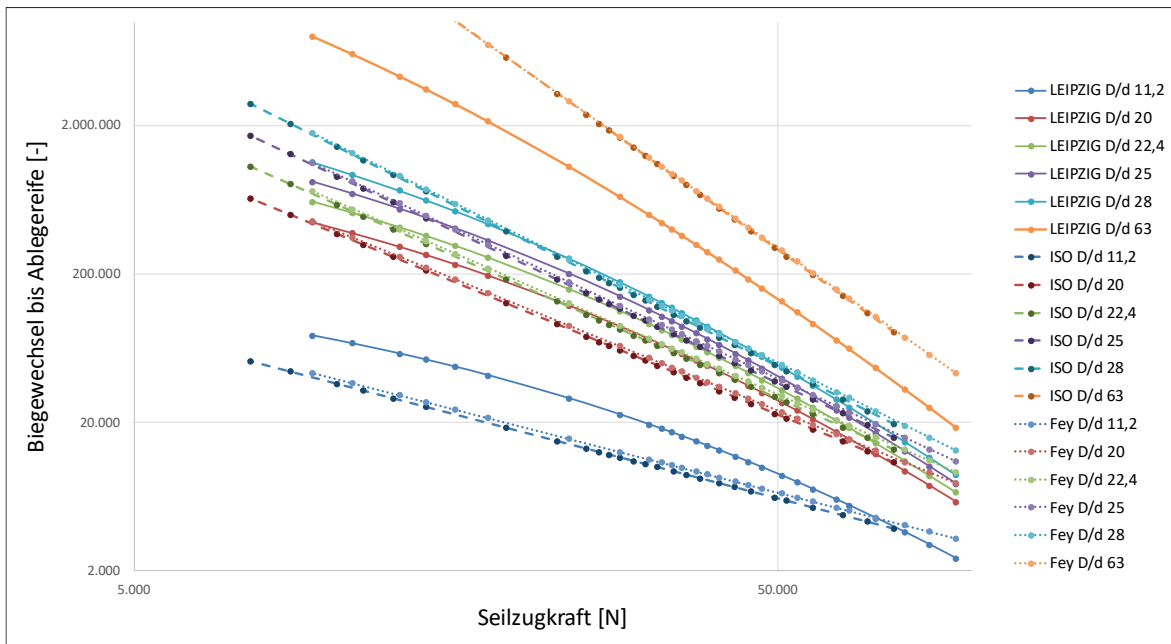


Bild 4: Vergleichsdiagramm (Lebensdauerkurven) für 10-litzige Seile; LEIPZIG mit $NE^{(10\%)}$ und Fey (Stuttgart) mit NA10, d. h. jeweils bis Abergereife mit Ausfallwahrscheinlichkeit 10 %

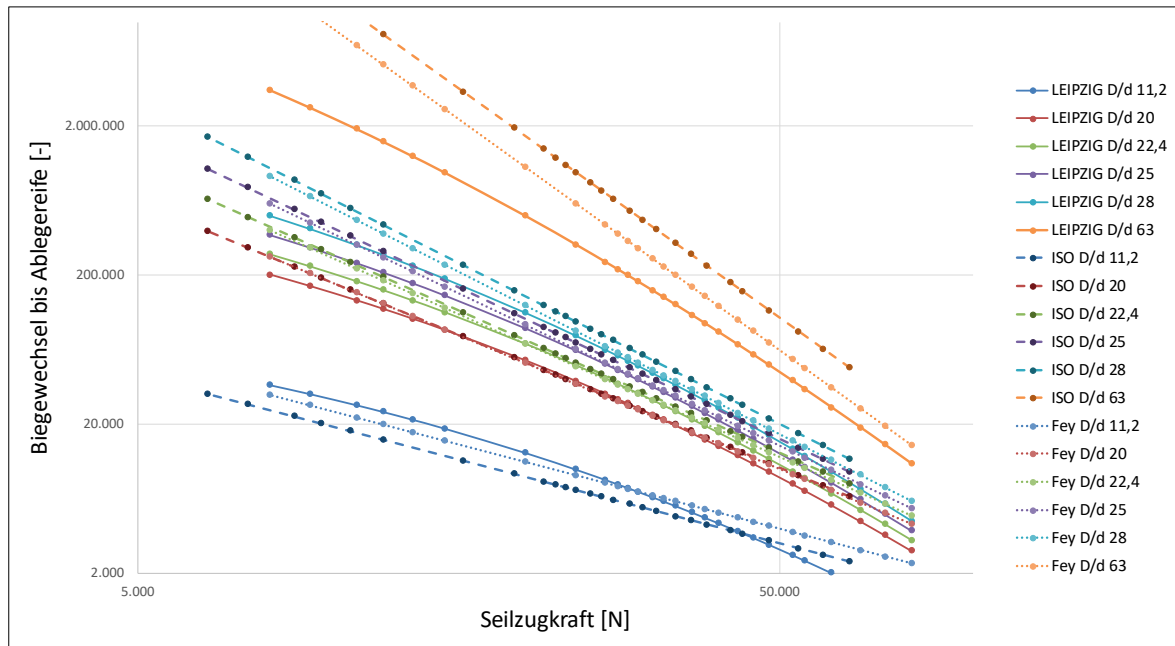


Bild 5: Vergleichsdiagramm (Lebensdauerkurven) für drehungsarme Seile RCN.23 [15]; LEIPZIG mit $NE^{(10\%)}$ und Fey (Stuttgart) mit NA10, d. h. jeweils bis Abergereife mit Ausfallwahrscheinlichkeit 10 %

Die hier dargestellten Ergebnisse des Vergleiches gehen vom Erreichen der Abergereife mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % aus. Der Abgleich der Wöhlerliniensysteme enthält hinsichtlich der Ergebnisse des Ansatzes der ISO 16625 [1] einen Sicherheitsbeiwert der Ermüdungsfestigkeit γ_{rf} von 1,25. Die beiden Regressionsmethoden beschreiben den charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit und beinhalten daher keinen Sicherheitsbeiwert. Damit stellt sich die Frage: Welcher charakteristische Wert der Ermüdungsfestigkeit liegt der ISO 16625 [1] zugrunde?

Wie in [12] dargestellt, geht es bei einem Sicherheitsnachweis um eine Absicherung gegen ein Versagen des Bauteils. Diese Grenze wird üblicherweise durch ein Quantil der Überlebenswahrscheinlichkeit des Bauteils nach dem Stand der Technik spezifiziert. Im Sinne eines konsistenten Sicherheitsnachweises wurde in der FDIS-Version von ISO 16625 [1] das Grenzkriterium des Betriebsfestigkeitsnachweises formal auf die Bruchkraft-Wöhlerlinie (Litzenbruch) mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7 %, wie beim Nachweis des Stahltragwerks, bezogen. „Zu dieser Grenze wird dann ein geeigneter Abstand eingehalten, der ein rechtzeitiges Erkennen des Ausfalls ermöglicht. Bei Seilen ist dieser Zeitpunkt die Abergereife – das Ende der Betriebsphase. In der Literatur [2] wird an verschiedenen Stellen ein Wert von 80 % der Bruchlastbiegewechselzahl vorgeschlagen. Die Umrechnung dieses „horizontalen“ Abstandes (zur Wöhlerlinie) in einen „vertikalen“ Abstand ergibt den Sicherheitsbeiwert. Aufgrund des variablen Wöhlerlinienexponenten würde sich ein variabler Sicherheitsbeiwert ergeben. Da dies in der Praxis ungünstig ist, sollte ein einheitlicher Wert festgelegt werden. Der in der Norm vorgeschlagene Sicherheitsbeiwert der Ermüdungsfestigkeit γ_{rf} von 1,25 scheint geeignet.“ (siehe [12]).

In Bild 6 ist ein Vergleich der beiden Grenzkriterien, verschiedener Ausfallwahrscheinlichkeiten und Berechnungsmethoden dargestellt. Zunächst erfolgt die Darstellung des Grenzzustands der Abergereife nach der Methode „Stuttgart“ mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit

von 10 % (SA10). Danach folgen 2 Liniensätze mit der Darstellung des Grenzzustands des Litzenbruchs nach der Methode „Stuttgart“ mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % (S10) bzw. 2,3 % (S2,3). Die letzten beiden Liniensätze entstammen der Berechnungsmethode der ISO 16625 0. Einmal mit der durchgezogenen grauen Linie, die den charakteristischen Wert des Grenzzustands des Litzenbruchs $F_{Rc,f}$ (ISO-C) mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7 % darstellen soll und der 2. Liniensatz der durchgezogenen schwarzen Linie, die den Bemessungswert des Grenzzustands $F_{Rd,f}$ abbildet. Alle Linien sind für D/d -Verhältnisse von 10 bis 63 dargestellt.

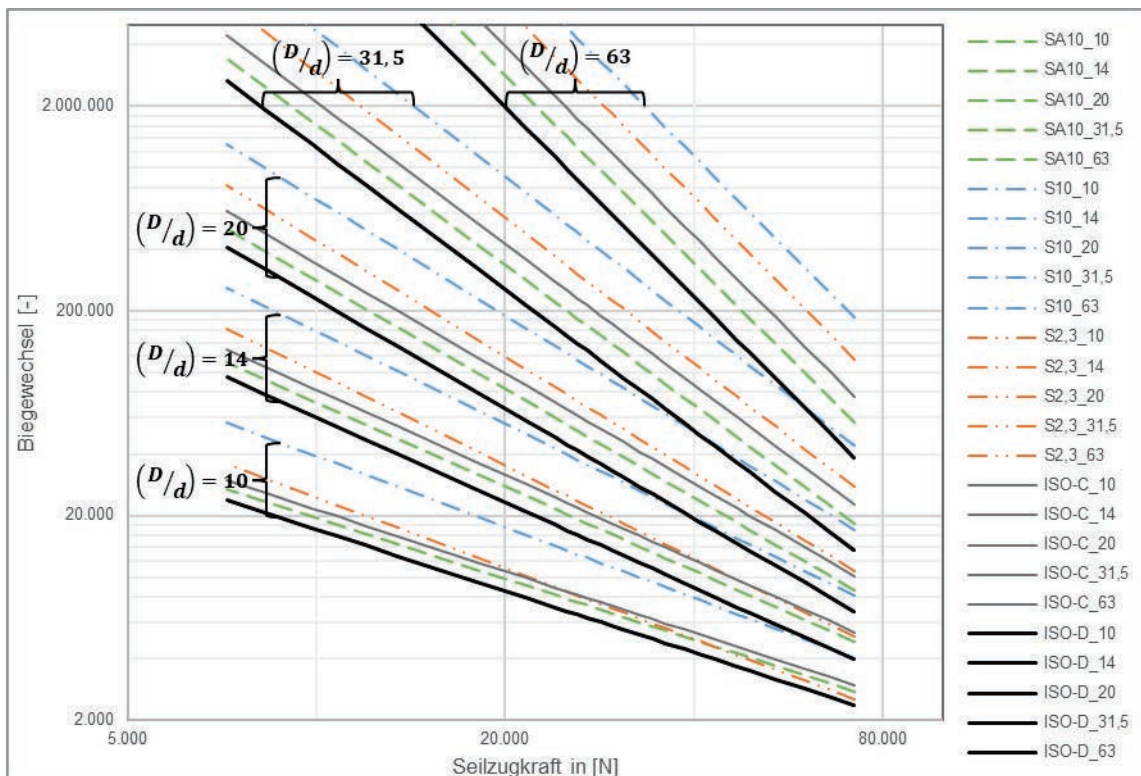


Bild 6: Vergleichsdiagramm der Wöhlerkurven für 8-litzige Seile; mit unterschiedlichem Grenzkriterium und Ausfallwahrscheinlichkeiten

Da der Bemessungswert des Grenzzustands der Ermüdungsfestigkeit $F_{Rd,f}$ kleiner ist als der Grenzzustand der Ablegereife nach Feyrer (SA10), kann das Bemessungskonzept als konservativ angesehen werden. Die vorgeschlagenen „Rope type factors“ wurden durchweg „auf der sicheren Seite liegend“ angenommen.

Durch die Spezifikation des Grenzzustands besteht für den Kranhersteller in Zusammenarbeit mit dem Seilhersteller jedoch die Möglichkeit, die Werte im Rahmen des Bemessungskonzepts zu optimieren und das konkrete Ermüdungsverhalten von Seil und Seiltrieb in den spezifizierten Parametern zu berücksichtigen.

4 Seilanzahl und Seiltriebauslegung

Ein wesentlicher, den Nachweis in ISO 16625 [1] beeinflussender Parameter ist die Anzahl der Seile im Auslegungszeitraum des Krans. Dieser Parameter fließt in den Seilkraftverlaufparameter (das bezogene Beanspruchungskollektiv) ein und beeinflusst damit die Grenzseilkraft (vgl. Gleichungen (29), (32) und (33) in [1]). Durch den in Kapitel 3 dargestellten Abgleich des synthetischen Wöhlerliniensystems mit den Regressionsmethoden für

laufende Drahtseile liegt die Biegewechselzahl w_{tot} , die beim Ermüdungsnachweis zugrunde gelegt werden muss, in einer zu den weiteren Seiltriebsparametern entsprechenden realistischen Größenordnung. Durch die Anwendung der Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % in Bezug auf die Ablegereife kann diese als hinreichend sicher angesehen werden, um Inspektionsintervalle für die Seiltriebe an dem jeweiligen Kran festzulegen. Damit ist ein wesentlicher Kritikpunkt der DIN EN 13001-3-2 [5] (vgl. 1.2) behoben. Eine dem neuen Ansatz entsprechende Hilfestellung zur Ermittlung der anzunehmenden Seilanzahl ist in ISO 16625 [1] in Anhang E beschrieben.

Unabhängig von den zu führenden Nachweisen im neuen Konzept der ISO 16625 kann es hilfreich sein, die bisherigen Konzepte zur Seiltriebauslegung weiterhin zu nutzen. Besteht die Aufgabe darin, einen Seiltrieb von Grund auf neu zu gestalten, ist die Auslegung des Seiles und der Seilrollen ein wesentlicher Punkt für die Dimensionierung der Gesamtanwendung. Hinsichtlich der Seiltriebauslegung ist es möglich, die Laufzeit-basierten Systeme der ISO 16625 (2013) oder der DIN 15020, welche konkrete Vorgehensweisen für die Auslegung liefern, zu verwenden und dies als Basis für die aktuellen normativen Nachweise zugrunde zu legen. Eine aktualisierte Fassung dieses Auslegungsprinzips wurde mit der Richtlinie VDI 5020 [15] umgesetzt. Darin wurden die bestehenden Lücken der DIN 15020 in Bezug auf höhere Drahtfestigkeiten und moderne Seilkonstruktionen geschlossen.

Zusammenfassung

Die hier dargestellte Vorgehensweise und die Hintergründe zur Ermittlung des „Rope type factor“ verschiedener Seilkonstruktionen untermauern die Funktionsweise des Ermüdungsnachweises in der ISO 16625 [1]. Der Nachweis stellt gegenüber den bisherigen Konzepten eine wesentliche Weiterentwicklung in der Normung für Seiltriebe dar sowie auch hinsichtlich der formalen Darstellung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises von Stahldrahtseilen. Die konkreten Größenordnungen von Betriebs- und Lebensdauern laufender Drahtseile in Form ertragbarer Biegewechselzahlen sind nun ein sichtbarer Bestandteil des Nachweises. Der erfahrungsgemäßen Tendenz bspw. einer längeren Betriebsdauer von 8-litzigen Seilen gegenüber 6-litzigen Seilen wird somit in hinreichender Weise Rechnung getragen. Mit dieser Norm ist neben der Bemessung des Seiltriebs auch eine Abschätzung der Aufliegezeit von Drahtseilen grundsätzlich möglich.

Die ISO 16625 [1] bietet mit der Methode der Grenzzustände mehr Flexibilität für die Gestaltung und den Sicherheitsnachweis von Seiltrieben, wobei die Betriebsdauern der Drahtseile explizit berücksichtigt werden. Die enthaltenen „Rope type factors“ sind ein erster vorsichtiger Schritt zur Klassierung und Berücksichtigung verschiedener Seilkonstruktionen, die in Zukunft weiterentwickelt werden können. Das zugrundeliegende synthetische Wöhlerliniensystem kann durch weitere Justierung auf Basis fortlaufender Lebensdaueruntersuchung verbessert werden.

Abschließend muss jedoch auf die naturgemäße hohe Streuung der Betriebs- und Lebensdauern laufender Drahtseile hingewiesen werden. Eine punktgenaue Vorhersage von ertragbaren Biegewechselzahlen wird aufgrund der komplexen Einflussgrößen bei Drahtseilen absehbar nicht möglich sein, weshalb neben einer sachgerechten Auslegung eines Seiltriebs immer eine regelmäßige, angepasste und gewissenhafte Inspektion erforderlich sein

wird. Zur Inspektion der Drahtseile und Ablegekriterien siehe DIN ISO 4309 [16].

Quellenverzeichnis:

- [1] ISO/FDIS 16625:2024, Cranes and hoists – Selection of wire ropes, drums and sheaves.
- [2] Feyrer, K.; Wehking, K.-H.: FEYRER – Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit, 3. Auflage, Berlin: Springer, 2018
- [3] Steinbach, G.; Anders, M.; Ryk, D.: Betriebsdauer in Seiltrieben – Berechnung der Biegewechselzahl – Methode "Leipzig", in: Hebezeuge Fördermittel, Nr. 5, pp. 34-35, 2018
- [4] Anders, M.: Ein Beitrag zur Lebensdauerabschätzung laufender Drahtseile. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen. Technische Universität Dresden, 2023. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-854584>
- [5] DIN EN 13001-3-2:2015, Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben.
- [6] Steinbach, G.; Anders, M.; Ryk, D.: Drahtseile in Seiltrieben nach DIN EN 13001-3-2:2014-12 - Bemessungsbiegewechselzahl und Realbiegewechselzahl, in: Hebezeuge Fördermittel, Bd. Exklusivbeitrag, 2016
- [7] Anders, M.; Ryk, D.; Steinbach, G.: Betriebsdauer und Sicherheit der Seiltriebe - Einfluss auf die Seiltriebauslegung, in: Begleitband zur 26. Kranfachtagung Technische Universität Dresden, Dresden, 2018
- [8] Golder, M., Anders, M., Novak, G., Eiwand, Ch.: New approach for ISO 16625 in Proceedings of the XXIII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics, MHCL 2019, Vienna, Austria
- [9] Reinl, J.; Golder, M.: Wire ropes in Crane Applications – Current State of the Standardization Work of ISO/WD 16625. innoTRAC Journal. Volume 1 (2020), pp. 37–46. URL: <https://doi.org/10.14464/innotrac.v1i0.456>.
- [10] Golder, M.; Reinl, J.: Wire ropes in crane applications – Current state of the standardization work of ISO/WD 16625 – Requirements and Objectives. 9. Erfahrungsaustausch: Erfahrungen mit der Anwendung der EN 13001 "Krane – Konstruktion – allgemein", Essen, 29. November 2021. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-771928>.
- [11] Schöneck, T.; Dallinger, N.; Schmieder, A.; Maximov, I.: Theoretical comparison of ISO/WD 16625:2023 with DIN EN 13001-3-2:2015 for the selection and verification of wire ropes for cranes and hoists. innoTRAC Journal. Volume 3 (2024), pp. 19-38. URL: <https://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/ojs/index.php/innoTRAC/article/view/801>.
- [12] Eiwand, Ch.; Golder, M.: Verifikation von Stahldrahtseilen nach ISO/CD 16625:2023, in: Begleitband zur 31. Internationalen Kranfachtagung

Ruhruniversität Bochum, Bochum, 2023

- [13] DIN 15020:1974, Hebezeuge – Grundsätze für Seiltriebe
- [14] ISO 4308:2003, Cranes and lifting appliances – Selection of wire ropes
- [15] VDI 5020:2024: Berechnung von Seiltrieben in Hebezeugen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2024
- [16] DIN ISO 4309:2021-08, Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage (ISO 4309:2017)

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Sicherheit in der digitalen Ära: Bedeutung und Auswirkung von Cybersecurity für die Kranbranche – Eine Erklärung von NIS2 und CRA

Brigitte Schulz

Thomas Foppe

SIEMENS

Dipl.-Ing. Brigitte Schulz

Siemens AG

Frauenauracherstr. 80

91056 Erlangen

Sicherheit in der digitalen Ära: Bedeutung und Auswirkung von Cybersecurity für die Kranbranche – Eine Erklärung von NIS2 und CRA

Die Cyber-Bedrohungen für Unternehmen nehmen weiter zu. Mehr als jedes zweite Unternehmen war im letzten Jahr betroffen. Die Kosten der Cyberkriminalität werden bis 2028 auf 13,82 Billionen US-Dollar steigen [1]. Um dieser Bedrohung zu begegnen, hat der Gesetzgeber reagiert. Die EU-Richtlinien NIS2 und CRA legen nun einheitliche Cybersicherheitsanforderungen für kritische Infrastrukturen und Produkthersteller fest. Die Richtlinien verpflichten Unternehmen zu umfassenden Schutzmaßnahmen und Meldepflichten. Bei Verstößen drohen hohe Strafen. Unternehmen müssen daher schnell handeln, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Nur wer proaktiv ein ganzheitliches Cybersicherheitskonzept umsetzt, kann langfristig wettbewerbsfähig bleiben.

1 Einleitung - Cyber-Bedrohungen für Unternehmen nehmen weiter zu - Gesetzgeber reagiert mit neuen Regulierungen

Cyberkriminalität stellt weiterhin eine erhebliche Bedrohung für Unternehmen in Deutschland dar. Kein Tag vergeht, an dem nicht über Cyberangriffe auf Unternehmen berichtet wird. Mehr als jedes zweite Unternehmen war im vergangenen Jahr von digitaler Sabotage betroffen, so der Branchenverband Bitkom [2].

Laut einer aktuellen Studie des Branchenverbands waren 2023 rund 73% der befragten Firmen Opfer von Cyberangriffen. Die am häufigsten auftretenden Formen waren Schadsoftware-Infektionen (54%), Phishing-Mails (46%) und Denial-of-Service-Attacken (28%) [2]. Cyberangriffe können für Unternehmen verheerende Folgen haben - die Schadenssummen reichen von kleineren Beträgen bis hin zu Millionenverlusten [3].

So erwartet die Statista's Market Insights, dass die Cyberkriminalität in den kommenden Jahren stark ansteigen wird. Laut Schätzungen dieser Studie werden die globalen Kosten der Cyberkriminalität von 9,22 Billionen US-Dollar im Jahr 2024 auf 13,82 Billionen US-Dollar bis 2028 wachsen [4].

Seit einigen Jahren steht insbesondere die Industrie durch die Digitalisierung der Fertigung und die Vernetzung der Produktionsprozesse im Fokus der Kriminellen. Die Angreifer versuchen, sich Zugang zu den Netzwerken zu verschaffen, um Daten zu stehlen oder den Betrieb zu stören. Die Folgen von erfolgreichen Cyber-Attacken können für produzierende Unternehmen verheerend sein. Ausfälle oder Manipulationen von Produktionsanlagen können zu erheblichen Schäden und Produktionsausfällen führen.

Die Gründe für die steigende Bedrohungslage sind vielfältig: Zunehmende Digitalisierung, Fachkräftemangel in der IT-Sicherheit und die Professionalisierung der Cyberkriminellen. Hinzu kommt, dass Mitarbeiter oft unzureichend für Cyber-Bedrohungen sensibilisiert sind und unbeabsichtigt Einfallstore für Angriffe schaffen.

Cyber-Sicherheit muss daher als integraler Bestandteil von Industrie 4.0-Konzepten behandelt werden. Nur so können Unternehmen die vielfältigen Bedrohungen effektiv adressieren und ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern. Daher ist es unerlässlich, dass Unternehmen ein umfassendes Cybersicherheitskonzept implementieren. Das bedeutet, dass Unternehmen das Thema Cyber-Sicherheit ganzheitlich angehen müssen,

um Schäden zu vermeiden, d. h. es müssen sowohl die Schutzmechanismen der IT als auch die Betriebstechnologie (OT) abgeschottet werden.

Um dieser Bedrohungslage zu begegnen, hat auch der Gesetzgeber reagiert. Die Europäische Union hat zwei wichtige Regulierungen erlassen: die EU NIS2-Richtlinie (Network and Information Systems Security Directive 2) [5] und die Verordnung über Cybersicherheit (CRA: Cybersecurity Resilience Act) [6].

Die EU NIS2- und die CRA bieten Anlagenbetreibern einen wichtigen regulatorischen Rahmen, um ihre Cybersicherheit zu stärken. Sie zielt darauf ab, die Resilienz und Widerstandsfähigkeit von Organisationen in der gesamten Lieferkette zu erhöhen. Während EU NIS2 rechtliche Vorgaben und Mindeststandards für kritische Infrastrukturen definiert, soll die CRA die Hersteller dazu verpflichten, Cybersicherheit von Beginn an in die Produktentwicklung zu integrieren. Ziel ist es, die Cybersicherheit von Produkten und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu gewährleisten.

2 Die EU NIS2-Richtlinie – Verschärfte Cybersicherheitsanforderungen für kritische Infrastrukturen in Europa

Die EU NIS2-Richtlinie ist eine Weiterentwicklung der 2016 eingeführten NIS-Richtlinie. Sie legt einheitliche Cybersicherheitsanforderungen für alle 27 EU-Mitgliedsstaaten sowie Island, Liechtenstein und Norwegen fest [5].

Ursprüngliches Ziel war, dass alle EU-Mitgliedsstaaten diese EU-Richtlinie innerhalb von 21 Monaten, also bis spätestens zum 17. Oktober 2024, in nationales Recht umsetzen müssen.

In Deutschland werden die Regelungen der EU NIS2 mit dem NIS-2-Umsetzungs- und Cybersicherheitsstärkungsgesetz (NIS2UmsuCG) [7] in nationales Recht umgesetzt. Das NIS2-Umsetzungsgesetz wurde im Juli 2024 im Kabinett beschlossen und befindet sich derzeit noch im Gesetzgebungsverfahren [7].

Die Maßnahmen in der EU-Richtlinie NIS2 und der deutschen Umsetzung durch das NIS2-Umsetzungsgesetz sind größtenteils identisch (NIS2UmsuCG). Das deutsche Gesetz erweitert die Vorgaben jedoch leicht für den Bereich der kritischen Infrastrukturen (KRITIS). Diese Erweiterungen erfolgen durch das zusätzlich erlassene KRITIS-Dachgesetz [8], das weitere, über die EU-Richtlinie hinausgehende Schutzmaßnahmen, Meldepflichten und Prüfanforderungen für KRITIS-Betreiber in Deutschland festlegt. Somit geht der deutsche Gesetzgeber beim Schutz kritischer Infrastrukturen über die Mindeststandards der EU-Richtlinie NIS2 hinaus und schafft einen stärkeren nationalen Schutzrahmen.

Kernpunkte der EU NIS2-Richtlinie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Deutliche Ausweitung des Anwendungsbereichs: Es werden deutlich mehr Branchen und Unternehmen erfasst als in der vorherigen NIS-Richtlinie. Dabei wird zwischen Sektoren mit hoher Kritikalität und kritischen Sektoren unterschieden (Tabelle 1), für die jeweils spezifische Anforderungen gelten. Der Hauptunterschied liegt in der Abstufung der zu erfüllenden Pflichten und Anforderungen sowie der

Beaufsichtigung und Sanktionierung durch die zuständigen Aufsichtsbehörden.

Tabelle1: Übersicht der kritischen Sektoren und der Sektoren hoher Kritikalität nach EU NIS2

11 Sektoren mit hoher Kritikalität:	7 kritische Sektoren:
Energie (Strom, Öl, Gas)	Logistik: Post und Kurier
Transport (Luftfahrt, Schifffahrt, Schiene, Straße)	Abfallwirtschaft
Gesundheitswesen	Lebensmittel (Produktion, Verarbeitung und Vertrieb)
Bankwesen	Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren (z. B. Maschinenbau, elektrische Ausrüstung, Fahrzeugbau)
Finanzmärkte	Digitale Dienste
Gesundheit	Forschung
Trinkwasser	Chemikalien
Abwasser	
Digitale Infrastruktur	
Öffentliche Verwaltung	
Weltraum	
Verwaltung von ICT Service Management	

- Verstärkte Berichtspflicht: Unternehmen müssen Cybersicherheitsfälle melden und regelmäßig über Risiken und Maßnahmen berichten.
- Hohe Strafandrohungen: Für besonders wichtige Einrichtungen und kritische Anlagen liegen die Bußgelder bei bis zu zehn Millionen Euro oder mindestens zwei Prozent des Jahresumsatzes, je nachdem, welcher Betrag höher ist. Für wichtige Einrichtungen liegen die Bußgelder bei bis zu sieben Millionen Euro oder mindestens 1,4 Prozent des Jahresumsatzes, je nachdem, welcher Betrag höher ist (Artikel 21 und 23). Darüber hinaus können auch natürliche Personen, also leitende Angestellte, für Pflichtverletzungen haftbar gemacht werden.
- Verbesserte Koordination: Nationale Behörden sollen stärker zusammenarbeiten und Informationen austauschen.
- Erhöhte Resilienz: Unternehmen müssen angemessene technische und organisatorische Maßnahmen ergreifen, um Ausfälle und Angriffe zu verhindern.

Insgesamt soll die EU NIS2-Richtlinie die Cybersicherheit kritischer Infrastrukturen in Europa deutlich stärken und Unternehmen zu mehr Prävention und Reaktionsfähigkeit verpflichten.

Die EU-Richtlinie NIS2 legt fest, welche Sektoren als kritische Infrastruktur gelten. Darunter fällt auch das verarbeitende Gewerbe, zu dem der Maschinenbau zählt (siehe Tabelle 1). Die konkret betroffenen Unternehmen des Maschinenbaus sind in der NACE-Klassifizierung (Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft), Abschnitt C, Abteilung 28 genannt [9]. In der Abteilung 28.9 ist explizit die "Herstellung von Hebezeugen und Fördermitteln" aufgeführt. Somit fallen Hersteller von verschiedenen Krantypen wie z. B. Turm-, Mobilkrane, Brückenkrane, Portalkrane unter die kritischen Sektoren der NIS2-Richtlinie und müssen somit die damit verbundenen spezifischen Anforderungen und Verpflichtungen der EU NIS2-Richtlinie erfüllen. Damit sind diese aufgefordert, ihre Cybersicherheitsmaßnahmen, Notfallpläne und Meldepflichten entsprechend anzupassen. Nur so können sie ihrer Verantwortung als Anbieter systemrelevanter Technologien gerecht werden.

Anders als bei der bislang geltenden Gesetzgebung zur kritischen Infrastruktur fallen unter die neue Richtlinie bereits Unternehmen mit 50 Mitarbeitenden und einem Jahresumsatz bzw. einer Jahresbilanz von über 10 Mio. EUR.

Aber auch mittelgroße und kleine Firmen können von den Sicherheitsanforderungen größerer Organisationen betroffen sein, für die sie als Dienstleister und Lieferanten tätig sind. In solchen Fällen sind sie unter Umständen gezwungen, ebenso strenge Sicherheitsvorkehrungen einzuhalten, um die gesamte Lieferkette zu schützen.

Ein Beispiel hierfür ist, wenn ein Automobilhersteller seine Zulieferer verpflichtet, bestimmte Cybersecurity-Technologien oder -Methoden einzuführen. Dies dient dazu, dass der Automobilhersteller selbst nicht gegen geltende EU-Vorgaben verstößt. Folglich müssen auch mittelgroße und kleine Unternehmen, die in Zulieferketten eingebunden sind, ihre Cybersicherheit auf ein hohes Niveau bringen, um den Anforderungen ihrer Auftraggeber zu genügen.

Zu den wichtigsten EU NIS2-Maßnahmen nach §30 [5] zählen:

1. Risikoanalyse und Risikomanagement:
 - Durchführung einer umfassenden Risikoanalyse für kritische Infrastrukturen und Dienste
 - Einführung eines Risikomanagementprozesses zur Identifizierung, Bewertung und Behandlung von Risiken
2. Sicherheitsmaßnahmen:
 - Implementierung geeigneter technischer und organisatorischer Sicherheitsmaßnahmen
 - Schutz vor Cyber-Angriffen, Ausfällen und anderen Störungen
 - Gewährleistung der Verfügbarkeit, Integrität und Vertraulichkeit von Systemen und Daten
3. Notfallplanung und Kontinuitätsmanagement:
 - Erstellung und Umsetzung von Notfallplänen
 - Sicherstellung der Aufrechterhaltung kritischer Funktionen im Krisenfall
 - Regelmäßiges Testen und Aktualisieren der Notfallpläne

4. Meldepflichten:

- Meldung von Vorfällen, die erhebliche Auswirkungen auf die Erbringung der Dienste haben, an die zuständigen Behörden
- Zusammenarbeit mit den Behörden bei der Untersuchung und Bewältigung von Vorfällen

5. Informations- und Kommunikationstechnologie:

- Einsatz sicherer und zuverlässiger IT-Systeme
- Regelmäßige Aktualisierung und Wartung der Systeme
- Schutz vor Schwachstellen und Cyberangriffen

6. Personalmanagement:

- Sensibilisierung und Schulung der Mitarbeiter zu IT-Sicherheit und Cybersicherheit
- Sicherstellung der Kompetenz und Qualifikation des Personals

Die EU NIS2-Richtlinie stellt einen wichtigen Meilenstein dar, um die Cybersicherheit kritischer Infrastrukturen in Europa zu stärken und Unternehmen zu mehr Prävention und Reaktionsfähigkeit zu verpflichten.

Mit der Umsetzung der NIS2-Richtlinie in nationales Recht schaffen die EU-Mitgliedsstaaten einen einheitlichen Rechtsrahmen, der Unternehmen in Schlüsselbranchen zu umfassenden Cybersicherheitsmaßnahmen zwingt und so den Schutz lebenswichtiger Infrastrukturen in ganz Europa deutlich verbessert.

3 Neue Cybersicherheitsanforderungen für Produkte in der EU

Parallel zur EU NIS2-Richtlinie ist auf EU-Ebene der Cyber Resilience Act (CRA) in Kraft getreten. Während die EU NIS2-Richtlinie sich auf die Absicherung kritischer Infrastruktur fokussiert, adressiert die CRA die Produktebene. Die CRA legt erstmals EU-weit einheitliche Cybersicherheitsanforderungen für Produkte mit digitalen Elementen fest, die auf dem EU-Markt vertrieben werden [4]. Dazu gehören Software- oder Hardwareprodukte, einschließlich Komponenten, die separat in Verkehr gebracht werden. Hersteller müssen nachweisen, dass ihre Produkte im Einklang mit den wesentlichen Cybersicherheitsanforderungen entwickelt, hergestellt und in Verkehr gebracht wurden. Außerdem legt CRA fest, dass diese Produkte bestimmte Cybersicherheitsanforderungen erfüllen müssen, wie z. B. eine sichere Standardkonfiguration, den Schutz von Datenintegrität und -verfügbarkeit sowie Mechanismen für Schwachstellenmanagement und Sicherheitsupdates.

- Für Hersteller gibt es dann eine Übergangsphase von 21 Monaten, in der sie ihre Produkte an die neuen Anforderungen anpassen müssen. Die vollständige Umsetzung aller CRA-Pflichten wäre dann ab dem 4. Quartal 2027 verpflichtend [10].

Zentrale Elemente des CRA sind:

- Breiter Anwendungsbereich: Der CRA erfasst ein weites Spektrum an Produkten, darunter Software, Hardware und cloudbasierte Lösungen.

- Verpflichtende Sicherheitsanforderungen: Hersteller müssen ihre Produkte mit Sicherheitsfunktionen wie sicheren Standardeinstellungen, Schwachstellenmanagement und Update-Mechanismen ausstatten.
- Umfangreiche Dokumentations- und Berichtspflichten: Hersteller müssen detailliert Rechenschaft über die Cybersicherheit ihrer Produkte ablegen, z. B. durch die Erstellung eines Software-Materialverzeichnis (SBOM).
- Hohe Strafen bei Nichteinhaltung: Verstöße können mit Strafen von bis zu 15 Millionen Euro oder 2,5% des globalen Jahresumsatzes geahndet werden.

Neben den technischen Produktanforderungen müssen Hersteller laut der Cybersicherheitsverordnung (CRA) auch verschiedene Dokumentations- und Managementauflagen erfüllen:

- Identifizierung und Dokumentation von Sicherheitslücken und Produktkomponenten, inklusive Software-Stücklisten
- Zeitnahe Behebung von Sicherheitslücken durch Updates
- Regelmäßige Sicherheitstests und -überprüfungen
- Öffentliche Offenlegung von Informationen zu behobenen Sicherheitslücken
- Interne Sicherheitsdokumentation, die über den gesamten Produktlebenszyklus aktuell gehalten wird
- Bereitstellung von Informationen und Anweisungen für Nutzer zu Sicherheitsfunktionen, Konfiguration etc.

Diese Anforderungen sollen sicherstellen, dass Hersteller Cybersicherheit systematisch in den gesamten Produktlebenszyklus integrieren - von der Entwicklung über die Produktion bis hin zum Support.

Auch die in den SINAMICS-Antrieben von Siemens implementierten Cybersicherheitsfunktionen stehen im Einklang mit den Anforderungen des neuen EU-weiten Cyber Resilience Act (CRA). Ein wichtiger Cybersicherheitsaspekt, den Siemens in seinen Sinamics-Antrieben umsetzt, sind sichere Standardeinstellungen (Secure by Default). Der Vorteil dieser sicheren Standardeinstellungen ist, dass ein potenzieller Angreifer keinen unautorisierten Zugriff auf das Gerät hat, sobald es an das Automatisierungsnetzwerk angeschlossen ist.

Auch die feingliedrige Benutzerverwaltung und Zugangskontrolle in der Automatisierungssoftware tragen zum Schutz bei. Darüber hinaus unterstützen die Antriebe sichere Kommunikationsprotokolle wie HTTPS und verschlüsselte S7-Kommunikation. Um im Störfall schnell wieder in Betrieb zu gehen, unterstützt die Technologie das Sichern und Wiederherstellen von Konfigurationen.

Siemens bietet zudem umfassende Sicherheitsdokumentationen und Einführungsvideos an, um Kunden beim Verständnis und der Konfiguration der Sicherheitsfunktionen zu unterstützen. Darüber hinaus werden Sinamics-Produkte nach einem vom TÜV SÜD zertifizierten, sicheren Produktentwicklungsprozess nach der IEC 62443 [11] entwickelt, der Bedrohungsanalysen, Code-Reviews und ein Schwachstellenmanagement umfasst.

4 Tiefengestaffelte Verteidigung „Defense in Depth Ansatz“

Die NIS2-Richtlinie und das Cybersicherheitsgesetz (CRA) legen zunehmend strenge Cybersicherheitsanforderungen für Unternehmen in kritischen Infrastrukturen und anderen Schlüsselbranchen fest. Diese Regulierungen erfordern von Unternehmen, dass sie ein umfassendes, mehrstufiges Cybersicherheitskonzept implementieren - genau das, was der Defense-in-Depth-Ansatz, ein Grundprinzip der IEC 62443 [11] bietet.

Bei diesem Ansatz geht es darum, Sicherheitsmaßnahmen auf mehreren Ebenen zu kombinieren, um Angriffe möglichst effektiv abzuwehren. Statt nur auf eine einzelne Sicherheitsbarriere zu setzen, werden verschiedene technische und organisatorische Schutzmaßnahmen implementiert.

Die Ebene der Anlagensicherheit fokussiert den Schutz an den Systemgrenzen. Hier kommen Maßnahmen wie Firewalls, VPNs und Zugangskontrollsysteme zum Einsatz, um den physischen und logischen Zugriff auf die Industrieanlage zu kontrollieren und abzusichern.

Auf der zweiten Ebene, der Netzwerksicherheit, wird die interne Segmentierung und Zugangskontrolle innerhalb des Automatisierungssystems adressiert. Durch die Implementierung von rollenbasierten Berechtigungskonzepten und die Aufteilung in logische Netzwerksegmente wird der Zugriff auf sensible Bereiche eingeschränkt.

Die letzte Ebene, die Systemintegrität, fokussiert auf den Schutz der einzelnen Komponenten und Geräte. Hier werden Sicherheitsmaßnahmen wie regelmäßiges Patch-Management, Konfigurationsoptimierung und der Einsatz von Sicherheitsfunktionen auf Komponentenebene umgesetzt, um die Integrität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Dazu gehören beispielsweise die Authentifizierung und Autorisierung von Benutzern und Geräten, die Verschlüsselung von Daten und Kommunikation sowie Integritätsprüfungen und Logging-Funktionen.

Durch das Zusammenspiel dieser verschiedenen Schutzebenen entsteht eine tiefengestaffelte Verteidigung, die Cyber-Kriminelle vor große Herausforderungen stellt. Der Defense-in-Depth-Ansatz gilt daher als bewährtes Konzept, um Unternehmen und kritische Infrastrukturen effektiv vor Angriffen zu schützen (Bild 1).

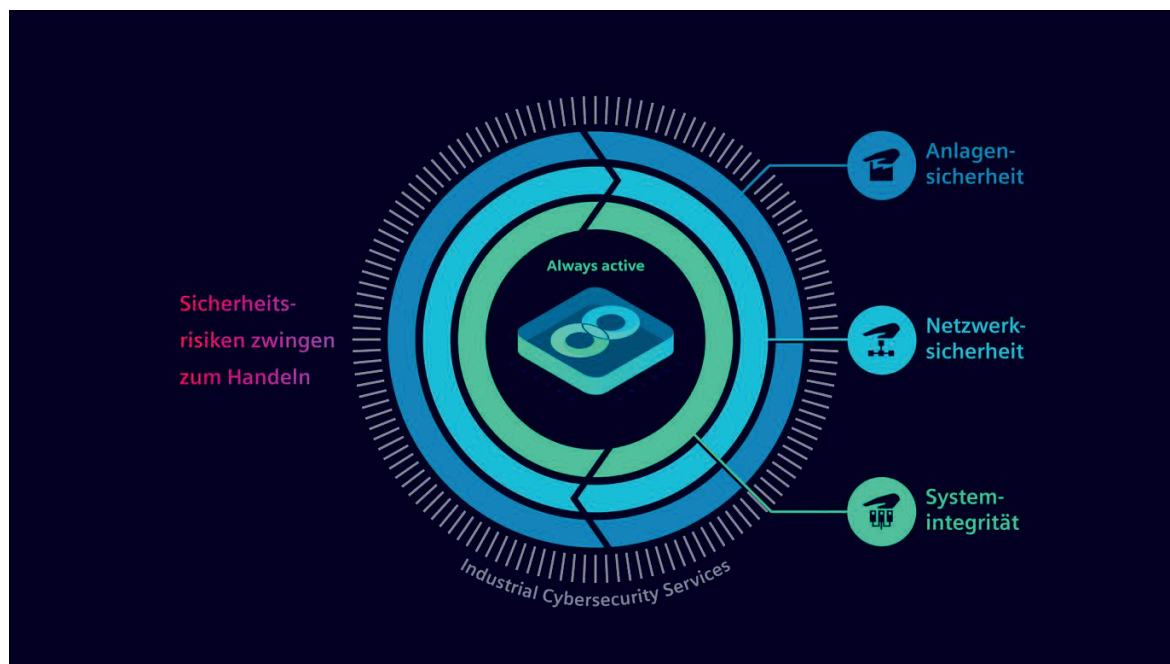


Bild 1: Mehrschichtiges „Defense in Depth“-Konzept nach IEC 62443

Auch Siemens unterstützt Betreiber von Anlagen mit seinem umfangreichen Portfolio bei der Analyse des Sicherheitsstatus und dem Erstellen und der Umsetzung eines Sicherheitskonzepts. Auch in der Kranabteilung verfolgt Siemens einen nach IEC 62443-4-1 – dem führenden Standard für Security in der industriellen Automatisierung – zertifizierten, sicheren Entwicklungsprozess für sein SIMOCRANE Portfolio. Darüber hinaus ist die Kranabteilung auch nach IEC 62443 2-4 und 3-3 als Solution Provider und nicht nur als Produkt-Lieferant zertifiziert.

Zusammenfassung

Cyberkriminalität stellt eine immer stärkere Bedrohung für Unternehmen dar - mehr als jedes zweite Unternehmen war im letzten Jahr betroffen. Kritisch können die Folgen auch für Branchen mit Kraneinsatz sein, da Ausfälle oder Manipulationen von Produktionsanlagen zu erheblichen Schäden und Produktionsausfällen führen können.

Darüber hinaus stellt auch der Einsatz von Krantechnik in kritischen Industriebereichen wie der Stahlindustrie, der energetischen Abfallentsorgung oder der Automobilbranche, die betroffenen Unternehmen vor neue Herausforderungen im Bereich der Cybersicherheit. Denn diese Industriebereiche verarbeiten und steuern wichtige Prozesse mithilfe von Industrieautomation und Krananlagen. Daher müssen die Betreiber dieser Anlagen besondere Vorkehrungen zum Schutz vor Cyber-Bedrohungen treffen, um die Funktionsfähigkeit und Sicherheit ihrer kritischen Infrastrukturen zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund haben der Gesetzgeber und die EU-Institutionen reagiert und neue Regulierungen erlassen, um die Cybersicherheit kritischer Infrastrukturen und Produktionsanlagen zu stärken.

Die EU-Richtlinie NIS2 zählt Kran- und Hebezeuganlagen zu den kritischen Infrastrukturen, die besonderen Schutz benötigen. Unternehmen in der Kranbranche sind daher verpflichtet, umfassende Cyber-Sicherheitsmaßnahmen, Notfallpläne und Meldepflichten zu erfüllen. Verstöße können mit hohen Strafen geahndet werden.

Parallel dazu legt der Cyber Resilience Act (CRA) erstmals EU-weit einheitliche Cybersicherheitsanforderungen für Produkte mit digitalen Elementen fest. Hersteller müssen nachweisen, dass ihre Produkte sicher entwickelt und hergestellt wurden.

Um den gesetzlichen Vorgaben zur Cybersicherheit zu genügen, müssen Unternehmen ein mehrstufiges "Defense-in-Depth"-Sicherheitskonzept implementieren, welches ein Grundprinzip der IEC 62443 ist. Nur so können sie ihre kritischen Infrastrukturen und Produktionsprozesse effektiv vor Cyberangriffen schützen.

Dabei sind die Hersteller von Krananlagen, als auch die Betreiber kritischer Industrieanlagen nicht allein. Es gibt Unternehmen wie beispielsweise Siemens, die Kranhersteller bei den zu treffenden Maßnahmen unterstützen. Siemens bietet ein umfassendes Portfolio an Cybersicherheitslösungen, die speziell für industrielle Anwendungen und OT-Umgebungen (OT: Operational Technology) entwickelt wurden. Siemens verfügt über ein tiefes Verständnis für OT-Umgebungen und kann Kranherstellern bei jedem Schritt ihrer Cybersicherheitsreise begleiten - von der Analyse bis hin zur Implementierung und verwalteten Diensten. Darüber hinaus bietet Siemens maßgeschneiderte Schulungen und Beratungsleistungen, um Kunden bei der Einhaltung relevanter Sicherheitsstandards und Vorschriften zu unterstützen.

Nur wer proaktiv ein ganzheitliches Cybersicherheitskonzept umsetzt, kann langfristig wettbewerbsfähig bleiben und die gesetzlichen Vorgaben von NIS2 und CRA erfüllen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Cybercrime Expected To Skyrocket in Coming Years: Intellectual Property Rights in Statista [online], Herausgegeben von Anna Fleck, Feb. 2024 [Zugriff am: 22.01.2025]. Verfügbar unter: [Chart: Cybercrime Expected To Skyrocket in Coming Years | Statista](#)
- [2] Angriffe auf die deutsche Wirtschaft nehmen zu. Intellectual Property Rights Verfügbar in bitkom [online], Herausgegeben von Andreas Streim, Aug. 2024 [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter: [Angriffe auf die deutsche Wirtschaft nehmen zu | Presseinformation | Bitkom e. V.](#)
- [3] Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2024. Property Rights im BSI [online], Herausgegeben vom BSI, Nov 2024 [Zugriff 22.01.2025]. Verfügbar unter: [BSI - Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland](#)
- [4] Estimated cost of cybercrime worldwide 2018-2029. Property Rights in Statista [online], Juni 2024 [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter: [Global cybercrime estimated cost 2029 | Statista](#)
- [5] DIRECTIVE (EU) 2022/2555 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE

- COUNCIL of 14 December 2022 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union, amending Regulation (EU) No 910/2014 and Directive (EU) 2018/1972, and repealing Directive (EU) 2016/1148 (NIS 2 Directive), Dez. 2022 [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter: [EUR-Lex - 02022L2555-20221227 - EN - EUR-Lex](#)
- [6] REGULATION (EU) 2024/2847 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2024 on horizontal cybersecurity requirements for products with digital elements and amending Regulations (EU) No 168/2013 and (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2020/1828 (Cyber Resilience Act) [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter: [EUR-Lex - 02024R2847-20241120 - EN - EUR-Lex](#)
- [7] Umsetzung der NIS2-Richtlinie für die regulierende Wirtschaft. Property Rights in BSI [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter [BSI - NIS-2-regulierte Unternehmen](#)
- [8] Referententwurf KRITIS-Dachgesetz – KRITIS-DachG, Property Rights im BMI [online], Nov 2024 [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter [BMI - Gesetzgebungsverfahren - Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie \(EU\) 2022/2557 und zur Stärkung der Resilienz kritischer Anlagen](#)
- [9] Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft ab 2008, NACE Rev. 2, [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter [2007_2106_DE.pdf](#)
- [10] Cyber Resilience Act: BSI bewirbt sich um Marktaufsicht für vernetzte Produkte. Property Rights im BSI, Dez 2024 [Zugriff am 22.01.2025]- Verfügbar unter: [BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik - Cyber Resilience Act: BSI bewirbt sich um Marktaufsicht für vernetzte Produkte](#)
- [11] Normenreihe IEC 62443: „Industrielle Kommunikationsnetze – IT-Sicherheit für Netze und Systeme“
- [12] NIS2 Umsetzungsgesetz. Property Rights OpenKRITIS, Das unabhängige Nachschlagewerk für KRITIS-Betreiber und Kritische Infrastrukturen. 53227 Bonn · info@openkritis.de · ISSN 2748-565X. [Zugriff am 22.01.2025]. Verfügbar unter: [Das NIS2-Umsetzungsgesetz NIS2UmsuCG – OpenKRITIS](#)

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Smarte Lasermesssysteme für Krananlagen: Präzise multifunktionelle Lasermessanlagen mit Mehrlagen- und Solid-State Messsensorik

Lars Mohr



M. Sc. Lars Mohr

LASE Industrielle Lasertechnik GmbH

Rudolf-Diesel-Straße 111

46485 Wesel

Smarte Lasermesssysteme für Krananlagen: Präzise multifunktionelle Lasermessanlagen mit Mehrlagen- und Solid-State Messsensorik

Smarte Lasermesssysteme können zum Beispiel für multifunktionale Lasermesssysteme eingesetzt werden, welche auf der aktuellen LiDAR-Technologie (light detection and ranging) basieren. Sie werden speziell für die vielfältigen Automatisierungslösungen, Positionier- & Überwachungsaufgaben sowohl an manuellen, ferngesteuerten, als auch vollautomatisierten STS, RTG- und RMG-Kranen sowie für Industriekrananlagen eingesetzt und ermöglichen durch nur ein einziges Messsystem mit wenigen Laserscannern die Realisierung vielfacher Messaufgaben zur Effizienzsteigerung sowie zur Vermeidung von Personen- & Objektschäden. Die Hauptfunktionalitäten können hierbei modular ausgewählt werden und umfassen unter anderem diverse 3-dimensionale Hinderniserkennungen von Fremdobjekten oder Personen vor und neben der Krananlage, Positionsüberwachung des LKWs sowie dessen Ladung, als auch die ordnungsgemäße Entriegelung der Container vom Fahrgestell während des Aufnahmeprozesses. Weitere Vorteile sind nach ISO EN 13849 PL. D zertifizierte Anlagen zur Überwachung von geteilten Bereichen, in denen Mensch und Maschine zusammenarbeiten.

1 Einleitung

Immer mehr Betreiber von See- und Binnenhäfen gehen dazu über, ihre Yard-Krananlagen hinsichtlich sicherheitstechnischer Automatisierungslösungen aufzurüsten bzw. zu modernisieren. Sei es zur Vermeidung von reinen Materialschäden am Kran, Container oder LKW, oder zur Absicherung von Personen rund um die Krananlage, inkl. Horizontaltransport Geräteführern.

Um diese mannigfachen Aufgaben zu realisieren, werden üblicherweise verschiedenste Single-Messsysteme an den Krananlagen verbaut (meist von verschiedensten Herstellern und mittels unterschiedlichster Sensortechniken und Adaptionsschnittstellen zur Kransteuerung).

Viele unterschiedliche Mess- & Überwachungssysteme bedeuten jedoch immer höhere Anschaffungskosten, ein deutlich größeres Reserverlager, unterschiedlichstes Technik-Knowhow, als auch uneinheitliche Wartungsintervalle der verbauten Systeme. Jegliche Produktabkündigung eines einzelnen Sub-Messsystems erfordert oft eine erneute Anpassung der Kran-SPS.

Smarte Lasermesssysteme sind Universal-Messsysteme und basieren standardmäßig auf dem Verbund von üblicherweise ein bis vier Mehrlagen-Laserscannern inkl. einer dazugehörigen Applikationssoftware. Die Laserscanner werden jeweils oberhalb der Fahrwerksenden der ausgewählten Kran-Portalseite oder über einer Fahrspur oder über sicherheitsrelevanten Bereichen installiert.

Die Mehrlagenscanner oder Solid State Scanner sind direkt an einen Industrie-PC angeschlossen, welcher mittels verbautem Industrie-PC die eigentliche Anwendungssoftware mit den einzelnen Funktionsmodulen bereitstellt und die Informationen 1:1 an die Kransteuerung mittels aller üblichen Schnittstellen übermittelt.

Aus den gewonnenen 3D-Punktwolken der verbauten Laserscanner extrahiert die Software eine 3D Punktwolke, die zum Beispiel im Falle der Überwachung des Absetzbereichs bei

Containerkrananlagen sowohl das 3-dimensionale LKW-Fahrgestell, dessen Fahrerkabine, den ggf. zu entladenden Container als auch die Personen oder Gegenstände, die sich im Einsatzbereich um den LKW, als auch vor & neben den Kran-Fahrspuren befinden. Und das alles ohne jegliche zusätzliche Bewegung des Laserscanners selbst.

Die verschiedenen Überwachungsfunktionen sind modulare Optionen, das bedeutet: Betreiber können die für sie relevanten Funktionen entsprechend ihren Bedürfnissen bestellen und aktivieren. Die smarten Lasermesssysteme unterstützen sowohl den manuellen Betrieb der Krananlage, dessen Remote-Betrieb als auch die vollautomatische Nutzung.

2 Hardware Layout

2.1 Scanner Hardware

Im Gegensatz zu einem 2D-Laserscanner, der nur einen einzigen 2D-Scan in einer Ebene erstellt, erzeugt ein Multilayer-Laserscanner mehrere Scanebenen pro Rotation. Typischerweise kommen hier Multilayer-Laserscanner mit bis zu 128 einzelnen Scanlagen zum Einsatz (Bild 1). Überdies ist das mögliche Sichtfeld in vertikaler Achse wichtig. Bei diesem System liegt das vertikale Sichtfeld bei 90° und das horizontale Sichtfeld bei 360°.

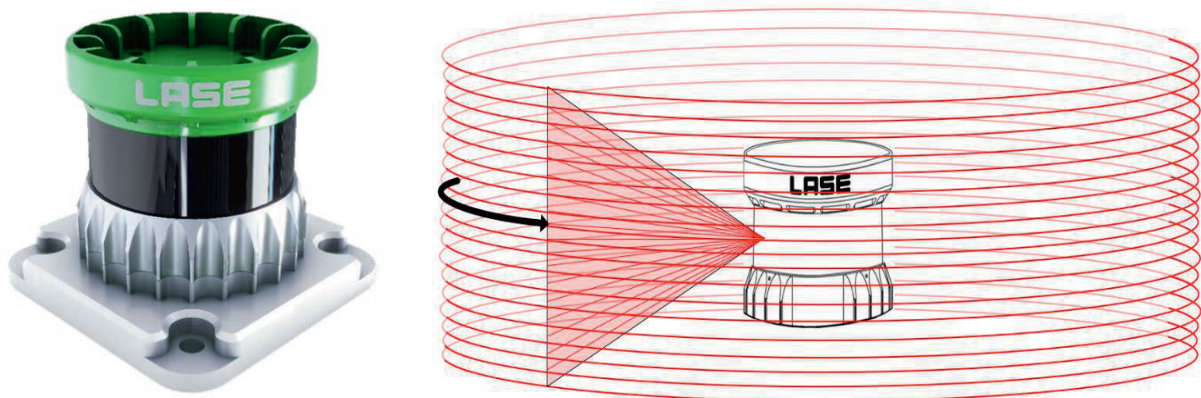


Bild 1: Verwendeter Laserscanner LASE3000D-4xx Serie (Temperaturbereich: -40°C bis +60°C, Messbereich: 20 m (bei 10% Reflektion), Scanbereich 360°x90°)

2.2 HW-Layout – Beispiel Smarte Lasermessanlage mit zwei Sensoren

Das System besteht im Beispiel aus zwei Multilayer-Laserscannern, einem Schaltschrank und einem Industrie-PC als Hauptkomponenten (Bild 2).

Die interne Datenkommunikation erfolgt über Ethernet, die externe wahlweise über Ethernet, Profibus oder Profinet.

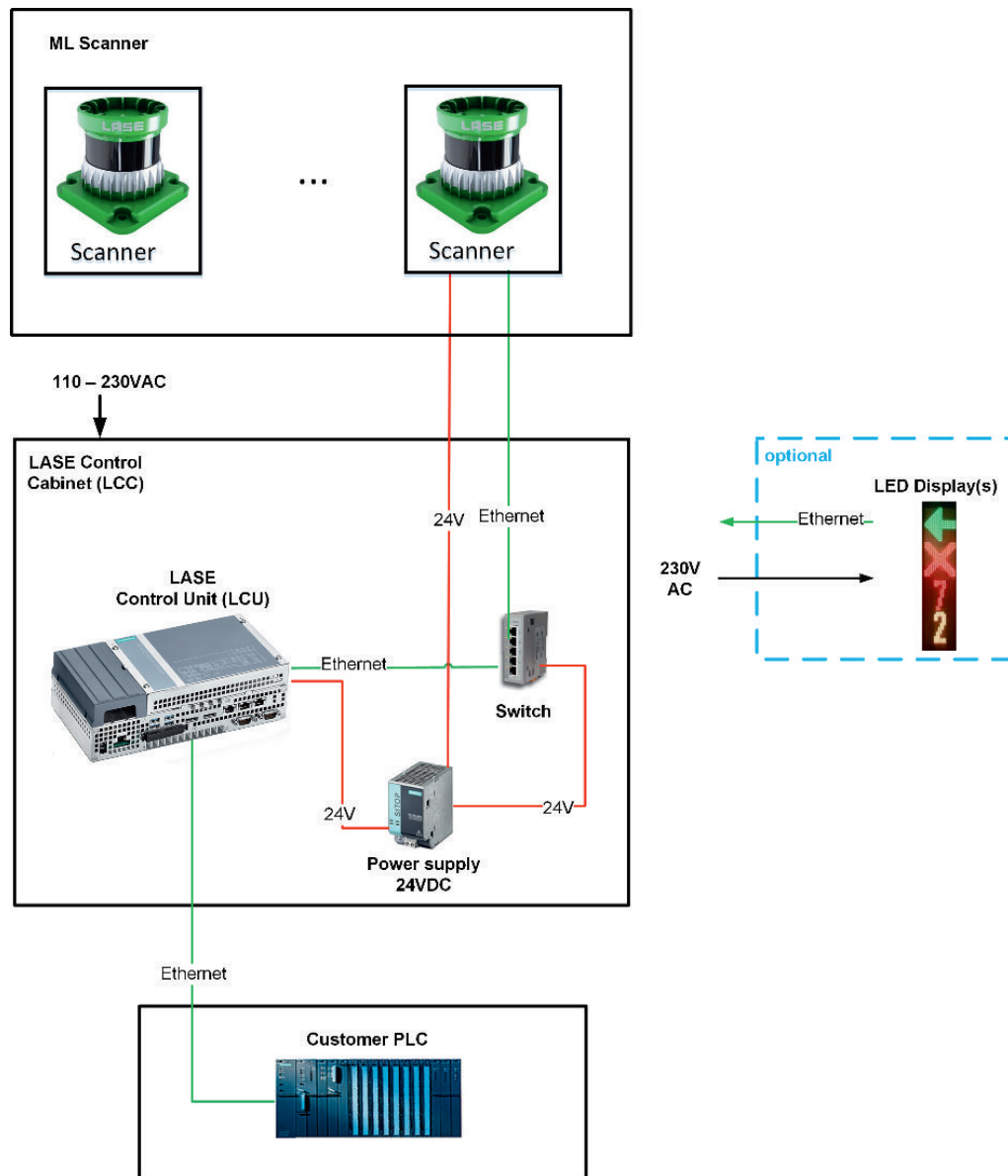


Bild 2: Blockschaltbild

2.3 Scanner-Anordnung

Die zu verwendenden Multilayer-Laserscanner können in verschiedenen Anlagen an unterschiedlichen Montageorten eingebunden werden. Die Montageposition hängt dabei stark von der Applikation und Maschine ab (Bilder 3 bis 7).



Bild 3: Montage über Fahrspur eines RTG für die Überwachung des Be- und Entladevorgangs



Bild 4: Montage am Fahrwerk eines RTG zur LKW-Anhebeprävention, Kranfahrerkollisionsprävention, LKW-Positionierung, Fahrerhauserkennung und LKW-Bewegungserkennung



Bild 5: Montageposition and Ship-To-Shore Kran zur Auslegerkollisionsprävention

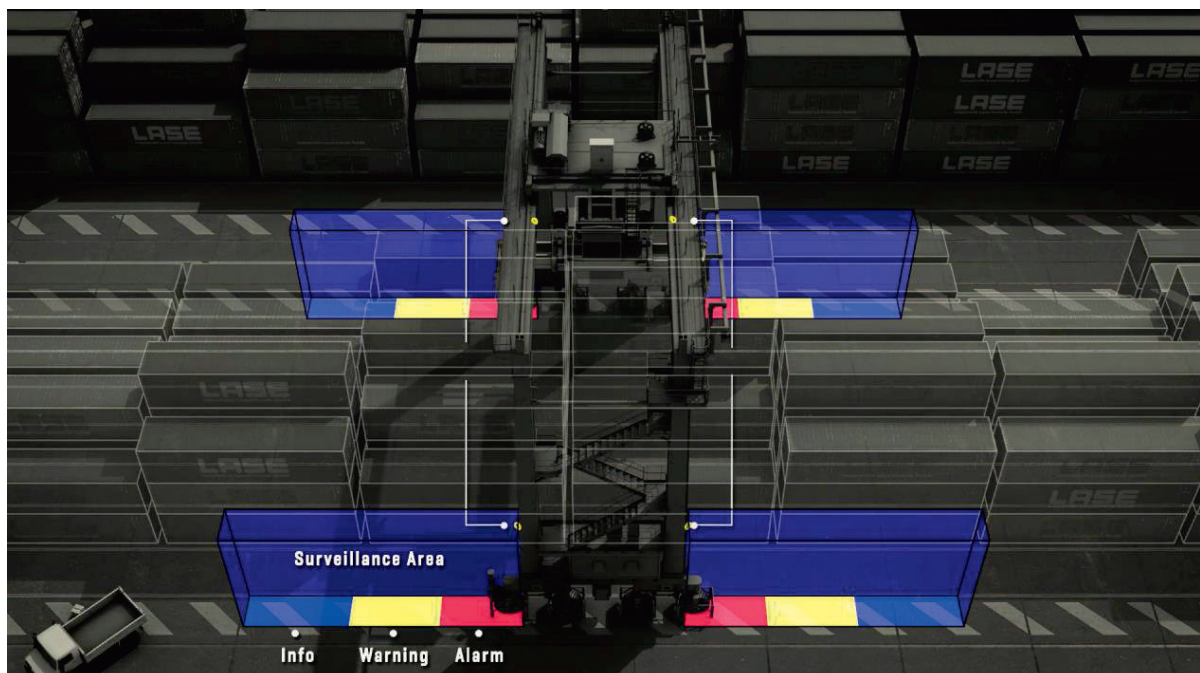


Bild 6: Montagepositionen zur Kranfahrerkollisionsprävention



Bild 7: Blick in Portal-Katzfahrtrichtung, mit Scanebenen in beiden Portal-Fahrtrichtungen

3 Funktionsübersicht

Im Folgenden werden alle Hauptfunktionen der smarten Lasermesssysteme erläutert.

3.1 LaseGCP-3D - Gantry Collision Prevention

Die dreidimensionale Kollisionserkennung überwacht die Bereiche vor und seitlich des Portalkrans, um potenzielle Fremdobjekte im Fahrweg zuverlässig zu identifizieren. Dabei werden Hindernisse unabhängig von ihrer Größe erkannt, von sehr kleinen Objekten (z. B. 15 x 15 cm) bis hin zu größeren Strukturen.

Falls sich Objekte im Fahrweg befinden, werden je nach Situation unterschiedliche Alarmstufen ausgelöst (Bild 8). Das System detektiert dabei sowohl Objekte auf dem Boden als auch solche, die seitlich oder oberhalb in den Fahrweg hineinragen. Die Überwachung erstreckt sich dabei sowohl auf den Bereich unmittelbar vor als auch neben der Fahrspur.

Standardmäßig werden drei Alarmzonen definiert, deren Größe dynamisch angepasst wird, basierend auf der Geschwindigkeit des Krans und den daraus resultierenden Bremswegen. Abhängig von den erfassten Informationen kann das System die Bewegung des Krans verlangsamen oder im Bedarfsfall vollständig stoppen.

Zusätzlich ist eine automatische Überwachung zur Vermeidung von Kollisionen zwischen verschiedenen Kränen integriert.



Bild 8: Kollisionswarnung im zweiten Alarmfeld

3.2 LaseTLP - Truck Lifting Prevention

Diese Funktion dient der Vermeidung von Unfällen, die bei der Entladung von Container-LKWs durch defekte oder verriegelte Twistlocks auftreten können. Das System erkennt zuverlässig ein unbeabsichtigtes Anheben des Fahrgestells eines LKWs, wenn der Kran einen Container aufnimmt (Bilder 9 bis 11). Während des Anhebevorgangs überwacht das Messsystem dreidimensional sowohl die Strukturen des Containers als auch die des LKW-Fahrgestells. Werden beide Objekte gleichzeitig angehoben, stoppt das System den Vorgang unmittelbar. Dadurch werden Schäden an Containern und LKW-Fahrgestellen vermieden sowie der Materialverschleiß signifikant reduziert. Diese Funktion ist mit allen gängigen Typen von LKW-Fahrgestellen (20", 40" und 45") kompatibel.

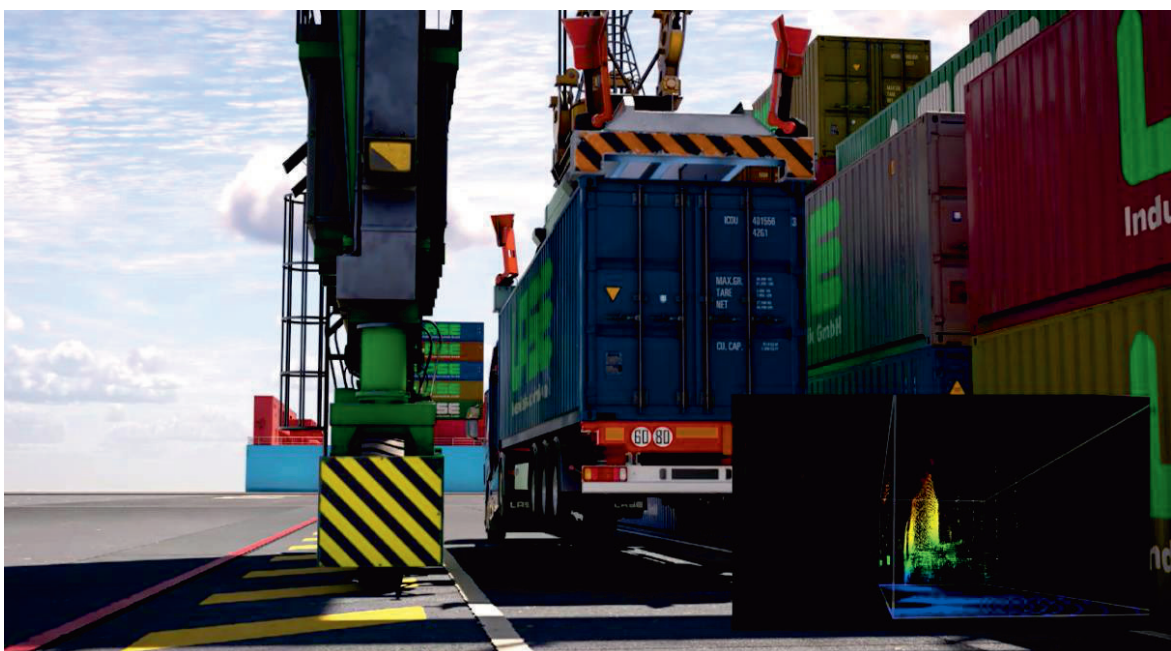


Bild 9: Not-Stopp bei Detektion eines Fahrgestell-Lifts

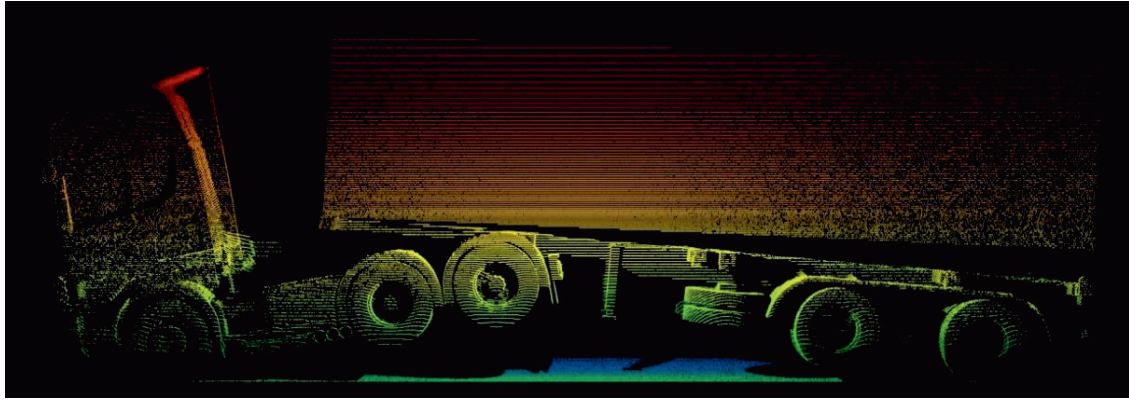


Bild 10: Horizontales 3D-Scanbild eines verriegelten Fahrgestells – beidseitig vorn fixiert

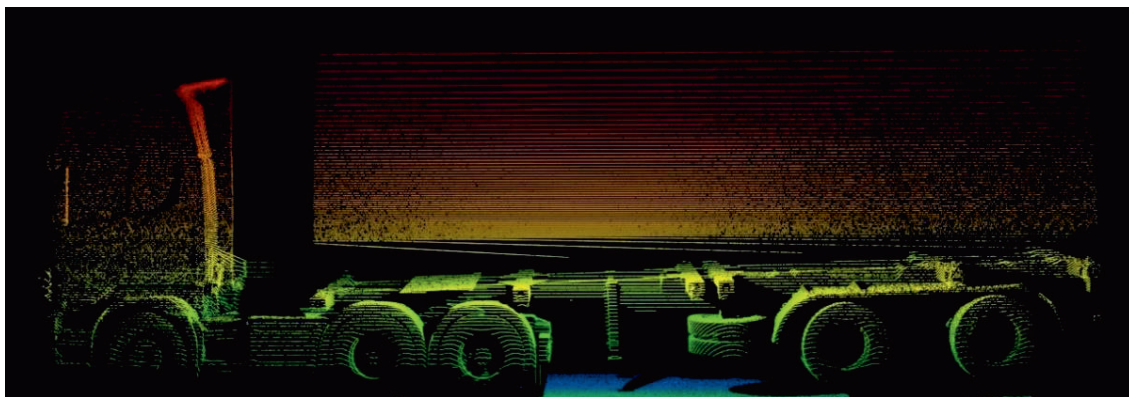


Bild 11: Horizontales 3D-Scanbild eines verriegelten Fahrgestells – einseitig hinten fixiert

3.3 LaseCP - Cabine Position

Während des Absetzvorgangs eines Containers auf das LKW-Fahrgestell überwacht das Messsystem kontinuierlich, ob sich das Fahrerhaus des LKWs außerhalb des Arbeitsbereichs des Spreaders und des abzusetzenden Containers befindet. Durch diese Überwachung wird sichergestellt, dass ein Absetzen des Containers auf das Fahrerhaus des LKWs ausgeschlossen ist (Bild 12).

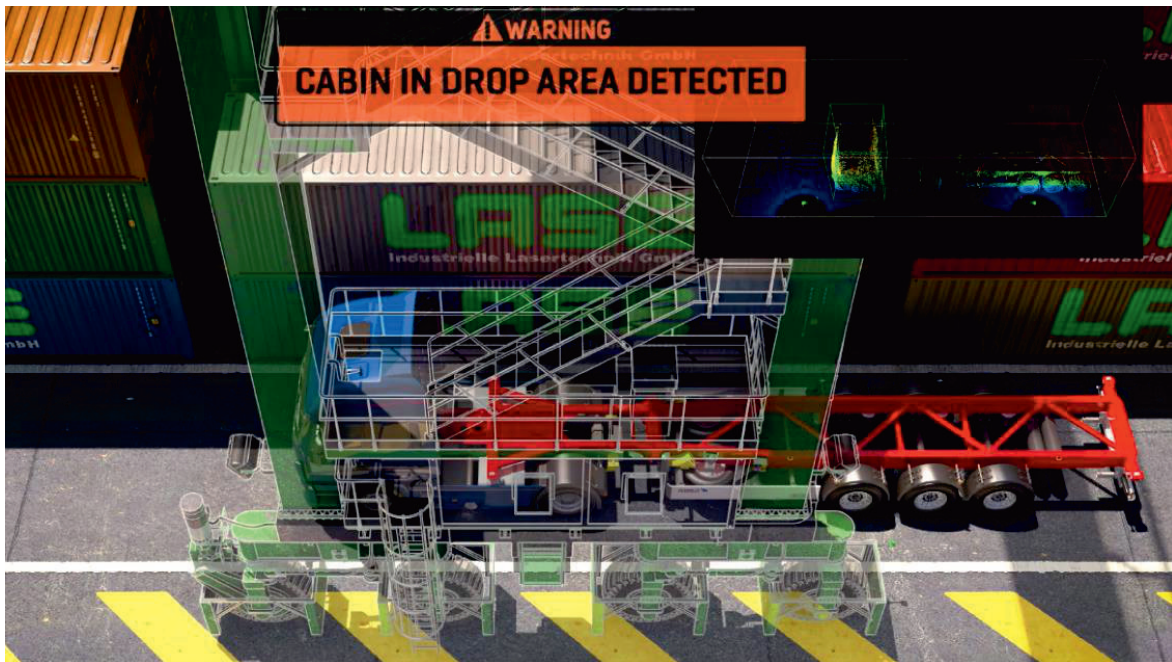


Bild 12: Not-Stopp bei Detektion einer Fahrerkabine im Absetzbereich des Containers

3.4 LaseTMD - Truck Movement Detection

Während des Be- und Entladevorgangs überwacht das System kontinuierlich die Position des LKWs. Erkennt das System eine unerlaubte Bewegung des Fahrzeugs, wird der Betrieb des Hubwerks sofort gestoppt (Bild 13).



Bild 13: Not-Stopp bei Detektion eines Chassis Lifts

3.5 LaseTPS - Truck Positioning System

Das Messsystem erfasst die Position des anfahrens Fahrzeugs sowie die Position und Länge eines eventuell geladenen Containers. Über eine digitale Anzeige erhält der LKW-Fahrer fortlaufend Informationen zur relativen Position des Fahrgestells bzw. Containers im Verhältnis zum Zentrum des Krans. Diese Funktion minimiert unnötige Korrekturmanöver und reduziert dadurch Zeitverluste während des Be- und Entladeprozesses (Bild 14 und Bild 15).

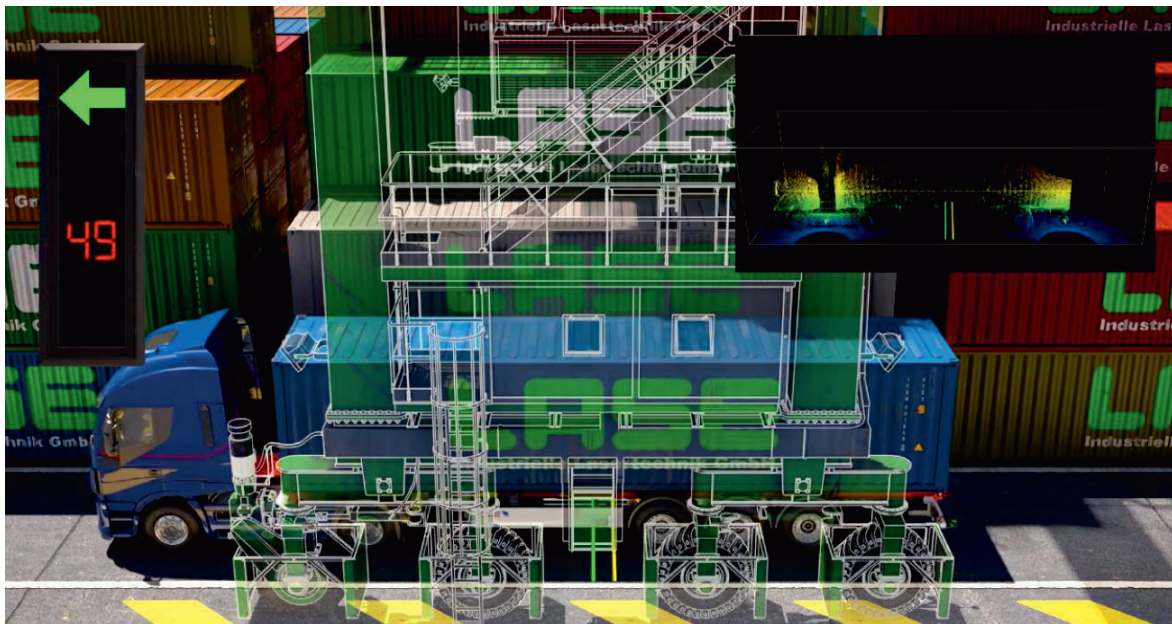


Bild 14: Visualisierung des Abstandes zur Zielposition

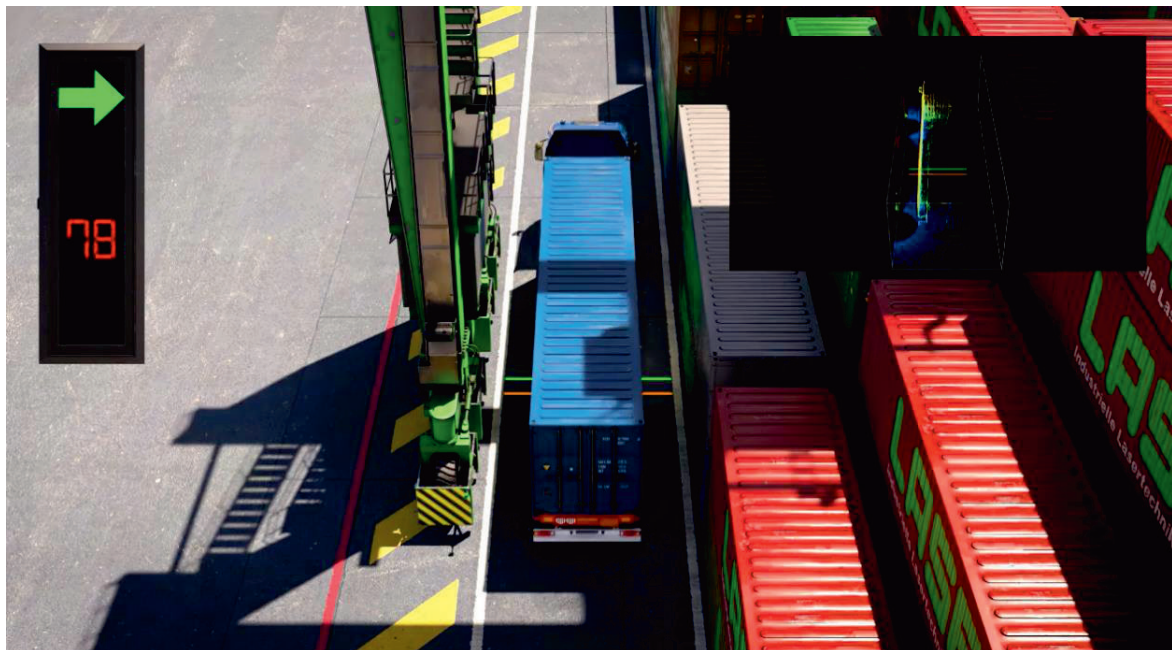


Bild 15: Visualisierung des Abstandes zur Zielposition

3.6 LaseASTO - Area Surveillance Truck Operation - Zertifiziert

Das System erkennt und klassifiziert automatisch die Struktur des LKWs sowie die Präsenz des LKW-Fahrers innerhalb eines definierten Überwachungsbereichs. Während des Beladevorgangs des Fahrgestells überwacht das Messsystem, ob sich Personen unerlaubt in der Nähe des Fahrzeugs aufhalten. In solchen Fällen wird das Absetzen des Containers automatisch gestoppt (Bilder 16 bis 18).

Personen, die sich zwischen dem Kranportal und dem LKW befinden, werden zuverlässig erkannt. Die Bereichsüberwachung bleibt aktiv, bis der Container vollständig abgesetzt ist oder die Sicht auf die gegenüberliegende Seite des LKW-Fahrgestells durch den Container blockiert wird.

Das System ist in einer Version erhältlich die nach ISO EN 13849 PL. D zertifiziert ist.

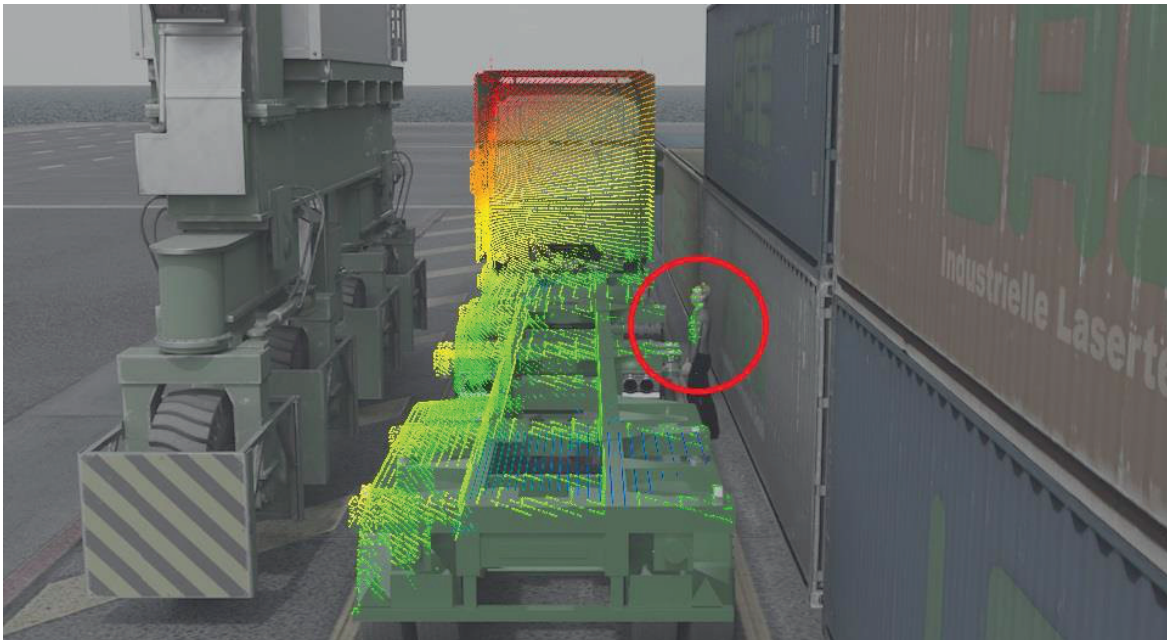


Bild 16: Alarmmeldung bei Detektion einer Person im Überwachungsbereich



Bild 17: Eindeutige 3D-Identifizierung einer Person neben dem Fahrgestell



Bild 18: Not-Stop bei Detektion einer Personen-Identifizierung

Zusammenfassung

Die Automatisierung von Maschinen und Prozessen entwickelt sich kontinuierlich weiter. In bestimmten Schnittstellenbereichen ist jedoch eine enge Zusammenarbeit zwischen Mensch und automatisierten Maschinen erforderlich. Smarte Lasermesssysteme zur dreidimensionalen Bereichsüberwachung, Kollisionsprävention und für Positionieraufgaben ermöglichen die Automatisierung und entlasten das Bedienpersonal von Kontroll- und Überwachungsaufgaben.

Diese intelligenten Systeme fungieren in den jeweiligen Einsatzgebieten als „Augen“ der Automatisierungsprozesse und stellen eine Schlüsseltechnologie moderner Krananlagen dar. Zu den zentralen Funktionen smarterer Lasermesssysteme gehören die dreidimensionale Vermessung des Transportgutes sowie die präzise Erfassung der Arbeitsbereiche, um eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine im selben Raum zu gewährleisten.

Die Verwendung smarterer Technologien trägt nicht nur maßgeblich zur Erhöhung der Sicherheit bei, sondern steigert auch die Effizienz im täglichen Betrieb. Ein multifunktionales Lasermesssystem kann dabei mit einem einzigen Layout eine Vielzahl von Aufgaben abdecken.

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Kollisionsvermeidung zwischen Kranen, Lastaufnahmemitteln und Transportfahrzeugen

Dirk Brunnengräber



Dipl.-Ing. Dirk Brunnengräber
Kymati GmbH
Am Hochacker 5
85630 Grasbrunn

Kollisionsvermeidung zwischen Kranen, Lastaufnahmemitteln und Transportfahrzeugen

Die Bewegung von Maschinen erzeugt eine latente Kollisionsgefahr - sowohl im automatischen Betrieb als auch bei der Steuerung durch einen Bediener. Kollisionen können Menschen gefährden, sehr große direkte Schäden hervorrufen und auch mittelbar sehr hohe Folgekosten durch Stillstand und Produktionsausfall hervorrufen.

Kollisionen bei Portal- und Brückenkränen mit Kranen auf derselben Schiene lassen sich sehr einfach vermeiden. Aber auch die Absicherung des Lastaufnahmemittels und die Vermeidung von Kollisionen mit Personen oder mit sich ggf. frei bewegenden Objekten (Fahrzeuge/Maschinen) ist mit Radarsensorik gut lösbar.

1 Kollisionsvermeidung bei Kranen

1.1 Einfache Kollisionsvermeidung bei Portal- und Brückenkränen

Portal- und Brückenkrane auf einer Kranbahn lassen sich durch Radarsensoren sehr sicher und hochverfügbar gegen Kollisionen absichern.

In Bild 1 wird die einfachste Variante mit einem Radarsensor gezeigt, der die Annäherung eines anderen Objektes erkennt und bei im Gerät selbst frei vorbestimmten Warn- und Alarmabständen ein Signal ausgibt. Die Abstandswarnung kann dynamisch an die Bewegungsgeschwindigkeit und Bremsleistung angepasst werden. Bei niedriger Annäherungsgeschwindigkeit können Krane so auch sehr nahe zueinander betrieben werden, ohne den Kollisionsschutz zu deaktivieren.

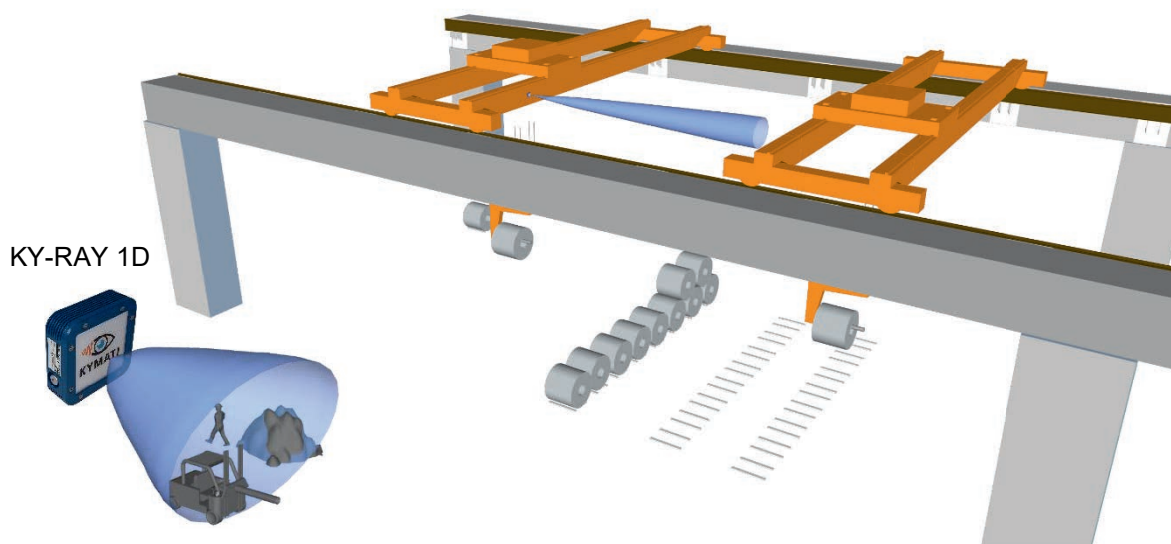


Bild 1: Absicherung durch einfachen Radarsensor KY-RAY 1D

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Sehr kostengünstig
- Reichweite ca. 20 m

Nachteile:

- Keine Funktionsüberprüfung der Messtrecke, wenn Objekte sich üblich nur außerhalb der Warnreichweite aufhalten

1.2 Intelligente Kollisionsvermeidung mit Selbstüberprüfung

Durch die Verwendung von Radarsensoren auf jedem Kran wird die Distanzmessung zum Nachbar kontinuierlich überprüft. Die Annäherung des jeweils anderen Objektes wird erkannt und ab einem im Gerät selbst frei vorbestimmtem Abstand ein Warn- oder Stoppsignal ausgegeben (Bild 2). Die Abstandswarnung kann dynamisch an die Bewegungsgeschwindigkeit und Bremsleistung angepasst werden. Der Ausfall eines Sensors führt zu einer Warnmeldung an die Kransteuerung oder an die Warnsignalisierung, um eine hohe Ausfallsicherheit zu gewährleisten.

Je Kran werden geschwindigkeitsabhängige Warn- und Alarmzonen (gelb/rot) verwendet

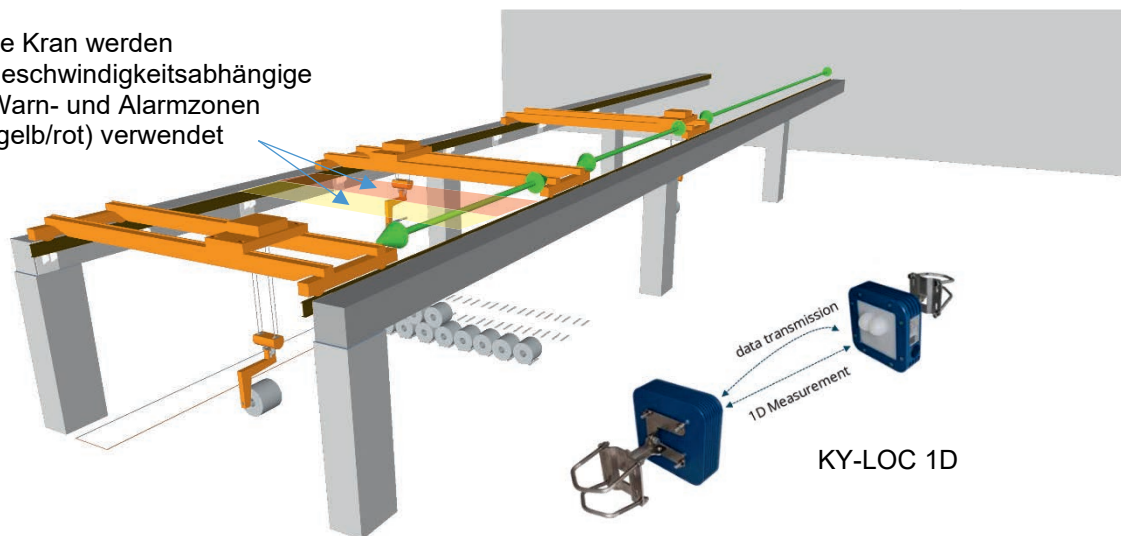


Bild 2: Überprüfung der Warndistanzen durch zwei Radarsensoren je Messtrecke

Die Funktion kann beliebig auf weitere Krane ausgedehnt werden, die entweder auf derselben Ebene oder auch auf anderen Ebenen agieren. In diesem Fall werden die Positionen der Lastaufnahmemittel der oberen Krane ebenfalls erfasst und diese Information drahtlos über das Radarsignal an eine kleine SPS übermittelt, die daraus Warn- und Stoppsignale an die jeweils betroffenen Krane zurücksendet, ebenfalls über den eigenen drahtlosen Kommunikationskanal des Radars (Bild 3).

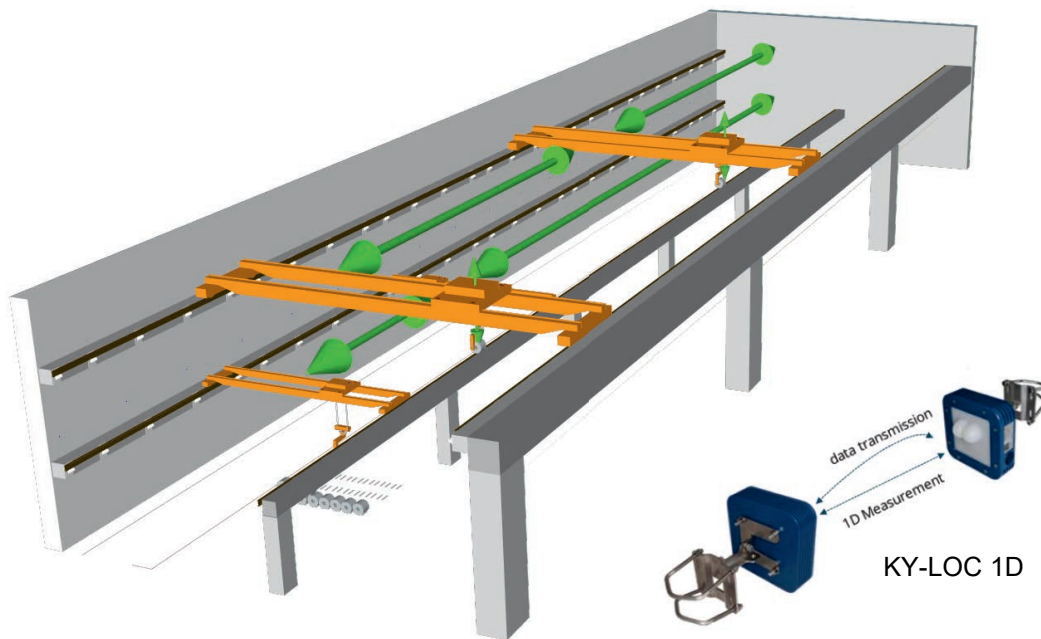


Bild 3: Kollisionsvermeidung bei Kranen auf mehreren Ebenen

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite bis 1 km
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Jeder Kran benötigt einen Radarsensor.
- Bei stromloser Steuerung eines Krans ist die Kollisionsvermeidungsfunktion mit Nachbarkranen temporär nicht in Betrieb.

Die xyz-Koordinatenmessung mit Kymati-Distanzsensoren kann direkt auf den Radarsensoren auch für die Parametrierung der Kollisionsvermeidung verwendet werden (Bild 4).

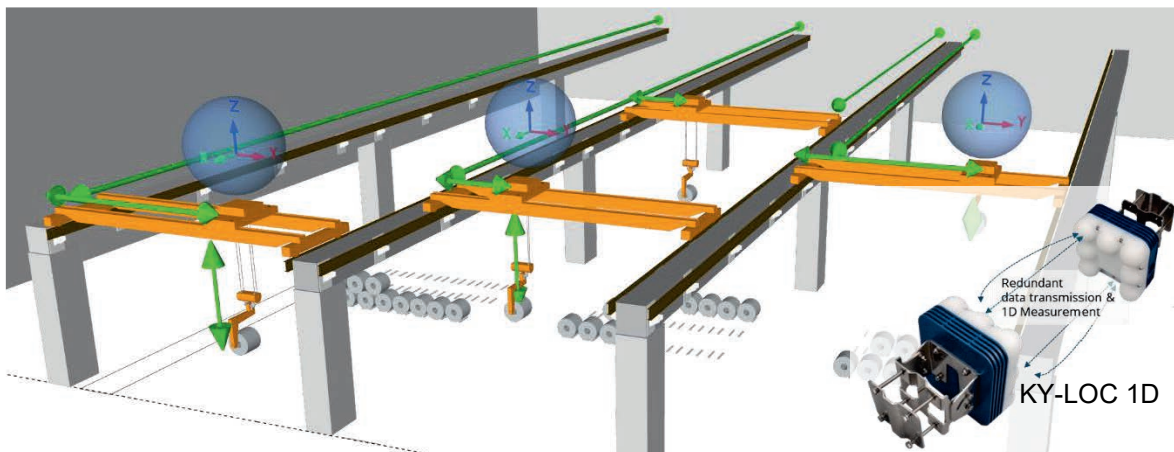


Bild 4: Nutzung bestehender xyz-Koordinatenmessung für die Kollisionsvermeidung

1.3 Hinderniserkennung im Bereich um den Kran

Sitzt kein Fahrer mehr in der Krankabine, fehlt der Blick des Kranfahrers auf die bediente Fläche. Bei möglichem Aufkommen von innerbetrieblichem Verkehr unter dem Kran (Personen oder Fahrzeuge) kann dieser Verkehr durch Radarsensoren detektiert, ggf. qualifiziert (z. B. Fahrzeug zulässig/Person nicht zulässig) und durch optische und akustische Signale signalisiert werden (Bild 5). Bei Bedarf kann auch der Kran temporär gestoppt werden.

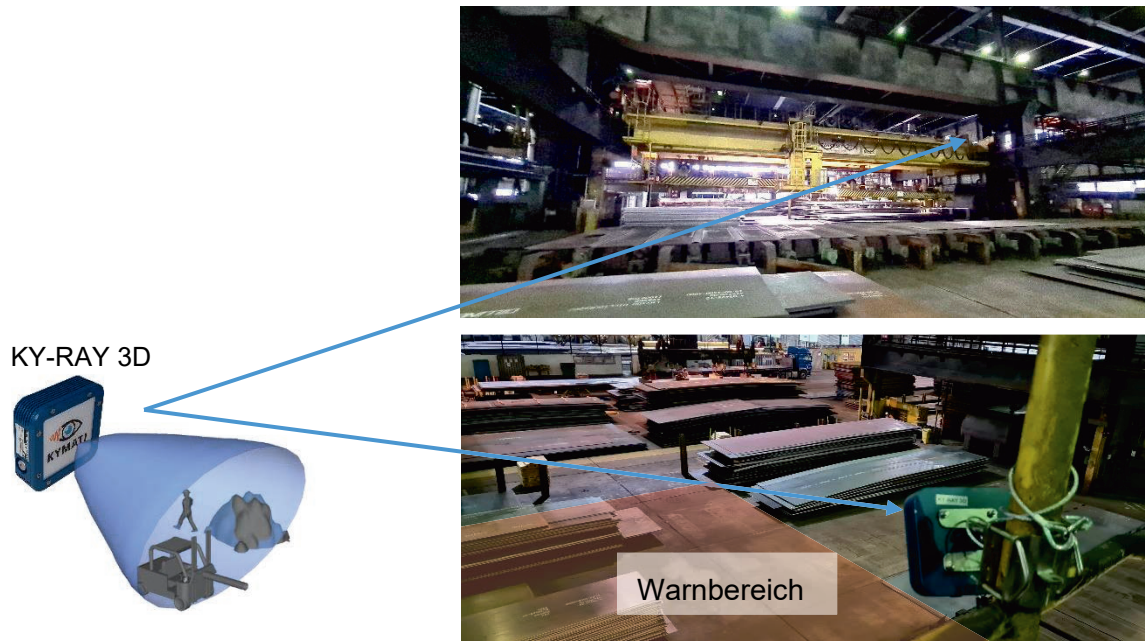


Bild 5: Überwachung des Umgebungsbereiches

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite bis 50 m
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

2 Positionsbedingte Einschränkung der Kranfahrt

Durch die Erfassung der Koordinaten der Kranbewegungen lassen sich auf dem Radarsensor selbst Einschränkungen vorgeben, die entsprechende Warnungen oder einen automatischen Stopp auslösen, wenn der Kran manuell über diese Grenzen hinaus bewegt werden soll. So können bestimmte Bereiche von der Kranfahrt ausgenommen werden, um Personensicherheit zu gewährleisten (Sozialräume, Arbeitsplätze, keine Last über Personen) oder um Beschädigungen an Lasten (z. B. Flugzeugteilen) und ortsfesten Einrichtungen durch Kollisionen zu vermeiden (Bild 6).

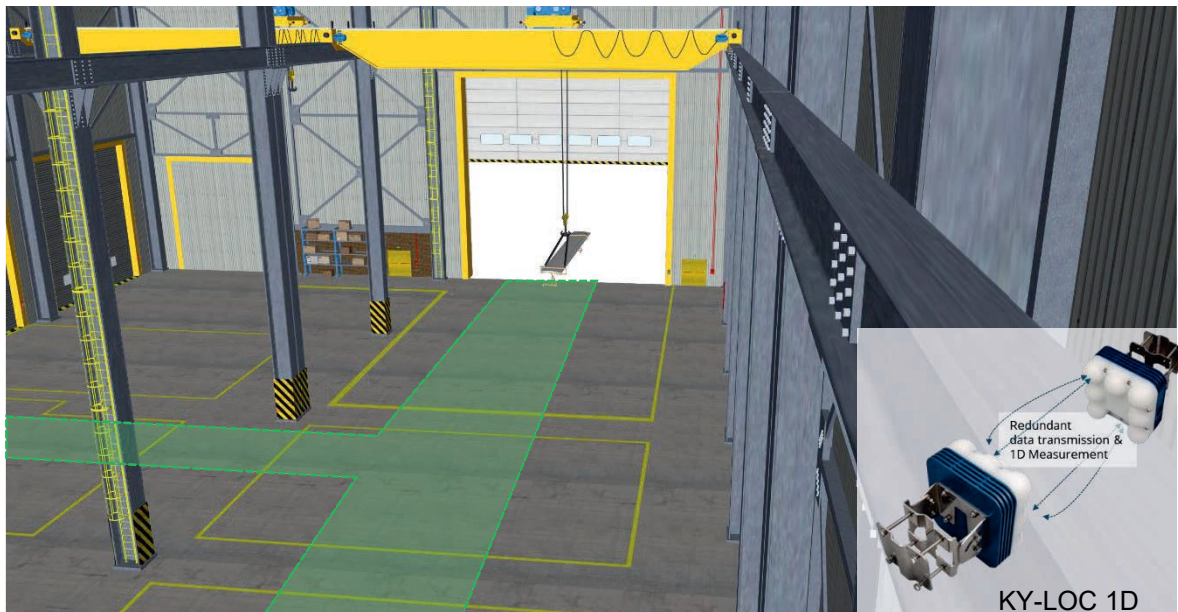


Bild 6: Positionsbedingte Einschränkung (grüne Bewegungsfläche) der Kranfahrt durch xyz-Koordinatenvergleich

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite bis 1 km
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

3 Überwachung von Lastübergabepositionen

Kollisionen der Last im Übergabebereich lassen sich durch am Kran befestigte oder im Übergabebereich separat installierte Radarsensorik einfach vermeiden. Eine manuelle oder automatische Lastübergabe erfolgt dann nur, sofern der Übergabebereich aktiv frei gemeldet wird (Bild 7).

KY-RAY 1D

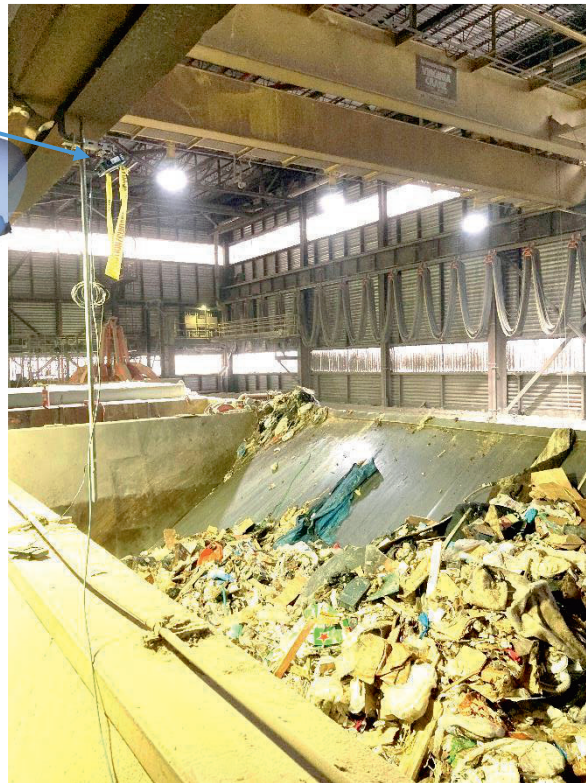
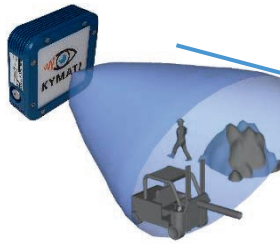


Bild 7: Überwachung des freien Lastübergabebereiches (hier: Schütte zur Müllverbrennung) vor Lastabgabe, um Überfüllung zu vermeiden

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite bis 20 m
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

4 Dreidimensionale Kollisionsüberwachung

4.1 Kollisionsvermeidung zwischen Kranen, Lastaufnahmemittel und Fahrzeugen

Der Warenstrom von und zu Kranen erfolgt vielfach auch durch Fahrzeuge, die unter oder neben dem Kran Lasten übernehmen. Solche Fahrzeuge operieren teilweise zeitgleich mit dem Kran, sodass Kollisionen grundsätzlich möglich und Maßnahmen zur Vermeidung erforderlich sind.

Ein Beispiel hierfür sind große Containerkrane, die Container zwischen Schiffen/Zügen und einem Transportfahrzeug bewegen. Der Fahrzeugverkehr unter dem Kran erzeugt potenziell die Gefahr der Beschädigung des Krans, aber auch die Gefahr, dass Lasten oder Lastaufnahmemittel mit den Transportfahrzeugen kollidieren. Insbesondere bei manuellem Betrieb von Kranen und Fahrzeugen ist die Situation für den Fahrer eines

Transportfahrzeuges gefährlich, da große Container die Sicht des Kranführers auf darunter stehende Fahrzeuge verdecken können (Bild 8). Solche Kollisionen sind leider nicht unüblich, können jetzt aber wirksam verhindert werden.



Bild 8: Gefährliche Lastwechsel zwischen Transportfahrzeugen (gelb) unter großen Containerkranen (grün) [PSA]

Eine besondere Herausforderung in solchen Situationen ist die Warnung für die Bediener von Kranen und Fahrzeugen. Kommt eine Warnung zu früh, weil die Sensorik nicht ausreichend differenzieren kann, so wird die Warnung zu häufig ausgelöst. Die Folge davon ist die Nichtbeachtung solcher Warnsignale durch die Bediener der Maschinen. Eine reine Annäherungswarnung würde entweder nur eine Hauptrichtung grob betrachten oder aber eine Unzahl von Sensoren benötigen und ist somit technisch und kommerziell auszuschließen.

Wichtigste Voraussetzung ist also, Warnungen vor Kollisionen nur auszulösen, wenn eine Fortsetzung der aktuellen Bewegung mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Kollision führt. Dies bedingt, die Position zu messen und die Bewegungen aller beteiligten Objekte in ihrer Richtung und Geschwindigkeit zu erfassen.

Das Prinzip dazu ist nicht neu – Hobbypiloten kennen es. Kleinflugzeuge außerhalb der Luftverkehrskontrolle warnen sich dadurch, dass jedes Flugzeug einen Sender an Bord hat, der die Position, Geschwindigkeit und Flugrichtung kontinuierlich als Datenpaket aussendet. Alle Flugzeuge innerhalb der Reichweite (wenige km) können dieses Signal empfangen und mit ihrem Empfänger daraus selbst eine Kollisionsgefahr auf der Basis des eigenen Kurses und der eigenen Geschwindigkeit ableiten (Bild 9). So ist sichergestellt,

dass es keine Vermittlung oder zwischengeschaltete Verarbeitung der Daten gibt, die möglicherweise zeitkritisch bei der Kollisionsvermeidung ist.

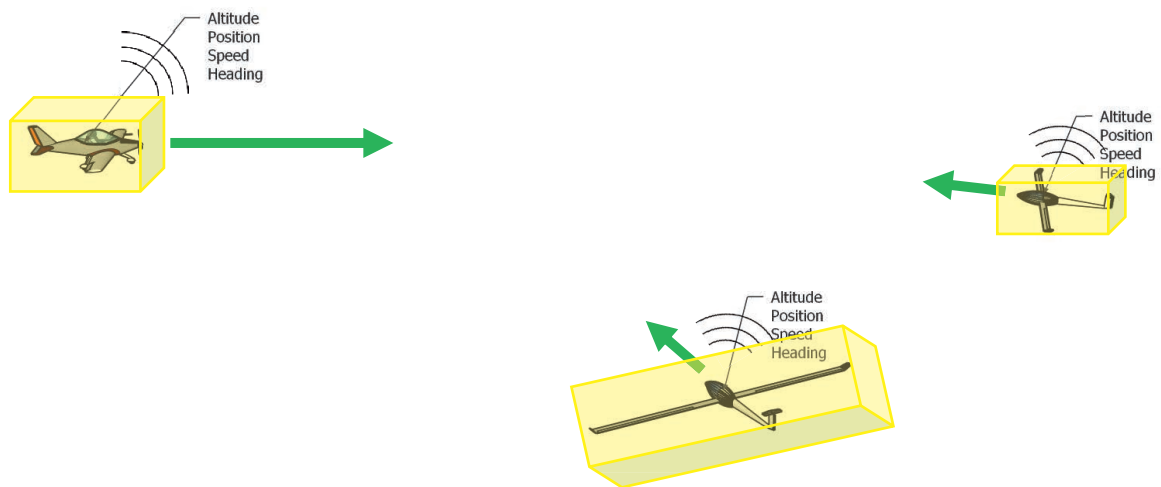


Bild 9: Kollisionsvermeidung bei Kleinflugzeugen ohne Luftverkehrsüberwachung

Dieses Prinzip nutzt die dreidimensionale Kollisionsvermeidung zwischen Kran, Lastaufnahmemittel und Transportfahrzeugen (Bilder 10 und 11).

Der Kran kennt seine Position im Containerterminal in den für diesen Standort festgelegten Koordinaten. Die Kransteuerung kennt ebenfalls die Position und den aktiven Bewegungszustand des Lastaufnahmemittels („spreader“) und auch den Ladezustand, mit oder ohne Container. Sobald nun der Kran mit einem kleinen Zusatzgerät, dem Kollisionsmelder, ausgestattet ist, sendet er kontinuierlich diese Bewegungsinformation als Funksignal aus. Der Kollisionsmelder hört zeitgleich auch auf solche Meldungen von anderen Kranen und Fahrzeugen.

Ein ebenfalls mit einem solchen Kollisionsmelder ausgestattetes Transportfahrzeug ermittelt seine Position und seine Geschwindigkeit im Containerlager mittels Satellitenortung (GPS, GNSS). Unter bzw. neben dem Kran erfolgt die Positionsermittlung durch Radarsignale, da dort GPS nicht zuverlässig funktioniert. Im Ergebnis sendet auch das Fahrzeug seine Bewegungsdaten im selben Koordinatensystem fortlaufend als Funksignal aus und hört zeitgleich auf Kollisionsmeldungen von anderen Fahrzeugen/Kranen.



Bild 10: Radar zur 2D Positionsbestimmung und Kollisionsvermeidung zwischen Kranen, Last und Fahrzeugen

Der Kollisionsmelder empfängt Positions- und Geschwindigkeitsmeldungen von allen nahen Fahrzeugen/Kranen. Kontinuierlich berechnet er daraus die Kollisionsgefahr, unter Berücksichtigung der eigenen Maschinenform und Bewegungsrichtung sowie der Bewegung der möglichen Kollisionsobjekte. Der Warn- und Alarmbereich lässt sich orts- und situationsabhängig modifizieren, um Warnungen und Alarmer nur in tatsächlich gefährlichen Annäherungen auszulösen und so eine hohe Akzeptanz bei den Bedienern der Krane und Fahrzeuge zu gewährleisten.

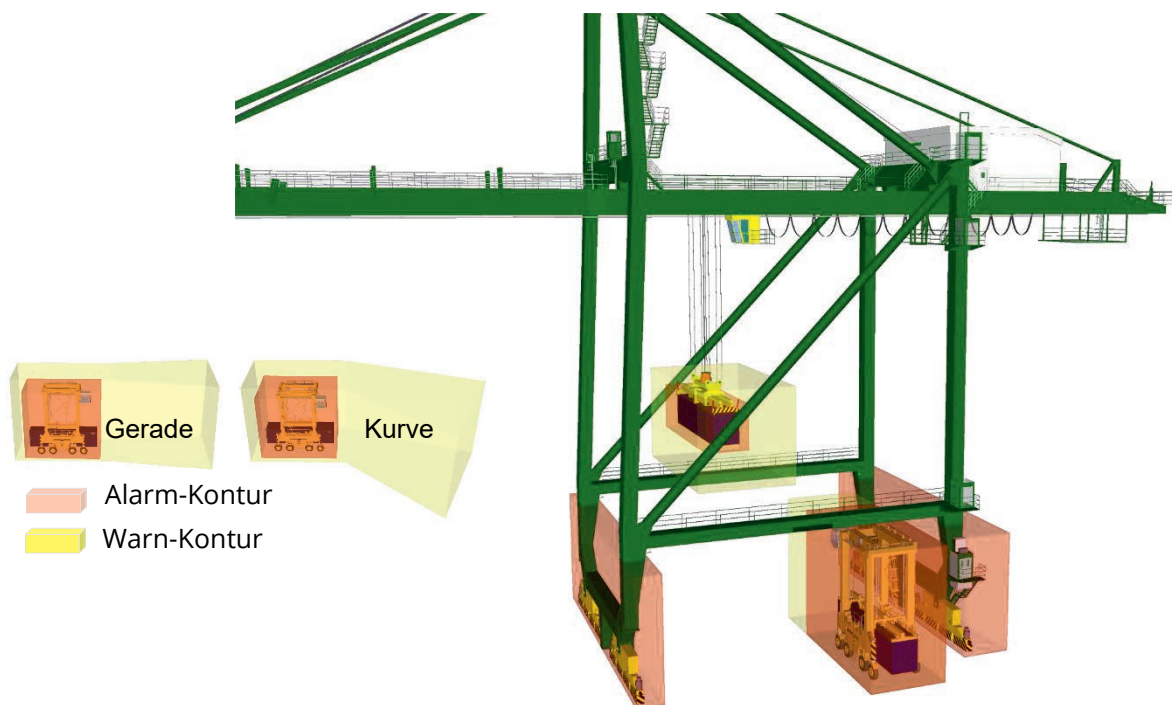


Bild 11: 3D Kollisionsvermeidung mit dynamischen Warn- und Alarmbereichen, abhängig von Fahrtrichtung und Geschwindigkeit

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite unbegrenzt bei lfd. Positionsbestimmung
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

4.2 Kollisionsvermeidung mit ortsfesten und temporären Hindernissen

Die im Kapitel 4.1 bereits vorgestellten Kollisionsmelder nutzen die Positionsbestimmung der bewegten Maschine für die Signalisierung an andere Kollisionsobjekte. Dieser Kollisionsmelder hat aber auch eine Datentabelle in seinem Speicher, die die Ortskoordinaten und die Form von temporären und ständigen Hindernissen beinhaltet (Bild 12). Die eigene Position wird daher kontinuierlich mit dieser Tabelle verglichen, um daraus ggf. Kollisionswarnungen für sich selbst zu erzeugen. Auf diese Art können z. B. Lichtmasten oder temporäre gesperrte Arbeitszonen in jeder beliebigen Fahrtrichtung/Annäherung abgesichert werden.

Die Tabelle mit allen bekannten Hindernissen kann automatisch oder manuell auf einem Rechner im Netzwerk geändert werden und wird über eine Netzwerkkommunikation danach einmalig wieder an alle Krane/Fahrzeuge verteilt. Somit ist lokal in jedem bewegten Objekt eine Kollisionsüberwachung mit minimaler Latenzzeit für ortsfeste Hindernisse möglich, ohne dafür eine Serververbindung zu benötigen.

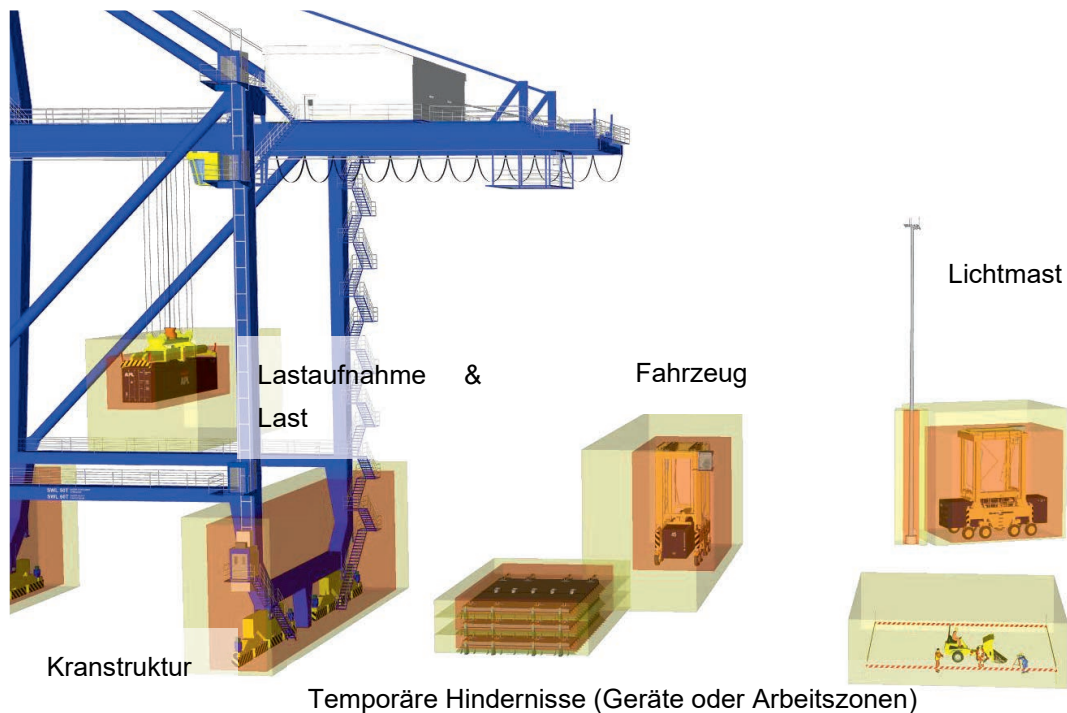


Bild 12: Kollisionsvermeidung mit ortsfesten Hindernissen (permanent oder temporär)

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite unbegrenzt bei lfd. Positionsbestimmung
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

4.3 Kollisionsvermeidung bei Turmdrehkränen

Die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Komponenten und Lösungen zur Kollisionsvermeidung können auch bei Turmdrehkränen zur Vermeidung von Kollisionen angewendet werden. Eine Vernetzung oder Verbindung zwischen den Kranen ist nicht erforderlich. Jeder Kran hat einen KY-LOC 2D Sensor zur Bestimmung der Position und Ausrichtung und sendet analog zu 4.1/4.2 seine Positions- und Bewegungsdaten über ein Funksignal aus. Nachbarkrane empfangen das Signal und können daraus die Kollisionsgefahr ermitteln. Ortsfeste Hindernisse (z. B. die Statue in Bild 13) können in der gemeinsamen Hindernistabelle für alle Krane hinterlegt werden, um bei Annäherung eine Warnung für den Bediener auszulösen.

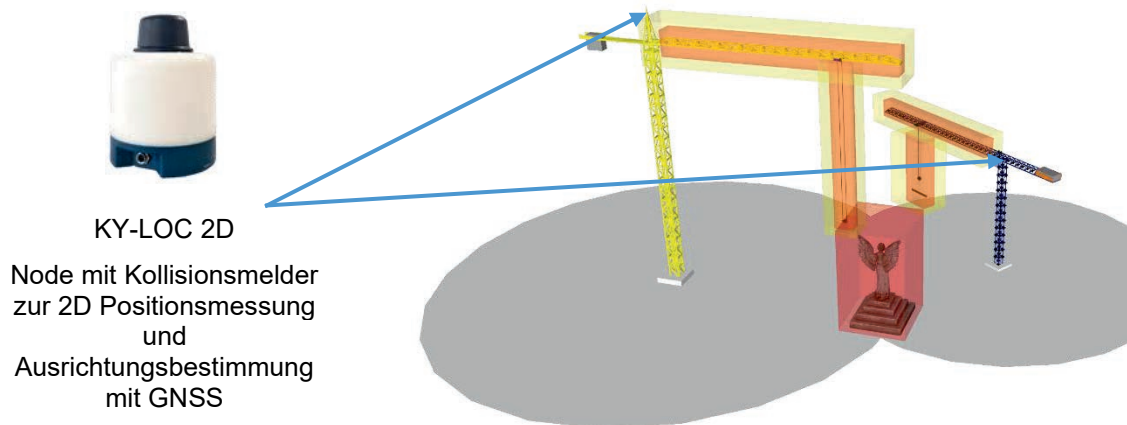


Bild 13: Kollisionsvermeidung bei Turmdrehkränen mit überlappendem Arbeitsbereich

Für alle in diesem Kapitel genannten Anwendungen gilt:

Vorteile:

- Kein Wartungs- oder Reinigungsaufwand
- Reichweite unbegrenzt bei lfd. Positionsbestimmung
- Kontinuierliche Selbstüberwachung

Nachteile:

- Keine

5 Visualisierung und 3D Replay von Kollisionswarnungen

Die Bewegungsdaten der Krane und Fahrzeuge können über ein vorhandenes Netz aufgezeichnet werden, um z. B. bei gefährlichen Annäherungen solche Daten später aus einem beliebigen Ansichtspunkt in 3D wieder abzuspielen und für Schulungszwecke zu nutzen.

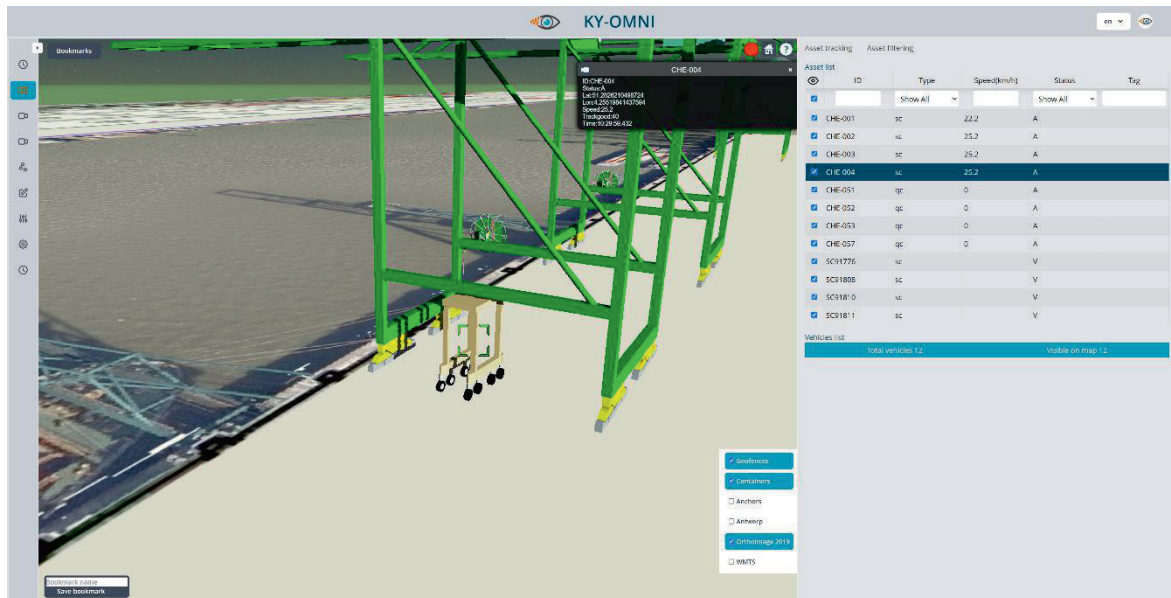


Bild 14: KY-OMNI Visualisierungssoftware, im Webbrowser

Über diese dynamische 3D Visualisierung können auch Flottendaten von Maschinen, Fahrzeugen und Kranen wie Kollisionswarnungen, Einsatzzeit, Stillstandszeit, Wartungsdaten und Bewegungsprofile je Gerät verwaltet werden (Bild 14).

Zusammenfassung

Positionsbestimmung und Kollisionssicherheit lassen sich kostengünstig mit denselben Radarsensoren wartungsfrei und mit geringem Installationsaufwand durchführen.

Kollisionswarnungen werden mit sehr wenig Latenzzeit auf dem Kran oder im Fahrzeug ausgelöst, ohne einen zentralen Server dazu zu benötigen. Dazu sind die Sensorik und die Algorithmen zur Kollisionsabschätzung heute so präzise, dass Fehlalarme weitgehend vermieden werden.

Durch neue Sensorik in Verbindung mit daran angepassten Algorithmen lässt sich die Betriebssicherheit für viele Anwendungen deutlich erhöhen, bei gleichzeitiger Senkung von Betriebsausfällen und Reparaturkosten.

Sicherheit macht sich bezahlt.

Quellenverzeichnis:

[1] Firmenunterlagen Kymati GmbH, 2025

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Sichere 3D-Kranassistenz mit Pro-Kran-Assist

Robin Schmidt
Daniel Sopauschke
Klaus Richter



Robin Schmidt
Kranbau Köthen GmbH
Am Holländer Weg 5-7
06366 Köthen



M. Sc. Daniel Sopauschke
Hon.-Prof. Klaus Richter
Fraunhofer IFF
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Sichere 3D-Kranassistentz mit Pro-Kran-Assist

Kranautomatisierer prognostizieren, dass die Entwicklungen bei photonischen 3D-Sensoren und Machine Learning-Verfahren zu einem großen Entwicklungsschub bei Assistenz- und Remote-Steuerungen führen werden. Krananlagen werden Bestandteil kollaborativer Prozessabläufe mit anderen automatisierten Betriebsmitteln und binden den Menschen ein.

Mit diesem Beitrag wird der aktuelle Entwicklungsstand eines produktiv arbeitenden Assistenzsystems für Prozesskrane in der Gießereiindustrie vorgestellt, mit dem insbesondere der gefährliche Anschlagvorgang für Gießpfannen sicherer gestaltet wird.

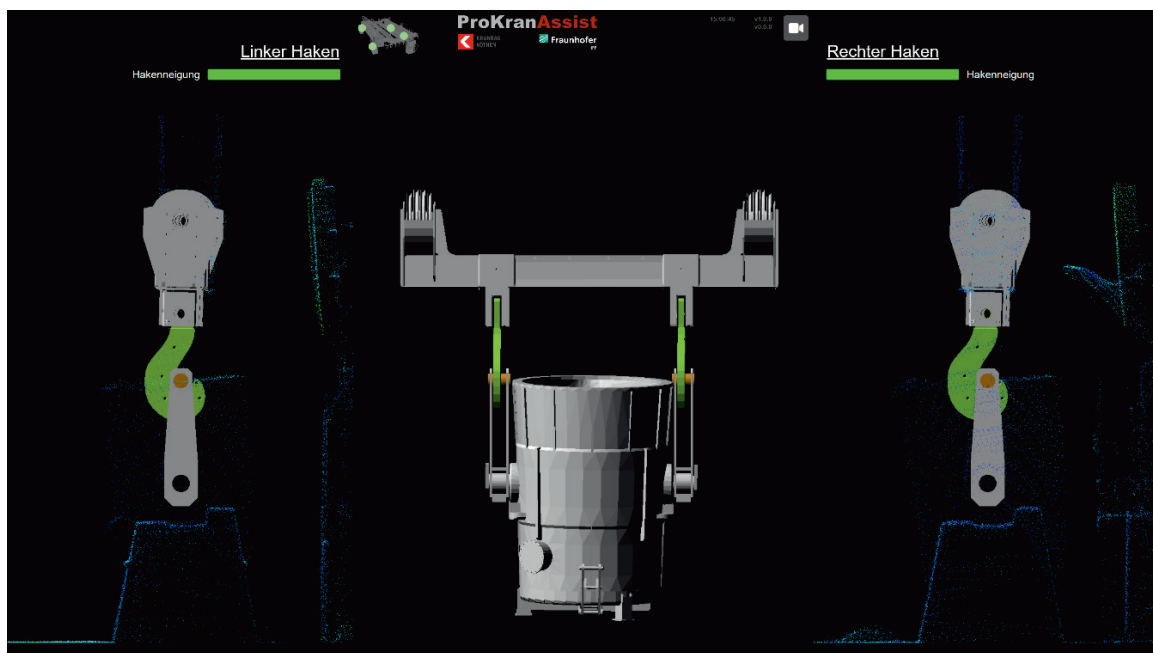


Bild 1: Nutzerinterface von Pro-Kran-Assist [Fraunhofer IFF]

1 Motivation

Die Stahlindustrie steht vor einem tiefgreifenden Wandel. Neue Technologien, die zunehmend auf Digitalisierung und Automatisierung setzen, gewinnen an Bedeutung. Geforderte Prozessumstellungen sind Herausforderungen, die gemeistert werden müssen. Ganz im Sinne von Industrie 4.0 wird dieser Fortschritt auch bei den Prozesskranen sichtbar. Hierbei spielen Assistenzsysteme eine zunehmende Rolle, um Arbeitsprozesse genau zu überwachen. Dabei stehen natürlich Arbeitssicherheit und Prozesseffektivität im Vordergrund, denn zuverlässige und effektive Krananlagen sind der Schlüsselfaktor kontinuierlicher Produktionsabläufe.

Wie bereits auf einer vorhergehenden Tagung vorgestellt, vermarktet die Kranbau Köthen GmbH das Assistenzsystem „Pro-Kran-Assist“ für Prozesskrane, ein automatisiertes, kontaktloses Analyseverfahren, welches den Arbeitsbereich eines Prozesskrans mittels 3D-LiDAR-Sensoren vollumfänglich extrinsisch erfasst und in Echtzeit analysiert. In den LiDAR-Sensoren werden Punktwolken mehr als 5-mal in der Sekunde mit einer Erfassungsrate von 1 Mio. Punkten/sec. gescannt und mithilfe von regelbasierten Algorithmen ausgewertet.

Dies ermöglicht eine absolut sichere Interpretation der Umschlagoperationen. Die Ergebnisse werden in Echtzeit in einem kombinierten Punktwolke/VR-Modell dargestellt und dem Kranführer präsentiert.

2 Ausgangslage

Bei Prozesskränen im Stahlwerksbetrieb bestehen besondere Gefährdungen, die es in anderen Industriebereichen nicht gibt. Der Transport von feuerflüssigen Massen birgt ein besonderes Risiko, da eine volle Gießpfanne aufgrund der Masse, der Transporthöhe und der auftretenden Hitze sehr viel potentielle Energie bündelt. Ein Lastabsturz oder das Kippen der Pfanne aufgrund eines nicht korrekt sitzenden Lamellenhakens wäre der denkbar schlimmste Zustand.

Wie bei allen Kränen mit einem seilgeführten Lastaufnahmesystem ist es auch hier schwierig, eine ordnungsgemäße Lastaufnahme/Lastabgabe bzw. eine Fehlstellung des Lastaufnahmesystems sensorisch zu erkennen, weil

- bedingt durch die Biegeschlaffheit der Seile und die Freiheitsgrade der mechanischen Gelenke eine genaue Position und Lage des Kranhakens nicht sicher aus der Kransteuerung bzw. dem bewegungsmechanischen Aufbau des Krans ableitbar sind,
- die durch den Kran aufzunehmende Last eine Position/Lage innehaben kann, die nicht ideal vom Lastaufnahmemittel des Krans angefahren werden kann,
- mindestens der Haken hinter der Gießpfanne nicht vom Kranführer einsehbar ist.

Auch die Umgebungsbedingungen in der Halle, charakterisiert durch Verschmutzung, Rauch und Schlacke, sowie die Beschaffenheit der Abstellfläche können die Aufnahmesituation erschweren. Bisher waren Piezo-Sensoren am Hakenmaul der aktuelle Stand der Technik, um den Lastaufnahmestatus zu messen, die aber sehr anfällig gegenüber Hitze oder Beschädigung durch Krafteinwirkung sind. Die im Vorfeld betrachteten Überwachungssysteme für Krananlagen sind allesamt störanfällig und lassen eine vollumfängliche Überwachung des Chargierprozesses nicht zu.

2.1 Der Piloteinsatz bei der GMH

Durch den Einsatz moderner LiDAR-Sensoren können trotz der erschwerten Arbeitsbedingungen die Lasthebemittel und die Gießpfanne zuverlässig erkannt und in einer 3D-Punktwolke abgebildet werden. Die Wiederholgenauigkeit bei der Bestimmung der Hakenposition ist dabei äußerst präzise. Selbst ein mechanisches Ungleichgewicht des Lastaufnahmesystems wird mühelos erkannt und dem Kranführer dargestellt. Durch die hervorragende Zusammenarbeit der Kranbau Köthen GmbH mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung Magdeburg konnten erste Referenzprojekte fertig gestellt werden.

Bereits im Sommer 2022 konnte die Kranbau Köthen GmbH bei ihrer GMH-Schwester, dem Stahlwerk Georgsmarienhütte, ein erstes Assistenzsystem platzieren ([1], [3], [4]). Nach ausführlicher Sichtanalyse wurde die optimale Position der LiDAR-Sensoren gefunden (siehe Bild 2).

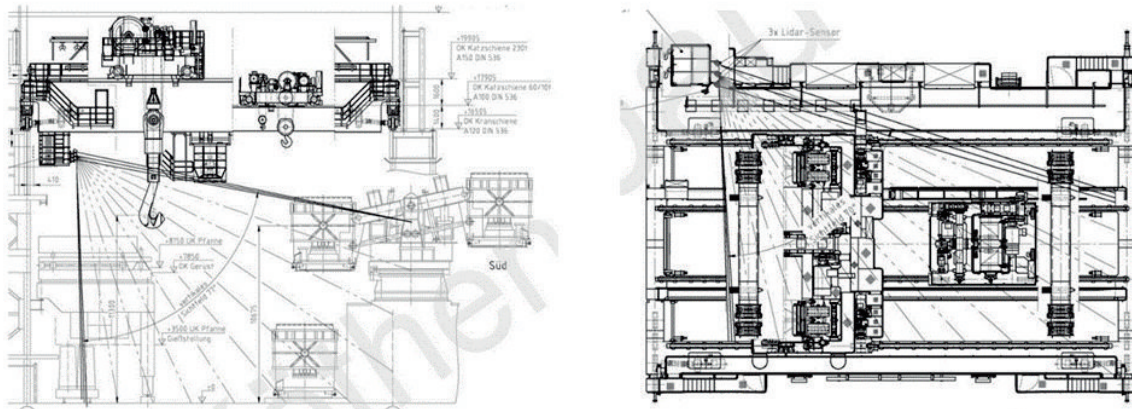


Bild 2: Sichtanalyse der Sensoren [Kranbau Köthen GmbH]

Generell empfiehlt es sich, eine symmetrisch angeordnete Position am Kran zu wählen, damit durch annähernd gleiche Detektionsabstände die Fehlerrate sinkt. Nach 3 Jahren Einsatzzeit läuft das Pilotprojekt immer noch zuverlässig und mit vollster Zufriedenheit. Lediglich ein Sensor der ersten Generation wies Störungen auf und musste getauscht werden. Ein Ergebnis, das für ein Entwicklungsprojekt absolut vertretbar ist.

2.2 Der Anwendungseinsatz bei voestalpine Donawitz

Die aus dem Pilotprojekt GMH gesammelten Erfahrungen flossen direkt in das nächste Projekt ein, wo die Herausforderungen für das Assistenzsystem noch einmal größer waren. Über 17 Meter Detektionsweg, die für ein Stahlwerk typisch rauen Umgebungsbedingungen, große Strahlungshitze, Staub und Rauch beschreiben die besonderen Einsatzbedingungen für das Sensorsystem beim Stahlwerk voestalpine Donawitz. Im Gegensatz zum Pilotprojekt bei der GMH ist hier nicht immer eine vollständige Sicht für die Sensoren gegeben. Eine wahre Belastungsprobe. Auch verschiedene Einbauten und Anlagenteile in der Halle, welche als Störkanten wahrgenommen werden können, mussten betrachtet werden - somit war auch hier eine ausführliche Vorabuntersuchung notwendig. Nach der sorgfältigen Untersuchung der Umgebung und der Sichtverhältnisse wurde die Position der Sensoren bestimmt. Anschließend konnten diese Sensorsysteme an der Krananlage montiert werden. Zur besseren Erreichbarkeit für Einstellung und Wartung der Geräte war es naheliegend, diese an vorhandenen Podesten zu montieren (siehe Bild 3 und Bild 4). Das ProKran System hält aber auch diesen extremen Bedingungen stand, trotz der teils erschwerten Sicht läuft das System für die Kranführer der voestalpine absolut zufriedenstellend.



Bild 4: Befestigung am Treppenaufgang [Kranbau Köthen GmbH]



Bild 3: Einfache Klemmbefestigung [Kranbau Köthen GmbH]

3 Lösungsweg

Die 4 LiDAR-Sensoren sind in einem Edelstahl-Kameragehäuse montiert (siehe Bild 3 und Bild 4). Temperaturuntersuchungen im Kameragehäuse zeigten, dass mit maximal 30 °C im Gehäuse-Innenraum keine separate Kühlung der Sensoren notwendig ist und die zulässigen Betriebstemperaturwerte der LiDAR-Komponenten nicht erreicht bzw. überschritten werden.

Bei Anlagen mit großer Strahlungshitze oder Flammenschlag bietet Kranbau Köthen als zusätzliche Option einen „intelligenten“ Schutzmechanismus. Eine Schutzklappe aus Edelstahl fährt dabei nach einer programmierten Bedingung, z. B. der erreichten Hubhöhe der Traverse, selbstständig zu und schützt die Linse vor Hitze und Flammenschlag. Zusätzlich werden die Gehäuse in feuerfestes Material eingepackt, welches die empfindliche Elektronik zusätzlich schützt.

Bei ersten Versuchen am Pilotprojekt wurde der Systemrechner noch mit Kofferband gesichert, nun erfolgt die Unterbringung der Schaltungskomponenten ordentlich im Schaltschrank (siehe Bild 5).

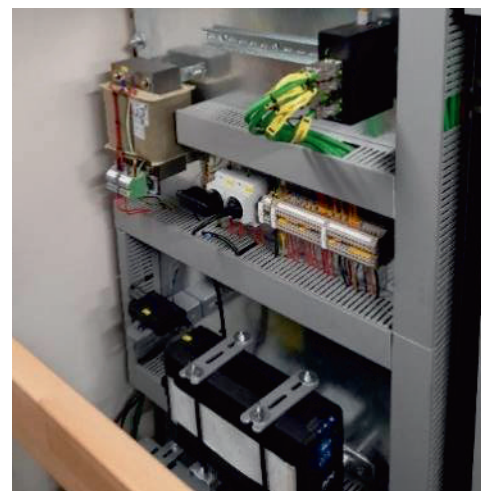
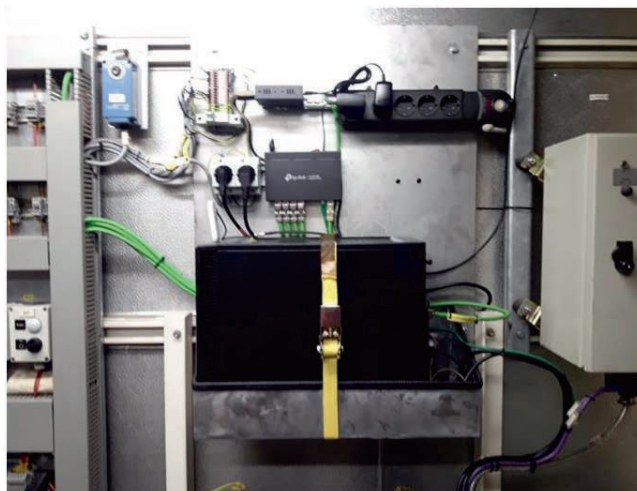


Bild 5: Befestigung der Rechnerkomponente beim Pilotprojekt und im Produktivprojekt [Kranbau Köthen GmbH]

Ein weiterer wichtiger Teil des Systems Pro-Kran-Assist sind die Glasperlen-Reflektoren. Die besonders beschichteten Reflektoren werden an dem Lastaufnahmemittel wie z. B. der Traverse montiert und geben den Sensoren das Feedback über die aktuelle Position. Gerade bei staubiger Umgebung erweisen sich diese besonderen Markerflächen als wichtiger Anhaltspunkt für die Detektion [2], in Bild 6 als roter, konzentrierter Fleck sichtbar.

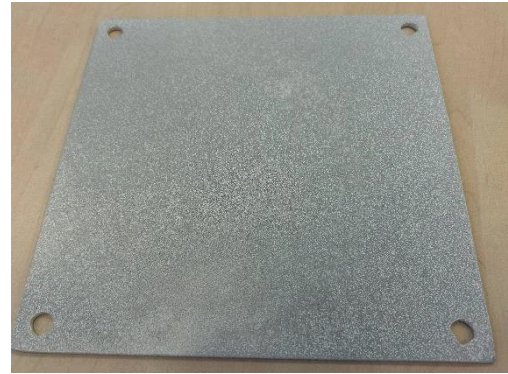


Bild 6: Detektion der Reflektorplatte [Fraunhofer IFF]

Die verwendeten LiDAR Sensoren von Livox Technology Company Limited unterscheiden sich in ihrem speziellen Abtastmuster von anderen gängigen LiDAR-Systemen, da sie ihren Erfassungsbereich nicht in Form starrer Ebenen, sondern in Form eines rotierenden Musters abtasten. Eine höhere Integrationszeit der Sensordaten führt somit zu einer geschlossenen Punktwolke, die alle Bereiche des Arbeitsraums erfasst. So wird der Fall vermieden, dass sich beispielsweise ein Kranhaken gerade zwischen zwei Scanebenen befindet und nicht genügend Daten für die Analyse generiert werden können.

In den so erzeugten Punktwolken werden dann die Objekte lokalisiert. Grundlage dafür bilden CAD-Modelle, die die Objektkonturen wiedergeben. Es entsteht der digitale Zwilling des realen Lastaufnahmesystems. Aus den detektierten Positionen und Ausrichtungen wird dann eine Einschätzung der Lastaufnahmesituation abgeleitet. Die Ergebnisse werden dem Kranführer anschließend in Form eines Dashboards präsentiert, in dem alle für ihn relevanten Informationen übersichtlich zusammengefasst sind.

4 Detektion und Evaluation der Krankomponenten

4.1 Datenintegration und Aufbereitung

Die verwendeten Livox HAP LiDAR Sensoren generieren jeweils 452.000 Punkte/s, welche in Paketen von je 96 Punkten über Ethernet an den Auswerterechner gesendet werden, also rund alle 210 μ s ein Paket [6]. Der Auswerterechner sammelt die ankommenden Pakete ein und integriert diese auf, da mit nur jeweils 96 Punkten keine Auswertung stattfinden kann. Typische Integrationszeiten liegen im Bereich von 200-400 ms. Je länger die Integrationszeit gewählt wird, desto dichter ist die entstehende Punktwolke, was die nachfolgende Lokalisierung erleichtern kann. Allerdings hinterlassen bei längeren Integrationszeiten die Bewegungen der beobachteten Objekte eine Art Motion Blur in den Punktwolken, was eine genaue Lokalisierung behindert. Die zu verwendende Integrationszeit ist ein Optimierungskriterium des Systems und muss an die spezifischen

Bedingungen angepasst werden. Es ist ebenfalls möglich, für die Detektion verschiedener Objekte jeweils andere Integrationszeiten zu verwenden, um eine optimale Auswertung zu ermöglichen.

Nach der Integration der Daten werden diese auf Grundlage einer erfolgten Kalibrierung in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und auf den Arbeitsbereich des Krans reduziert. Die Sensoren können abhängig von ihrer Lage und Ausrichtung größere Bereiche der Halle erfassen, die jedoch für das hier genannte Auswertungsziel der Überprüfung der korrekten Lastaufnahme nicht relevant sind. Durch den Zuschnitt auf den Arbeitsbereich des Krans werden die Punktmenge und damit auch die benötigte Zeit für die folgende Analyse verringert.

Ebenfalls werden Störpunkte aus den Daten entfernt. Dazu liefert bereits der Sensor zu jedem Punkt eine Einschätzung mit, ob es sich bei dem Punkt um ein Rauschen oder um echte Messdaten handelt. Auf dieser Grundlage können fehlerhafte Messdaten schnell verworfen werden. Eine aufwändigere Filterung wird aufgrund der erforderlichen Taktzeit nicht durchgeführt.

4.2 Markerbasierte Detektion

In der nun vorliegenden Punktwolke werden die relevanten Objekte für die Bewertung der Lastaufnahmesituation, Traverse, Haken und Gießpfanne mit Zwischengehänge, detektiert. Bevorzugt findet die Detektion dabei über retroreflektive Marker statt, die in den Sichtbereichen der Sensoren an den Objekten befestigt wurden. Diese Marker sind in der Punktwolke aufgrund ihrer im Vergleich zur Umgebung erhöhten Retroreflektivität schnell zu identifizieren und ermöglichen eine zügige und sichere Detektion.

Zur Detektion der Traverse werden die retroreflektiven Punkte aus der Gesamtpunktwolke extrahiert, zu Regionen zusammengefasst, die jeweils einen Marker darstellen, und anschließend mit den erwarteten Positionen der Marker an der Traverse verglichen, um eine Übereinstimmung zu identifizieren. Aus den so zugeordneten Markern kann dann eine Schätzung der Lage der Traverse abgeleitet werden. Diese Schätzung wird anschließend durch eine Registrierung mithilfe des ICP-Algorithmus [5] in die umgebende Punktwolke verbessert.

Im Anschluss werden die Haken lokalisiert. Deren grundlegende Position ist bereits aufgrund der detektierten Traverse gegeben, da sich die Haken relativ zur Traverse nur wenig bewegen können. Die verbleibende Unsicherheit betrifft die Auslenkung der Haken, also ihre Rotation um den Aufhängungspunkt an der Traverse. Auf den Hakenrückseiten sind ebenfalls retroreflektive Marker befestigt, aus deren Lage sich der Auslenkungswinkel einfach bestimmen lässt.

Der Vorteil einer markerbasierten Detektion liegt in der erreichbar kurzen Latenz zur Objektlokalisierung, da die Extraktion der Marker aus der Punktwolke und deren Abgleich mit den bekannten Positionen keine aufwändigen Berechnungen benötigen. So können dem Kranführer Änderungen der Lastaufnahmesituation sehr zügig wiedergegeben werden.

Nachteilig wirkt sich hingegen der erhöhte Wartungsaufwand aus, da die Marker

insbesondere im Stahlwerksumfeld größeren Mengen an Staub, Flammenschlag und Hitze ausgesetzt sind. Verschmutzte Marker können nicht mehr so stabil detektiert werden und sollten daher regelmäßig gereinigt werden.

4.3 Markerfreie Detektion

Das Anbringen von retroreflektiven Markern ist nicht immer praktikabel. Im Gegensatz zur nur einmal vorhandenen Traverse sollten etwa auch die verwendeten Gießpfannen mit Markern ausgestattet werden. Ebenfalls wird eine Detektionsmethode für den Fall benötigt, wenn die Marker verschmutzt sind und daher nicht erkannt werden können. In diesem Fall wird die Detektion alleinig über die Punktwolke, die Geometrien der relevanten Objekte und Vorwissen über deren Lage durchgeführt.

Die Detektion der Traverse erfolgt nun über den Zwischenschritt der Detektion der Seile, an denen die Traverse aufgehängt ist. Der Bereich, in dem sich die Seile relativ zum Kran bewegen, ist sehr begrenzt, wodurch die Seile leicht identifiziert werden können. Im Anschluss wird die Traverse an das untere Ende der Seilpunktwolke mithilfe des ICP-Algorithmus eingepasst. Für die Detektion der Haken wird nun ebenfalls auf den ICP zurückgegriffen. Nach einer initialen Schätzung ihrer Position auf Basis der Traversenposition werden die digitalen Haken in die umgebende Punktwolke eingepasst.

Die Gießpfanne wird mittels einer markerfreien Methode lokalisiert. Dabei wird nur die Untermenge an Punkten betrachtet, die sich vor und unterhalb der Traverse befinden. Andere Gießpfannen sind für die aktuelle Lastaufnahmesituation nicht von Interesse. Die Lokalisierung erfolgt dann über die Detektion der zylindrischen Form der Gießpfanne in der Punktwolke und eine anschließende Feineinpassung mithilfe des ICP-Algorithmus.

Der Vorteil der markerfreien Detektion liegt in dem zugrunde liegenden generalisierten Ansatz zur Objektlokalisierung, der weniger von äußeren Einflüssen wie etwa Verschmutzungen abhängig ist. Nachteilig wirkt sich die etwas höhere Latenz aus, die vor allem auf die zusätzlichen Berechnungsschritte zurückzuführen ist.

Nach erfolgter Detektion werden die Positionen und Ausrichtungen der Objekte im digitalen Zwilling hinsichtlich der Situation der Lastaufnahme bewertet. Für die Traverse werden dabei der Grad der Schwingung (Rotation um vertikale Achse) und der Schiefstellung bewertet, da sich bei einer Aufnahme mit nur einem Kranhaken eine Verkippung der Traverse einstellen würde. Für die Kranhaken wird die Bewertung aus drei Kriterien abgeleitet: den Hakenwinkeln, dem Versatz zum Aufnahmepunkt in Kranfahrtrichtung und dem Versatz in Katzfahrt-/Hubrichtung. Daraus lässt sich dann eine Gesamteinschätzung der aktuellen Lage ableiten.

5 Visualisierung

Die Punktwolke, die Detektionsergebnisse und deren Bewertung werden dem Kranführer in Form eines Dashboards präsentiert. Dieses soll ihn dabei unterstützen, die Prozesssituationen zu den Zeitpunkten der Aufnahme und Abgabe der Gießpfanne, besonders am verdeckten Kranhaken, besser einschätzen zu können. Ein beispielhaftes Dashboard während der Pfannenaufnahme ist in Bild 1 dargestellt.

Das Dashboard gliedert sich grundsätzlich in die Bereiche der Kranhakenansichten und einer Frontaldarstellung. In den beiden Kranhakenansichten werden als vertrauensbildende Basis die fusionierten Daten aller 4 LiDAR-Sensoren in einer kombinierten Punktwolke dargestellt. Diese, auf die nahe Umgebung der Kranhaken reduzierte Punktwolke, wird dabei 20mal pro Sekunde aktualisiert, so dass sich ein flüssiges Abbild der realen Situation ergibt. Überlagert werden dann die Ergebnisse der Objektlokalisierungen in Form von 3D-Modellen der Traverse, des jeweiligen Kranhakens und des Zwischengehänges samt der Aufnahmepunkte im Takt der Detektion wiederholend und echtzeitnah dargestellt. Die Kranhaken werden dabei auf Grundlage der getroffenen Evaluation der Prozesssituation im digitalen Zwilling einem Ampel-Schema folgend eingefärbt, so dass für den Kranführer mit einem Blick auf das Dashboard die Einschätzung des Systems zur aktuellen Gesamtlage zu erkennen ist.

In der Frontalansicht sind wegen der besseren Übersichtlichkeit nur die 3D-Modelle visualisiert. Die Frontalansicht erlaubt dem Kranführer eine einfache Einschätzung, ob das Lastaufnahmesystem korrekt zentriert ist und beide Kranhaken in den vorgesehenen Spalt im Zwischengehänge eintauchen können oder ob noch ein Versatz in Kranfahrtrichtung besteht.

Das Dashboard ist als Web-Anwendung realisiert, die über eine Websocket-Verbindung vom Backend die benötigten Daten zur Visualisierung empfängt und dann mithilfe des neuen WebGPU-Standards visualisiert. Dieser neue Standard ermöglicht im Vergleich zum Vorgänger WebGL eine höhere Performance, die die Flüssigkeit der Darstellung steigert [7]. Durch die Realisierung des Nutzerinterfaces als Webanwendung lassen sich moderne Webtechnologien zur Gestaltung nutzen, so dass für den Kranführer eine einfache, übersichtliche Präsentation der Detektionsergebnisse realisiert werden kann.

6 Ergebnisse

Die Detektionsgeschwindigkeit des Systems liegt bei ca. 4-5 Detektionen pro Sekunde. Das ist ausreichend, um den Zustand des Lastaufnahmesystems fortlaufend in Echtzeit zu überwachen und dem Kranführer frühzeitig Hinweise auf möglicherweise gefährliche Situationen zu geben. Die Feinregistrierung der Modelle in die umgebende Punktwolke nimmt dabei den größten Aufwand ein.

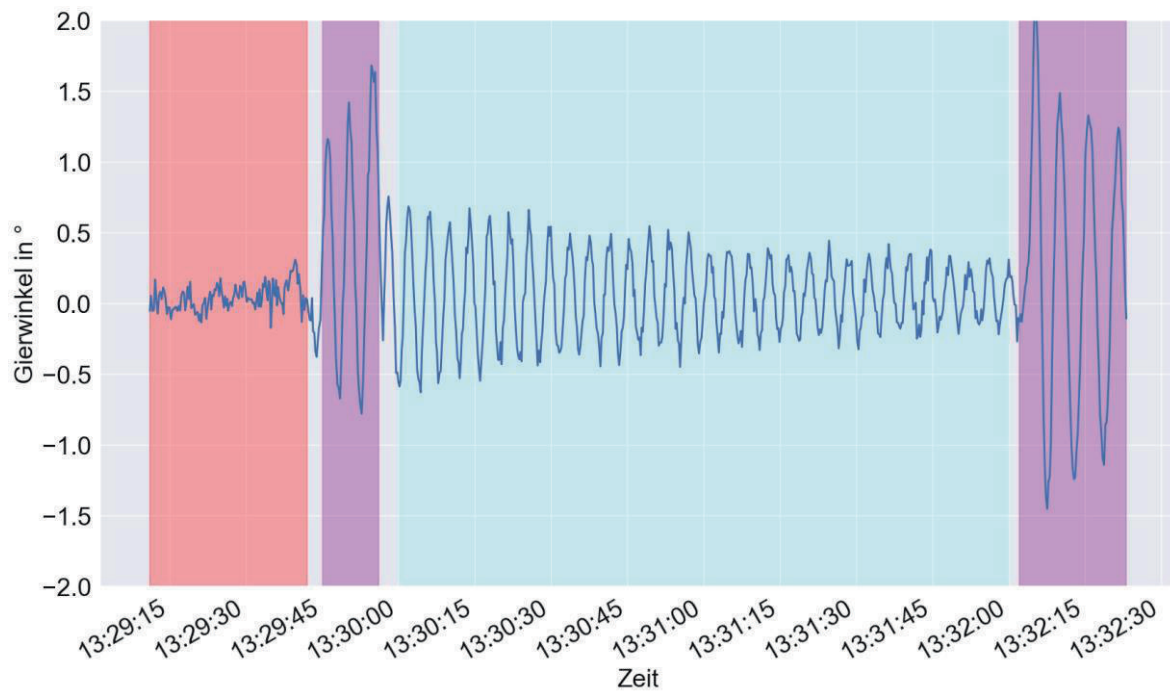


Bild 7: Gierwinkel der Traverse - Rotation um die vertikale Achse [Fraunhofer IFF]

Das System protokolliert sämtliche Detektionen für eine nachträgliche Analyse mit. Aus diesen lassen sich neben der maßgebenden Distanz zwischen Hakenmaul und Aufnahmepunkt an der Gießpfanne auch Nebeneffekte wie Pendelbewegungen der Krantraverse erkennen. Exemplarisch soll dies an den Protokolldaten einer Pfannenaufnahme verdeutlicht werden: Zu Beginn befindet sich die Krantraverse oberhalb und aus Kranfahrersicht vor der Pfanne. Die Traverse wird dann an die Pfanne herangefahren und anschließend aufgenommen. Nach dem Anheben wird die Pfanne für eine bestimmte Zeit im schwebenden Zustand gehalten, anschließend wieder abgesetzt und die Traverse entfernt. In den Bildern 7 und 8 sind die Kurven einiger Parameter während dieser Aufnahme visualisiert. Relevante Abschnitte sind farblich hervorgehoben.

Bild 7 zeigt den Gierwinkel der Traverse, die Rotation um die vertikale Achse. Vor der Aufnahme der Pfanne ist dieser nahe 0° (roter Bereich), da die Traverse frei und in Ruhe hängt. Beim Anfahren an die Pfanne stößt jedoch ein Kranhaken zuerst gegen das Zwischengehänge und versetzt die Traverse in Schwingung. Diese Schwingungen werden kurzperiodischer und schwächer, sobald die Pfanne angehoben ist (hellblauer Bereich). Am Ende werden die Schwingungen wieder stärker, da sich beim Absetzen ein Haken nicht sofort von der Pfanne löst. Diese Verzögerung führt zu einem größeren Gierwinkel, der anschließend nachschwingt.

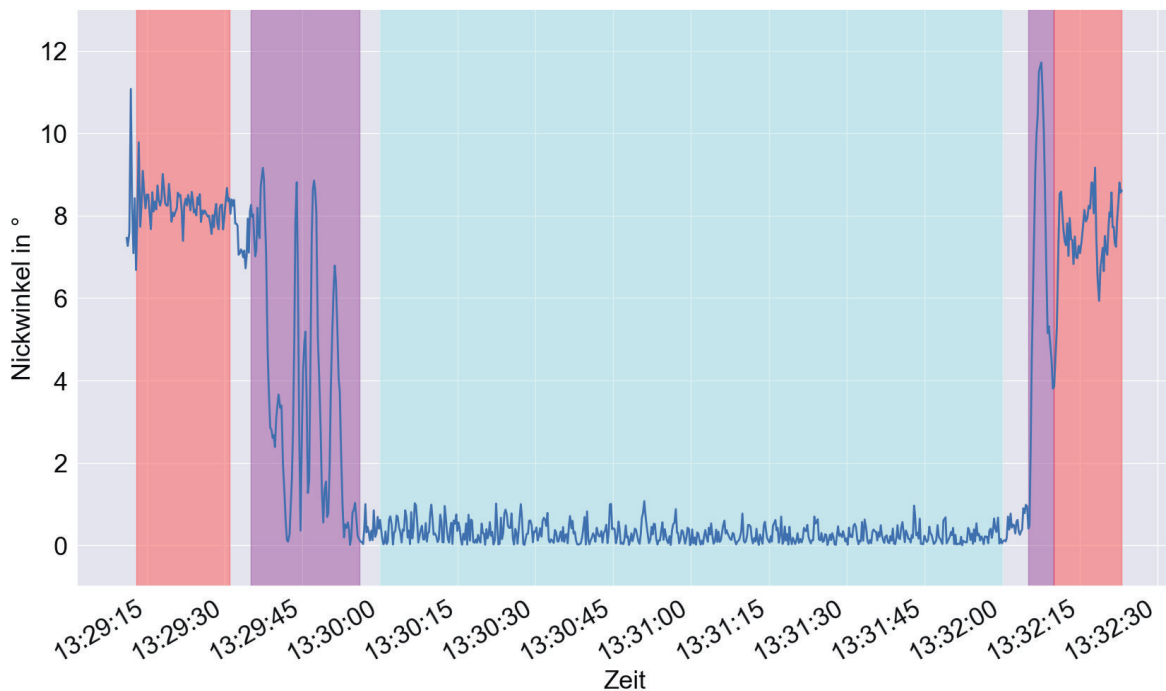


Bild 8: Auslenkung des rechten Kranhakens [Fraunhofer IFF]

Besonders relevant für die Bewertung der Lastaufnahme ist die Auslenkung der Kranhaken, der Rotationswinkel um ihren Aufhängungspunkt an der Traverse, dargestellt in Bild 8 für den rechten Kranhaken. Vor dem Einhaken und Anheben der Pfanne beträgt der Winkel ca. 8° . Der erwartete Winkel lässt sich aus der Geometrie von Traverse und Kranhaken ableiten. Beim Aufnehmen der Pfanne ändert sich der Winkel in kurzer Zeit stark, da der Kranführer mit den Kranhaken am Aufnahmepunkt anschlägt, um sicher einhaken zu können (violetter Bereich). Nach dem Anheben der Pfanne stellt sich ein neues mechanisches Gleichgewicht mit einem Hakenwinkel von ca. $0,5^\circ$ ein. Dies ist ein wichtiger Indikator für die korrekte Aufnahme der Pfanne. Würde die Pfanne auf der Hakenspitze aufgenommen werden, würde der Hakenwinkel zu diesem Zeitpunkt deutlich größer sein, was als Warnung an den Kranführer übermittelt wird. Nach dem Absetzen der Pfanne ändert sich der Hakenwinkel wieder auf die ursprünglichen 8° . In der Abbildung für den rechten Haken (Bild 8) kann man das kurzzeitige Festhalten an der Gießpfanne beim Aushaken gut erkennen (zweiter violetter Bereich). Der Haken ist noch mit dem Aufnahmepunkt verbunden, während die Traverse schon leicht nach hinten bewegt wird. Dadurch verkippt der Haken. Auch dies kann als Warnsignal an den Kranführer gemeldet werden, um ein mögliches Umkippen oder Verziehen der Pfanne nach dem Absetzen zu vermeiden.

Zusammenfassung

Neuartige LiDAR-Sensoren können den Kranprozess mit seinen Komponenten auch im rauen Umfeld der Stahl- und Prozessindustrie zuverlässig und robust als 3D-Punktwolke erfassen, wie das in der Zusammenarbeit zwischen der Kranbau Köthen GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Fabrikautomatisierung und -betrieb IFF in Magdeburg entwickelte Assistenzsystem Pro-Kran-Assist zeigt.

Das Assistenzsystem läuft vollkommen autark, um eine unkomplizierte Systemintegration auch bei Bestandskränen zu ermöglichen. Zukünftig wird das Assistenzsystem automatisch schon bei Anomalien in der Anfahrtsbewegung warnen, um den Bewegungsvorgang rechtzeitig modifizieren oder abbrechen zu können.

Krananlagen werden immer mehr Bestandteil kollaborativer Prozessabläufe mit anderen automatisierten Betriebsmitteln und binden den Menschen ein. Kranstillstände als Folge konventioneller, restriktiver Sicherheitsfunktionen für den gesamten Arbeitsbereich sollten so zukünftig auf ein Minimum reduzierbar sein.

Quellenverzeichnis:

- [1] Sopauschke, D., Trostmann, E.; Richter, K.: Smart process observer for crane automation. In: International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication; Springer International Publishing, 2022
- [2] Groneberg, M., et al.: A Case Study on Retroreflective Marker Usage in Industrial 3D Lidar Applications. In: International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication; Springer Nature Switzerland, 2023
- [3] Poenicke, O. et al.: Industrial Application Use Cases of LiDAR Sensors Beyond Autonomous Driving. In: International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics; Springer Nature Switzerland, 2023
- [4] Sopauschke, D., Lange, J.; Richter, K.: Intelligenter Prozessbeobachter für die Kranautomatisierung. In 31. Internationale Kranfachtagung. S. 51 – 60. Bochum 2023
- [5] Sopauschke, D.; Trostmann, E.: Modellbasierte Analyse und Auswertung von 3D-Punktwolken. In: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, 2021, Fraunhofer Verlag
- [6] HAP Manual;
[https://dl.djicdn.com/downloads/Livox/HAP/HAP\(TX\) User Manual V1.2 EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/Livox/HAP/HAP(TX) User Manual V1.2 EN.pdf)
(Datum des Zugriffs: 22.01.2025)
- [7] Chickerur, S. et al.: WebGL vs. WebGPU: A Performance Analysis for Web 3.0. In: Procedia Computer Science 233 (2024): 919-928

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Sichere Kranpositionierung unter rauen Bedingungen

Alexander Meier



M. Sc. Alexander Meier
Symeo GmbH
Prof.-Messerschmitt-Straße 3a
85579 Neubiberg

Sichere Kranpositionierung unter rauen Bedingungen

Eine sichere Kranpositionierung ist von zentraler Bedeutung in Anwendungen, bei denen der Transport großer Sachwerte oder der Schutz von Menschenleben im Fokus steht. In solchen Szenarien ist die Reduktion von Risiken durch technische Maßnahmen nicht nur eine gesetzliche Anforderung, sondern auch eine moralische Verpflichtung. Insbesondere sichere Sensorsysteme spielen hierbei eine zentrale Rolle, um Maßnahmen zur Risikoreduktion wirksam umzusetzen.

Herausfordernd wird es jedoch, wenn solch anspruchsvolle Anwendungen unter rauen Umgebungseinflüssen oder dem Vorhandensein von prozessbedingten Störeinflüssen realisiert werden müssen. Ob durch äußere Einflüsse wie Regen, Nebel, Störlicht und Staub oder durch prozessbedingte Faktoren wie zum Beispiel Schlacke, Lichtbögen, Dampf und Störschall – die Zuverlässigkeit des Systems steht dabei im Vordergrund. Schließlich gilt: Nur ein verfügbares System kann seine Sicherheitsfunktion zuverlässig ausführen und somit aktiv zur Risikoreduktion beitragen.

1 Herausforderungen durch raue Umwelt- und Prozessbedingungen

Die sichere Positionierung von Krananlagen stellt hohe Anforderungen an die eingesetzte Sensorik, insbesondere wenn diese unter anspruchsvollen Umwelt- und Prozessbedingungen arbeiten muss. Viele etablierte Sensortechnologien für die 1D-Distanzmessung, also die präzise Erfassung eines Abstands zu einem definierten Zielpunkt, liefern unter idealen Bedingungen zuverlässige Messergebnisse. In realen Industrie- und Außenanwendungen sind sie jedoch häufig erheblichen Störeinflüssen ausgesetzt. Diese können die Genauigkeit und Verfügbarkeit der Messsysteme beeinträchtigen oder sie sogar vollständig unbrauchbar machen.

1.1 Umweltbedingte Störeinflüsse

Besonders in Outdoor-Anwendungen wirken zahlreiche Umweltfaktoren auf die eingesetzte Sensorik ein (Bild 1). Ein häufiges Problem ist Regen, der nicht nur die optische Durchlässigkeit von Linsen und Abdeckungen beeinflusst, sondern auch durch Reflexionen und Brechungen die Messsignale verfälschen kann. Dies ist besonders kritisch für Distanzmesssysteme, die mit optischen Verfahren wie Lichtlaufzeitverfahren arbeiten. Diese Technologien sind darauf angewiesen, dass das ausgesendete Signal ohne Störungen reflektiert wird – Wassertröpfchen in der Messstrecke können jedoch die Signalqualität drastisch verschlechtern.

Ein weiteres bedeutendes Umweltphänomen ist Nebel. Während er für das menschliche Auge oft nur eine Sichtbehinderung darstellt, kann er für viele Sensortechnologien zur 1D-Distanzmessung zu einem kritischen Problem werden. Kamerabasierte Systeme und laserbasierte Distanzmessverfahren sind stark von der Lichtstreuung betroffen, wodurch die Signalqualität und somit die Messgenauigkeit abnimmt.

Auch Ultraschallsensoren, die in der Theorie robuster gegen optische Störungen sind, werden durch Nebel in ihrer Präzision beeinflusst, da die Schallgeschwindigkeit, welche zur genauen Messung bekannt und konstant sein muss, temperatur- und feuchtigkeitsabhängig ist.

Neben diesen direkten Wiedereinflüssen ist auch Störlicht ein kritischer Faktor. Direkte Sonneneinstrahlung oder stark reflektierende Oberflächen können die Signalverarbeitung optischer Distanzmesssysteme beeinträchtigen oder Fehlmessungen verursachen. Besonders bei Laser-Distanzmessgeräten oder Infrarotsensoren kann es dazu kommen, dass das eigentliche Messsignal in der Hintergrundstrahlung untergeht oder von unerwarteten Reflexionen verfälscht wird.

Staub stellt eine weitere Herausforderung dar, insbesondere in Industriebereichen wie der Baustoff-, Metall- oder Bergbauindustrie. Feine Partikel in der Luft können sich auf Sensoroberflächen ablagern, was nicht nur optische Sensoren beeinträchtigt, sondern auch mechanische Drehgeber oder Inkrementalgeber in ihrer Funktionsweise stört. Radar ist gegenüber diesen Einflüssen unempfindlich.



Bild 1: Raue Umgebungsbedingungen sowie prozessbedingte Störeinflüsse

1.2 Prozessbedingte Störeinflüsse

Neben den natürlichen Umweltbedingungen gibt es eine Vielzahl von Störungen, die direkt aus den industriellen Prozessen selbst resultieren. Ein typisches Beispiel ist die Staubbildung in Hochtemperaturprozessen, wie sie in der Schwerindustrie vorkommt. Beim Gießen oder Verarbeiten von Metallen entstehen häufig Rauch, Dampf und Staub, die sich in der Umgebungsluft verteilen und die Signalerfassung von Distanzsensoren beeinträchtigen können.

Ein weiteres kritisches Szenario ergibt sich in Prozessen, bei denen heiße Materialien kontrolliert abgekühlt werden müssen. Die dabei entstehenden Dampfwolken beeinflussen Sensoren auf ähnliche Weise wie Nebel und können insbesondere bei optischen oder laserbasierten Distanzmessverfahren zu massiven Messfehlern führen. Selbst wenn die Sensoren durch hermetische Gehäuse geschützt werden, bleibt das Problem der Signalabsorption oder -streuung bestehen.

Zusätzlich können mechanische Einflüsse, wie Vibrationen oder Schwingungen, Messungen verfälschen. Besonders problematisch ist dies bei Drehgebern oder anderen mechanischen Sensoren, die auf eine präzise Positionserfassung angewiesen sind.

In einer Umgebung mit starker Staubentwicklung kann es zudem zur Bildung von Schmierfilmen auf mechanischen Sensoren kommen, was zu mechanischem Schlupf und damit zu ungenauen Messwerten führt. Weiterhin ist Schlupf durch mechanischen Verschleiß eine weitere mögliche Fehlerquelle.

Ein oft unterschätzter Einfluss ist die Lichtbogenbildung in Schweiß- oder Schneidprozessen. Hochenergetische Lichtbögen emittieren ein breites Spektrum elektromagnetischer Strahlung, das optische Sensoren und sogar elektronische Systeme beeinflussen kann. Diese elektromagnetischen Störungen können Signalverarbeitungsprozesse beeinträchtigen und zu Fehldetektionen führen.

1.3 Anforderungen an ein robustes Distanzmesssystem

Zusammenfassend zeigt sich, dass industrielle Anwendungen mit einer Vielzahl an Umwelt- und Prozessstörungen konfrontiert sind, die den Einsatz vieler herkömmlicher 1D-Distanzmesstechnologien erschweren oder unmöglich machen. Eine funktional sichere Lösung muss daher nicht nur präzise und zuverlässig messen, sondern auch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Störeinflüssen aufweisen. Dies bedeutet, dass das Sensorsystem:

- unempfindlich gegenüber optischen Störungen sein muss (z. B. durch reflektiertes Licht, Nebel oder Staub).
- nicht auf mechanisch bewegliche Teile angewiesen sein darf, da diese unter rauen Bedingungen verschmutzen oder ausfallen können.
- hohe Verfügbarkeit und Messstabilität gewährleisten muss, um auch unter schwierigen Bedingungen verlässliche Daten zu liefern.

Denn nur ein Distanzmesssystem, das stabil und verfügbar bleibt, kann seine sicherheitskritische Funktion zuverlässig erfüllen.

2 Radar als robuste Lösung für funktional sichere Distanzmessungen

Angesichts der vielfältigen Herausforderungen, die Umwelt- und Prozessbedingungen für Distanzmesssysteme darstellen, ist die Wahl der richtigen Sensortechnologie entscheidend. Viele herkömmliche Messverfahren stoßen unter widrigen Bedingungen schnell an ihre Grenzen – optische Systeme versagen bei Nebel oder Störlicht, mechanische Sensoren leiden unter Verschmutzung und Verschleiß.

Radartechnologie hingegen bietet entscheidende Vorteile für robuste und zuverlässige Distanzmessungen. Sie arbeitet mit elektromagnetischen Wellen, die weitgehend unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen wie Regen, Staub oder Dampf sind. Während optische Systeme bereits durch kleinste Partikel in der Messstrecke gestört werden, kann Radar auch in stark beeinträchtigten Umgebungen präzise Abstandsbestimmungen durchführen. Zudem ermöglicht die hohe Durchdringungsfähigkeit von Radarwellen in bestimmten Frequenzbereichen Messungen durch Materialien hindurch, die für andere Sensoren undurchsichtig sind.

Ein weiterer Vorteil ist der inhärent robuste Aufbau von industrieller Radartechnik: Sie benötigt keine beweglichen Teile wie Ablenkspiegel, wodurch der Wartungsaufwand minimiert und die Langzeitstabilität der Sensorik erhöht wird. Gerade in sicherheitskritischen Anwendungen, in denen ein System jederzeit zuverlässig arbeiten muss, ist dies ein entscheidender Faktor.

In den folgenden Abschnitten wird erläutert, warum Radar besonders gut für funktional sichere Distanzmessungen geeignet ist und wie die physikalischen Eigenschaften dieser Technologie gezielt genutzt werden können, um eine hohe Messgenauigkeit und Robustheit zu gewährleisten.

2.1 Radarfrequenzen und Wellenlängen – Schlüssel zur Robustheit

Ein zentraler Vorteil der Radartechnologie liegt in der Wahl der Frequenz und der damit verbundenen Wellenlänge. Die verwendete elektromagnetische Strahlung bewegt sich typischerweise im Frequenzbereich von 5 GHz bis 240 GHz, was einem Millimeterwellen-Spektrum entspricht (Bild 2). Diese Frequenzbereiche sind im sogenannten ISM-Band (Industrial Scientific and Medical Band) angesiedelt, welches weltweit gut verfügbar ist.

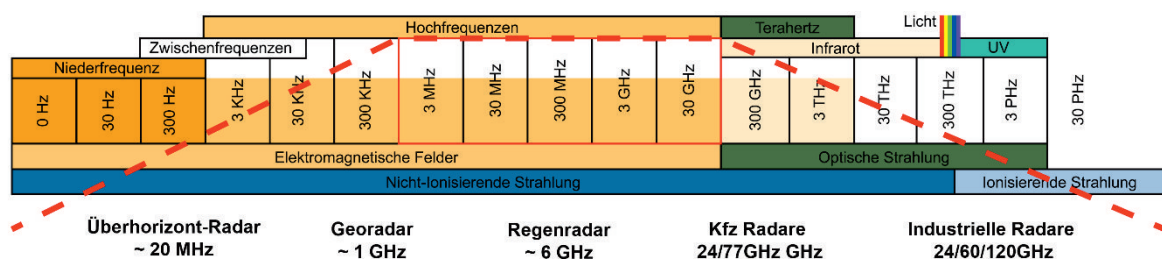


Bild 2: Frequenzspektrum für verschiedene Radaranwendungen [1]

Die Wellenlänge ist ein entscheidender Faktor für die Robustheit eines Sensorsystems gegenüber Störungen. Allgemein gilt: Je größer die Wellenlänge im Verhältnis zur Größe der Störpartikel, desto geringer der Einfluss dieser Partikel auf das Messsignal. Während optische Sensoren im Bereich des sichtbaren Lichts mit Wellenlängen im Mikro- oder Nanometerbereich arbeiten, nutzt Radar größere Wellenlängen im Millimeterbereich. Dies führt dazu, dass typische Störpartikel wie Regen, Nebel, Staub oder Dampf, die für lichtbasierte Systeme problematisch sind, im Radarbereich kaum Einfluss auf das Messsignal haben.

Um dies zu verdeutlichen, lohnt sich ein Vergleich:

- Optische Sensoren (Kameras, Laserscanner) arbeiten mit Wellenlängen zwischen 400 und 700 nm (sichtbares Licht) oder im nahen Infrarotbereich. Bereits feine Staubpartikel oder Wassertröpfchen haben eine vergleichbare oder größere Größe und führen daher zu Signalstreuung, Absorption oder Reflexionen.
- Radarsysteme im Millimeterwellenbereich nutzen Wellenlängen von etwa 1 mm (bei 300 GHz) bis 60 mm (bei 5 GHz). Da die meisten Störpartikel in industriellen und Outdoor-Anwendungen deutlich kleiner als diese Wellenlängen sind, bleiben sie für das Radarsignal weitgehend transparent.

Dies erklärt, warum Radar eine besonders robuste Technologie für Distanzmessungen unter rauen Bedingungen ist. Während optische Systeme durch Schmutz, Wasser oder Staub schnell an ihre Grenzen stoßen, kann Radar zuverlässig durch diese Störeinflüsse hindurch messen. Besonders im Hochfrequenzbereich (z. B. 77 GHz, 120 GHz oder 240 GHz) lassen sich zudem hohe Messgenauigkeiten im Millimeterbereich erzielen.

Diese physikalischen Eigenschaften machen Radar zur idealen Lösung für sicherheitskritische Anwendungen, in denen eine zuverlässige Messung selbst unter widrigen Umweltbedingungen sichergestellt werden muss.

2.2 Das Primärradar

Ein Radarsystem basiert auf der Aussendung und dem Empfang elektromagnetischer Wellen. Die grundlegende Funktionsweise eines Primärradars beruht darauf, dass ein Sender ein Radarsignal aussendet, das auf ein Ziel trifft und von dort reflektiert wird. Der Empfänger registriert das zurückkommende Signal und bestimmt daraus verschiedene Messgrößen. Dabei können zwei fundamentale Messmethoden genutzt werden, die durch den Einsatz der FMCW-Technologie (Frequency Modulated Continuous Wave) ermöglicht werden:

- Distanzmessung mittels Time-of-Flight (ToF) – Die Signal-Laufzeit zwischen Aussendung und Empfang des reflektierten Signals liefert direkt die Entfernung des Objekts.
- Geschwindigkeitsmessung mittels Dopplereffekt – Die Frequenzverschiebung des reflektierten Signals gibt Aufschluss über die Relativbewegung des Objekts.

FMCW-Radarsysteme senden kontinuierlich eine frequenzmodulierte Welle aus. Durch den Vergleich der gesendeten und empfangenen Signale kann sowohl die Laufzeitdifferenz (zur Bestimmung der Distanz) als auch die Frequenzverschiebung (zur Ermittlung der Geschwindigkeit) analysiert werden. Diese Methode macht Radar besonders effizient und präzise für industrielle Anwendungen.

Die Menge der vom Empfänger empfangenen Energie hängt im Wesentlichen von drei physikalischen Effekten ab: Absorption, Transmission und Reflexion (Bild 3). Diese Effekte bestimmen, wie viel der ausgesendeten Radarwellen zum Sensor zurückgelangt und damit für die Messung genutzt werden kann.

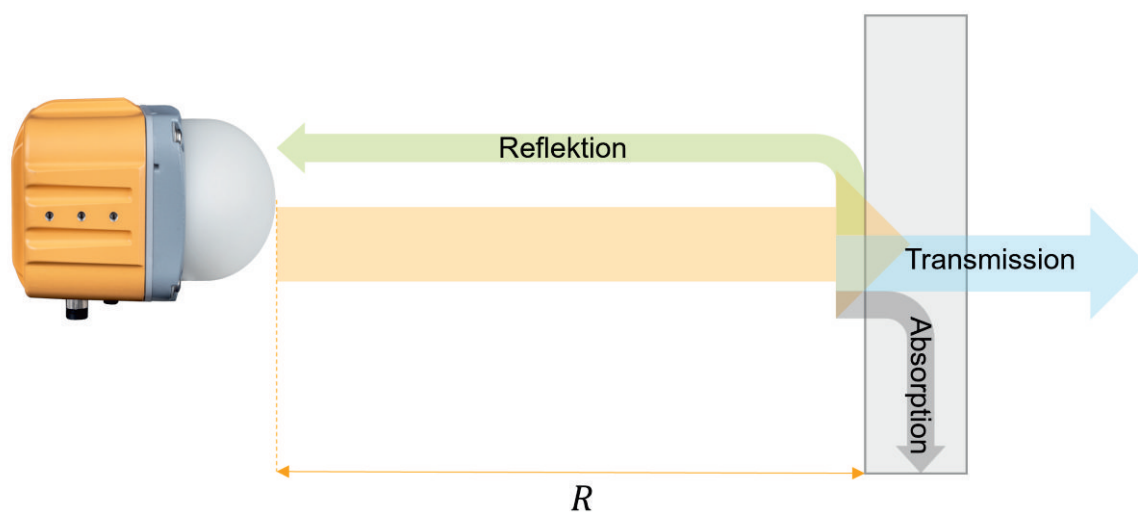


Bild 3: Aufteilung der emittierten Leistung beim Primärradar

2.2.1 Absorption – Energieverluste durch Materialeigenschaften

Ein Teil der ausgesendeten Radarsignale wird durch das Zielmaterial absorbiert und in Wärme oder andere Energieformen umgewandelt. Dies bedeutet, dass nicht die gesamte auf das Objekt treffende Energie für die Rückstreuung zur Verfügung steht. Die Absorptionseigenschaften eines Materials hängen stark von dessen elektrischer Leitfähigkeit und Permittivität ab. Beispielsweise absorbieren Metalle nur sehr wenig Radarenergie, während nichtleitende Materialien oder bestimmte Kunststoffe große Teile der Strahlung verschlucken können.

2.2.2 Transmission – Durchdringung von Materialien

Ein weiterer Teil der elektromagnetischen Wellen kann das Ziel durchdringen, insbesondere wenn das Material eine hohe Transmissivität für Radarwellen aufweist. In der Praxis bedeutet dies, dass Radar durch einige Materialien hindurchsehen kann, während andere das Signal vollständig blockieren. Metalle sind nahezu vollständig undurchlässig für Radarwellen, während Kunststoffe, Papier, Holz oder sogar dünne Schichten von Beton gewisse Radartransparenz aufweisen. Diese Eigenschaft kann gezielt genutzt werden, um versteckte Objekte zu detektieren oder Radarsysteme hinter Schutzabdeckungen zu betreiben, ohne dass die Sensorleistung beeinträchtigt wird.

2.2.3 Reflexion – der entscheidende Signalanteil für die Messung

Der für die Messung entscheidende Anteil der Radarenergie ist der reflektierte Signalanteil. Dieses Signal wird vom Zielobjekt zurück zum Sensor gelenkt und zur Bestimmung der Entfernung und weiterer Parameter verwendet. Die Intensität der Reflexion hängt von mehreren Faktoren ab:

- Materialeigenschaften des Objekts (stark reflektierende Materialien wie Metall liefern hohe Signalarückläufe, während absorbierende Materialien schwache Rückläufe erzeugen)
- Geometrie des Ziels (ebene Flächen reflektieren das Signal gezielt, während unregelmäßige oder raue Oberflächen zu Streuung führen können)
- Radarrückstreuquerschnitt des Objekts, der beschreibt, wie gut ein Objekt elektromagnetische Wellen zurückwirft

2.2.4 Zusammenhang mit der Radargleichung

Ein zentraler Aspekt der Radartechnologie ist die Frage, wie viel von der ausgesendeten elektromagnetischen Energie nach der Reflexion am Ziel wieder am Empfänger ankommt. Dies wird durch die Radargleichung beschrieben, die verschiedene physikalische Einflüsse auf das empfangene Signal quantifiziert.

Die allgemeine Form der Radargleichung lautet:

$$P_r = P_t * \frac{G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (1)$$

wobei:

- P_r = empfangene Leistung
- P_t = ausgesendete Leistung
- G_t = Gewinn der Sendeantenne
- G_r = Gewinn der Empfangsantenne
- λ = Wellenlänge des Radarstrahls
- σ = Radarrückstreuquerschnitt des Ziels (wie gut es Radarwellen reflektiert)
- R_t = Entfernung zwischen Radar und Ziel (senden)
- R_r = Entfernung zwischen Ziel und Radar (empfangen)

Die empfangene Signalstärke hängt dabei wesentlich von der Entfernung zum Zielobjekt ab. Da die empfangene Leistung mit der vierten Potenz der Entfernung ($\frac{1}{R^4}$ für $R_t = R_r$) abnimmt, bedeutet dies, dass sich die empfangene Signalleistung bei einer Verdopplung der Distanz nicht nur halbiert, sondern um den Faktor 16 reduziert wird.

Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Langstreckenmessung dar, da schwache Reflexionen bei weiter entfernten Objekten zunehmend schwerer detektierbar sind. Aus diesem Grund müssen Radarsysteme entweder mit hoher Sendeleistung arbeiten oder empfindliche Empfänger und intelligente Signalverarbeitung einsetzen, um auch geringe Rückstreusignale noch zuverlässig auswerten zu können.

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Wellenlänge des Radarstrahls, die direkt mit der verwendeten Frequenz zusammenhängt. Die Radargleichung zeigt, dass die empfangene Leistung proportional zum Quadrat der Wellenlänge ist. Je größer die Wellenlänge, desto mehr Energie kann das Radarsystem empfangen. Dies erklärt, warum niedrigfrequente Radarsysteme im 24 GHz-Bereich besonders gut für große Distanzen geeignet sind. Die Messgenauigkeit wird maßgeblich durch die verfügbare Bandbreite bestimmt, die in der Regel mit steigender Frequenz zunimmt. Hochfrequente Radarsysteme im 61 GHz-, 120 GHz- oder 240 GHz-Bereich bieten hingegen eine deutlich feinere Ortsauflösung im Millimeterbereich, unterliegen jedoch einer höheren Freiraumdämpfung. Die Wahl der optimalen Frequenz ist daher stets ein Kompromiss zwischen Reichweite und Präzision.

Neben der Frequenz beeinflusst auch der Radarrückstreuquerschnitt des Zielobjekts, wie viel der ausgesendeten Energie zurück zum Sensor reflektiert wird. Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, insbesondere Metalle, reflektieren Radarwellen sehr effizient, während nichtleitende Materialien wie Kunststoffe große Teile der Wellen absorbieren oder durchlassen. Auch die Form und Orientierung (bezüglich des Radars) des Objekts spielt eine entscheidende Rolle: Glatte, ebene Flächen reflektieren das Signal gezielt in eine bestimmte Richtung (Einfallswinkel entspricht Reflexionswinkel), während raue oder unregelmäßige Oberflächen das Signal streuen, wodurch nur ein Bruchteil der Energie zum Radar zurückkehrt. In sicherheitskritischen Anwendungen kann dieser Effekt gezielt beeinflusst werden, indem Radarreflektoren oder speziell gestaltete Oberflächenstrukturen eingesetzt werden, um die Detektierbarkeit eines Objekts zu verbessern.

Schließlich spielt die Antennencharakteristik eine entscheidende Rolle in der Radargleichung. Der Gewinn der Sende- und Empfangsantenne bestimmt, wie stark das Signal gebündelt und in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Hochrichtende Antennen

mit schmalen Öffnungswinkel erhöhen die Effizienz des Systems erheblich, da sie die Energie gezielt auf das gewünschte Messziel fokussieren. Dies ist besonders für Langstreckenradare wichtig, da hier jede unnötige Energieabstrahlung außerhalb des relevanten Messbereichs vermieden werden sollte.

Zusammenfassend zeigt die Radargleichung, dass eine präzise Distanzmessung durch verschiedene physikalische Einflussgrößen bestimmt wird. Die exponentielle Abschwächung der Signalleistung mit der Entfernung, die Wahl der optimalen Frequenz für die gewünschte Reichweite und Genauigkeit, die Reflexionseigenschaften des Zielobjekts sowie die Antennencharakteristik sind entscheidende Faktoren für die Leistungsfähigkeit eines Radarsystems. FMCW-Radar nutzt diese Prinzipien optimal aus, indem es gleichzeitig die Laufzeit (ToF) für die Entfernung und den Dopplereffekt für die Geschwindigkeitsmessung erfasst. Dadurch eignet sich Radartechnologie besonders gut für robuste und hochverfügbare Distanzmessungen, bei denen es auf hohe Verfügbarkeit und Präzision auch unter rauen Bedingungen ankommt.

2.3 Physikalische Vorteile des Sekundärradar-Prinzips gegenüber dem Primärradar [2]

Das Sekundärradar-Prinzip bietet gegenüber dem klassischen Primärradar mehrere entscheidende physikalische Vorteile, die insbesondere für robuste und hochverfügbare Distanzmessungen relevant sind. Während ein Primärradarsystem darauf angewiesen ist, dass ein ausreichend starkes Signal vom Zielobjekt reflektiert wird, nutzt ein Sekundärradar ein aktives Antwortverfahren zwischen zwei gezielt eingesetzten Systemkomponenten – einem Master und einem Slave. Diese Architektur überwindet die wesentlichen Einschränkungen des Primärradars und führt zu mehreren mess- und systemtechnischen Vorteilen.

2.3.1 Geringere Abstandsabhängigkeit der Signalstärke – Höhere Reichweite

Eine zentrale physikalische Einschränkung des Primärradars ist die starke Entfernungsabhängigkeit der empfangenen Signalstärke, die gemäß der Radargleichung mit $\frac{1}{R^4}$ skaliert. Das bedeutet, dass die Signalstärke bei doppelter Entfernung nicht nur halbiert, sondern auf 1/16 des ursprünglichen Werts reduziert wird. Dies begrenzt die effektive Reichweite erheblich, da das reflektierte Signal mit zunehmender Entfernung rapide schwächer wird.

Im Sekundärradar-Prinzip ist diese Abhängigkeit deutlich reduziert, da der Slave das Signal aktiv empfängt und eine passende Antwort neu zurücksendet. Dadurch folgt die empfangene Signalstärke einer günstigeren $\frac{1}{R^2}$ -Skalierung, was bedeutet, dass sich das Signal bei doppelter Entfernung nur um den Faktor 1/4 abschwächt. Dies führt zu:

- Deutlich höheren nutzbaren Reichweiten – während ein Primärradar oft bei einigen hundert Metern an seine Grenzen stößt, sind im Sekundärradar Distanzen bis zu einem Kilometer problemlos realisierbar.
- Konstanterer Signalqualität über große Distanzen, da die Signalverluste deutlich geringer ausfallen.

2.3.2 Unabhängigkeit vom Radarquerschnitt des Zielobjekts

Ein Primärradarsystem ist darauf angewiesen, dass das Messziel genügend Radarwellen reflektiert. Die Signalmessstärke ist daher stark vom Material, der Geometrie und der Ausrichtung des Objekts abhängig.

- Hoch reflektierende Materialien wie Metall liefern gute Messergebnisse.
- Nichtmetallische oder absorbierende Materialien (z. B. Holz, Kunststoff oder Beton) schwächen das Signal stark ab.

Diffuse oder schräge Oberflächen führen zu Streuung, wodurch das zurückkommende Signal unzuverlässig wird. Das Sekundärradar ist von diesen Faktoren weitgehend unabhängig, da der Slave eine aktive Antwort erzeugt, anstatt ein passives Echo zurückzusenden.

Dadurch:

- Funktioniert die Messung unabhängig von der Materialbeschaffenheit – selbst schlecht reflektierende oder nichtleitende Objekte stellen kein Problem dar.
- Gibt es keine Signalverluste durch ungünstige Reflexionswinkel, da der Slave das Signal gezielt zurücksendet.

Diese Eigenschaft ist besonders vorteilhaft in Umgebungen, in denen stark schwankende Oberflächeneigenschaften der Messziele auftreten können, z. B. durch Schmutz, Staubablagerungen oder variierende Materialzusammensetzungen.

2.3.3 Eindeutige Zielzuordnung – Keine Mehrdeutigkeiten durch Reflexionen

Eine weitere Herausforderung des Primärradars vor dem Hintergrund einer funktional sicheren Applikation ist die Messmehrdeutigkeit bei zunehmender Entfernung. Da Radarsysteme typischerweise mit einem bestimmten Öffnungswinkel arbeiten, wächst der Messkegel mit der Distanz. Dadurch können sich:

- Mehrere Objekte im Radarstrahl befinden, was zu Messunsicherheiten führt.
- Falsche Reflexionen von Objekten im Hintergrund das Signal verfälschen.
- Fehlmessungen durch Mehrwegreflexionen (Multipath-Effekte) auftreten, wenn das Signal über mehrere Wege zurück zum Sensor gelangt.

Im Sekundärradar-Prinzip ist dieses Problem eliminiert, da sich der Slave aktiv beim Master „meldet“ und nur dieses eine Ziel als gültig erfasst wird. Das führt zu:

- Eindeutiger Zielzuordnung, da das System nur mit seinem Gegenstück kommuniziert.
- Keine Erkennung von unerwünschten Objekten durch Reflexionen in der Umgebung bedingt durch die Aufweitung des Radarkegels.

Dies macht das Sekundärradar ideal für industrielle Anwendungen, in denen eine verfügbare und präzise Distanzmessung notwendig ist, ohne dass Störquellen das Signal beeinflussen können.

2.3.4 Höhere Verfügbarkeit durch Signalüberwachung und Verbindungsprüfung

Bei einem Primärradar kann ein fehlendes Signal auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein:

- Das Messobjekt ist nicht mehr im Sichtbereich.
- Das Signal wurde absorbiert oder gestreut.
- Eine Störquelle bzw. ein technischer Defekt der Sendeeinheit verhindert die Messung.

Da das System jedoch nur nach dem Echo des selbst ausgesendeten Signals „lauscht“, ist eine eindeutige Fehlerdiagnose schwierig – ein fehlendes Signal kann sowohl auf einen Systemausfall als auch auf ein physikalisches Problem zurückzuführen sein.

Das Sekundärradar hingegen ermöglicht eine kontinuierliche Verbindungskontrolle durch die aktive Antwort des Slave-Moduls. Dadurch ist es möglich:

- Jederzeit zu überprüfen, ob die Verbindung zwischen Master und Slave noch besteht.
- Eine Diagnose über Signalqualität und Signalverfügbarkeit durchzuführen.

Diese kontinuierliche Selbstüberwachung des Systems erhöht die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit erheblich (Bild 4).

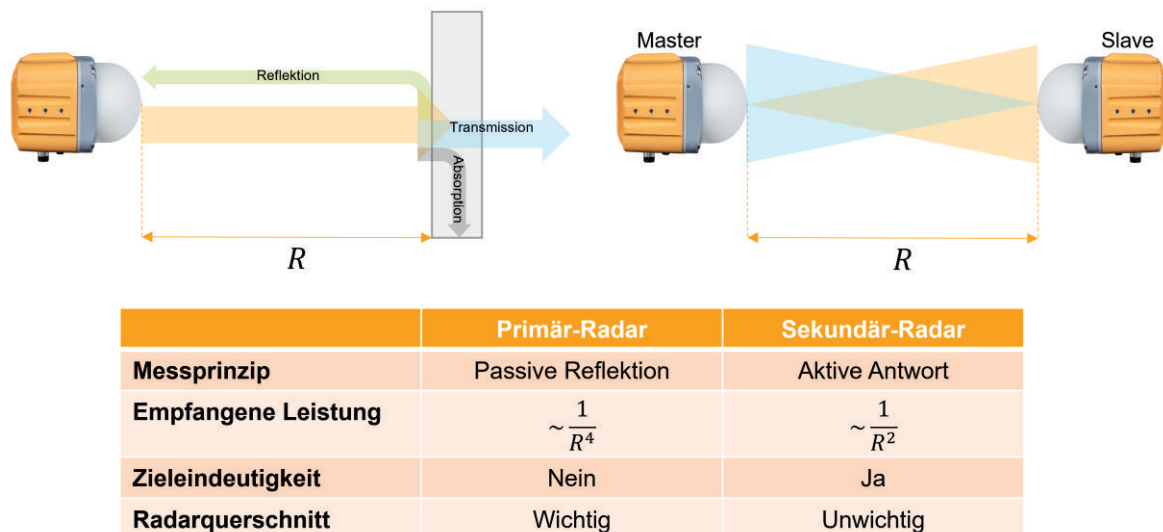


Bild 4: Gegenüberstellung von Primär- und Sekundärradar

3 Konzept des LPR®-SAFE Systems zur funktional sicheren Abstandsmessung

Das LPR®-SAFE System wurde gezielt entwickelt, um eine funktional sichere 1D-Abstandsmessung zu ermöglichen, die auch unter rauen Umgebungsbedingungen zuverlässig arbeitet. Es basiert auf dem Sekundärradarprinzip, das durch eine aktive Antwortarchitektur die physikalischen Nachteile des Primärradars überwindet und eine robuste, hochverfügbare Messlösung bietet.

3.1 Systemarchitektur und Messprinzip

Das LPR®-SAFE System nutzt ein paarweise angeordnetes Sekundärradar, bestehend aus einer Master- und einer Slave-Einheit. Der Master sendet ein Radar-Signal aus, das vom Slave empfangen, verarbeitet und aktiv mit einer verstärkten Antwort zurückgesendet wird. Durch diese Architektur lassen sich präzise Abstandsbestimmungen mit hoher Verfügbarkeit, Reichweite und Sicherheit realisieren (Bild 5).

Die wesentlichen Funktionskomponenten des Systems sind:

- Zwei unabhängige Sekundärradar-Messstrecken, die jeweils aus einem Master und einem Slave bestehen
- Echtzeit-Signalverarbeitung zur Verifikation der Messwerte
- Integration in eine sichere speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zur Plausibilisierung der Ergebnisse
- Doppelte Absicherung der Messdaten durch redundante Sensormessungen

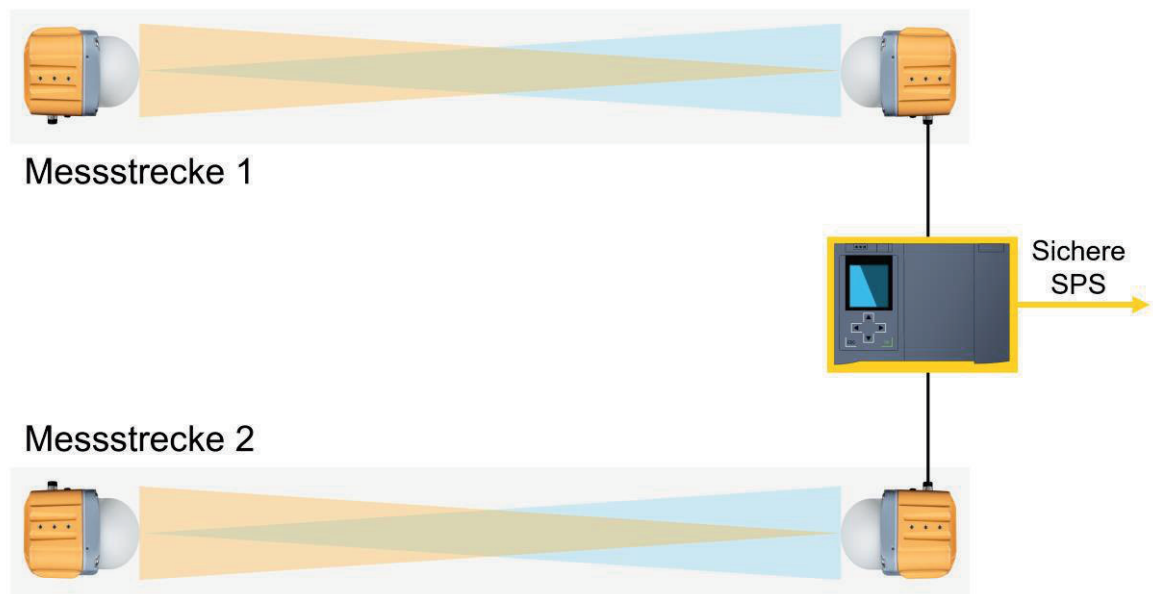


Bild 5: Systemarchitektur LPR®-SAFE

3.2 Sicherheitsmechanismen und Fehlererkennung

Da das System für sicherheitskritische Anwendungen wie die Kranpositionierung entwickelt wurde, enthält es mehrere Mechanismen zur Fehlererkennung und Systemüberwachung:

1. Diversitäre Redundanz durch zwei unabhängige Messstrecken
 - Das LPR®-SAFE System nutzt zwei separate Messkanäle, die mit unterschiedlichen Radarsignalen arbeiten.
 - Diese diversitäre Architektur stellt sicher, dass Messfehler oder Systemausfälle erkannt werden können, indem beide Kanäle miteinander verglichen werden.
 - Der Einfluss systematischer Fehler der einzelnen Messkanäle wird durch diesen Ansatz signifikant reduziert.

2. Ruhe-Strom-Prinzip für kontinuierliche Systemüberwachung

- Selbst wenn sich der Abstand zwischen Master und Slave nicht verändert, kann das System durch kontinuierliches Monitoring der Signalqualität sicherstellen, dass die Verbindung aktiv ist.
- Es wird immer auf ein eindeutiges Ziel, die passend konfigurierte Gegenstation, gemessen.

3. Plausibilisierung der Messwerte durch eine sichere SPS

- Die gemessenen Abstände der beiden Radarstrecken werden von einer sicheren speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) verarbeitet.
- Die SPS führt Plausibilitätsprüfungen durch, indem sie:
 - die beiden Messwerte miteinander vergleicht,
 - temporale Konsistenzprüfungen durchführt,
 - Metadaten der Messungen bewertet und korreliert.
- Erst wenn beide Strecken konsistente Werte liefern, wird das Messergebnis als sicher anerkannt.

4. Hochfrequente Messrate für Echtzeitverarbeitung

- Das System arbeitet mit einer hohen Abtastrate von bis zu 50 Hz für mittlere Reichweiten (bis 300 m) und 20 Hz für große Distanzen (bis zu 1 km).
- Diese hohe Messrate ermöglicht eine präzise Echtzeit-Überwachung der Distanzänderungen, was besonders für dynamische Kranbewegungen essenziell ist.

3.3 Systemintegration und Verfügbarkeit

Das LPR®-SAFE System bzw. der SPS-Safety-Block wurde so konzipiert, dass dieser sich problemlos in bestehende industrielle Steuerungssysteme integrieren lässt und kann somit flexibel in verschiedene Sicherheitsarchitekturen eingebunden werden.

Ein weiterer Vorteil des Systems ist seine Degradierbarkeit:

- Falls ein Messkanal ausfällt oder eine Messstrecke gestört ist, kann der verbleibende Kanal weiterhin genutzt werden, um einen sicheren Zustand einzuleiten.
- In Anwendungen, bei denen eine sofortige Notabschaltung problematisch wäre (z. B. bei schwebenden Lasten), kann der Prozess durch eine kontrollierte Überführung in einen sicheren Prozesszustand stabilisiert werden, da ein Messkanal weiterhin Positionsdaten zur Verfügung stellt und so z. B. ein Anlagenführer aktiv eingreifen kann.

Das LPR®-SAFE System kombiniert die Vorteile der Sekundärradar-Technologie, diversitärer Messansätze und sicherer Signalverarbeitung zu einer Lösung, die speziell für funktional sichere, hochverfügbare Abstandsmessungen (ISO13849, PLd, cat. 3) in sicherheitskritischen Anwendungen entwickelt wurde.

Durch die aktive Antwortarchitektur, die redundante Messstrecke, das Ruhe-Strom-Prinzip und die Plausibilisierung durch eine sichere SPS bietet es eine zuverlässige Lösung für

funktional sichere Kranpositionierungen – selbst unter extremen Umwelt- und Prozessbedingungen.

Zusammenfassung

Die sichere Positionierung von Krananlagen stellt hohe Anforderungen an die eingesetzten Sensortechnologien, insbesondere unter rauen Umwelt- und Prozessbedingungen. Das vorgestellte LPR®-SAFE System basiert auf dem Sekundärradar-Prinzip und wurde speziell entwickelt, um eine funktional sichere, hochverfügbare 1D-Distanzmessung zu ermöglichen. Durch seine robuste Architektur und die präzisen Messmethoden erfüllt das System auch in anspruchsvollen industriellen Umgebungen die hohen Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit.

Herkömmliche Messsysteme, wie optische, mechanische oder ultraschallbasierte Sensoren, stoßen unter Bedingungen wie Regen, Nebel, Staub, Lichtbögen oder starken Vibrationen schnell an ihre Grenzen. Radartechnologie bietet hingegen physikalische Vorteile, da sie elektromagnetische Wellen nutzt, die weitgehend unempfindlich gegenüber solchen Störeinflüssen sind. Im Vergleich zum Primärradar ermöglicht das Sekundärradar-Prinzip, bei dem ein aktiver Slave das Signal gezielt zurücksendet, eine höhere Reichweite, präzise Zielzuordnung und Unabhängigkeit von Materialeigenschaften.

Das LPR®-SAFE System überwindet die Einschränkungen des Primärradars durch eine aktive Antwortarchitektur und integriert zusätzliche Sicherheitsmechanismen wie diversitäre Redundanz, ein Ruhe-Strom-Prinzip und eine Plausibilisierung durch eine sichere SPS.

Dadurch bietet es nicht nur zuverlässige Messergebnisse, sondern auch eine kontinuierliche Selbstüberwachung, um den sicheren Betrieb auch im Fehlerfall zu gewährleisten.

Mit einer hohen Messfrequenz, einer integrierten Fehlererkennung und der Fähigkeit zur Degradierung im Störfall stellt das LPR®-SAFE System eine ideale Lösung für sicherheitskritische Anwendungen dar, wie sie bei der Kranpositionierung und im industriellen Umfeld erforderlich sind. Das System erfüllt dabei die Anforderungen an Performance Level d gemäß ISO13849, PLd, cat. 3 und ermöglicht eine präzise und robuste Abstandsmessung auch unter extremen Bedingungen.

Dieses Konzept zeigt, dass die Kombination aus innovativer Sekundärradartechnologie, durchdachter Systemarchitektur und sicherer Signalverarbeitung ein neues Niveau an Sicherheit und Verfügbarkeit für industrielle Anwendungen schaffen kann.

Quellenverzeichnis:

- [1] Evers, D.: Radar - Schlüsseltechnologie der Zukunft; Vortrag SPS2023. Ort: Nürnberg, 2023; bei Zeitschriften Angabe der Seitenzahlen des Beitrages
- [2] Roehr, S.; Gulden, P. and Vossiek, M.: Precise Distance and Velocity Measurement for Real Time Locating in Multipath Environments Using a Frequency-Modulated Continuous-Wave Secondary Radar Approach. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 10, pp. 2329-2339, Oct. 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.2003137

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

PSIORI CraneLink Internet-basierte Kranfernsteuerung mit AR- und AI-Assistenten

Karl Geiger, Alexander Höreth, Jens Ruppenthal, Emad Alkhashab,
Bolko Busemann, Paul Bockelmann, Rasmus Diederichsen, Leon
Gieringer, Sebastian Höfle, Peter Hofmeier, Aylin Jamali, Robin Jehn,
Jonas Kindler, Thorsten Kundoch, Julia Meier, Giulio Neusch-Frediani,
Joel Oswald, Zahra Padar, Vishnu Prasath Mohanraj Subbulukakshmi,
Lukas Strack, Caroline Weber, Sascha Lange



Dr. Karl Geiger
Dipl.-Ing. (BA) Jens Ruppenthal (Referent)
PSIORI GmbH
Heinrich-von-Stephan-Straße 20
79100 Freiburg i. Br.

PSIORI CraneLink - Internet-basierte Kranfernsteuerung mit AR- und AI-Assistenten

Mit unserer Kran-KI "KAI" führen Krane ihre Aufgaben selbständig durch [1,2]. Jede Implementierung ist mit dem Training von KAI an die örtlichen Gegebenheiten sowie der Installation und Kalibrierung ein individuelles und an die jeweilige Situation angepasstes Projekt.

Einzelne Module von KAI können wir mittlerweile als eigenständige Produkte anbieten. Diese Produkte erleichtern die Arbeit des Kranführers, verringern Unfallrisiken und reduzieren Kosten. Hier beschreiben wir das erste Produkt CraneLink und die Augmented-Reality-Funktionen zur sicheren Steuerung eines Krans auch über große Distanzen hinweg.

1 Einleitung

Auf der Kranfachtagung 2023 stellten wir die erste Iteration unserer Kran-KI "KAI" vor. Wir beschrieben dort die kamerabasierte autonome Steuerung eines Rundkrans und die eingesetzten modernen (Deep Learning) und klassischen Objekterkennungsverfahren [1]. Die Erweiterung des Systems auf die LiDAR-basierte Objekterkennung (Light detecting and Ranging, Licht bzw. Laser-basierte Erkennung und Abstandsmessung) und die gleichzeitige Steuerung von zwei Brückenkranen mit je zwei Laufkatzen und Greifern stellten wir auf der Kranfachtagung 2024 vor. Das System ist seit über einem Jahr in einem Papierwerk in Nordeuropa im Einsatz, wo es mittlerweile selbständig Holzladungen von Zügen ablädt und entweder sorgfältig im Holzlager stapelt oder auf einem von drei Förderbändern zur Weiterverarbeitung ablegt.

Das Gesamtsystem KAI mit allen Funktionen ist eine Individualentwicklung für Holzverladeplätze, die individuell gemeinsam mit dem Kunden entwickelt und an die lokalen Verhältnisse angepasst wird. KAI ist kein Produkt, das ohne Anpassungen generell verwendet werden kann, sondern hat deutlichen Projektcharakter.

Wir haben nun eine Reihe von Funktionen des Projekts definiert, die wir als eigenständige, generell für alle Krantätigkeiten einsetzbare Produkte anbieten. Alle Produkte erleichtern die Kranarbeiten, reduzieren Risiken und verringern die Kosten. Sie können aufeinander aufbauend eingesetzt werden und übernehmen in fortschreitendem Maß Einzelaufgaben der Kransteuerung.

Hier beschreiben wir das erste Produkt "CraneLink" zur Fernsteuerung von Kranen. Mit CraneLink kann ein Kranführer Krane vor Ort via Netzwerk oder über große Entfernungen per Internet sicher und zuverlässig von einem Schreibtisch aus steuern. Auf handelsüblichen Monitoren werden dem Kranführer über eingeblendete Hilfslinien Informationen zur genauen Positionierung des Greifers oder Hakens im Raum angezeigt, wodurch die Orientierung des Kranführers im Raum unterstützt und damit die Wahrscheinlichkeit von ungewollten Bewegungen oder Unfällen drastisch reduziert wird. Die Roadmap sieht vor, weitere der 2023 und 2024 beschriebenen autonomen Funktionen als Produkterweiterungen anzubieten, mit denen der Kranführer bspw. bestimmte Ziele anfahren oder teilautonome Funktionen wie das Abladen oder Auflegen von Gütern aufrufen kann.

Mit CraneLink beobachtet der Kranführer über die am Arbeitsplatz des Kranführers

angebrachten Monitore die Video-Streams der am Kran montierten Kameras. Mit den dort ebenfalls montierten Joysticks kann der Kranführer den Kran wie gewohnt steuern. Im Notfall kann er den Nothalt bedienen, mit dem die Kransteuerung angehalten wird.

Das Alleinstellungsmerkmal von CraneLink ist, dass der Schreibtisch mit Joysticks und Monitoren an einem beliebigen Ort aufgestellt werden kann. Die Kommunikation mit dem Kran - Videoübertragung, Steuersignale und Nothalt - erfolgt über eine Standard-IP-Anbindung (100 Mbit) im LAN oder über das Internet. Hierbei stand die einfache Installation im Fokus, um den Einsatz teurer Hardware oder einer komplizierten Konfiguration der Firewall zu vermeiden.

CraneLink ist Ausgangspunkt und Basis für eine Reihe von geplanten Erweiterungen, die wir in „Ausblick“ weiter unten beschreiben.

2 Funktionsübersicht

2.1 Videostream

Am Kran sind an beliebigen Stellen Kameras montiert, deren Live-Feeds über CraneLink lokal im LAN oder sicher verschlüsselt über das Internet übertragen werden. Wir setzen auf eine Client-Server-Architektur, um auf aufwändige Firewall-Konfigurationen oder die Nutzung eines VPN zu verzichten. Die Video-Streams von bis zu drei Kameras können in Echtzeit auf handelsüblichen PCs dargestellt und vom Kranführer nach Belieben auf den angeschlossenen Monitoren verteilt werden.

In einem der frei positionierbaren Fenster werden zusätzliche Daten zur Kransteuerung eingeblendet, wie die aktuellen Koordinaten des Greifers oder der Status der sicheren Verbindung.

2.2 Latenzkontrolle

Im Sichtfeld einer der Kameras am Kran kann ein zeitsynchronisierter Mustergeber angebracht werden, dessen Muster sich in regelmäßigen Abständen ändert (Bild 1). Das Muster ist daher stets in einem der Fenster auf den Monitoren zu sehen. Ein gleichartiger Mustergeber wird unterhalb der Monitore angebracht. Durch den visuellen Vergleich des Musters am Arbeitsplatz des Kranführers mit dem Muster im Video-Feed kann der Kranführer sofort erkennen, ob der Videostream ausreichend geringe Latenz aufweist.



Bild 1: PSIORI LED-Panel

Durch eine Kombination von sekundlichen Zeitangaben und viertelsekundlichen Lauflichtern kann einfach visuell die Latenz überprüft werden.

2.3 Steuerung

Auf dem Schreibtisch des Kranführers sind Joysticks montiert, mit denen der Kranführer den Kran wie gewohnt steuern kann. Die Steuersignale der Joysticks werden vom PC ausgelesen und über das lokale Netzwerk oder verschlüsselt über das Internet, äußerst latenzarm an die PLC des Krans geschickt, die ihrerseits die Aktuatoren des Krans steuert. Für die Steuerung vor Ort kann auf handelsübliche Hardware im Firmennetzwerk zurückgegriffen werden. Die Tele-Operation über das Internet setzt eine stabile Internetverbindung voraus.

2.4 Nothalt

Am Schreibtisch des Kranführers ist ein handelsüblicher Nothalt-Schalter montiert. Der mit ihm verbundene Safety-Controller sendet kontinuierlich ein positives Signal an den verknüpften Safety-Controller der Kran-Steuereinheit (PLC). Wird der Nothalt gedrückt oder das Signal durch Netzwerkunterbrechungen gestört, gibt der Safety-Controller an der PLC dies als Nothalt weiter. Für die PLC ist hierzu keine zusätzliche Sicherheitsfunktion zu integrieren, da das nach EN ISO 13849-1:2023 Performance Level d zertifizierte System sich so verhält, als sei der Nothalt-Schalter direkt an die PLC des Krans angeschlossen. Da auch diese Verbindung verschlüsselt über eine Server-Architektur laufen kann, ist sowohl der Einbau des Safety-Controllers bei der PLC wie auch die Netzwerk- oder Internetverbindung zwischen beiden Safety-Controllern einfach zu realisieren und ohne Firewall-Konfiguration oder VPN möglich.

2.5 Augmented Reality-Visualisierungen

Die Darstellung der Video-Feeds auf den Monitoren ist wie jedes Videobild zweidimensional. Der Kranführer kann die genaue Position des Greifers oder Hakens im Raum und relativ zu anderen Objekten im Arbeitsbereich bei üblichen 2D-Darstellungen daher nicht direkt erfassen. CraneLink stellt dem Kranführer Augmented Reality-Werkzeuge (AR) zur Verfügung, die die Orientierung im Raum unterstützen. Diese zeigen in der Darstellung des Video-Streams Hilfslinien an, die die räumliche Position des Hakens oder Greifers verdeutlichen: Virtuelles Lot und virtuelle Höhenlinien.

2.5.1 Virtuelles Lot

In Kameraansichten, auf denen der Haken oder Greifer sichtbar ist, kann eine vertikale Linie eingezeichnet werden, die vom Mittelpunkt des Hakens oder Greifers senkrecht bis zum Boden oder Objekt unter dem Haken oder Greifer reicht. Dafür ermittelt das System über die Auswertung der Daten eines am Kran montierten LiDARs einerseits die genaue Position des Mittelpunktes des Hakens oder Greifers im Kran-Koordinatensystem und andererseits die Position und Gestalt der Objekte in der Umgebung des Krans.

Diese Linie wird kontinuierlich neu berechnet und gezeichnet. Sie zeigt genau an, wo über dem Boden oder über welchem Objekt der Haken oder Greifer aktuell positioniert ist. So kann der Kranführer am Bildschirm die Position von Haken oder Greifer im Raum jederzeit präzise einschätzen.

2.5.2 Virtuelle Höhenlinie

In der primären Kameraansicht, die aus der Perspektive der Kanzel filmt, werden virtuelle Linien auf Objekte, Wände, Gebäude usw. im Arbeitsumfeld des Krans in Höhe des Hakens oder Greifers gezeichnet. Mittels LiDAR erfasst das System die Position von Greifer oder Haken sowie – laufend aktualisiert – die Position und Gestalt der Objekte im Arbeitsumfeld des Krans. Dies erleichtert dem Kranführer die Bestimmung der Höhe des Hakens oder Greifers im Raum.

2.6 Bedienung

Der Kranführer betrachtet den Greifer oder Haken sowie die Arbeitsumgebung auf den Monitoren, während er ihn mit den Joysticks manövriert und Ladungen aufnimmt, transportiert und ablegt. Die Augmented Reality-Visualisierungen unterstützen den Kranführer bei der Navigation. Durch die geringe Latenz können alle Kranoperationen wie gewohnt ausgeführt werden. Der genaue Stand der Verzögerung im Video-Stream kann, wenn gewünscht, jederzeit durch den Vergleich des Mustergebers am Monitor mit dem in einem der Video-Streams abgebildeten Mustergeber am Kran überprüft werden.

3 Architektur

3.1 CraneLink im lokalen Netzwerk

Die einzelnen Teilsysteme können dabei in unterschiedlichen Subnetzen betrieben werden, auch wenn diese sich nicht gegenseitig erreichen können. Lediglich die Server-Komponente muss von beiden Subnetzen aus erreichbar sein, um die initiale Verbindung herzustellen (Bild 2).

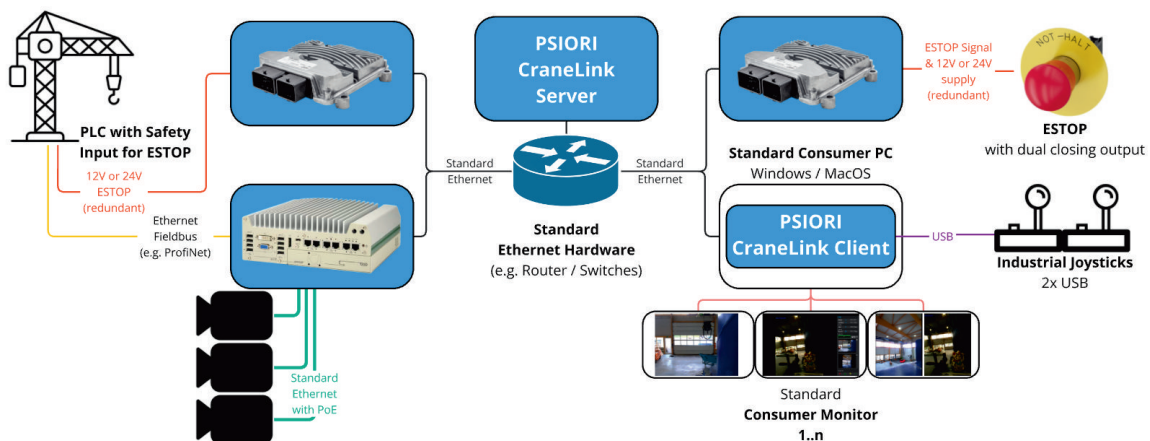


Bild 2: CraneLink - Topologie im lokalen Netzwerk

Das System für das lokale Netzwerk besteht aus drei Teilsystemen:

- (a) Kran-Teilsystem
- (b) Server-Teilsystem im lokalen Netzwerk
- (c) Bediener-Teilsystem

Bei der rein lokalen Verwendung gelangen keine Daten oder Aufzeichnungen in das Internet, der Zugriff ist lokal beschränkbar. Bei Bedarf kann man jedoch auch Zugriff von Extern ermöglichen, dies erfordert jedoch manuelle Eingriffe in die Firewall-Regeln vor Ort.

3.2 CraneLink via Internet

Das System für das Internet, verteilt über mehrere Standorte hinweg, besteht aus drei Teilsystemen (Bild 3):

- (a) Kran-Teilsystem
- (b) Cloud-Teilsystem im Internet
- (c) Bediener-Teilsystem

Die Server-Komponente ist im Internet und somit von beiden Standorten aus erreichbar, um die initiale Verbindung herzustellen.

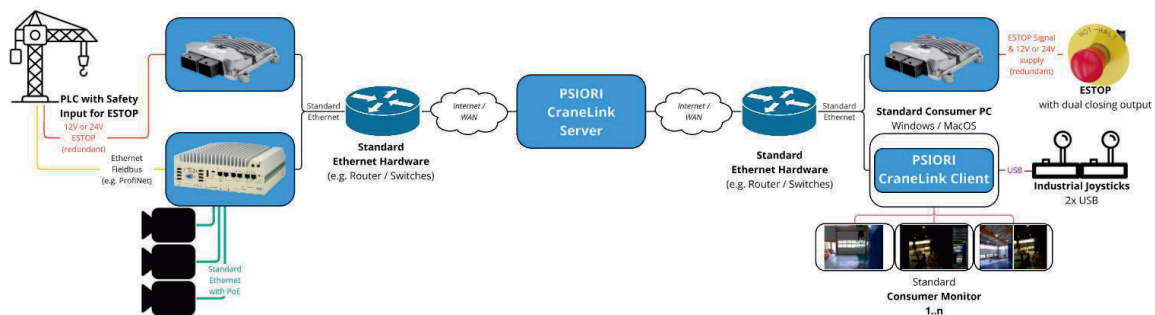


Bild 3: CraneLink - Topologie bei Internet-Nutzung

3.3 Kommunikationspfade

Das System weist drei Signalwege auf:

- (1) Kamera- und Sensordaten vom Kran zum Bediener-Teilsystem
- (2) Steuerdaten vom Bediener an den Kran
- (3) Sicherheitsnetzwerk für den Nothalt zwischen Bediener und Kran

Alle drei Kommunikationspfade sind voll verschlüsselt, um nur autorisierten Teilnehmern Zugriff zu gewähren. Dies verhindert fremde Steuersignale wie auch unerlaubtes Abfangen der Daten.

Das Sicherheitsnetzwerk ist zusätzlich selbstüberwachend, so dass bei Unterbrechung immer ein sicherer Zustand, in diesem Fall der Nothalt, erreicht wird.

3.4 Kran-Teilsystem

Am Kran ist ein Industrie-PC (im Folgenden "Kran-PC") mit Anbindung an das Internet verortet. Am Kran sind weiterhin die Kameras und ein LiDAR montiert, jeweils über eine Kabelverbindung direkt mit dem Industrie-PC verbunden; nahe einer der Kameras kann ein Mustergeber zur Überprüfung der Latenz so angebracht werden, dass das Muster scharf von der Kamera erfasst wird.

Der Kran-PC enthält eine Erweiterungskarte, über die der Austausch von Informationen (Steuersignale, Kraninformationen) zwischen der Kran-Steuereinheit (PLC) und dem Kran-

PC erfolgt. Hierbei werden zu Beginn ausschließlich PLCs mit Profinet-Verbindung unterstützt. Mittels Feldbusbeschreibungsddatei (bspw. GSD) werden die Funktionen des CraneLink-Systems an die PLC angebunden.

Teil des Kran-Teilsystems ist auch ein Rechner des Sicherheitsnetzwerks, der über das Cloud-Teilsystem gemeinsam mit seinem Gegenstück am Arbeitsplatz des Bedieners das Sicherheitsnetzwerk überwacht. Dieser imitiert im Fall der Auslösung oder zu hoher Latenz in der Kommunikation einen üblichen Nothalt über redundante 12V oder 24V Leitungen so, als ob der entfernte Nothalt-Schalter direkt an die PLC angeschlossen wäre.

3.5 Cloud-Teilsystem oder lokaler Server im Netzwerk

Für die Steuerung via Internet dient ein Server in der Cloud als Proxy für die Joystick-Befehle und die Daten mit Kran-Information (beide: MQTT, TLS-Verschlüsselt) sowie für den Verbindungsaufbau des Sicherheitsnetzwerkes. Dieser Proxy kann auch ohne Internetanbindung lokal im Kundennetzwerk betrieben werden. Hierbei können auch Teilnetzwerke des Kunden über die Serverstruktur verbunden werden, ohne die Netzwerktopologie vor Ort anpassen zu müssen.

Weiterhin stellt der Server einen Media-Server für die Video- und Virtual Overlay-Daten (WebRTC und MQTT) bereit, die vom Kran-Teilsystem zum Bediener-Teilsystem transportiert werden.

Schließlich verteilt der Server die Zertifikate für alle Komponenten und verhindert das Auftreten diverser Firewall-Probleme während der Kommunikation über das Internet.

3.6 Bediener-Teilsystem

Der Arbeitsplatz des Bedieners ist ein Schreibtisch mit Standard-PC (Windows oder MacOS) und einem oder mehreren Monitoren. Der PC ist im lokalen Netzwerk angeschlossen oder benötigt bei Steuerung über das Internet eine Verbindung mit mindestens 50 Mbit/s.

Die am Schreibtisch montierten Joysticks sind via USB mit dem PC verbunden. Ein Taster für den Nothalt ist elektrisch mit dem anderen Rechner des Sicherheitsnetzwerks verbunden.

3.7 Signalweg Sensordaten zu Kontroll-Pult am Schreibtisch

Die Bilder der Kameras werden über das lokale Netzwerk an den Kran-PC gesendet und hier vor der Übertragung vorverarbeitet (z. B. Verzerrungskompensation), für die AR-Berechnung verwendet und komprimiert. Der Videostream wird an das Cloud-Teilsystem oder den Server im lokalen Netzwerk gesendet.

Der Kran-PC sendet zusätzlich die aus den LiDAR-Daten berechneten Koordinaten von Virtuellem Lot und Virtueller Höhenlinien sowie die Kran-Informationen aus der PLC (MQTT) an den Cloud-Knoten.

Diese Daten werden mit bis zu 20 Hz an das Cloud- oder Server-Teilsystem geschickt.

3.8 Signalweg Steuerdaten an Kran

Die Steuersignale der Joysticks werden verschlüsselt und mit geringer Latenz vom Schreibtisch des Bedieners via MQTT an das Cloud- oder Server-Teilsystem gesendet. Das Kran-Teilsystem empfängt die Steuersignale aus der Cloud oder vom Server-Teilsystem; die im Kran-PC verbaute Feldbuskarte sendet sie via Profinet an die Kran-PLC.

3.9 Signalweg Sicherheitsnetzwerk

Der Sicherheits-Controller beim Kranbediener sendet in regelmäßigem Abstand ein Heartbeat-Signal mit dem aktuellen Zustand des Nothaltschalters über den Cloud-Knoten an das Gegenstück am Kran-Teilsystem. Wenn das Signal nicht im erwarteten zeitlichen Abstand zum letzten Signal eintrifft, ist dies ein Hinweis auf eine nicht hinreichend stabile Verbindung zwischen Bediener-, Cloud- oder Server- und Kran-Teilsystem; in diesem Fall sendet der Sicherheits-Controller im Kran-Teilsystem analog zu einem Not-Abschaltungstaster ein Signal zur Notabschaltung direkt an die Kran-PLC (12 V oder 24 V). Zur Diagnose der Verbindung tauschen beide Sicherheits-Controller parallel Statusinformationen aus.

Ein Lockout kann optional in das System integriert werden, um die Fernsteuerung zu unterbinden. Hiermit kann eine ungestörte, lokale Bedienung (bspw. Servicearbeiten) ohne Einfluss von außen sichergestellt werden.

4 Hardware

CraneLink ist eine Software, die für die folgende ausgewählte Hardware konzipiert ist.

Kameras	bis 3x Flir GigE Kamera bis zu 3.2 MP, 35 FPS Sensor 1/1.8" x 3
Objektiv	passend zur Kamera; bspw. Tamron M118FM08 (8 mm) x 3
Kameragehäuse	passend zur Kamera; bspw. Autovimation Salamander x 3
Signalgeber zur Zeitsynchronisation	optional x 2 synchronisierte Signalgeber bspw. PSIORI LED Panels
Kran Computer	Aktueller i9 Processor 32 GB RAM, 512 GB SSD OS Ubuntu Linux 22.04 oder höher optional: 2.5GB/s PoE Ethernet Ports für Kameras bspw. Neousys Nuvo-9006E
Arbeitsplatz Computer	Aktueller i5 Processor mind. 16 GB RAM 512 GB HD/SSD Windows 10 / 11, MacOS 15.1.1 oder neuer
Cloud Server	Aktueller i5 Processor

	64 GB RAM
	1 TB HD/SSD
	OS Ubuntu Linux 22.04 oder höher
Not-Aus-Signalüberwachung	PSIORI E-Stop Kit bestehend aus 2x STW ESX.4cs-gw mit Ethernet-Option, Not-Abschaltung und Kabel
Joysticks	2x USB Joysticks bspw. APEM HF45S10U Joystick 4.5 V USB

Bei Verwendung anderer Hardware-Produkte müssen in der Software ggf. entsprechende Anpassungen vorgenommen werden.

Der Großteil dieser Hardware kann von den Herstellern oder im Handel, zum Teil aber auch vorkonfiguriert von PSIORI bezogen werden. Ausnahme ist das E-Stop-Kit: Es enthält Geräte, die die Kommunikation der Nothalts über das Internet überwachen und als Set nach EN ISO 13849-1:2023 PLd zertifiziert sind. Dieses kann nur über PSIORI bezogen werden.

5 Berechnung der Augmented Reality-Visualisierungen

Die vom LiDAR gelieferten Punktwolken von Greifer oder Haken sowie ggf. Last und der Objekte in der Arbeitsumgebung des Krans werden auf dem Kran-PC in das Koordinatensystem des Krans und schließlich das der primären Kamera umgerechnet. Aus den transformierten Punktwolken ermittelt das System die Start- und Endpunkte des Virtuellen Lots sowie der Virtuellen Höhenanzeige, die dann perspektivisch korrekt in das von der Kamera aufgezeichnete Bild gerendert werden können.

Die Kameras werden intrinsisch kalibriert, um ggf. vorhandene Verzerrungen in der Optik zu behandeln. Anschließend wird der LiDAR auf das Kran-Koordinatensystem wie in [2] beschrieben mit einem eigens entwickelten Kalibrierungsalgorithmus kalibriert; die Kameras werden auf das Koordinatensystem des LiDARs mittels [3] kalibriert. Die nun folgenden Berechnungen finden im Kran-Koordinatensystem statt.

Im Betrieb wird die grobe Position des Greifers zunächst über die Encoder-Werte bestimmt. Eine vorab erstellte Modellpunktwolke mit geometrischen Annotationen von Greifer oder Haken wird in der LiDAR-Messung registriert. Die initiale Position wird mit einer effizienten Implementierung des ICP-Algorithmus bestimmt [4] und laufend aktualisiert.

Anschließend wird die Position des Greifers oder Hakens auf den Boden oder die mit LiDAR erfassten Objekte darunter projiziert (Virtuelles Lot) bzw. auf die mit LiDAR erfassten Objekte der Arbeitsumgebung projiziert (Virtuelle Höhenlinie), die mindestens die gleiche Höhe haben wie der Haken oder Greifer.

Schließlich werden die Ergebnisse aus dem Kran-Koordinatensystem in Kamerakoordinaten transformiert; die Start- und Enddaten der Linien werden wie beschrieben an das Bediener-Teilsystem gesendet. Dort werden die Linien zwischen den Start- und Enddaten gezeichnet und dem Video-Stream der primären Kamera überlagert.

6 Sicherheit (Safety und Security)

Die gesamte Kommunikation zwischen Kran, Cloud oder lokalem Server bis hin zum PC des Kranführers sowie zwischen Safety-Controller am Kran und dem Safety-Controller beim Bediener ist verschlüsselt.

Die Server-Komponenten der Cloud oder des lokalen Servers erstellen hier über Web-Interfaces die Konfigurationen der Teilsysteme, welche auch die einmaligen Zugangsschlüssel erhalten.

Bediener oder Systemadministratoren können diese Dateien erzeugen, herunterladen und auf den Komponenten installieren oder bei Bedarf die vorhandenen Konfigurationen invalidieren.

Es ist zu jeder Zeit sichergestellt, dass nur ein Bediener aktiven Zugriff auf den Kran hat und dass weder Daten des Kranes nach außen gelangen noch Steuerbefehle von Dritten zugelassen werden.

State-of-the-Art Verschlüsselung mit TLS und entsprechende Zertifikate stellen dies sicher.

Für die Sicherheitskomponenten, die für den Schutz des Personals zuständig sind (e. g. "Safety") werden zusätzliche Protokolle verwendet, die den Standards ISO 13849-1:2023 bzw. DIN EN ISO 13849-1:2023 entsprechen und somit eine Zertifizierung der Nothalt-Komponenten mit Performance-Level d ermöglichen. Hiermit ist den Anforderungen der Krannorm DIN EN 13557 Genüge getan, dass jedes Steuerpult über einen konformen Nothalt verfügt.

7 Ausblick

Wir planen und implementieren derzeit eine Reihe von Erweiterungen des Systems. Zunächst entwickeln wir eine weitere Augmented Reality-Visualisierung, die die Unfallgefahr bei Steuerung ohne direkten Sichtkontakt noch weiter reduziert. Eine Reihe von Assistenzsystemen werden anschließend vorgestellt. Diese entlasten den Kranführer zusätzlich, indem Routinearbeiten oder -Kontrollen auf KI-gestützte Produkte ausgelagert werden.

7.1 Weitere Augmented Reality-Visualisierungen

Virtuelle Gefahrenzone

In dem Video-Stream einer der Kameras wird auf dem Grund unter dem Greifer oder Haken ein Kreis vorab definierter Größe gezeichnet, der den Gefahrenbereich unter dem Greifer oder Haken kennzeichnet. Die Größe des Kreises ändert sich mit der Höhe des Greifers oder Hakens. So kann der Kranführer rasch erkennen, ob ein Objekt oder Mensch sich innerhalb des Gefahrenbereichs befindet oder ihn betritt.

7.2 Assistenzfunktionen

Zielpositionen

Der Kranführer definiert beliebige Zielpositionen im Raum, die vom Greifer oder Haken auf Knopfdruck angefahren werden. Der Greifer oder Haken wird dabei zunächst nach oben gefahren, um mögliche Hindernisse auf dem direkten Weg zu vermeiden und hält an vorgegebener Position in der definierten Höhe sowie Rotation.

Kollisionsdetektion und -Warnung

Wenn Greifer, Haken oder ggf. Last während des manuell gesteuerten Transports einen bestimmten, vorab festgelegten Mindestabstand zu Objekten in der Arbeitsumgebung des Krans unterschreiten, dann wird eine Warnmeldung am Pult ausgelöst. Optional wird die Bewegung des Krans in einem solchen Fall bei drohender Kollision auch unterbrochen. Für die Kollisionsdetektion wird zunächst die Arbeitsumgebung des Krans einmal per LiDAR vermessen. Diese Vermessung kann eigenständig durch Rotation des Kranes erfolgen, eine separate Vermessung durch externe Dienstleister ist nicht erforderlich. Die Karte der Objekte in der Arbeitsumgebung wie auch die Position und Pose von Greifer oder Haken und ggf. Last wird im Betrieb laufend aktualisiert.

Diese Erweiterung verringert die Wahrscheinlichkeit des ungewollten Kontakts zwischen Greifer, Haken oder ggf. Last und dem Boden oder Objekten im Arbeitsumfeld des Krans.

People Tracker

Der People Tracker überwacht einen vorab definierten Bereich unter dem Greifer oder Haken darauf, ob ein Mensch den Bereich betritt oder sich dieser Bereich über einen Menschen bewegt. Ist dies der Fall, wird dem Bediener eine Warnmeldung angezeigt und ein Nothalt des Krans ausgelöst.

Die Erkennung von Menschen erfolgt mit KI-gestützter Computer Vision. Wenn das System in den von den Kameras aufgezeichneten Videostreams Menschen erkennt, dann wird am Pult eine Warnmeldung ausgegeben. Dies verringert die Unfallgefahr drastisch.

Systemprotokollierung („Time Machine“)

Die Video-Streams der Kameras und die eingeblendeten AR-Funktionen werden gemeinsam mit den gesendeten Steuersignalen aufgezeichnet und gespeichert. Die maximale Aufzeichnungsdauer kann definiert werden, anschließend werden die Aufzeichnungen überschrieben. Aufzeichnungen können jederzeit gesichert werden.

Die Aufzeichnungen können in einer Software wiedergegeben werden, die die Videosignale sowie die Kraninformationen und die vom Pult gesendeten Kontrollbefehle fortlaufend anzeigt. Der Nutzer kann schnell zu jedem beliebigen Punkt auf dem Zeitstrahl springen und die vorliegende Information an diesem Zeitpunkt überprüfen. Auf diese Weise können Fragen im Zusammenhang mit unvorhergesehenen oder unerwünschten Ereignissen rasch und eindeutig geklärt werden.

KI-basierte Schwingungsdämpfung

Im Gegensatz zur klassischen input shaping-basierten Schwingungsdämpfung (Sway Control) kann die KI-basierte Schwingungsdämpfung nicht nur lineare trägheitsinduzierte Schwingungen bei Beschleunigung und Abbremsen dämpfen, sondern auch rotatorische Überdrehungen ausgleichen; darüber hinaus dämpft das KI-basierte System auch Schwingungen, die durch externe Kräfte wie Windböen ausgelöst werden.

Das Produkt kann während der manuellen Steuerung vom Kranführer durch einfachen Knopfdruck hinzugeschaltet werden; es modifiziert dann die Steuerbefehle des Kranführers so, dass bei Erreichen des Zielorts praktisch keine Schwingungen mehr auftreten und sofort mit dem Be- bzw. Entladeprozess begonnen werden kann. Hierdurch spart der Kranführer im Betrieb erheblich Zeit ein, während gleichzeitig an angenehmes und dynamisches Steuerungsgefühl erhalten bleibt.

Das System wendet moderne KI-gestützte Bilderkennungsverfahren an, um Position und Pose von Greifer, Haken und ggf. Ladung im Raum zu ermitteln und entsprechende Ausgleichmomente zu berechnen.

3D-Path Finder

Durch eine initiale Vermessung der Arbeitsumgebung wird eine dreidimensionale Karte mittels LiDAR erstellt. Diese wird im Betrieb dynamisch ergänzt und korrigiert. So werden auch bewegliche oder temporäre Objekte erkannt und berücksichtigt. Mit Hilfe dieser Karte kann der 3D-Path Finder Zielpositionen optimiert anfahren und die kürzesten oder zeitlich effizientesten Wege berechnen, während zeitgleich die Hindernisse auf dem Weg umfahren werden. So können Hebebewegungen gegen seitliche Ausweichmanöver ersetzt und dadurch Zeit und Energie gespart werden. Hierbei werden nicht nur statische Objekte (bspw. Wände, Maschinen), sondern auch dynamische Hindernisse (bspw. Fahrzeuge, Lagerware) in die Berechnung einbezogen.

Zusammenfassung

Durch die hier beschriebenen CraneLink-Funktionen sowie die genannten Erweiterungen und Sicherheitsfunktionen steigt die Effizienz und werden Risiken und Kosten verringert. In Summe runden die dargestellten Funktionen das System ab und führen zu bereits in KFT23 und KFT24 dargestellten Autonomiefunktionen von Kranen hin.

Quellenverzeichnis:

- [1] Lange, S. et al.: Steuerung von Kranen mit Künstlicher Intelligenz: Kran-AI KAI. In: Begleitband zur 31. Internationalen Kranfachtagung 2023, Schriftenreihe des Instituts für Konstruktionstechnik 23-7, Bochum, DE, J. Scholten, Hrsg., 2023, S 61-72
- [2] Diederichsen et al.: Vollautonome Entladung von Rungenwagen auf Basis von in Echtzeit verarbeiteten 3D-LiDAR-Daten in einem Multi-Agenten-System zur Steuerung von Industriekranen. In: Begleitband zur 32. Internationalen Kranfachtagung 2024, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden, DE, T. Schmidt, Hrsg., 2024, S 145-157
- [3] Koide, K. et al.: General, Single-shot, Targetless, and Automatic LiDAR-Camera Extrinsic Calibration Toolbox. In: arXiv:2302.05094, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.05094>
- [4] Besl, P. J.; Kay, N. D.: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 14, no. 2, 1992, S. 239-256

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

FutureWoodTrans: Entwicklung eines automatisierten Be-, Um- und Entlade- systems in der autonomen Forstwirtschaft

Alexander Ortner-Pichler

Max Cichocki

Christian Landschützer



DI Dr. techn. Alexander Ortner-Pichler
Dipl.-Ing. Dr. techn. B.Sc. Max Cichocki
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Prof. h. c.
Christian Landschützer
Institut für Technische Logistik / TU Graz
Inffeldgasse 25/E
8010 Graz (Österreich)

FutureWoodTrans: Entwicklung eines automatisierten Be-, Um- und Entlade- systems in der autonomen Forstwirtschaft

Das Projekt FutureWoodTrans verfolgt einen innovativen Ansatz zur Entwicklung von autonomen Forstwirtschaftssystemen. Durch die Erstellung eines Digital Twins eines PALFINGER EPSILON M12Z105 Holzverladekrans wird ein virtuelles Abbild des realen Systems geschaffen. Die Integration von Mehrkörpersimulation, Hydraulik und Steuerung ermöglicht eine detaillierte Analyse des Systems und eine dadurch beschleunigte Entwicklung eines automatisierten Steuerungs- und Regelungssystems. Erste Ergebnisse zeigen das Potenzial dieser Methode für die Entwicklungsunterstützung von komplexen mechatronischen Systemen.

1 Einleitung

Die Holzindustrie befindet sich in einem tiefgreifenden Transformationsprozess, der maßgeblich durch die Notwendigkeit einer verstärkten Automatisierung getrieben wird. Insbesondere die Holzernte und die dadurch bedingten Manipulationsprozesse rücken immer stärker in den Fokus. Während ferngesteuerte und teleoperierte Systeme bereits etabliert sind, liegt der Schwerpunkt der aktuellen Forschung auf der Entwicklung autonomer Maschinen. [1], [2], [3]

Im Projekt FutureWoodTrans erforscht ein Konsortium, bestehend aus vier wissenschaftlichen Partnern der TU Graz¹ (Institut für Technische Logistik, Institut für Fahrzeugtechnik, Institut für Maschinelles Sehen & Darstellen und Institut für Softwaretechnologie) sowie vier Industriepartnern (Siemens AG, Forstbetrieb Mayr-Melnhof-Saurau MMF, Holzcluster Steiermark GmbH und PALFINGER EPSILON), die Implementierung autonomer Prozesse in der Forstlogistik. Das Hauptziel des Projekts ist die autonom gesteuerte Holzernte, von der Navigation in entlegene Waldgebiete bis zum Be- und Entladen der Holzgüter.

Die Autoren des Instituts für Technische Logistik sind in einer Vorstufe dieser Autonomisierung für die Entwicklung eines automatisierten Be-, Um- und Entlademoduls verantwortlich. Dieses Modul basiert auf einem von PALFINGER EPSILON bereitgestellten M12Z105 Holzverladekran, der als Grundlage für die Automatisierung dient (siehe Bild 1).

Eine wesentliche Herausforderung der Entwicklung liegt in der präzisen Steuerung und Regelung des Kranarms. Dieser muss in der Lage sein, Holzstämme unterschiedlicher Größe und Gewichtsverteilung effizient und automatisiert zu manipulieren. Die mechanische und hydraulische Steuerung der Greifarme erfordert eine hochgradig präzise Regelung, um sowohl Fehlgriffe als auch Schäden an der Ladung zu minimieren. Herausforderungen ergeben sich insbesondere aus der Lastabhängigkeit der Gelenksteuerung, die in vielen bestehenden Systemen nicht ausreichend berücksichtigt wird. Dadurch entstehen komplexe Problemstellungen bei der Bahnverfolgung und Endlageneinstellung, was zu ungenauer Positionierung und ineffizientem Betrieb führen kann.

¹ <https://itl.TUGraz.at> | <https://ftg.TUGraz.at> | <https://icg.TUGraz.at> | <https://sai.TUGraz.at>



Bild 1: PALFINGER EPSILON M12Z105 Holzverladekran [4]

Ein bedeutendes technologisches Problem im Kontext dieser Entwicklung ist die präzise Integration hydraulischer Aktorik und der angewendeten Steuerungsalgorithmen in die Technologie des Digital Twins. Diese Ansätze bieten großes Potenzial für die Simulation und Optimierung von Ladeprozessen, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Modellbildung und Implementierung in einem ganzheitlichen Simulationsmodell des Digital Twins. Die resultierenden Simulationsmodelle müssen nicht nur realitätsnah, sondern auch effizient genug sein, um möglichst in Echtzeit ausgeführt werden zu können.

Die sich daraus ergebenden Anforderungen aus unterschiedlichen Forschungsgebieten führen zu einer Problemstellung, die einen multidisziplinären Ansatz notwendig macht, wie er auch in verwandten Forschungsfeldern (siehe exemplarisch [5]) gefordert wird. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, setzen die Autoren des Instituts für Technische Logistik auf innovative Ansätze des Digital Engineerings (siehe beispielsweise [6]-[11]). Durch die Kombination von Forschungsarbeiten zur hydraulischen Modellierung mit institutseigenen Methoden zur Abbildung komplexer mechanischer Systeme wird ein domänenübergreifender Digital Twin entwickelt. Dieser dient als zentrale Plattform, um die Steuerung und Regelung des Be-, Um- und Entlademoduls zu entwickeln, zu optimieren und die beschriebenen Probleme sowohl in der Kranarmsteuerung als auch in der Integration von Steuerungsalgorithmen effizient zu adressieren.

2 Stand der Technik

Arbeiten wie [12], [13] und [14] zeigen im Bereich der Entwicklung automatisierter Holzverladesysteme große Fortschritte, identifizieren jedoch Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen. So führt die Entwicklung in [12] zu Problemen bei der Bestimmung der endgültigen GreiferhöhenEinstellung, die zu fehlerhaften Zangengriffen führen können oder Schwierigkeiten bei der Bahnverfolgung aufgrund der fehlenden Lastabhängigkeit der Gelenksregelung.

Der aktuelle Stand der Technik in der Steuerung hydraulischer Roboterarmen ist geprägt von Fortschritten in der Regelung von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden. Jedoch stellt das hochgradig nichtlineare Verhalten dieser Systeme, insbesondere die auftretenden Reibungen, Hysterese und Unstetigkeiten, eine erhebliche Herausforderung für die Entwicklung präziser und robuster Steuerungsalgorithmen dar. Die physikalischen Eigenschaften hydraulischer Systeme führen zu einem unregelmäßigen Verhalten, was die Steuerung erschwert. [15]

[14] stellt in diesem Kontext fest, dass durch den Einsatz von Digital Twins der gesamte Arbeitsprozess einer Maschine, einschließlich ihrer Interaktion mit der Umgebung, realitätsnah simuliert werden kann. Mehrkörpersimulationen ermöglichen dabei eine präzise Berechnung der dynamischen Belastungen, denen die Maschine während des Betriebs ausgesetzt ist. Die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation dienen als detaillierte Eingangsdaten für Finite-Elemente-Analysen, um die strukturelle Integrität der Maschine zu bewerten und potenzielle Schwachstellen zu identifizieren. Sowohl die Kopplung der beiden Domänen (Mehrkörperdynamik und Strukturmechanik) als auch eine umfassende Integration der verwendeten Aktorik sind in dieser Arbeit jedoch nicht abgebildet.

Die Forschungsarbeit in [16] analysiert die Herausforderungen und Potenziale der Kopplung von Mehrkörpersimulationen mit hydraulischen Systemen. Dabei werden insbesondere die durch den zeitdiskreten Datenaustausch bedingten Diskontinuitäten und Verzögerungen identifiziert, die zu Instabilitäten in den numerischen Integrationsverfahren führen können. Ähnliches erforschen die Autoren in [17] und konzentrierten sich auf die Simulation der Mehrkörperdynamik eines Spreaders und des Hebemechanismus, indem sie ein fortschrittlicheres mathematisches Modell des Krans analysieren. Die Simulationen bilden allerdings nur das Systemverhalten während transients Vorgänge ab.

[18] präsentiert eine neue, semi-analytische Methode zur effizienten Kopplung von Mehrkörperdynamik und hydraulischen Aktuatoren in der Simulation hydraulischer Maschinen. Im Vergleich zu bestehenden numerischen Methoden wird die Genauigkeit und Rechenleistung der neuen Methode anhand eines Modellbeispiels eines Forstkrans untersucht und belegt. Die Ergebnisse zeigen eine verbesserte Rechenleistung bei vergleichbarer Genauigkeit. Der Fokus liegt auf einer monolithischen Kopplung, die Echtzeitfähigkeit ermöglicht und für verschiedene Anwendungen in Forschung und Produktentwicklung nutzbar ist. Das verwendete Modell basiert auf der Index-3 Augmented-Lagrange-Methode für die Mehrkörperdynamik und der konzentrierten Flüssigkeitsmethode für die Hydraulik, zeigt sich jedoch problematisch in der anwendungsorientierten Verwendung und Portierung auf andere Systeme.

Der aktuelle Forschungsstand zeigt, dass in der Entwicklung von Steuerungssystemen für hydraulische Anlagen erhebliche Fortschritte erzielt wurden. Dennoch bestehen Forschungslücken bei der ganzheitlichen digitalen Abbildung des Systems Verladekran. Insbesondere fehlt es an Modellen, die das Systemverhalten über Domänengrenzen hinweg abbilden und dabei sowohl die Steuerungs- und Regelungsarchitektur als auch die eingesetzte Hydraulikaktuatorik sowie die dynamischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Bauteilelastizitäten abbilden.

3 Entwicklung des Digital Twins

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird ein holistischer, anwendungsorientierter Ansatz zur Entwicklung des Steuerungs- und Regelungssystems für den Holzverladekran vorgestellt. Um die Entwicklungszeit zu reduzieren und mögliche Entwicklungsfehler so früh wie möglich zu identifizieren und zu beheben, wird zur Entwicklung auf die Methoden des Digital Engineerings zurückgegriffen und der Holzverladekran als Digital Twin abgebildet. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Domänen, die durch den Kran realisiert werden, muss auch der Digital Twin in entsprechenden Softwaresystemen realisiert werden, die die physikalischen Domänen möglichst präzise und effizient abbilden. Da es keine etablierte Methode zur Entwicklung eines multi-domänen Digital Twins gibt, wurde ein Vorgehen analog zur Richtlinie VDI 2206 (siehe [19]) konzipiert. Da sich der entwickelte Prozess sehr umfangreich zeigt, werden in diesem Artikel nur die Prozessschritte zwei bis fünf aus Bild 2 grob umrissen.

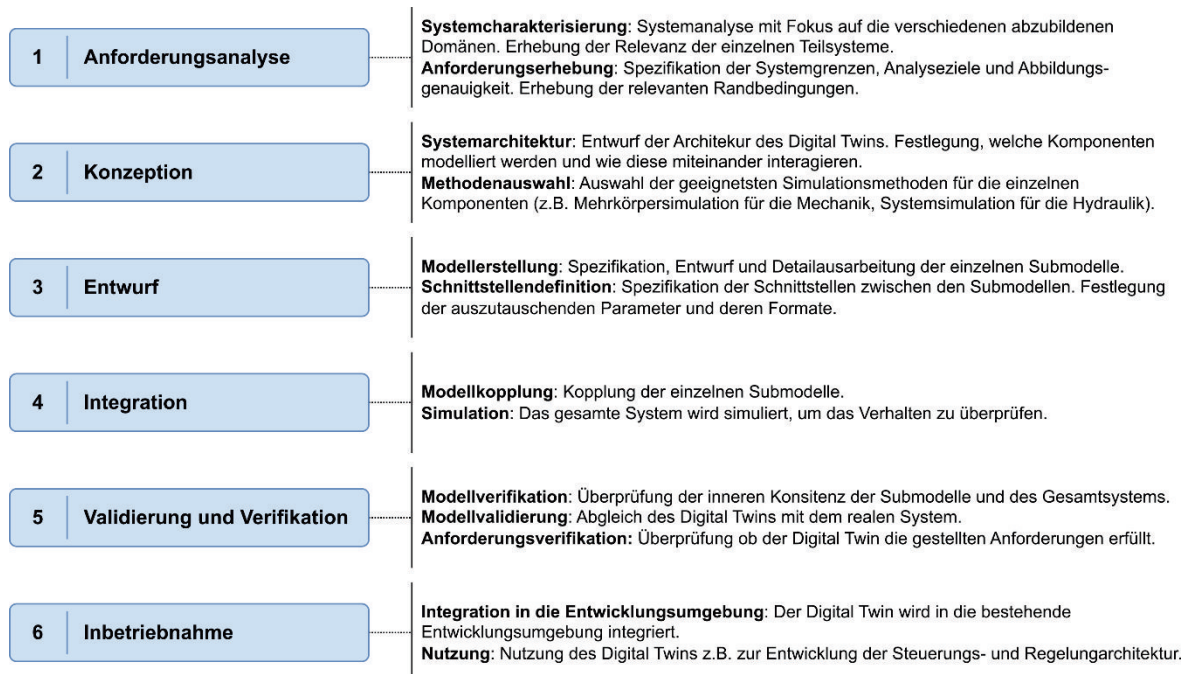


Bild 2: Prozess zur Entwicklung eines multi-domänen Digital Twins

Für eine realitätsnahe Simulation im Digital Twin müssen die dominierenden Systembestandteile des Krans identifiziert und präzise modelliert werden. Kernstück der Entwicklung des Digital Twins bildet eine Mehrkörpersimulation, in die weitere funktionale Aspekte des Holzverladekrans gekoppelt werden. Der vom Projektpartner PALFINGER EPSILON zur Verfügung gestellte Verladekran bietet bereits eine ausgezeichnete Basis, die zur Automatisierung genutzt werden kann. So ist der Kran als Prototyp ausgeführt und bereits mit Sensorik zur Erfassung der Gelenkpositionen und Eruierung der Hydraulikdrücke in den verbauten Zylindern ausgestattet. Der Kran kann im momentanen Zustand durch eine Vorgabe der Gelenkgeschwindigkeit angesteuert werden.

Im Rahmen der Systemcharakterisierung wurde die Kausalkette analysiert, die im Kran umgesetzt wird, sobald ein Steuerbefehl über den CAN-Bus an die Steuereinheit übermittelt wird. Verfolgt man die kinematische Kette des Krans ausgehend von diesem Steuerbefehl,

lassen sich vorrangig folgende Bestandteile identifizieren, die die Position des letzten kinematisch bestimmten Gelenks (siehe Bild 3) beeinflussen:

- Steuerungssystem und Signalübertragung durch CAN-Bus
- Hydraulische Aktorik
- Bewegliche Bauteile des Krans: Geometrie, Massen
- Elastizitäten (Die Elastizitäten sind als separater Punkt angeführt, da sie maßgeblich für die Lastabhängigkeit des Regelungssystems verantwortlich sind.)

3.1 Mehrkörpersystem

Bild 3 zeigt eine Struktur des Holzverladekrans, die als Basis der Mehrkörpersimulation verwendet wird und die relevanten Bauteile und Gelenke erfasst, die die kinematische Kette bis zum letzten kinematisch definierten Gelenk (C67) bildet:

Bauteile

- P1: Basis
- P2: Hauptarm
- P3: Knickarm
- P4: Schubarm

Gelenke:

- C12: Schwenkgelenk
- C23: Hauptgelenk
- C34: Knickgelenk
- C45 & C56: Schubgelenk
- C67: Pendelgelenk

Die in Bild 3 als A1 bis A3 gekennzeichneten Aktuatoren sind hydraulisch ausgeführt und werden näher in Abschnitt 3.1 behandelt. Das Aktorsystem und die detaillierte Modellierung des Schubgelenks an sich, durch die die Bewegung des Schubarms realisiert wird, wird aus Rücksicht auf den Projektpartner PALFINGER EPSILON nicht näher behandelt.

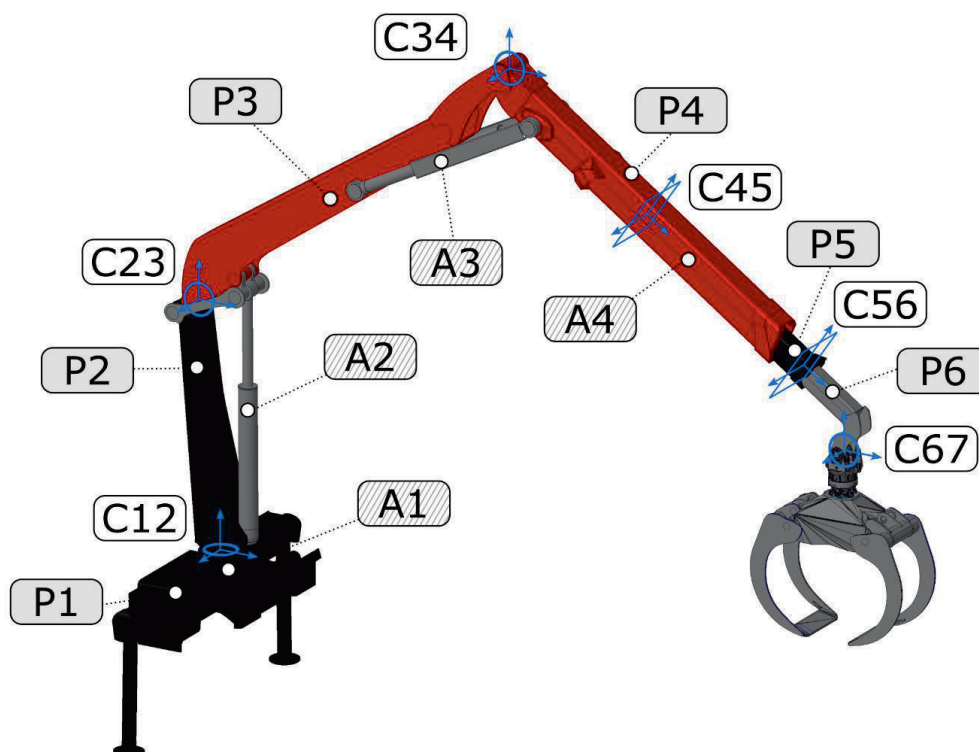


Bild 3: Struktur des Holzverladekrans als Basis der Mehrkörpersimulation

In der Mehrkörpersimulation, die in MSC Adams der Firma Hexagon umgesetzt wurde, werden die rotatorischen Verbindungen der einzelnen Bauteile des Verladekrans durch Bushings² abgebildet, bei denen eine rotatorische Steifigkeit und Dämpfung auf null gesetzt wurde. Dadurch lässt sich ein Drehgelenk mit entsprechender elastischer Nachgiebigkeit abbilden.

3.2 Hydraulik

Zur Abbildung der Hydraulik im Digital Twin wurde eine Systemsimulation entwickelt, die das Verhalten der Hydraulik detailgetreu abbildet. Bei der Modellierung wurde besonderer Wert daraufgelegt, dass das Verhalten hinsichtlich der Reaktionsverzögerung und der limitierte verfügbare Volumenstrom bei Aktivierung mehrerer Hydraulikzylinder korrekt abgebildet wird. Zur Modellierung wurde auf die Open Source Bibliothek OpenHydraulics zurückgegriffen, die es ermöglicht, die im Verladekran verbaute Hydraulik in der nötigen Detailtiefe abzubilden, aber den Modellierungsaufwand im Vergleich zu den Implementierungen in [16] und [18] deutlich reduziert. Bild 4 zeigt ein exemplarisches Simulationsmodell, das aus zwei Zylindern, den entsprechenden Ventilen und dem Antriebsaggregat besteht. Aus Rücksicht auf den Projektpartner PALFINGER EPSILON wird hier nicht das im Digital Twin verwendete Modell gezeigt, das die gesamte Hydraulik des verwendeten Krans abbildet.

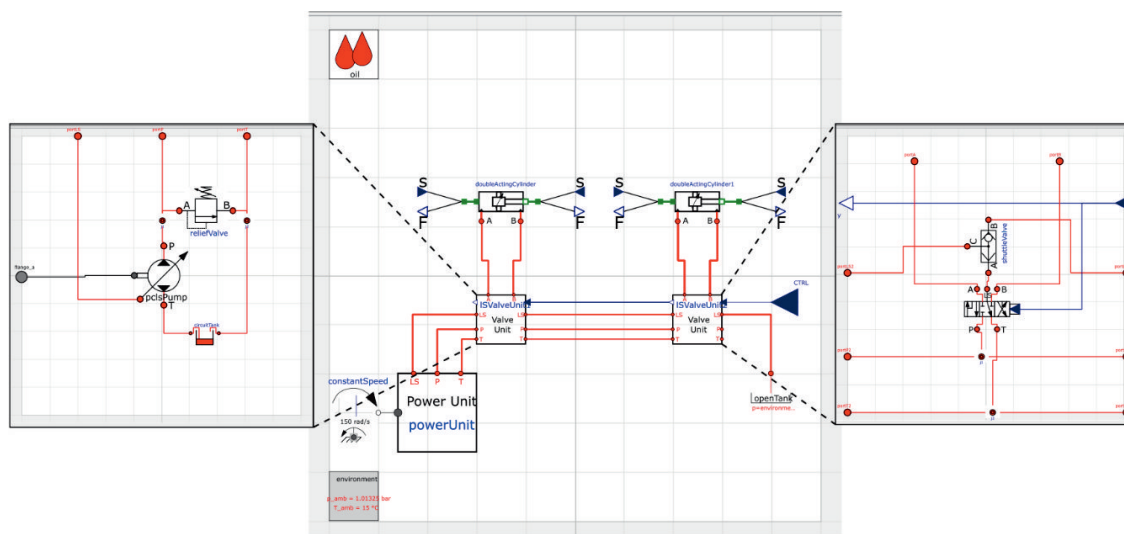


Bild 4: Simulationsmodell in OpenModelica zur Abbildung der Hydraulik

Im mittleren Teil der Abbildung (Bild 4) sind zwei doppelwirkende Hydraulikzylinder zu sehen, die durch die beiden Ventilmodule angesteuert werden können. Der rechte Detailausschnitt zeigt Details zu den Ventilmodulen, die die Verbindung im Hauptteil der Simulation vereinfachen. Verwendet wird hier ein 4/3-Wegeventil, das durch die Signaleingänge an der rechten Seite angesteuert wird. Der linke Detailausschnitt zeigt die verwendete Power Unit, die in dieser Darstellung durch eine Bewegungsvorgabe mit konstanter Geschwindigkeit

² Eine Bushing ist ein 6-DoF Feder-Dämpfer-System: für die drei translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade können jeweils unterschiedliche Steifigkeits- und Dämpfungskennwerten hinterlegt werden.

gespeist wird. Im Digital Twin, der zur Entwicklung verwendet wird, ist hier der im Verladekran verbaute Elektromotor abgebildet.

Das Simulationsmodell zur Abbildung der Hydraulik wird in das Gesamtsystem des Digital Twins als FMU³ integriert. Als Schnittstellen dazu dienen die in Bild 4 gezeigten Interfaces F, s und CTRL. Als Eingangsgrößen in die Hydrauliksimulation werden neben der Ventilstellung die in der Mehrkörpersimulation berechneten Verschiebungen verwendet, die den aktuellen Zylinderhub ergeben. Als Ausgabegröße wird die momentane Reaktionskraft des Hydraulikzylinders an die Mehrkörpersimulation zurückgegeben.

3.3 Elastizitäten

Zur Integration der Bauteilelastizitäten wurden zwei verschiedene Varianten umgesetzt, die sich sowohl hinsichtlich der möglichen Abbildungsgenauigkeit als auch der notwendigen Rechenzeit oder Rechenleistung stark unterscheiden:

- Abbildung des elastischen Verhaltens durch Abbildung der Bauteile in einer FEM-Analyse und Integration der FEM-Simulation in die Mehrkörpersimulation
- Abbildung des elastischen Verhaltens durch Diskretisierung der Starrkörper und Verbinden der Bauteile durch kinetische Randbedingungen

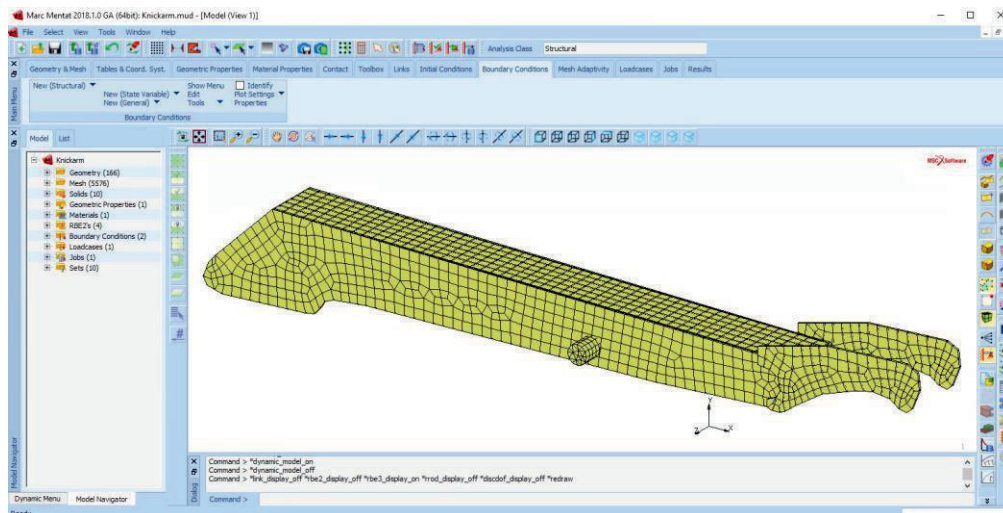


Bild 5: FEM Simulationsmodell zur Abbildung der Elastizität des Knickarms

Bild 5 zeigt eines der verwendeten FEM-Simulationsmodelle, die in Marc der Firma Hexagon umgesetzt wurden. Die Simulation wird über das ASCI-Interface zur Simulationskopplung mit der Mehrkörpersimulation verbunden. Hierbei werden die Boundary Conditions der FEM Simulation mit den entsprechenden Markern⁴ in MSC Adams verbunden. Der gezeigte Knickarm bildet vier relevante Boundary Conditions ab: Die Kraftübertragung an der linken und rechten Seite längs des Arms sowie die beiden Drehgelenke an der Vorder- und Hin-

³ Die FMU stellt eine eigenständige Einheit dar, die mit dem restlichen Modell über gerichtete Ein- und Ausgänge kommuniziert. Details dazu sind unter anderem in [20] dargestellt.

⁴ Die Reaktionskraft wird bei Verwendung des ASCI-Interfaces in MSC Adams durch eine allgemeine GForce (3 linear unabhängige Kräfte und die entsprechenden Drehmomente) abgebildet.

terseite des Knickarms. Diese Boundary Conditions werden als 6-DoF Verschiebungsvorgaben abgebildet, deren Verschiebungen durch das ASCI-Interface zur Simulationskopplung zwischen MSC Adams und MSC Marc vorgegeben werden. Auf Basis der durch die Mehrkörpersimulation errechneten Verschiebungen werden in jedem Synchronisierungsschritt der Cosimulation die entsprechenden Reaktionskräfte in der FEM-Simulation berechnet und wieder in die Mehrkörpersimulation zurückübertragen.

Der Mesh der FEM Simulation wurde stark hinsichtlich der Rechenzeit optimiert, eine auch nur annähernde Echtzeitfähigkeit liegt jedoch mit der verfügbaren Hardware außerhalb des Möglichen. Auf Grund dessen wird im zur Regelungsentwicklung verwendeten Digital Twin eine reduzierte Abbildung der Elastizitäten verwendet, die in Bild 6 dargestellt ist. Der Knickarm wird dabei in drei Teile aufgeteilt, die durch Bushings miteinander verbunden sind. Diese Variante zeigt sich naturgemäß deutlich effizienter hinsichtlich der Rechenzeit und bildet die elastische Verformung im Rahmen der geforderten Genauigkeit ab.

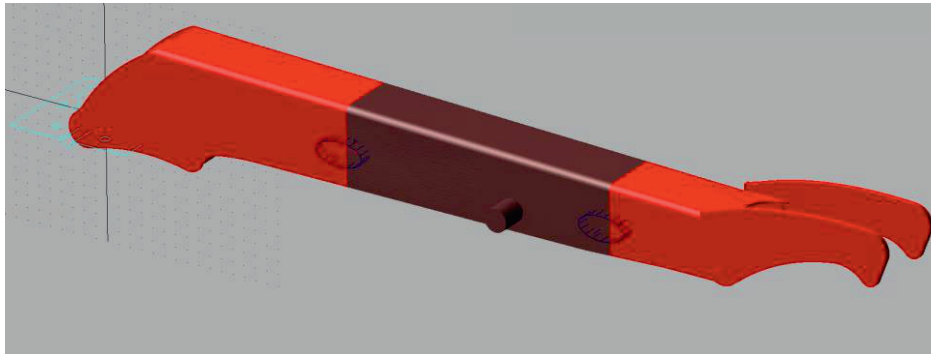


Bild 6: Abbildung der Elastizitäten durch Diskretisierung und elastische Verbindung

Die Parameter der Steifigkeitswerte der Bushings werden anhand der FEM-Simulation berechnet und das Systemverhalten dahingehend optimiert, dass die relative Verschiebung der Kräfteinleitungs- und -ausleitungspunkte über einen breiten Lastbereich übereinstimmen. Die Dämpfungswerte der Bushings werden anhand eines Rayleigh-Dämpfungsmodells approximiert.

3.4 Steuerung, CAN-Bus und Sensor-FMU

Das Steuerungssystem rechnet eine Vorgabegeschwindigkeit der Gelenke in die entsprechende Verfahrensgeschwindigkeit der Zylinder und in weiterer Folge in die Ventilstellung des Hydraulikkreislaufs um. Als zusätzliche Randbedingung wird dabei berücksichtigt, dass die Vorgabegeschwindigkeit nur durch einen CAN-Bus mit einer Taktrate von 40 ms gesetzt werden kann. Das Steuerungssystem wurde in einer FMU umgesetzt, das mit Hilfe des fmusDK 2.0.6⁵ erstellt wurde. Das Software Development Kit, das als Community Projekt vorangetrieben wird, ermöglicht es, FMUs auf Basis von C-Code zu formulieren und zu kompilieren. Als Eingangsgröße der FMU wird ein Vorgabewert der jeweiligen Gelenksgeschwindigkeit als Prozentwert im Intervall von $\pm 100\%$ akzeptiert, der wie beschrieben umgerechnet wird und in weiterer Folge als Eingangsgröße der Hydrauliksimulation dient.

⁵ Nähere Informationen dazu können unter <https://github.com/qtronic/fmusdk/> gefunden werden.

Die Sensor-FMU (siehe auch Bild 7) dient dem Auslesen der momentanen Gelenkspositionen und -geschwindigkeiten. Sie wurde mit dem gleichen SDK erstellt, liest die entsprechenden Werte der Mehrkörpersimulation aus und überlagert diese Werte mit einem variabel definierbaren statistischen Rauschen.

3.5 Gesamtsystem des Digital Twins

Bild 7 zeigt ein Flow-Port-Diagramm des Digital Twins für ein einzelnes Gelenk. Abgesehen von der als Main Control gezeigten Hauptsteuerung, die die Leittrajektorien der Bewegungen berechnet und der Gelenkregelung im CAN-Bus Takt diskretisiert übergibt, sind alle Komponenten direkt an die Mehrkörpersimulation gekoppelt.

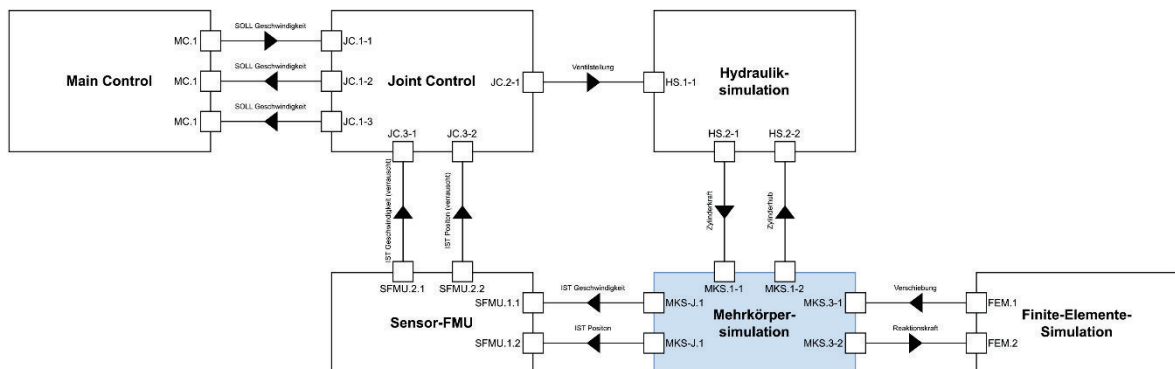


Bild 7: Flow-Port-Diagramm des Digital Twins

Das gekoppelte Simulationsmodell, das das Herzstück des Digital Twins bildet, ist so weit optimiert, dass es echtzeitfähig⁶ ist, solange der Greifvorgang nicht stattfindet. Sobald der Greifvorgang startet und die abgebildeten 3D-Kontakte zusätzliche Rechenkapazität benötigen, steigt die notwendige Rechenzeit so stark an, dass vor allem aufgrund des volatilen Verhaltens der Rechenzeit Echtzeitfähigkeit mit dieser Tool-Chain nicht mehr erreicht werden kann. Nichtsdestotrotz lassen sich einzelne Teilzyklen (z. B. das Anfahren des Greifpunkts oder das Befördern der Baumstämme zum Zielpunkt bei Modellierung als zusammenhängende Ersatzmasse) gut dazu nutzen, um das Regelungssystem zu entwickeln.

⁶ Unter Echtzeitfähigkeit wird in diesem Kontext eine Echtzeitfähigkeitsschranke die der Realzeit entspricht verstanden.

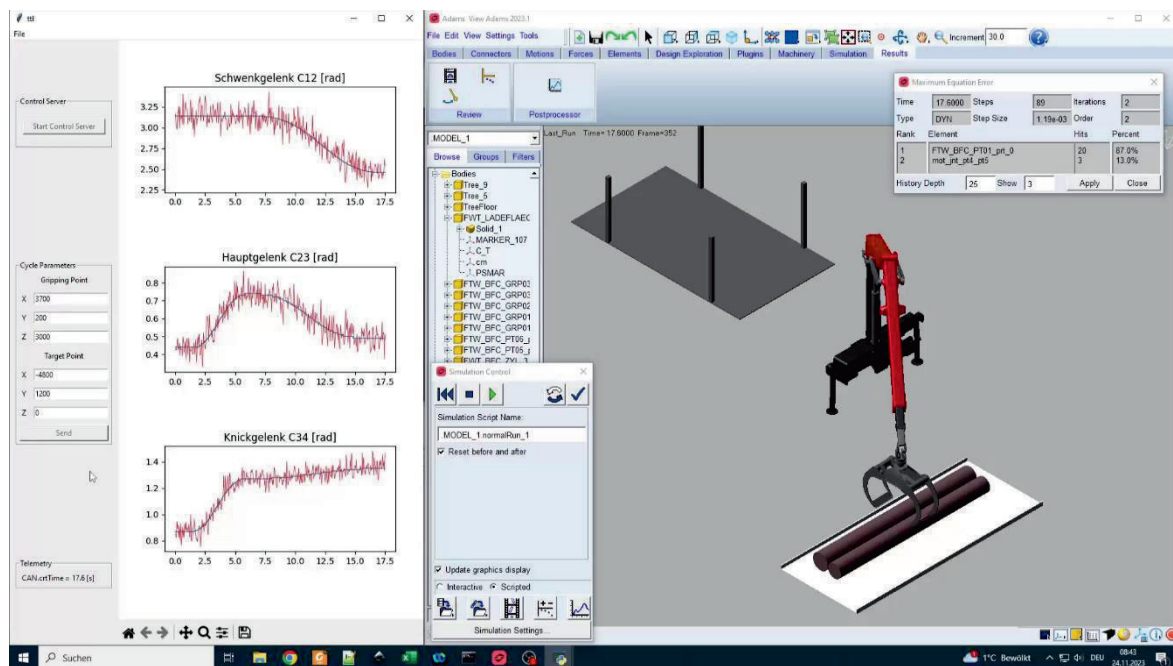


Bild 8: Gesamtsystems des Digital Twins

Bild 8 zeigt eine Variante⁷ des Gesamtsystems des Digital Twins. Die rechte Seite des Bildes zeigt das gekoppelte Simulationsmodell, von dem hier nur die Mehrkörpersimulation zu sehen ist. Links im Bild ist die Main Control als Python GUI abgebildet, in der der Greifpunkt und der Zielpunkt des Bewegungsvorgangs eingegeben werden können. Die drei Analysecharts, die im rechten Bereich der Python GUI zu sehen sind, zeigen die Soll-Geschwindigkeiten (blaue Kurven) und die durch die Sensor-FMU mit statistischem Rauschen verzerrten Ist-Geschwindigkeiten (rote Kurven) an. In dieser Variante des Digital Twins wird die Hauptsteuerung durch einen gezielten Eingriff in den Solvingprozess der Mehrkörpersimulation umgesetzt. Die Solversteuerung wird hierbei so verändert, dass synchron zum CAN-Bus Takt die Mehrkörpersimulation kurzzeitig unterbrochen wird und über eine Socketverbindung die Kommunikation zur Python GUI ermöglicht wird.

Die Kontrollroutine, die dies ermöglicht ist in Adams als Consub umgesetzt und wird in C-Code ausformuliert. Eine Herausforderung in der Umsetzung stellt die Synchronisierung beider Umgebungen im CAN-Bus-Takt dar. Die umgesetzte Solversteuerung der Mehrkörpersimulation erlaubt es so der Hauptsteuerung, direkt in die Berechnung der Mehrkörpersimulation einzugreifen und sie zur Laufzeit zu steuern.

4 Erste Ergebnisse der Testläufe

Um die Entwicklung der Steuerungseinheit auch im realen Umfeld zu testen und den Digital Twin zu validieren, wurde im Rahmen des Projekts FutureWoodTrans durch das Institut für Technische Logistik eine Plug-In-Steuerungsbox entwickelt, welche in Bild 9 dargestellt ist. Die Steuerungsbox besteht aus einem 120W Netzteil, einem Industrie-PC (Revolution PI Connect S), dem für die Kommunikation notwendigen Erweiterungsmodul für den CAN-Bus

⁷ Durch den modularen Aufbau kann der Digital Twin in verschiedenen Konfigurationen betrieben werden. So können Detailspekte mit höherer oder geringerer Genauigkeit abgebildet werden.

und einem Erweiterungsmodul für I/O Kommunikation sowie einem Notaus Schalter. Die Kommunikation der Steuerungsbox mit dem Kran konnte bereits vor den Feldtests durch eine von der Firma PALFINGER EPSILON zur Verfügung gestellte Testumgebung ausgiebig getestet werden, wodurch sich die Zeit zur Erstinbetriebnahme bei den ersten Testläufen auf nahezu null reduzieren ließ.

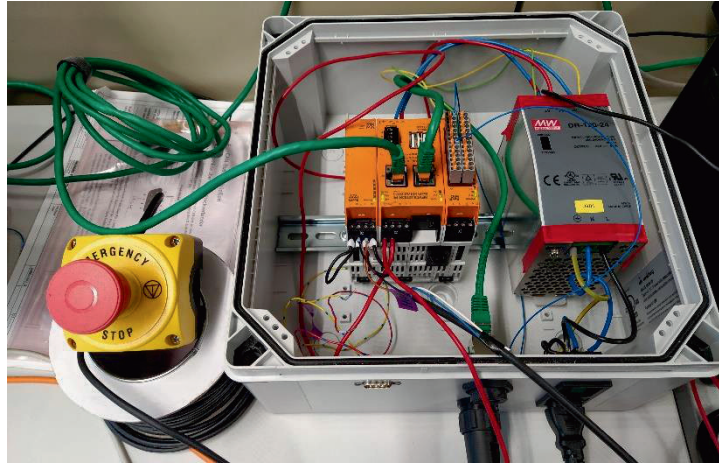


Bild 9: Plug-In-Steuerungsbox

Die Plug-In-Steuerungsbox übernimmt die Aufgabe der in Bild 7 dargestellten Main Control und berechnet auf Basis der Rückwärtskinematik des Verladekrans die benötigten Leittrajektorien und die daraus abgeleiteten Geschwindigkeitsleitkurven der einzelnen Gelenke.

Im Rahmen der ersten Testläufe wurde ein Versuchsplan von 96 verschiedenen Fahrmanövern ausgeführt, in dem neben einfachen Sprungfunktionen zur Testung des Reaktionsvermögens des Verladekrans auch Sigmoidale Leitkurven getestet wurden, die für die Weiterentwicklung des Regelungssystems hauptsächlich Anwendung finden werden. Bild 10 zeigt eine Auswertung eines Versuchs, der mit einer Sigmoidfunktion als Leitkurve (blaue Kurve im Diagramm in Bild 10) bis zu einer Maximalgeschwindigkeit von 92% am Schubarm des Verladekrans durchgeführt wurde. Die grüne und die gelbe Kurve zeigen die Ist-Geschwindigkeit des Digital Twins (für diese Analysekurve in der Darstellung wurden die unverfälschten Gelenksdaten genutzt – d. h. ohne Überlagerung mit statistischem Rauschen) beziehungsweise der Messung am realen Verladekran.

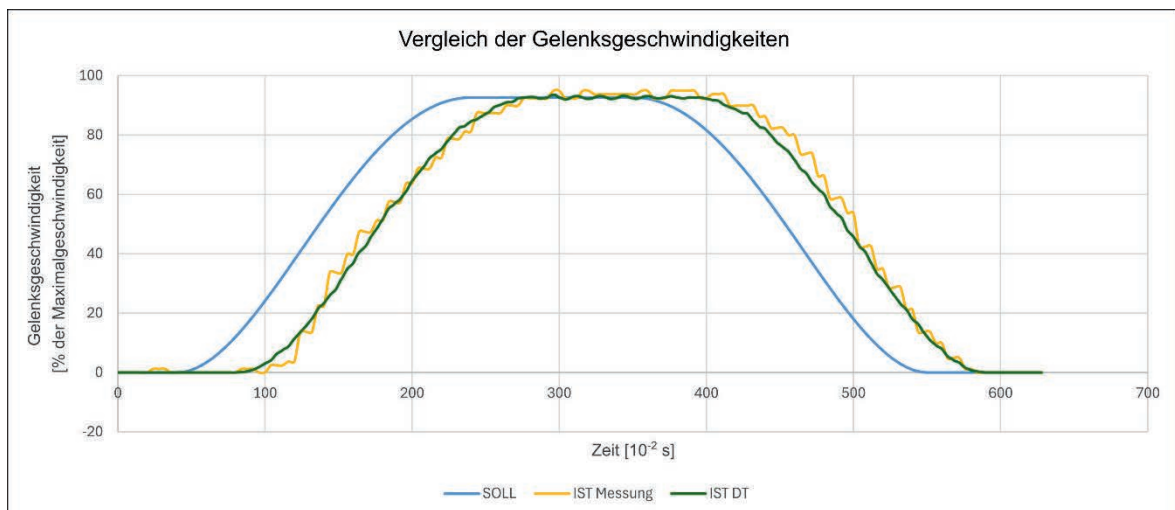


Bild 10: Analysekurve eines Versuchslaufs

Die Analyse der Kurven zeigt eine gute Abbildung der Reaktionsverzögerungen (in Bild 10 als Verschiebung entlang der Zeitachse zwischen der blauen und der grünen sowie gelben Kurve zu sehen) bei der Beschleunigung und Verzögerung der Gelenksgeschwindigkeit, die durch die Trägheit des Hydrauliksystems und die verschiedenen Latenzen zwischen den unterschiedlichen Steuerungsbereichen bedingt ist. Im Bereich konstanter Geschwindigkeit ist ein oszillierendes Verhalten der Ist-Geschwindigkeit um den Sollwert erkennbar. Dieses Phänomen lässt sich auf die Reibungseffekte im Schubgelenk zurückführen und wird vom Digital Twin zwar abgebildet, jedoch zeigt sich die Schwingungsamplitude als zu gering im Vergleich mit dem Realsystem.

Prinzipiell lassen sich die ersten Versuche als Erfolg sehen und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Gelenksgeschwindigkeiten und denen, die anhand des Digital Twins bestimmt wurden. Eine Feinabstimmung der Reibungsparameter erscheint jedoch zur weiteren Verbesserung der Modellgenauigkeit sinnvoll. Die Erkenntnisse aus dieser ersten Versuchsreihe werden als Grundlage für die kontinuierliche Weiterentwicklung des Digital Twin verwendet.

Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts FutureWoodTrans werden Möglichkeiten und Lösungen in der autonomen Forstwirtschaft erforscht. Als Teil dieses Forschungsprojekts ist das Institut für Technische Logistik verantwortlich für die Konzeption, Entwicklung und Umsetzung eines innovativen, automatisierten Be-, Um- und Entladesystem auf Basis eines PALFINGER EPSILON M12Z105 Holzverladekrans.

Die vorliegende Forschungsarbeit präsentiert einen innovativen Ansatz zur Entwicklung eines Steuerungs- und Regelungssystems für Holzverladekrane, der auf den Prinzipien des Digital Engineerings basiert. Im Zentrum steht die Erstellung eines Digital Twins, der das physische System umfassend abbildet und dadurch hilft, die nötige Entwicklungszeit zu reduzieren und eine frühzeitige Identifizierung und Behebung von Fehlern ermöglicht. Zusätzlich dazu erlaubt der Digital Twin die Simulation potenzieller Gefahrensituationen und Ausfälle in einer sicheren, virtuellen Umgebung. Dies ist insbesondere bei komplexen Maschinen von Bedeutung, bei denen Fehlfunktionen schwerwiegende Unfälle verursachen können. Durch die Simulation verschiedener Betriebsszenarien können Systemschwachstellen identifiziert und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen entwickelt werden, ohne Personal oder Maschinen einem Risiko auszusetzen. Erste Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationen und den realen Messungen hinsichtlich der Gelenksgeschwindigkeiten. Dies bestätigt die Leistungsfähigkeit des Digital Twins als Entwicklungswerkzeug.

Parallel zur Entwicklung des Regelungssystems wird im Rahmen des Projekts vom Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen der TU Graz ein Bilderkennungssystem entwickelt, durch das die einzelnen Baumstämme, die in einem Polter gestapelt sind, erkannt werden können. Bild 11 zeigt exemplarisch ein Segmentierungsergebnis des Bilderkennungssystems, in dem die oberste Schicht der im Polter gestapelten Baumstämme gut erkannt wird. Auf Basis dieser Erkennung kann auf die Schwerpunktlage der einzelnen Baumstämme

zurückgeschlossen werden, die dem Gesamtsystem des Be-, Um- und Entladesystems zur Verfügung stehen.



Bild 11: Beispielbild einer Segmentierung des Bilderkennungssystems [21]

Neben der Analyse der Lastabhängigkeit der Greiferhöhe des Systems wird das Hauptaugenmerk der zukünftigen Entwicklung auf die Integration des Gesamtsystems und das nahtlose Zusammenspiel zwischen Bilderkennungssystem und Regelungssystem gelegt.

Acknowledgement:

Dieses Projekt wird aus Mitteln der Innovationsstiftung für Bildung unter der FFG-Nr. 898697 gefördert und im Rahmen des Programms Innovationslabore für Bildung durchgeführt.



Author Contributions:

Conceptualization: AOP; Methodology: AOP; Software: AOP; Investigation: AOP, MC; Validation: AOP, MC; Writing - Original Draft: AOP; Writing - Review & Editing: AOP, CL, MC; Visualization: AOP; Project administration: AOP, CL; Funding acquisition: AOP, CL;

Quellenverzeichnis:

- [1] Landscheidt, S.; Kans, M.; Winroth, M.: Opportunities for robotic automation in wood product industries: the supplier and system integrators' perspective. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11. Jg., S. 233-240
- [2] Kogler, C.; Beiglböck, A.; Rauch, P.: Empirical insights into salvage wood logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 2024, 45. Jg., Nr. 2, S. 365-381
- [3] Visser, R.; Obi, O. F.: Automation and robotics in forest harvesting operations: Identifying near-term opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 2021, 42. Jg., Nr. 1, S. 13-24
- [4] PALFINGER EPSILON (2024). EPSILON-Holztransport. Verfügbar als png-Bild unter https://www.palfingerepsilon.com/de_DE/Holzwirtschaft/Holztransport (Datum des Zugriffs: 18.12.2024)
- [5] Cichocki, M.: Transforming the Composting Industry Towards Industry 4.0 and Physical Internet Capabilities. Dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria, 2024. <https://doi.org/10.3217/n1b6e-2yv61>
- [6] Cichocki, M.; Ortner-Pichler, A.; Landschützer C.: Virtual Engineering in the Design and Simulation of Advanced Gripper Systems for Biomass Handling. 32nd European Biomass Conference (EUBCE 2024), Marseille, France, Juni 2024. doi: 10.13140/RG.2.2.33086.29762
- [7] Kröpfl, P. R.; Ortner-Pichler, A.; Siegl, A.; Steger, M.; Landschützer, C.: Approaches to Chain Drive Design Using Numerical Simulation. Conference proceedings innoTRAC 2024, Fachkolloquium innoTRAC, Chemnitz, Germany, September 2024
- [8] Kröpfl, P. R.; Ortner-Pichler, A.; Siegl, A.; Landschützer, C.; Neugebauer, J.: Simulationsbasierte Weiterentwicklung einer Berechnungsvorschrift für Taschensortersysteme. In *Was uns bewegt – ein Potpourri der Logistik* (S. 169-183). Verlag der TU Graz, 2024. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-995-7-01>
- [9] Leitner, G., Stadlthanner, D.; Ortner-Pichler, A.; Landschützer, C.: Modeling and parameterization of flexible consignments using multi flexible body dynamics. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 2024, 19. Jg., Nr. 1, S. 3-16
- [10] Leitner, G.; Stadlthanner, D.; Ortner-Pichler, A.: Modellierung von forminstabilen Kleinsendungen mittels Multi Flexible Body Dynamics. In: *Logistikwerkstatt Graz 2024*. Verlag der Technischen Universität Graz, 2024. S. 185-200
- [11] Kröpfl, P. R.; Steinkellner, H.; Ortner-Pichler, A.; Mahringer, G.; Landschützer, C.: Digital Engineering tools in designing parcel distribution centers: Introducing a multidimensional classification model. In: *Conference Paper Comec 23*. 2023
- [12] Ayoub, E.; Fernando, H.; Larrivéé-Hardy, W.; Lemieux, N.; Giguère, P.; Sharf, I.: Log Loading Automation for Timber-Harvesting Industry. In: *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2024. S. 17920-17926

- [13] LOSCH, D.; ROSSMANN, J.: Simulation-based analysis of mechanized wood harvest operations. In: 2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). IEEE, 2017. S. 5-9
- [14] Kaufmann, D.; Osterloh, T.; Rossmann, J.: A Digital Twin based Approach to Structural Mechanics: New Perspectives for Robotics in Forestry and Beyond. <https://doi.org/10.5220/0012755500003758>
- [15] Mattila, J.; Koivumäki, J.; Caldwell, D. G.; Semini, C.: A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024. 22(2), S. 669-680
- [16] Rahikainen, J.; González, F.; Naya, M. Á.; Sopanen, J.; & Mikkola, A.: On the co-simulation of multibody systems and hydraulic dynamics. *Multibody System Dynamics*, 2020. 50(2), 143-167
- [17] Andziulis, A.; Eglynas, T.; Bogdevicius, M.; Jusis, M.; Senulis, A.: Multibody dynamic simulation and transient analysis of quay crane spreader and lifting mechanism. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8. Jg., Nr. 9
- [18] Jaiswal, S.; Pyrhönen, L.; Mikkola, A.: Computationally efficient coupling of multibody dynamics and hydraulic actuators in simulating hydraulic machinery. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 28. Jg., Nr. 3, S. 1291-1302
- [19] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2206 - Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. 2nd ed., Berlin, Beuth Verlag, 2021
- [20] Schmitt, T. L.; Andres, M.: Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme – Bondgraphen, objektorientierte Modellierungstechniken und numerische Integrationsverfahren. 2.Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2023. – ISBN 978-3-658-42760-3
- [21] Mandal, S.: Leveraging Foundation Models in Instance Segmentation of Wood Logs for Robotic Grasping. Masterarbeit an der Technischen Universität Graz, 2024

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Predictive Maintenance Lösung für Krane - Monitoren von Systemen auf Krane -

Norbert Esser



Dipl.-Ing. Norbert Esser
Data Respons Solutions GmbH
Amalienbadstr. 41, Bau 53
76227 Karlsruhe

1 Predictive Maintenance Lösung/Monitoren von Systemen auf Krane

1.1 Predictive Maintenance – noch nie so wichtig wie heute...

Neben den einmaligen Anschaffungs- und Installationskosten tragen die Nutzungskosten von Kranen über die Lebenszeit von bis zu mehreren Jahrzehnten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten. Diese Nutzungskosten lassen sich grob in Betriebskosten (Energie /Verbrauchsstoffe) und Lebenszykluskosten (Wartung, Reparatur, Ersatzteile) gliedern.

Gerade in Zeiten finanzieller Anspannung ist es notwendig, einen kosteneffizienten Betrieb sicherzustellen, d. h. die Energiekosten, Liegezeiten von Containerschiffen etc. zu reduzieren und die Verfügbarkeit zu maximieren.

Ausfälle von Kransystemen haben neben den Imageschäden auch ein hohes Kostenrisiko für den Betreiber und Hersteller von Kranen. Steht das Kransystem still, trägt es nicht zur Profitgenerierung bei; nach- und vorgelagerte Logistik und Transportketten sind direkt betroffen. Schiffsliegekosten bilden hier einen erheblichen Anteil. Zusätzlich muss die Wiederinbetriebsetzung eines ausgefallenen Krans geplant und organisiert werden.

Dazu muss i. d. R. ein Servicetechniker vor Ort eine Analyse des Problems durchführen, bevor er eine Reparatur anweisen kann. Dabei können wiederum wertvolle Stunden für Reise und Materialbeschaffung ins Land gehen.

Zur Reduzierung von Ausfällen und schneller Reaktionsfähigkeit, wenn doch ein System einen Fehler aufweist, ist es hochprior wichtig, die Fehlerursache zu identifizieren und eine schnelle Lösung herbeizuführen. Fernwartung von solch komplexen Systemen ist unabdingbar!

Zur Fernwartung gehören:

- Monitoring relevanter Subsysteme und Komponenten, Live-Einblicke in den aktuellen Zustand, automatische Alarmierung bei Abweichungen
- Diagnosemöglichkeiten wie Rücklesen aller Inventory-Informationen wie SW- und HW-Stände
- Update von SW-Komponenten zur Behebung von Fehlern, Aktualisieren von Funktionen und Schließen von möglicherweise aufgetretenen IT-Sicherheitslücken

Fernwartung bedeutet AUS DER FERNE – also bequem vom Schreibtisch des Serviceanbieters, dies kann der Kran-Hersteller, Subsystem-Hersteller oder Betreiber des Hafens/der Krane sein.

Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Reduzierung der Präsenzzeit am Kran – verkürzt Reaktionszeiten und vermeidet Liegezeiten, Wartezeiten, Serviceeinsätze und damit verbundene Kosten
- Frühzeitiges Erkennen von Negative-Trends von überwachten Komponenten (vor dem Ausfall)
- Live-Status und tiefgehendes Monitoring – ermöglicht die Bewertung der Performance der Systeme aufgrund von Massendaten
- Aktualisierungen Software „over-the-air“

- Permanente Datenerfassung – schafft hohes Maß an Wissen über die Flotte
- Deutlich größere Datenmenge erlaubt qualitativ höherwertige Auswertung
- Mögliche Erweiterung für digitale Geschäftsmodelle

1.2 Prinzipieller Verladevorgang im Hafen

Bild 1 zeigt einen prinzipiellen Lade- und Entladevorgang wasser- und landseitig, der auch bidirektional ablaufen kann. Der Ship-to-Shore Kran entlädt das Containerschiff. Der Transport zum Container Stack kann automatisch über ein fahrerloses AGV (Automated Guided Vehicle) erfolgen. Alternativ ist ein manueller Transport möglich. Dabei setzt der STS Kran den Container auf eine definierte Bodenmarkierung, von der ein manuell bedienter Straddle Carrier das Gut aufnimmt und zum Container Stack transportiert. Ein automatisierter RTG-Kran (ARTG) sortiert die herangeführten Container in den Stack. Die Koordinaten, wo welcher Container hin soll, kommen über den zentralen Server vom hafenspezifischen Terminal Operation System (TOS). Für Kühlcontainer ist im Stack ein gesonderter Bereich reserviert.

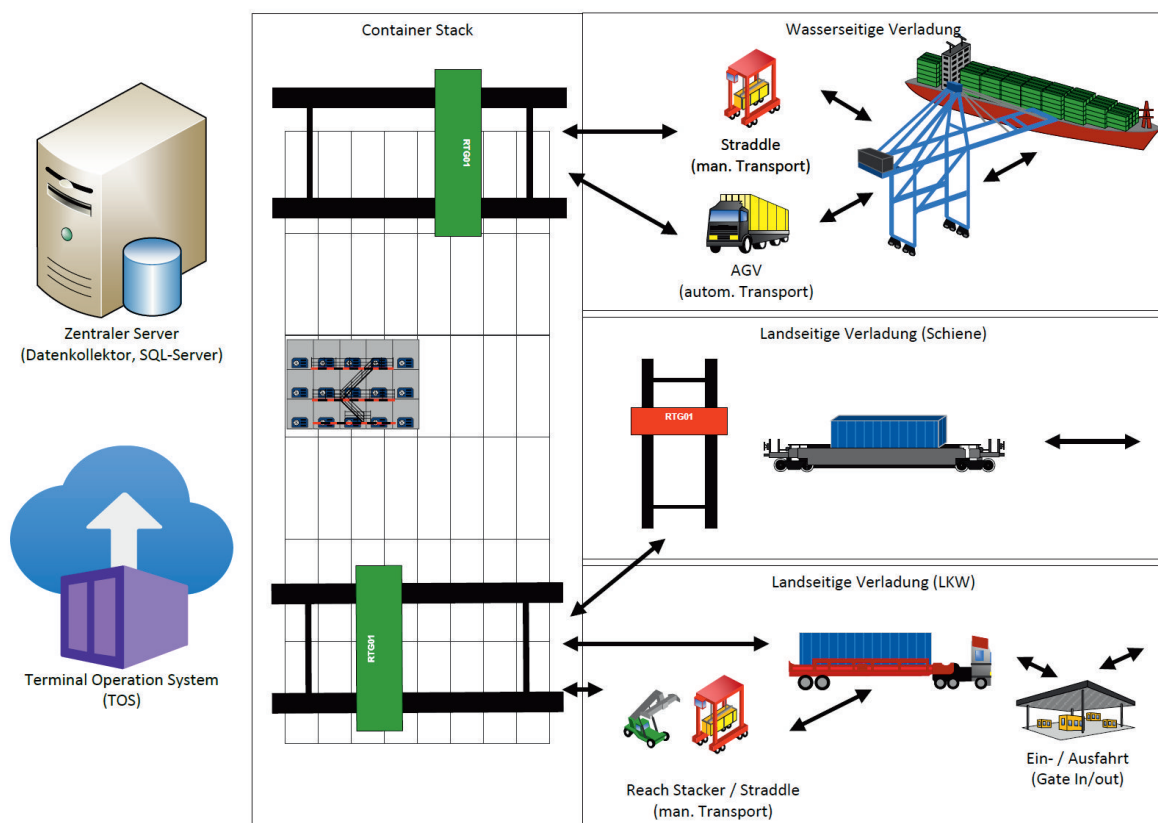


Bild 1: Lade- und Entladevorgang wasser- und landseitig

Landseitig erfolgt die automatische Verladung mit dem RTG-Kran auf die Schiene oder auf den LKW. Eine manuelle Verladung ist immer über einen Reach Stacker oder Straddle Carrier möglich. Auch in diesem Fall setzt der RTG Kran den Container auf eine definierte Bodenmarkierung ab und dieser wird von den genannten Fahrzeugen aufgenommen und entsprechend verladen. Der manuelle Vorgang wird z. B. genutzt im Störfall einer Truck-Lane (Zaunüberwachung hat Verladebereiche durch Personendetektion abgeschaltet...).

1.3 FRAMS – Fault Reporting And Monitoring System

Bild 2 zeigt ein gelebtes Fernwartungskonzept, das aktuell bereits viele Funktionen abdeckt. Die linke Seite des Bildes zeigt die Gerätschaften, die an einem Lade- und Entladevorgang unmittelbar beteiligt sind. Damit diese Vorgänge reibungslos ablaufen, muss eine Reihe von Funktionen und Randbedingungen erfüllt werden. Verladeaufträge werden, wie bereits beschrieben, über das Terminal Operation System und damit über den zentralen Server erteilt und abgearbeitet. Dabei sind Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit von größter Bedeutung. FRAMS ist auf diese Bedürfnisse zugeschnitten, wird kontinuierlich verbessert und optimiert. Die auf der rechten Seite des Bildes gezeigten Fernwartungs-/Fernbedienungselemente werden sicher über VPN angebunden und erlauben übers Web einen direkten Zugriff auf Funktionen und Komponenten der Gerätschaften.

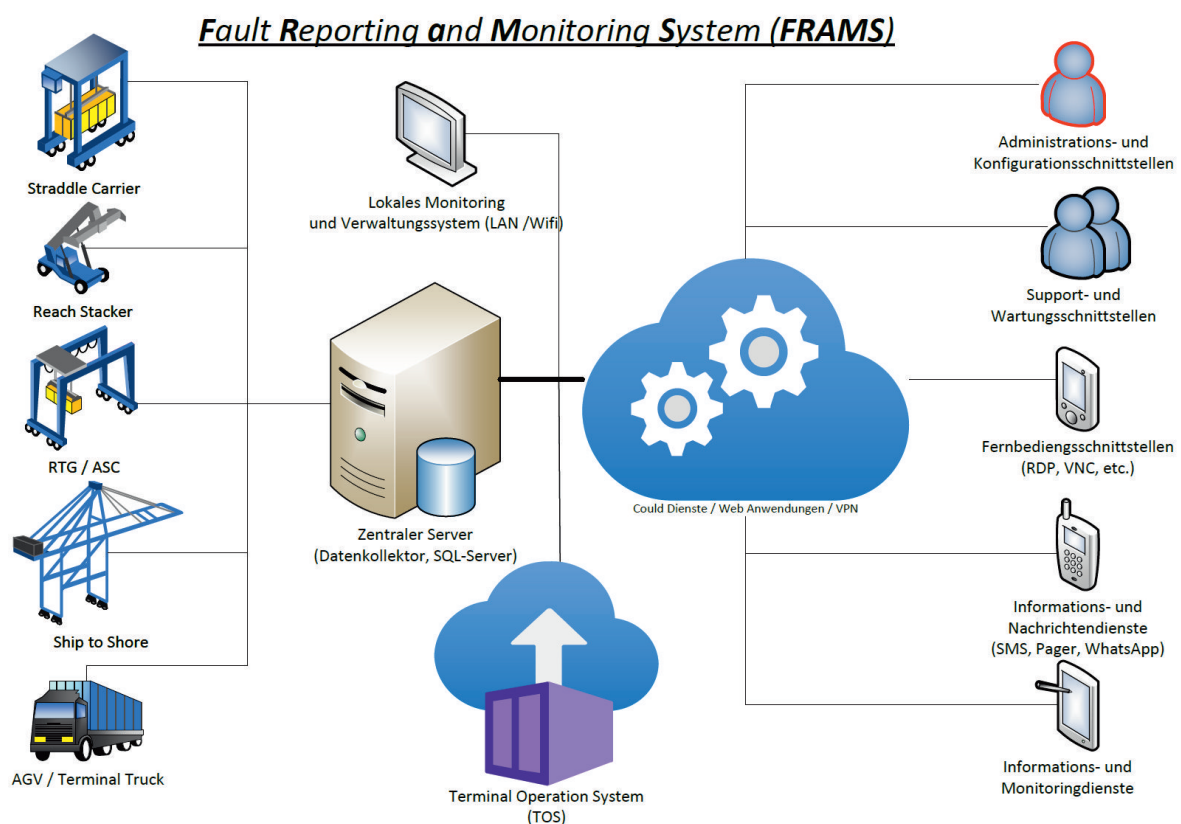


Bild 2: Fernwartungskonzept

Der Umfang der überwachten Komponenten und Funktionen wird nachfolgend am Beispiel des RTG (ARTG) Krans verdeutlicht.

Überwachung der Systeme:

- Positions- und Statuskontrolle (Monitoring) des RTG
- Hardwarekontrolle, Ausfall verschiedener Komponenten, wie Motoren, Wegmesssysteme, Kamera, Laser, ...
- Überwachung der Betriebsmittel, wie Öle der Hydraulik, Bremsen, ...

Überwachung des automatischen oder manuellen Betriebs:

- Überwachung von Gefahrenbereichen (IICZ LS (Interchangezone landseitig))
 - Beobachtung der LKW-Beladezone via Kamera
 - Anti-Truck-Lift Control (Twistlocks gelöst/verriegelt?) via Kamera
 - Full-Auto Truck Load/Unload via Kamera
 - Personendetektion mittels Bewegungsanalyse via Kamera
- Anwesenheitskontrolle der Fahrer (am Bedienterminal des Fahrers)
- Lichtschrankenüberwachung der Truck-Lanes
- Fan-Control (Zaunüberwachung) des Automatikbereiches

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass eine Fehlergruppierung und Priorisierung hierbei besonders wichtig sind, da bereits ein minimales Problem zu langen Transferzeiten der Container und somit zu höheren Kosten führen kann.

Beispiel Zaunkontrolle:

Sobald ein Tor oder Schloss des Zauns einen fehlerhaften Zustand meldet, wird ein dem zugeordneter Sicherheitsbereich vollständig stillgelegt – auf gut Deutsch, da geht nichts mehr. Ein solches Problem kann sehr viele Folgefehler erzeugen. Hier ist es wichtig, dass durch geeignete Priorisierung und ein Monitoring des Fehlers, sprich der Ursache, eine schnelle Lösung herbeigeführt werden kann.

1.4 Einbindung von Komponenten in FRAMS

Am Beispiel des IoT-Gateways von Data Respons Solutions wird gezeigt, wie mühelos weitere Komponenten in FRAMS eingebunden werden können.



Bild 3: IoT-Gateway

Entwickelt wurde das Gateway für die Firma Cargotec (Bild 3). Fast alle Produkte der Cargotec-Marken Kalmar, Hiab und MacGregor werden mit dieser „Kommunikationseinheit“ ausgestattet. Dabei geht es primär um die Wegoptimierung der sich im Hafen befindlichen Fahrzeuge (Straddle- und Shuttle-Carrier, usw.) sowie deren Kommunikation untereinander. Die Anbindung an die jeweilige Hafen-Managementsoftware (TOS) ist zwingend. Das IoT Vehicle Gateway ermöglicht es, dass die Fahrzeuge ihre Aufträge in Echtzeit übermittelt bekommen. Die jeweiligen Vehicle-Standorte werden online erfasst und damit mögliche Kollisionen verhindert. Außerdem dient das Gateway als Datenlogger für das jeweilige Vehicle. Relevante Daten werden im Betrieb in einer Cloud erfasst, ausgewertet und weiterverarbeitet. Somit ist eine Fernüberwachung über FRAMS gewährleistet.

Zusammenfassung

Das Fernwartungskonzept mit dem Beispiel des RTG Krans sowie die mühelose Einbindung weiterer Komponenten am Beispiel IoT Gateway verdeutlichen, dass durch ein gutes und bewährtes Monitoring- und Analysesystem FRAMS eine schnelle Fehlerdiagnose aus der Ferne erfolgen kann. Weiterhin werden Wartungskosten und Vor-Ort-Einsätze minimiert.

Quellenverzeichnis:

- [1] Dipl.-Inform. (FH) Maik Neuendorf, reCognitec GmbH, Kleinmachnow
- [2] Mathias Beer, Ci4Rail GmbH, Nürnberg

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Vorbereitende Instandhaltung von Industriekranen mit Predictive Maintenance

Moritz Lehnert

Hans-Martin Wulfmeyer



B. Sc. Moritz Lehnert

M. Sc. Hans-Martin Wulfmeyer

Lehnert Regelungstechnik GmbH

Bleckenburgstr. 11a

39104 Magdeburg

Vorbereitende Instandhaltung von Industriekranen mit Predictive Maintenance

Die Verfügbarkeit von Krananlagen ist entscheidend für reibungslose Produktionsprozesse. Hier setzen wir mit dem Konzept des Predictive Maintenance an, welches wir mithilfe einer kontinuierlichen Überwachung und Analyse relevanter Anlagenparameter ermöglichen. Damit lassen sich Wartungsbedarf, Verschleiß und potenzielle Ausfallrisiken frühzeitig erkennen, um ungeplante Stillstände zu reduzieren. Ein benutzerfreundliches Interface unterstützt hierbei, indem es sowohl eine übersichtliche Darstellung der Zustände als auch die Dokumentation und Anpassung von Wartungseinstellungen erlaubt.

1 Einleitung

Die Instandhaltung von Industriekranen ist ein kritischer Faktor für die Produktivität und Sicherheit in vielen stahlproduzierenden Unternehmen. Ausfälle, ungeplante Stillstände oder sogar Unfälle haben nicht nur finanzielle Folgen, sondern können die gesamte Logistik- und Produktionskette empfindlich stören.

Das Management der Kraninstandhaltung steht vor der Aufgabe, in der Regel hunderte Krananlagen zu warten. Vorrangig werden produktionsrelevante Krane in festen Intervallen und bei Havarien gewartet, ohne Datengrundlage und meistens ohne Wartungsplan. Hier besteht Bedarf an einer tagesaktuellen Datenauswertung und an Informationen über Verschleißteile am Kran. Die Daten, um Entscheidungen zu treffen, sind in der Regel vorhanden, werden aber aufgrund der Komplexität nicht ausgewertet.

Mit einem an die SPS angeschlossenen Industrie-PC und entsprechender Software ist es möglich, Wartungsobjekte anzulegen und bei der Planung der Instandhaltung zu unterstützen. Bei dem Erneuern von Wartungsobjekten wie bspw. eines Seils kann der Schlosser dieses einfach über die Visualisierung der SPS zurücksetzen. Das Management kann jederzeit über das interne LAN einen Überblick über den Zustand aller Krane erhalten und datenbasierte Entscheidungen treffen.

2 Grundlagen

Um eine prädiktive Instandhaltung effektiv zu gestalten, können Wartungsintervalle von Verschleißteilen in Korrelation zu den erfassten Daten untersucht werden. Dazu zählt das Wissen um Verschleißfaktoren und Lebensdauer von Kranteilen sowie die kontinuierliche Datenerfassung und -auswertung mit Hilfe digitaler Systeme. Verschleißteile werden nachfolgend als Wartungsobjekte definiert.

2.1 Wartungsobjekte

Die mechanischen Komponenten eines Krans sind hohen Belastungen und ständiger Beanspruchung ausgesetzt. Drei besonders relevante Wartungsobjekte sind Drahtseile, Laufräder und Hubwerksgetriebe.

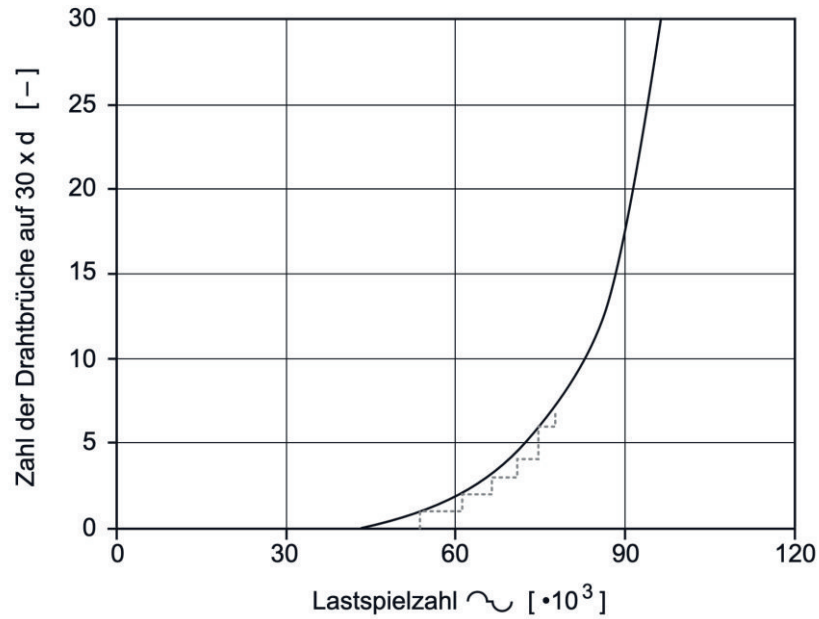


Bild 1: Typischer Verlauf der Zunahme der Drahtbruchzahl mit zunehmender Biegewechselzahl bzw. Lastspielzahl [1]

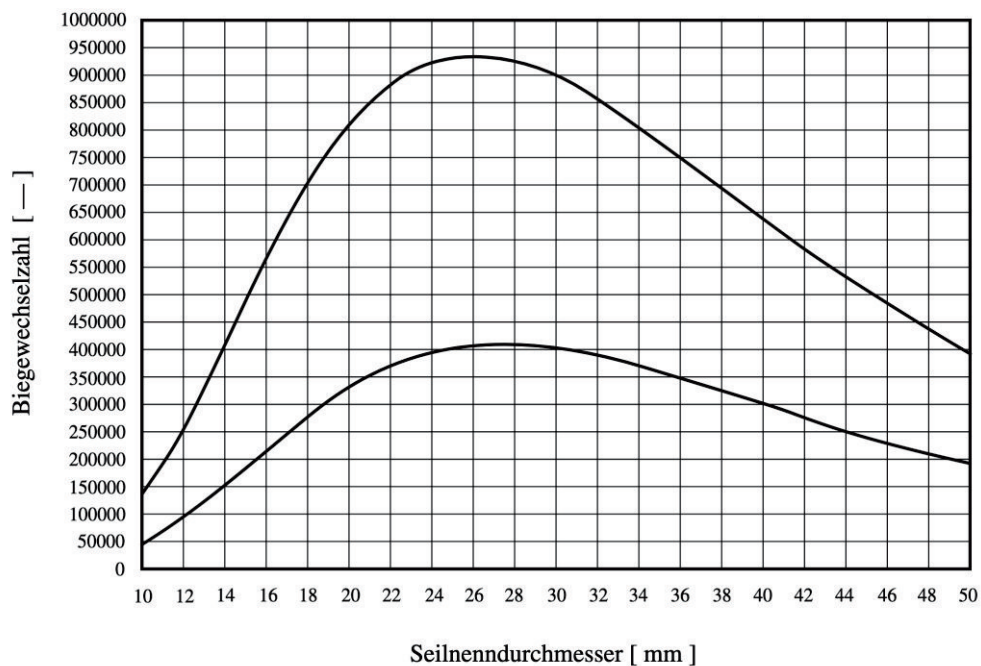


Bild 2: Biegewechselzahl bis Ablegereife und Bruch in Abhängigkeit vom Seilennendurchmesser [2]

Drahtseile unterliegen während ihres Einsatzes verschiedensten Verschleißfaktoren: Sie sind zyklischen Belastungen ausgesetzt, können durch Rost und Abrieb angegriffen werden und werden bei unsachgemäßer Installation oder Handhabung zusätzlich in ihrer Lebensdauer beeinträchtigt. Nach DIN 15020 sind Drahtbrüche, Durchmessererringerungen sowie Deformationen wie Korkenzieher- oder Schlaufenbildung klare Anzeichen für einen kritischen Zustand, der einen Austausch der Seile notwendig macht (Bild 1). Auch die mittlere Biegewechselzahl, etwa nach der „Leipzig“-Methode (VDI2358:2012-12), liefert wichtige Hinweise auf die Gesamtbelastung

und gibt einen Aufschluss über mögliche Risiken. Eine genaue Lastüberwachung und Dokumentation der Belastungszyklen sind hier entscheidend, um Verschleiß vorherzusagen und das Ausfallrisiko zu minimieren (Bild 2).

Laufräder stehen ebenfalls im Fokus der Wartung, da sie bei ungleichmäßiger Belastung – insbesondere bei Portalkränen – und bei Spurversatz einem erhöhten Abrieb ausgesetzt sind. Dies betrifft vor allem die Spurkränze, die durch diese Beanspruchungen verstärkt verschleifen und dadurch Vibrationen sowie einen höheren Wartungsbedarf verursachen können (Bild 3).



Bild 3: Schiene mit Laufrädern und Abrieb [Lehnert Regelungstechnik GmbH]

Bei den Hubwerken hängt die Lebensdauer der Getriebe in besonderem Maße von den Lastzyklen ab. Je häufiger bei voller Last gehoben und gesenkt wird, desto größer ist das Risiko für frühzeitigen Verschleiß. Darüber hinaus ist auch die Hubwerksbremse stark von der Intensität der Lastzyklen betroffen und bedarf regelmäßiger Wartung.

Die Haltebremsen für die Kran- und Katzfahrt haben bei sachgemäßer Verwendung in der Regel eine hohe Lebensdauer. Fallen sie zu früh ein oder öffnen zu spät, kann es hier jedoch zu einem erheblichen Verschleiß kommen.

2.2 Die Wissenspyramide

Die Wissenspyramide ist ein Modell, das die Entstehung von Wissen beschreibt. Sie hat ihren Ursprung im Datenmanagement und zeigt den Unterschied zwischen Daten, Informationen und Wissen auf (Bild 4).

Daten bilden die unterste Ebene der Pyramide. Einzelnen betrachtet, haben sie jedoch keine relevante Aussagekraft. Denn Informationen entstehen erst, wenn Daten miteinander verknüpft werden. Werden verschiedene Informationen kombiniert, lassen sich Muster und Strukturen ableiten, die zusammen mit Kontext und Erfahrungen zu Wissen führen. Das Wissen dient wiederum als Entscheidungsgrundlage für konkrete Handlungen – die vierte Ebene.

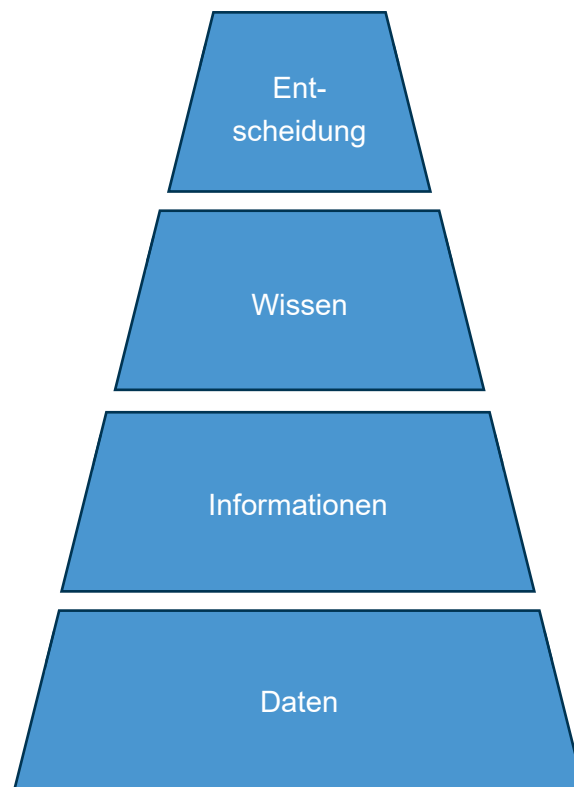


Bild 4: Wissenspyramide

Beispiel:

Daten: Das Hubwerk hat sich seit der letzten Wartung 600-mal mehr als 10 cm nach oben bewegt. Durchschnittlich wurden dabei 30 t gehoben und gesenkt.

Information: Beim Seil wurden 600 Biegewechsel verursacht.

Wissen: Bei 500-800 Biegewechseln sollte eine Inspektion durchgeführt werden.

Entscheidung: Seile auf Ablegereife prüfen.

3 Umsetzung

In der Umsetzung ist eine geeignete Systemarchitektur erforderlich, um die Daten effizient zu erfassen und zu speichern. Weiterhin ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle unerlässlich, um die aufbereiteten Informationen für den Menschen anschaulich zu visualisieren und eine Interaktion mit dem System zu gewährleisten.

3.1 Systemarchitektur

Die vorgestellte Lösung zur Erfassung und Verarbeitung der Daten besteht aus einem Industrie-PC mit x86-Hardwarearchitektur (Bild 5 und Bild 6). Dieser kann durch verschiedene Sensoren erweitert werden, wie z. B. mit einem Kamerasystem zur Messung der Lastschwingung und des Schrägzugs oder induktiven Sensoren zur Messung der relativen Lage des Krans zur Schiene.



Bild 5: Industrie-PC mit Infrarot-Kameramesssystem zur Schwingungsmessung

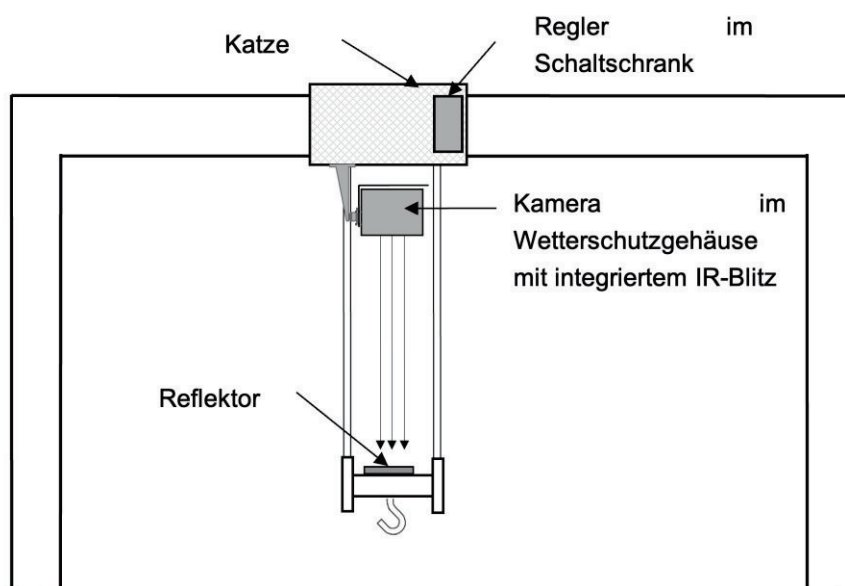


Bild 6: Der Industrie-PC wird im Schaltschrank eingebaut und die Kamera unterhalb der Katze montiert.

3.2 Datenerfassung

Um sämtliche weitere relevanten Daten zu erfassen, wird der Industrie-PC über eine Schnittstelle wie beispielsweise PROFIBUS, PROFINET oder EtherNet/IP an die SPS angeschlossen. Kontinuierlich werden Messwerte in einem Intervall von circa 70 Millisekunden ausgelesen und in einem Zeitreihendatenbanksystem gespeichert.

Vom Kran werden bereits vorhandene Daten vom System erfasst, wie beispielsweise Positionsgeber für die Fahrtriebe (Katz-, Kranfahrt, Hubwerk, Drehwerk), Lastmessung oder Hubwerksbremssignale (Bild 7). Damit wird das Ziel verfolgt, einen digitalen Zwilling, also ein digitales Modell von der Krananlage aus dem realen in den virtuellen Raum zu übertragen, um ein näherungsweise Abbild der Realität zu generieren.

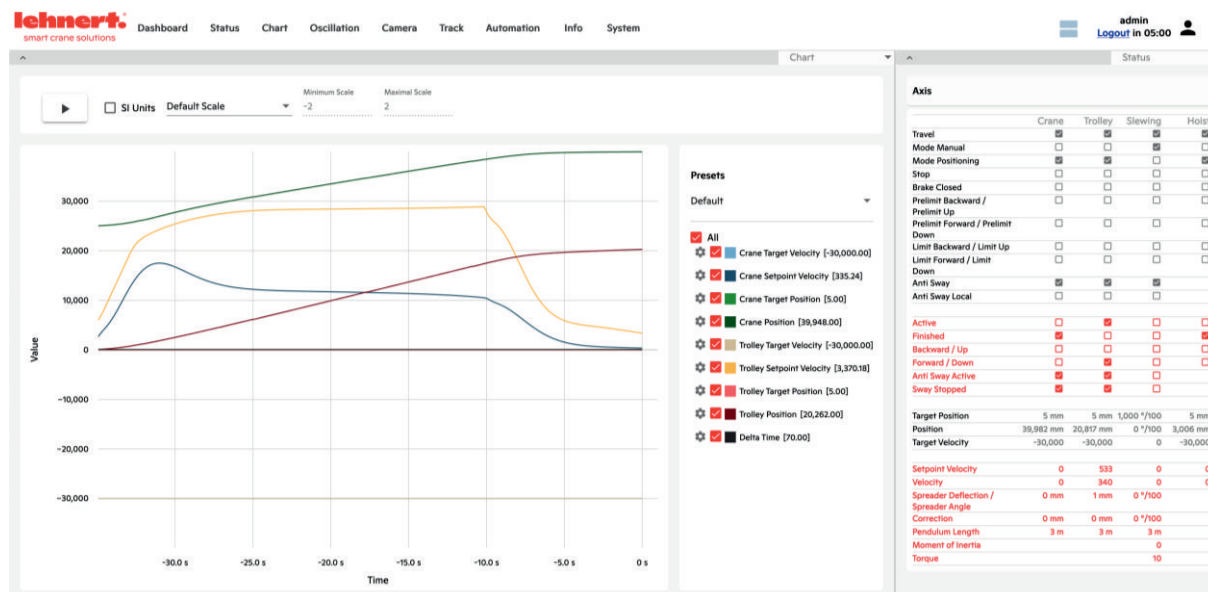


Bild 7: Datenerfassung im 30-Sekunden-Diagramm

3.3 Mensch-Maschine-Schnittstellen

Ein benutzerfreundliches Interface ist für die reibungslose Integration in die Betriebsabläufe essenziell. Dazu gehört eine direkte Anbindung an die SPS, um den Schlossern eine einfache Interaktion mit dem System zu ermöglichen. Ergänzend steht Kranbetreibern ein Web-Interface mit umfangreicher Bedienung zur Verfügung.

3.3.1 Kommunikation mit der SPS

Die Kraninstandhaltung kann Wartungsobjekte definieren, die überwacht werden sollen. Jedem Wartungsobjekt wird dann entsprechend ein Algorithmus zugeordnet, der bei Überschreiten eines einstellbaren Schwellenwerts eine Warnung an die SPS herausgibt.

Schlosser können über die Visualisierung der SPS beim Austausch von Verschleißteilen die entsprechenden Wartungsobjekte zurücksetzen.

Dadurch entsteht fortlaufend eine umfassende Dokumentation zu gewechselten Verschleißteilen und zu wichtigen Kenngrößen – etwa der Biegewechselzahl, der Laufleistung von Rädern und Getrieben oder der Bremszyklen. Ebenso werden produktionsrelevante Informationen wie Umschlag, Auslastung und Standzeiten aufgezeichnet.

3.3.2 Web-Interface

Eine komplexe Softwarearchitektur aus Front- und Backend gewährleistet neben der Kommunikation mit der SPS eine einfache Bedienung für den Kranbetreiber mittels eines Web-Interface (Bild 8). In dem umfangreichen Interface kann das Management sämtliche Daten einsehen, Wartungsobjekte anlegen oder zurücksetzen sowie die Grenzen für die Systemwarnungen parametrisieren.

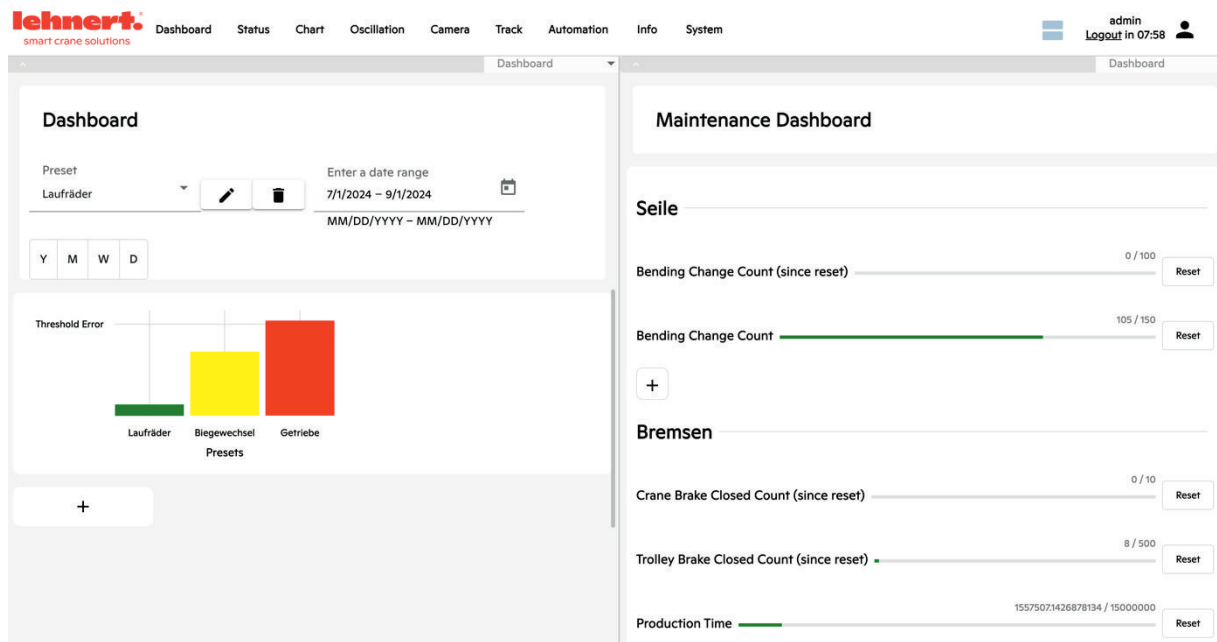


Bild 8: Dashboard mit einem Ampelsystem für eine übersichtliche Darstellung der Wartungsobjekte

Zusätzlich können aus den Daten weitere Diagramme angezeigt werden, wie zum Beispiel die Katz- und Kranposition und damit die Lastverteilung im Arbeitsbereich (Bild 9). Bild 9 zeigt an den Seiten des Diagramms die Belastungsverteilung der Laufräder bezogen auf die Kranseiten an sowie eine punktuelle Belastung im 2D-Raum.

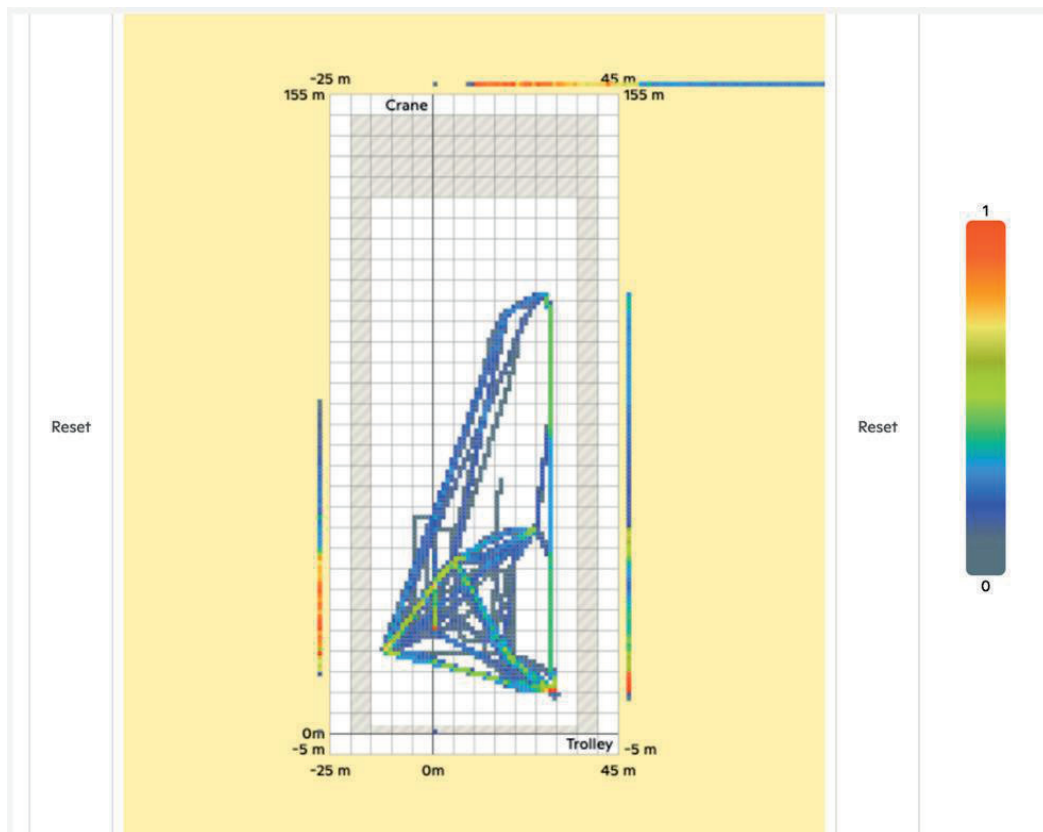


Bild 9: Häufungsdiagramm zur Anzeige der Fahrten

Über eine interne Vernetzung ist es weiterhin möglich, von einem PC aus auf die Daten jedes Krans zuzugreifen.

4 Vorteile

Der entscheidende Vorteil des Systems besteht in der automatisierten, kontinuierlichen Überwachung sämtlicher Kranparameter. Wo früher in regelmäßigen Abständen manuelle Inspektionen erfolgten, die nur den Ist-Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt abbildeten, ermöglicht das digitale Monitoring eine lückenlose Zustandsverfolgung. Diese detaillierte Datengrundlage dient nicht nur der vorausschauenden Instandhaltung, sondern liefert auch wertvolle Impulse für die Optimierung der gesamten Betriebsprozesse.

Dank eines Ampelsystems erhält das Wartungspersonal auf einen Blick Auskunft über den Kranzustand (siehe Bild 8). Unnötige Inspektionen entfallen und Wartungspläne lassen sich effizienter gestalten.

Wesentliche Vorteile in der Praxis:

- Zustandsüberwachung und Vorhersage: Wartungszyklen werden aus historischen und Echtzeitdaten berechnet.
- Reduzierte Ausfallzeiten: Durch frühzeitige Warnungen lassen sich Bauteile proaktiv tauschen, bevor ein Schaden entsteht.
- Effizientere Ressourcenplanung: Personal und Ersatzteile können passend zum vorhergesagten Wartungszeitpunkt bereitgestellt werden.
- Unnötige Wartungen entfallen.
- Lückenlose Dokumentation: Alle durchgeführten Wartungen und Bauteilwechsel werden in einem Logbuch gespeichert und lassen sich jederzeit nachverfolgen.

5 Zusammenfassung & Ausblick

Die Lehnert Regelungstechnik GmbH zeichnet sich als innovatives Unternehmen aus, das weltweit elektronische Steuerungen für Industriekrane, Containerbrücken und Drehkrane liefert und mit diesem neuen Produkt neben der Regelungstechnik nunmehr auch eine Lösung in der Überwachung von Krananlagen entwickeln, fertigen, liefern und in Betrieb nehmen kann.

Dieser Beitrag stellt eine Lösung für die Unterstützung der vorbereitenden Instandhaltung bei Industriekranen vor. Hierbei wurde auf die Voraussetzungen, die verwendete Systemarchitektur sowie das Benutzen durch das Instandhaltungspersonal eingegangen.

5.1 Prädiktives Monitoring und Machine Learning

Mithilfe von Machine-Learning-Verfahren können komplexe Analysen durchgeführt werden, bei denen Muster in den gesammelten Daten erkannt und Zusammenhänge zwischen Parametern und Verschleiß oder Fehlfunktionen identifiziert werden. Damit können Ausfälle nicht nur vorhergesagt, sondern potenzielle Störfälle auch frühzeitig verhindert werden.

5.2 Industrie 4.0 und Kran-Daten-Hub

Die Vernetzung der Kransysteme untereinander und mit übergeordneten Leitsystemen macht es möglich, einen zentralen Kran-Daten-Hub zu entwickeln (Bild 10). Dieses Konzept sieht vor, dass sämtliche Krandaten in einem firmeneigenen Server zusammenlaufen und für verschiedene Analysen zur Verfügung stehen. Neben der Instandhaltung lassen sich damit auch logistische Abläufe optimieren oder Vergleiche von Produktivitätskennzahlen zwischen unterschiedlichen Standorten ziehen.

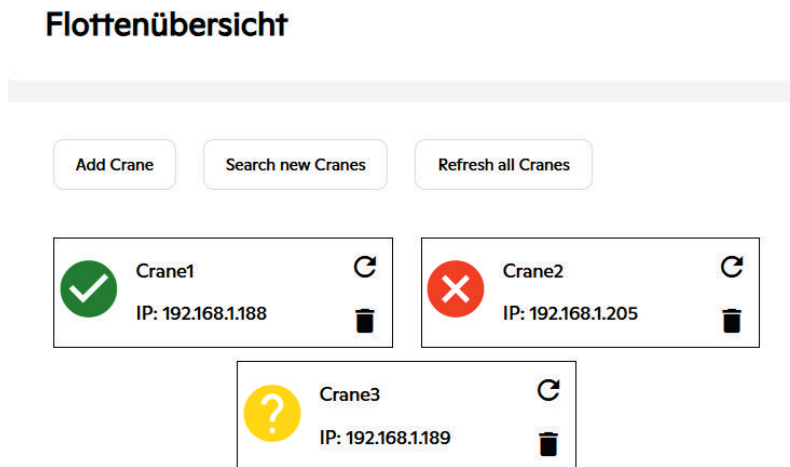


Bild 10: Flottenübersicht im Kran-Daten-Hub

Quellenverzeichnis:

- [1] Verreet, R.: Die Inspektion von Drahtseilen. Verfügbar als PDF-Dokument unter https://www.ropetechnology.com/downloads/brochures/bro_die-inspektion-von-drahtseilen.pdf (Datum des letzten Zugriffs: 10.01.2025)
- [2] Verreet, R.: Stahldrahtseile für Krane Probleme und Lösungen. Verfügbar als PDF-Dokument unter https://www.ropetechnology.com/downloads/brochures/bro_stahldrahtseile-fuer-krane-probleme-und-loesungen.pdf (Datum des letzten Zugriffs: 10.01.2025)
- [3] Verreet, R.: Die Auslegung des Seiltriebes nach DIN 15020. Verfügbar als PDF-Dokument unter https://www.ropetechnology.com/downloads/brochures/bro_die-auslegung-des-seiltriebes-nach-din-15020.pdf (Datum des letzten Zugriffs: 10.01.2025)
- [5] Steinbach, G., Anders, M., Ryk, D.: Berechnung der Biegewechselzahl – Methode „Leipzig“. Verfügbar als PDF-Dokument unter https://www.technische-logistik.net/sites/default/files/public/data-fachartikel/HF0518_Berechnung-Biegewechselzahl-Leipzig_0.pdf (Datum des letzten Zugriffs: 10.01.2025)
- [6] <https://www.abtasty.com/de/blog/wissenspyramide-daten-informationen-wissen/> (Datum des letzten Zugriffs: 10.01.2025)

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Effiziente Instandhaltung durch automatisierte Zustandsüberwachung von Krangetrieben

René Maisenhelder

Christian Rüttling



Dipl.-Ing (DH) René Maisenhelder
SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
Ernst-Blickle-Str. 42
76646 Bruchsal

Effiziente Instandhaltung durch automatisierte Zustandsüberwachung von Krangetrieben

Der Albtraum für jeden Kranbetreiber – ein ungeplanter Anlagenstillstand. Damit es erst gar nicht so weit kommt, können kritische Anlagenteile vorausschauend gewartet werden. Voraussetzung hierfür ist das Wissen um deren aktuellen Zustand. Im folgenden Beitrag wird erläutert, wie sich Hubwerksantriebe mit modernen Condition-Monitoring-Verfahren kontinuierlich überwachen lassen und wie damit die Grundlage für eine proaktive Wartung geschaffen wird – ein Schlüssel zu höherer Verfügbarkeit.

1 Wenn Stillstand nicht in Frage kommt

Mit Predictive Maintenance – also der vorausschauenden Instandhaltung/Wartung – ist ein Konzept aus dem Umfeld der Industrie 4.0 in der Praxis angekommen. Per Definition beschreibt Predictive Maintenance eine Instandhaltungsstrategie, die sich auf die Auswertung von Maschinen- und Prozessdaten stützt. Grundlage hierfür ist die Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) der Gesamtanlage oder der kritischen Anlagenteile. Hierbei werden Parameter wie Schwingungen, Drehzahlen, Temperatur usw. kontinuierlich aufgenommen, analysiert und bewertet. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen können Eintrittswahrscheinlichkeiten für schädigungsrelevante Ereignisse ermittelt werden. Die darauf basierende Ableitung von zustandsorientierten Wartungsmaßnahmen wird dann als Predictive Maintenance bezeichnet.

Abzugrenzen ist Predictive Maintenance von traditionellen Konzepten wie der reaktiven oder der periodischen Instandhaltung. Bei der reaktiven Instandhaltung wird erst reagiert, wenn bereits ein Schadensereignis eingetreten ist. Dieser Ansatz ist sehr einfach umzusetzen, erfordert wenig Planung und einen geringen Personaleinsatz. Durch ungeplante Maschinenstillstände und die damit verbundenen Unterbrechungen wichtiger Betriebsprozesse können jedoch hohe Folgekosten entstehen. Einen Schritt weiter geht die periodische Instandhaltung.

Sie setzt auf eine vorbeugende Wartung anhand eines Wartungskalenders. Die Wartungsintervalle orientieren sich entweder an Herstellervorgaben oder den Erfahrungswerten der Instandhalter. Die Wahrscheinlichkeit eines ungeplanten Maschinenstillstandes kann so reduziert werden. Weiter steigern lässt sich die produktive Nutzungszeit einer Maschine durch Predictive Maintenance. Sich anbahnende Schäden können frühzeitig erkannt und bedarfsgerecht behoben werden. Ein zustandsorientiertes Instandhaltungskonzept trägt zudem dazu bei, Wartungszeiten sowie den hierfür notwendigen Personaleinsatz zu optimieren. Eine Wartung wird nur noch dann durchgeführt, wenn sie tatsächlich notwendig ist - vor allem bei schwer zugänglichen Krangetrieben ein echter Zeitgewinn. Weitere Vorteile, die sich aus Predictive Maintenance ergeben, sind z. B. das Erkennen von Trends und die dadurch mögliche Identifikation von Fehlerursachen sowie die optimale Ausnutzung der Restlebensdauer von Maschinenkomponenten.

2 Zustandsüberwachung und Wartungsprognosen für Hubwerksgetriebe

Voraussetzung für die Umsetzung eines zustandsorientierten Instandhaltungskonzepts ist die Nutzung effizienter Condition-Monitoring-Systeme. SEW-Eurodrive hat mit der DriveRadar® IoT Suite ein System entwickelt, mit dem Industriegetriebe zuverlässig und kontinuierlich überwacht werden (Bild 1). Die am Getriebe verbauten Sensoren erfassen alle betriebsrelevanten physikalischen Größen. Im Einzelnen sind dies: Das Schwingungsverhalten der Wälzlager und Verzahnenteile, Ölfüllstand, Getriebeöltemperatur, Umgebungstemperatur, Eingangsdrehzahl sowie die GPS-Lokalisierung. Das Sensorpaket und die Edge Processing Unit (EPU) werden als vormontierte Plug-and-Play-Lösung zusammen mit dem Getriebe ausgeliefert oder können als Nachrüstsatz an bestehende Getriebe angebaut werden (Bild 2). Die EPU sendet die gesammelten Messwerte in kurzen Intervallen verschlüsselt via Mobilfunk an ein hochverfügbares und nach ISO/IEC 27001 zertifiziertes Rechenzentrum. Dort werden die Daten automatisiert ausgewertet und interpretiert.

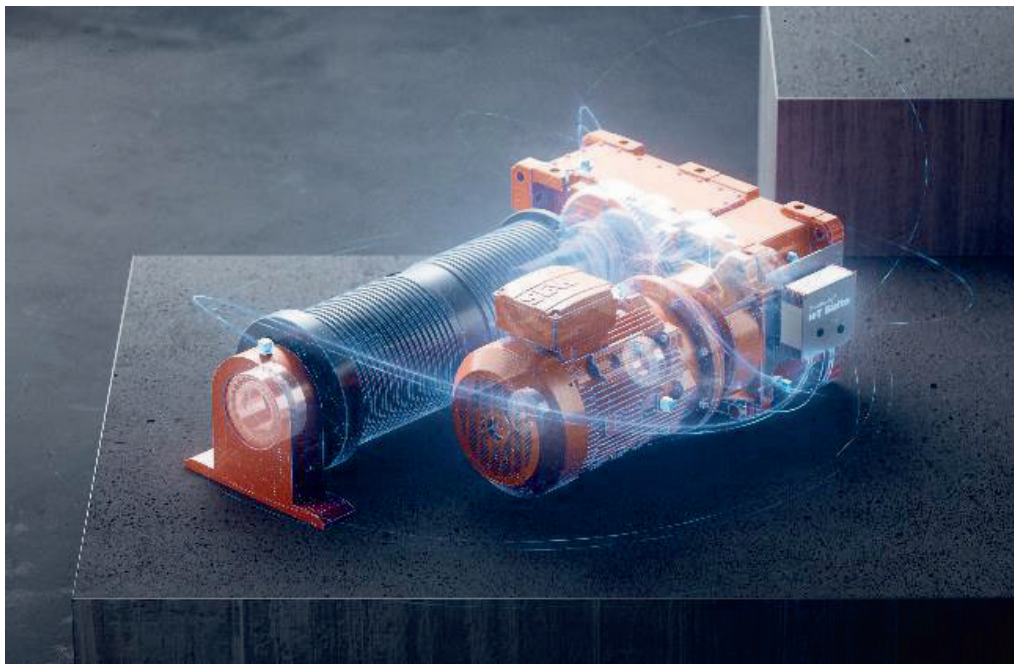


Bild 1: Hubwerksantrieb mit dem Condition-Monitoring-System DriveRadar®

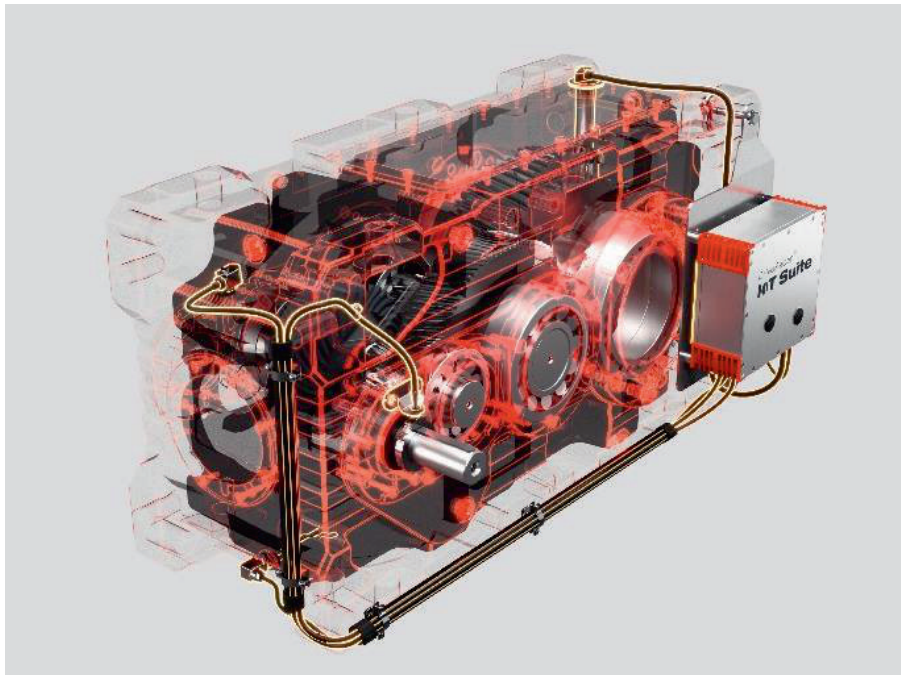


Bild 2: Getriebe der Baureihe X.e mit dem DriveRadar® Sensorpaket

Der Zugang zur Webanwendung – der DriveRadar® IoT-Suite – erfolgt über die Website von SEW-Eurodrive sowie über die DriveRadar-App. Hier werden in der Asset-Ansicht alle überwachten Getriebe sowie deren Status angezeigt. Ein Ampelsystem gibt schnell und intuitiv verständlich Auskunft darüber, ob sich ein kritischer Betriebszustand anbahnt oder bereits eingetreten ist. In der Detailansicht, der nächsten Detaillierungsebene, sind neben den Sensor-Messwerten auch Rechen- und Prognoseergebnisse aufgeführt. So kann etwa die Dauer bis zum Erreichen eines kritischen Ölfüllstandes oder bis zum nächsten notwendigen Ölwechsel prognostiziert werden. Weitere abgeleitete Größen sind die Öl-Viskosität und die Betriebsdauer.

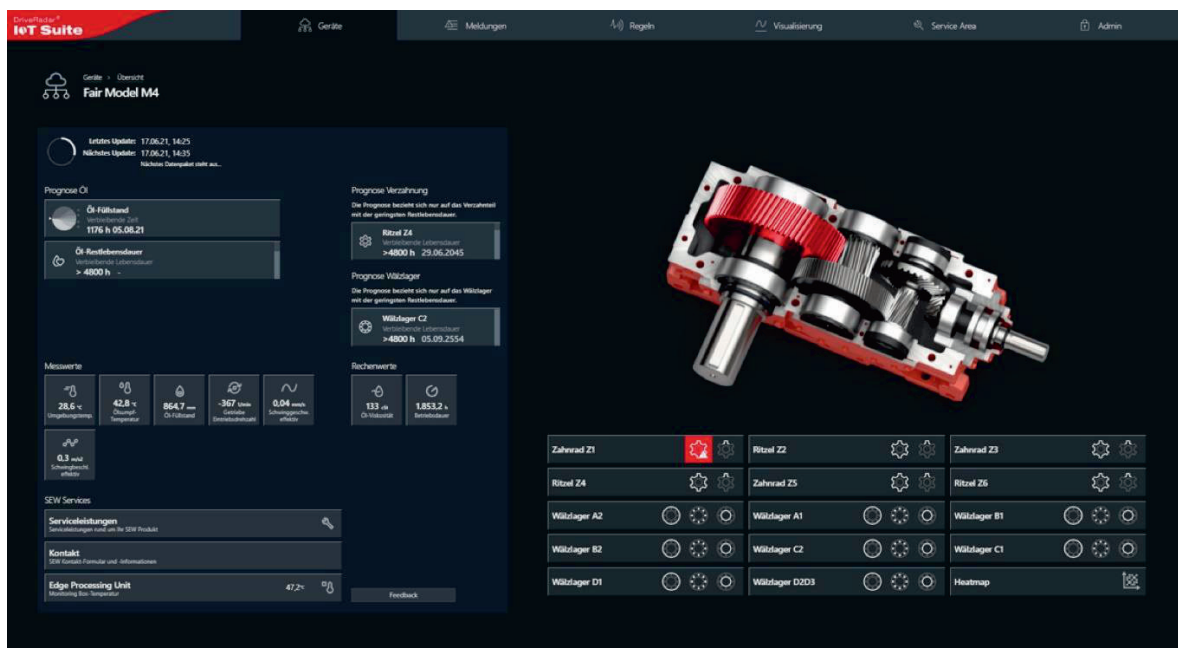


Bild 3: Messwertübersicht und Prognosen

IEPE-Schwingungssensoren geben Auskunft über den Zustand der Wälzlager (Bild 3). Auftretende Schäden werden mit Hilfe des präzisen Analyseverfahrens den einzelnen Komponenten des Lagers – Innenring, Außenring, Wälzkörper – zugeordnet. Die Getriebeverzahnung wird ebenfalls mittels Schwingungsanalyse überwacht. Lokale oder umlaufende Verzahnungsschäden können so frühzeitig erkannt und angezeigt werden. Die Schwingungsanalyse ist sowohl bei konstanter als auch bei variabler Drehzahl durchführbar. Im Teach-In-Modus generiert das selbstlernende System die Vorwarn- und Fehlergrenzwerte. Bei Überschreitung eines Grenzwerts erhält der Anwender eine Nachricht mit entsprechender Handlungsempfehlung auf die DriveRadar-App oder per E-Mail. Während die Grenzwerte für Wälzlager und Verzahnung systemseitig errechnet werden, sind diese bei anderen Messwerten frei wählbar oder abhängig von der Projektierung des überwachten Getriebes (Bild 4).

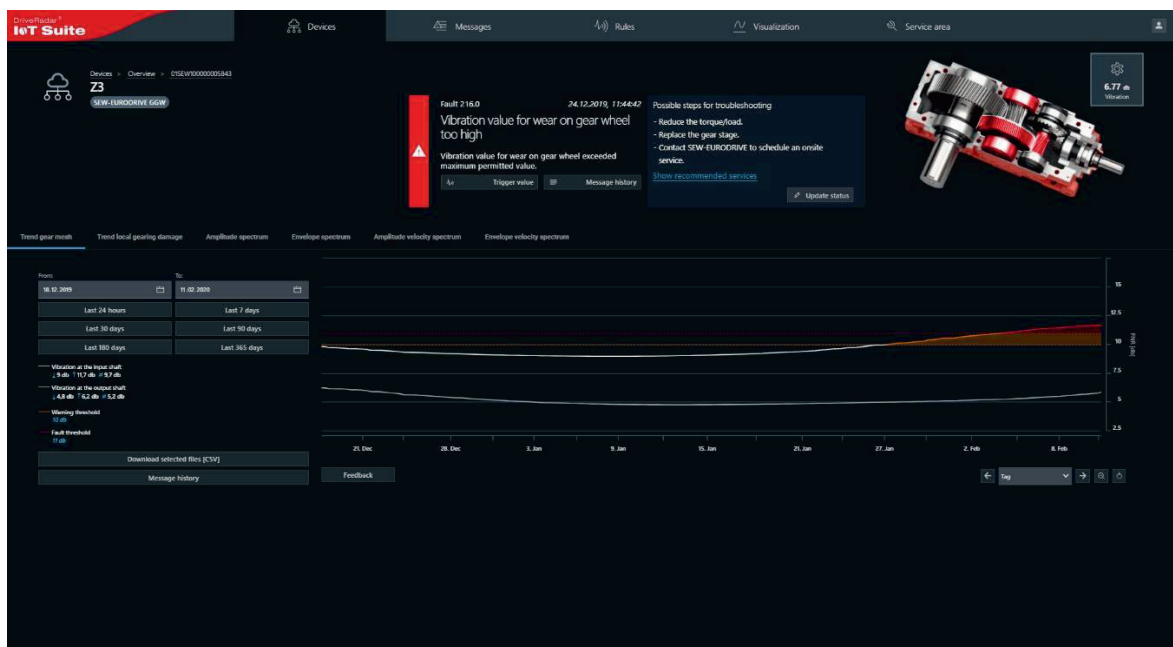


Bild 4: Trendverläufe zu verschiedenen Schadensmustern

3 Prognose der Restlebensdauer für Verzahnung und Wälzlager

Neben dem Erkennen akuter Schäden ermöglicht das System auch eine Prognose der Restlebensdauer für alle Verzahnungen und Wälzlager. Hierzu werden die tatsächlich auftretenden Betriebszeiten ins Verhältnis zu den ursprünglich zugrunde gelegten Projektierungsdaten gesetzt. Als Ergebnis erhält der Anwender die theoretische Restlebensdauer in Stunden. Die so errechneten Prognosewerte und die akute Schadensanalyse ergänzen sich optimal. Während die Prognose anzeigt, ob die Wahrscheinlichkeit für eine Bauteilmüdung ansteigt, kann die Schadensdetektion anhand des Frequenzspektrums auch plötzlich auftretende Schädigungen erfassen, beispielsweise durch unerwartete Ereignisse wie einen Fremdkörperintritt oder das Abreißen des Schmierfilms.

Zusammenfassung

Sensoren, Edge Processing Unit und eine webbasierte Analyseumgebung bilden zusammen ein intelligentes Condition-Monitoring-System, das es Kranbetreibern ermöglicht, die Lebensdauer der schwer zugänglichen Hubwerksgetriebe optimal auszunutzen. Präzise Analyseverfahren, die im Hintergrund Sensordaten verarbeiten und interpretieren, schaffen Transparenz über den Zustand kritischer Getriebebauteile. Wartungsarbeiten können dadurch bedarfsorientiert geplant und durchgeführt werden. Sich anbahnende Schäden oder Sollwertunterschreitungen werden mit Hilfe einer Ampelfunktion angekündigt und per App an den Anwender kommuniziert. Systemseitige Handlungsempfehlungen unterstützen zudem bei der Fehlerbehebung und zeigen passende Servicemaßnahmen auf. Expertenwissen, z. B. im Bereich der Schwingungsanalyse, ist beim Anwender somit keine Voraussetzung zur Umsetzung einer vorbeugenden Instandhaltung. Kranbetreiber profitieren so von einem prädiktiven Instandhaltungsmanagementsystem, das dazu beiträgt, dass der Warenumschlag weiterhin störungsfrei abläuft.

33. Internationale Kranfachtagung 2025

Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung

Lebensdaueranalyse und messtechnische Überwachung von Kranbahnträgern und Kranen

Arne Goedeke
Stephan Voigt
Christopher Kral
Richard Täger
Quentin Huss



Dr.-Ing. Arne Goedeke
Hochschule Anhalt
Bernburger Straße 55
06366 Köthen

Lebensdaueranalyse und messtechnische Überwachung von Kranbahnträgern und Kranen

Dieser Artikel präsentiert ein Verfahren zur Lebensdauervorhersage von Prozesskränen und Kranbahnen. Durch ein nachrüstbares Messsystem werden in Kombination mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) realitätsnahe Beanspruchungen ermittelt, welche in Schädigungen umgerechnet werden. Das ermöglicht eine gezielte Instandhaltungsplanung, verlängert die Nutzungsdauer und reduziert sowohl Kosten als auch Produktionsausfälle.

1 Einführung und Motivation

Europäische Stahlwerke stehen aufgrund schwankender Stahlnachfrage, internationaler Konkurrenz und der steigenden Anforderungen an nachhaltige Produktion unter immensem Kostendruck, sodass kostenintensive Ersatzanschaffungen häufig aufgeschoben werden.

Zentrale Prozesskrane, wie der Chargierkran, sind für die Wertschöpfungskette essenziell, da sie für den Transport von Roheisen und Rohstahl verantwortlich sind. Ein Ausfall dieser Krane führt zum Stillstand der Stahlproduktion. Die Neuanschaffung der Krane und der Kranbahnträger, auf welchen sie fahren, ist kostenintensiv, weshalb Betreiber die Nutzungsdauer häufig maximieren wollen, ohne die Sicherheit zu gefährden. Dies führt zu einem Zielkonflikt zwischen ökonomischen und sicherheitstechnischen Aspekten.

Zur Verbesserung der Planbarkeit des Kran- und Trägertausches stellt dieser Beitrag ein Verfahren zur Berechnung der Lebensdauer von Kranen und Kranbahnen vor. Die Lebensdaueraussage basiert zum einen auf Messwerten zur Erfassung der Belastungen und zum anderen auf der Nutzung der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Berechnung der Beanspruchungen, wodurch die Aussagekraft der Vorhersagen gegenüber herkömmlichen, auf Annahmen basierenden Berechnungen deutlich erhöht werden kann. Das Messverfahren ist so konzipiert, dass es an beliebigen Krananlagen nachgerüstet werden kann, sodass bereits vorhandene Messmittel nicht erforderlich sind.

2 Grundlagen der Lebensdauervorhersage

Die Lebensdauervorhersage von Bauteilen und Tragstrukturen basiert auf der Ermüdungsfestigkeitsberechnung, auf welche in diesem Abschnitt kurz eingegangen wird. Bild 1 zeigt einen stark vereinfachten und abgewandelten Ablauf der Schweißnahtberechnung nach dem Strukturspannungskonzept bei Nutzung der FKM-Richtlinie [1]. Es wurde eine einachsige Beanspruchung sowie eine Wechselfestigkeit nach FAT 100 unterstellt. Außerdem wurden hohe Eigenspannungen angesetzt, sodass der Einfluss von Mittelspannungen vernachlässigt wird und die Wechselfestigkeit $\sigma_{W,\perp}$ direkt der Dauerfestigkeit σ_D – also der Beanspruchungsgrenze, bei der eine ewige Lebensdauer des betrachteten Strukturpunktes unterstellt wird – entspricht. Ebenfalls wurden Sicherheitsbeiwerte vernachlässigt, sodass die Schädigung D direkt aus der Teilschädigung D_i entsprechend der Wöhlerlinie berechnet werden kann. Die Wöhlerlinie beschreibt die Anzahl der möglichen Lastwechsel N_i , bis ein Strukturpunkt unter einstufiger zyklischer Beanspruchung σ_a versagt. Die Grenzspielzahl der Dauerfestigkeit N_D sowie die Steifung der Wöhlerlinie k wurden hierbei ebenfalls der Richtlinie entnommen. Mit diesen Vereinfachungen entspricht der Berechnungsgang nahezu exakt dem Eurocode [2],

welcher im Stahlbau üblicher ist.

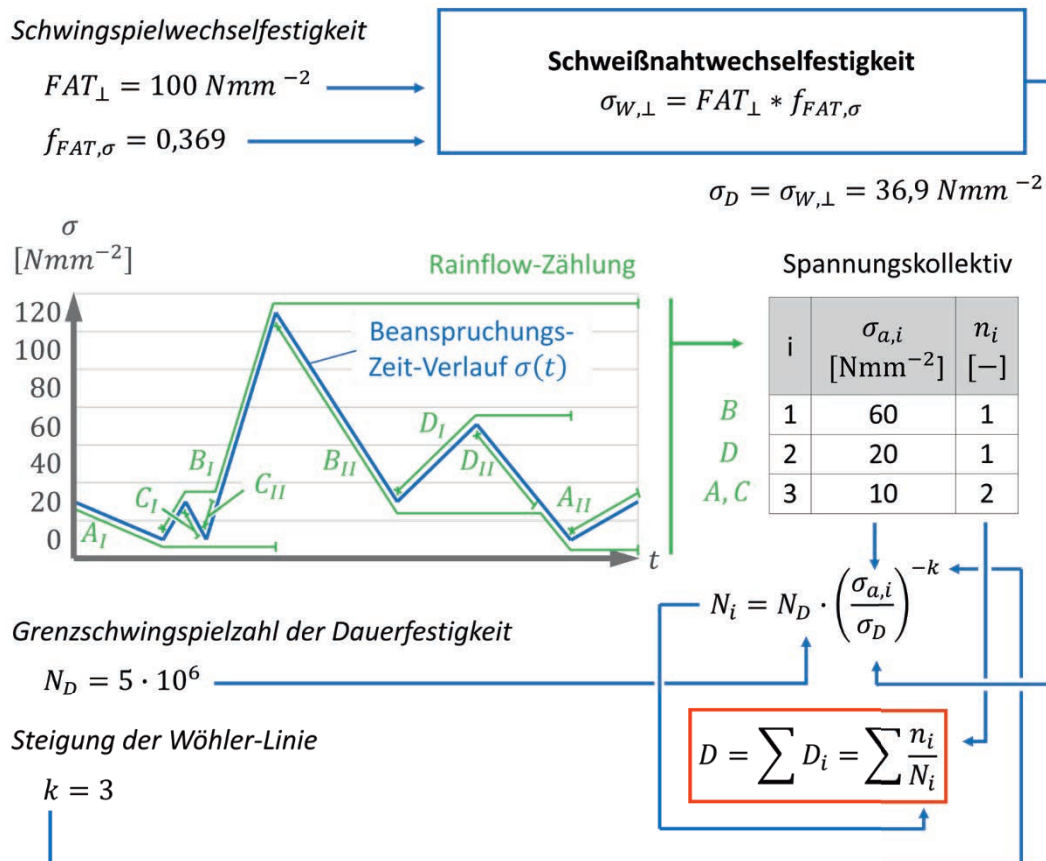


Bild 1: Vereinfachter Überblick über die Betriebsfestigkeitsberechnung von Schweißnähten

Die Eingabe auf der Beanspruchungsseite ist die Tabelle der Spannungskollektive mit den Spannungsamplituden $\sigma_{a,i}$ und der Anzahl n_i der auftretenden Schwingspiele. Diese lassen sich beispielsweise mithilfe einer Rainflow-Zählung (RFZ) aus dem Beanspruchungs-Zeit-Verlauf (BZV) $\sigma(t)$ eines Strukturpunktes auslesen. Jede Be- und Entlastung eines Strukturpunktes trägt potenziell zur Schädigung der Struktur bei, weshalb eine möglichst realitätsnahe Abbildung dieses Verlaufes essenziell für die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage ist. Bild 1 zeigt einen kurzen, auf die Umkehrpunkte reduzierten Ausschnitt eines BZV $\sigma(t)$. Die Auszählung ergibt drei unterschiedliche Spannungsamplituden $\sigma_{a,i}$, wobei lediglich die erste oberhalb der Dauerfestigkeit σ_D liegt und damit schädigungsrelevant ist. Reale gemessene BZV sind deutlich länger und können häufig nur mithilfe von programmierten Algorithmen ausgewertet werden.

3 Installiertes Messsystem zur Ermittlung der Belastungsgrößen

3.1 Brückenkran

Zur Erfassung aller Belastungsgrößen werden Dehnungsmessstreifen (DMS) für die Materialbeanspruchung und Laser zur Entfernungsmessung eingesetzt. Bild 2 zeigt repräsentativ einen Laser zur Erfassung der Position der Katze auf einem Brückenkran sowie einen DMS zur Aufnahme der Beanspruchung an einem Strukturpunkt. Dieser wird zur Erfassung der Hublast eingesetzt, vgl. Abschnitt 4.1.

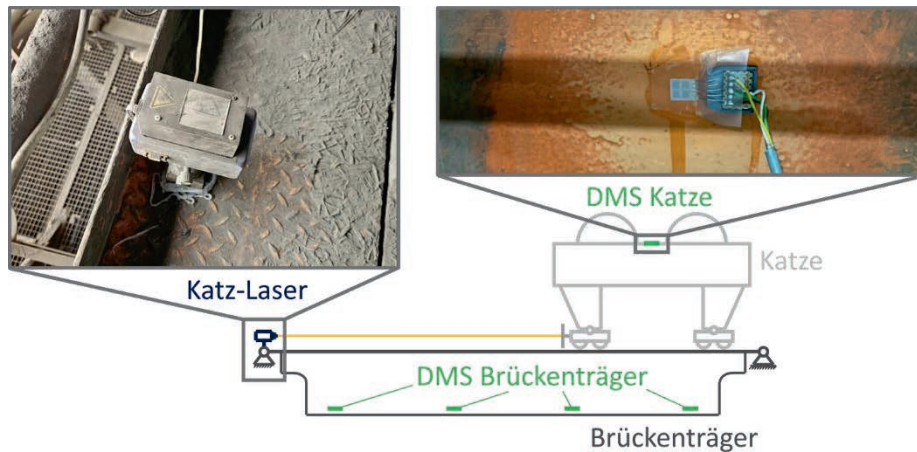


Bild 2: Am Brückenkran eingesetzte Sensoren (Seitenansicht Brückenträger)

3.2 Kranbahn

Bild 3 zeigt die auf der Kranbahn installierten Sensoren. Zur Erfassung der Kranposition wird ebenfalls ein Laser an der Stirnseite des Hallenschiffs aufgestellt. Auf den Kranbahnträgern werden DMS zur Erfassung der Beanspruchung appliziert. Wie am Brückenträger, vgl. Bild 2, dienen diese vornehmlich zur Plausibilitätsprüfung und redundanten Messung, vgl. Abschnitt 4.3.

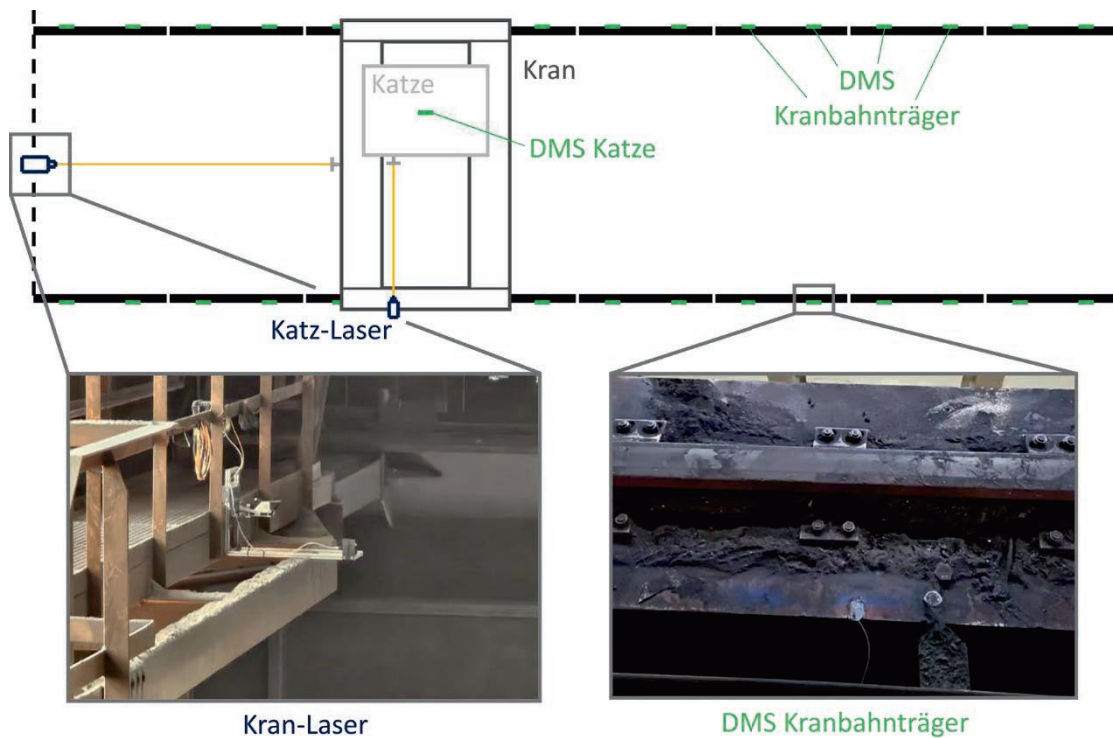


Bild 3: Auf der Kranbahn eingesetzte Sensoren (Draufsicht Hallenschiff)

4 Berechnung der Beanspruchungsverläufe

4.1 Katze

Eine der wichtigsten Belastungsgrößen aller folgenden Strukturen ist die Hublast F_{Hub} . Sie entspricht i. d. R. dem Eigengewicht der zu hebenden Last. Bild 4 zeigt die Schnittansicht einer in der Ebene (seitlich) betrachteten Laufkatze eines Brückenkrans. Die Hublast F_{Hub} wird über die Seile (hier vereinfacht über nur zwei Seile dargestellt) in die Katze eingeleitet. Der bereits in Bild 2 dargestellte DMS sollte so appliziert werden, dass er sich proportional zur Hublast verhält und möglichst nicht von Führungskräften des Katzfahrwerks beeinflusst wird. Derartige Positionen können in zuvor durchgeführten FEM-Analysen bestimmt werden. Nach der Inbetriebnahme ist der DMS wie folgt zu kalibrieren:

$$\kappa = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{F_{Hub,i}}{\varepsilon_i} \quad (1)$$

Hierbei ist n die Anzahl der mit bekannten Lasten $F_{Hub,i}$ durchgeführten Kalibrierhübe, ε_i die dabei jeweils gemessene Dehnung und κ der zu bestimmende Kalibrierungsfaktor. Dieser kann genutzt werden, um die Hublast F_{Hub} während des Betriebs zu messen, vgl. Umrechnung vom oberen zum mittleren Verlauf in Bild 4.

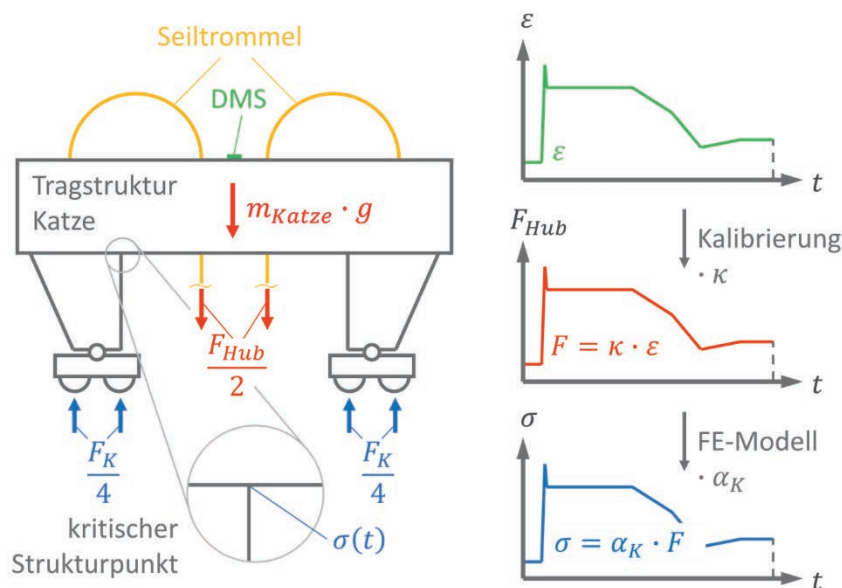


Bild 4: Vorgehen zur Ermittlung des Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs an der Katze

Zusätzlich zur Hublast F_{Hub} wirkt ebenfalls das Eigengewicht der Katze. Soll wie in Bild 1 mittelspannungsfrei gerechnet werden, hat diese konstante Belastung jedoch keinen Einfluss auf die Schädigung, sodass die Beanspruchung eines kritischen Bereiches als proportional zur Hublast F_{Hub} zu betrachten ist. Die hierfür erforderliche Einflusszahl α_K kann mithilfe einer einzelnen FEM-Analyse mit einer Einheitslast ermittelt werden, sodass die für die Lebensdauerberechnung erforderlichen BZV $\sigma(t)$ auf der Katze mit lediglich einem DMS gemessen werden können. Im Sinne der Redundanz wird jedoch die Nutzung mehrerer DMS zu empfehlen.

Zur weiteren Berechnung der Kran- und Kranbahnstruktur ist die von der Katze auf die

Katzschiene übertragene Katzlast F_K zu berechnen:

$$F_K(t) = F_{Hub}(t) + m_{Katz} \cdot g \quad (2)$$

Im vorliegenden Beispiel wird die Last durch den Einsatz von Schwingen gleichmäßig über vier Laufrollen je Seite auf den Brückenträger übertragen. Die Kräfteskitze aus Bild 4 ist so zu deuten, dass die Katze auf beiden Trägerseiten (also an allen 8 Laufrollen) freigeschnitten wurde. Die aus der Seitenansicht hintereinanderliegenden Laurollen werden zusammengefasst, sodass sich insgesamt 4 Viertel ergeben.

4.2 Brückenkran

Die Berechnung des BZV am Brückenkran ist aufwendiger als an der Laufkatze. In den meisten Fällen wird die Katzlast F_K gleichmäßig auf beide Brückenträger aufgeteilt, weshalb in Bild 5 je Laufrolle 1/8 der Gesamtlast übertragen wird.

Die mithilfe des Lasers gemessene Entfernung, vgl. Bild 2, kann in eine Katzposition y_K umgerechnet werden, welche bis zur Katzmitte definiert ist. Diese ist als zweite Belastungsgröße des Brückenkrans anzusehen. Bild 5 zeigt einen seitlichen Trägerdurchbruch, dessen Korbbeanspruchung in Abhängigkeit von der Katzposition y_K im mittleren Diagramm dargestellt wird. Der Verlauf wird mit σ_{FEM} bezeichnet, da der mithilfe der FEM bei einer Einheitslast von $F_K = 1$ N erstellt wurde. Die vier Einzellasten wurden dabei schrittweise über den gesamten Träger verschoben.

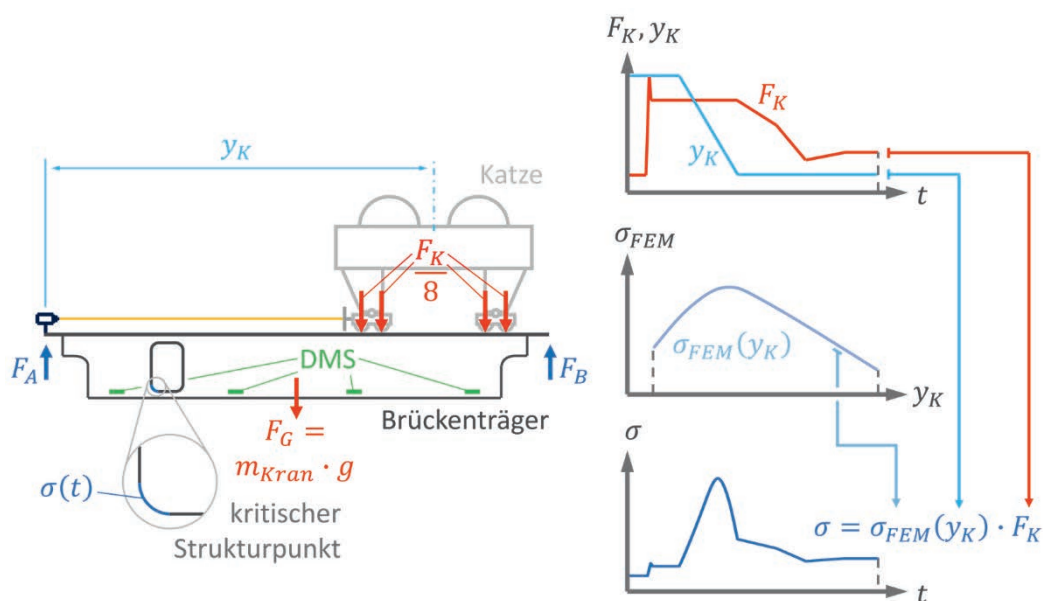


Bild 5: Vorgehen zur Ermittlung des Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs am Kran

Zur Berechnung des BZV $\sigma(t)$ des Strukturpunktes kann zu jedem Zeitpunkt t der aktuelle Wert der Beanspruchung in Abhängigkeit von der gemessenen Katzposition $\sigma(y_K(t))$ mit der momentanen Katzlast $F_K(t)$ multipliziert werden. Der resultierende Verlauf verdeutlicht die Relevanz der Katzposition y_K . Zum Zeitpunkt des Lastpeaks im Verlauf von $F_K(t)$ befindet sich die Katze auf der dem Stegdurchbruch gegenüberliegenden Seite. Daher sticht dieser Peak kaum im BZV $\sigma(t)$ hervor. Das Maximum des Verlaufes entsteht beim Überfahren des Trägers bei konstanter Katzlast F_K . Würde stets die maximal mögliche

Spannungsamplitude angesetzt werden, könnte das Ergebnis einer Lebensdauerberechnung unnötig konservativ ausfallen. Demgegenüber könnten jedoch auch Spannungswechsel unberücksichtigt bleiben, welche sich aus Fahrbewegungen der Katze ohne Laständerung ergeben.

Die DMS entlang des Brückenträgers dienen als redundantes Werkzeug zur Positionsmessung der Katze, falls der Laser ausfällt. Hierauf wurde in [3] genauer eingegangen. Außerdem dienen die DMS zur Einbeziehung von Schwingungen im Bereich der untersuchten Strukturstelle, welche von den DMS auf der Katze ggf. nicht erfasst werden können. Dies ist insbesondere bei eher weichen Kranen mit langer Spannweite und geringerer Hublast von Bedeutung.

4.3 Kranbahnträger

Zur Ermittlung des BZV $\sigma(t)$ von Kranbahnträgern muss zunächst die Belastung der Kranbahn über die Zeit ermittelt werden. Bild 6 zeigt hierzu analog zu Bild 3 ein Hallenschiff in der Draufsicht, jedoch mit insgesamt drei Kranen. Auch hier können die Positionen aller Krane mithilfe von Lasern gemessen werden, wobei der mittlere Kran von einem der anderen Krane aus gemessen werden muss. Wie auf dem Brückenkran, vgl. Bild 4, können die Messungen in Abstände $x_{K,i}$ von einem gemeinsamen Koordinatensystem aus umgerechnet werden. Die Abstände werden bis zur Katzmitte hin angetragen, welche in den meisten Fällen mit der Kranmitte übereinstimmt.

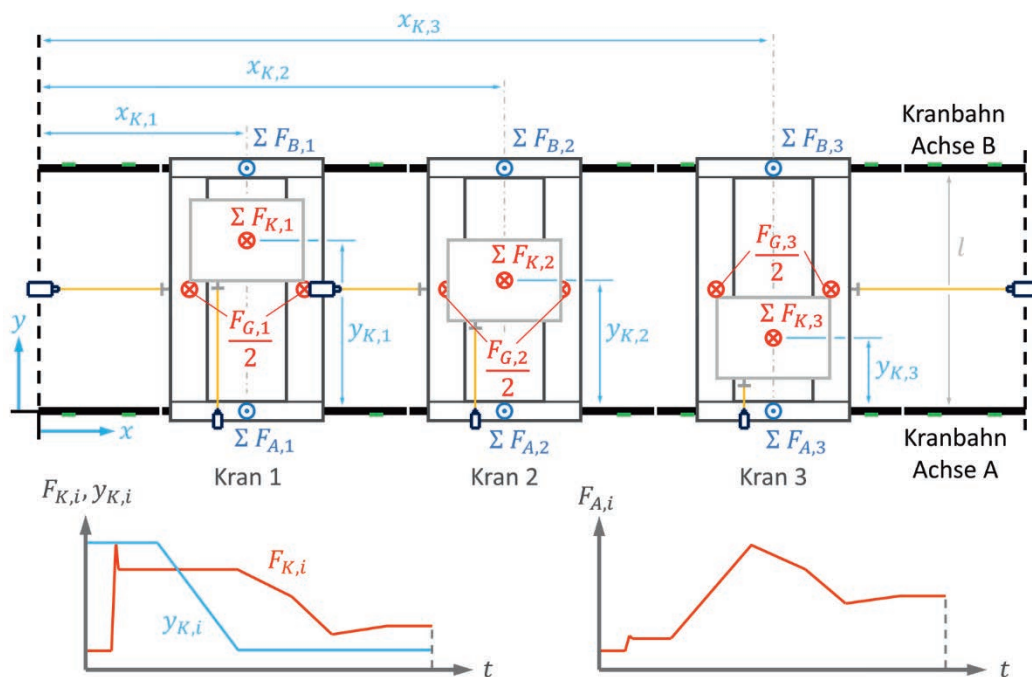


Bild 6: Ermittlung der Kranbahnbelastung

Die Katzlasten $F_{K,i}$ der Krane werden der Übersichtlichkeit halber nicht an den einzelnen Laufrädern dargestellt, sondern als resultierende Kraft in der Katzmitte zusammengefasst. Das Eigengewicht der Krane wird auf beide Brückenträger aufgeteilt. Die auf die Kranbahnachsen A und B weitergegebenen Schnittkräfte $F_{A,i}$ und $F_{B,i}$ werden ebenfalls zu jeweils einer resultierenden Einzellast zusammengefasst. Repräsentativ wird die Kraft $F_{A,i}$

durch ein Momentengleichgewicht um die Achse B berechnet:

$$F_{A,i} = F_{K,i} \cdot \frac{l - y_{K,i}}{l} + \frac{2 \cdot F_G}{2} = F_{K,i} \cdot \frac{l - y_{K,i}}{l} + \frac{m_{Kran} \cdot g}{2} \quad (3)$$

In den Diagrammen von Bild 6 wird dargestellt, welcher zeitliche Verlauf sich für $F_{A,i}$ in Abhängigkeit von den bereits in Bild 5 genutzten Verläufen für $F_{K,i}$ und $y_{K,i}$ ergibt. Hierbei ist zu sehen, dass die Last $F_{A,i}$ am stärksten steigt, während die Katze auf die Achse A zufährt. Der Peak von $F_{K,i}$ ist wie bei dem Spannungsverlauf in Bild 5 wenig relevant.

In Bild 7 wird ein Kran i in der Seitenansicht dargestellt. Die Last $F_{A,i}$ wird über insgesamt 12 Laufrollen auf die Kranbahn übertragen. Der gezeigte Kranbahnträger j ist in einer zweigeteilten Ausführung gefertigt, wobei er während des Aufbaus am Steg und Untergurt verschraubt sowie am Obergurt verschweißt wurde. Häufig verbleiben hierbei Schweißbadsicherungen, welche eine besonders kritische Kerkstelle darstellen.

Der Beginn und das Ende des Kranbahnträgers von dem globalen Koordinatensystem aus werden über die Positionen der Stützen $x_{S,j}$ und $x_{S,j+1}$ beschrieben.

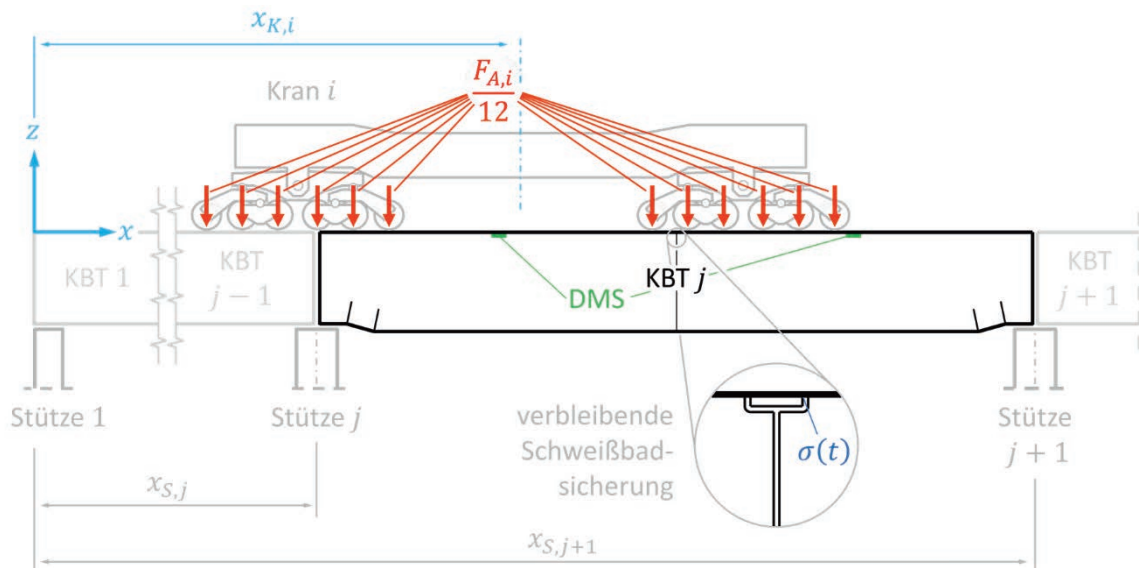


Bild 7: Beliebiger Kranbahnträger der Achse A in der Seitenansicht

Der Verlauf eines mithilfe der FEM erzeugten Verlaufs der Strukturspannung σ_{FEM} in Abhängigkeit von der Kranposition $x_{K,i}$ wird in Bild 8 oben rechts dargestellt. Es fällt auf, dass der Verlauf bereits vor dem Erreichen von $x_{S,j}$ ansteigt. Dies liegt daran, dass der Lastenzug (die Abfolge der Laufräder) des Krans so lang ist, dass die ersten Laufräder den Kranbahnträger bereits weit vor der Kranmitte erreichen, auf die sich $x_{K,i}$ bezieht.

Der Verlauf weist im mittleren Bereich ebenfalls viele „Zacken“ auf. Diese sind auf die Überfahrten der einzelnen Laufräder über die Strukturstelle zurückzuführen, welche mithilfe der FEM-Analyse abgebildet werden können.

Bild 8 zeigt ebenfalls den in Bild 6 ermittelten zeitlichen Verlauf der Last $F_{A,i}(t)$ sowie einen beliebigen Verlauf der Kranposition $x_{K,i}(t)$. Der Kran fährt zunächst auf den Träger auf, stoppt kurz, um eine Last zu heben, fährt dann noch weiter auf den Träger und verlässt ihn abschließend in dieselbe Richtung wieder.

Der BZV $x_{K,i}(t)$ für die Schweißbadsicherung wird auf die gleiche Weise wie der BZV der Kerbspannung des Brückenträgerdurchbruchs in Bild 5 bestimmt. Für jeden Zeitpunkt t muss der momentane Spannungswert $\sigma_{FEM}(x_{K,i}(t))$ mit der momentan wirkenden Last $F_{A,i}(t)$ multipliziert werden. Die Spannungswechsel der Überfahrt sind klar erkennbar. Hierdurch wird wiederholt der Vorteil der Erfassung aller Belastungsgrößen in Kombination mit der FEM-Berechnung deutlich. Durch die Rainflow-Zählung, vgl. Bild 2, geht jeder dieser Spannungswechsel in die Berechnung der Schädigung D mit ein.

Zur Berücksichtigung aller Krane einer Kranbahn können die BZV $\sigma_i(t)$ jedes Krans i unabhängig aufgestellt und anschließend addiert werden.

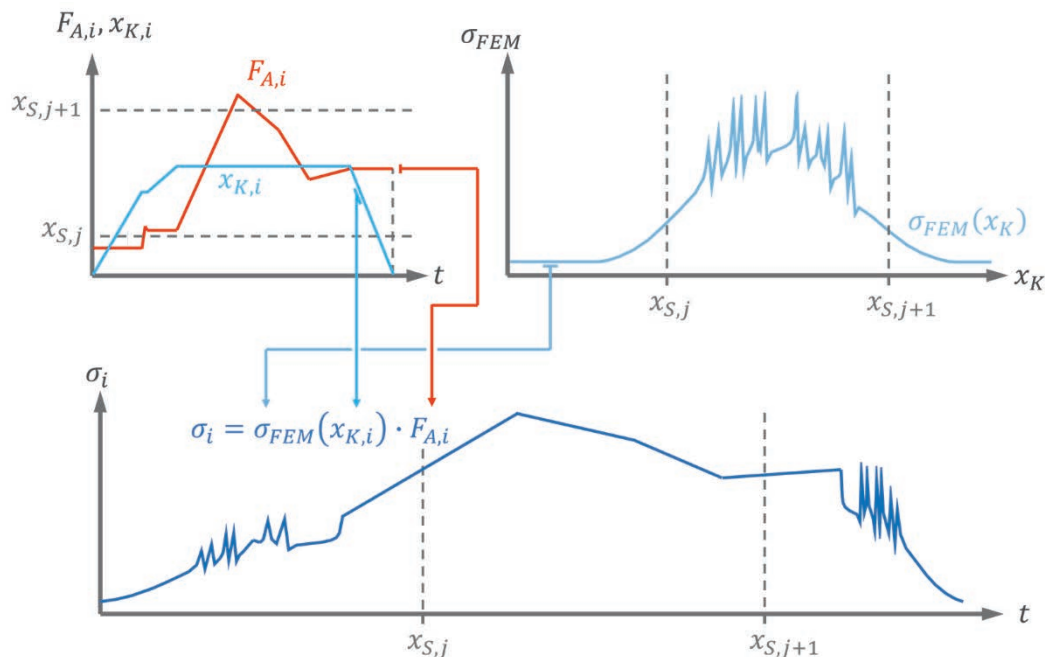


Bild 8: Ermittlung der Kranbahnbeanspruchung

Die in Bild 3 und Bild 7 dargestellten DMS dienen der Referenzmessung sowie dem Abgleich bzw. der Validierung des gesamten Systems. An ihren Positionen werden die BZV $\sigma(t)$ basierend auf den Belastungsgrößen berechnet und mit den Messwerten der DMS verglichen.

5 Berechnung der Lebensdauer und Auswertung

Eine Struktur gilt als rechnerisch geschädigt, sobald der Schädigungsparameter den Wert $D = 1$ überschreitet. Da die Sensoren i. d. R. nicht dauerhaft installiert werden, muss auf den Schadenseintrittszeitpunkt t_S extrapoliert werden, vgl. Bild 9. Zunächst werden ab dem Zeitpunkt des Messbeginns t_0 in äquidistanten Zeitabständen (meist tageweise) nach Bild 1 an allen betrachteten Strukturstellen von Katzen, Kranen und Kranbahnen Teilschädigungswerte D_i berechnet. Nach dem Abschluss der Messung – in Bild 9 werden 5 Tage gemessen, in der Praxis üblich sind 30 bis 60 Tage – wird eine Gerade durch die sich ergebenden Punkte approximiert, vgl. linkes Diagramm. Die ermittelte Steigung m_D beschreibt den Schädigungszuwachs pro Tag.

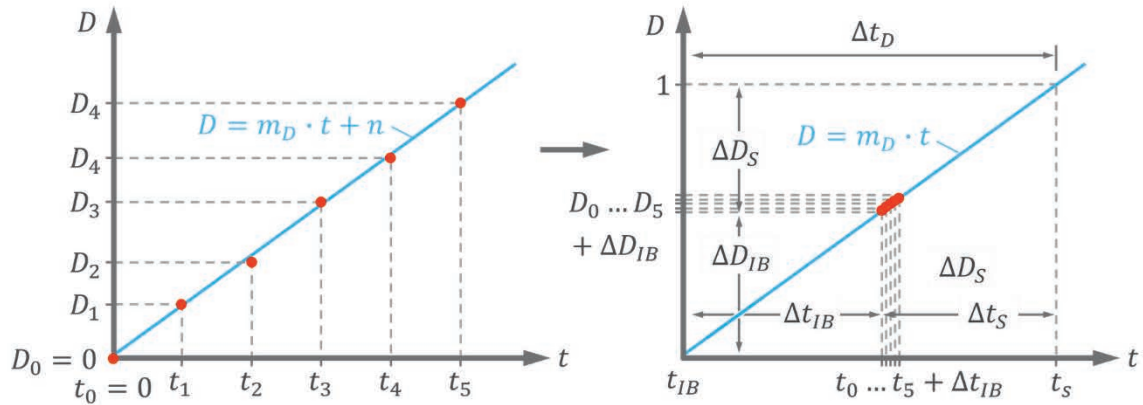


Bild 9: Berechnung der Lebensdauer

Anschließend kann die Zeit Δt_D , die der Strukturpunkt rechnerisch insgesamt hält, vgl. rechte Seite von Bild 9, berechnet werden:

$$\Delta t_D = \frac{1}{m_D} \quad (4)$$

Ist der Zeitpunkt der Inbetriebnahme t_{IB} bekannt, ist anschließend die Berechnung des rechnerischen Zeitpunkts des Schädigungseintritts t_S und die Angabe der Restlebensdauer Δt_S möglich. Darüber hinaus können bei Bedarf weitere in Bild 9 dargestellte Kenngrößen, wie die Schädigung seit der Inbetriebnahme ΔD_{IB} oder die verbleibende Schädigungsreserve ΔD_S ermittelt werden.

Bild 10 zeigt die aktuelle Methode zur qualitativen Visualisierung der Ergebnisse. Je Strukturbauteil (Katze, Brückenträger, Kopfträger und Kranbahnträger) wird jeweils die Restlebensdauer Δt_S des kritischsten Strukturpunktes als repräsentativ für den gesamten Bereich herangezogen. Anschließend werden die Bereiche entsprechend der dargestellten Skala eingefärbt.

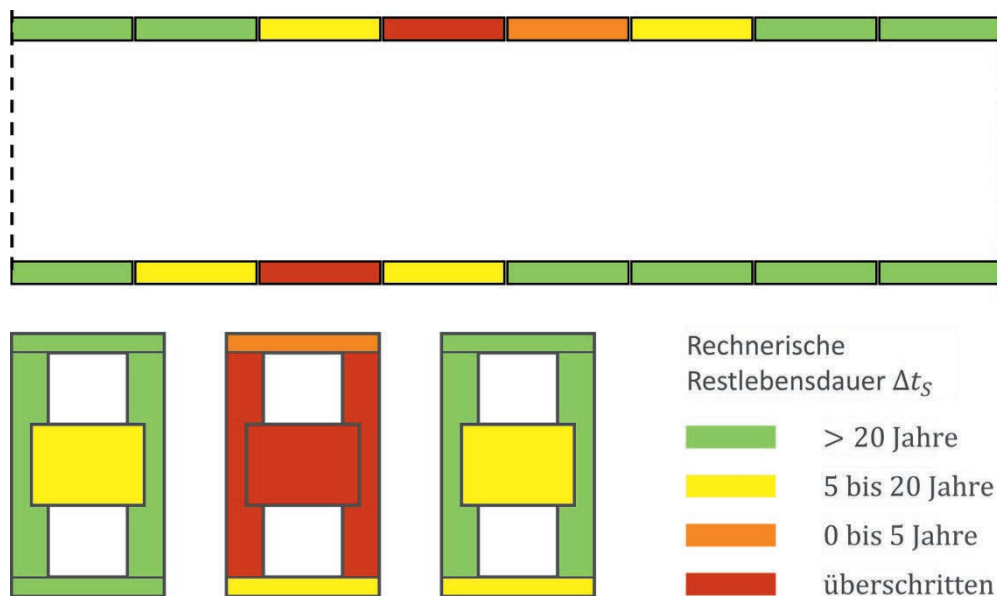


Bild 10: Visualisierung der Lebensdauerergebnisse

Auf diese Weise entsteht ein guter erster Überblick über den Handlungsbedarf. Bereiche mit einer rechnerisch überschrittenen Lebensdauer können dennoch schadensfrei sein, da in der Regel, selbst ohne Berücksichtigung zusätzlicher Sicherheitswerte, von einer hohen Überlebenswahrscheinlichkeit des Materials von über 90 % ausgegangen wird.

Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht eine realitätsnahe Lebensdauervorhersage für Prozesskrane und Kranbahnen, wodurch Unternehmen die Nutzungsdauer ihrer Anlagen durch prädiktive Instandhaltung maximieren können, ohne die Sicherheit zu gefährden. Ein nachrüstbares Messsystem, bestehend aus Dehnungsmessstreifen und Lasern, erfasst alle relevanten Belastungsgrößen von Katzen, Kranen und Kranbahnträgern. Diese Daten werden mit der FEM verrechnet, um die Beanspruchungen und darüber die Schädigung an kritischen Strukturpunkten realitätsnah zu berechnen, wodurch konservative Annahmen vermieden und die Genauigkeit der Vorhersagen erheblich gesteigert wird.

Das Verfahren wurde bereits mehrfach in der Praxis angewendet und kontinuierlich auf Basis auftretender Problemstellungen optimiert. Darüber hinaus wurde eine interne Software entwickelt, die eine schnelle Auswertung der aufgenommenen Daten ermöglicht. Zukünftig soll diese Software um eine Datenbank-Schnittstelle erweitert werden, die es erlaubt, mehrere Projekte innerhalb eines Unternehmens in einem benutzerfreundlichen Dashboard zusammenzufassen. Dieses Dashboard wird den Anwendern ermöglichen, alle relevanten Informationen zu Belastungen, Schädigungsfortschritt und Restlebensdauer zentral einzusehen und deren Veränderungen über die Zeit zu überwachen. Zudem sollen Änderungen im Materialdurchsatz und bei den zu hebenden Lasten eingegeben werden können, wodurch die Lebensdauervorhersagen direkt aktualisiert werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen, 6. Ausgabe, Frankfurt am Main: VDMA Verlag, 2012
- [2] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [3] Goedeke, A.: Entwicklung eines Werkzeugs für Brückenkranstrukturen. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2022

www.fmt.ovgu.de/kranfachtagung

Institut für Engineering von Produkten und Systemen
Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

39106 Magdeburg
Universitätsplatz 2
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 58604
www.ieps.ovgu.de

ISBN-13: 978-3-948749-51-4