



30. Internationale Kranfachtagung Magdeburg

KRAN 4.0: Erfolge der Digitalisierung

11. und 12. Juli 2022



Institut für
Logistik und Materialflusstechnik

30. Internationale Kranfachtagung 2022
Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

am 11. und 12. Juli 2022 in Magdeburg

Eine Veranstaltung von:



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM)



IBAF Engineering GmbH

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung
am 11. und 12. Juli 2022 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: 978-3-948749-11-8

DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/38810>

Alle Rechte vorbehalten.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Lizenz:



© 07/2022 Institut für Logistik und Materialflusstechnik
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>F. Matta</i>	
Neue Chargierkrane bei HKM – Anforderungen und Herausforderungen	5
<i>T. Foppe</i>	
Digitalisierung in der Kranindustrie. Von der Entwicklung bis zum Betrieb. Erfahrungen aus dem Feld	17
<i>U. Pietryga</i>	
Betrieb automatisierter Containerkrane und Maschinen	25
<i>T. Englert</i>	
Lastpendeldämpfung für Turmdrehkrane – Ein erster Schritt zur Kranautomation	39
<i>C. Bang</i>	
Krane als Großraumroboter – Integration von smarten Kranen in Produktions- umgebungen mit Personenverkehr	51
<i>F. Piso, R. Kamps</i>	
Bionisch inspirierte Leichtbaukonzepte für Krane und Schiffsentlader	61
<i>S. Krause, P. Kaufmann, M. Klinger, O. E. Mørkrid, J. Suominen, P.-L. Vuorela</i>	
AEGIS – Innovative autonome land- und schiffsgebundene Cargo Handling Systeme	75
<i>M. Stök, A. Lohrengel, T. Recknagel, T. Schmidt</i>	
Lebensdauer laufender Drahtseile mit Kunststoffummantelung und deren Eignung für die Mehrlagenwicklung	93
<i>F. Schatz</i>	
Sicherheitsfunktionen von Funkfernbedienungen Safety functions of Radio Remote Controls	107
<i>G. Persico, A. Fischer, F. Golasowski, F. Hölzke, H. Raddatz, M. Riedl, T. Bangemann, D. L. Tran, K. Meisberger, H. Borstell, K. Hanisch, H. Cermann, M. Tekkalmaz, J. Lategahn</i>	
Innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane zur Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung in Smart Factories	121

L. Mohr

LaseASTO (Area Surveillance and Truck Operation) – Zugangskontrolle und
Bereichsüberwachung von automatischen Stapelkränen 147

T. Hörl-Weinhold

Neue Applikationsmöglichkeiten in der Automatisierung in schwierigem Umfeld
durch 120 GHz Radar und bildgebendem Radar im 77 GHz Bereich 153

D. Pannier, L. Hübner, S. Krause

Produkt- und Verfahrensentwicklung einer innovativen hochgedämmten
Kransteuerzentrale 165

M. Müller

LAKOS-Tech. DMS-Kraftsensoren als Lastkollektivspeicher.
In Kombination von funktionaler Sicherheit gemäß SIL3|PLe und IO-Link-Kommunikation.
Die Retrofit-Lösung für Krananlagen 183

A. Weigel, L. Sauter

Crane Assembly and Service Processes meet Virtual Reality
Kranmontage- und Serviceprozesse treffen auf die Virtuelle Realität 189

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Neue Chargierkrane bei HKM Anforderungen und Herausforderungen

Frank Matta



Dr.-Ing. Frank Matta
Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH
Ehinger Straße 200
47259 Duisburg

Neue Chargierkrane bei HKM – Anforderungen und Herausforderungen

Die Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH (HKM) betreibt im Duisburger Süden ein integriertes Hüttenwerk mit Hafenanlage, Kokerei, Sinteranlage, Hochofenanlagen und einem Stahlwerk mit insgesamt fünf Gießanlagen. In der Chargierhalle des Stahlwerks, in der Schrott und flüssiges Roheisen zu den beiden vorhandenen Konvertern verbracht werden, ist ein Austausch der beiden dort verkehrenden Prozesskrane erforderlich. Der Konverterbetrieb bildet dabei den Beginn der Produktionskette im Stahlwerk, jeder Ausfall der zugehörigen Prozesskrane hat damit unmittelbar Auswirkungen auf nachgelagerte und teilweise auch vorgelagerte Prozesse. Welche besonderen Anforderungen dann an solche Krane gestellt werden müssen und welche weiteren Herausforderungen sich für die Umsetzung ergeben, soll in diesem Beitrag dargestellt werden.

1 Einleitung und Problemstellung

Die Stahlherstellung aus Roheisen nutzt den Konverterprozess zur Umwandlung des Roheisens zu Stahl durch gezieltes Verbrennen des überschüssigen Kohlenstoffs im Roheisen. Hierzu wird dem Konvertergefäß zunächst Schrott zur Kühlung und als Legierungsmittelträger zugeführt (chargiert). Im Anschluss daran erfolgt die Zugabe von flüssigem Roheisen. Im Konverterprozess selbst wird unter Zuführung von Sauerstoff der Schrotanteil aufgeschmolzen und der Kohlenstoffgehalt der Schmelze entsprechend der Erfordernisse eingestellt. Zeitgleich erfolgt hier auch die Zugabe der Haupt-Legierungselemente für die jeweilige Stahlsorte.

Für diesen Prozess stehen bei der HKM jeweils ein Chargierkran für den Schrotteinsatz (5-Träger-Brückenkran mit 3 baugleichen Katzen, Tragfähigkeit 3 x 60 t, Baujahr 1966) und ein Chargierkran für Roheisen (4-Träger-Brückenkran, Hauptkatze 400 t, Hilfskatze 80 t, Baujahr 1996) zur Verfügung. Beide Krane müssen aus unterschiedlichen Gründen zeitgleich ersetzt werden. Hierzu wurde bereits auf der Kranfachtagung im Jahre 2020 schon vorgetragen [1].

Die ersten Vorüberlegungen gehen zurück bis ins Jahr 2018, ab 01-2020 beschäftigt sich der Kranbereich der Neubauabteilung der HKM nach Genehmigung des Budgets nun intensiv mit der Umsetzung. Die Inbetriebnahme und der „Krantausch“ selbst sind für November 2022 geplant.

Beide Prozesskrane haben höchste Anforderungen an die technische Ausrüstung und die Verfügbarkeit, es stehen hier insbesondere für den Roheisen-Chargierkran (SCC01) nur sehr begrenzte Stillstandszeiten zur Instandhaltung zur Verfügung (ca. 45 h per anno bei Betrieb 24-7-365). Zudem gibt es für das Tragwerk des Stahlwerks (Baujahr 1965/66) erhebliche Restriktionen hinsichtlich der ertragbaren Lasten, die von den vorhandenen Kranen bereits deutlich „angekratzt“ wurden.

2 Technische Anforderungen

2.1 Radlastvorgaben für die Kranbahn und Hallenstützen

Im Vorlauf zum eigentlichen Beschaffungsvorgang hat man sich natürlich mit den zugehö-

rigen Lasten, die durch neue Krane in den Bestands-Stahlbau einzuleiten sind, auseinandergesetzt. Hierbei wurde schnell deutlich, dass dort Mitte der 90er Jahre bei der Beschaffung des heutigen Roheisen-Chargierkrans (BS 3a) kaum (dauerhaft) haltbare Annahmen getroffen worden sind. So hat man seinerzeit nur für einen kleinen Hallenbereich die Nutzung der vollen Tragfähigkeit eingeplant und nachgewiesen, während der größere Hallenbereich nur mit verminderter Tragfähigkeit bemessen wurde. In den Vorüberlegungen zur Neubeschaffung wurde dann aber festgelegt, dass diese Annahmen so nicht zu halten sind, was massive Auswirkungen auf die Ausgestaltung der Krane zur Folge hatte, um die Radlasten soweit zu minimieren, dass für nahezu alle relevanten Stellen die neuen Krane mit voller Tragfähigkeit zu betreiben sind.

Zu den wesentlichen Änderungen zählen:

- Definition eines „Fahr-Regimes“ für die Nutzung der vollen Tragfähigkeit (lastabhängige Korridore für Kranfahrt und Katzfahrt)
- Verlagerung der Hauptkatze auf alle vier Brückenträger (bisher nur auf den beiden Hauptträgern verlagert)
- Anordnung zusätzlicher Laufräder im Kranfahrwerk (2 x 16 Räder statt 2 x 12 Räder) zur Minimierung lokaler Radlasten
- Sehr moderate Einstufung für die Hubklasse (HC2)

Für die Nachweise im Stahlbau der Halle (Kranbahnträger und Stützen) hat man zudem über die hier sehr deterministische Transportaufgabe (alle Fahrwege, Gewichte und das Mengengerüst sind bekannt und sicher anzugeben) einen berechneten Kollektivbeiwert für den Betriebsfestigkeitsnachweis ansetzen können.

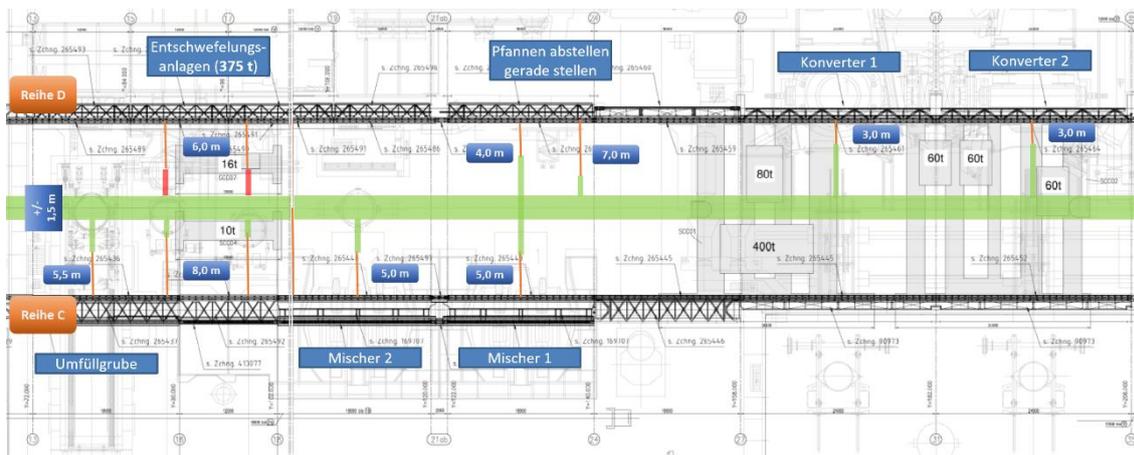


Bild 1: Definition des Fahrbereichs mit Last

Gemäß Bild 1 hat der generell nutzbare Fahrweg mit Last in Kranfahrtrichtung lediglich eine Breite von 3 m (bei einer Spannweite von 22 m). Katzbewegungen außerhalb des Fahrwegs werden bei Kranfahrt unterbunden. In den jeweils gekennzeichneten Positionen können die Auf- und Abnahmestellen dann über Katzfahrt erreicht werden, die Kranfahrt lässt hier nur noch kleine Ausgleichsbewegungen von maximal +/- 0,25 m zu.

Da die zugehörigen Bewegungen für das Tragwerk statisch relevant sind, werden alle Fahrbewegungen sicher über entsprechende Geber erfasst und verarbeitet (Kat. 3, Performance

Level d).

Die Verlagerung der Hauptkatze zeigt das folgende Bild 2.

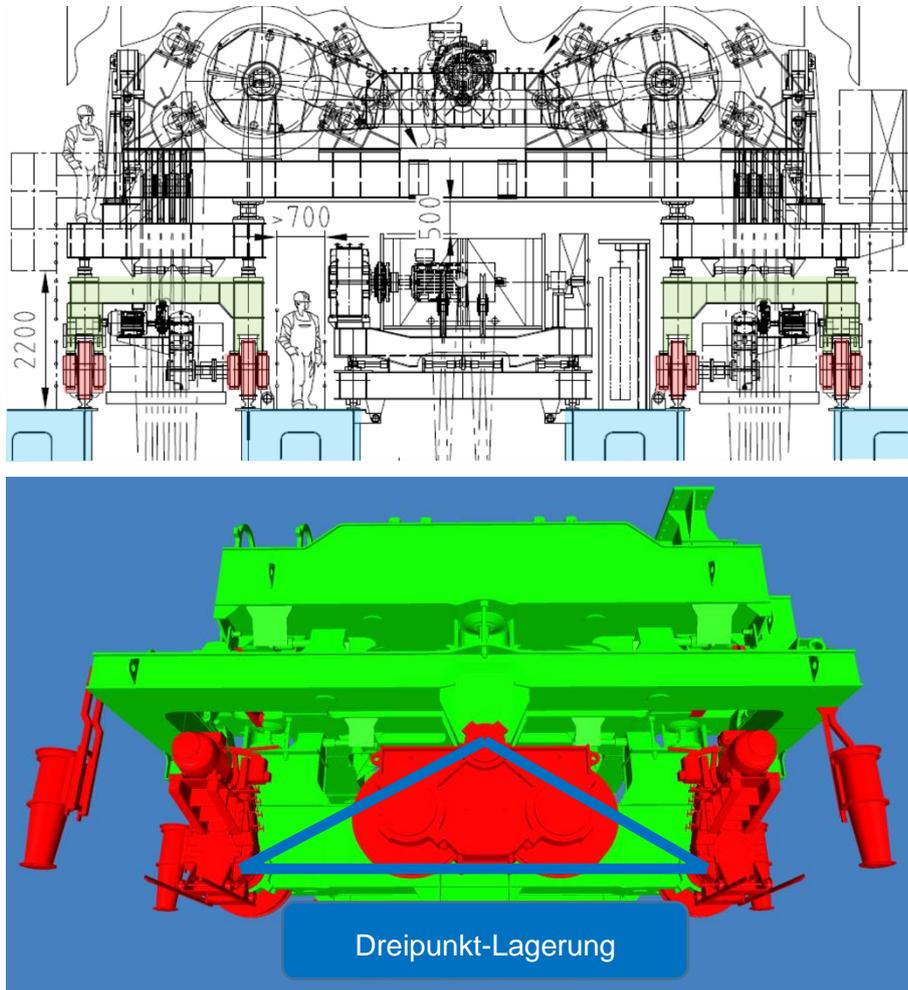


Bild 2: Verlagerung Hauptkatze

Die beiden Fahrrahmen überspannen hierbei jeweils einen Haupt- und einen Neben-Brückenträger. Die Verlagerung jedes Fahrrahmens erfolgt mit jeweils vier Laufrädern, wobei ein „Pärchen“ in einer Zweiradschwinge angeordnet ist. Hierdurch entsteht quasi eine statisch bestimmte Dreipunkt-Lagerung.

Von den insgesamt 8 Katzlaufrädern sind die vier „Einzelräder“ angetrieben. Die Oberflächen sind jeweils oberhalb der Fahrrahmen in den Wägerahmen angeordnet. Hierdurch ergibt sich der vorteilhafte „Nebeneffekt“, dass von den insgesamt 40 Seilsträngen nur noch 4 direkt vom Hubwerksrahmen ablaufen und das zugehörige Tragwerk entsprechend „schlank“ ausgeführt werden kann.

Beide Hubwerke erhalten einen Wägerahmen mit Wägezellen hoher Genauigkeit, da über den Chargierkran beim Einleervorgang das genaue Gewicht abgeleitet werden muss. Der eigentliche Einleervorgang erfolgt dabei „semi“-automatisch mit vorgegebener Einleergeschwindigkeit (Tonnen/Sekunde), d. h. die Geschwindigkeiten der beiden Hubwerke werden über die Steuerung geregelt.

2.2 Vorgaben für die Konstruktion und die Berechnung

Bei so wichtigen Prozesskränen sind sehr umfangreiche Vorgaben an die Konstruktion und Berechnung selbstverständlich. So ist im zugehörigen Leistungsverzeichnis hierzu auch einiges zu finden. Die grundsätzliche Einstufung der Krane erfolgt dabei natürlich nach gültigem Normenwerk, bezogen auf die vielen Parameter der zugehörigen DIN 13001-3-1 gab es hier aber bereits durch den Auftraggeber sehr konkrete Festlegungen.

Bei beiden Kranen erfolgte zudem die Auslegung der Seile nach DIN 15020 und nicht nach der DIN-EN 13001-03-02, da diese für den Auftragnehmer aus unserer Sicht zu viele Entwurfsfreiheiten erlaubt.

Für den Maschinenbau sind ebenfalls entsprechende Vorgaben erfolgt. Neben diversen Hersteller-Vorgaben für bestimmte Baugruppen (Kupplungen, Getriebe, Geber, elektrische Antriebstechnik, etc.) ist hier besonders die Auslegung der **Getriebe** hervorzuheben. Hier sind Berechnungsvorgaben bis hin zur Festlegung von differenzierten Anwendungsfaktoren der einzelnen Stufen und Mindestwerte der Sicherheiten konkret formuliert worden.

Die Einhaltung unserer Vorgaben wird natürlich ebenfalls entsprechend überwacht. So sind für alle Schritte der Projektierung Prüfungen und Kontrollen durch „Dritte“ beauftragt worden:

- Prüfung der statischen Berechnungen für den tragenden Stahlbau für beide Krane (einschließlich Katzrahmen und Traversen)
- Prüfung der Berechnung Maschinenbau für alle wesentlichen Antriebskomponenten
- Explizite Prüfung der Getriebeberechnung **aller** Getriebe
- Prüfung der Übereinstimmung der Konstruktion mit Bezug zu den statischen Berechnungen, insbesondere hinsichtlich der angesetzten Kerbfälle

Für diese Prüfungen gibt es einen sehr umfangreichen Auftrag an das IFF in Leipzig.

Zusätzlich sind alle wesentlichen Schritte in der Fertigung durch von uns beauftragte Mitarbeiter der GSI-SLV Duisburg begleitet worden.

Der erhebliche Umfang der „externen“ Prüfungen hat einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Durchlaufzeit der Konstruktion und Fertigung.

2.3 Redundanzvorgaben

Aus der vertraglich vereinbarten Verfügbarkeit von 99,5 % (gemäß VDI 3423 mit einer Bemessungszeit von 8640 h/a) ergeben sich zwangsläufig einige notwendige Redundanzen. Grundsätzlich gilt dies für beide Krane. Für den Schrott-Chargierkran (SCC02) ist aber bereits durch die Gestaltung mit drei baugleichen Katzen zumindest das Hubwerk (teil)redundant, da im Mittel „nur“ ca. 2,3 Mulden je Schmelze eingesetzt werden müssen, so dass hier ein gewisser Freiheitsgrad entsteht.

Folgende Redundanz-Vorgaben mussten durch den Lieferanten u. A. umgesetzt werden (SCC01, teilweise auch SCC02):

- Planetengetriebe mit 2-Motoren-Antrieb im Haupt- und Hilfshub: Bei Ausfall eines Antriebs kann mit halber Geschwindigkeit weitergefahren werden (nur SCC01)

- 4 Antriebe je Katze in 2 Motorgruppen: Bei Ausfall eines Antriebs kann mit verminderter Beschleunigung weitergefahren werden (nur SCC01)
- 8 Antriebe in 4 Motorgruppen für die Kranfahrt: Bei Ausfall eines Antriebs kann mit verminderter Beschleunigung weitergefahren werden (3 Motorgruppen) (für SCC02 analog)
- Redundante 5-kV-Einspeisung bezogen auf die Zuleitung (Kabeltrommel) (SCC01)
- Zusätzlich Betrieb über Stromschiene bei verminderter Leistung im Haupthubwerk (1-Motorenbetrieb) möglich (SCC01)
- Redundante Einspeisung über Stromschiene auf beiden Stützenreihen (SCC02)
- (Teil)redundante Auslegung der Umrichter mit Umschaltmöglichkeit
- (Teil)redundante Auslegung der Bremsen (doppelte Betriebsbremsen, von den jeweils 4 Nothalte-Zangen sind jeweils nur 3 erforderlich)
- Redundante und diversitäre **sichere** Wegerfassung (2 x Symeo je Bewegung und zusätzlich sichere Absolutwertgeber mit Synchronisierung über RFID-Tags an der Kranbahn)
- (Teil)redundante Auslegung der Klimatechnik
- ...

2.4 Weitere Ausstattungsmerkmale

Für beide Krane gibt es weitere Ausstattungsmerkmale, die teilweise aus technischen Anforderungen, aus Erhöhung der Verfügbarkeit oder aus Gründen der Instandhaltbarkeit umgesetzt worden sind.

Für den SCC01 ist dies – bedingt durch den Prozess – der umfangreiche **Flammschutz** für alle Baugruppen, die im unmittelbaren Einflussbereich am Konverter liegen (Brückenträger, Katzrahmen, Kabelschlepp-Einrichtungen und Hubwerk-Antriebstechnik). Die Anforderungen bestehen hierbei zudem darin, diesen so auszuführen, dass dieser „leicht“ demontierbar ist, um an den „verdeckten“ Bauteilen Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten durchführen zu können.

Darüber hinaus waren bei der Projektierung Themen wie Begehungen, Laufbühnen, Trassierungen, etc. besonders im Fokus, für den SCC01 erschwerend noch unter der Berücksichtigung des potenziellen Flammenschlags. Besondere Ausmaße hat damit auch das Thema „Beleuchtung“ bekommen: Hier sind an beiden Kranen zusammen ca. 100 Leuchten verbaut worden, mehr als das Doppelte von dem, was seitens des Lieferanten eingeplant war.

2.5 Instandhaltbarkeit

Die Zugänglichkeit und Instandhaltbarkeit zu einzelnen Baugruppen waren zudem während der Projektierung mit die größten Herausforderungen in der Konstruktion. Die im Leistungsverzeichnis so lapidar formulierte Anforderung „**alle relevanten Baugruppen sind für Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben zugänglich zu gestalten**“ erforderte dann bei vielen Details eine langwierige Diskussion und mehrfache Entwürfe, bis für beide Seiten eine befriedigende Lösung erarbeitet werden konnte.

Als prägnantes Beispiel sei hier die Antriebseinheit für das Katzfahrwerk der Hauptkatze des Roheisen-Einsetzkranes SCC01 genannt. Durch den sehr komplexen Aufbau des Tragwerks der Katze mit Unterwagen, Wäge- und Hubrahmen musste eine machbare und vertretbare Lösung zum Ausbau der Einheit gefunden und entwickelt werden. Bild 3 zeigt diese „Sonderlösung“.

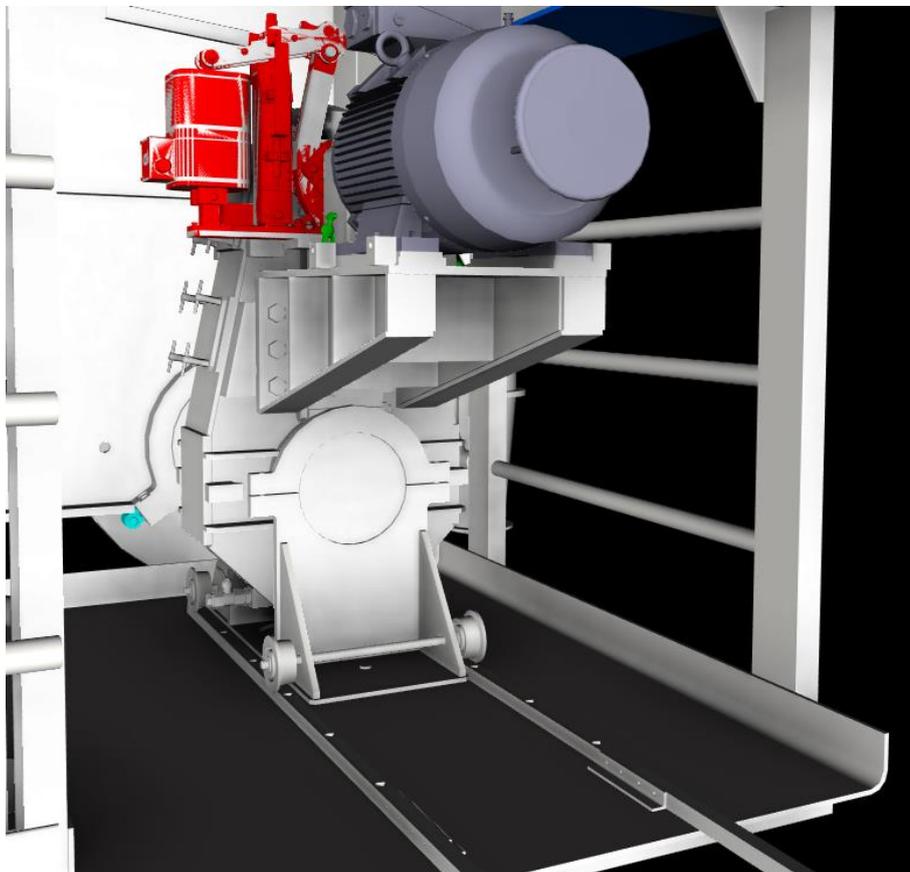


Bild 3: Ausbaurichtung Fahrtrieb Hauptkatze SCC01

Motor, Kupplung und Bremse sind dabei auf einem Konsol verlagert, das am Getriebe angeflanscht ist, so dass der gesamte Antrieb als eine „Einheit“ handhabbar wird. Für den Ausbau setzt sich diese Einheit nach Lösen der Flanschverschraubung am Laufrad auf einen Laufwagen ab, der über eingelassene Fahrschienen den Ausbau ermöglicht. Oberhalb der Einheit (im Bild nicht sichtbar) ist eine Laufbahn im Katzrahmen integriert. Über einen Rollwagen und einen Kettenzug kann so die Einheit angeschlagen werden. Bild 4 zeigt den ausgebauten Zustand aus der Detailentwicklung im Zuge der Projektierung.

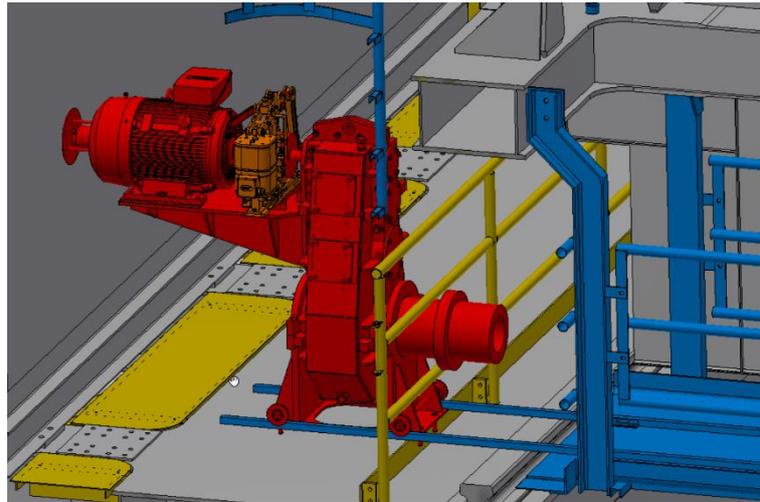


Bild 4: Antriebseinheit ausgebaut

Die zusätzlichen Einrichtungen sind hier natürlich an allen 4 Stellen der Hauptkatze vorgesehen.

Zum Abschluss dieses Kapitels zeigen die beiden folgenden Bilder den letzten Stand der Konstruktion als 3D-Modell, Bild 5 und Bild 6.

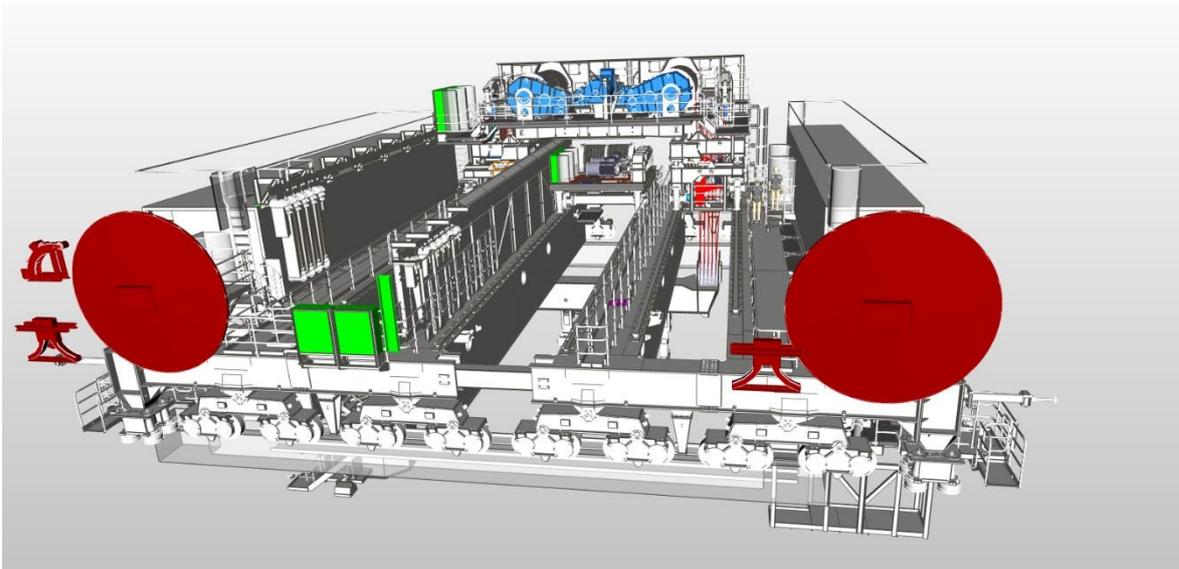


Bild 5: 3D-Modell Roheisen-Chargierkran SCC01

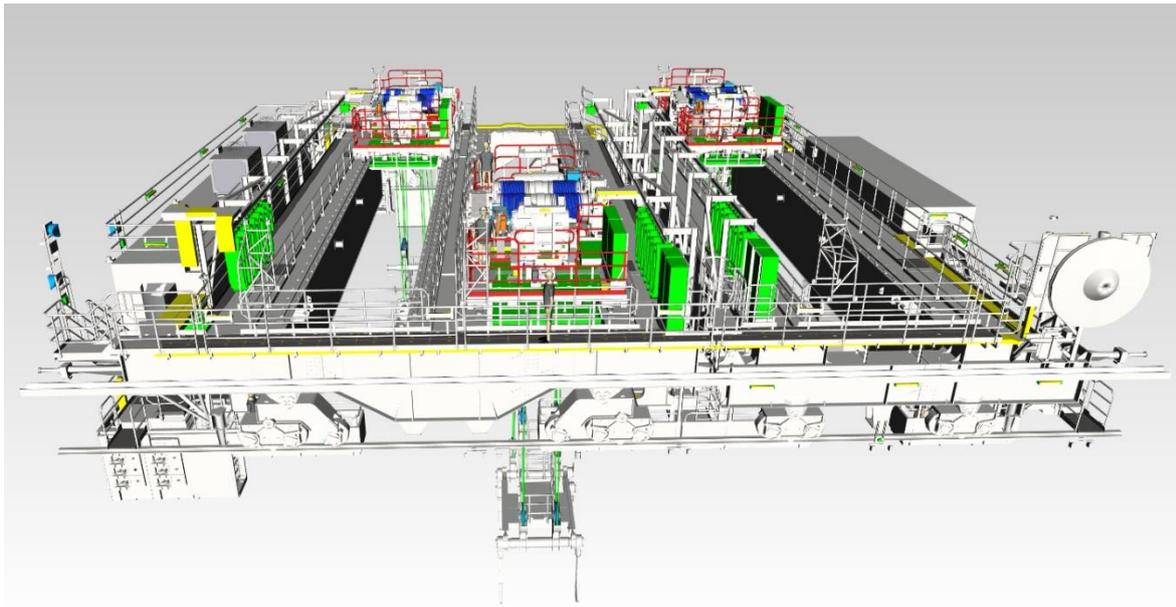


Bild 6: 3D-Modell Schrott-Chargierkran SCC02

3 Randbedingungen zur Montage

Wie bereits in [1] dargestellt, nehmen die Montage und Inbetriebnahme der neuen Krane sowie die Demontage der beiden „alten“ Krane einen erheblichen Stellenwert innerhalb des Projektes ein. Dies gilt für das erforderliche Budget genauso, wie für den notwendigen Planungsaufwand zur Montage und Demontage. Bild 7 zeigt das mittlerweile fertig gestellte Montagegerüst.

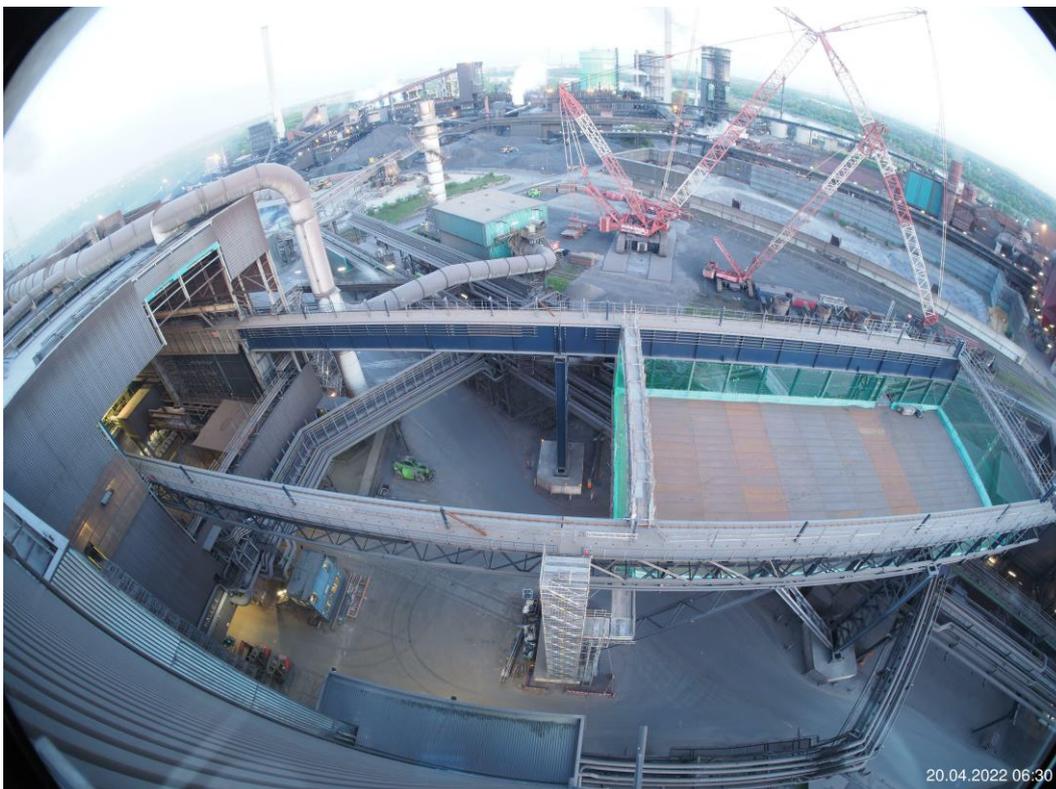


Bild 7: Temporäres Montagegerüst zum Aufbau der Krane

Man bedenke, dass hier rund 1.400 Tonnen Stahl verbaut worden sind, die nach Beendigung des Projektes wieder zurückgebaut werden müssen. Der Bereich des begehbaren und (teil)belastbaren Schutzes gegen herabfallende Teile oberhalb der Medientrasse (rechts im Bild) wird für den eigentlichen Aufbau der Krane genutzt (Zugmontage und Komplettierung). Allein dieser hat einen Anteil von rd. 180 t am Gesamtgewicht.

Bezogen auf das Montagegerüst sind die besonderen Herausforderungen im Öffnen der Giebelwand und in der Verkehrsführung (Montage und laufender Betrieb) zu sehen.

Für die Öffnung der Giebelwand hat sich die Lage der letzten „inneren“ Stützen als sehr nachteilig herausgestellt. Diese stehen aus Gründen der Infrastruktur um einige Meter in Längsrichtung versetzt, also nicht in einer gemeinsamen Achse. Dies erzeugt eine Dachauskragung von mehr als 12 m, die sich hier im Wesentlichen auf den Dachstielel abstützt. Für die Durchfahrt der neuen Krane in die Halle müssen diese aber zurückgebaut werden. Eine mit Bezug auf die Statik aber auch mit Bezug auf die Montage große Herausforderung war dabei die Entwicklung und Umsetzung der notwendigen Konstruktion im Dachbereich und in Längsrichtung der Halle. Da „auf dem Boden“ laufender Anlieferverkehr herrscht (ca. 40-50 LKW/Tag) konnten die zugehörigen Aufgaben nur nach Abstimmung und an Wochenenden durchgeführt werden.

Bild 8 und Bild 9 zeigen die statisch erforderlichen Verbände unmittelbar im Bereich der Attika und im Feld dahinter mit Lasteinleitung „nach unten“.

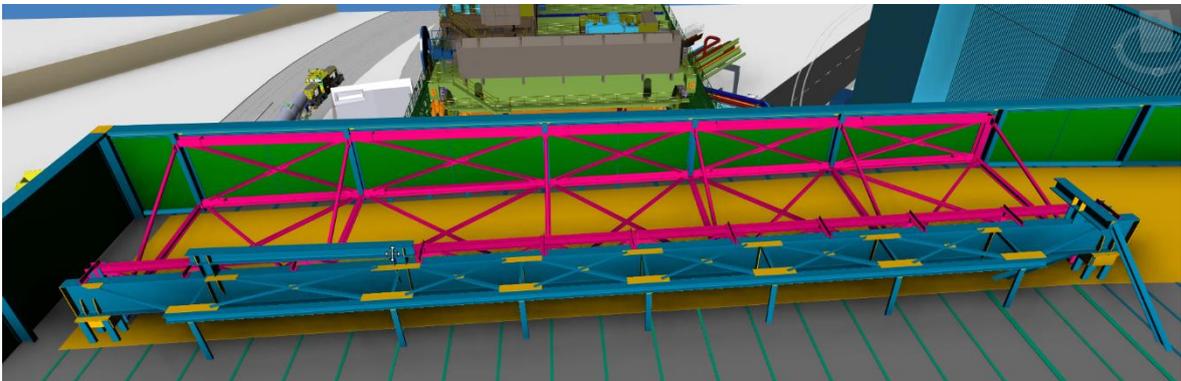


Bild 8: Abfangung des Dachüberstands durch stehende und liegende Verbände

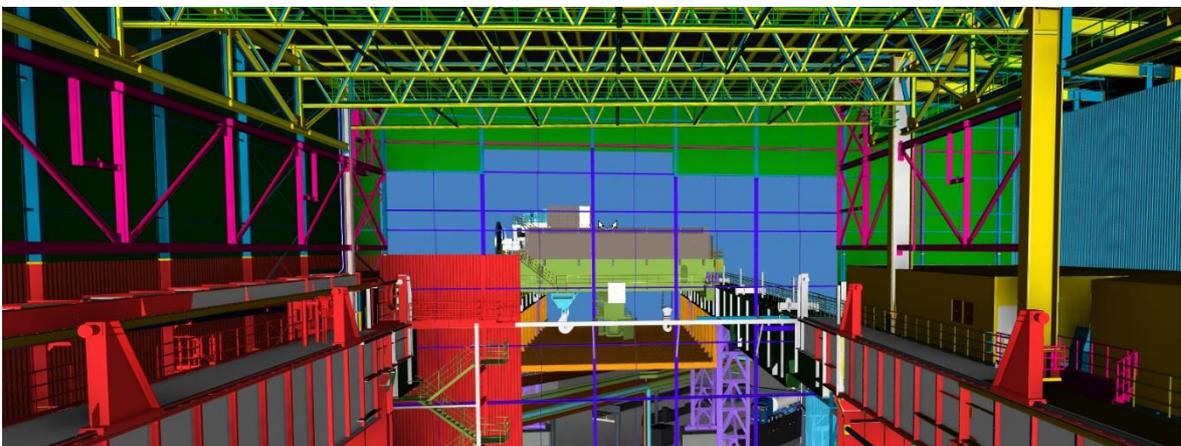


Bild 9: Längsverbände im Bereich der Kranbahn-Achsen (pinkfarbene Konstruktion)

Zusammenfassung

Der Neubau von Prozesskranen ist für die Neubaubereiche eines Hüttenbetriebs eigentlich eine ganz normale Anforderung. Ganz anders stellt sich die Situation aber dar, wenn man sich mit den beiden wichtigsten Kranen der gesamten Hütte beschäftigen muss und dies auch noch gleichzeitig erfolgen muss. In diesem Beitrag sind die wesentlichen Anforderungen und Herausforderungen bei der Umsetzung eines solchen Projektes dargestellt worden. Wesentliche Auswirkungen auf die Gestaltung der Krane ergaben sich hierbei bereits aus den statischen Vorgaben des Hallensystems mit nicht mehr zu haltenden Voraussetzungen aus der Vergangenheit.

Bei Kranen höchster Verfügbarkeit rücken aber noch viele andere Aspekte in den Fokus, von denen ein Teil hier beleuchtet werden konnte. Das für die Montage und Demontage der Krane erforderliche Montagegerüst, das wegen der vorhandenen Organisationsstrukturen „im eigenen Bereich“ bearbeitet werden konnte, stellte neben der Krantechnik in der Vorplanung dabei die größte Herausforderung dar. Auch hinsichtlich der erforderlichen Mittel zur Umsetzung des Gesamtprojektes rückt dieses in den Fokus: Bezogen auf das reine Kranbudget beträgt das Gesamtbudget ca. 190 %.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung befinden sich trotz der widrigen Randbedingungen alle Teilprojekte im Zeit- und Kostenrahmen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Matta, F.: Vorplanung neuer Chargierkrane bei der HKM. In: Tagungsband der 28. Internationalen Kranfachtagung Magdeburg „Kran 4.0: Potenziale der Digitalisierung“, Magdeburg: LOGiSCH GmbH, 2020; S. 121-133

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Digitalisierung in der Kranindustrie Von der Entwicklung bis zum Betrieb - Erfahrungen aus dem Feld -

Thomas Foppe

SIEMENS

Thomas Foppe
Siemens AG
Frauenauracherstr. 80
91056 Erlangen

Digitalisierung in der Kranindustrie - Von der Entwicklung bis zum Betrieb

Derzeit gibt es weltweit einen starken Trend zur Digitalisierung, welcher durch die Corona-Pandemie und den damit verbundenen Lockdown noch verstärkt wurde. Dies umfasst verschiedene Branchen und Anwendungen. Auch Krananlagen spielen hier eine zentrale Rolle im Umfeld von Produktionsmaschinen und Logistikprozessen. Hierbei ermöglicht die Digitalisierung ein erhebliches Einspar- und Verbesserungspotential in den unterschiedlichen Phasen eines Projektes (Bild 1).



Bild 1: Phasen eines Projektes

Das Thema Digitalisierung reicht dabei von Simulationen und Digitalen Zwillingen, welche schon während der Planungs- und Engineering-Phase verwendet werden, bis zur Datenerfassung, Cloud-Computing und dem Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) zur Optimierung der Prozesse und Warenströme während des Betriebes.

1 Planung

Bereits während der Planungsphase können sowohl bei Neuanlagen wie auch bei Modernisierungen digitale Hilfsmittel eingesetzt werden, um den Ist-Zustand aufzunehmen, mögliche Schwachstellen aufzudecken und auf Basis dieser Erkenntnisse den Soll-Zustand zu definieren.



Bild 2: Terminal Simulation im Überblick

Dank der heute weit verbreiteten Verfügbarkeit von modernen Simulationstools (Bild 2), lassen sich viele Prozesse schon in der Planungsphase optimieren. Dies umfasst sowohl Produktionsanlagen als auch logistische Prozesse. Im Bild 3 ist beispielhaft eine Simulation eines Terminals mit 4 STS Kranen, 5 RMG Kranen und Lkw-Verkehr dargestellt.

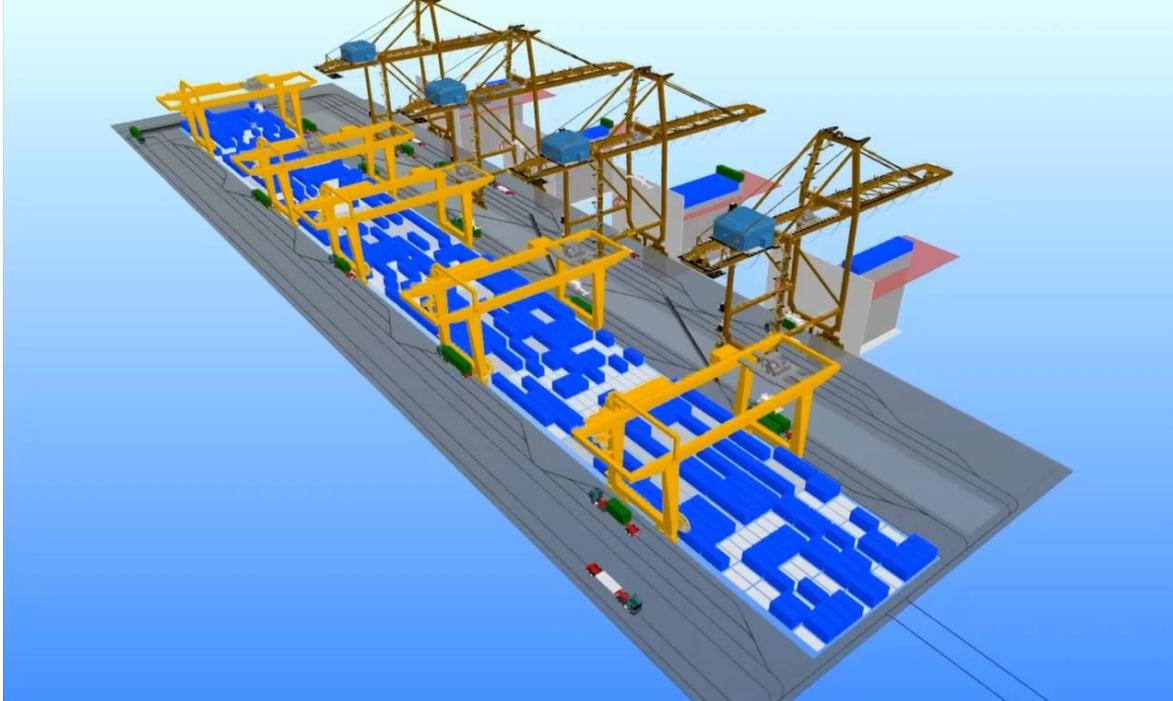


Bild 3: Simulation eines Terminals mit Lkw-Verkehr und Lagerfläche

In einer solchen Simulation lassen sich nun auf einfache Weise verschiedene Szenarien darstellen. So kann zum Beispiel eine zu hohe Anzahl an Kranen dazu führen, dass der äußere Kran den Container in der Mitte nicht mehr erreichen kann und ein einzelner Container evtl. 2- oder 3-mal angefasst werden muss, bis er seine finale Position erreicht hat. Auf der anderen Seite kann eine zu geringe Anzahl an Kranen dazu führen, dass die Fahrwege sehr lang werden und auf Grund der Verzögerungen bei den Lkws Staus entstehen. Daher spielt auch die Geschwindigkeit der verschiedenen Achsen (Kranfahrt, Katzfahrt, Hubwerk) eine entscheidende Rolle. Auch die Anzahl der Lkws im Terminalbereich hat bedeutenden Einfluss auf die Performance des gesamten Terminals. Bei zu vielen Lkws und Engstellen, wie hier am Ende der Lagerfläche, kann es zu Stauungen kommen. Daher ist auch eine intelligente Steuerung des Einfahrt-Gates von großer Bedeutung. So kann mit Hilfe der Simulation des am Containerdurchfluss beteiligten Terminal Equipments (STS, RMG, LKW) von der Schiffsentladung bis zur Einlagerung des Containers im Block das Design so optimiert werden, dass einerseits ein Containerstau an der Wasserseite (STS) vermieden und andererseits die vorhandenen Stapelkrane im Block optimal ausgelastet und effizient betrieben werden können.

Auch Optimierungen in Abhängigkeit von externen Einflussfaktoren lassen sich auf diese Weise testen. So kann beispielsweise die Priorisierung der Container in Abhängigkeit von Tageszeiten, Anzahl der Schiffe im Hafen oder Anzahl der Lkw im Wartebereich bedarfsgemäß angepasst werden.

2 Konstruktion

Schon seit vielen Jahren verwenden die Kranhersteller moderne Software-Tools, bei denen das Konstruieren in 3D-Modellen Stand der Technik ist. Durch fortlaufende Verbesserungen und Erweiterungen in der digitalen Landschaft ist es heute möglich, schon während der Konstruktionsphase die vorgesehene Sensorik wie Kameras oder Laserscanner im digitalen Modell einzufügen.

So können z. B. die korrekte Anbauposition, der Blickwinkel und der Öffnungswinkel der Kamera sowie die Entfernung vorab überprüft werden. Durch das Platzieren am 3D Modell können die verschiedenen Kameraperspektiven, wie in Bild 4 zu sehen, mit dem Kunden besprochen werden und der optimale Montageort der Kamera mit dem Kranbauer abgestimmt werden. Auf diese Art werden notwendige Änderungen, wie sie häufig während der Inbetriebnahme-Phase auftreten, vermieden.

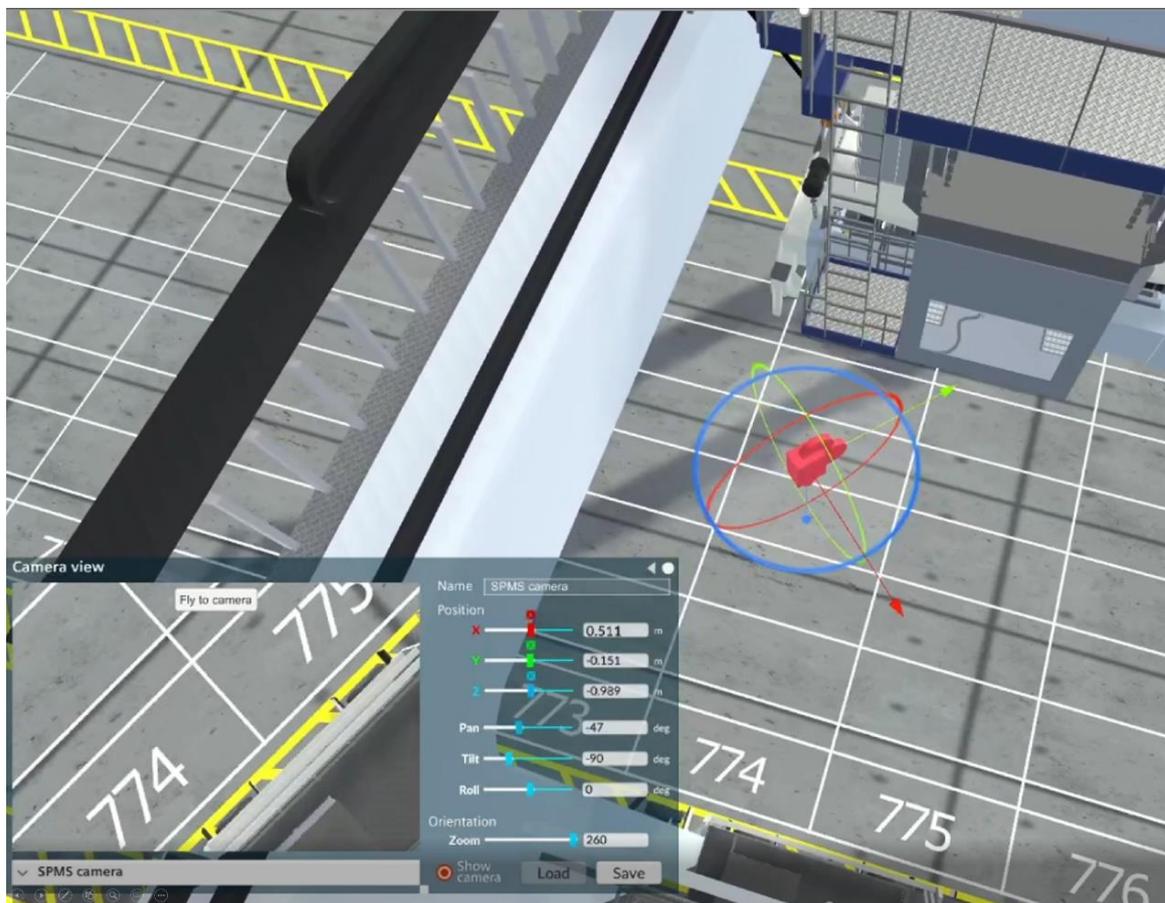


Bild 4: Simulation der Kameraperspektive

Auch die Positionierung der Laserscanner lässt sich, wie in Bild 5 dargestellt, überprüfen. Damit wird vorab sichergestellt, dass einerseits der gesamte notwendige Bereich erfasst wird, andererseits die Entfernung des Lasers zum Objekt aber auch kurz genug ist, um mit ausreichender Auflösung auch kleinere Elemente sicher erkennen zu können.

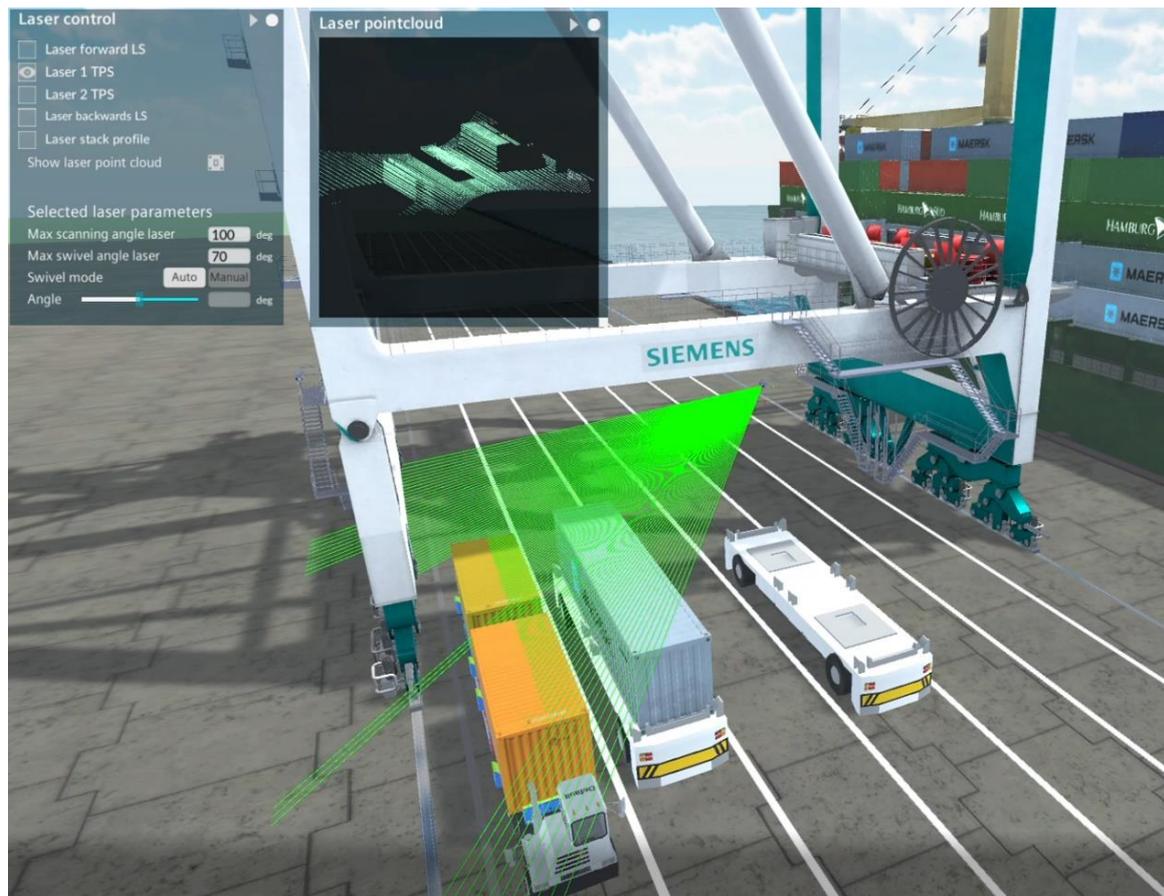


Bild 5: Simulation des Laserscanners

3 Engineering

Auch in der anschließenden Engineering-Phase und bei der Entwicklung neuer Technologien oder Anwendungsfälle ermöglichen Digitale Zwillinge die Integration sowie das Zusammenspiel unterschiedlicher Technologiemodule zu verbessern, Funktionalitäten zu prüfen und Schnittstellen zu definieren. Besonders in diesem Bereich hat der Lockdown während der Corona-Pandemie den Einsatz von digitalen Werkzeugen noch einmal beschleunigt. Durch den reduzierten direkten Kundenkontakt und die verlorenen Möglichkeiten, neue Entwicklungen oder Software auf der Anlage zu testen, ist es zwingend notwendig geworden, diese Entwicklungen an Digitalen Zwillingen zu testen. Dies bietet zusätzlich den Vorteil, die Software und Schnittstellen schon zu testen, bevor der Kran in Betrieb genommen wird. Somit können mögliche Fehler schon vorab erkannt und Verbesserungen implementiert werden. Dadurch werden Inbetriebnahme-Zeiten signifikant reduziert.

4 Installation, Inbetriebnahme und Abnahme

Viele Aspekte, die in der Vergangenheit zu Verzögerungen während der Installation und Inbetriebnahme der Krananlagen geführt haben, können nun durch die in Abschnitt 2 und 3 beschriebenen Vorkehrungen vermieden werden.

Allerdings hat die Pandemie-Situation der letzten 2 Jahre weitere Herausforderungen mit

sich gebracht. Durch die starken Reisebeschränkungen auf nationaler und internationaler Ebene und die damit verbundenen Quarantäne-Zeiten war es in vielen Fällen unmöglich, persönlich anzureisen. Da nun häufig die Fachkräfte und Spezialisten auf der Anlage fehlten, wurde auch hier der Einsatz digitaler Hilfsmittel stark vorangetrieben. Eine Remote-Inbetriebnahme und die Remote-Unterstützung von Kunden, Partnern und Kollegen ist heute keine Seltenheit mehr. Auch bei den Installationsarbeiten wird inzwischen vermehrt auf Körperkameras und den Einsatz von AR-Brillen zurückgegriffen.

5 Betrieb

Viele für den Betrieb der Krananlagen notwendige Applikationen werden heute durch eine künstliche Intelligenz unterstützt, um ganz allgemein »Wissen« aus »Erfahrung« zu erzeugen. Hierbei entwickeln Lernalgorithmen aus möglichst repräsentativen Daten ein Modell. Dieses Modell kann anschließend auf neue Daten derselben Art angewendet werden. Wenn Prozesse zu kompliziert sind, um sie analytisch zu beschreiben, aber genügend viele Beispieldaten verfügbar sind, z. B. Sensordaten oder Bilder, bietet sich Maschinelles Lernen oder KI an.

Durch die heutigen Möglichkeiten der Datenerfassung bietet die Digitalisierung neue Ansätze der datengetriebenen Prozessverbesserung. Ein wesentlicher Bestandteil ist hierbei die Data Analytics (Bild 6). Erkenntnisse aus Daten zu extrahieren sowie das Sammeln, Organisieren und Speichern großer Datenmengen und das Repräsentieren der Daten für den Nutzer.

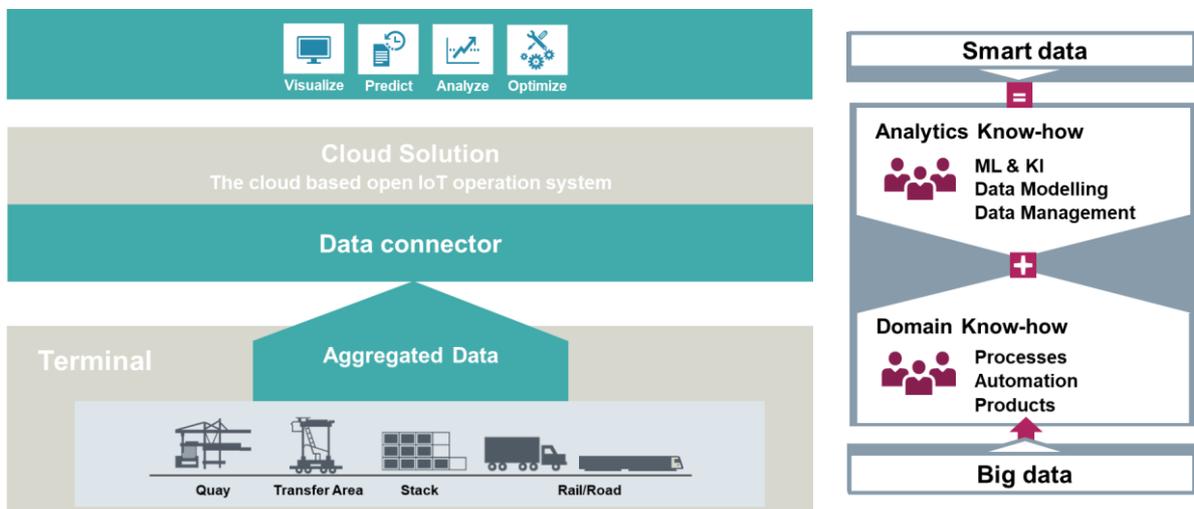


Bild 6: Data Analytics

Im Bereich der Predictive Maintenance (vorausschauende Wartung) kommen neben der Data Analytics auch das Maschinelle Lernen (ML) und die Künstliche Intelligenz (KI) zur Anwendung (Bild 7), um zum Beispiel durch Erkennung von Anomalien den Ausfall von Antriebskomponenten vorausschauend zu detektieren. Die KI-Modelle werden mit dem Datenstrom aus dem laufenden Betrieb kontinuierlich abgeglichen und erlauben letztlich mit entsprechendem Domain-Know-how, Vorhersagen zu verbessern und Empfehlungen für vorausschauende Wartungsmaßnahmen, zur Vermeidung ungeplanter Stillstandszeiten anzupassen. Die Visualisierung für Bedien- und Servicepersonal erfolgt vorzugsweise über

ein SCADA Crane Management System (CMS). Eine Anbindung des CMS an eine Cloud erlaubt darüber hinaus Data Analytics und den Vergleich relevanter KPIs global vernetzter Containerterminals.

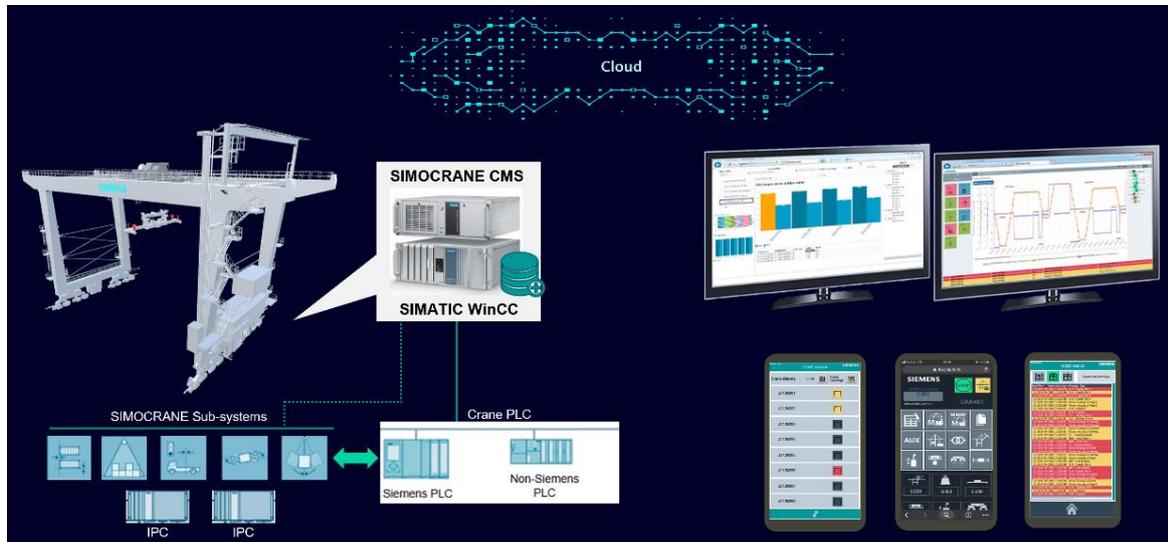


Bild 7: Überblick CMS (Crane Management System) mit Cloud Anbindung

Zusammenfassung

Das Thema Digitalisierung ist heute untrennbar mit der Kranindustrie verbunden und ist Treiber für viele neue Technologien. Digitale Zwillinge sorgen dafür, dass ganze Werke zunächst digital erschaffen werden. Diese Digitalen Zwillinge können im Anschluss in Kombination mit Data Analytics und Künstlicher Intelligenz (KI) einen entscheidenden Beitrag leisten, um Prozesse zu optimieren und Stillstände zu vermeiden.

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Betrieb automatisierter Containerkrane und Maschinen

Uwe Pietryga



Dipl.-Ing. (FH) Uwe Pietryga
Direktor Solution Sales KAS
Kalmar Germany GmbH
Max-Born-Straße 2
22761 Hamburg

Betrieb automatisierter Containerkrane und Maschinen

Dieser Beitrag ist die Fortsetzung der Ausführungen anlässlich der Kranfachtagung 2019 zum Thema [1]. Es wird über die Erfahrungen, die wir aus verschiedenen Projekten der letzten drei Jahre sammeln konnten, berichtet. Aufbauend auf den Darstellungen im Ursprungsbericht liegt hier der Fokus auf den Besonderheiten, die in der Projektrealisierung entstehen können. Dabei geht es um die Bereiche, die von allgemeinem Interesse sind und im täglichen Geschäft des Kranexperten kaum eine Rolle spielen, bzw. in manuellen Kranprojekten eine eher untergeordnete Bedeutung haben.

1 Einleitung

Seit nunmehr knapp 50 Jahren werden Containerterminals automatisiert, und es gibt auch weiterhin immer wieder neue Erkenntnisse, die man in die jeweiligen Projekte einbinden kann, um so kontinuierlich mehr Prozesse im Terminal zu automatisieren.

Die Entwicklungen der Industrie und der Mobilitätsbranche im Bereich der Robotik und Digitalisierung nehmen einen immer weitergehenden Einfluss auf die gesellschaftliche Akzeptanz und rechtliche Bewertung von Automatisierungslösungen. Dies gilt insbesondere auch für Maschinen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Einfluss weiter vergrößern wird, da aktuell immer neue Anwendungsgebiete für die Automatisierung erschlossen werden.

Diese Entwicklung hat eine direkte Auswirkung auf die Realisierung von automatisierten Containerterminals. Es ergeben sich immer wieder neue Anforderungen, die von den Herstellern und Betreibern berücksichtigt werden müssen.

Eine Erkenntnis ist, dass eine unterschiedliche Betrachtungsweise der Maschinen, d. h. in diesem Zusammenhang Krane und horizontale Transporter im Terminal, zwischen manuellem und automatisiertem Terminal notwendig wird. Im manuellen Terminal kann die Schnittstelle zwischen den Maschinen eindeutig festgelegt werden. Dies ist im automatisierten Terminal nicht immer der Fall, da die Automatisierung hier vielfach verschiedene Maschinen umfasst. Diese Kombination aus Maschinen, die auch schon aus einem Kran mit zu berücksichtigenden Sicherheitseinrichtungen bestehen kann, macht die Betrachtungen komplexer.

Generell gilt: Projekte der Automatisierung in Containerterminals beinhalten nach wie vor sehr individuelle Anforderungen.

2 Die Besonderheit von automatisierten Kranen im Containerterminal

Wie im 2019 veröffentlichten ersten Teil des Berichtes ausgeführt, sind die Betreiber in Deutschland verpflichtet, die gesetzlichen EU-Mindestanforderungen an den Arbeitsschutz beim Einsatz von Arbeitsmitteln zu beachten.

Diese Mindestanforderungen führen in der Praxis zu einem erheblichen Aufwand, um die technischen und organisatorischen Maßgaben umzusetzen, die zur Erlangung der Konformität notwendig sind.

Bei manuellen Krananlagen sind die Verfahren zur Herstellung der Konformität unter

Einbindung der bekannten Normen und Vorschriften hinreichend beschrieben und damit unkompliziert anwendbar. Mit der Einführung der Maschinenrichtlinie im Jahr 2009 ist dieses Verfahren noch einmal weiter standardisiert worden und es gibt Klarheit über das Verfahren. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl von Erfahrungswerten, auf die zurückgegriffen werden kann.

Anders sieht es bei den automatisierten Containerterminals aus. Hier gelten zwar die gleichen Anforderungen und so lassen sich die gleichen Methoden anwenden, jedoch ist aufgrund der Komplexität und Einzigartigkeit der Projekte der Aufwand größer. Die Vielzahl der Schnittstellen macht es schwierig, das Verfahren vollumfänglich durchzuführen. Die allgemein zugänglichen Informationsquellen sind sehr begrenzt und auch heranziehbare Erfahrungswerte gibt es bisher nur wenige.

Es ist deshalb erforderlich, sich tiefgehend mit den geltenden Anforderungen auseinanderzusetzen und ein neues Verständnis aufzubauen, um die Zusammenhänge besser zu verstehen und entsprechend handeln zu können.

Nur so lässt sich der notwendige Aufwand in Grenzen halten und vorgegebene Kosten- und Zeitrahmen in den Projekten einhalten.

Auch hier geht es, wie immer darum, die technische Machbarkeit mit den betrieblichen Anforderungen und den rechtlichen Vorgaben in Einklang zu bringen. Es ist eben ein sehr aufwendiger Prozess.

2.1 Automatisierte Krane und die EU-Maschinenrichtlinie

Aus Sicht der Hersteller hat die Einhaltung der Anforderungen der EU-Maschinenrichtlinie Priorität.

Wie bereits ausgeführt, sind bei der Automatisierung im Containerterminal üblicherweise mehrere Maschinen eingebunden.

In der EU-Maschinenrichtlinie wird dies durch den Begriff „Gesamtheit von Maschinen“ (Begriff aus der Maschinenrichtlinie) beschrieben.

Die Idee hinter diesem Begriff hilft uns, die weiteren Schritte zu beschreiben. Auch wenn im Großkranbau diese Betrachtung eher unüblich ist, so ist es vorteilhaft, dass in anderen Industrien die Betrachtung von mehreren Maschinen als Ganzes, z. B. bei komplexen Produktionsanlagen, üblich ist.

In dem Leitfaden zur Anwendung der Maschinenrichtlinie sind deshalb weitergehende und hilfreiche Hinweise enthalten. Sie helfen uns, ein besseres Verständnis der Zusammenhänge aufzubauen. Der § 38 klärt das wie folgt:

„... Gesamtheiten von Maschinen unterliegen der Maschinenrichtlinie, da ihre Sicherheit nicht nur von der sicheren Konstruktion und dem sicheren Bau der einzelnen Einheiten, aus denen sie bestehen, sondern auch von der Eignung der miteinander verbundenen einzelnen Einheiten und der Sicherheit der Schnittstellen zwischen diesen abhängig ist. ...“

[2]

Und weiter:

„... Die vom Hersteller einer Gesamtheit von Maschinen durchzuführende Risikobeurteilung muss sich daher sowohl auf die Eignung der einzelnen Einheiten im Hinblick auf die Sicherheit der Gesamtheit, als auch auf die Gefährdungen erstrecken, die sich aus den Schnittstellen zwischen den einzelnen Einheiten ergeben. Außerdem muss sie sich auf etwaige Gefährdungen erstrecken, die von der Gesamtheit der Maschinen ausgehen und die nicht durch die EG-Konformitätserklärung (für Maschinen) oder die Einbauerklärung und Montageanleitung (für unvollständige Maschinen), ausgestellt vom Hersteller der einzelnen Einheit, abgedeckt sind. ...“ [2]

Praktisch lassen sich daraus folgende Auswirkungen für automatisierten Containerkrane ableiten:

- Die Abgrenzung des Automatikbereiches sowie die Zugangskontrollen zum Automatikbereich sind Bestandteil der „Gesamtheit von Maschinen“ und damit Teil des Gesamtsystems und damit auch beim Kran zu betrachten.
- Die Notwendigkeit, die Anforderungen auf alle Teile anzuwenden, z. B. im Hinblick auf Steuerungskategorien und Schutzniveaus, inklusive der Dokumentationen, ist einzuhalten.
- Die Ausführung z. B. der Türverriegelung ist auch unter dem Gesichtspunkt der Maschine und im Gesamtsteuerungssystem zu betrachten.
- Schnittstellen zu anderen Bauwerken, wie z. B. Zäune, um die Anforderungen der EU-Maschinenrichtlinie zu erfüllen, sind zu betrachten.
- Die Reduzierung auf die klassischen Schnittstellen eines manuellen Krans, reicht nicht mehr aus.

Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist hilfreich, um nicht den Gesamtüberblick und die Fokussierung auf das Wesentliche zu verlieren. Dabei hilft die Kenntnis der von der EU zur Verfügung gestellten Informationen, um sich das notwendige Basiswissen anzueignen und um das eigene Verständnis zu verbessern.

Der benannte EU-Leitfaden behandelt übrigens auch das Thema der Kombination von neuen und bestehenden Maschinen. Aus der Praxis heraus wissen wir, dass dies durchaus auch von Relevanz im Bereich Krane sein kann. Es gibt dort hilfreiche Hinweise und Verfahrensempfehlungen.

Die Kenntnis erleichtert schließlich auch die Diskussion mit anderen Fachleuten, da eine gemeingültige Basis existiert, auf der man aufbauen kann.

2.2 Besseres Verständnis zwischen Betreiber und Hersteller

Die Zusammenarbeit zwischen Betreiber und Hersteller ist in Automatisierungsprojekten sehr intensiv. Es gibt viele Detailklärungen, die notwendig sind, um ein Projekt erfolgreich zu realisieren. Dabei sind erfahrungsgemäß die Vorstellungen von Hersteller und Betreiber sehr unterschiedlich. Es gilt, aus diesen unterschiedlichen Vorstellungen ein gemeinsames Verständnis aufzubauen, um die Sichtweisen des jeweiligen anderen besser zu verstehen und um die Detailklärungen durchzuführen. Dieses Zusammenspiel zwischen Hersteller und Betreiber beginnt idealerweise weit vor der eigentlichen Beschaffung. Bereits in der Planungsphase ist der Austausch sinnvoll. Nur so lassen sich Ideen auf ihre

Realisierungsmöglichkeiten frühzeitig überprüfen bzw. Konstruktionsvorgaben direkt mitberücksichtigen.

Dies betrifft z. B. die Anforderungen ans Gelände, erforderliche Bodenfestigkeiten und Oberflächenbeschaffenheit, zulässige Neigungen bzw. Steigungen und geht weiter über einzuhaltende Sicherheitsabstände und Mindestabstände, z. B. der Container im Containerlager.

Diese Anforderungen differieren teilweise zu den Vorgaben, die in einem manuellen Terminal gelten.

Die Energie- und Datenkommunikationsanforderungen sowie auch notwendige Platzreservierungen für die IT-Hardware in klimatisierten Terminalgebäuden sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Aus dieser Aufzählung lässt sich bereits erkennen, dass es viele Bereiche gibt, die nicht offenkundig direkt mit einer Maschine in Zusammenhang gebracht werden, und es ist ein spezielles Wissen erforderlich, um richtig zu planen.

Es reichen die im Kranbau üblichen Spezialisierungen wie Elektrotechnik, Maschinen/Stahlbau und Statik alleine nicht mehr aus.

Trotzdem werden oftmals vorhandene Spezifikationen, z. B. von manuellen Kranen, verwendet, die lediglich um die gewünschten Automatikfunktionen erweitert werden. Damit ist es nicht möglich, den Erfordernissen eines automatisierten Containerterminals gerecht zu werden.

Es ist festzustellen, dass solche Spezifikationen oftmals nicht die notwendigen und vollumfänglichen Leistungsumfänge beschreiben.

Aus Sicht des Herstellers ist es deshalb wünschenswert, wenn sich der Betreiber im Vorfeld auch mit der eigenen Arbeitsorganisation auseinandersetzt. Nur wenn der Betreiber sein gesamtes Arbeitssystem [3] kennt und beschreiben kann, ist es möglich, alle Schnittstellen zu erfassen und die notwendigen Festlegungen gemeinsam mit dem Hersteller zu treffen. Die Empfehlungen des BAuA EmpfBS1113 [4] geben hier gute Hinweise, wie vorzugehen ist.

Die Anwendung der nachfolgenden Checkliste der Ausführungsanforderungen hat sich als hilfreich bewährt, um die Absprachen zwischen Betreiber und Hersteller zu vereinfachen.

Checkliste der Ausführungsanforderungen:

- Enthält die Spezifikation eindeutige Liefergrenzen und eine Festlegung der zusätzlich zu erbringenden Leistungen und mitzuliefernden Unterlagen (z. B. die Aufzählung der zu liefernden Dokumente zum Konformitätsbewertungsverfahren)?
- Berücksichtigt die Planung alle notwendigen Maßnahmen für das Schutzkonzept?
- Liegt eine Planung für die terminalweite Kommunikation und für die Steuerungsinfrastruktur vor?

- Gibt es ein Wartungskonzept, das vorhersehbare Störungen (z. B. Hubseilbruch) berücksichtigt?
- Wie sind die Arbeitsprozesse für den Automatikbetrieb definiert?
- Ist der Lieferant, der die Herstellerverantwortung für die Gesamtheit der Maschinen übernimmt, bestimmt? Dies gilt sowohl für die Steuerung als auch für die Dokumentation.
- Ist eine Gesamtsystembeschreibung vereinbart?
- Sind die Verkehrswege und die Abgrenzungen der Arbeitsbereiche eingeplant? Ist ausreichend Platz vorhanden?
- Ist der Platz für die Wartung, z. B. Kalibrierung von Sensorsystemen, eingeplant?
- Gibt es ein Gesamtsteuerungskonzept und sind die Zugangskontrollen zu den unterschiedlichen Arbeitsbereichen definiert?
- Ist ein Schulungskonzept für den Betrieb, Wartung und Störfall definiert?
- Gibt es detaillierte Regelungen zu den Anforderungen und der Mitwirkung bei der betrieblichen Gefährdungsbeurteilung?
- Ist die terminaleigene Infrastruktur (Gebäude, Verkehrsflächen, Bodenbeschaffenheit) in der Planung berücksichtigt?
- Sind die Anforderungen der Automatisierung an die IT-Infrastruktur berücksichtigt?
- Gibt es ein ganzheitliches IT-Software- und Hardware-Konzept?
- Sind dezidierte Test und Verbesserungsstrategien vereinbart?

Die Bereitstellung der notwendigen Informationen ist mit erheblichem Aufwand verbunden, dies sollte man nicht unterschätzen und bei der Projektplanung entsprechend berücksichtigen, um Verzögerungen zu vermeiden.

2.3 Der richtige Grad der Automatisierung

Die Beantwortung einer der wichtigsten Fragen im Zusammenhang mit der Automatisierung von Terminals lässt sich immer noch nicht allumfassend und einfach beantworten: Inwieweit ist es sinnvoll zu automatisieren?

Leider gibt es dazu keine einfache Antwort, da einheitliche Regeln oder allgemeingültige Erfahrungswerte fehlen. Selbst grundsätzliche Parameter/Kenngrößen, wie z.B. die Berechnung der Leistungsfähigkeit der Automatisierung sind nicht standardisiert. Solche allgemeingültigen Parameter wären aber notwendig, um Lösungen auf ihre Leistungsfähigkeit hin zu beurteilen und um unterschiedliche System vergleichen zu können.

In dem Projekt „Terminal Industrie Committee 4.0“ - TIC 4.0 (Infos unter www.tic40.org) werden erste Schritte unternommen, um solche herstellerübergreifenden Festlegungen für unsere Industrie zu treffen. Es gibt bereits erste Feldtests mit den vom TIC 4.0 definierten Schnittstellen, doch es ist noch nicht absehbar, wann allgemeingültige Ergebnisse vorliegen und veröffentlicht werden. Es ist aber wahrscheinlich, dass dies noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird.

Man ist also weiterhin darauf angewiesen, individuelle Untersuchungen für sein Projekt durchzuführen, um eine möglichst objektive Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

Dabei stützt man sich auf Wettbewerbsanalysen, Marktuntersuchungen und teils aufwendige Berechnungen, Simulationen und Emulationen.

Der Aufwand, den man betreibt, hängt zwangsläufig auch von der Projektgröße ab. Es ist verständlich, dass man in kleineren Projekten nicht die finanziellen und logistischen Ressourcen aufbringen kann, um eine komplette Emulation des Terminalbetriebes durchzuführen. Es wird nach einfacheren Modellen und Verfahren gesucht, um sich eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Im ersten Teil dieses Berichtes finden sich dazu hilfreiche Anmerkungen.

Da wir gegenwertig verstärkt Anfragen von Intermodalterminals erhalten, wollen wir darauf etwas genauer eingehen.

Es ist offensichtlich, dass die Automatisierung bei dem größten Teil der europäischen Intermodalterminals noch nicht im Fokus steht. Das hat sich in den letzten drei Jahren nicht grundlegend geändert.

Woran liegt diese Zurückhaltung, wo doch eigentlich in allen anderen industriellen Bereichen die Automatisierung stark voranschreitet?

Basierend auf der im vorherigen Kapitel erstellten Checkliste der Ausführungsanforderungen lassen sich genaue Gründe benennen, weshalb es schwierig erscheint, Intermodalterminals zu automatisieren.

Einige davon sind:

- Die IT-Infrastruktur ist nicht ausreichend entwickelt, es werden proprietäre Insellösungen mit betreiberspezifischer Software und nicht dokumentierten Schnittstellen eingesetzt.
- Bestandsterminals kämpfen mit Platzproblemen, dies erschwert die Abgrenzung von Automatikbereichen.
- Es gibt eine große Varianz an Umschlagsgütern, inklusive betreiberspezifischen Trailern und Wechselbrücken. Reine ISO-Seecontainer-Terminals sind nicht der Standard, das erschwert die Automatisierung.
- Begrenzte Budgets und Planungskompetenz der Betreiber erfordern höheren Einsatz von den Herstellern, um eine Automatisierungslösung attraktiv zu gestalten.
- Die Umschlagsgeschwindigkeit ist nur ein begrenzt wichtiges Entscheidungskriterium.
- Die geringere Anzahl von Maschinen erschwert den Einsatz der Automatisierung bei Kranen und bringt keinen personellen Vorteil der Fernsteuerung, wie es bei mehreren Kranen im Seeterminal der Fall ist.
- Der Wunsch nach fertigen und erprobten Lösungen ist groß.

- Entwicklungspartnerschaften mit Herstellern sind eher die Ausnahme. Dies erschwert die Anpassungsentwicklung und verzögert die Einführung von innovativen Lösungen.

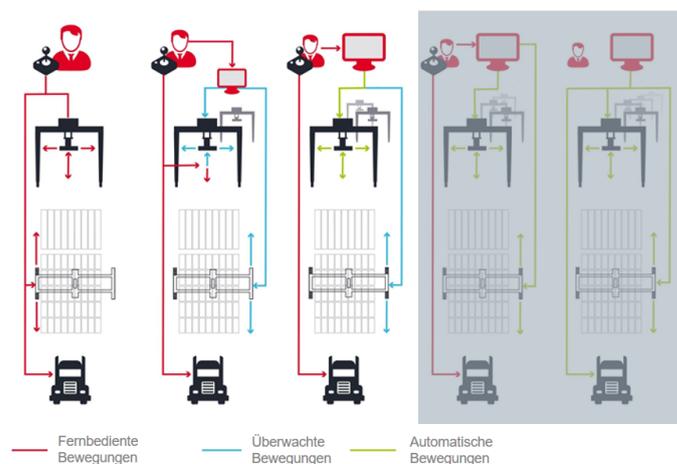
Diese Liste ist sicherlich eine Momentaufnahme und hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Die genannten Argumente sind nicht für alle Fälle anwendbar, und selbstverständlich sind die Gründe für die Entscheidung der Einführung von Automatisierung vielfältiger.

Es zeigt sich jedoch, dass noch einige Hürden zu überwinden sind, um den Einsatz der Automatisierung attraktiver zu gestalten.

Der Einsatz von fertigen Automatisierungsmodulen und deren stufenweise Einführung ist aus unserer Erfahrung von großer Hilfe.

Als sinnvolle Unterteilung zur Bestimmung des Grades der Automatisierung hat sich das folgende fünfstufige Konzept bewährt. In der nachfolgenden Grafik (Bild 1) ist das Konzept dargestellt und es sind auch die gegenwärtigen Grenzen der Automatisierung, speziell für Intermodalterminals, eingetragen.

Verfügbare Automatisierungsstufen für Intermodal



Automatisierungsgrad nach Lagerplatz & Sicherheitskonzept

- › **Stufe 1.1 Fernsteuerung (RC):** Basisangebot
- › **Stufe 1.2 Überwacher RC:** Standard bei TOS Integration
- › **Stufe 2.1 Halbautomatik:** Automatisch im Lager mit überwachter Kranfahrt
- › **Stufe 2.2 Automatisch:** AutoRTG Fahrplan
- › **Level 3 Voll-Automatisch:** Zukünftige Entwicklung

Bild 1: Stufen der Automatisierung im Intermodal Bereich

Für die dargestellten Stufen sind modularisierte Automatisierungslösungen mit dem Kalmar One-Automatisierungssystem in Intermodalterminals außerhalb von Deutschland im Einsatz.

Es bleibt festzuhalten, dass in anderen Rechtssystemen die Einführung von vollautomatischen Intermodalterminals einfacher ist. Im weltweiten Vergleich haben wir hier deshalb ein Defizit.

2.4 Erhöhung der Sicherheit durch Automatisierung

Aus unseren Gesprächen wissen wir, dass das Thema ‚Arbeitssicherheit‘ in den Terminals eine große Bedeutung hat.

Vielfach unbeachtet ist, dass die Automatisierung einen messbaren und positiven Einfluss auf die Sicherheit hat.

Einer der Gründe dafür ist die Verlagerung von Arbeitsplätzen weg von der gefährlichen Maschinenumgebung. Die Arbeitsplätze der Bediener befinden sich nicht mehr auf den Maschinen selbst, sondern im sicheren und komfortablen Bürorumfeld. Neben den ergonomischen Vorteilen werden auch die Risiken durch den Weg zum Arbeitsplatz reduziert. Der Mitarbeiterverkehr auf dem Terminalgelände verringert sich, was wiederum die Anzahl und Schwere der Arbeitsunfälle minimiert. Dadurch reduzieren sich die Ausfallzeiten der Mitarbeiter.

Ein weiterer positiver Faktor ist die Trennung der manuellen und automatischen Arbeitsbereiche. Der Zugang zu potentiell gefährlichen Bereichen ist sicher gesperrt und kann nur durch eine zugangskontrollierte Tür oder ein Tor realisiert werden. Dies dient der Sicherheit sowohl der Terminalmitarbeiter als auch ggf. betriebsfremder Personen, wie z. B. LKW-Fahrern oder Wagenmeistern.

Die Automatisierung führt auch zu einem konstanteren, gleichmäßigeren Betriebsablauf, und das sorgt für eine geringere Abnutzung der Maschinen. Havarieschäden können drastisch reduziert werden.

Diese Einschätzungen werden von verschiedenen Terminalbetreibern geteilt.

3 Einfluss der CO₂-Besteuerung/Energiekosten

Ein weiterer Bereich, in dem der positive Einfluss der Automatisierung nicht sofort erkennbar ist, soll zum Abschluss hier beschrieben werden.

Die 2020 eingeführte CO₂-Besteuerung und der ökologische Umbau unserer Gesellschaft führen dazu, dass in den Entscheidungsprozessen zunehmend die Energiekosten und Kosteneinsparpotentiale durch den Energieeinsatz betrachtet werden. Hier gibt es in den Terminals noch große Potentiale, da viele Maschinen mit Dieselmotoren angetrieben werden.

Die Nutzung dieser Potentiale könnte mit einer Automatisierungsstrategie kombiniert werden, um die lokal entstehenden Emissionen und Energiekosten zu reduzieren.

Im Bereich der Intermodalterminals kann dies durch die schnellere Umstellung des Reachstacker-Betriebs hin zu elektrisch betriebenen RTG-Kranen oder den Einsatz von Kalmar Fast Charge Auto Strads/Shuttle Carrier realisiert werden.

Dabei kann die Effizienz der elektrischen Antriebe von Umschlagsgeräten in automatisierten Terminals auch durch eine weitere Eigenschaft weiter verbessert werden.

Durch den Einsatz eines Energiemanagement Systems zur Spitzenlastreduktion (Peak shaving) lassen sich im Automatikbetrieb weitere Vorteile generieren. Dabei wird das

Energiemanagement des Terminals in die Steuerung der Umschlagsgeräteautomatisierung eingebunden.

Das Ziel ist die Vermeidung von kurzzeitigen Leistungsspitzen des Gesamtterminal-Stromanschlusses. Da die Berechnung der Stromkosten üblicherweise von der tatsächlich entnommenen Anschlussleistung (üblicherweise wird hierzu die 15 min. Spitzenlast/Jahr verwendet) abhängt, kann eine Reduzierung dieser Kenngröße zu erheblichen Betriebskosten Einsparungen führen. Für die Umschlagsgeräte bedeutet dies, dass die Arbeitsaufträge auch unter dem Gesichtspunkt der verfügbaren Energie geplant werden.

Schließlich wird durch den zunehmenden Einsatz von batterieelektrischen Systemen wie z. B. Kalmar Fast Charge Power Pack die Möglichkeit zur lokalen Speicherung von Energie geschaffen. Auch dieses System hilft bei der Reduzierung der Spitzenlast im Terminal (Bild 2).

Schema der Spitzenlastbegrenzung

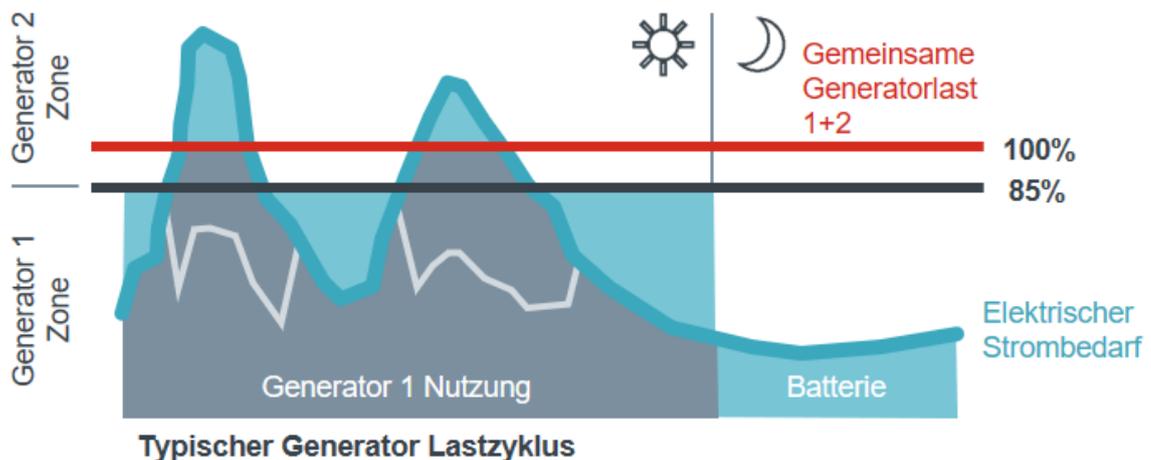


Bild 2: Schema der Spitzenlastbegrenzung

4 Ausblick auf die neue EU-Maschinenverordnung

Die aktuell gültige EU-Maschinenrichtlinie (MRL) wurde zum 20.04.2016 eingeführt und befindet sich gerade in der Überarbeitung durch die Europäische Kommission. Am 21.04.2021 hat die EU-Kommission einen Entwurf zur Anpassung der 2016er MRL vorgelegt.

Die Bewertung dieses Vorschlages durchläuft gerade die Genehmigungsprozesse und soll schließlich in eine neue und verbindlich anzuwendende Maschinenverordnung überführt werden.

Die Gründe zur Überarbeitung sind vielfältig. Es ist aber erkennbar, dass aktuelle technische Entwicklungen im Bereich der Robotik, Digitalisierung, Cybersicherheit, des Maschinenlernens und des Einsatzes von Software allgemein, eine stärkere Berücksichtigung finden sollen.

Es wird damit ein weiterer Schritt unternommen, um unnötige Interpretationsmöglichkeiten

zu minimieren. Inwieweit sich das Konformitätsverfahren selbst ändern wird, bleibt abzuwarten.

All diese Aspekte kommen auch bei automatisierten Containerkränen zum Tragen, und es ist davon auszugehen, dass es damit zukünftig einfacher werden wird, die Konformität im Sinne der MRL herzustellen. Auch das wird zukünftig dazu beitragen können, die Hürden zur Einführung von Automatisierung weiter zu reduzieren.

Zusammenfassung

Im ersten Teil dieses Berichtes wurden die Anforderungen an die Sensorik und die Notwendigkeit der Trennung der Arbeitsbereiche beschrieben. In diesem zweiten Teil liegt der Schwerpunkt in der Beschreibung von Abhängigkeiten, die sich durch die Betrachtung des Gesamtsystems ergeben. Dabei geht es hier um die Erkenntnis, dass die Maschinen nicht isoliert, sondern integriert betrachtet werden müssen.

Die Kenntnis dieses Zusammenhanges ist nützlich, um die praktische Arbeit der Hersteller und Betreiber zu erleichtern.

Der möglichst frühzeitige Austausch zwischen Betreiber und Lieferant hilft, Planungen und Ausführungen reibungsloser zu gestalten. Dieser Austausch sollte weit vor der eigentlichen Beschaffung anfangen, damit ungeplante Mehraufwendungen und Projektverzögerungen vermieden werden.

Die Checkliste der Ausführungsanforderungen hilft dabei das gegenseitige Verständnis in der Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Betreiber zu verbessern. Sie gibt einen guten Überblick über die Komplexität der Anforderungen, die bei einem Automatikprojekt bestehen und verdeutlicht den notwendigen größeren Aufwand, den man betreiben muss im Vergleich zu einer konventionellen Kranbeschaffung, wo alle Parameter in einer technischen Spezifikation beschrieben sind.

Besonders deutlich wird dies bei den Intermodalterminals, die oftmals erst am Anfang der Einführung von Automatisierungslösungen stehen. Hier sind die Ausführungsanforderungen noch einmal anders als bei den Seeterminals, und die Akzeptanz ist noch weiter zu verbessern. Mit dem praxiserprobten Stufenmodell lassen sich solche Hürden überwinden und der richtige Grad der Automatisierung anschaulich festlegen.

Die Automatisierung bietet auch Vorteile, die sich nicht auf den ersten Blick erschließen.

Das ist zum Beispiel mit dem Thema ‚Verbesserte Arbeitssicherheit‘ der Fall. Auch die positiven Effekte auf die ökologische Bilanz des Terminalbetriebs sind nicht offensichtlich erkennbar.

Dabei kann die Automatisierung auch bei der Entwicklung weg vom Dieselantrieb hin zum elektrischen Antrieb, wie z. B. mit Kalmar Zero Emission RTG und Kalmar Fast Charge Portalhubwagen helfen. Mit der situationsabhängigen Ladestrategie lassen sich im Automatikbetrieb die Nachteile des häufigeren Batterieladens minimieren, ohne die Umschlagsleistung zu behindern.

Bei zunehmender Elektrifizierung und Automatisierung der Terminals sind ebenfalls neue Methoden zur Optimierung des Energiemanagements möglich. Hier können gekoppelte Umschlagskonzepte beitragen, die Stromkosten des Terminals zu optimieren.

Die gesellschaftliche Akzeptanz der Automatisierung befindet sich gerade im Umbruch. Durch den vermehrten Einsatz von Automatisierungslösungen, z. B. in der Mobilität, ändert sich die öffentliche Wahrnehmung. Dies findet auch zunehmend Berücksichtigung in den gesetzlichen Vorgaben. Ein gutes Beispiel dafür ist die geplante neue EU-Maschinenverordnung.

Die Ausführungen im Bericht zeigen, dass es sich lohnen kann, als Erster von den Vorteilen der Automatisierung zu profitieren, um auch in der Zukunft den Anforderungen, die an ein Containerterminal gestellt werden, gerecht zu werden. Mit den heute verfügbaren Systemen kann schon jetzt ein zukunftsfähiges Terminal geplant und betrieben werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] Pietryga, U.: Betrieb automatisierter intermodaler Containerkrane. In: Tagungsband 27. Internationale Kranfachtagung: Ruhr-Universität Bochum, 2019, S. 7-36; ISBN 3-89194-226-5 2019
- [2] Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EC, Auflage 2.2 – Oktober 2019. Verfügbar als PDF-Dokument unter <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/38022> (Datum des Zugriffs: 28.03.2022)
- [3] TRBS 1151 Gefährdungen an der Schnittstelle Mensch - Arbeitsmittel - Ergonomische und menschliche Faktoren, Arbeitssystem, Ausgabe: März 2015. Verfügbar als PDF-Dokument unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/TRBS-1151.html> (Datum des Zugriffs: 28.03.2022)
- [4] EmpfBS 1113 Beschaffung von Arbeitsmitteln, Ausgabe März 2021. Verfügbar als PDF-Dokument unter <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/EmpfBS-1113.html> (Datum des Zugriffs: 28.03.2022)

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Lastpendeldämpfung für Turmdrehkrane - Ein erster Schritt zur Kranautomation

Tobias Englert

LIEBHERR

Dr.-Ing. Tobias Englert
Liebherr-Werk Biberach GmbH
Postfach 16 63
88396 Biberach an der Riß

Lastpendeldämpfung für Turmdrehkrane - Ein erster Schritt zur Kranautomation

Der Beitrag stellt eine Lastpendeldämpfung zur Unterstützung der Kranbediener vor. Die Basis für das System bildet eine Pendelwinkelerfassung über eine an der Unterflasche angebrachte inertielle Messeinheit. Zusammen mit einer geeigneten Modellierung der Kranstruktur wird so eine aktive Pendeldämpfung umgesetzt.

Mit Blick auf die zunehmende Automation im Bauumfeld stellt dieses System einen wichtigen ersten Schritt zum hochautomatisierten Kranbetrieb dar. So ist ein eigenständiger Betrieb der Maschine nur denkbar, wenn die Position der Last in Echtzeit bekannt und Bewegungen sicher und damit pendelarm durchgeführt werden können.

1 Einleitung und Einordnung

Der zunehmende Fachkräftemangel, das wachsende Sicherheitsbewusstsein sowie der steigende Kostendruck stellen das Baugewerbe vor große Herausforderungen. Mit Blick auf die Industrie, allen voran die Automobilindustrie, oder den Agrarsektor konnte das Baugewerbe in den letzten Jahrzehnten nicht Schritt halten. Über die letzten 20 Jahre gesehen liegt die jährliche Produktivitätssteigerung der Bauindustrie nur bei einem Drittel der Gesamtwirtschaft und auch die Margen sind verhältnismäßig gering. Darüber hinaus führen nicht nur bei Großprojekten Zeit- und Kostenüberschreitungen zu Problemen und unzufriedenen Kunden [1].

Vor diesem Hintergrund steht die Bauindustrie vor großen Umstrukturierungen, wie sie andere Branchen schon durchlaufen haben. Dabei spielen die zunehmende Digitalisierung und Automation der Abläufe und Bauprozesse eine zentrale Rolle, um den eingangs genannten Herausforderungen begegnen zu können. Im Zuge dessen müssen sich auch die Baumaschinen wandeln, smarter, leistungsfähiger und selbstständiger werden, ohne die Automation dabei als Selbstzweck zu verstehen. Dies gilt insbesondere für Turmdrehkrane als zentrale Logistikpunkte auf der Baustelle.

1.1 Automatisierungslevel von Turmdrehkranen

Mit Blick auf den Turmdrehkran ergeben sich zahlreiche Zwischenstufen zwischen dem klassischen Baukran und einem autonomen Roboter. Dabei ist sicherlich nicht jeder Automatisierungsgrad für jeden Anwendungsfall gleichermaßen sinnvoll. Für eine bessere Orientierung lassen sich die Automatisierungsstufen, ähnlich zur SAE J3016 Definition aus der Automobilindustrie [2], in fünf Stufen einteilen.

Bild 1 zeigt diese Definitionen für den Turmdrehkran aus der Sicht von Liebherr. Während unter Level 0 im Wesentlichen anzeigende und warnende Systeme fallen, greifen Systeme gemäß Level 1 direkt in die Antriebe ein. In diese Kategorie gliedert sich die im Folgenden vorgestellte Lastpendeldämpfung ein. Erfolgt ein Eingriff in mehreren Antrieben gleichzeitig, handelt es sich um ein Level 2-System. Der Kranführer behält bei all diesen Systemen die volle Verantwortung und muss diese dauerhaft überwachen.

Ab Level 3 kann das System in definierten Umgebungen und freigegebenen Situationen selbstständig agieren, ohne dauerhaft durch den Nutzer überwacht zu werden. Erkennt das System eine Grenze, bspw. eine schwer passierbare Engstelle oder ein unerwartetes

Level	Klassischer Betrieb - 0 -	Assistiert - 1 -	Teilautomatisiert - 2 -	Hochautomatisiert - 3 -	Vollautomatisiert - 4 -	Autonom - 5 -
Das System	Greift nicht aktiv in den Betrieb ein. Zeigt lediglich Betriebsdaten & Systemgrenzen auf.	Unterstützt den Fahrwunsch und greift aktiv ein um das Fahrverhalten in Richtung des gewählten Antriebs zu verbessern.	Verfährt mehrere Antriebe selbstständig um eine Zielposition zu erreichen oder einem Zielpfad zu folgen.	Verfährt angehängte Lasten in freigegebenen Situationen in definierten Umgebungen selbstständig.	Versetzt Lasten in definierten Umgebungen selbstständig.	Versetzt eine Last in jeder Umgebung komplett selbstständig
Der Fahrer	Bleibt voll verantwortlich und muss den Kran dauerhaft steuern bzw. überwachen.			Muss das System nicht dauerhaft überwachen aber in Grenzsituationen schnell übernehmen.	Übernimmt den Kran nur außerhalb der definierten Umgebung.	Wird nicht mehr benötigt
Beispiele	Betriebsdateninformationen inkl. Warnungen	Pendelfreies Verfahren einer angehängten Last	Überwachtes Abfahren einer eingelernten Bahn bei angehängter Last	Automatisierter Hub im abgesperrten Bereich Bewegung einer angehängten Last bis 4m über Zielpunkt, Stopp bei Hindernissen.	Bewegung einer Last in (quasi) statischer Umgebung Bewegung einer angehängten Last bis 4m über Zielpunkt	Autopilot zum anheben, versetzen & absetzen von Lasten

Bild 1: Definition verschiedener Automatisierungslevel für Turmdrehkrane

Hindernis, so muss der Nutzer dennoch übernehmen können. Im Gegensatz dazu erledigt ein Level 4-System alle Situationen in einer definierten Umgebung eigenständig. Bei einem autonomen Betrieb gemäß Level 5 bewältigt das System alle Situationen in allen Umgebungen und kann daher Lasten komplett selbstständig versetzen.

1.2 Einordnung der Lastpendeldämpfung & Stand der Technik

Auch wenn die Lastpendeldämpfung selbst als ein Level-1 System zu sehen ist, stellt sie eine zentrale Voraussetzung für den weiteren Automatisierungspfad dar. Eine Last kann nur dann sicher selbstständig verfahren werden, wenn dies pendelfrei geschieht. Auch mit Blick auf die Entwicklung der Teleoperation gewinnt das Assistenzsystem an Bedeutung, da sich so der Wegfall des "Popometers" ein Stück weit kompensieren lässt.

Lastpendeldämpfungssysteme als solche sind in zahlreichen Krananwendungen, wie etwa Brücken- oder Hafenkranen, seit einigen Jahren wohlbekannt und weitverbreitet [6]. Im Bereich der Turmdrehkrane ist dagegen bisher noch kein kommerzielles System am Markt. Auch in der Literatur beschränken sich die meisten Forschungsarbeiten auf Krane im Labormaßstab, siehe bspw. [7, 8]. Nur sehr wenige Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit einem vollwertig einsetzbaren Baustellenkran, siehe bspw. [3,4].

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Zum einen gestaltet sich die Bestimmung der Lastposition aufgrund der fehlenden Energie- und Dateninfrastruktur an der Katze und dem Lasthaken schwierig. Zum anderen erfordert die sehr flexible Stahlstruktur eine entsprechende Berücksichtigung in der Regelung. Nicht zuletzt muss das System als Ganzes schnell und robust in der rauen und unübersichtlichen Baustellenumgebung funktionieren.

Das im Folgenden vorgestellte System zielt darauf ab, genau diesen Herausforderungen zu begegnen. Dabei liegt der Fokus zunächst auf kleineren Schnelleinsatzkränen, da diese von häufig wechselnden Personen und damit öfters auch von ungeübteren Nutzern bedient werden. Der Beitrag geht zunächst kurz auf die Kranmodellierung ein, bevor in Kapitel 3 die Regelungsstruktur erläutert wird. Im Anschluss stellt der Beitrag experimentelle Ergebnisse vor und endet mit einem Fazit.

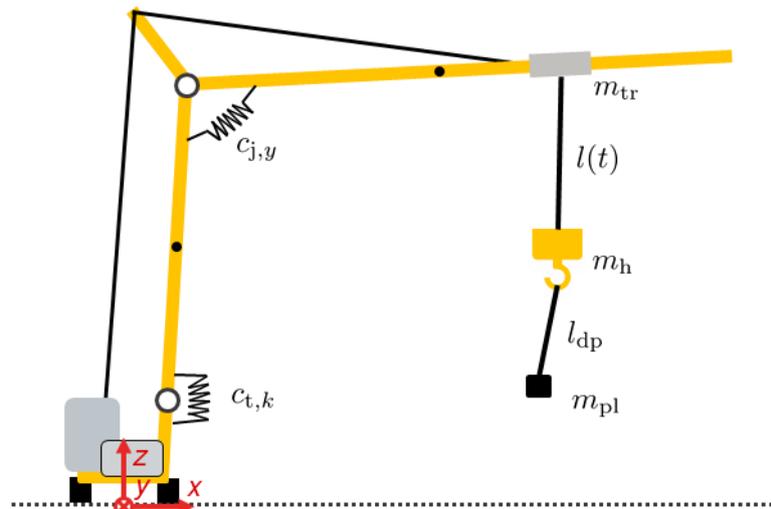


Bild 2: Schematischer Aufbau des Kranmodells

2 Modellierung

Für den Entwurf einer pendeldämpfenden Regelung ist ein entsprechendes Modell der Regelstrecke unerlässlich. Wie frühere Arbeiten zeigen, muss bei der Modellierung des Krans neben der Pendeldynamik auch die Strukturelastizität berücksichtigt werden, um ein performantes System erzielen zu können [4]. Im Folgenden wird der Kran dazu, ähnlich wie in [5] vorgeschlagen, über mehrere Starrkörper approximiert.

Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau des Kranmodells. Die Grundlage stellt die Drehbühne mit dem Gegenballast und einem unteren Turmstück dar. Zwischen diesem unteren und dem oberen Turmstück wird ein in jeder Achse drehbares Gelenk mit den Winkeln $\nu_x(t)$, $\nu_y(t)$ und $\nu_z(t)$ und mit je einer Rotationsfeder der Steifigkeit $c_{t,x}$, $c_{t,y}$ und $c_{t,z}$ angenommen. So kann neben der Turmtorsion auch die Turmbiegung in beide Richtungen abgebildet werden.

Die Verbindung zwischen Ausleger und Turm wird um die y -Achse ebenfalls über ein Drehgelenk mit dem Winkel β und einer Drehfeder der Steifigkeit $c_{j,y}$ modelliert. Um die anderen Achsen wird die Verbindung dagegen als starr angenommen. Der Ausleger selbst wird in radialer Richtung ebenfalls als starr angenommen. In Schwenkrichtung erfolgt die Approximation über einen Euler-Bernoulli Balken. Dadurch wird die Durchbiegung $v(x, t)$ verteilt-parametrisch betrachtet und somit der in Drehrichtung deutlich höheren Elastizität Rechnung getragen.

Die Laufkatze, der Lasthaken und die Last sind über die Punktmassen m_{tr} , m_h und m_{pl} abgebildet. Die Seile zwischen den Massen werden als masselos betrachtet. Während die Seillänge zwischen Laufkatze und Lasthaken variabel über einen Antrieb eingestellt werden kann, wird der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Lasthakens und der Last l_{dp} als konstant betrachtet. Die oberen und unteren Pendelwinkel $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$ und $\phi_x(t)$, $\phi_y(t)$ sind relativ zum Lot definiert.

Die Eingänge in das System $u(t) = [\gamma(\ddot{\gamma}) \ddot{l}(t) \ddot{x}_{tr}(t)]$ stellen die Drehbeschleunigung $\ddot{\gamma}(t)$ sowie die Katz- und Hubseilbeschleunigung $\ddot{l}(t)$ und $\ddot{x}_{tr}(t)$ dar. Jede dieser Größen kann über eine Drehzahlregelung am entsprechenden Umrichter umgesetzt werden. Unter der

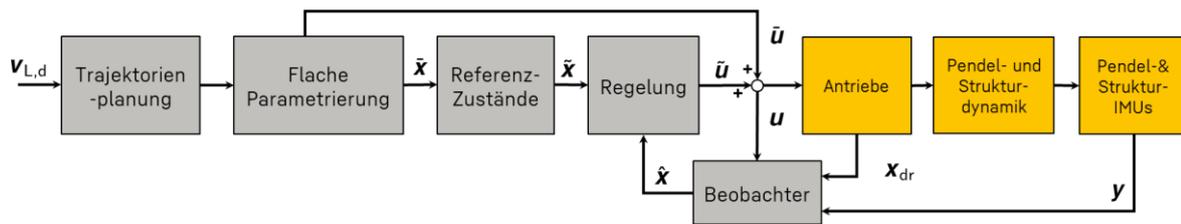


Bild 3: Blockschaltbild der Systemarchitektur

Annahme, dass die Antriebe entsprechend ausgelegt sind und die unterlagerte Drehzahlregelung ausreichend schnell ist, kann daher bei der Modellierung der Struktur- und Pendeldynamik auf eine Betrachtung auf der Drehmomentenebene verzichtet werden. Als freie Koordinaten $q = [v_x, v_y, v_z, \beta, v, \varphi_x, \varphi_y, \phi_x, \phi_y]$ verbleiben somit lediglich die Gelenk- und Pendelwinkel sowie die Auslegerquerbiegung. Über einen Euler-Lagrange Ansatz lässt sich auf dieser Basis mit Hilfe der kinetischen und potentiellen Energien die Systemdynamik herleiten. Zur Berücksichtigung der verteilt-parametrischen Querbiegung $v(x, t)$ kann dabei auf den Ritz-Ansatz zurückgegriffen werden. Für eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle auf die Arbeit [5] verwiesen.

3 Systemarchitektur

Im Sinne einer Lastpendeldämpfung gibt der Nutzer durch eine Auslenkung des Joysticks die Lastgeschwindigkeit vor. Demzufolge muss die Lastpendeldämpfung anhand dieser Signale eine entsprechende Ansteuerung der Antriebe umsetzen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird dazu auf eine Zwei-Freiheitsgrade-Regelung zurückgegriffen. Diese ist in Bild 3 in einem Blockschaltbild dargestellt. Ausgehend von der aktuellen Lastgeschwindigkeit werden zunächst Trajektorien auf die vom Nutzer vorgegebene Sollgeschwindigkeit $v_{L,d}$ berechnet. Mit Hilfe einer flachen Parametrierung können daraus die Vorsteuersignale \bar{u} und die Sollzustände \bar{x} für die unterlagerte Regelung berechnet werden. Neben den Soll- müssen auch die Ist-Zustände bekannt sein. Diese werden mit Hilfe eines Beobachters aus geeigneten Sensorsignalen geschätzt.

3.1 Zustandsbeobachter & Sensorkonzept

Wie eingangs erwähnt, sind Lastpendeldämpfungssysteme in anderen Krananwendungen weitverbreitet. Dementsprechend sind auch einige Pendelwinkelerfassungssysteme am Markt verfügbar. Mit Blick auf die fehlende Stromversorgung und Datenanbindung auf der Laufkatze und dem Lasthaken sowie dem zur Verfügung stehenden Kostenrahmen sind die bekannten Ansätze, wie Seilgyroskope [5], LED Transmitter am Lasthaken oder kamerabasierte Verfahren in der breiten Masse nur schwer umsetzbar.

Aus diesen Gründen wird im Rahmen der Arbeit auf eine IMU (Inertial Measurement Unit) am Lasthaken zurückgegriffen. Der Sensor bestimmt die Beschleunigung und die Drehrate in allen drei Achsen. Er ist über Funk mit der Steuerung verbunden und bezieht die Energie aus einer Batterie. Aufgrund der geringen Datenmengen kann eine ausreichend kurze Abtastzeit stabil mit ausreichend geringer Latenz bei verhältnismäßig geringem Energiebedarf umgesetzt werden.

Zur Bestimmung der Strukturgrößen werden zwei weitere IMUs, eine an der Turm- und eine an der Auslegerspitze montiert. Das Sensorkonzept umfasst somit drei IMUs und lässt sich schnell und mit überschaubarem Kostenaufwand an den Kran anbringen.

Um aus den Messdaten den aktuellen Systemzustand $\hat{\mathbf{x}}$ bestimmen zu können, wird auf einen Kalman-Filter zurückgegriffen. Im Wesentlichen besteht dieser aus zwei Schritten. Zunächst werden der im Zeitschritt k zu erwartende Systemzustand $\hat{\mathbf{x}}_p(k)$ sowie die erwarteten Messwerte $\hat{\mathbf{z}}(k)$ anhand des letzten Systemzustands $\hat{\mathbf{x}}(k-1)$ und eines Modells gemäß

$$\hat{\mathbf{x}}_p(k) = \mathbf{F}(k-1) \hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{G}(k-1) \mathbf{u}(k-1), \quad \hat{\mathbf{z}}(k) = \mathbf{H}(k) \hat{\mathbf{x}}(k) \quad (1)$$

prädiziert. Im nächsten Schritt findet ein Abgleich mit den realen Messungen $\mathbf{z}(k)$ und damit eine Anpassung des geschätzten Systemzustandes

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}_p(k) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{z}(k) - \hat{\mathbf{z}}(k)], \quad \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k) \mathbf{H}(k)^T \mathbf{S}(k)^{-1} \quad (2)$$

statt. Die Systemmatrizen $\mathbf{F}(k)$, $\mathbf{G}(k)$ und $\mathbf{H}(k)$ stellen die System-, Eingangs- und Messmatrix eines diskreten linearen Systems dar. Da das in Kapitel 2 entwickelte Kranmodell stark nichtlinear ist, muss es in jedem Abtastschritt um den jeweiligen Arbeitspunkt linearisiert und diskretisiert werden. Dies führt zur Zeitabhängigkeit der Systemmatrizen. Zwar könnte man über ein Unscented oder Extended Kalman-Filter, siehe bspw. [10,11], auch die nichtlineare Dynamik berücksichtigen, allerdings ist der enorme zusätzliche Rechenaufwand aufgrund der kleinen Winkel und der damit verbundenen geringen Abweichungen nicht gerechtfertigt.

Die Kalman-Matrix $\mathbf{K}(k)$ aus Gleichung (2) errechnet sich über die Kovarianzmatrizen der Zustands- und Messwertschätzung $\mathbf{P}(k)$ und $\mathbf{S}(k)$. Diese hängen von den Systemmatrizen und den Rauschmatrizen des als normalverteilt angenommenen Modell- und Messrauschens ab. Je nach Gewichtung des Rauschens wird eher dem Modell oder der Messung vertraut und somit mehr oder weniger gefiltert. Für eine genauere Beschreibung sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen, siehe bspw. [11].

3.2 Vorsteuerungs- & Regelungsentwurf

Die Regelung ist über einen LQ-Ansatz umgesetzt, siehe bspw. [12]. Dabei wird zur Bestimmung der Reglermatrix \mathbf{K} ein Optimalsteuerungsproblem

$$\min_{\mathbf{u}} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t))^T \mathbf{Q} (\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t)) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) dt \quad (3)$$

uBv. $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$

mit den Gewichtungsmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} auf unendlichem Horizont über die algebraische Riccati-Gleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}$ gelöst. Dies führt auf das Regelgesetz

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}[\bar{\mathbf{x}}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)], \quad \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}. \quad (4)$$

Auch hier wird analog zum Kalman-Filter auf das linearisierte, aber zeitkontinuierliche Streckenmodell mit der Systemmatrix \mathbf{A} und Eingangsmatrix \mathbf{B} zurückgegriffen. Zusätzlich werden allerdings noch die jeweiligen Antriebsgrößen als weitere Zustände berücksichtigt. So können auch Sollgeschwindigkeiten oder Zielpositionen angefahren werden.



Bild 4: Versuchskran Liebherr L1-24

Im Kostenfunktional des Optimalsteuerungsproblems (3) werden neben den Stellgrößen die Abweichungen der Zustandsgrößen zu ihren jeweiligen Referenzwerten $x_d(t)$ über die Gewichtungsmatrizen R und Q quadratisch bestraft. Über die Gewichtungsfaktoren kann das Verhalten der Regelung bestimmt werden. Bspw. kann das Ansprechverhalten gegenüber großen Pendelwinkeln austariert werden.

Die Sollgrößen $x_d(t)$ für die Regelung werden aus einer flachen Vorsteuerung abgeleitet, siehe bspw. [5,13]. Für das umfangreiche Modell aus Kapitel 2 ist es jedoch schwer, den Nachweis der Flachheit zu führen. Selbst wenn dies gelingen würde, wäre die Berechnung der Parametrierung sehr aufwendig und die Trajektorien müssten eine sehr hohe Stetigkeit aufweisen. Um diesen Problemen zu entgehen, wird auf ein starres Kranmodell zurückgegriffen, siehe bspw. [7,9]. Bei diesem Modell stellt die Lastposition einen flachen Ausgang $z = \Psi(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(\alpha)})$ dar, der sich in Abhängigkeit der Zustände sowie einer Anzahl an Stellgrößenableitungen darstellen lässt. Somit können aus dem gewünschten zeitlichen Verlauf der Lastposition $z^*(t)$ direkt die entsprechenden Antriebssignale und die auftretenden Pendelgrößen

$$x(t) = \Psi_x(z(t), \dot{z}(t), \dots, z^{(\beta_z-1)}(t)), \quad u(t) = \Psi_u(z(t), \dot{z}(t), \dots, z^{(\beta_z-1)}(t), z^{(\beta_z)}(t)) \quad (5)$$

bestimmt werden.

Da die unterlagerte Regelung auf dem Mehrkörpermodell aus Kapitel 2 aufbaut und somit weitere Zustände aufweist, müssen die verbleibenden Referenzwerte sinnvoll gewählt werden. Hierbei bietet es sich an, die Ruhelage des Systems zu verwenden. Mit Ausnahme der Winkel ν_y und β ist der Referenzwert somit Null.

Die Zieltrajektorie der Lastposition $z^*(t)$ wird aus den Meisterschaltersignalen über einen Polynomansatz erzeugt. Hierzu wird auf eine Offline-Vorberechnung der Koeffizienten zurückgegriffen, um möglichst effizient die nötige 4-fache Differenzierbarkeit zu erreichen.

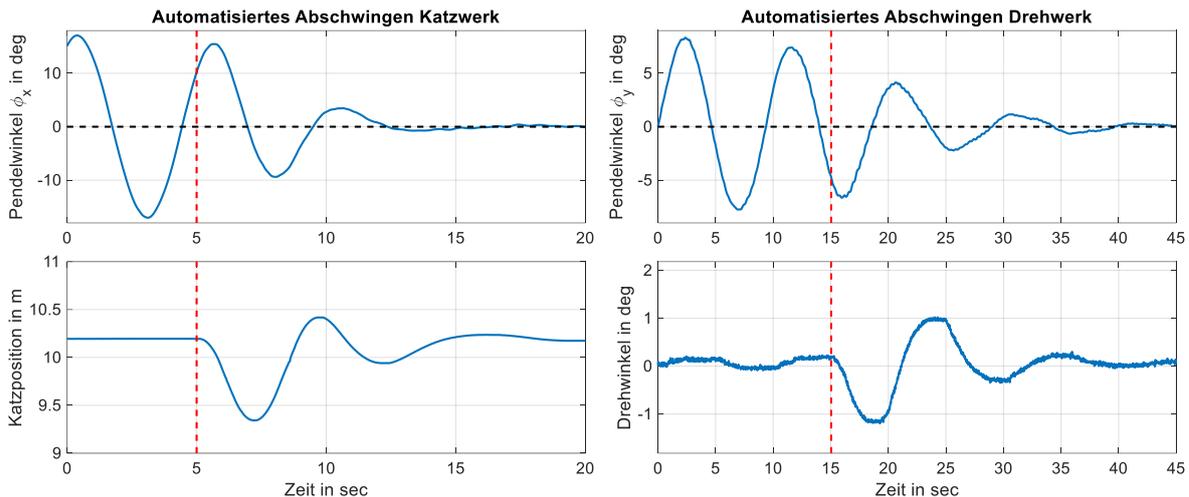


Bild 5: Abschwingversuche im Katz- und Drehwerk bei 12 m Senktiefe

4 Experimentelle Validation

Die vorgestellte Lastpendeldämpfung wurde an einem Schnelleinsatzkran Liebherr L1-24, wie er in Bild 4 zu sehen ist, experimentell umgesetzt und validiert. Dazu wurden drei IMUs am Kran montiert und die in den vorherigen Kapiteln beschriebene Regelung auf einer dSPACE Rapid-Prototyping-Plattform implementiert. Anhand von zwei Szenarien wird im Folgenden die Performance des Systems näher betrachtet.

4.1 Abschwingversuche

Im ersten Szenario ist ein Pendeln vorhanden und die Regelung wird im Laufe der Messung mit dem Ziel, das Pendel zu eliminieren, aktiviert. Bild 5 zeigt die Messergebnisse zweier Abschwingversuche, einmal in radialer und einmal in tangentialer Richtung. Auf der linken Seite ist ein Pendeln in radialer Ebene bei einer Senktiefe von 12 m dargestellt. Wie das Bild 5 zeigt, wird vom Beobachter ein initiales Pendeln mit einer Amplitude von ca. 13° geschätzt. Dies trifft den realen Wert, der mit einem Referenzmesssystem erfasst wurde, sehr genau. Es ist zu erkennen, dass das freie Pendeln fast ungedämpft erfolgt. Nach ca. 5 Sekunden wird die Regelung aktiviert und das Pendeln mit nur zwei Zügen sehr schnell eliminiert.

Auf der rechten Seite von Bild 5 ist ein Abschwingversuch in tangentialer Richtung bei 12 m Senktiefe und einer Ausladung von 25 m zu sehen. Es wird deutlich, dass das freie Pendeln in tangentialer Richtung besser gedämpft wird. Dies liegt an der Nachgiebigkeit der Struktur sowie am Spiel und der Reibung im Kugeldrehkranz. Auch hier ist zu erkennen, dass nach der Aktivierung der Regelung das bestehende Pendeln schnell eliminiert werden kann. Die Abschwing-Performance ist im Drehwerk allerdings stark von der Ausladung abhängig, da die realisierbare Drehbeschleunigung und Drehgeschwindigkeit der Laufkatze mit zunehmendem Abstand zur Drehachse steigen.

4.2 Fahrt mit aktiver Lastpendeldämpfung

Das zweite Szenario ist in Bild 6 dargestellt und beschreibt eine Fahrt mit dauerhaft aktivierter Lastpendeldämpfung. Im Rahmen dieses deutlich praxisnäheren Szenarios

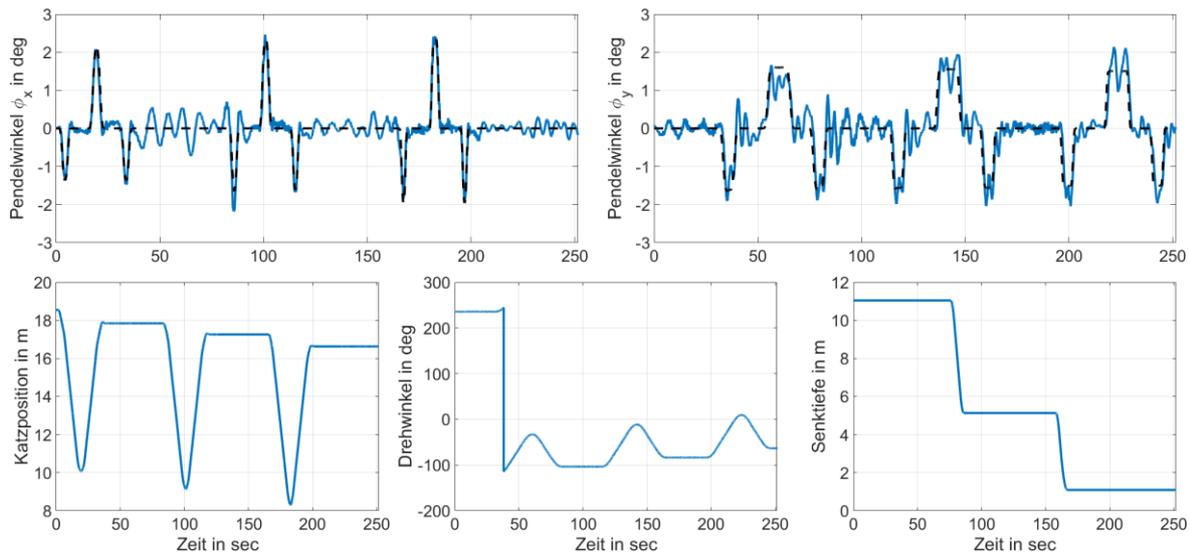


Bild 6: Kranfahrt mit aktiver Lastpendeldämpfung

wurden das Katz- und Drehwerk dreimal abwechselnd mit jeweils einer Richtungsumkehr betrieben. In der Zwischenzeit wurde die Senktiefe verringert. So können die Einflüsse der Senktiefe sichtbar gemacht werden.

Es ist deutlich zu erkennen, dass beim Anfahren und Abbremsen im jeweiligen Werk erwartungsgemäß ein kleinerer Pendelwinkel entsteht als bei der Richtungsumkehr. Dabei stimmt der in schwarz dargestellte Sollwert aus der flachen Vorsteuerung sehr gut mit dem vom Beobachter geschätzten Pendelwinkel überein.

Abgesehen von den Anfahrvorgängen sind die Pendelwinkel unabhängig von der Senktiefe mit Amplituden von weniger $0,7^\circ$ sehr klein. Hierbei gilt es auch zu berücksichtigen, dass jeweils nur ein Antrieb die Fahrfreigabe durch den Nutzer erhalten hat. Sprich, während der Fahrt im Katzwerk war das Drehwerk gesperrt und umgekehrt. Das kleine Restpendeln kann folglich durch eine minimale Auslenkung der Joysticks und der damit verbundenen Freigabe für den Antrieb weiter reduziert werden.

Zusammenfassung

Mit Blick auf den Fachkräftemangel und den Kostendruck im Baugewerbe spielt die Automatisierung und Digitalisierung zusehends eine wichtigere Rolle. Auch der Turmdrehkran muss dieser Entwicklung Rechnung tragen und sich mehr und mehr zu einer automatisierten Materialumschlagsmaschine entwickeln. Ein erster Schritt in diese Richtung stellt die Lastpendeldämpfung als Grundlage für jede automatisierte Lastbewegung dar.

Im Rahmen des Beitrags wurde ein Kranmodell vorgestellt, welches die Kanelastizität mitberücksichtigt. Auf Basis von drei IMUs lässt sich der gesamte Kranzustand inklusive der Pendelwinkel über einen Kalman-Filter schnell und kosteneffizient bestimmen. Die auf dieser Basis entwickelte Zwei-Freiheitsgrade-Regelung mit flacher Vorsteuerung stellt eine performante Lastpendeldämpfung dar, wie die experimentellen Ergebnisse an einem realen Baustellenkran verdeutlichen. In zukünftigen Arbeiten soll das System noch robuster gestaltet und in Richtung der Automatisierung weiterentwickelt werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] Ribeirinho, M. J. et al.: The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. Zürich: McKinsey & Company, 2020
- [2] On-Road Automated Driving (ORAD) committee: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles; April 2021. https://doi.org/10.4271/J3016_202104
- [3] Rauscher, F.; Sawodny, O.: An elastic jib model for the slewing control of tower cranes. IFAC-PapersOnLine Ausgabe 50.1, 2017; 9796-9801
- [4] Bonnabel, S.; Claeys, X.: The Industrial Control of Tower Cranes: An Operator-in-the-Loop Approach. IEEE Control Systems Magazine Ausgabe 40.5, 2020; 27-39
- [5] Thomas, M.; Sawodny, O.: A model to control self-erecting tower cranes with elastic structure. IFAC-PapersOnLine Ausgabe 53.2, 2020; 8947-8952
- [6] Ramli, L. et al.: Control strategies for crane systems: A comprehensive review. Mechanical Systems and Signal Processing Ausgabe 95, 2017; 1-23
- [7] Graichen, K.; Egretberger, M.; Kugi, A.: Suboptimal model predictive control of a laboratory crane. IFAC Proceedings Ausgabe 43.14, 2010; 397-402
- [8] Vaughan, J.; Kim, D.; Singhose, W.: Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics. IEEE Transactions on Control Systems Technology Ausgabe 18.6, 2010; 1345-1358
- [9] Rauscher, F.; Sawodny, O.: Modeling and control of tower cranes with elastic structure. IEEE Transactions on Control Systems Technology Ausgabe 29.1, 2020; 64-79
- [10] Wan, E. A.; Van Der Merwe, R.: The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. Proceedings of the Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium. IEEE, 2000; 153-158
- [11] Bar-Shalom, Y.; Rong Li, X.: Estimation with Applications to Tracking and Navigation, Hoboken, USA: Wiley, 2001
- [12] Vaughan, D.: A negative exponential solution for the matrix Riccati equation, IEEE Transactions on Automatic Control, Ausgabe 14.1, 1969; 72–75
- [13] Hagenmeyer, V.; Zeitz, M.: Flachheitsbasierter Entwurf von linearen und nichtlinearen Vorsteuerungen. at - Automatisierungstechnik, Ausgabe 52, 2004; 3-12

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Krane als Großraumroboter – Integration von smarten Kranen in Produktionsumgebungen mit Personenverkehr

Christoph Bang



Dipl.-Ing. (TU) Christoph Bang
BANG Kransysteme GmbH & Co. KG
Am Alten Bahndamm 11
08606 Oelsnitz/Vogtl.

Krane als Großraumroboter – Integration von smarten Kranen in Produktionsumgebungen mit Personenverkehr

Ein Trend in der Industrie greift und wandelt den Charakter der Prozesse: Die Digitalisierung treibt die Automatisierung voran. Vor allem im Bereich der Intralogistik ist dies deutlich erkennbar. So agieren Werkzeugtransportkrane zunehmend als smarte Großraumroboter. Die Bedienung von Hand weicht dem halbautomatischen oder gar vollautomatischen Betrieb.

1 Einleitung

Der Fachkräftemangel in der Industrie zieht tiefgreifende Auswirkungen nach sich. So ist die nicht abgedeckte Nachfrage nach qualifiziertem Fachpersonal, neben der Erhöhung der Arbeits- und Prozesssicherheit, einer der treibenden Faktoren, wenn es um die Automatisierung geht. Vor allem große und mittelgroße Unternehmen sehen sich gezwungen, in den kommenden Jahren zu automatisieren. Die große Wachstumshoffnung der Industrie liegt weltweit auf kollaborativen Lösungen. Das Potential in diesem Bereich ist enorm. Laut einer Studie des Handelsblatts aus 2021 sind bislang erst zwei Prozent des Marktes erschlossen.



Bild 1: Simulation Porsche Schuler Pressshop, Halle/S.

BANG Kransysteme GmbH & Co. KG arbeitet an integrierten, innovativen Systemlösungen für schienengeführte Intralogistiklösungen (Bild 1). Neben intelligenter Sensorik, die Menschen und Anlagen im Verkehrsbereich der Prozesskrane absichert, geraten auch smarte Dienstleistungen im Bereich Zustandsüberwachung (Condition Monitoring Systems) und vorbeugender Instandhaltung (Predictive Maintenance) im Zusammenhang mit der zugehörigen Vernetzung der Krane im ‚Internet of Things‘ in den Fokus der Betreiber.

2 Integrierte Sicherheit

Um die Sicherheit der Personen im Arbeitsbereich der Prozesskrane sicherzustellen und die Diagnosedeckungsgrade entsprechend der Risikobeurteilung nach EN ISO 14121-1 zu gewährleisten, sind die Krane mit integrierten Sicherheitstechnologien ausgestattet. Diese reichen vom Sicherheitsscanner bis zur zentralen Sicherheitssteuerung nach EN ISO 13849-1 im erforderlichen Performance Level ‚d‘, also mit entsprechender Redundanz an den relevanten Stellen (Bild 2).



Bild 2: Werkzeugwechsel am Pressentisch

Damit werden folgende Prozesse erfasst und überwacht:

- Hubfunktion
- Fahrbewegungen
- Erkennung von Personen und Hindernissen im Verkehrsbereich und am Lastaufnahmemittel

Der Kran reduziert vorausschauend und automatisch die Geschwindigkeit, um drohende Kollisionen oder Überfahrten zu vermeiden. Eine Notfallbremsung ist ebenfalls möglich, da die Scan-Radien am Lastaufnahmemittel so konfiguriert sind, dass der Bremsweg ausreicht, um die Geschwindigkeiten am Hindernis - auch bei unerwartetem Eintritt - vollständig zum Stillstand zu bringen.

3 Kommunikation

Die Kommunikation der Assistenzsysteme untereinander und mit der Umgebung findet auf unterschiedliche, der Produktionsumgebung angepassten Weise statt. Über Industrie-WLAN-Module, Datenübertragung über Schienensysteme an der Kranbahn, Funkstrecken im Gigahertzbereich, integrierte Kamerasysteme oder sichtbares Licht (Bild 3). Über das Dashboard am Leitstand oder auf dem mitgelieferten Tablet Computer sind die Zustände übersichtlich zu erkennen.



Bild 3: Lastaufnahmemittel mit redundantem 3D-Laser und Ultraschall-Sensorik

Die Zykluszeiten werden deutlich kürzer und es existieren nützliche Zusatzfunktionen und eine einfache Einstellbarkeit der Eigenschaften der Krananlage über die SPS sowie ein über ProfiNET verbundenes Netzwerk von hochwertigen Sensoren, die das Performance Level d nach EN 13849-1 erfüllen.

Predictive Maintenance oder auch Condition based Maintenance – also Wartung nur dann, wenn erforderlich - und Anpassung der Anlagenfunktionen per WLAN und Remote Access sind weitere nützliche Features.

Das Zusammenspiel, die Prozessverkettung mit der Produktionsanlage zusammen mit der effizienteren und sichereren Handhabung der Werkzeuge führt zu enormen Einsparungen – bezüglich Zeit und Lagerplatz, vereinfacht die Arbeit für den Bediener und bietet maximale Sicherheit für den Bediener.

Vollautomatische Prozesskrane kommunizieren anwendungsorientiert mit übergeordneter Leittechnik, beispielsweise einem Leitstand, dem Produktionsmanagement oder einem Lagerverwaltungsrechner. Alle Bewegungen des Krans einschließlich Aufnehmen und Absetzen der Last, laufen bei der vollautomatischen Variante programmgesteuert ab. Eine ständige Aufsicht erübrigt sich; manuelle Eingriffe sind auf einen Nothalt oder auf ein Umschalten auf Handsteuerung beschränkt.

Die Entscheidung zwischen einem Standard- oder einem automatisierten Kran wird in vielen Anwendungsfällen vom Durchsatz oder von Aspekten der Arbeitssicherheit bestimmt. Es gibt einen eindeutigen Trend zur Automatisierung, wenn der Kran als wesentlicher Bestandteil der innerbetrieblichen Logistik die Bereiche Produktion und Werkzeuglager miteinander verknüpft. Der Kran hat dann großen Einfluss auf die Effizienz und Flexibilität und somit letztlich auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses.

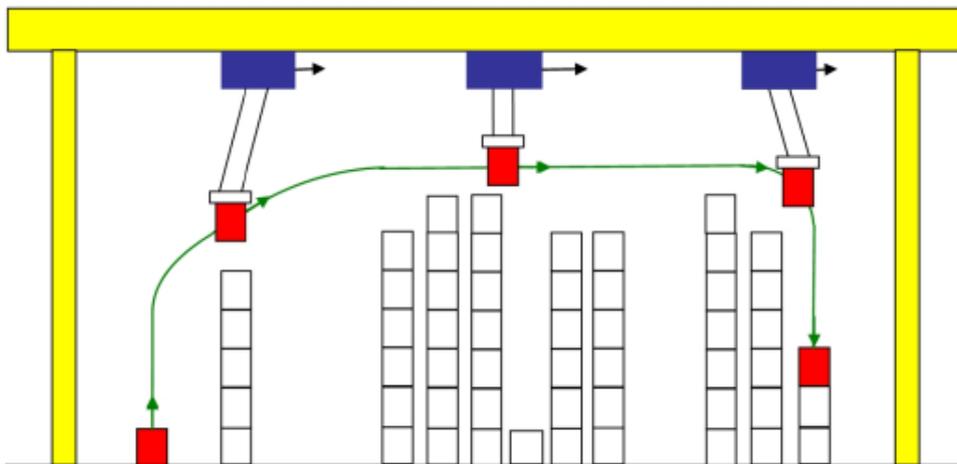


Bild 4: Optimaler Lastumschlagprozess mit Pendelregelung (kamerabasiert)

Art und Form der Lastaufnahmemittel werden durch die Last oder deren Ladungsträger bestimmt. Bei vollautomatisch gesteuerten Anlagen nimmt das auf das Transportgut perfekt abgestimmte Lastaufnahmemittel eine Schlüsselfunktion ein, denn nur dann sind eine automatische Lastaufnahme und die Einhaltung von Positioniertoleranzen möglich (Bild 4).

Um der wachsenden Modellvielfalt in der Automobilindustrie zu begegnen und somit die wachsende Zahl von Werkzeugen in schnellen Umrüstprozessen zu managen, hat sich die Mehrfachstapelung der Werkzeuge im Presswerk als Standard etabliert. Der Trend geht in Richtung ‚Sixpack‘ – die automatische 6-fach Stapelung von Presswerkzeugen bis zu einer Höhe von bis zu 10 m Stapelhöhe.

4 Schnelligkeit und Präzision

Automatiksteuerungen ermitteln selbstständig den kürzesten Fahrweg und optimale Geschwindigkeiten. Modernste Antriebstechnik ermöglicht ein schnelles Beschleunigen und Verzögern unter Rückspeisung der Bremsenergie. Pendeldämpfungssysteme sorgen für präzises und sicheres Positionieren. BANG Krane nutzen zudem alle Potenziale der Automatisierung.

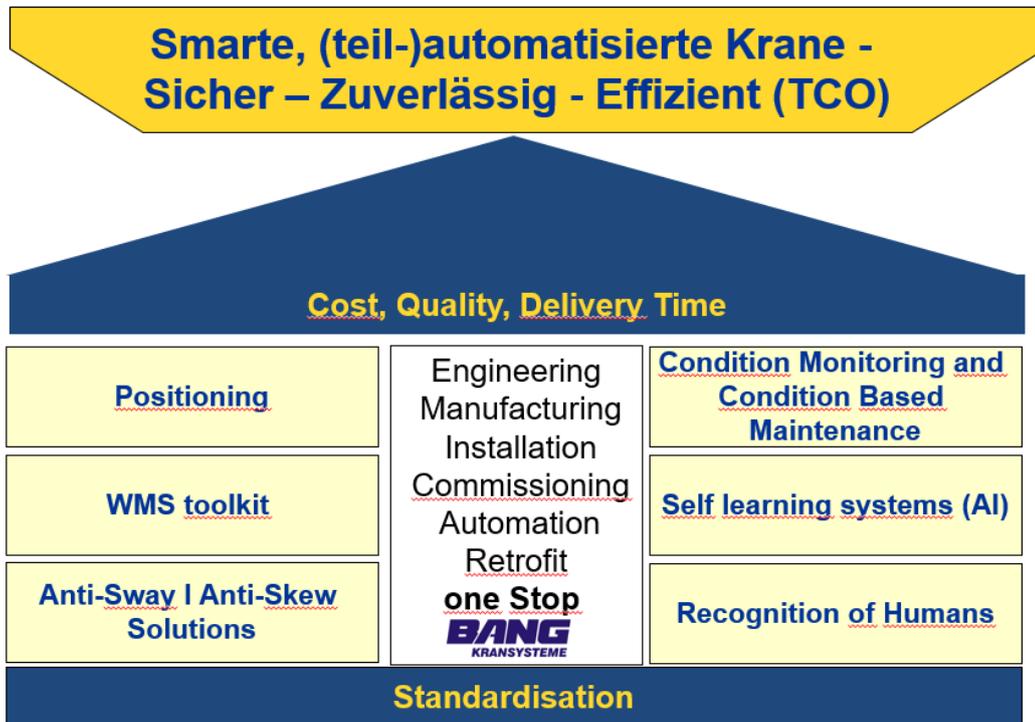


Bild 5: Trends für Prozesskrane

Automatische Prozesskrane können kundenspezifisch für den Einsatz mit Magnetanlagen, Vakuumtraversen oder Werkzeuggreifern abgestimmt werden. Der Einsatz von Lagerverwaltungssoftware ermöglicht zudem die individuelle Abstimmung auf die jeweiligen Logistikprozesse und deren Optimierung (Bild 5).

5 Energieeffiziente Intralogistik

Durch Netzurückspeisung der Bremsenergie sparen Krane Strom im laufenden Betrieb. Mittels neuester Antriebstechnologie gelingt eine Energierückspeisung beim Senken der Last, anstatt Bremswiderstände aufzuheizen. Auch bei Kranen mit Frequenzumrichter-geregelten Antrieben werden Motoren mit Energieeffizienzklassen, die die aktuell höchste IEC-Norm erfüllen, verbaut. Bei der Beleuchtung kommt sparsame LED-Technik zum Einsatz. BANG Krane sparen mit diesem Energiekonzept bis zu 60 % Strom gegenüber herkömmlichen Kranen. Energiesparende Prozesskrane leisten mittels ihres reduzierten CO₂-Ausstoßes einen aktiven Beitrag für den Umweltschutz (Bild 6).

Ziel: Sichere, effiziente Intralogistik-Prozesse

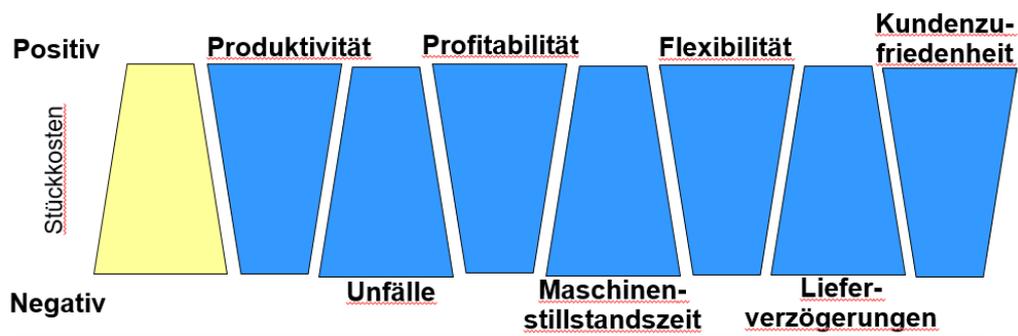


Bild 6: Vorteile automatisierter Krananlagen

6 Hohe Wirtschaftlichkeit

Die frühzeitige Kooperation in der Planung zwischen Auftraggeber und Kranentwickler ermöglicht die optimale Auslegung der Krane. Partnerschaftliche Entwicklung gewährleistet die Erarbeitung maßgeschneiderter Lösungen bei maximaler Erfüllung der Kundenvorgaben. BANG Krane garantieren höchstmögliche Anlagenverfügbarkeit. Sie sind kostengünstig im Betrieb über den gesamten Lebenszyklus: durch niedrigen Energieverbrauch, geringen Verschleiß und Ersatzteilbedarf sowie optimierte Wartungsintervalle.

Zusammenfassung

Die frühzeitige Kooperation in der Planung zwischen Auftraggeber und Kranentwickler ermöglicht die optimale Auslegung der Krane in Bezug auf Funktionalität und Lebensdauer. Prozesskrane der Zukunft automatisierte Bindeglieder in Intralogistikprozessen, zumeist in besonders anspruchsvollen Produktionsbereichen und Risikoumgebungen. Durchdachte Prozesskrane tragen durch niedrige Personalkosten, optimierten Energieverbrauch, geringen Verschleiß und Ersatzteilbedarf sowie optimierte Wartungsintervalle maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit in Unternehmen bei

Durch den Einsatz von fehlersicheren Steuerungen und hochwertiger Sensorik bis zur redundanten Auslegung wird höchste Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit erreicht. Krane müssen in der Lage sein, Personen zu erkennen sobald diese in die Nähe schwebender Lasten kommen. Mit der technisch sicheren Lösung dieser Herausforderungen für die Arbeitssicherheit erweitert sich das Einsatzfeld der Krane als Großraumroboter branchenübergreifend um ein Vielfaches.

Über BANG Kransysteme:

BANG Kransysteme gehört zu den international anerkannten Fachunternehmen für die Planung, Fertigung, Montage und den Service von Prozesskranen, Automatikkranen und Windensystemen mit Traglasten bis 500 t. Über 165 spezialisierte Fachleute, vom Konstruktionsmechaniker bis zum Softwarespezialisten, sorgen bei dem Komplettanbieter für hochwertige Lösungen im Kranbau bei einem Jahresumsatz von mehr als 30 Mio. €.

Die enorme Fertigungstiefe ermöglicht es, die Qualität der Komponenten sicherzustellen, sodass BANG Krane die Transportaufgaben im Industrieprozess noch sicherer, zuverlässiger und effizienter verrichten. BANG Krane erfüllen damit höchste Ansprüche an Leistungsfähigkeit unter Extrembedingungen.

BANG Kransysteme verfolgt das Ziel, immer die beste Kranlösung für die spezifische Anforderung zu entwickeln, um einen schnellen, sicheren und effizienten Materialfluss mit höchster Zuverlässigkeit zu erreichen. Und das schafft echte Wettbewerbsvorteile für die Kunden.

In den letzten Jahren wurde kräftig investiert: BANG Kransysteme bündelt die Unternehmensteile und alle Kompetenzen an einem Standort – dem BANG Kran Campus. Hier entstand einer der modernsten Kranhersteller Deutschlands. Insbesondere die Stahlindustrie, die Automobilindustrie sowie kerntechnische Einrichtungen schätzen die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der BANG-Prozesskrane.

30. Internationale Kranfachtagung Magdeburg

Kran 4.0: Erfolge der Digitalisierung

Bionisch inspirierte Leichtbaukonzepte für Krane und Schiffsentlader

Floris Johannes Piso

Rolf Kamps

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

M. Sc. Eng. Floris Johannes Piso

Prof. Dr.-Ing. Rolf Kamps

Hochschule Luzern

Technikumstraße 12

CH-6048 Horw

Bionisch inspirierte Leichtbaukonzepte für Krane und Schiffsentlader

Die weltweite Marktentwicklung, die Internationalisierung der Unternehmen, die Wahl von Produktions- und Fertigungsstandorten sowie steigende Material- und Energiekosten erfordern einen sparsamen Umgang mit Ressourcen. Der Leichtbau als eine Möglichkeit, Material-, Transport- und Energiekosten zu sparen, ist hier eine der Möglichkeiten, die frühzeitig im Produktentstehungsprozess diese Kriterien berücksichtigt. Dieser Beitrag stellt Ergebnisse einer Untersuchung dar, in der, ausgehend von bionischer Inspiration, Geometrien und Bauweisen für Kranbaukonzepte berechnet wurden. Ziele dieser Untersuchung sind eine Gewichtsreduzierung und die Minimierung der Windlasten bei der Konzeptentwicklung von Kranen und Schiffsentladern für den Güterumschlag in Hafenanlagen.

1 Einleitung

Hafenkrananlagen unterliegen einem harten Wettbewerb. Die Krananlagen sind in der Regel groß und schwer, was die Gesamtkosten zusätzlich durch Material-, Transport- und Montagekosten belastet. Die Schütt- und Massenguttransportschiffe, die neu in den Dienst gestellt werden, haben die Tragfähigkeiten gesteigert. Um kurze Lade- und Liegezeiten zu erreichen, werden immer leistungsstärkere Be- und Entladegeräte benötigt. Große Hafenkrananlagen und Schiffsentlader werden häufig in Nähe ihres Einsatzortes gefertigt und können bis über 600 t wiegen. Dieses enorme Gewicht muss von den Hafenkaimauern gestützt werden. Hier werden Lösungen notwendig, die Leistungssteigerungen bei minimalem Gesamtgewicht der Anlagen realisieren können. In der Regel werden die Portale und Ausleger in Gitterbauweise als Schweißkonstruktionen geplant und in lokalen Stahlbaubetrieben gefertigt. Bild 1 zeigt einen modernen Hochleistungsschiffsentlader der Fa. Bühler AG in Uzwil mit einer Entladeleistung von bis zu 1.300 t/h. Dieser Beitrag stellt einen möglichen Ansatz dar, wie durch Inspiration aus der Natur ein Leichtbaukonzept entwickelt werden kann. Das Konzept ist so ausgelegt, dass eine Blechbauweise in Verbindung mit Zugstangen oder Zuggurtungen realisiert werden kann.



Bild 1: Typischer Aufbau eines Schiffsentlader [Bühler AG Uzwil]

1.1 Leichtbaustrategien

Leichtbau ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft. Die Technische Mechanik als eine der alten Wissenschaften wirkt zusammen mit den Werkstoffwissenschaften, den modernen Fertigungsmöglichkeiten und nicht zuletzt der Rechenleistung heutiger Computer. Sauer [Sau-2018] beschreibt folgende Strategien, wie Leichtbauziele erreicht werden können. Hier werden, um einige zu nennen, der Konzept-, System- oder Funktionsleichtbau, der Formleichtbau oder konstruktive Leichtbau, der Stoffleichtbau oder Fertigungsleichtbau aufgeführt. Klein [Kle-2013] beschreibt darüber hinaus Leichtbauweisen wie die Differentialbauweise, die Integralbauweise, die Integrierende Bauweise, die Verbundbauweise sowie die Vollwand- und Schalensysteme.

1.2 Neuartige Ansätze für den bionischen Leichtbau

In dieser Arbeit werden Leichtbaukonzepte auf Grundideen bionischer Vorbilder hin untersucht. Nachtigall [Nac-2002] unterscheidet die Begriffe technische Biologie und Bionik. Nachtigall schreibt: „Von Bionik kann immer dann gesprochen werden, wenn die Anregungen aus der Natur gekommen sind.“ Im Verlaufe der Untersuchungen wurden, basierend auf Grunduntersuchungen von Maier [Mai-2015], Vorbilder aus der Natur, hier Radiolarien und Diatomeen untersucht und als Ausgangsmodelle für umfangreiche Topologieuntersuchungen verwendet. Dieser Ansatz wurde mit dem Ansatz nach Kappel [Kap-2007] und Mattheck [Mat-2017] verknüpft. Mattheck und Kappel beschreiben einen Ansatz „Denken“ in Seilen“, in dem die Knicklasten bei dünnwandigen Druckstützen mit „Seilen“ erhöht werden können.

1.3 Bionischer Leichtbau aus Sicht der Überlegung: «Denken in Seilen»

Ohne auf die mechanischen Grundlagen zur Bewegung und Verformung von Körpern unter Einwirkung von Kräften hier im Detail einzugehen, kann festgestellt werden, dass ein ideales Seil ein Konstruktionselement zur Übertragung reiner Zugkräfte ist [vergl. Kap-2007 S7ff]. Biege- und Drucksteifigkeit können nicht übertragen werden. Im idealen Zugseil sind reine Zugspannungen homogen über den Seilquerschnitt verteilt. So kann eine optimale Querschnittsbelastung erreicht werden.

Die Steifigkeit von Bauteilen stellt einen Zusammenhang zwischen aufgebrachten Belastungen und den daraus resultierenden Spannungen und Verformungen dar. Hier wird nach aufgebrachtem Lastfall zwischen Zug, Druck, Biegung, Schub (Scherung) und Torsion unterschieden [Löp-2016]. Wird ein schlanker Stab mit Druckkräften beaufschlagt, versagt er meist schon vor Erreichen seiner Materialdruckfestigkeit durch Ausknickung. Hier spielt das Flächenträgheitsmoment des Stabes eine massgebliche Rolle für die Biegesteifigkeit. Das Flächenträgheitsmoment nimmt mit Abstand zur Biegeachse zu. Kreisrunde Querschnitte besitzen eine nach allen Seiten gleiche Biegesteifigkeit. Die Biegesteifigkeit kann durch die Geometrie bei gleicher Querschnittsfläche optimiert oder spezialisiert werden (siehe Bild 2).

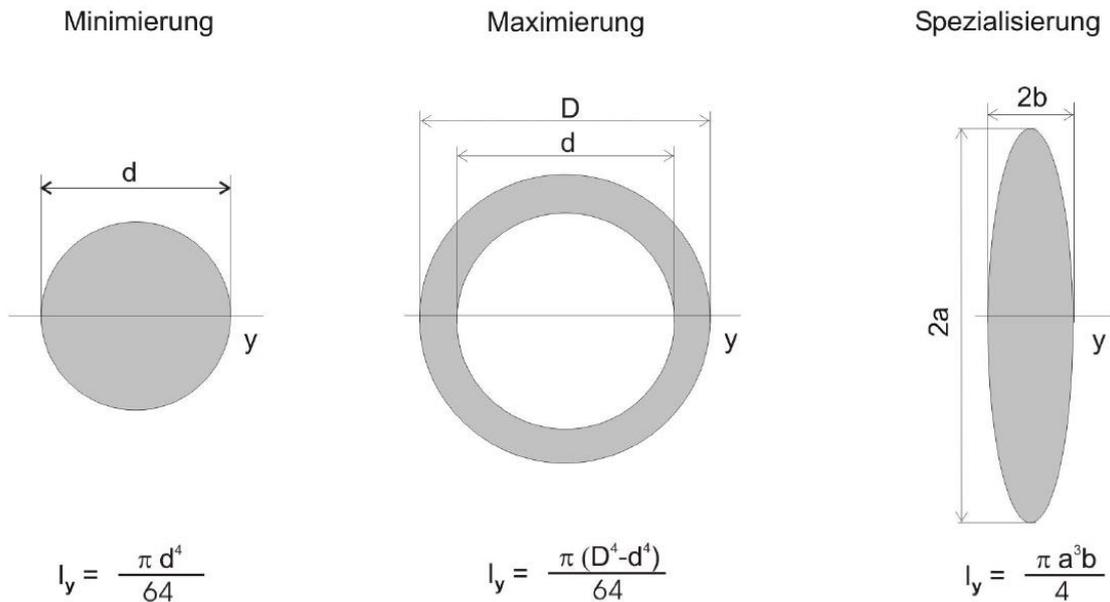


Bild 2: Einfluss der Flächenträgheitsmomente auf die Biegesteifigkeit [Kap-2007]

Rohre versagen in der Regel bei Druck oder Biegung durch eine Querschnittsverflachung. Wird die Querschnittsverflachung durch eine Druckstütze verhindert, muss die Druckstütze vom Querschnitt ausreichend dick sein, um nicht zu knicken. Wird anstelle der Druckstütze ein Zugseil quer zur Lastrichtung gespannt, muss das Seil lediglich gegen Zerreißen ausgelegt werden (Bild 3).

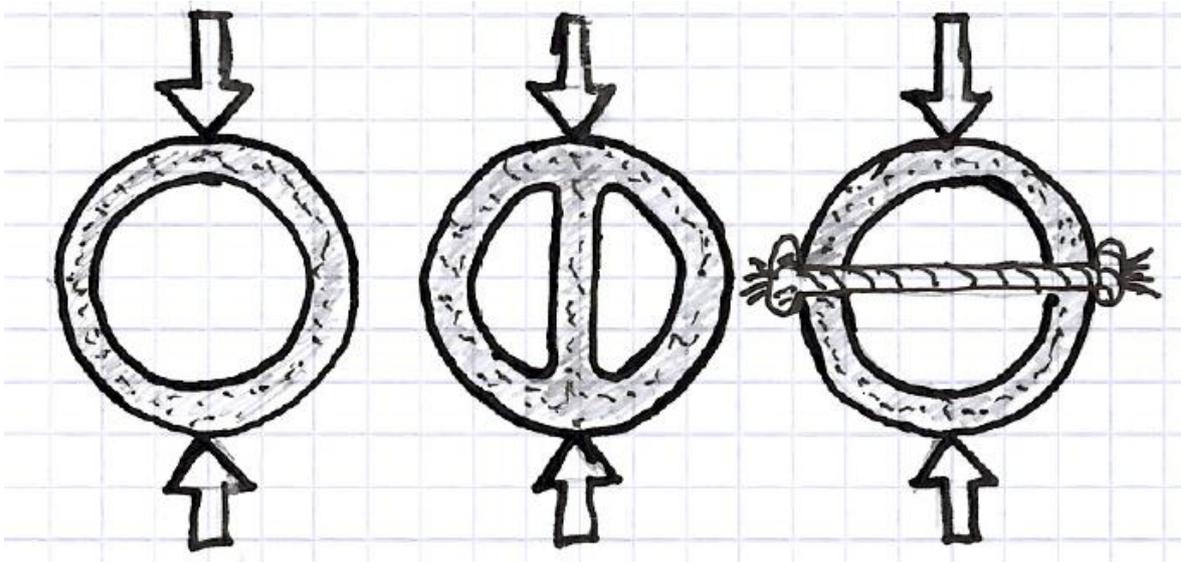


Bild 3: Wirkungsweise eines Zugseiles im Rohrquerschnitt [vergl. Kap-2007]

Dieser Ansatz wurde bei der Gestaltung von schlanken Druckstäben sowohl bei der Auslegung des Portals eines Kranes als auch bei der Gestaltung des Auslegers berücksichtigt.

1.4 Konzeptbildung

Strukturoptimierungen können in fünf Gruppen mit unterschiedlichen Optimierungscharakteristiken eingeteilt werden (Bild 4) [vergl. [Ben-2004], [Sch-2013]. Folgende Gruppen werden in [Sau-2018] als Optimierungsdisziplinen genannt:

- Wahl der Bauweise
- Wahl der Materialeigenschaften
- Topologie Optimierung
- Formoptimierung
- Dimensionierung (sizing)

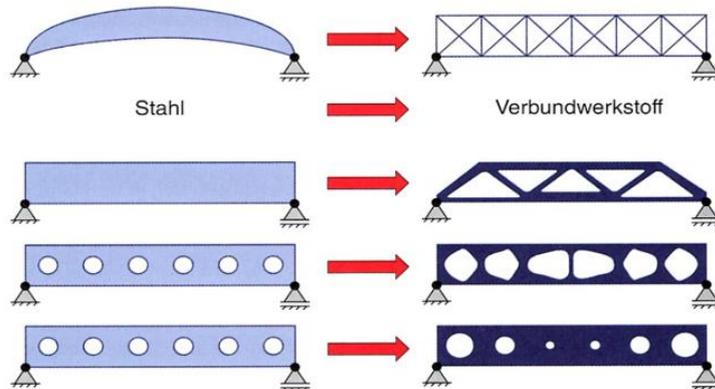


Bild 4: Fünf Optimierungsdisziplinen [vergl. Sau-2018]

Die Forderung, dass das neue Konzept nicht in Profil-, sondern in Blechbauweise herstellbar sein muss, bedeutete, dass die klassische Gitterbauweise verlassen werden konnte. Bei der Topologie Optimierung wurde der Ansatz von Maier (Bild 5) [Mai-2015] als Ausgangsansatz gewählt.

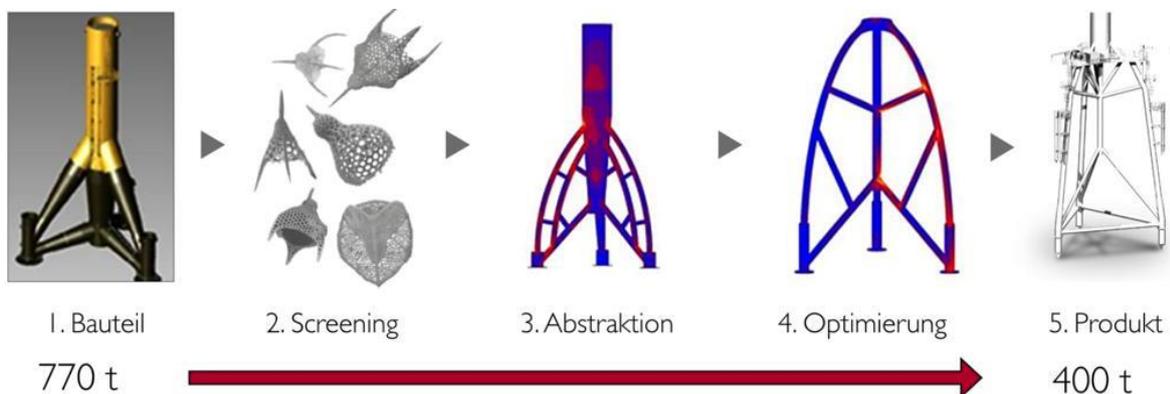


Bild 5: Vorgehensweise bei der Methode Evolutionary Light Structure Engineering ELiSE® [vergl. VDI Richtlinie VDI 6224 Blatt 3]

Maier beschreibt in seiner Dissertation die Vorgehensweise zur Auffindung und Bewertung bionisch geeigneter Vorbilder. Hier werden insbesondere Radiolarien und Diatomeen untersucht. Ausgewählt wurden Radiolarien mit Geometrien, die in etwa den Belastungsfall und die Kräfteinleitungs- und Lagerreaktionskräfte darstellen können.

Die gefundenen Geometrievorschlüsse, welche innerhalb der ausgewählten Radiolarienstrukturen als Suchräume für Topologie Programme zugelassen waren, wurden anschliessend mit dem Ansatz von Kappel und Mattheck kombiniert. Hier werden den dünnen Druckstäben Versagensrichtungen vorgegeben bzw. die Biegesteifigkeit so

ausgelegt, dass eine klare Versagensrichtung gegeben ist. Der Versagensgrund durch Querschnittsverflachung bzw. die weitere Ausknickung wurde dann aber durch Zugseile verhindert. So entstand ein Konzept aus dünnen Druckstäben mit Zugseilen.

Zur Topologie Geometriefindung wurden die Softwareprogramme der Autodesk Fusion Generative Design, Topopt (DTU) und Ansys angewendet und die Ergebnisse verglichen.

1.4.1 Vorgehen bei der Betrachtung des Portals

Wie bereits beschrieben, basiert die Vorgehensweise darauf, dass das natürliche Vorbild mit einer Topologie Optimierung vereint wird. Als Ausgangsgeometrie wurden nur die Strukturelemente der Eukaryoten verwendet, die für einen spezifischen Lastfall relevant sind. Dafür wird in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum eine Radiolarie oder Diatomee als Vorbild hinterlegt. Der Algorithmus der Topologie Optimierung versucht, basierend auf den Lagerungen und Lasten, sich dem natürlichen Vorbild anzunähern. Dabei wird ein Schärfegrad λ eingeführt, welcher die Detailgenauigkeit des natürlichen Vorbildes darstellt [Mai-2015].

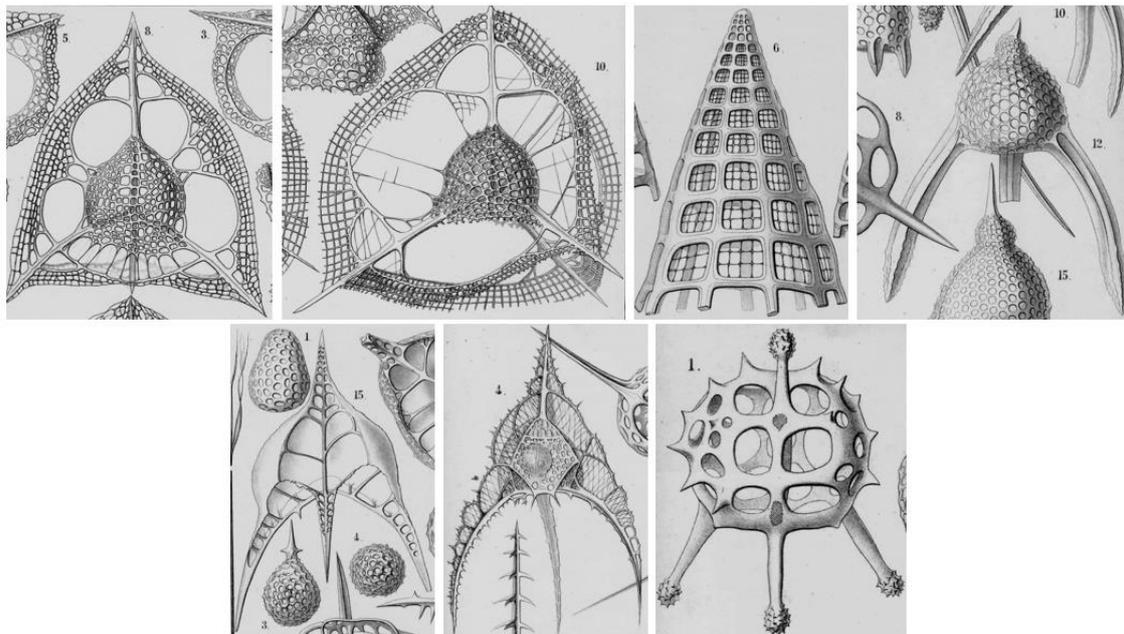


Bild 6: Wirkungsweise oben, von links nach rechts: *Clathrocorys murrayi*, *Clathrocorys teuscheri*, *Plectopyramis dodecomma*, *Lychnocanium fortipes*; unten, von links nach rechts: *Pteroscenium pinnatum*, *Pteroscenium arcuatum*, *Tripospyris capitata* [Bio-2020]

Da für das Screening keine Datenbank vorhanden ist, wird auf Zeichentafeln von Ernst Haeckel zurückgegriffen (Bild 6). Dabei wird vor allem darauf geachtet, dass die Radiolarienstruktur nutzbar für die Konstruktion des Portals, Auflager- und Kraft-einleitungspunkte ist.

Das Ergebnis der Simulation liefert die Bereiche der Radiolarien, die für den Lastfall benötigt werden. Auf diese Weise wird das Vorgehen von Maier näherungsweise kopiert. Die Darstellung (Bild 7 links) zeigt auf, wie hoch die Relevanz der einzelnen Bauteilbereiche im Hinblick auf die Belastung sind. Aus den Ergebnissen werden durch Abstraktion Strukturen entwickelt, die sich in Blechbauweise darstellen lassen (Bild 7, rechts).

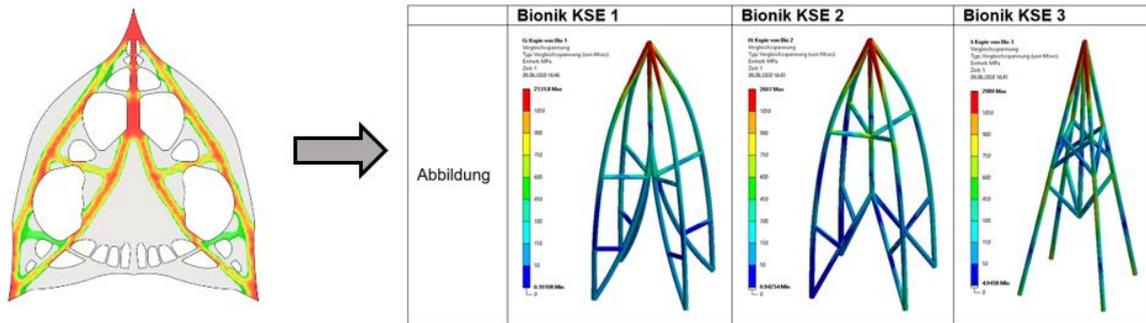


Bild 7: Entwicklung der Portal Geometrie [Pis-2020]

Diese Konzepte wurden dann mit dem Ansatz von Kappel und Mattheck, wie bereits erwähnt, erweitert. Den Druckstäben wurde eine Versagensrichtung vorgegeben und dort, wo möglich, wurden Zugseile verwendet. Abschließend wurde das gesamte Bauteil mit einer Spannungsanalyse mit dem Softwareprogramm Ansys berechnet.

1.4.2 Vorgehen bei der Betrachtung des Auslegers

Analog wurde der Ausleger betrachtet. Dies bedeutet, dass für den Ausleger nach natürlichen Vorbildern mit einem minimalen Breite- zu Längenverhältnis gesucht werden muss (Bild 8).



Bild 8: Bionische Vorbilder für den Ausleger [Hae-2015]

Die Simulationen der Hauptspannungsvektoren zeigen die Zug- und Druckbelastungsrichtungen der Diatomeen und des Kalkschwammes unter der Berücksichtigung des adaptierten Maximallastfalles (Bild 9). Für alle Simulationen wird deutlich, dass die Zugspannungen jeweils an den Rändern gegenüber zur Belastungsrichtung dominant sind. Die Diatomee *Triceratium moronense* ist im Vergleich zu den anderen Modellen zugdominant. Die Hauptspannungsvektoren in Zugrichtung überwiegen, wodurch dieses natürliche Vorbild am besten zum Kriterium der Zug- und Druckverteilung passt. Aus der Topologie Optimierung wurde wie beim Portal eine Blechkonstruktion abstrahiert und anschließend mit der Software Ansys eine Spannungsanalyse durchgeführt.

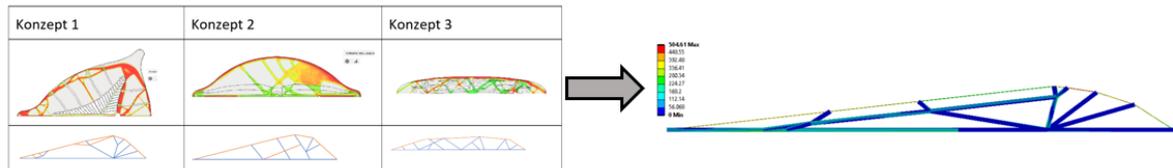


Bild 9: Entwicklung der Auslegergeometrie [Pis-2020]

Die Geometrie wurde hinsichtlich Windlast (Oberfläche) und Gewicht optimiert. Hierzu wurden Evolutionsalgorithmen eingesetzt.

2 Ergebnisse

Sowohl für das Portal als auch den Ausleger gelten Restriktionen, die eine Adaption der Geometrievorschläge berücksichtigen müssen. So sind die Bauteilabmessungen, die Aufnahme von Hochleistungsförderelementen, die Beweglichkeit in Hafenanlagen, die sogenannten Kick- und Lupfbewegungen und viele andere Anforderungen zwingend einzuhalten. Dennoch konnten mögliche Konzeptvorschläge entwickelt werden. Neben den klassischen Ansätzen aus dem Stahlbau wurden auch Ansätze aus dem Bereich der Architektur untersucht [Kni-2019]. Knippers untersucht verzweigte Tragstrukturen nach Vorbildern von Baumstrukturen.

2.1 Ergebnisse für das Portal

Als Konzept konnte eine einfache Blechkonstruktion entwickelt werden. Die Rohre sind in Schalenbauweise mit Distanzhaltern dem Aufbau von Bambushölzern nachempfunden [vergl. hierzu Kappel 2007].

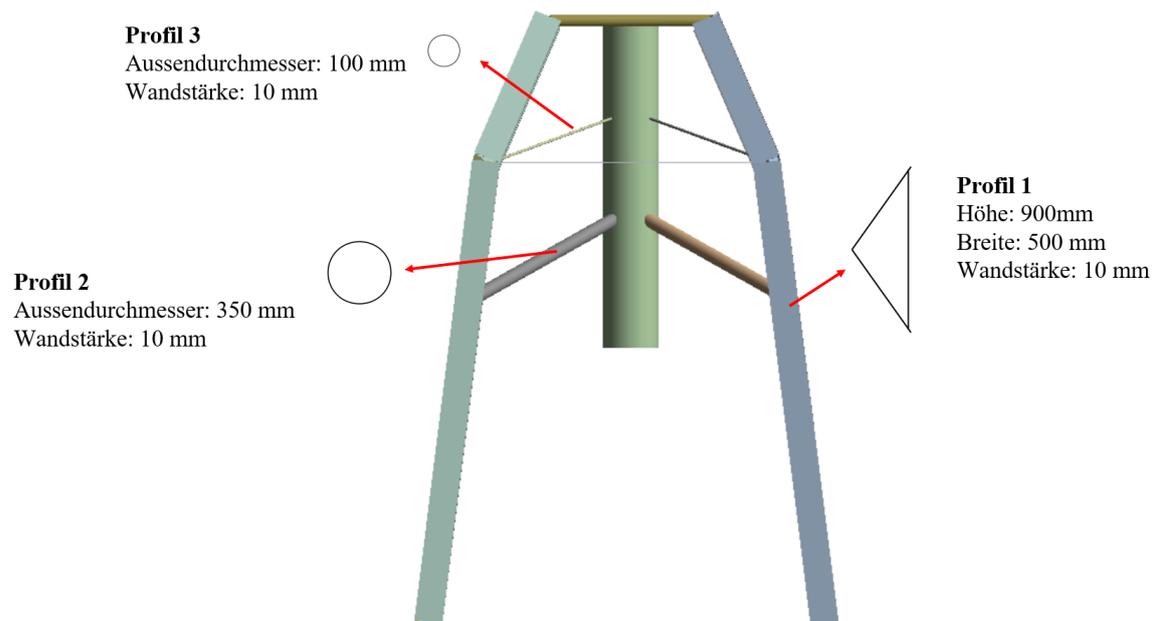


Bild 10: Profilquerschnitte eines Portals nach bionischem Vorbild [Pis-2020]

Die Portalstützen sind Blechkonstruktionen mit der Entwicklung von Knickstäben zu Druckbögen. Seile verhindern das Ausbeulen, die Tragfähigkeit und Steifigkeit können so deutlich erhöht werden (Bild 10).

2.2 Ergebnisse für den Ausleger

Analog zum Portal wurden ebenso für den Ausleger einfache Blechbauweisen entwickelt. Auch hier sind die Rohrquerschnitte dem Aufbau von Bambushölzern nachempfunden. Der untere Teil des Auslegers ist ein Druckbogen. Die Zugkräfte werden über Seile aufgenommen. Eine Besonderheit bei diesem Konzept ist, dass anstelle der Seilabspannung des Druckbogens das Gewicht des Horizontalförderers verhindert, dass der Druckbogen in die vorgegebene Versagensrichtung ausbeulen kann (Bild 11).

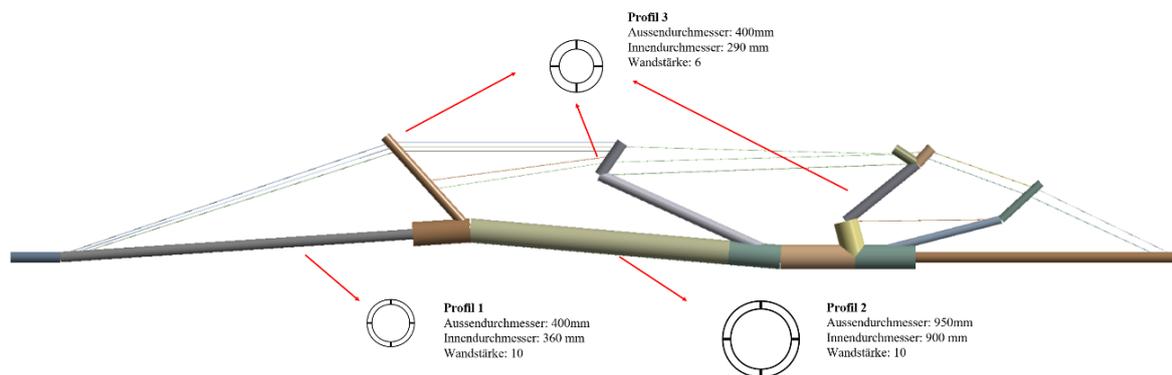


Bild 11: Profilquerschnitte eines Auslegers nach bionischem Vorbild [Pis-2020]

3 Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

Bei dem vorliegenden Beitrag handelt es sich lediglich um eine Konzeptbetrachtung. Als Werkstoffe wurden die Stahlsorten S235 und S355 betrachtet. Es wurde mit einer Sicherheit $\geq 1,6$ gerechnet. Die ansonsten im Kranbau üblichen Sicherheiten und Beiwerte blieben weitestgehend unberücksichtigt. In dieser Konzeptstudie sollte überprüft werden, ob sich mit bionischen Leichtbaukonzepten Gewichtsreduzierungen erzielen lassen. Hinzu kommen Forderungen nach der Herstellbarkeit und Materialvorgaben. Das Konzept sollte nur Bleche und Seile bzw. Zugstangen beinhalten. Die Geometrievorschlüsse aus den Topologie Untersuchungen lassen sich ohne Abstraktion und Anpassung auf herstellgerechte Fertigungsmethoden eines Stahlbaus nicht herstellen. Hier müssen herstellgerechte Varianten entwickelt und erneut berechnet werden. Gegenüber der Ursprungsvariante lassen sich bei den bereits genannten Einschränkungen der Vorgehensweise bei den Berechnungen in Summe fast 50 % des Stahlbaus an Gewicht einsparen. Auch die Windlastfläche konnte reduziert werden. Hinzu kommt, dass mit der Gewichtsreduktion des Auslegers auch das Gegengewicht reduziert werden kann. Erste Anzeichen, dass die Spannungsschwankungen zwischen maximalen und minimalen Bauteilspannungen kleiner werden, konnten mit dem bionischen Ansatz beobachtet werden, das ist aber noch zu verifizieren. Auf Grundlage dieser Konzeptvorschlüsse sind in weiteren Arbeiten, Konzepte und Kranbaukonstruktion zu entwickeln, die dann mit den üblichen Kransicherheiten berechnet werden müssen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass bionisch inspirierter Leichtbau ein großes Potential aufzeigen kann. Allerdings sind die Topologie Vorschläge in herstellbare Konstruktionen zu übersetzen. Die Topologie Software Topopt (DTU) erwies sich als geeignetes Werkzeug für so große Bauteilabmessungen. Ein Hochleistungsschiffsentlader ist bis zu über 30 m hoch und kann eine Auslegerlänge von über 40 m erreichen. Mit dem Topologie Programm Autodesk Fusion Generative Design konnten hier keine verwertbaren Geometrie vorschläge gefunden werden. Die Erweiterung des Ansatzes von Maier mit dem Konzept von Kappel (Denken in Seilen) bringt neue Gestaltungsansätze, die so nicht über die Berechnungsprogramme gefunden wurden. Werden die Bauteile sinnvoll in herstellbare Bauteilgeometrien übersetzt und mit weiteren bekannten Gestaltungsvorschlägen der Bionik ergänzt, wie zum Beispiel die Ausführung der Druckbögen nach dem Prinzip des Bambus oder Schachtelhalms, können erhebliche Gewichtseinsparungen erzielt werden. Auch lassen sich die Forderungen seitens der Materialvorgaben, eine Bauweise nur aus Blechen und Seilen (Zugstangen) ohne die Verwendung von Profilen umsetzen. Diese Arbeit ist jedoch nur als Grundlagenbetrachtung zu verstehen, in weiteren Arbeiten müssen die Konzeptvorschläge nach dem Regelwerk für Kransicherheiten überprüft werden. Bild 12 stellt den gesamten Konzeptentwurf vor.

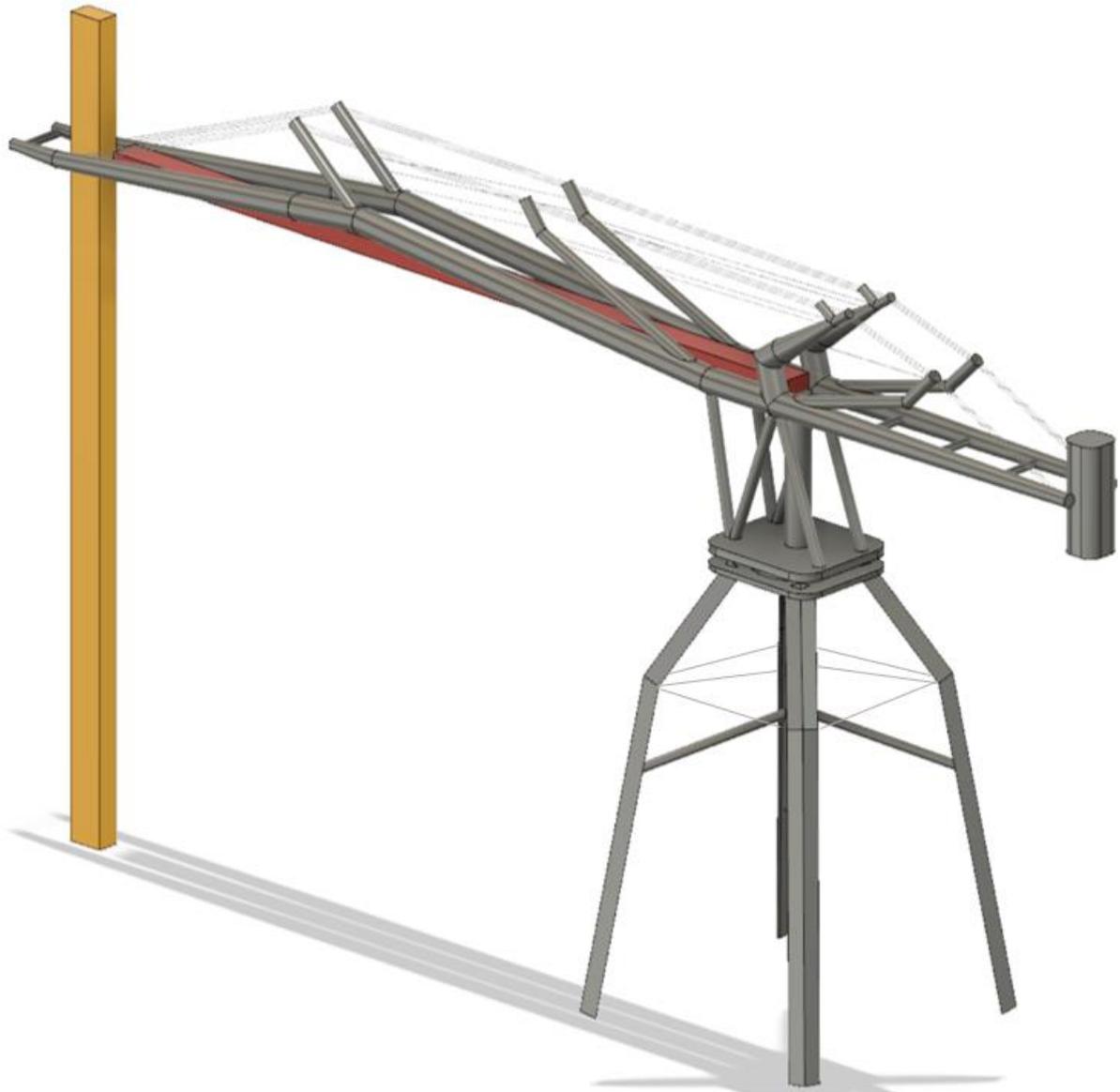


Bild 12: Gesamtkonzeptentwurf eines Hochleistungsschiffsentladers, entwickelt nach bionischem Vorbild [Pis-2020]

Quellenverzeichnis:

- [Ben-2004] Bendsoe, M.P., Sigmund, O.: *Topology Optimization (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2004
- [Bio-2020] Biolib.de, Stand 2020, *LEGION III ó NASSELLARIA - Plates 51 to 98*
- [Ham-2015] Hamm, C.: *Evolution of Lightweight Structures Analyses and Technical Applications*; Heidelberg New York London: Springer, 2015
- [Hae-2013] Haeckel, E.: *Kunstformen der Natur* Norderstedt: Vero-Verlag 2013
- [Hae-2019] Haeckel, E.: *Kunstformen der Natur Tafel 31 Calocyclus*; München: Prestel Verlag 2019
- [Kap-2007] Kappel, R.: *Zugseile in der Natur (Wissenschaftlicher Bericht FZKA 7313)*; Forschungszentrum Karlsruhe, 2007
- [Kle-2013] Klein, B.: *Leichtbaukonstruktion Berechnungsgrundlagen und Gestaltung (10. Auflage)*; Springer Vieweg, 2013
- [Kni-2019] Knippers, J.; Schmid, U.; Speck, T.: *Bionisch Bauen - Von der Natur lernen*; Basel: Birkhäuser, 2019
- [Läp-2016] Läßle, V.: *Einführung in die Festigkeitslehre (4. Auflage)*; Springer Vieweg 2016
- [Mai-2015] Maier, M.: *Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau (Dissertation)*; Universität Bremen, 2015
- [Mat-2017] Mattheck, C.: *Die Körpersprache der Bauteile. Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur*; Karlsruher Institut für Technologie, 2017
- [Pis-2020] Piso, F.: *Entwicklung und Verifizierung einer Leichtbaukonstruktion für einen kontinuierlichen Schiffsentlader mit Trogkettenförderer*; Masterthesis, Hochschule Luzern 2020
- [Nac- 2002] Nachtigall, W.: *Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2002
- [Sau-2018] Sauer, A.: *Bionik in der Strukturoptimierung. Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau (1. Auflage)*; Vogel, 2018
- [Sch-2013] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [VDI 2017] VDI 6224 Blatt 3: *Bionik – Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2017

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

AEGIS - Innovative autonome land- und schiffsgebundene Cargo Handling Systeme

Stefan Krause
Peter Kaufmann
Mathias Klinger
Odd Erik Mørkrid
Janne Suominen
Pia -Liisa Vuorela



Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Krause
(Referent)

Institut für Strukturleichtbau und
Energieeffizienz gGmbH

Limbacher Str. 56

09113 Chemnitz, Deutschland



Dr.-Ing. Peter Kaufmann

Institut für Strukturleichtbau und
Energieeffizienz gGmbH

Limbacher Str. 56

09113 Chemnitz, Deutschland



Dr.-Ing. Mathias Klinger
Institut für Strukturleichtbau und
Energieeffizienz gGmbH
Limbacher Str. 56
09113 Chemnitz, Deutschland



Odd Erik Mørkrid
SINTEF Ocean
Otto Nielsens veg 10
7052 Trondheim, Norwegen



Janne Suominen
MacGregor Finland Oy
Hallimestarinkatu 6
20780 Kaarina, Finnland



Pia -Liisa Vuorela
Cargotec Finland Oy
Porkkalankatu 5
00180 Helsinki, Finnland

AEGIS - Innovative autonome land- und schiffsgebundene Cargo Handling Systeme

Gegenstand des internationalen Forschungsprojektes AEGIS ist die Entwicklung eines zukünftigen, nachhaltigen, wettbewerbsfähigen wassergebundenen Transportsystems für Europa. Ziel ist die Integration neuer Innovationen aus dem Bereich des vernetzten und automatisierten Verkehrs (CAT), unter Einbeziehung vielfältigerer Schiffsgrößen und flexiblerer Schiffssysteme, automatisierter Cargo-Handling-Systeme, Häfen und Kurzstreckenseeshuttles, standardisierter Ladeeinheiten sowie neuer digitaler Technologien. Eine Schlüsselrolle spielen dabei innovative, autonome land- und schiffsgebundene Cargo-Handling-Systeme, die eine signifikante Optimierung der Effizienz und damit der Wettbewerbsfähigkeit wassergebundener Transportsysteme ermöglichen.

1 Einleitung und Motivation

Die Europäische Union [1] und die norwegische Regierung [2] haben die Bedeutung von wassergebundenen Transportsystemen als die Grundlage für ein nachhaltiges Wachstum in Europa erkannt. Gemäß dem Whitebook der EU [3] sollen bis 2030 30 % des Straßengüterverkehrs über 300 km auf die Schiene oder das Wasser verlagert werden und bis 2050 mehr als 50 %. Bislang konnte dieses Ziel nicht ansatzweise erreicht werden (siehe Bild 1). Im Zeitraum 1995 bis 2016 stieg der Anteil des Straßenverkehrs an den Intra-EU-Tonnenkilometern von 45 % auf 49 %, während der Anteil des Kurzstreckenseeverkehrs von 33 % auf 32 % sank. Der Binnenverkehr verzeichnete einen leichten Rückgang von 4,3 % auf 4,2 %. Der Gesamtfrachtverkehr nahm um 29 % (Tonnenkilometer) zu.

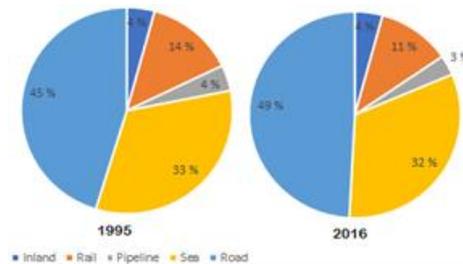


Bild 1: Darstellung der statistischen Verteilung des Transports auf die unterschiedlichen Transportträgerformen für die Jahre 1995 und 2016 [Quelle EU Statistical Yearbook 2018]

	 vs 
Price	
Timeliness	
Transport time	
Flexibility	
Environment	
Frequency	
Security controls	

Bild 2: Vergleich zwischen den Hauptmerkmalen straßengebundenen und wassergebundenen Transports [4]

Bild 2 [4] veranschaulicht, warum der Kurzstreckenseeverkehr derzeit nicht mit dem Lkw konkurrieren kann. Der Schiffsverkehr ist im Allgemeinen billiger, kann im Vergleich zum Lkw schwere Lasten und mehr Tonnage transportieren und ist umweltfreundlicher. Auf der anderen Seite bietet der Lkw-Transport eine bessere Servicequalität und ist auf kurzen Strecken flexibler.

Hauptziel des AEGIS-Projekts ist die Verlagerung des Straßentransports auf die Schifffahrt, auf der Grundlage des zu entwickelnden, grünen nachhaltigen multimodalen Wassertransportsystems, um Staus und Umweltverschmutzung auf den Straßen zu reduzieren.

Transport auf dem Wasser kann sehr energieeffizient sein, insbesondere durch den Einsatz neuartiger Schiffstypen mit emissionsfreien bzw. emissionsarmen Antriebssystemen, wie z. B. elektrische Batterien, Brennstoffzellen oder im Bedarfsfall hoch effiziente Verbrennungsmotoren unter Nutzung alternativer Brennstoffe (E-Fuels).

In der Vergangenheit konnte ein Trend hin zu immer größeren Schiffen verzeichnet werden, getrieben von der Maxime, die Energie- und Betriebskosten auf ein Minimum zu reduzieren. Dies führt jedoch auch zu einer Einschränkung der durch diese Schiffe belieferten Terminals, einer Erhöhung der Kosten und Größe dieser Terminals und verringert die Flexibilität der Dienste, indem die Frequenz verringert und eine Geschwindigkeit für alle Ladungen auf einem Schiff fixiert wird. Das AEGIS-Projekt strebt die Konzeptentwicklung an, basierend auf mehr und kleineren Schiffen, die eine Erhöhung der Frequenz, eine Differenzierung der Geschwindigkeiten, eine Senkung der Terminalkosten und eine Verkürzung der Hafenzeiten im Vergleich zu den aktuell im Einsatz befindlichen größeren Schiffen ermöglichen. Mehrere kleinere Schiffe erhöhen auch die Zuverlässigkeit und Belastbarkeit wassergebundener Transportsysteme. Der Ausfall eines Schiffes hat kaum Auswirkungen auf die Transportkapazitäten. Automatisierter Ladungsumschlag und standardisierte Ladeeinheiten sind weitere zentrale Grundbausteine, um die Probleme und Umschlagkosten in den Häfen und auf den Schiffen weiter zu verringern. Darüber hinaus sind Schiffe am effizientesten, wenn die Laderäume voll sind. Das AEGIS-Projekt konsortium befasst sich auch mit der Frage, wie neue Ladung, sowohl im eingehenden als auch im ausgehenden Verkehr, für den Transport auf dem Wasserweg gewonnen werden kann. Dies erfordert neue Arten von Dienstleistungen, neue Geschäftsmodelle und eine bessere Logistik.

Im Rahmen des AEGIS-Projektes wurden drei Anwendungsfälle (Bild 3) ausgewählt, die als Basis-Verkehrssysteme für die Untersuchung der Umsetzbarkeit der zu entwickelnden neuen Verkehrssystemlösungen dienen sollen. Diese Anwendungsfälle (Use Cases ... UC) sind: UC-A - Lokale ländliche und städtische Verteilung in der Region Trondheimsfjord, wo der Ansatz darin besteht, kleine Shuttles für die Verteilung von einem neuen Terminal in Meeresnähe aus einzusetzen. Hier werden auch Möglichkeiten zur Verbesserung der norwegischen Kurzstreckenseeverkehrsverbindungen zu den europäischen Häfen untersucht. UC-B - Umschlag von größeren RORO-Schiffen aus Europa auf Binnenwasserstraßen als Alternative zum LKW-Transport. UC-C - Regionale Hafenkooperation südlich von Kopenhagen mit neuen Zubringerlinien von Hamburg und

anderen größeren Häfen, mit lokaler Verteilung auf der letzten Meile mit automatisierten kleinen Schiffen.

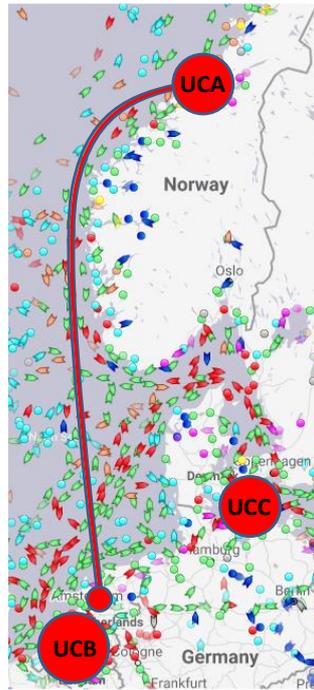


Bild 3: Darstellung der drei im AEGIS-Projekt zu untersuchenden Anwendungsfälle

In dem vorliegenden Tagungsbeitrag werden nachfolgend die ausgewählten Anwendungsfälle, die dafür entwickelten Schiffskonzepte sowie die damit einhergehenden Cargo-Handling-Systeme dargestellt sowie der Stand der bisherigen Entwicklungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf noch ausstehende Entwicklungstätigkeiten gegeben.

2 Anforderungen und Zielsetzung

2.1 Anwendungsfall A

Anwendungsfall A umfasst den Kurzstreckenseeverkehr von Rotterdam entlang der norwegischen Westküste bis nach Trondheim sowie den lokalen Hinterlandtransport, für die für den Gütertransport zu kleinen Häfen in der Region des Trondheimsfjord unter Nutzung eines Umschlagterminals in Sandstad. Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte sind:

1. Der lokale Verkehr zwischen kleineren Häfen in der Region Trondheimsfjorden mit einem Tochterschiff,
2. Terminalaktivitäten und -betrieb, die sich je nach Terminalgröße unterscheiden und von den kleinsten Selbstbedienungshäfen über mittelgroße Häfen bis hin zu den großen Häfen in Europa, wie z. B. in Rotterdam, reichen sowie
3. der Kurzstreckenseeverkehr von Norwegen zu den großen Häfen in Europa (Rotterdam)

Bei der Entwicklung des autonomen Verkehrssystems liegt der Schwerpunkt vor allem auf den folgenden Aspekten:

- Das autonome Schiff mit verschiedenen Autonomiestufen. Im Anwendungsfall gibt es zwei verschiedene Schiffskonzepte: ein Mutterschiff (siehe Unterabschnitt 4.1.1), das den Kurzstreckenseeverkehr durchführt, und Tochterschiffe (siehe Unterabschnitt 4.1.2), die lokal in Norwegen operieren.
- Ein besonderer Schwerpunkt liegt auch auf dem Kranbetrieb und landgestützten autonomen Lösungen wie Terminalschleppern und Reach Stackern.
- Ein Fernsteuerungszentrum an Land (RCC) und seine Rolle bei der Unterstützung der Schiffe und Terminals.
- Interaktion zwischen Schiffen und automatisierten Hafendiensten, insbesondere im Hinblick auf Lösungen für sicheres Anlegen und Festmachen.
- Kommunikation zwischen Schiffen, Kontrollzentren und Besatzung bei logistischen Abläufen.



Bild 4: Vorgeschlagene Mikroszenarien für Anwendungsfall A

Als Grundlage für die Entwicklung wurden im Rahmen des Anwendungsfalls A verschiedene Mikroszenarien (siehe Bild 4) erarbeitet. Die Szenarien beinhalten unterschiedliche Frachtvolumen, Anforderungen in Bezug auf die Wetterbedingungen sowie hinsichtlich der zu beliefernden Terminals.

2.2 Anwendungsfall B

Der Anwendungsfall B beinhaltet die Schnittstelle zwischen Kurzstreckenseeverkehr sowie dem Hinterlandverkehr über Binnenwasserstraßen in Belgien und den Niederlanden. Der Fokus des zu entwickelnden autonomen Transportsystems liegt auf dem RoRo-Transport auf den Binnenwasserstraßen mit dem Ziel, bestehenden Lkw-Transport auf die Binnenwasserstraßen in der Region umzustellen.

Das nachfolgende Bild 5 zeigt beispielhaft zwei mögliche Transportrouten für den Gütertransport von Rotterdam nach Gent über unterschiedliche Binnenwasserstraßen.

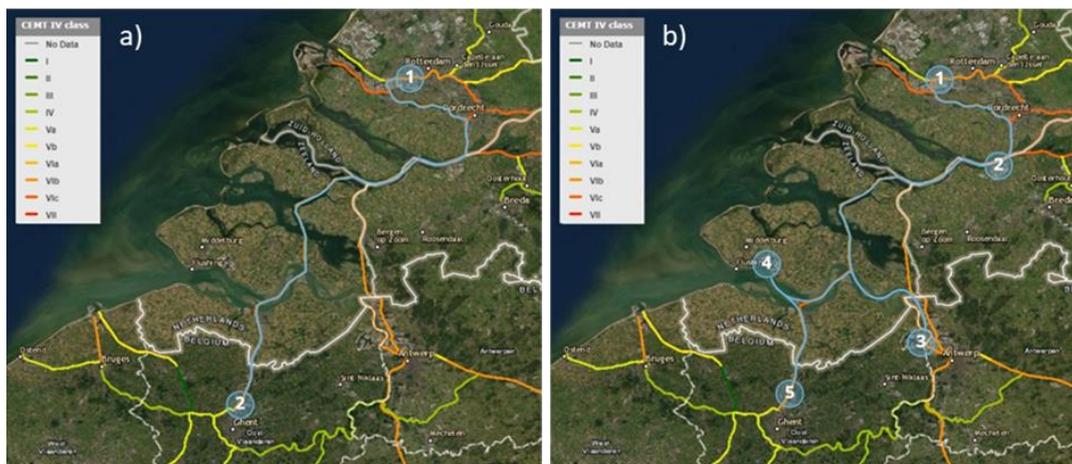


Bild 5: Mögliche Routen zwischen dem Hafen von Rotterdam und dem Hafen von Gent auf den Binnenwasserstraßen (links: Direkttransport, rechts: Transport mit Zwischenstopps)

Die aufbauend auf den ausgewählten Mikroszenarien zu entwickelnden Schiffstypen für Anwendungsfall B sind auf westeuropäischen Binnenwasserstraßen (IWW) einsetzbar und gemäß den CEMT-Klassen (Konferenz der europäischen Verkehrsminister) definiert. Darüber hinaus sollen die Schiffe nur Anhänger als RoRo transportieren. Es wird keine Lkw-Fahrer oder eine Besatzung an Bord geben, da der Autonomiegrad sehr hoch sein muss und Platz und Gewicht auf den Schiffen sicher sein müssen. Im Hinblick auf die verschiedenen Szenarien und die bestehenden IWW werden verschiedene Größen mit der Entwicklung angestrebt.

2.3 Anwendungsfall C

Der Forschungsschwerpunkt liegt im Anwendungsfall C auf der Revitalisierung bestehender Häfen in Dänemark am Beispiel der Häfen Aalborg und Vordingborg. Hauptziele der beiden dänischen Häfen sind dabei die Entwicklung von Konzepten für ein Mehrzweck-Terminal in einem kleinen Hafen (Vordingborg) und ein intermodales automatisches grünes Terminal in einem mittelgroßen Hafen (Aalborg) für die Verlagerung von Fracht vom Straßenverkehr auf den Kurzstreckenseeverkehr, zur Erfüllung der EU-Ziele für 2030 und 2050 sowie zur Verringerung der CO₂-Emissionen.

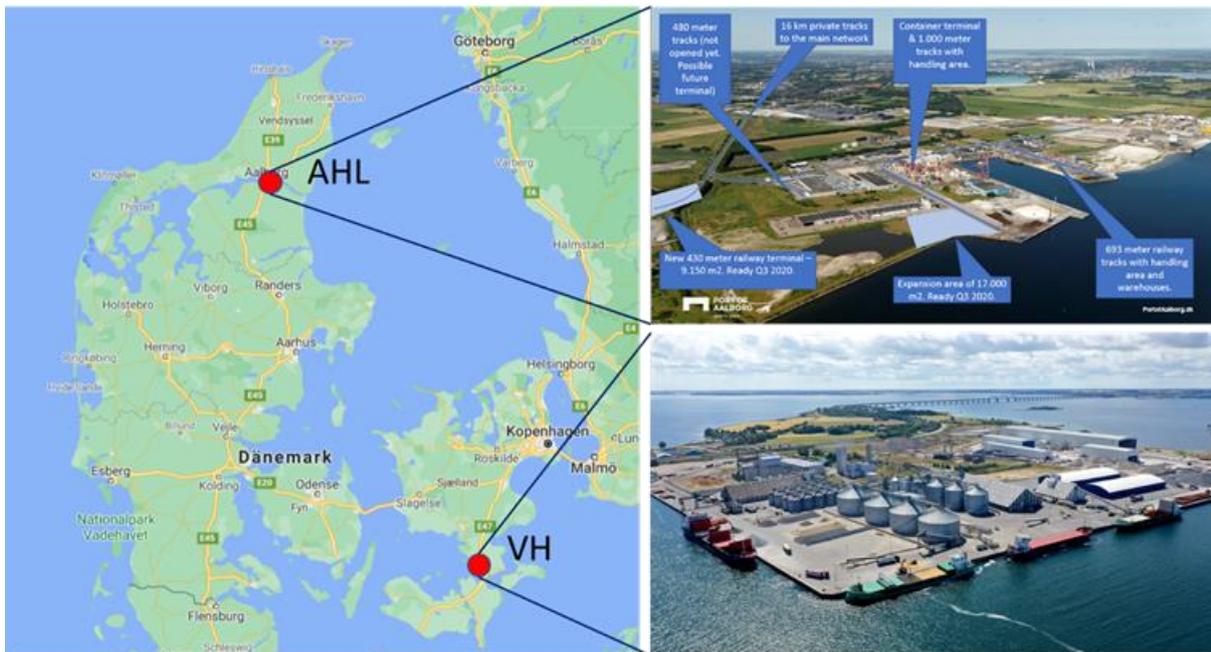


Bild 6: Zu revitalisierende Hafenstandorte Vordingborg und Aalborg

In Anbetracht der verschiedenen Herausforderungen im Anwendungsfall C sind diverse Schiffskonzepte inkl. der erforderlichen Cargo-Handling-Systeme zu entwickeln.

3 Schiffskonzepte und Cargo-Handling-Systeme

In diesem Abschnitt werden die für jeden Anwendungsfall entwickelten Schiffsentwürfe unter Berücksichtigung der Schlussfolgerungen aus den Unterabschnitten 2.1 bis 2.3 vorgestellt.

Die Beschreibungen der Schiffsentwürfe umfassen allgemeine Hauptabmessungen wie Länge über alles (LOA), Breite (B) und Tiefgang nach Entwurf (T_{Design}) sowie Informationen über das Antriebssystem, Kraftstoffkonzepte und den Frachtumschlag an Bord inklusive der angestrebten Autonomiekonzepte.

3.1 Mutter- und Tochterkonzepte für Anwendungsfall A

Wie bereits erwähnt, wird in diesem Unterabschnitt der aktuelle Stand der Schiffsentwicklung für Anwendungsfall A vorgestellt.

3.1.1 Mutter-Schiffsentwürfe

Gemäß Abschnitt 2.1 wurden innerhalb des Anwendungsfalles verschiedene Szenarien definiert, die mehr als ein Schiffdesign für das Mutterschiff erfordern.

Schiffsentwurf für ein 1000-TEU-Schiff

Dieser Schiffsentwurf wurde für den Umschlag von Rotterdam in die Region Trondheim entwickelt. Daher wurde ein Containerschiff mit bordeigenen Umschlagsystemen und einem umweltfreundlichen Antriebssystem entwickelt, das in Bild 7 dargestellt ist; die wichtigsten Abmessungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Bild 7: Neues Design des Mutterschiffs

Tabelle 1: Abmessungen für neues Design

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
143.8	25.5	8.2

Dieses Schiff ist als Open-Top-Konzept mit einer Gesamtkapazität von 1046 TEU konzipiert, jedoch sind Ladeplätze für 40-, 45-Fuß- und Kühlcontainer im Entwurf berücksichtigt.

Wie in Bild 7 dargestellt, ist das neu konzipierte Mutterschiff mit zwei Dreigelenkkränen ausgestattet - eine Entwicklung des AEGIS-Partners Cargotec/MacGregor (CT/MCG). Jeder Kran hat eine Ausladung von 32 m und eine sichere Arbeitslast (SWL) von 45 t. Die Vorteile des Dreigelenkkrans liegen in seiner hohen inneren Stabilität, der platzsparenden Konstruktion, dem reibungslosen Betrieb mit Anti-Sway-System und den präzisen Bewegungen. Er wird hochgradig autonom betrieben werden. CT/MCG bietet spezielle Autonomielösungen für seine Krane an, wie z. B. Anti-Kollisionssysteme und automatisches Greifen der Ladung. Obwohl in internationalen Drehkreuzen wie Rotterdam der Einsatz der hafenseitigen Kräne obligatorisch ist, ermöglicht ein bordeigenes Umschlagssystem in den norwegischen Häfen eine hohe Flexibilität. Das Schiff ist nicht an die Verfügbarkeit von Hafenausrüstungen gebunden und kann seine eigene grüne Energie für den Umschlagprozess nutzen. Auch die Möglichkeit, vom Hafen bereitgestellten Ökostrom zu nutzen, wird in Betracht gezogen.

Das erste entwickelte Design des Mutterschiffs soll auf einer Autonomiestufe von eins bis zwei arbeiten. Es wird eine Besatzung an Bord geben, und die Kapitänbrücke und die Unterkünfte sind Teil des Schiffskonzepts. Während des Betriebs wird eine Steigerung der Autonomie erwartet (aufgrund von Lerneffekten und angenommenen Vorschriften). Die Aufbauten sind daher modular aufgebaut und können bei Bedarf teilweise entfernt werden. Zusätzlich werden automatisiertes Festmachen [5] und automatisierter Ladungsumschlag Zeit sparen und Umladungen unabhängig von den Hafenbetriebszeiten ermöglichen. Ein digitaler Zwilling ermöglicht es Kunden und Reedern, den Schiffsstatus zu beobachten und zu vergleichen und die Ankunftszeit vorherzusagen.

Schiffsentwurf für ein 160 TEU-Schiff

Untersuchungen zum Frachtaufkommen im Bereich des Anwendungsfalls A führen zu der Idee eines Küsten-Zubringerschiffs, das Häfen entlang der norwegischen Westküste anläuft, bevor kleine, autonome Tochterschiffe die letzte Meile im Fjord zurücklegen. Bild 8

zeigt den ursprünglichen Entwurf und die Tabelle 2 listet die entwickelten Hauptabmessungen auf.

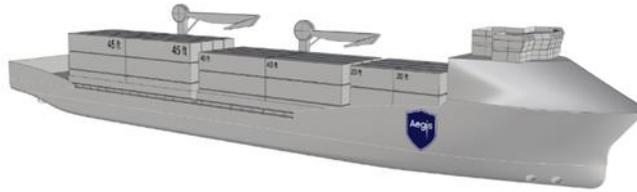


Bild 8: Küsten-Feederschiff

Tabelle 2: Abmessungen für Küsten-Feederschiffe

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
103.5	13.4	2.7

Wie in Bild 8 gezeigt wird, erfolgt der Transport verschiedener Containergrößen. Das Schiff ist für jeweils 32 TEU, FEU und 45-Fuß-Container ausgelegt. Daraus ergibt sich eine Gesamtkapazität von 160 TEU. Bei der weiteren Entwicklung wird der Stauraum für High-Cube- und Kühlcontainer entsprechend den erforderlichen Daten aus Unterabschnitt 2.1 berücksichtigt.

Das Küsten-Feederschiff ist mit zwei Bordkränen ausgestattet. Jeder von ihnen hat eine Tragfähigkeit von 35 t, einer mit 18 m Breite und der andere mit 25 m Breite. Dies gewährleistet die Zugänglichkeit jedes Frachtcontainers auf dem Schiff. Diese Bordkräne sind hochgradig autonom und befinden sich an der Backbordseite des Schiffes. Dies ermöglicht den Einsatz von Terminal-Kränen in größeren Häfen. Durch die Anbringung der Kräne an der Backbordseite des Schiffes wird sichergestellt, dass die Bordkräne beim Be- und Entladen nicht mit den Terminal-Kränen kollidieren.

Dieses Konzept wird mit einer Autonomiestufe von zwei bis drei entwickelt, die eine Brücke und eine Unterbringung der Besatzung erfordert. Die Brücke ist jedoch so konzipiert, dass sie modular aufgebaut ist und daher bei einer Erhöhung der Autonomiestufe in der Zukunft abgebaut werden kann. Darüber hinaus werden für dieses Konzept ein automatisches Anlegen und ein automatischer Frachtumschlag sowie die Implementierung eines digitalen Zwillings in Betracht gezogen.

3.1.2 Tochter-Schiffsentwürfe

In diesem Unterabschnitt werden zwei verschiedene Ansätze für die Konstruktion von Tochterschiffen für die Frachtverteilung in der Region Trondheim beschrieben.

Schiffsentwurf selbstfahrendes Shuttle

Das selbstfahrende Shuttle ist als völlig autonomes Schiff mit grünem Antrieb nur für den Transport von Containern konzipiert und in Bild 9 dargestellt. Darüber hinaus ist das Schiff mit einem bordeigenen Umschlagsystem ausgestattet. Im Hinblick auf das erwartete Frachtvolumen gemäß dem in Unterabschnitt 2.1 beschriebenen Szenario wurden die wichtigsten Abmessungen berechnet und sind in Tabelle 3 aufgeführt.



Bild 9: autonom fahrendes Shuttle

Tabelle 3: Abmessungen für selbstfahrende Shuttles

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
61.0	12.4	3.3

Die erforderlichen Eingangsdaten werden mit einer Kapazität von maximal 60 TEU in Längsrichtung in vier Reihen und zwei Ebenen und einer Betriebsgeschwindigkeit von 10 kn angenommen.

Dieses Shuttle-Schiff ist mit einem vollautomatischen, in Leichtbauweise hergestellten Portalkran mit Teleskopbeinen ausgestattet. Der Kran reicht von der Steuerbord- bis zur Backbordseite und kann sich auf Führungsschienen vom Heck bis zum Bug bewegen, um sicherzustellen, dass jeder Container erreicht werden kann und lange Kranausleger vermieden werden, die sonst Stabilitätsprobleme verursachen würden. Der Einsatz eines solchen Mobilkrans ist für kleinere Schiffe von Vorteil, da Lagerverluste vermieden werden können. Während der Fahrt wird der Kran am Heck gesichert. Außerdem wird ein Teleskopspreader für 20- bis 45-Fuß-Container zum Be- und Entladen eingesetzt.

Das Shuttle-Schiff ist so konzipiert, dass es in hohem Maße autonom ist. Wie in Bild 9 zu sehen ist, hat das Schiff keine Aufbauten, da keine Besatzung an Bord ist. Je nach Autonomiestufe kann das Schiff von einem Fernsteuerungszentrum an Land gesteuert werden (Stufe 3) oder völlig autonom fahren (Stufe 4). Darüber hinaus werden für diesen Entwurf ein automatisches Anlegen und ein automatischer Frachtumschlag sowie die Implementierung eines digitalen Zwillings in Betracht gezogen.

Schiffsentwurf für einen Push-Konvoi

Das zweite Schiffskonzept umfasst kleine, autonome und selbstfahrende Lastkähne, die von einem grünen, fortschrittlichen und hochautomatisierten Schubboot geschoben werden. Wie in der Analyse von Anwendungsfall A festgestellt wurde, sind die Hauptfrachtarten Container und Schüttgut. Daher werden Universalschiffe mit einer Kapazität von 36 TEU entwickelt, die in drei Reihen und drei Lagen längs gelagert werden. Es ist auch möglich, Schüttgut oder eine Kombination aus Schüttgut und Containerladung zu laden, wie in Bild 10 zu sehen ist. Diese Barge (Leichter) sind als zusätzlicher Lagerraum vor der Küste oder als Erweiterung des hafenseitigen Lagerraums für mögliche Kunden gedacht. Die sich aus diesen Annahmen ergebenden Hauptabmessungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

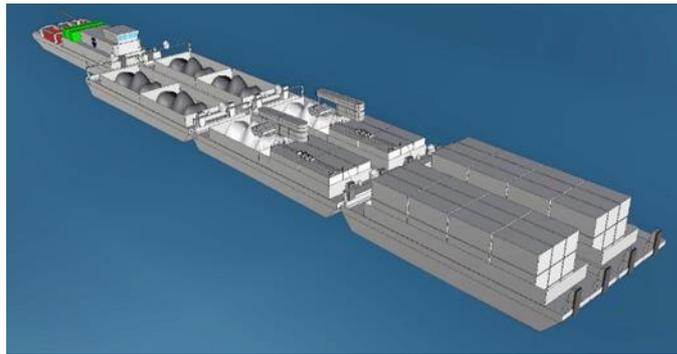


Bild 10: Schubverband mit drei verschiedenen Binnenschiffskonzepten

Tabelle 4: Abmessungen für Universalschubleichter

$L_{OA}[m]$	$B[m]$	$T_{Design}[m]$
33.0	9.8	2.0

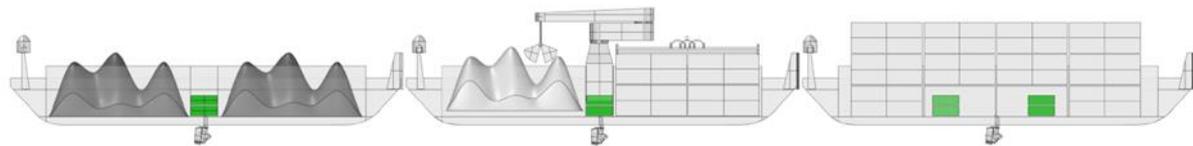


Bild 11: Mögliche Batteriespeicher (grün) in den verschiedenen Barkassenkonzepten

Die Umschlag-ausrüstung für die modular aufgebauten Binnenschiffe hängt von der transportierten Ladung ab. Bei gemischter Ladung müssen verschiedene Ladungen mit demselben Kran umgeschlagen werden. Daher wird Ausrüstung für den Umschlag beider Ladungseinheiten benötigt, die leicht und vorzugsweise autonom austauschbar sein sollte. Die gesamte Umschlag-ausrüstung wird auf dem Lastkahn mitgeführt und ist für den installierten Kran leicht zugänglich.

Die Schiffe sind so konzipiert, dass sie völlig autonom sind (Stufe 4). An Bord sind Geräte für die Positionierung, Navigation und Kommunikation installiert. Darüber hinaus werden das automatische Anlegen und das automatische Ein- und Auskuppeln in den und aus dem Konvoi durch die bordeigene Ausrüstung unterstützt.

Schubschiff

Dieses Schiff (siehe Bild 12) wurde so entwickelt, dass es in der Lage ist, maximal neun Leichter (wie oben beschrieben) bei einer Betriebsgeschwindigkeit von 8 kn zu schieben. Die sich aus diesen Annahmen ergebenden Hauptabmessungen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

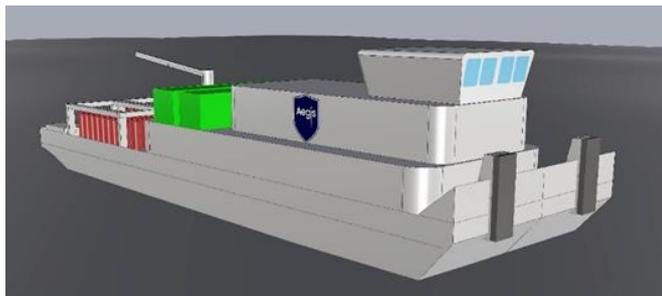


Bild 12: Schubboot für Konvoi-Konzept

Tabelle 5: Abmessungen für Schubboote

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
33.4	10.8	2.0

Das Kupplungssystem am Bug des Schiffes ähnelt dem für die Lastkahnkonzepte entwickelten System. Dieses Kupplungssystem ermöglicht Bewegungen der gekuppelten Einheiten in vertikaler Richtung, während es Bewegungen in horizontaler Richtung unterdrückt. Außerdem wird keine Nutzlast auf dem Schubboot, sondern nur auf den Lastkähnen gelagert.

Wie bereits erwähnt, wird auf dem Schiff keine Ladekapazität berücksichtigt, so dass auch keine Frachtumschlagsausrüstung benötigt wird. Dennoch ist das Schiff mit einem kleinen, stationären und automatisierten Kran ausgestattet, um die Wasserstoffpackungen beim Austausch von leeren gegen betankte Packs zu be- und entladen.

Wie bereits erwähnt, ist auf dem Schiff keine Ladekapazität vorgesehen. Die Autonomiestufe dieses Schiffes soll von 2 auf 4 ansteigen, daher werden zu Beginn eine Brücke und Unterkünfte für die Besatzung benötigt. Die Sensoren für Positionierung, Navigation und Kommunikation sowie die unterstützende Software und Systeme sind ebenfalls an Bord installiert. Routen- und Kraftstoffverbrauchsoptimierung sind derzeit verfügbar und für dieses Schubbootkonzept erforderlich. Schrittweise könnte das Schiff mit einer reduzierten Besatzung und vielen unterstützenden Systemen betrieben werden (Stufe 2). Später ist der Betrieb über eine Fernsteuerungszentrale (Stufe 3) an Land ohne Besatzung an Bord möglich. Die letzte Stufe ist ein völlig autonomer Betrieb (Stufe 4), der von einem Kontrollzentrum überwacht wird.

3.2 Schiffsentwürfe für Anwendungsfall B

In diesem Unterabschnitt wird der aktuelle Stand der für den Anwendungsfall B entwickelten Schiffsentwürfe beschrieben. Es ist zu beachten, dass sich diese Entwürfe im Konzeptstadium befinden und nicht vollständig entwickelt oder detailliert sind.

Wie in Unterabschnitt 2.2 erwähnt, müssen diese RoRo-Schiffe auf Binnenwasserstraßen (IWW) in den Niederlanden und Belgien fahren, um die Überlastung der Straßen zu verringern. Daher ist die Schiffskonstruktion streng auf die verfügbaren Wasserstraßenabmessungen entlang der erwarteten Route beschränkt. Diese Abmessungen werden im Rahmen des CEMT klassifiziert und bilden die Grundlage für die Entwicklung umweltfreundlicher und fortschrittlicher Schiffsentwürfe.

In Bild 13 sind drei verschiedene Größen von RoRo-Schiffen dargestellt. Die beiden oberen Ausführungen sind für die CEMT-Klasse II (oben links) und die CEMT-Klasse IV (oben rechts) geeignet, während die untere Ausführung eine neue Kombination der CEMT-Klasse IV mit einer angepassten Breite gemäß CEMT-Klasse VIb ist.

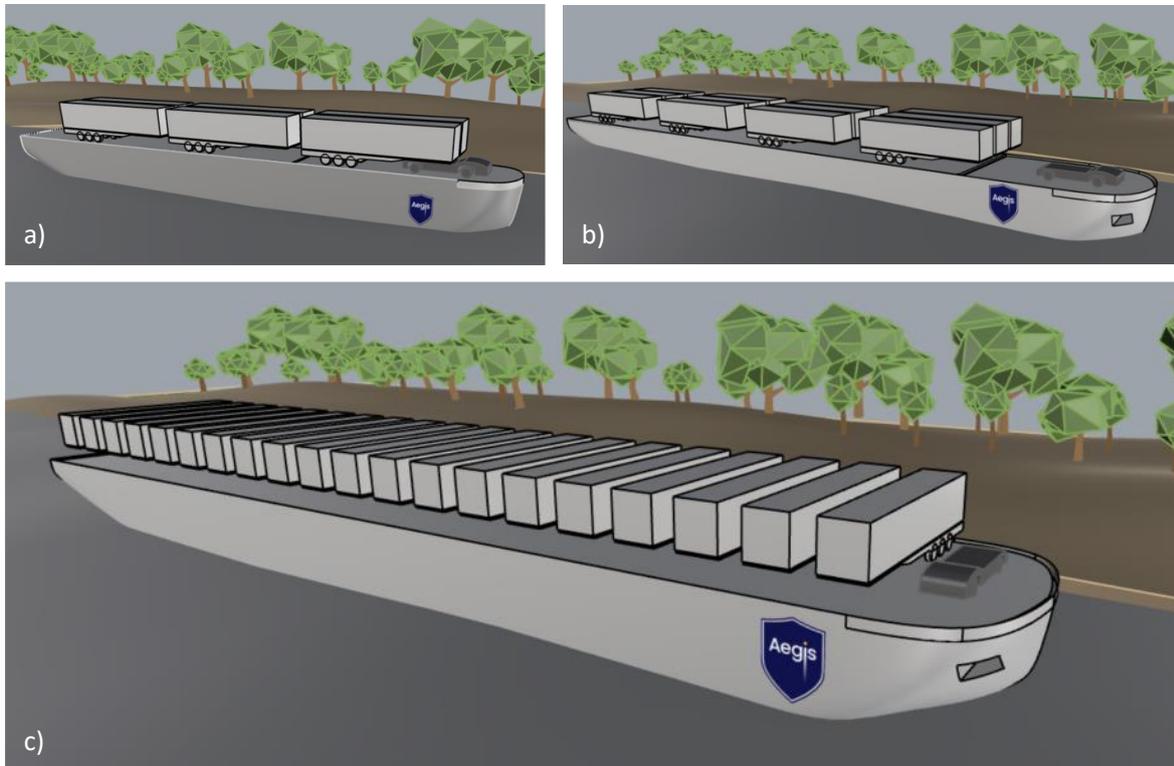


Bild 13: IWW RoRo-Schiffskonstruktionen;
geeignet für CEMT II (a), CEMT IV (b) und CEMT IV+ (c)

Aus diesen Ansätzen ergeben sich die Hauptabmessungen, die in Tabelle 6 aufgeführt sind. Im Allgemeinen sind die Antriebs- und Umschlagssysteme für jedes Schiff gleich, werden jedoch an die Schiffsgröße angepasst. Die Kapazität der Schiffe beträgt 12 Anhänger für CEMT II, 21 Anhänger für CEMT IV und 38 Anhänger für CEMT IV+.

Tabelle 6: Abmessungen für IWW-Schiffe

Vessel	L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
CEMT II (a)	55.0	6.6	2.3
CEMT IV (b)	85.0	9.5	2.5
CEMT IV+ (c)	85.0	15.0	2.5

Für das Be- und Entladen müssen die Schiffe über eine Rampe verfügen (in Bild 13 nicht dargestellt), die sich am Bug befindet, automatisiert ist und mit einem automatischen Verankerungssystem verbunden ist. Außerdem sind zwei Ladungsschichten geplant, was ein Liftsystem für die Lastwagen oder Anhänger erfordert, mit dem die Verteilung auf die beiden Schichten möglich ist. Außerdem werden die Schiffe ein eigenes AGV (Automated Guided Vehicle) an Bord haben, um die Anhänger in kleineren Häfen entlang der Route zu

be- und entladen. Das AGV wird an Deck gelagert, wenn das Schiff in Fahrt ist. Alle Ladesysteme werden so entwickelt, dass sie von der Stromversorgung des Schiffes oder, falls vorhanden, von grünem Landstrom gespeist werden.

Das Beladen der Trailer quer zur Fahrtrichtung erfordert eine andere Art des Ladungsumschlags. Jedes übereinander gelagerte Trailerpaar verwendet einen eigenen Lift in Kombination mit einer beweglichen Seitenrampe zum Be- und Entladen über die Backbordseite. Daher ist ein automatisches Stabilitätssystem für das Be- und Entladen erforderlich. Dieses System soll kontinuierlich Wasser in die Ballastwassertanks hinein- und herauspumpen.

Die Schiffe sind so konzipiert, dass sie unabhängig von der Laderichtung der Anhänger in hohem Maße autonom sind. Was den Grad der Autonomie betrifft, so sind sie entweder völlig autonom (Stufe 4) oder werden von einer Fernsteuerungszentrale an Land ohne Besatzung an Bord ferngesteuert (Stufe 3); führende Forschungsprojekte sind FernBin [6] und AutoBin [7]. Darüber hinaus werden autonome Verankerungssysteme verwendet und digitale Zwillinge für den Betrieb der Schiffe eingesetzt.

3.3 Kombinierte Konzepte für Anwendungsfall C

Dieser Unterabschnitt beschreibt die Entwicklungsansätze für den Anwendungsfall C. Die entwickelten Schiffskonzepte werden von den beiden anderen Anwendungsfällen abgeleitet. Wie in Unterabschnitt 2.3 erwähnt, werden sowohl LoLo als auch RoRo Schiffe benötigt, um die Möglichkeiten der definierten Regionen in Dänemark abzudecken.

Erste Ansätze sind in Bild 14 und Bild 15 dargestellt. Im oberen Bild 14 ist ein kombiniertes SSS- und IWW-Containerschiff mit einer Kapazität von etwa 128 TEU dargestellt. Das untere Bild 15 zeigt ebenfalls ein kombiniertes Schiff des Kurzstreckenseeverkehrs und der Binnenschifffahrt, jedoch für den Stückguttransport.



Bild 14: Containerschiff-Konstruktion

Tabelle 7: Abmessungen für Containerschiffe

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
71.0	10.9	2.8

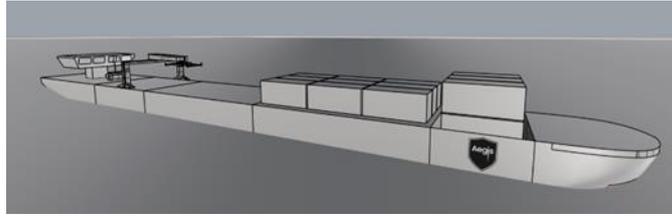


Bild 15: Schiffskonstruktion für gemischte Ladung

Tabelle 8: Abmessungen für Stückgutfrachter

L_{OA} [m]	B [m]	T_{Design} [m]
85.0	9.5	2.5

Die für die entwickelten Schiffsentwürfe verwendeten Umschlaggeräte wurden von den Entwürfen des Anwendungsfalls A abgeleitet. Ein Entwurf für den Containerschiffsentwurf ist ein Dreigelenkkran des Projektpartners MacGregor. Diese Art von Kranen ist selbststabilisierend und eignet sich daher sehr gut für das in Bild 14 dargestellte Konzept. Da der Kran auf dem Schiff angebracht ist, kann die gesamte Ladung leicht erreicht und be- bzw. entladen werden, ohne dass weitere Ausrüstung auf der Hafenseite erforderlich ist. Das andere Konzept ist ein beweglicher Portalkran, ähnlich dem in Unterabschnitt 3.2 beschriebenen. Bei dem in Bild 15 dargestellten Konzept wird die Breite des Krans an die Schiffsbreite angepasst, und es werden austauschbare Ausrüstungen für verschiedene Ladeeinheiten benötigt. Während der Fahrt wird der Kran vor der Brücke so nah wie möglich am Deck befestigt.

Diese Schiffe sind für einen mittel- bis hochautonomen Betrieb ausgelegt. Während des Betriebs wird der Autonomiegrad von Stufe 2 bis zu Stufe 4 ansteigen. Daher werden die geplanten Kapitänsbrücken und Mannschaftsunterkünfte modal und leicht rückbaubar sein. Darüber hinaus sind für dieses entwickelte Design automatisches Anlegen und automatischer Ladungsumschlag sowie die Implementierung eines digitalen Zwillinges vorgesehen.

Zusammenfassung

Das zentrale Ziel von AEGIS ist die Entwicklung eines neuen wassergestützten Verkehrssystems für Europa, das die Vorteile von Schiffen und Binnenschiffen nutzt und gleichzeitig die herkömmlichen Probleme wie die Abhängigkeit von großen Terminals, hohe Umschlagkosten, geringe Geschwindigkeit und Frequenz sowie geringe Automatisierung der Informationsverarbeitung überwindet.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden neue fortschrittliche, effiziente, umweltfreundliche und kleinere Schiffskonzepte entwickelt, neben anderen Faktoren wie der Terminalautomatisierung und der digitalen Konnektivität, insbesondere der Kommunikation zwischen allen Teilnehmern der künftigen Transportkette. Diese Schiffskonzepte sowie die gesamte Transportkette mit allen Verkehrsträgern und Terminalaktivitäten werden anhand von drei verschiedenen realen Anwendungsfällen in Europa unter Berücksichtigung der ökologischen und regionalen Bedingungen entwickelt.

Ein Hauptbestandteil der Schiffsentwicklung ist die Implementierung neuer Technologien für autonomen Schiffsbetrieb und Umschlag. Dazu werden neue Technologieansätze der Projektpartner MacGregor und Kalmar für den autonomen Umschlag untersucht, simuliert und in Form eines Demonstrators aufgebaut.

Die Untersuchungen innerhalb der Anwendungsfälle führen zur Entwicklung eines Logistik-Analyse-Tools. Dieses Tool wird benötigt, um die Kosten von Schifffahrtsrouten mit einem aktuellen oder einem vergleichbaren autonomen Schiffskonzept zu simulieren und zu vergleichen. Dies wird nur ein Aspekt des logistischen Analysewerkzeugs sein.

Quellenverzeichnis:

- [1] 2009 *Strategic goals and recommendations for EU's maritime transport policy until 2018* /COM/2009/0008 final/Brussels
- [2] 2017 *National Transport Plan 2018-2029* Meld. St. 33 (2016-2017).
<https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-33-20162017/id2546287/>
- [3] WHITE PAPER, Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system, Verfügbar als PDF-Dokument unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>
- [4] Auditor General Norway 2018 *Transport of cargo* Retrieved June 2020 from: <https://www.riksrevisjonen.no/rapporter/Sider/Godstransport.aspx>
- [5] Port of Helsinki 2019 *Second automated mooring system to West Harbour for faster, safer and cleaner operations* Retrieved January 2022 from: <https://www.portofhelsinki.fi/en/port-helsinki/whats-new/news/second-automated-mooring-system-west-harbour-faster-safer-and-cleaner>
- [6] Kracht F E 2020 *FernBin Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt* Retrieved January 2022: <https://www.uni-due.de/mechatronik/forschung/fernbin>
- [7] DST *Autonomous Inland Vessel – Simulation and demonstration of automated inland navigation* Retrieved January 2022 from: <https://www.autobin.de/en/>

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Lebensdauer laufender Drahtseile mit Kunststoffummantelung und deren Eignung für die Mehrlagenwicklung

Max Stök
Armin Lohrengel
Toni Recknagel
Thorsten Schmidt



Max Stök, M. Sc.
TU Clausthal
Institut für Maschinenwesen (IMW)
Robert-Koch-Str. 32
38678 Clausthal-Zellerfeld

Lebensdauer laufender Drahtseile mit Kunststoffummantelung und deren Eignung für die Mehrlagenwicklung

Kunststoffummantelte Drahtseile werden in einigen Anwendungsfällen bereits eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich in der Praxis durch eine deutlich höhere Lebensdauer als konventionelle Drahtseile aus. In Normen werden diese Seile allerdings noch nicht erfasst. Durch Dauerbiegeversuche kann das Ermüdungsverhalten des Seiles deutlich schneller als in der praktischen Anwendung untersucht werden. Die Schädigungsarten und -mechanismen bei der mehrlagigen Bewicklung von Seiltrommeln werden durch Dauerwickelversuche analysiert. Mittels FE-Simulationen können die Beanspruchung innerhalb des Seiles sowie dessen Steifigkeit betrachtet werden. Die Ergebnisse sollen der rechnerischen Abschätzung der Seillebensdauer sowie der Erarbeitung erster Auslegungshinweise für die Mehrlagenwicklung dienen.

1 Motivation

Stahldrahtseile werden als laufende Seile im Bergbau, Aufzugsbau und Kranbereich eingesetzt. Im Beitrag wird ein gängiges Kranseil untersucht, das für die Versuche ummantelt wurde. Die Seile unterliegen infolge der Güterbewegung, der Änderung der Zugkrafttrichtung durch Seilscheiben und den Kontakten auf der Seiltrommel einer hohen Belastung. Entlang der Seillängsachse erfolgt die Zugbelastung. Die Biege- und Druckbelastung entsteht durch den Abrollprozess über die Seilscheiben [1]. In der Mehrlagenwicklung wird das Seil durch den Wickeldruck der oberen Lagen sowie den Kontakt mit dem bereits aufgewickelten Seil beansprucht [2]. Dies führt zur Ermüdung der hochbeanspruchten Seildrähte. Um das Seil aus sicherheitsrelevanten Gründen nicht bis zum Versagenseintritt zu nutzen, sind Ablege Kriterien bis zu einem zulässigen Schädigungsgrad festgelegt [3]. Für die Schädigungsarten, die während der Inspektion konventioneller Seile z. B. durch Sichtprüfung zu beurteilen sind, existieren derzeit keine standardisierten Ablege Kriterien für kunststoffummantelte Drahtseile [4]. Die Lebensdauer eines Drahtseiles wird durch die Biegezahl bis zum Versagen beschrieben. Infolgedessen kann das Maschinenelement seine angedachte Aufgabe nicht mehr bewerkstelligen. Es entstehen Gefahren für Mensch und Maschine, wenn das Drahtseil über den Zeitpunkt des Erreichens der Ablegereife im Einsatz bleibt [1]. Um das Verhalten laufender kunststoffummantelter Drahtseile zu untersuchen, wurden Dauerbiegeversuche zur experimentellen Bestimmung der Lebensdauer sowie mehrlagige Wickel- und Querdruckversuche zur Untersuchung in der Mehrlagenwicklung durchgeführt. Zusätzlich wurden das Schädigungsverhalten und die Steifigkeit durch numerische Simulationen betrachtet. Zusammenfassend wurden die Erkenntnisse verwendet, um ummantelte Seile in die rechnerische Lebensdauer nach Methode „Leipzig“ zu implementieren. Für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln konnten erste Dimensionierungs- und Konstruktionshinweise erarbeitet werden.

2 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Einfluss einer zusätzlichen Kunststoffummantelung eines konventionellen Drahtseiles auf die Lebensdauer betrachtet. Die Konstruktionsstruktur des Drahtseiles lautet 6x26WS-IWRC. Zur Ummantelung des konventionellen

Drahtseile wurden zwei unterschiedliche Polyethylene verwendet (Bild 1). Die eingesetzten Werkstoffe unterscheiden sich in ihren mechanischen und Dichteigenschaften.

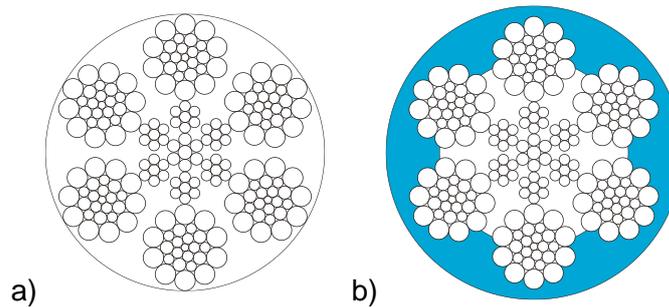


Bild 1: Konstruktion Prüfseile; a) konventionelles Drahtseil; b) kunststoffummanteltes Drahtseil

Optisch werden die Seile nach der Kunststofffarbe unterschieden. „Seilvariante 1“ bezeichnet den transparenten Kunststoff, „Seilvariante 2“ den schwarzen Kunststoff und „Seilvariante 3“ das nichtummantelte konventionelle Seil.

2.1 Ergebnisse Dauerbiegewechselversuche

Die Dauerbiegewechselversuche zur Bestimmung der Lebensdauer wurden am Seilprüfstand der Professur für Technische Logistik (TLA) durchgeführt. Der Prüfstand verfügt über drei unabhängige Biegezonen mit Einfachbiegung und die Seilkraft wird über eine hydraulische Spannvorrichtung eingestellt. Während der regelmäßigen Seilinspektion wurde die Drahtbruchentwicklung (hauptsächlich bei den konventionellen Seilen) sowie der Zustand der Kunststoffummantelung dokumentiert. Zusätzlich kamen die magnetinduktive Seilprüfung zum Einsatz sowie die nachfolgende Untersuchung der Innenschädigung aller Versuchsseile.

Die drei Seilvarianten wurden mit zwei Lasthorizonten in drei verschiedenen D/d-Verhältnissen getestet. Auf Grund der unterschiedlichen Durchmesser der Seilvarianten kamen unterschiedliche Rillenradien zum Einsatz. Der Einfluss der Rillengeometrie wurde erweiternd zum allgemeinen Untersuchungsgegenstand betrachtet. Bild 2 zeigt die Versuchsmatrix der durchgeführten Dauerbiegewechselversuche.

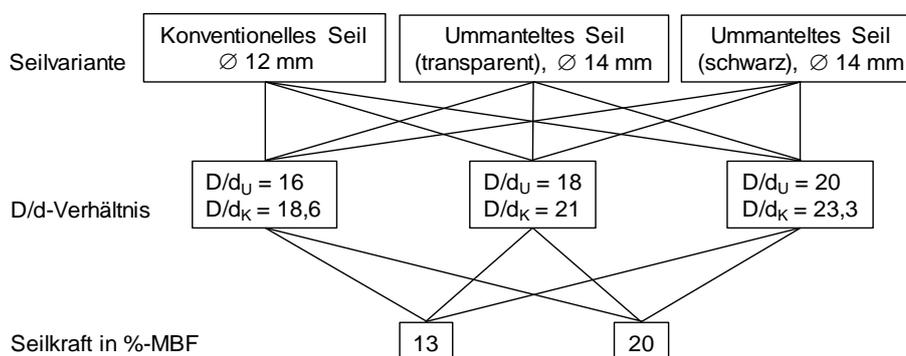


Bild 2: Versuchsmatrix Dauerbiegeversuche TUD

Während der Versuche waren die Kunststoffummantelungen starken Belastungen ausgesetzt. Beim Lauf über Seilscheiben kam es zur Biegebelastung. Zusätzlich war der Kunststoff einer lokalen Zug- und Druckbelastung ausgesetzt, während das konventionelle Innenseil in den Kunststoff zur Scheibe gepresst wurde. Die Abnutzungserscheinungen bei

gleichen Parametern sind in Bild 3 dargestellt. Der transparente Kunststoff nutzte sich laufseitig ab, bis es zum Durchbruch des Stahldrahtseiles kam. Die schwarze Variante bildete einzelne Kunststoffsegmente, die verschiebbar auf dem Seil waren, bis es auch zur laufseitigen Durchdringung kam. Nach Ablösung des Kunststoffes kam es zum Stahl/Stahl-Kontakt zwischen Seil und Scheibe.

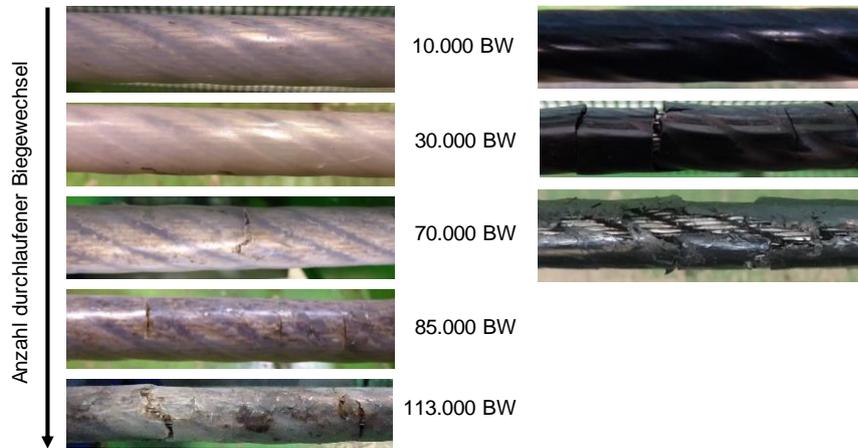


Bild 3: Zustand der Kunststoffummantelung bei gleichen Versuchsparametern

Die Drahtbruchentwicklung eines konventionellen Seiles ist in Bild 4 dargestellt. Die schwarzen Kreuze symbolisieren die aufgetretenen Drahtbrüche in den drei Biegezonen. Die Biegewechselzahl beim Erreichen der Ablegereife ist markiert. Die Drahtbruchzählung wurde auch bei den ummantelten Seilen nach Ablösung des Kunststoffes durchgeführt. Die roten Kreuze zeigen die sichtbaren Drahtbrüche bei gleichen Versuchsparametern mit der schwarzen Variante. Lediglich eine Biegezone hatte die Ablegereife auf Grund der Überschreitung der maximal zulässigen Anzahl an Drahtbrüchen erreicht. Ab diesem Zeitpunkt waren die Einzeldrähte dem direkten Stahl/Stahl-Kontakt zwischen Seil und Seilscheibe ausgesetzt. Es gilt die Annahme, dass das ummantelte Seil im Inneren eine stärkere Schädigung aufweist. Diese nicht sichtbaren Drahtbrüche waren im Rahmen der optischen Seilinspektion nicht erkennbar. Auch die magnetinduktive Seilprüfung konnte diese Schädigung nicht exakt dokumentieren. Sie ist Gegenstand der späteren Nachuntersuchung.

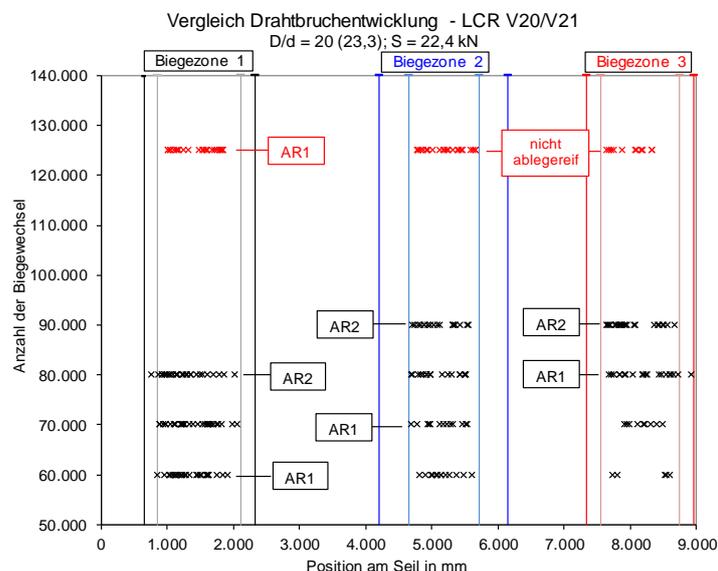


Bild 4: Vergleich Drahtbruchentwicklung bei Seilvariante 2 und 3

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen aller Seilvarianten bei dem kleinsten D/d-Verhältnis und den beiden Laststufen. Die erreichte Lebensdauer des konventionellen Seiles auf der zu großen Rillengeometrie ist geringfügig kleiner als in der normgerechten Rillengeometrie. Die kunststoffummantelten Seilvarianten weisen einen Lebensdauerzugewinn von +27 %/ 55 % bzw. +53 %/ 86 %, verglichen mit der konventionellen Seilvariante 3, auf. Diese Tendenz ließ sich auch für das mittlere D/d-Verhältnis sowie das große D/d-Verhältnis bei beiden Laststufen abzeichnen. Für alle Versuchsparameter war die Steigerung der Lebensdauer infolge der Ummantelung signifikant.

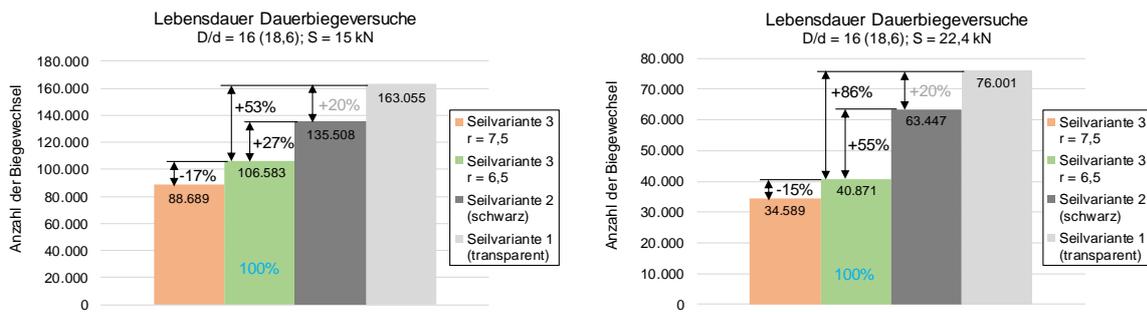


Bild 5: Ergebnisse Dauerbiegewechselversuche

2.2 Ergebnisse Nachuntersuchung

Im Rahmen der Nachuntersuchung der getesteten Seile wurde der äußere Zustand des Drahtseiles betrachtet. Zusätzlich wurde der Fokus auf die Innenschädigung gelegt und das Seil geöffnet. Als Untersuchungskriterium galten die sichtbaren Drahtbrüche an den Außenlitzen der Versuchsseile. Weiterhin gelten die nicht-sichtbaren Drahtbrüche als Bewertungsansatz für die Innenschädigung. Diese können in dem Kontaktbereich der Außenlitzenlage mit dem Seilkern sowie infolge der Berührung benachbarter Außenlitzen entstehen. Es erfolgte die prozentuale Auswertung des Anteils der sichtbaren Drahtbrüche für jedes D/d-Verhältnis und jede Laststufe (Bild 6). Die ummantelten Varianten verzeichnen die Abnahme des Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis. Mit steigender Last nahm der Anteil der sichtbaren Drahtbrüche zu, aber die Innenschädigung war zumeist noch dominant. Die Tendenz des abnehmenden Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis war bei den konventionellen Seilen nicht erkennbar.

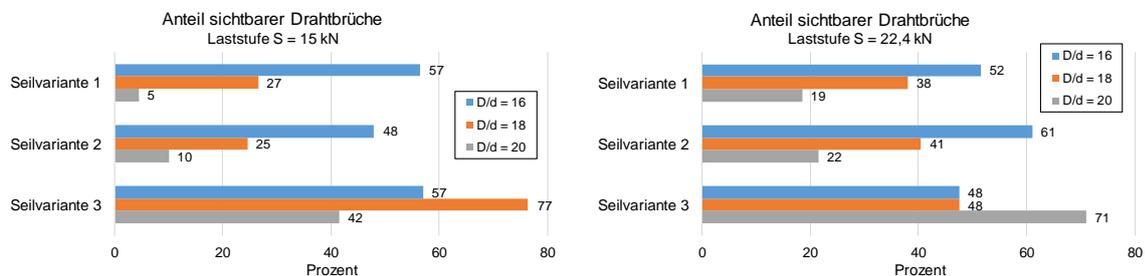


Bild 6: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche

2.3 Ergebnisse Mehrlagenwickelversuche

Um die Eignung eines Drahtseils mit Kunststoffmantel für die mehrlagige Bewicklung einer Seiltrommel beurteilen zu können, sind die Schädigungsstellen und -mechanismen untersucht

worden. Die Seilvarianten 1 und 2 sind dafür auf dem Spulprüfstand des Institutes für Maschinenwesen zwischen zwei Seiltrommeln reversierend (1 Spulzyklus) gespult worden. Dabei ist die Seilzugkraft mit 10 % und 20 % der Mindestbruchkraft (MBK) und das D/d-Verhältnis mit 18 und 24 variiert worden. Die Versuchsmatrix ist in Bild 7 dargestellt. Während des Spulens ist die fortschreitende Schädigung des Kunststoffmantels dokumentiert worden.

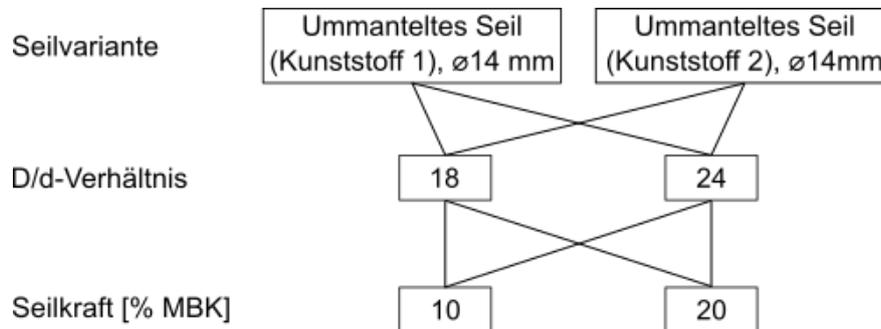


Bild 7: Versuchsmatrix für die Spulversuche der kunststoffummantelten Seile in der Mehrlagenwicklung

Der Versuch wurde beendet, sobald der Kunststoffmantel auf einer Strecke von einem Meter nicht mehr am Seil vorhanden war. Mit den unterschiedlichen Seilzugkräften und D/d-Verhältnissen ergaben sich unterschiedliche Spuldauern, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die größten Spuldauern konnten mit der Seilvariante 2 bei einer Zugkraft von 10 % MBK und dem größeren D/d-Verhältnis von 24 erreicht werden.

Tabelle 1: Erreichte Spulzyklen bei unterschiedlichen Versuchsparametern

	D/d	Prüfkraft [kN]	Kunststoffmantel offen	Gutes Wickelbild	Versuch beendet
Seilvariante 1 (transparent)	24	10	50	130	340
		25	3	4	20
	18	10	-	-	-
		25	1	3	11
Seilvariante 2 (schwarz)	24	10	70	550	550 ¹
		25	2	13	25
	18	10	-	-	-
		25	1	11	20

Insgesamt konnten drei unterschiedliche Schädigungsorte und Mechanismen beobachtet werden. Im Kreuzungs- und Parallelbereich der Seiltrommel mit Lebusrillung ist der Kunststoffmantel mit der Zeit deformiert worden. Der Kunststoffmantel passte sich der dichtest-

¹ Der Versuch wurde bei 550 Spulzyklen beendet, um noch weitere Seile mit der zweiten Trommel testen zu können.

möglichen Form jeweils an. Im Kreuzungsbereich entspricht dies einem Rechteck, was darin resultierte, dass der Kunststoff an den Kontaktstellen zur darüberliegenden Lage komplett aus dem Kontakt gepresst wurde und das Drahtseil offen liegt. Im Parallelbereich der Seiltrommel hat der Kunststoffmantel eine sechseckige Form angenommen.

Die stärkste Schädigung des Kunststoffmantels ist in den Aufstiegsbereichen des Seils von einer Lage in die nächst höhere an den Bordscheiben beobachtet worden. Durch den sich verengenden Spalt wird das Seil in die nächste Lage gezwungen. Zusätzlich zu der Druckbelastung auf den Kunststoff kommt noch eine Scherkomponente dazu, die zu einer Überlastung des Kunststoffs führt. Der Aufstiegsbereich mit den auftretenden Kräften ist in Bild 8 dargestellt. In der ersten Umschlingung der höheren Lage wird das Seil der unteren Lage weiterhin geschädigt, da der Spalt zur Bordscheibe so groß ist, dass die obere Lage sich hier in den Spalt hereinzieht und die Scherbelastung im Kunststoff auftritt.

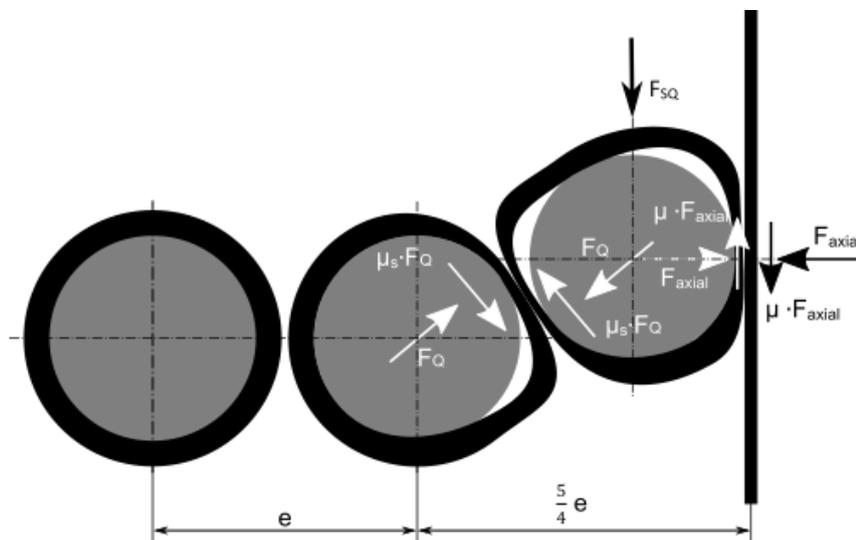


Bild 8: Kräfte und resultierende Deformation am Kunststoffmantel im Aufstiegsbereich

Um eine Schädigung des Seilmantels durch eine überlagerte Druck- und Scherbeanspruchung zu verhindern, kann mit Auflaufkeilen das Seil in die nächste Lage gehoben werden. Das Seil kann sich dann nicht mehr in den verengenden Spalt ziehen und der Kunststoffmantel wird lediglich durch eine Druckbelastung beansprucht. Die ist in Bild 9 dargestellt.

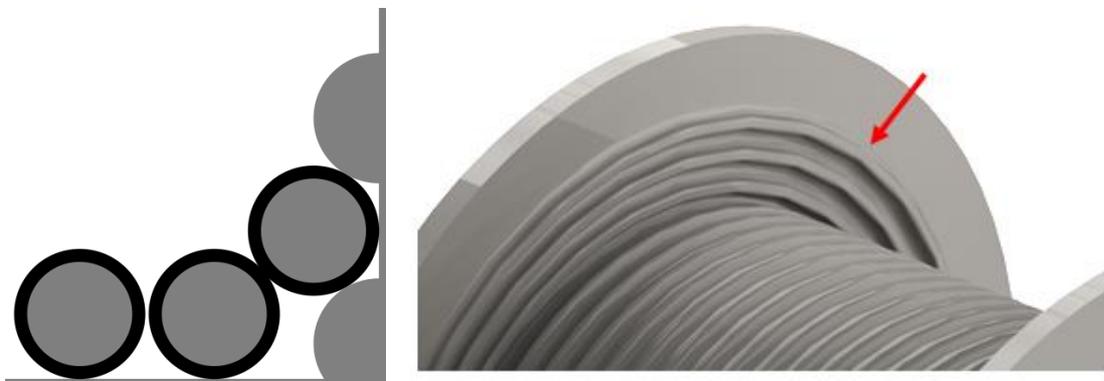


Bild 9: Auflaufkeile an der Bordscheibe, um das Seil seitlich abzustützen und in die nächste Lage zu heben. Für Faserseile (rechts) schon in [5] vorgestellt.

2.4 Ergebnisse Querdruckversuche

Am Institut für Maschinenwesen (IMW) kann die Querelastizität von Seilen mit einem Prüfstand untersucht werden. Dazu werden die Seile sowohl in Längs- als auch in Querrichtung belastet, da die Quersteifigkeit eines Seiles von der Zuglast abhängig ist. Die Quersteifigkeit kann für bis zu sechs Seile gleichzeitig gemessen werden, sodass auch säulenförmige oder pyramidale Anordnungen von Seilen, wie sie in den Parallel- und Kreuzungsbereichen von Seiltrommeln mit Lebusrilling vorkommen, abgebildet werden können. Um den Einfluss der Kunststoffummantelung herauszustellen, wird die Steifigkeit der kunststoffummantelten Drahtseile (Seilvariante 1 und 2) ins Verhältnis gesetzt zu der Steifigkeit des konventionellen Drahtseils (Seilvariante 3). Die Steifigkeit des nicht ummantelten Seils lag im üblichen Bereich für Drahtseile. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Verhältnis Querelastizitätsmodul der Seilvariante 1 zu Seilvariante 3, eine Lage

$\frac{E_{SQ,Seilvar.1}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,70	0,95	0,66	0,37	0,28
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,84	0,50	0,50	0,63	0,65
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,32	0,51	0,76	0,91	0,97
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,48	0,88	0,95	0,93	1,05

Tabelle 3: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 2 zu Seilvariante 3, eine Lage

$\frac{E_{SQ,Seilvar.2}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	5,22	0,95	0,80	0,68	0,52
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,87	0,53	0,59	0,65	0,70
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,34	0,50	0,66	0,75	0,80
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,56	0,63	0,60	0,55	0,61

Zur Veranschaulichung sind die Querelastizitätsverhältnisse in Bild 10 als Boxplot dargestellt. Der Median der Querelastizitätsverhältnisse beträgt 0,68 bei der Seilvariante 1 und 0,64 bei Seilvariante 2. Der Kunststoffmantel senkt die Quersteifigkeit also im Mittel ab, jedoch ist in der Tabelle 2 für Kunststoff 1 zu erkennen, dass sich bei sehr geringen sowie hohen Längs- und Querlasten die Steifigkeitsverhältnisse angleichen. Bei den hohen Lasten ist die Angleichung darauf zurückzuführen, dass der Kunststoffmantel der Last nicht standhält und versagt.

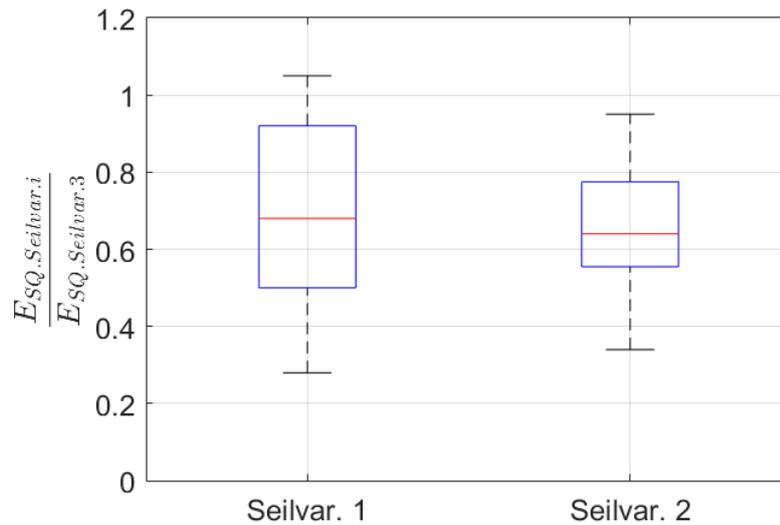


Bild 10: Steifigkeitsverhältnis zwischen dem kunststoffummantelten und konventionellen Drahtseil

3 Numerische Untersuchungen

Die Druckbeanspruchung an Seildrähten beim Lauf über Seilscheiben ist experimentell nicht bestimmbar. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) kann als Hilfsmittel eingesetzt werden. Bei konventionellen und kunststoffummantelten Drahtseilen ist die Zug- und Biegebeanspruchung gleich stark. Die Druckbeanspruchung infolge der Scheibe muss sich durch die Kunststoffschicht ändern. Zum Vergleich der Verteilung der Druckbeanspruchung in einem konventionellen und einem kunststoffummantelten Drahtseil wurden 2D- und 3D-Modelle genutzt (Bild 11). Dabei wurde der Aufbau von der Einfachlitze über das 6x7-Litzenseil bis hin zum gesamten Untersuchungsseil sukzessive vorangetrieben.

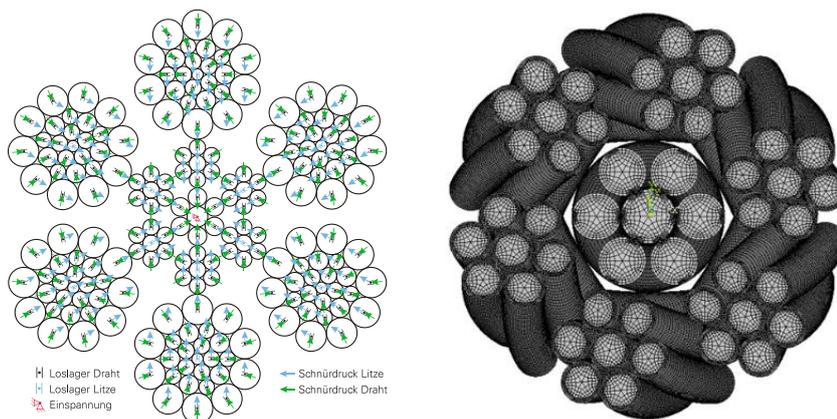


Bild 11: 2D- und 3D-Seilmodell

Im Rahmen der Untersuchungen sind Simulationen mit den erstellten 2D- und 3D-Modellen der Seilvarianten durchgeführt worden. Dabei wurden Randbedingungen auf das Seilmodell aufgebracht, die den realen Belastungen durch Zug infolge einer zu hebenden Masse sowie durch Biegung infolge der Umlenkung durch Seilscheiben entsprechen. Im 2D-Modell wurde der analytisch bestimmte Schnürdruck auf die Einzeldrähte und Litzen aufgebracht. Im 3D-Modell stellte sich dieser Schnürdruck infolge der Zugkraft ein und konnte als Vali-

dierungswert genutzt werden. In der Auswertung wurden der Ort und die Größe der maximal auftretenden Druckspannung der konventionellen und kunststoffummantelten Seilmöde untersucht (Bild 12).

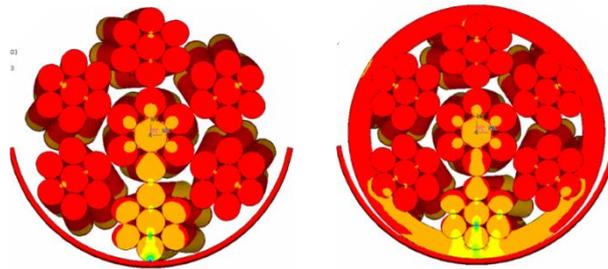


Bild 12: Zugspannungsverteilung im konventionellen und kunststoffummantelten Litzenseil

Durch die Auswertung der Simulationen mit reiner Zugbelastung des Seiles sowie mit Zug- und Querbelastung konnte der Anteil der durch Biegung entstehenden Druckbelastung der Seildrähte ermittelt werden. Eine deutliche Reduzierung der Druckbeanspruchung infolge der Kunststoffummantelung konnte festgestellt werden. Zudem kam es zu einer breitflächigeren Verteilung der Last auf die Außendrähte der Außenlitzen. Der Ort der maximalen Druckbeanspruchung verschiebt sich durch die Ummantelung von dem Außendraht/Seilscheibe-Kontakt in den Kontaktbereich der Außendrahtlage der Außenlitzen zur unterliegenden Drahtlage. Diese Spannung ist dennoch wesentlich geringer als das ursprüngliche Maximum in der konventionellen Variante.

Da Versuche sowohl kosten- als auch zeitintensiv sind, ist eine numerische Abschätzung der Quersteifigkeit der Seile mithilfe der FEM durchgeführt worden. Im Modell ist das konventionelle Drahtseil aus Abschnitt 2.4 modelliert worden. Wie im Versuch ist das Seil in einem ersten Schritt längs und in einem zweiten Schritt quer belastet. Das Modell ist in Bild 13 dargestellt. Aus der aufgebrachten Kraft und der resultierenden Verformung ist die Quersteifigkeit des Seils bestimmt worden. Für den für die Anwendung relevanten Bereich von $k_Q = 0,04$ bis $0,08$ ist die Abweichung von 6,7 % eine gute Näherung. [6]

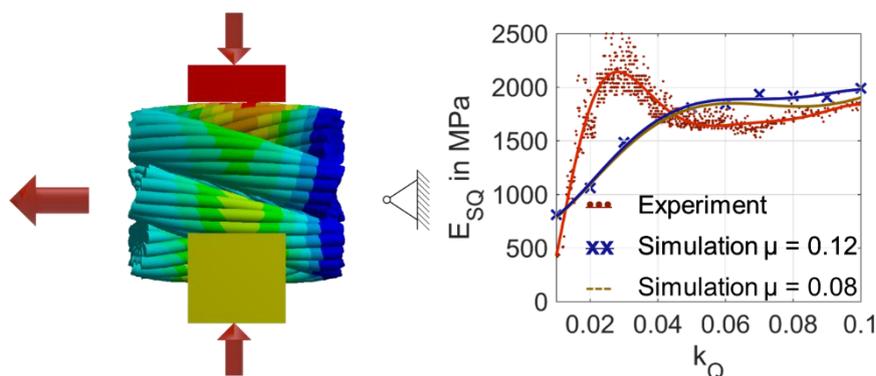


Bild 13: Seilmodell und die damit bestimmte Quersteifigkeit des Seils [6]

In einer Parameterstudie ist der Kreuzungsbereich auf der Seiltrommel für kunststoffummantelte Seile nachgestellt worden. Die Seile sind wie bei der Simulation der Querelastizität mit einer Rillengeometrie geführt worden. Über die Rillengeometrie ist die Last aufgebracht worden. Dabei ist der Einfluss des variierten Elastizitätsmoduls des Kunststoffes auf die Dehnung, Kontaktbreite und auftretenden Scherbelastungen untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Bild 14 dargestellt. Ein niedrigerer Elastizitätsmodul führt dabei zu einer

größeren Kontaktellipse (Kontaktbreite) und geringeren Scherspannungen im Kunststoff. Mit steigendem Elastizitätsmodul nimmt die Kontaktfläche ab, was zu höheren Spannungen im Kunststoff führt. Hieraus kann abgeleitet werden, dass ein niedrigerer Elastizitätsmodul zu bevorzugen ist, da hieraus geringere Spannungen resultieren. Es ist bei der Auswahl des Kunststoffes jedoch auch die Zugfestigkeit des Kunststoffes zu berücksichtigen. Bei den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Wickelversuchen versagte Kunststoff 1 früher als Kunststoff 2, obwohl der Elastizitätsmodul von Kunststoff 1 nur etwa halb so hoch ist wie der von Kunststoff 2. Dies ist auf die etwa doppelt so hohe Zugfestigkeit zurückzuführen.

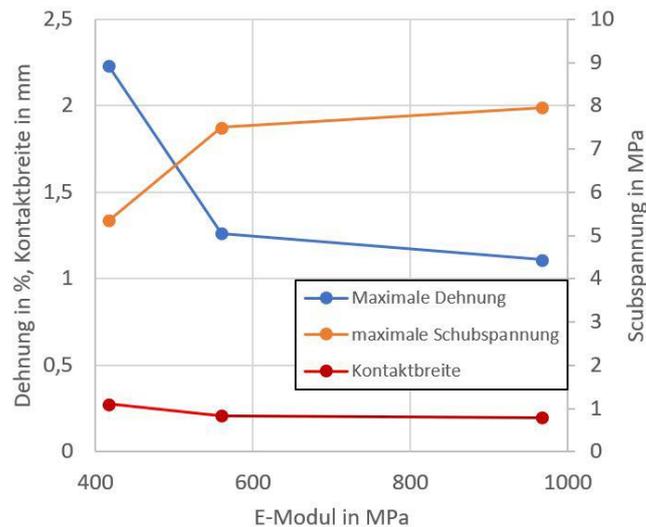


Bild 14: Maximale Schubspannung, Dehnung und Kontaktbreite bei unterschiedlichen Elastizitätsmodulen in MPa [7]

4 Lebensdauerabschätzung

Der rechnerische Ansatz zur Ermittlung der Betriebs- und Lebensdauer von laufenden Drahtseilen nach Methode „Leipzig“ bezieht das mechanische Seilmodell ein. Die in der Praxis auftretenden Zug-, Biege- und Druckspannungen werden berücksichtigt. Zur Ermittlung der Gesamtbeanspruchung y werden geometrische Abmessungen und Eigenschaften der Seilkonstruktion und des Seiltriebes genutzt. Die Betriebsdauerkonstante H sowie der Anstrengungsexponent CL wurden aus Regressionsrechnungen bestimmt. Somit lässt sich die Biegewechselzahl nach Gl. (1) und Gl. (2) bestimmen:

$$y = \frac{1,04 \cdot \frac{S}{A} + \frac{0,6 \cdot E}{K^2 \cdot D/d} + \frac{K \cdot L \cdot B}{d} \cdot \sqrt{\frac{S}{D/d}}}{R} \quad (1)$$

$$N = \frac{H}{y^{CL}} \quad (2)$$

Der Ansatz unterscheidet in den inneren und äußeren Kontaktbereich des Seiles. Der innere Kontaktbereich beschreibt den Kontakt der Außenlitzenzlage mit dem Seilkern. Der äußere Kontakt ist definiert durch die Berührungszone der Außendrähte der Außenlitzenz mit der Seilscheibe. Die Schadensentwicklung im Seilinneren kann allerdings durchaus zum frühzeitigen Versagen des Seiles beitragen [3].

Die Lebensdauer der experimentell untersuchten konventionellen Seile wurde rechnerisch mittels der Methode „Leipzig“ abgeschätzt. Durch die gewonnenen Erkenntnisse der Beanspruchung der Einzeldrähte bei Zug- und Querbelastung aus den numerischen Simulationen konnten die prozentuale Reduktion der Beanspruchung sowie die Verlagerung des Ortes der maximalen Spannungsinduzierung bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen konnte der Anteil der Druckspannung an der Schädigung des ummantelten Drahtseiles während des Laufs über Seilscheiben im Berechnungsansatz angepasst werden. Für den äußeren Kontaktbereich konnte so die Erhöhung der Lebensdauer um mehr als 40 % berechnet werden. Für den inneren Kontaktbereich wurde eine Verdopplung der Lebensdauer ermittelt.

Zusammenfassung

Der positive Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Lebensdauer der Drahtseile konnte in den Dauerbiegeversuchen nachgewiesen werden. Mit numerischen Berechnungen sind die Beanspruchung der Drähte im Seil bestimmt und die Lebensdauerabschätzung nach der Methode Leipzig angepasst worden. Für die Mehrlagenwicklung sind die Schadensorte und -mechanismen bestimmt worden. Durch konstruktive Maßnahmen an der Seiltrommel sind die Schäden durch den Aufstieg des Seils in die nächsthöhere Lage vermeidbar.

Bis zur Anwendung kunststoffummantelter Drahtseile in der Mehrlagenwicklung ist noch weitere Forschungsarbeit zu leisten.

Quellenverzeichnis:

- [1] VDI 2358: VDI-Richtlinie – Drahtseile für Fördermittel. Berlin: Beuth Verlag, 2012
- [2] Spezialdrahtseile für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln; http://www.ropetechnology.com/bro_dt/Bro_Mehrlagen_de.pdf Datum des Zugriffs 10.01.2021
- [3] Jehmlich, G.: Anwendung und Überwachung von Drahtseilen. 1. Auflage, Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1985
- [4] DIN ISO 4309: Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage. Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [5] Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings of the OIPEEC Conference 2015, Dr. I.M.L. Ridge, Stuttgart, ISBN: 978-0-9552500-5-7.
- [6] Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M.: Finite element analysis of wire rope stiffness. In: M.A.R. Dohm (Hrsg.): Exploring Opportunities - Synthetic/Steel. Proceedings of the OIPEEC Conference 2019. Conference 2019. Den Haag, 12. 15. März. OIPEEC, S. 207–220.
- [7] Neumann, M.: Aufbau und Validierung eines Rechenmodells für FE-Untersuchungen an Kunststoffummantelten Seilen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, TU Clausthal

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Sicherheitsfunktionen von Funkfernbedienungen Safety functions of Radio Remote Controls

Frédéric Schatz



Frédéric Schatz
Conductix Wampfler
JAY Electronique
ZAC La Bâtie
37, rue Champrond
38334 Saint-Ismier Cedex
France

Safety functions of Radio Remote Controls

Over the last 25 years, radio remote control has become the preferred way for controlling cranes and much of the lifting equipment used in the industry.

Today, radio remote control is a pillar of operator safety.

First of all, by giving freedom of movement to the operator. Thanks to wireless control, the operator can stay away from the suspended load and any dangerous / harmful location in the work area. Then, through the implementation of new features and technological evolutions, radio remote control has become an active component in the safety chain. The paper is describing four of these features, some of them having been introduced in the market just recently.

1 Radio Remote Control for cranes

The use of radio remote controls to operate cranes represented a great step in terms of operator and work safety. Not being limited by a cable connection anymore, the operator has complete freedom of movement in the work area. He's able to stay away from the suspended load, to place himself where he has the best visual control and he can navigate in the entire working area, without being limited by a cable.

With a range exceeding 100 m, multidirectional signal emission, reliable communication both indoor and outdoor, radio has established itself as the best wireless solution, compared to other technologies like infrared.



Figure 1: First radio remote for maintenance crane in hydraulic power plant, 1985

At Jay Electronique, the journey started in 1980 when the company replaced pendant controls on overhead cranes in a Potain factory with their radio equivalents. The technology at that time was based on 152 MHz radio modules.

Over the years, radio and electronic technologies made regular progress and brought the radio remote control to a much higher degree of performance and functionalities. Compactness, radio performance, autonomy, feature rich man-machine interface, connection with complex automation control, compatibility with severe environments like Explosive environments, to name only a few.

Today modern radio remotes are powerful systems with hardware and software to support complex interactions, used in critical systems and providing high levels of safety.

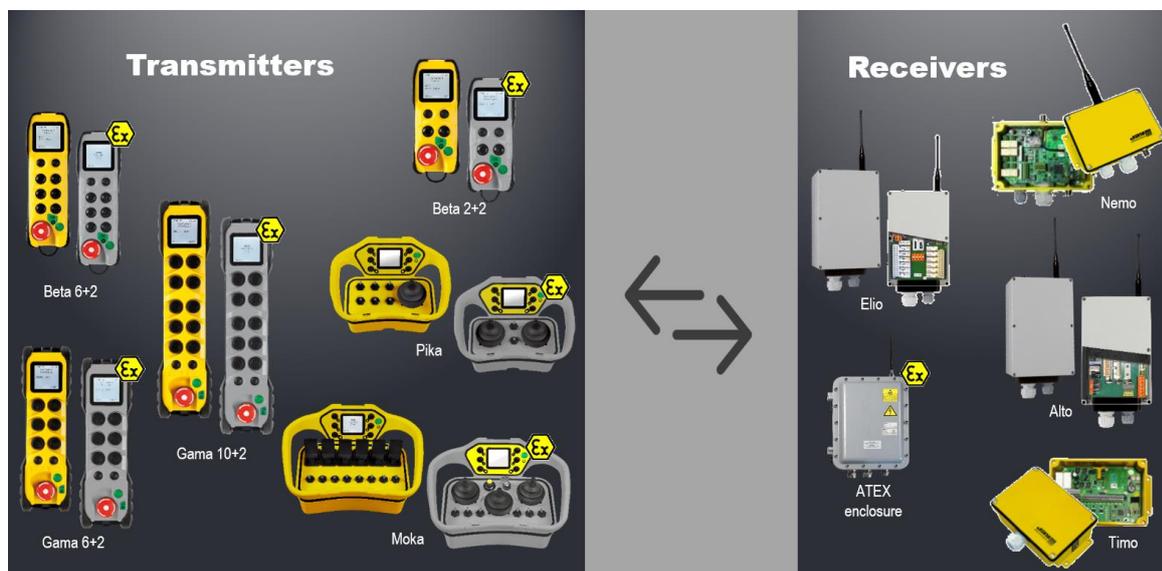


Figure 2: Current portfolio of JAY radio remote

Some examples of high-level functionalities are given here:

- execute critical functions with a certified safety performance: emergency stop, critical process functions, dual hand actions
- implement access control. Make sure that only allowed personnel is using the crane, make sure the use of the crane is permitted only in some conditions, define safe areas for the operator using the crane
- interact with the crane control and provide safety related feedbacks on a display



Figure 3: Crane operator using a screen based remote control

2 Safety performance of radio remote controlled functions

In Europe, the machine directive requires that the manufacturer conducts a risk analysis and implements safety measures to bring down the risk to an acceptable level. For the control components of crane, safety measures consist in two requirements mainly,

- a. provide an emergency stop, with a rated safety performance of minimum SIL2 PLd
- b. depending on the application and the criticality of the tasks performed, guarantee that critical actions are executed with a rated safety performance, usually starting with SIL2 PLc

The safety performance is defined using a tree analysis tool, analysing each risk and taking in account the severity of the harm, frequency of occurrence, possibility to avoid the danger. The result is given either in a Performance Level scale or Safety integrated Level SIL.

EN ISO 13849-1	Safety of machinery – Safety-related parts of control systems
IEC 62061	Safety of machinery – Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems
IEC 61508	Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic-safety-related systems
IEC 61784-3	Industrial communication networks – Profiles – Part 3: Functional safety fieldbuses – General rules and profile definitions

Figure 4: European norms for functional safety of control devices

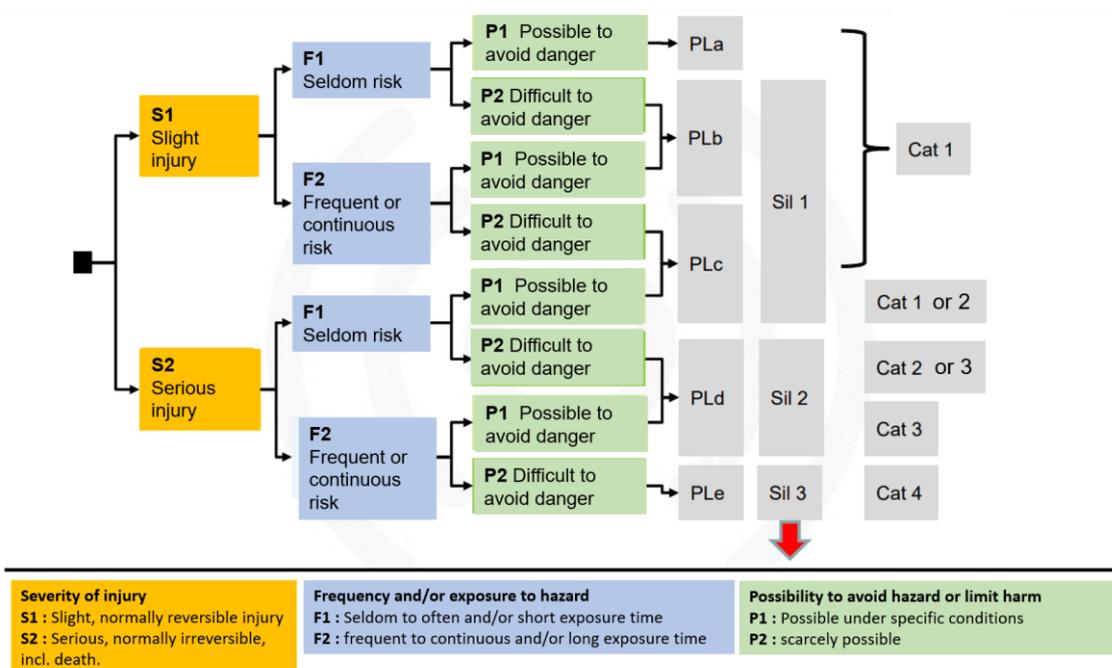
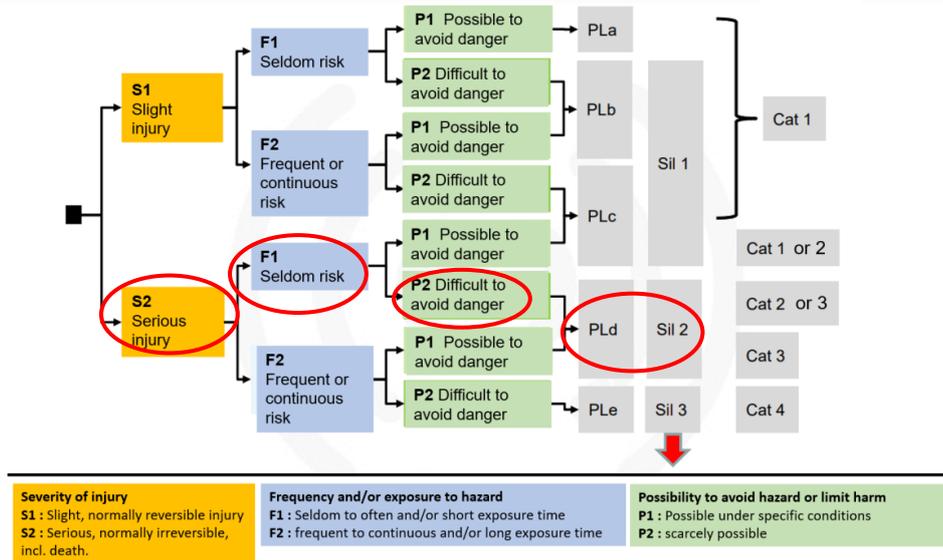


Figure 5: Tree analyse tool to evaluate the safety level of a risk reduction measure

Examples for safety requirement for crane control functions:

Emergency stop

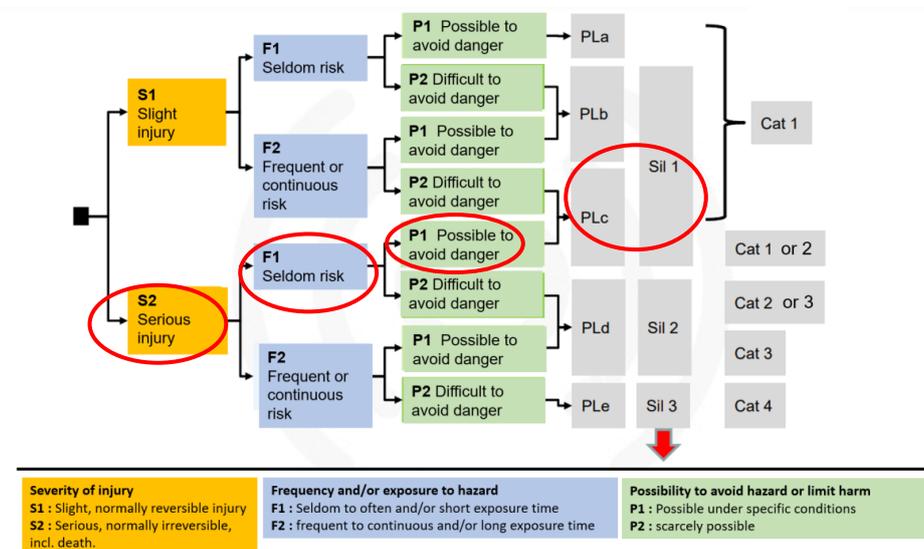
- Severity: serious injury
- Occurrence: low frequency
- Possibility to avoid hazard: difficult to avoid



Final rating: SIL2 PLd

Critical functions: de-magnetizing of electromagnets, rotating hot metal ladle, moving a 100 m long wind turbine blade.

- Severity: major injury
- Occurrence: low frequency
- Danger avoidance: possible to avoid



Final rating: SIL1 PLc

To achieve these levels, the complete radio remote system must be designed and produced according to design rules for functional safety, such as:

- **Redundancy** all along the signal transmission chain: double action / double contact buttons, dual channel output, dual channel architecture (2 independent microprocessors with output comparison), self-check loops, error correcting code in the telegram, etc.
- **Continuous emission and radio link monitoring**

A safety system must guarantee that only the crane is controlled by the authorized operator. This is done by managing unique ID codes for each device, so that the radio receiver on the crane responds only to commands from the authorized transmitter.

The manufacturer is responsible must ensure that this ID code is never used by two devices. Once it is switched ON, a safety radio system is transmitting constantly, even if no command is activated. The radio system must guarantee that the communication is working to ensure that a safety signal like an emergency stop will be sent unmistakably, at any moment.

If the radio link is broken, the radio system will detect this abnormal situation and automatically switch to safety. This is called a passive stop, in opposition to an active stop required by worker action.

The permitted time after which the system goes to safety varies with the application, usually between 0.5 and 3 seconds.



Figure 6: SIL2 PLd single or dual action commands. SIL3 PLe emergency stop

3 Securing the operator area with infrared connection

While the freedom of movement and ability to control from any place are great benefits from wireless control, ensuring that the crane operator stands in a dedicated area when the crane is active can be essential to ensure safety of people and equipment.

Playing with the power of the radio signal will reduce the working range but this simple solution does not offer proper accuracy and does not strictly define an area on the floor.

A very effective way is to combine omnidirectional radio waves with a directional infrared beam.

By adding an infrared validation for critical sequences, we make sure that the operator is staying in the limited area defined by the cone of reception of the infrared sensor. An infrared sensor has a cone of visibility of 60° . Placed at 5m, it defines a ground area of approx. 5m diameter in which the operator has to stay, the 'safe area'.

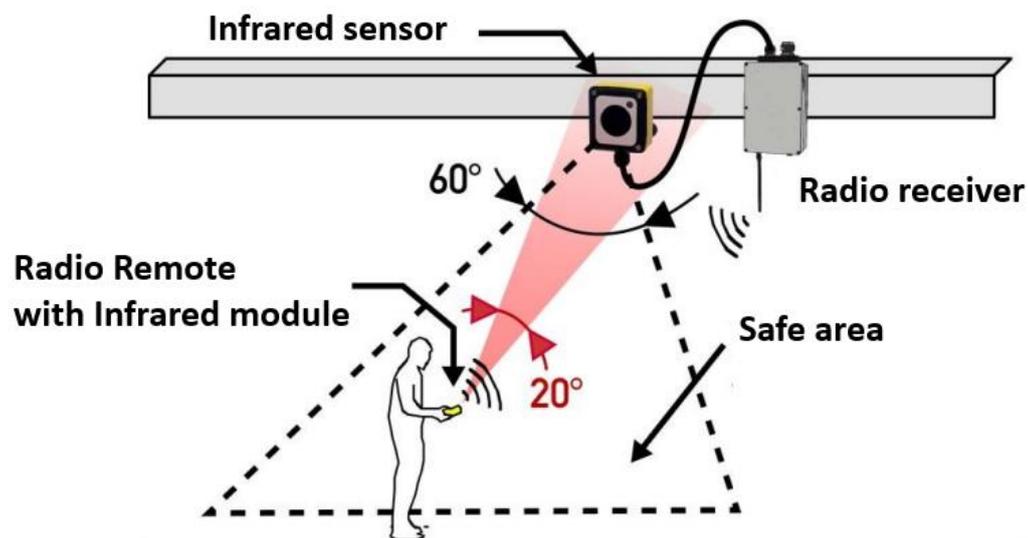


Figure 7: Safe area defined by infrared sensor

It is possible to connect several IR sensors and define an extended safe area.

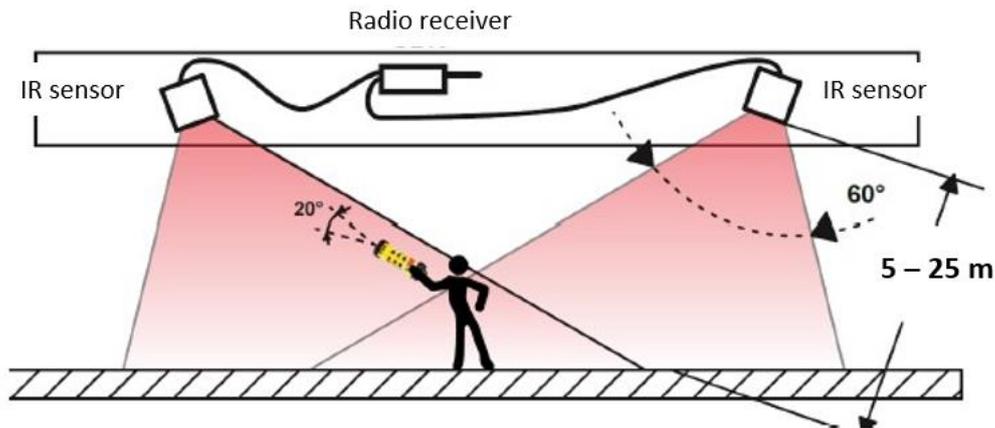


Figure 8: Extended safe area defined by multiple infrared sensors

Depending on the application, infrared connection is used only for start or during complete operation.

If it's only for start the operator must stand in the safe area to start the radio remote. After, he is free to move with the radio remote. This option is good to make sure that the crane is not started without having visual contact, eg. from another room.

When complete operation is selected, the operator must stand in the safe perimeter all the time. It is particularly adapted to processes generating severe conditions like heat, splashes or fumes.

4 Feedbacks – alarms – dynamic interface: from pushbuttons to mobile control panels

Staying informed of critical parameters like load or wind speed, being in direct communication with the main control, reading alarms, status or fault messages: the modern radio remote system is capable of much more than push-button commands and has become, thanks to digital technology, a true mobile control panel.

Key enablers to this transition were:

- Reliable and low latency communication
- Bi-directional communication: the receiver is also a transmitter, sending data back to the operator
- Programmable LCD displays
- Bus communication with a PLC

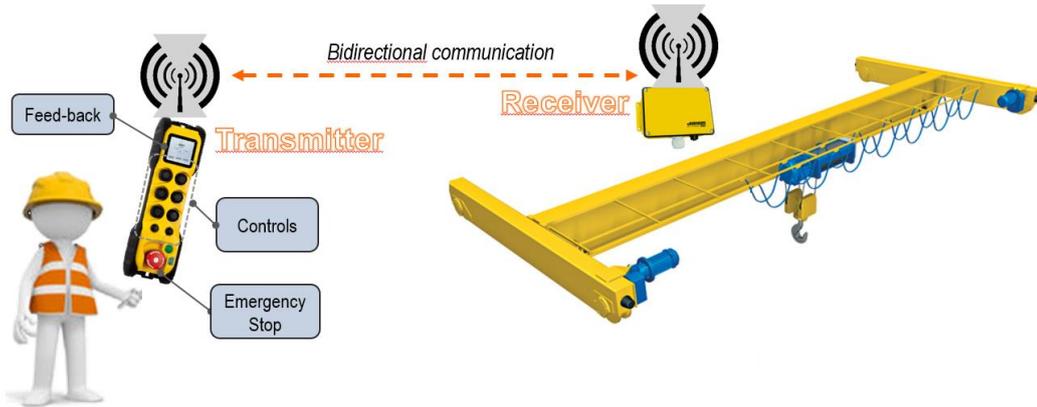


Figure 9: Bidirectional communication

Modern radio remotes with displays have the potential to serve as mobile interfaces and interact with the machine in an effective way.

Here are some examples:

Alarms and warnings: on a signal received from the main PLC, the radio remote displays warning or alarm messages in relation with the crane or the process. End limit crossing, excessive load, excessive wind speed, overpressure, faults. All are displayed in clear text or even with personalised graphic symbols. The real time and reliable information allow quick and safe action by the operator.

Operator inputs: in semi-automated cranes, the operator does not directly control the crane movements but rather tells the system which task to perform or which position to reach. A customer user interface with menus and lists to scroll will be used as interface. The operator is guided by the interface and his choices are predefined through safe procedures.

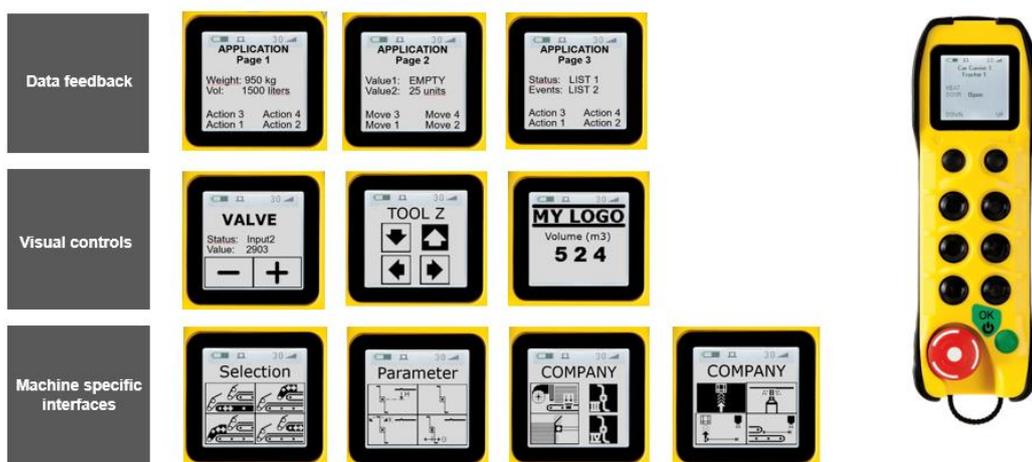


Figure 10: Customised display designs

Customers are supplied with a tool to design the interface by themselves, in an intuitive and effective way.

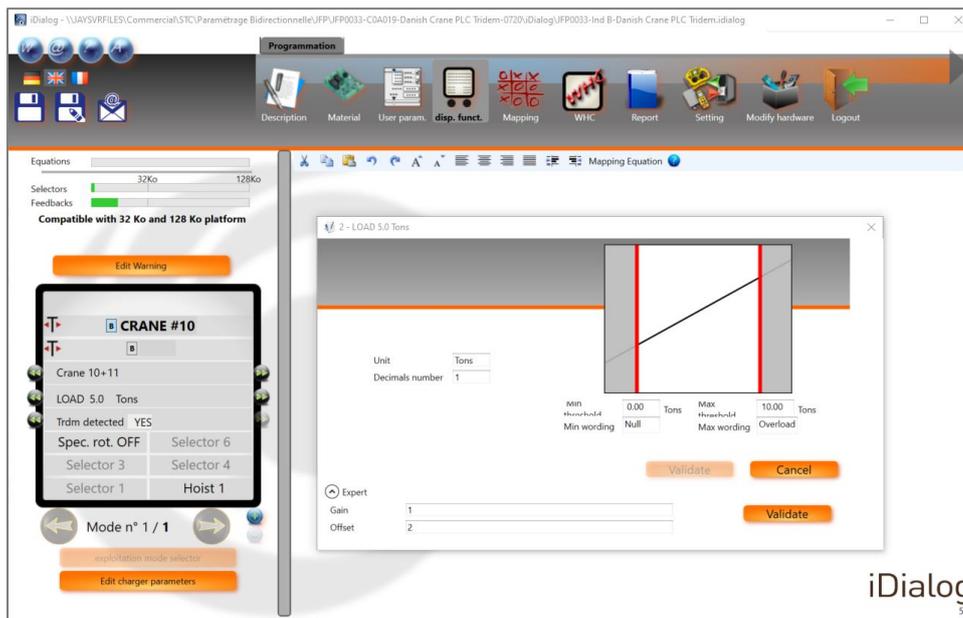


Figure 11: Software for interface design

5 Radio remote combined with trapped-key interlocking for custom-made access control

Making sure that the right person controls the machine at a given time and executes only authorized actions is essential to guarantee safe operation.

Trapped-key interlocking is a well-known and efficient technology to manage safe access and safe operation

Often used with electric panels, it relies on a simple and robust principle. In the simplest situation, switching off an electric panel frees a key. The key is inserted in an exchange panel, freeing another key. This key is then used to access a restricted area. Through the logic of interlocking, access to this area is not possible if the electric panel is not switched off.

In a recent project, Conductix had the opportunity to combine the robust access control features of a trapped-key system with the portability and flexibility of a radio remote system, giving a customized and highly safe solution to his customer.



Figure 12: Typical setup in a train maintenance depot

The application is in a maintenance depot for trains.

A safe sequence has been defined to operate the overhead cranes

1. Switch off power in the catenary wires => key #1 is free
2. Ground the train => key #2 is free
3. Pantograph down => key #3 is free
4. All keys in place on the exchange panel => key #4 is free
5. Key #4 is inserted in the radio remote, the switch is activated, allowing the use of the remote and the crane

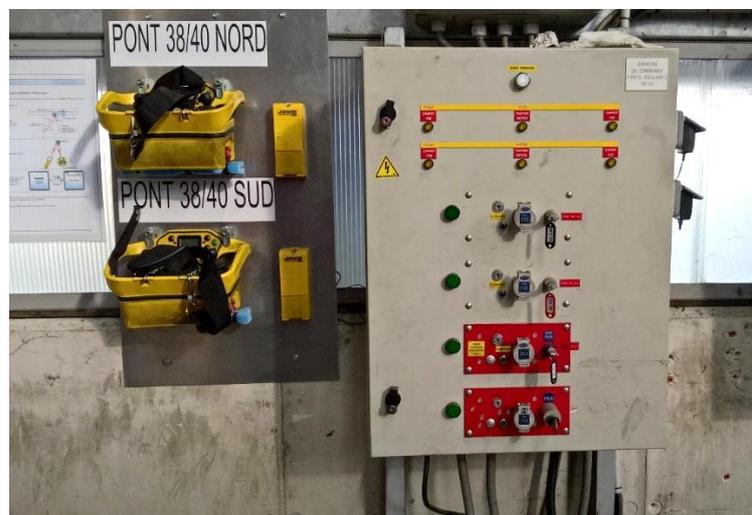


Figure 13: Master panel with trapped-key interlocking and radio remote for overhead cranes



Figure 14: Radio remote with trapped-key insert

Left: key missing, no operation. Right: key inserted, operation active

Zusammenfassung

Conclusion

Through a selection of 4 different features, we explored the added value of radio remote control in building a high safety control system.

Initially the main contribution of radio remote to safety was to move freely across the work area and stay away from dangerous locations. With the progress of hardware and software, the number of functionalities has grown extensively.

Today, advanced radio remote must be considered as a powerful Human Machine Interface with built-in safety, certified to levels as high as SIL3 Plc, and interfaces with all automation standards

In the future the majority of hazardous or tedious tasks will be achieved remotely. Most of the bricks to build such systems are already available and radio remote will undoubtedly continue to play a central role.

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane zur Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung in Smart Factories

Giuliano Persico, Anja Fischer

Frank Golatowski, Fabian Hölzke, Hannes Raddatz

Matthias Riedl, Thomas Bangemann, Duy Lam Tran

Karsten Meisberger

Hagen Borstell

Klaus Hanisch, Henry Cermann

Metin Tekkalmaz

Julian Lategahn

OPTIMUM

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Giuliano Persico (Referent)
Demag Cranes & Components GmbH
Ruhrstraße 28
58300 Wetter (Ruhr)

Dr. Frank Golatowski (Referent)
Universität Rostock
Richard-Wagner-Straße 31
18119 Rostock-Warnemünde

Folgen Sie uns auf



YouTube



LinkedIn



Klaus Hanisch (Referent)
tarakos GmbH
Werner-Heisenberg-Straße 1
39106 Magdeburg

Innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane

Im Rahmen des internationalen, in Deutschland vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten ITEA3-Forschungsprojektes OPTIMUM (OPTimised Industrial IoT and Distributed Control Platform for Manufacturing and Material Handling), sind innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane entwickelt und prototypisch in einem Material Handling Demonstrator implementiert worden. Die Erprobung und Validierung der durch die Assistenzfunktionen erreichbaren Effizienzsteigerung wurde sowohl durch Simulation als auch in einem realen Demo-Montageprozess verifiziert und dokumentiert. Voraussetzungen für die neuen Assistenzfunktionen sind eine verteilte dezentrale Steuerungsarchitektur, Indoor-Lokalisierung aller am Materialfluss beteiligten Akteure (Menschen und Maschinen) sowie eine hochverfügbare, echtzeitfähige drahtlose Kommunikations-Infrastruktur. Auch Aspekte der funktionalen Sicherheit und der Cyber Security wurden berücksichtigt.

1 Motivation

Im Material-Handling-Segment werden Komfortfunktionen für den Bediener, hohe Flexibilität und Produktivitätssteigerung der Maschinen sowie sichere Handhabungsprozesse (Safety) als entscheidende Kriterien für die Nutzung von Kranen in zukünftigen Smart Factories eingeschätzt. Das Projekt OPTIMUM adressierte innovative Konzepte für das Engineering, die Inbetriebnahme, die Steuerung sowie Überwachung von „Material Handling“ Lösungen. Gegenüber den zur Ausgangssituation etablierten zentralen und hierarchisch gegliederten Steuerungs- und Anwendungsprozessen (S95 / IEC 62264) erfordern künftige, komponentenbasierte Konzepte und „kollaborative Automatisierung“ **verteilte** Funktionalitäten. Die in OPTIMUM entwickelten und prototypisch implementierten Technologien sollen Maschinen- und Kranhersteller dazu befähigen, Hardware-Varianten der eingesetzten Steuerungstechnik zu reduzieren und durch Modularität der eingesetzten Software zu ersetzen. Kontext- und Positionsinformationen sollen Assistenzfunktionen ermöglichen, die zu einer Steigerung von Effizienz, Komfort und funktionaler Sicherheit führen und somit die Chancen der Platzierung von neuen und innovativen Produkten im Markt erhöhen.

Unternehmen, die heute klassische Steuerungstechnik vertreiben, werden befähigt, auf die Herausforderungen von komponentenbasierten, verteilten industriellen Steuerungen zu reagieren. Die Arbeiten in OPTIMUM sind bereits in Industrie 4.0 Arbeitskreise eingeflossen, insbesondere auch in die Spezifikation des „OPC UA Companion Profile for Cranes & Hoists“.



Bild 1: Material Handling Demonstrator in der Demag Research Factory

2 Assistenzfunktionen für Standardkrane

Im Material Handling Demonstrator (MH-Demonstrator), siehe Bild 1, wurden folgende neue Funktionen implementiert:

- **Come to Me:** Der Kran fährt autonom zu der Bedienerposition.
- **Follow Me:** Der Kran folgt autonom dem Bediener.
- **Go To:** Der Kran fährt autonom zu einer von Bedienern gewählten Zielposition.
- **Follow Machine:** Der Kran folgt autonom z. B. einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) oder einem Gabelstapler.
- **Restricted 3D Zones:** Dreidimensionale Zonen, die nicht oder nur unter Einhaltung bestimmter Bedingungen – z. B. mit reduzierter Geschwindigkeit – vom Kran angefahren werden dürfen.

Alle aufgeführten Assistenzfunktionen können auch mit der Funktion „Kran-Tandem“ kombiniert werden, die die gleichzeitige Bewegung mehrerer Krane und Laufkatzen/Hebezeuge ermöglicht.

Der Demonstrator in der Domäne des Material Handling (MH) umfasst, neben zwei Kranen, weitere verschiedene Maschinen, die für den innerbetrieblichen Materialfluss in industriellen Prozessen typischerweise eingesetzt werden (siehe Bild 2). Die beiden Industriekrane sind mit je zwei Laufkatzen und Hebezeugen ausgestattet, um so den "flurfreien" Materialtransport zu realisieren. Der bodengebundene Transport erfolgt mittels eines manuell betriebenen Gabelstaplers und eines FTS-Prototyps.

Zur Demonstration und Validierung der innovativen Assistenzfunktionen wurde ein "Demo-Montage-Prozess" definiert, der alle Assistenzfunktionen in einem logischen Kontext nutzt. Für das Montageszenario wurden insgesamt vier Montageplätze in der DEMAG Research Factory eingerichtet. Die Montageaktivitäten werden von zwei Personen durchgeführt, die auch für die Steuerung der benötigten Maschinen zuständig sind: Krane, FTS und Gabelstapler.

2.1 Der Montageprozess

Der Montageprozess besteht aus drei verschiedenen Schritten - siehe Bilder 2-6.

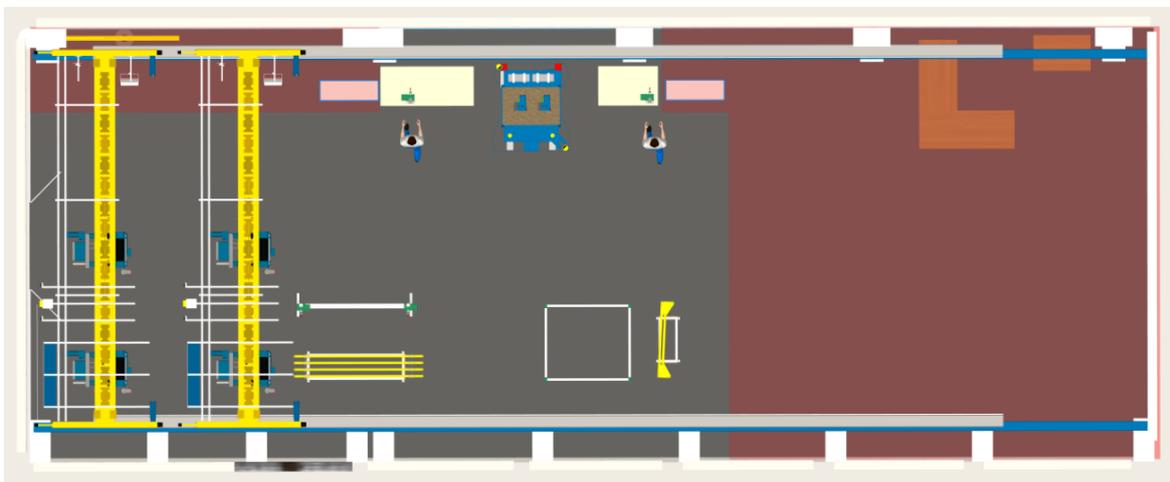


Bild 2: Draufsicht Demo-Montage-Szenario

Zunächst wird ein DEMAG-Kettenzug mit Steuerplatine, Bremse und elektrischer Abdeckung komplettiert. Dies geschieht an den Montageplätzen 1 und 2.

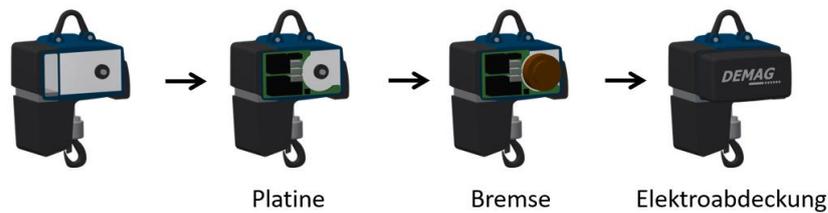


Bild 3: Erster Montageschritt

Im zweiten Schritt werden zwei Kettenzüge mit einem Vierkant-Träger zu einem "Duo" verbunden. Für die Duo-Montage gibt es eine eigene "Duo-Montage-Station".



Bild 4: Zweiter Montageschritt

An der dritten Arbeitsstation werden zwei Duo-Kettenzüge mit zwei Traversen zu einem "Quadro" montiert. Auch für die Quadro-Montage ist ein eigener Montageplatz vorhanden.

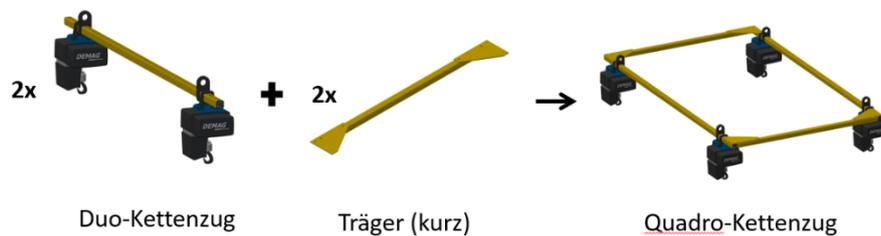


Bild 5: Dritter Montageschritt



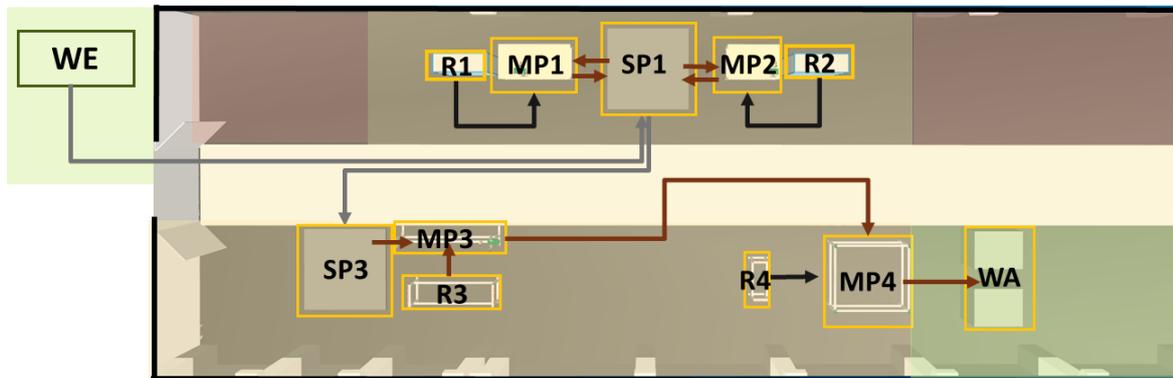
Bild 6: Montage- und Aufbaustationen

Der Kettenzug stellt in diesem Szenario eine "Einzellast" dar, die mit nur einem Anschlagpunkt sicher transportiert werden kann. Der "Duo" repräsentiert eine "Langlast", für deren sicheren Transport zwei Anschlagpunkte benötigt werden. Der "Quadro" symbolisiert "flache Lasten" (z. B. Flugzeugflügel), die mehr als zwei Anschlagpunkte für ihren sicheren Transport erfordern.

Sowohl zum Transport des „Duo´s“ als auch des „Quadros“ können die beiden Krane im "Tandem-Modus" verfahren werden, so dass ein sicherer Transport der verschiedenen Lastformen gewährleistet ist.

2.2 Validierung

Bild 7 stellt eine Übersicht (Top View) des Montageprozesses in der Demonstratorhalle dar:



Legende			
Abkürzung	Bedeutung	Zeichen	Bedeutung
WE	Wareneingang		Sperrbereich
WA	Warenausgang		Montagebereich
MPn	Montageplatz (Nummer)		Quelle/Senke
Rn	Regal (Nummer)		Materialfluss per FTS
SPn	Stellplatz (Nummer)		Materialfluss per Kran

Bild 7: Montageprozesslayout mit Materialfluss vom halbfertigen Kettenzug zum Quadro-Kettenzug

Der Montageprozess der Kettenzüge in der Produktionslinie wurde in zwei verschiedenen Szenarien realisiert:

1. Materialfluss und Handling mit konventionellen Maschinen ohne Assistenzfunktionen
2. Materialfluss und Handling mit den innovativen OPTIMUM-Assistenzfunktionen

Die Gesamtzeit für die Montage eines Quadro-Kettenzuges wurde für beide Szenarien zunächst simuliert (Bild 8):

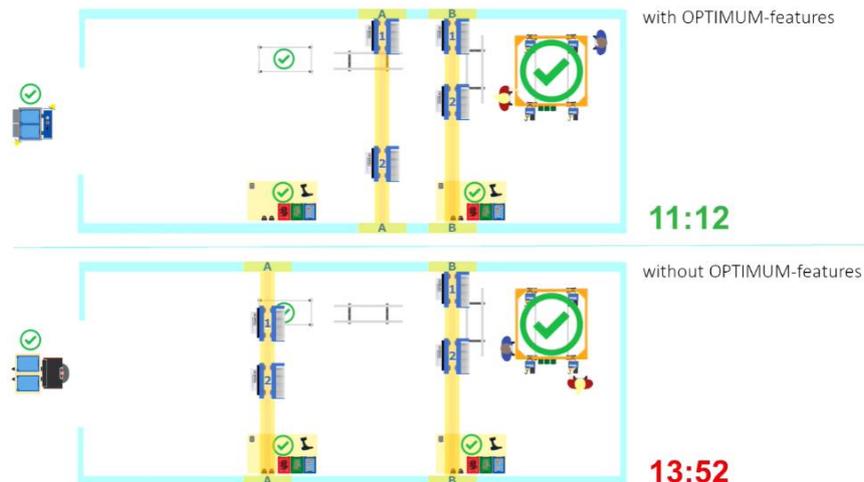


Bild 8: Simulation der Montage eines Quadro-Kettenzuges mit und ohne OPTIMUM Assistenzfunktionen (<https://www.youtube.com/watch?v=BwPIQu31JHU>)

1. Montagezeit ohne Assistenzfunktionen = 13' 52"

2. Montagezeit mit Assistenzfunktionen = 11' 12"

Der Vergleich der Montagezeiten ergibt eine Zyklusreduktion von ca. 18 %.

Die Prozessschritte und die reinen Montagezeiten sind in beiden Szenarien gleich. Die Zyklusreduktion wird durch die Aktivierung von autonomem Verfahren der Krane und des FTS mittels folgender Assistenzfunktionen erreicht:

- Come to Me
- Go To
- Follow Machine

Die Erfassung der Zykluszeiten im realen Demo-Montageprozess konnte die Simulationsergebnisse bestätigen.



Bild 9: Realer Demo-Montageprozess (<https://www.youtube.com/watch?v=ulspY7qCyws>)

In Anbetracht der kleinen Fläche (ca. 220 m²) der Demo-Montage-Linie ist die Einsparung bereits recht beeindruckend und es ist zu erwarten, dass sie sich bei längeren Verfahrenswegen aller am Prozess beteiligter Maschinen entsprechend weiter erhöhen würde.

In den nächsten Kapiteln werden die technischen Voraussetzungen für die Implementierung dieser Assistenzfunktionen beschrieben.

3 Verteilte Steuerungsarchitektur

Die Umsetzung der innovativen Assistenzfunktionen erfordert das Zusammenwirken mehrerer Steuerungskomponenten in den beteiligten Maschinen. Dies bedarf technischer Voraussetzungen, die in OPTIMUM definiert und umgesetzt wurden.

Kern des OPTIMUM-Konzepts sind Geräte, die vorwiegend im industriellen Umfeld eingesetzt werden und verschiedene Aufgaben übernehmen können. Sie laufen autark und sind z. B. direkt in Maschinen verbaut bzw. eingebettet. Speziell für die Erfüllung der Steuerungsaufgaben ist auf den Geräten eine Komponente „Distributed Control Platform“ (DCP) vorgesehen. Sie basiert auf dem Distributed Object Model Environment (DOME) und erlaubt die Kooperation einer beliebigen Anzahl von Geräten und Maschinen, um gemeinsam z. B. Transportaufgaben zu lösen [6]. Wie jedes herkömmliche Steuerungsgerät verarbeitet das DCP Sensordaten und erzeugt Aktorinformationen, die über geeignete Schnittstellen mit der Peripherie ausgetauscht werden. Steuerungsinformationen zwischen DCP werden über ein effizientes Kommunikationsprotokoll ausgetauscht [4], welches bei Nutzung von IP-Kommunikation auch gesichert [5] erfolgen kann.

Neben der direkten, vernetzten Kommunikation zwischen den DCP Instanzen auf den eingebetteten Steuerungsgeräten (Knoten), sollen verschiedene Informationen auch mit weiteren Geräten ausgetauscht werden, die nicht direkt Steuerungsaufgaben erfüllen. Dazu zählen abgesetzte Bediengeräte oder Visualisierungen teils in 3D, die für die Auslegung und Erfüllung der Assistenzfunktionen benötigt werden. Diese Art der Kommunikation erfolgt über eine Industrial Internet of Things (IIoT) Komponente, die ebenfalls auf den Steuerungsgeräten vorhanden ist.

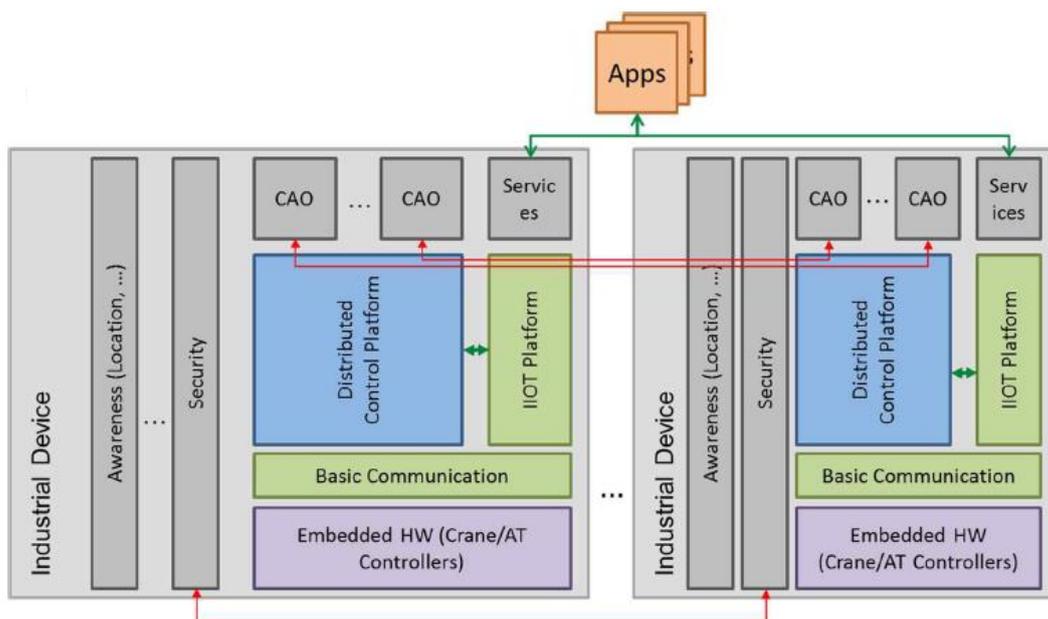


Bild 10: OPTIMUM Komponentenarchitektur

Bild 10 zeigt die grundlegende Architektur, um das oben skizzierte Konzept umzusetzen. Im Mittelpunkt der Architekturdefinition steht das blaue Rechteck mit der Bezeichnung Distributed Control Plattform, das die Schnittstellen zur IIoT-Plattform und die der Basiskommunikation unterhält. Auf der Grundlage des DCP erfolgt die Entwicklung der Steuerprogramme objektorientiert mit in sich gekapselten Funktionen in Form von „Control Application Objects“ (CAO). Ein konkretes Steuerungsprogramm besteht somit aus solchen Objekten und definiert den Datenaustausch zwischen diesen.

Die Control Application Objects, die auf einem bestimmten „Knoten“ laufen, müssen verwaltet werden, z. B. instanziiert, ihren Status ändern oder auch zerstört werden können. Außerdem müssen logische Verbindungen zwischen den Objekten hergestellt werden. Dies kann lokal geschehen, wenn diese Objekte auf demselben Knoten (und in derselben Anwendung) laufen oder netzwerkweit über das gesamte Kommunikationssystem. Die Art des verwendeten Kommunikationssystems ist aus der Sicht des Control Application Object irrelevant. Für den Datenaustausch zwischen den Objekten werden daher die von der Distributed Control Plattform bereitgestellten Dienste genutzt. Auf der Grundlage dieses Ansatzes können verschiedene Kommunikationssysteme oder -protokolle verwendet werden.

Für die vertikale Kommunikation zwischen OPTIMUM-Komponenten und Supervisor oder einem aus der Ferne bedienten HMI-Gerät kann OPC UA oder MQTT verwendet werden. Das entfernte HMI-Gerät kann vom Bediener verwendet werden, um die OPTIMUM-Komponenten zu konfigurieren.

Von Bedeutung ist, dass die horizontale Kommunikation Echtzeitdaten übertragen kann und verschiedene Kommunikationsmedien (drahtgebunden oder drahtlos) eingebunden werden können. Unabhängig vom Kommunikationsmedium muss auch die temporäre Kommunikation zwischen Control Application Objects berücksichtigt werden, z. B. ob ein Bediener mit einem Materialflusssystem interagiert oder ob ein mobiles Materialflusssystem in die Fabrikhalle einfährt, um Material auszuliefern. Daher muss jede OPTIMUM-Komponente in der Lage sein, andere OPTIMUM-Komponenten im Hinblick auf Sicherheitsrichtlinien zu überprüfen.

Bild 11 zeigt die interne Architektur der Distributed Control Plattform (DCP). Gemäß Bild 10 ist die DCP Teil des Industriergeräts und für die Ausführung des lokalen Teils der Steuerungsanwendung verantwortlich. Die DCP besteht aus verschiedenen Blöcken oder logischen Komponenten. Es ist wichtig zu beachten, dass das Industriergerät über ein Betriebssystem (Operating System – OS) verfügt, das Dienste wie Prozess- und Thread-Ausführung, Speicherverwaltung oder Netzwerk-Sockets bereitstellt. Außerdem zeigt die Architektur Interaktionen zwischen den logischen Komponenten.

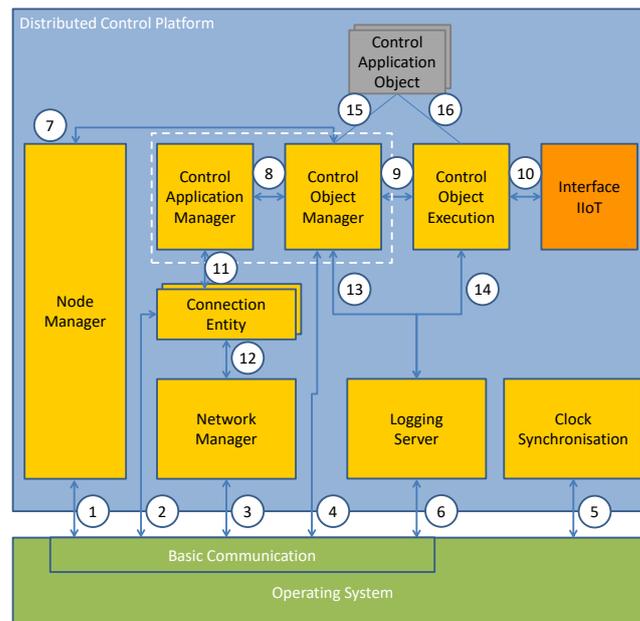


Bild 11: Architektur der Distributed Control Platform (DCP)

4 Industrial IoT-Plattform

Die IIoT-Plattform ist neben der im vorherigen Abschnitt vorgestellten verteilten Steuerungsplattform DCP ebenfalls eine wichtige Softwarekomponente der OPTIMUM-Architektur (Bild 10), die komplexe Kommunikationsmuster in einem heterogenen Geräteumfeld ermöglicht [4, 6]. Die IIoT-Plattform ist die zentrale Instanz für die horizontale und vertikale Kommunikation und verantwortlich für den Austausch von Systemparametern und Gerätedaten: Sie kann sowohl geräteintern als auch von externen Geräten kontaktiert werden, um Informationen abzurufen. Sie sammelt und überwacht folglich Geräte und verarbeitet oder kombiniert diese, um die Informationen an die umliegenden Komponenten weiterzugeben. Um diesen Prozess durchzuführen, wurden Schnittstellen für die geräteinternen Komponenten (MQTT - Message Queuing Telemetry Transport) und für externe Zugriffe von anderen Geräten (OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture) erarbeitet. Zur Kopplung der geräteinternen Kommunikation über MQTT und der externen Kommunikation über OPC UA wurde das in Bild 12 dargestellte Datenmodell entwickelt [7]. Diese Kopplung folgt zunächst den Empfehlungen des OPC UA Standards zur Kopplung von OPC UA und MQTT, geht aber darüber hinaus, da Daten über MQTT abonniert werden können [8].

In Bild 13 wird exemplarisch dargestellt, wie eine Komponente X eines Gerätes mithilfe der IIoT- Plattform Informationen von einer Komponente Y auf einem anderen Gerät abrufen oder abonnieren kann.

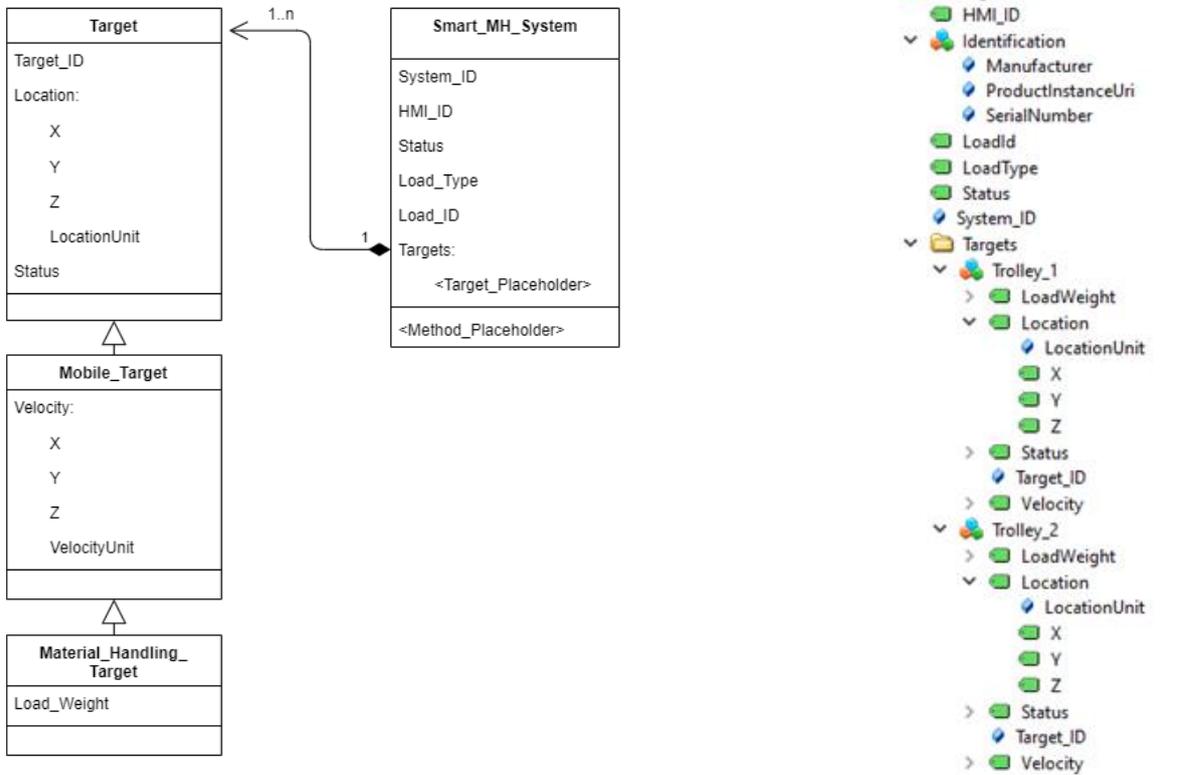


Bild 12:

Datenmodell

Links: Maschinenklassen, Rechts: Instanz eines Brückenkrans mit zwei Laufkatzen

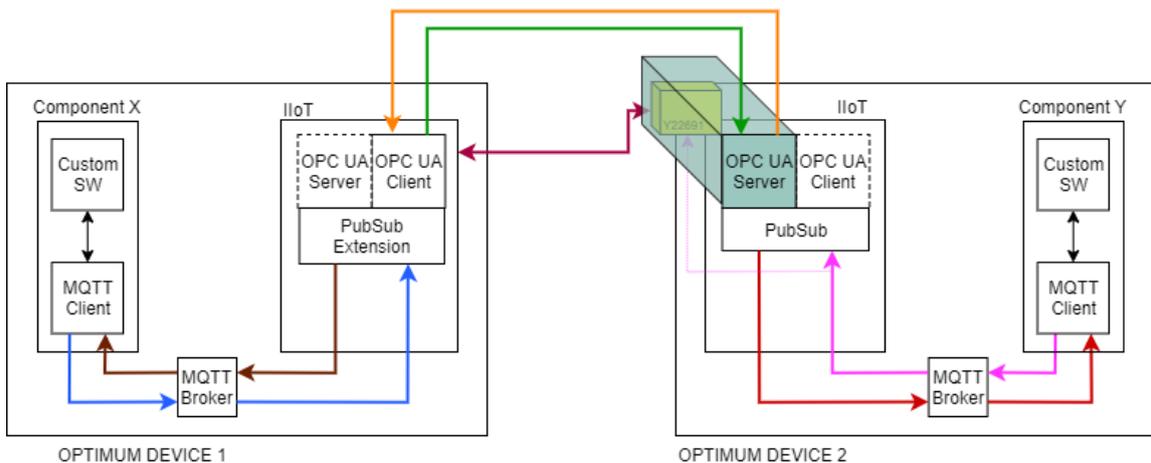


Bild 13: Datenaustausch zwischen 2 Komponenten auf verschiedenen Geräten mithilfe der IIoT-Plattform

Die IIoT-Plattform kann als universell einsetzbare Instanz angesehen werden, die ältere Geräte und Maschinen via Plug&Play-Technologie in Industrie 4.0-Szenarien integrieren kann. Die Schnittstelle zur geräteinternen Kommunikation kann durch andere Protokolle ausgetauscht werden. So wurde während des OPTIMUM-Projektes zu Evaluationszwecken eine alternative Schnittstelle über AMQP entwickelt.

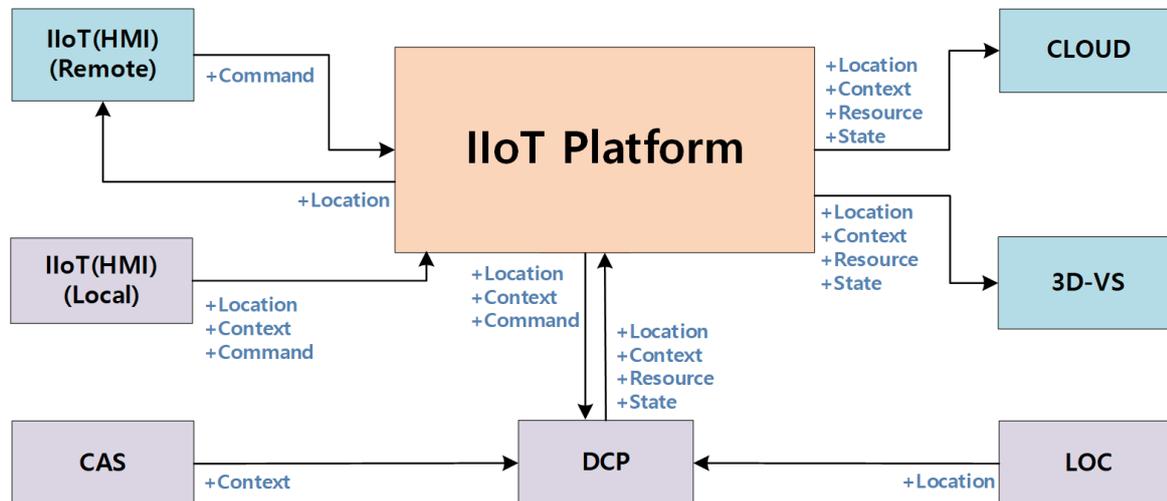


Bild 14: Konzeptueller Informationsfluss zwischen den Komponenten

Bild 14 stellt den Informationsfluss zwischen einzelnen Komponenten des OPTIMUM-Projektes und der IIoT-Plattform dar. Hier wurde die IIoT-Plattform neben der Geräte-zu-Geräte-Kommunikation auch verwendet, um Daten mit den nachfolgend aufgezählten Komponenten auszutauschen:

- CAS: Ermöglicht die Verarbeitung und Speicherung von Kontextinformationen im Industriergerät (Context Awareness).
- LOC: Verarbeitet die Standortinformationen des Geräts in Echtzeit und stellt sie der DCP zur Verfügung.
- DCP: Steuert Geräte in Echtzeit mit Kontext- und Standortinformationen und liefert bei Bedarf Informationen an andere Geräte und externe Komponenten über die IIoT-Plattform. Sie steuert das lokale Gerät unter Verwendung der Zustandsinformationen anderer Geräte (z. B. HMI, 3D-VS, etc.)
- HMI: Liefert Steuerbefehle und die Standortinformationen des Bedieners (bereitgestellt durch separates Gerät "Wearable") an die DCP und führt bei Bedarf die Zusammenarbeit zwischen dem Bediener und dem Gerät durch, indem es die Statusinformationen des Geräts von der DCP erhält.
- 3D-VS: Verfügt über die notwendigen Informationen zur Überwachung und Visualisierung des Arbeitsstatus und Standorts des Geräts.
- CLOUD: Führt die Anfrage/Antwort aus, die erforderlich ist, um die in der unteren Schicht erzeugten Daten an die obere Schicht zu übertragen.

Weiterhin ist die IIoT-Plattform für die Containerisierung mittels Docker vorbereitet und Docker-Skripte zum Kompilieren sowie Simulieren wurden entworfen. Die Bereitstellung der IIoT-Plattform als Docker Image ermöglicht eine vereinfachte Verteilung, Versionierung und Orchestrierung von Abhängigkeiten mithilfe des OPTIMUM App Stores. In Bild 15 ist die Containerisierung exemplarisch dargestellt.

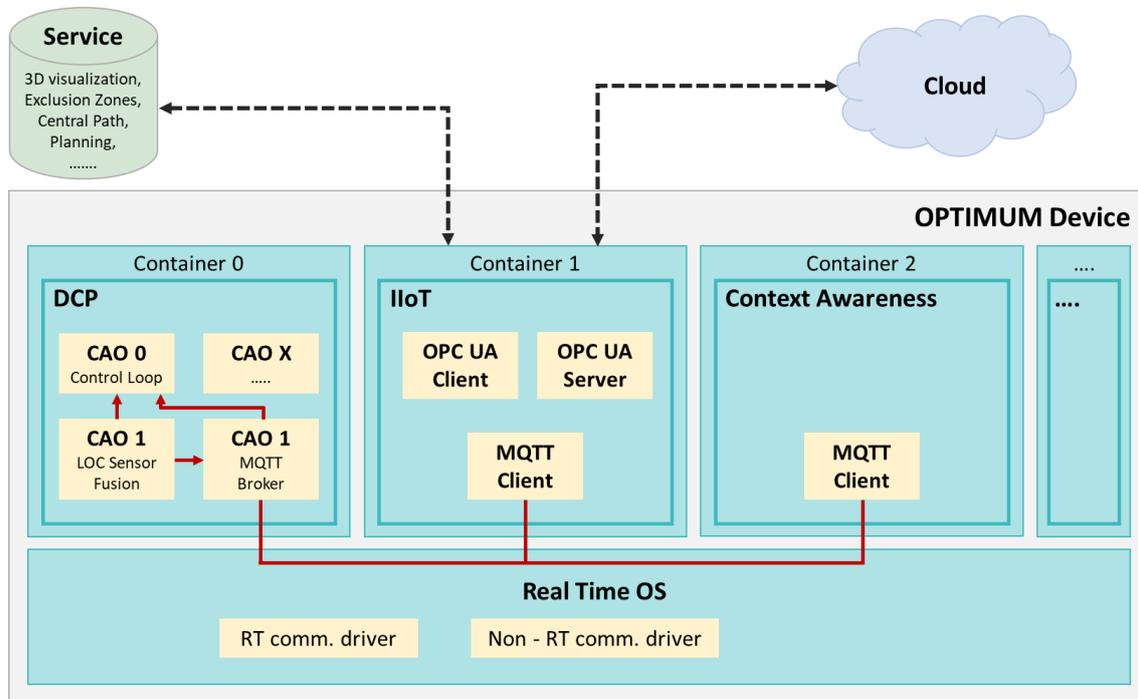


Bild 15: Isolierung von OPTIMUM Komponenten mithilfe von Containern

5 Innovative grafische Bedienoberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI – Graphical User Interface) für den Material-Handling-Demonstrator bei DEMAG in Wetter ergänzt die standardmäßig eingesetzte Kranfunksteuerung und ermöglicht dem Bediener die intuitive und einfache Nutzung von innovativen OPTIMUM Assistenzfunktionen. Um dieses Ziel bestmöglich zu erreichen, stellt die GUI ein 2D-Layout der Fabrikhalle dar, in dem die verschiedenen statischen, aber auch beweglichen Objekte mit einfachen Symbolen visualisiert werden. Um die verschiedenen Objekte und Zustände (z. B.: Status wie verfügbar, belegt, Störung...) zu unterscheiden, werden Styling-Attribute wie Farbe, Form, Rahmen oder Muster verwendet.

Die folgende Ansicht in Bild 16 zeigt ein Beispiel, wie die GUI prototypisch für ein Smartphone umgesetzt wurde. Die GUI kommuniziert mit den Maschinen über OPC UA und ist hardware-interoperabel für verschiedene Geräte und Betriebssysteme wie z. B. Android, Windows, iOS und Linux.



Bild 16: Kransteuerung mit GUI Element

Die GUI erfordert am Anfang eine Identifikation des Bedieners, um den Zugriff auf das Menü der Assistenzfunktionen zu autorisieren. Mit diesem Autorisierungsverfahren ist es möglich, verschiedene Zugriffsebenen in Abhängigkeit von den Bedienerfähigkeiten zu definieren. Das Authentifizierungsverfahren wurde hier unter Verwendung der RFID-Technologie implementiert. Auch weitere Technologien, wie QR-Codes und Kamera können genutzt werden, um das Pairing von Wearable und Smart Device in einfacher Weise zu ermöglichen. Nach der Authentifizierung kann der Bediener die Maschinen auswählen und reservieren, die er zur Erfüllung der Aufgabe benötigt.

Anhand der Farbe und Form der Objektdarstellungen können die Bediener z. B. unterscheiden,

- ob die Maschine von ihm selbst oder von einem anderen Bediener reserviert ist oder ob sie verfügbar ist,
- ob die Maschine mit dem Netzwerk verbunden ist.
- Auch der aktuelle Status der Maschinen, z. B. Betriebsbereitschaft, Warn- oder Fehlermeldungen, wird angezeigt.

Die Bediener können Maschinen auf dem Bildschirm auswählen und jene Assistenzfunktionen, die von der/den ausgewählten Maschine/n ausgeführt werden können, werden mittels entsprechender Schaltflächen angezeigt. Wenn der Bediener beispielsweise einen verfügbaren Kran auswählt, wird die Schaltfläche "Reservieren" angezeigt, und der Bediener kann den Kran durch Anklicken der entsprechenden Schaltfläche reservieren. Wenn der Bediener die Katzen dieses Krans auswählt, werden die dazugehörigen verfügbaren Assistenzfunktionen (siehe Abschnitt 2) angezeigt. Sobald eine Assistenzfunktion gewählt wurde, informiert die GUI den Bediener über die nächsten Schritte, wie z. B. die Auswahl der Master-Katze, den Zielort oder das zu verfolgende FTS.

Nach der Selektion der Assistenzfunktion kann die Kranbewegung beginnen und startet, sobald der Bediener eine dedizierte Freigabetaste an der Funksteuerung betätigt. Falls die Freigabetaste während der Bewegung nicht mehr betätigt wird, wird die Funktion unterbrochen und alle Kranbewegungen kommen zum Stillstand. Schließlich wird der Benutzer über den Status der gewählten Assistenzfunktionen (gestartet, aktiv, beendet) informiert und hat zu jeder Zeit auch die Möglichkeit, aktive Assistenzfunktionen wieder zu stoppen.

Wenn die Assistenzfunktion noch nicht vollständig ausgeführt wurde, kann sie durch erneutes Betätigen der Freigabetaste fortgesetzt werden.

6 Indoor-Lokalisierungssystem

Die Lokalisierung von Maschinen und Personen ist Grundvoraussetzung, um ortsbezogene Daten über die OPTIMUM API (Application Programming Interfaces) zur Verfügung stellen zu können. Daher ist es wichtig, ein robustes und zuverlässiges Ortungssystem zu haben, um Funktionen, die einen Ortsbezug benötigen zu unterstützen.

Ein Pfeiler der im Projekt umgesetzten Lokalisierung ist die Positionsbestimmung über UWB (Ultrabreitband). Dies ist eine funkbasierte Technologie, die ein breites Frequenzspektrum von mindestens 500 MHz nutzt. Das macht UWB im Vergleich zu anderen Funkkonzepten gegenüber Störungen robust. Auch die Interferenz mit anderen Schmalbandlösungen ist sehr gering, was die Koexistenz verschiedener Systeme ermöglicht. In Kombination mit einer sehr präzisen Uhr auf den UWB-Chips ist es möglich, die Distanz zwischen zwei Geräten zu ermitteln.

Um aus den mittels des UWB-Systems gemessenen Entfernungen eine Position zu ermitteln, wird ein Kalman-Filter verwendet, der auf dem Prinzip der Trilateration beruht. Diese benötigt eine Distanzmessung zu drei ortsfesten Anker mit bekannter Position, um eine eindeutige Position in einem zweidimensionalen Raum oder zu vier Anker in einem dreidimensionalen Raum bestimmen zu können. Bild 17 zeigt einen typischen Aufbau zur Lokalisierung eines mobilen Tags. Die mobile Einheit misst die Abstände zu jedem Anker in Reichweite. Diese Messungen werden verwendet, um Kreise mit dem entsprechenden Anker als Zentrum und dem Abstand als Radius zu erstellen. Im Falle einer perfekten Messung entspricht der Schnittpunkt der Kreise der eindeutigen Position des Tags. Aufgrund von Messungenauigkeiten, die zum Beispiel durch Mehrwegeausbreitungen des Funksignals entstehen können, kann die Position nicht eindeutig aufgelöst werden und wird statistisch über den Kalman-Filter bestimmt [11].

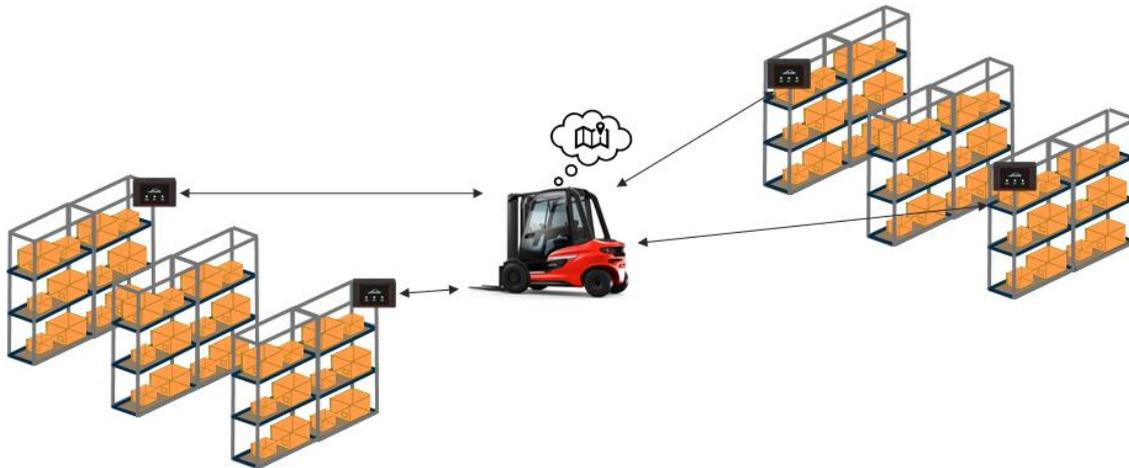


Bild 17: Aufbau des Funklokalisierungssystems

Bei der Lokalisierung von Personen wird - neben UWB - auch eine Inertial Measurement Unit (IMU) verwendet. Eine IMU misst die Beschleunigungen und Rotationsgeschwindigkeiten über jede der drei Raumachsen. Beide Messungen werden verwendet, um den lokalen IMU-Referenzrahmen zunächst an der vertikalen Achse über die Gravitation an der realen Welt auszurichten und seine Drehung zu verfolgen. Dann wird die gemessene (und gedrehte) Beschleunigung zweimal integriert, um die Positionsänderung der Person zu berechnen.

Die permanente Integration von verrauschten Sensorwerten resultiert in einem stetig ansteigenden Fehler, der die Genauigkeit der Lokalisierung im Laufe der Zeit beeinträchtigt. Dieser Effekt wird durch Zero-Velocity-Updates (ZUPT) mit fußmontierten Sensoren abgeschwächt. Diese Methode nutzt die Zeitspannen, in denen ein Fuß den Boden berührt, um den akkumulierten Fehler zu analysieren und zu korrigieren, da die tatsächliche Änderung von Position und Ausrichtung vorübergehend gleich Null ist. Auf diese Weise werden jeder Schritt direkt gemessen und die Schritttrichtung und Schrittlänge des Benutzers als Ergebnis der ZUPT-Methode ermittelt [9].

Zur alleinigen Nutzung ist diese Methode jedoch nicht geeignet. Daher wurde im Rahmen des Projektes ein Fusionsmodul entwickelt, das es ermöglicht, verschiedene Systeme miteinander zu koppeln. Dies wirkt sich besonders vorteilhaft bei der Kombination aus einer absoluten und einer relativen Positionsquelle aus, wie dies bei der Lokalisierung über UWB und IMU der Fall ist. So wird eine kontinuierliche Kalibrierung der Orientierung des Nutzers erreicht, indem die Schritttrichtungsänderung der IMU und der Bewegungstrend aus den vergangenen UWB-Messungen in einem separaten Kalman-Filter verwendet werden [2,3].

Im OPTIMUM Projekt wird die UWB-Lokalisierung vor allem auf den Industriergeräten, wie den Kranen, FTSs oder Staplern genutzt. Eine Kombination über das zuvor beschriebene Fusionsmodul wäre im Falle von weiteren Positionsinformationen jedoch auch möglich.

Da die Krane nicht nur in der XY-Ebene sondern auch vertikal in der Z-Achse verfahren, hat jeder Kran zwei UWB-Tags. Je einer an jeder Laufkatze für die Bestimmung der X- und Y-Koordinaten. Ein weiterer Tag ist am Lasthaken angebracht, damit der entsprechende Tag an der Laufkatze die Z-Koordinate bestimmen kann. Die Tags an den Laufkatzen sind

über eine CAN-Schnittstelle mit der OPTIMUM Steuerung verbunden, um der Steuerungsanwendung die benötigten Positionsinformationen bereitzustellen.

Bei Personen besteht die besondere Herausforderung darin, dass die Anbringung eines UWB-Tags nicht an jeder Position des Körpers möglich ist. Daraus folgen Abschattungen der Antenne, die zu einem Abfall in der Genauigkeit der UWB-Lokalisierung führen können. Daher wurde bei Personen, wie einem Kranbediener, von vornherein auf eine Kombination mit einer IMU gesetzt. Aufgrund dessen wurde ein „Wearable“ entwickelt, das die Anbringung verschiedener Sensorik an den Körper erlaubt. Bild 18 zeigt die einzelnen Komponenten, die für die Realisierung des Prototyps genutzt wurden.

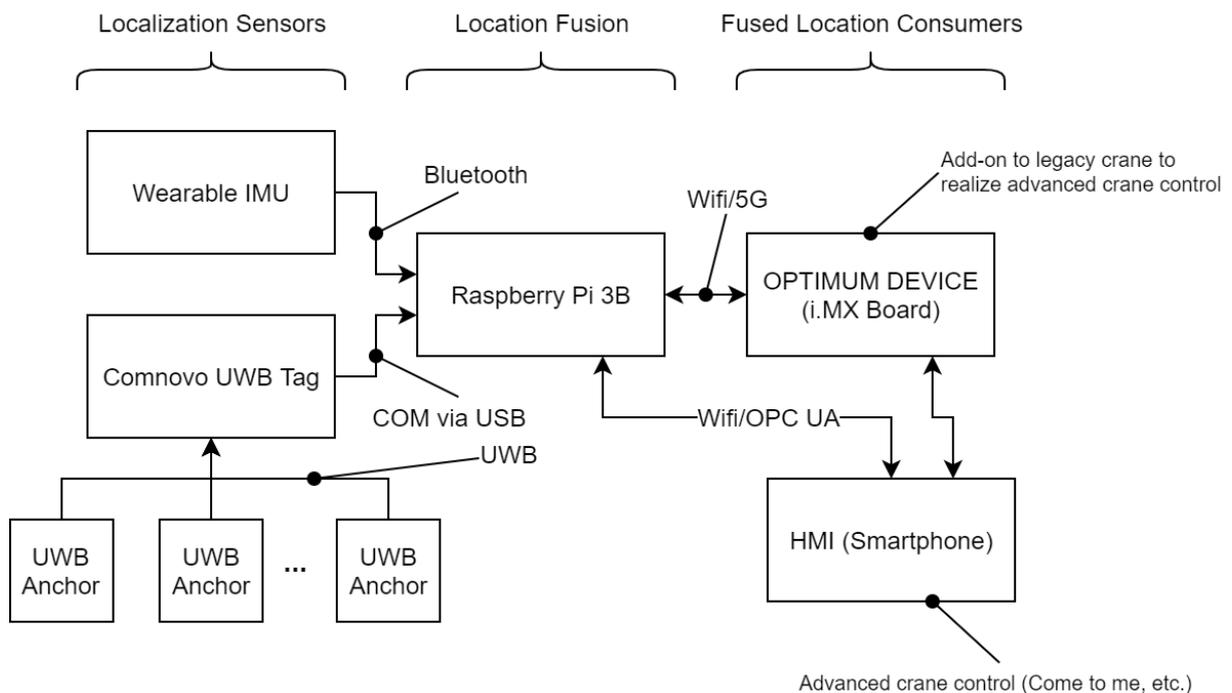


Bild 18: Architektur des Wearables

Die genutzte IMU enthält eine Firmware, die den Schrittlängenvektor aus den IMU-Rohdaten ermittelt. Wurde ein Schritt mit Hilfe des ZUPT-Algorithmus erkannt, wird der Schrittvektor über Bluetooth an eine zentrale Verarbeitungseinheit gesendet. Genauer gesagt, wird ein Rohdatenpaket, bestehend aus Schrittlänge und Bewegungsrichtung, gesendet.

Die Verarbeitungseinheit kombiniert die absolute Position des UWB-Positionierungssystems mit den relativen Bewegungsdaten der tragbaren IMU. Die Verarbeitungseinheit veröffentlicht die Standortdaten über OPC UA, wobei eine „leichtgewichtige“ Version der IIoT-Plattform zum Einsatz kommt. Darüber kann ein Benutzergerät – z. B. ein Smartphone – auf die fusionierten Positionsdaten zugreifen und diese verwenden (Bild 19).

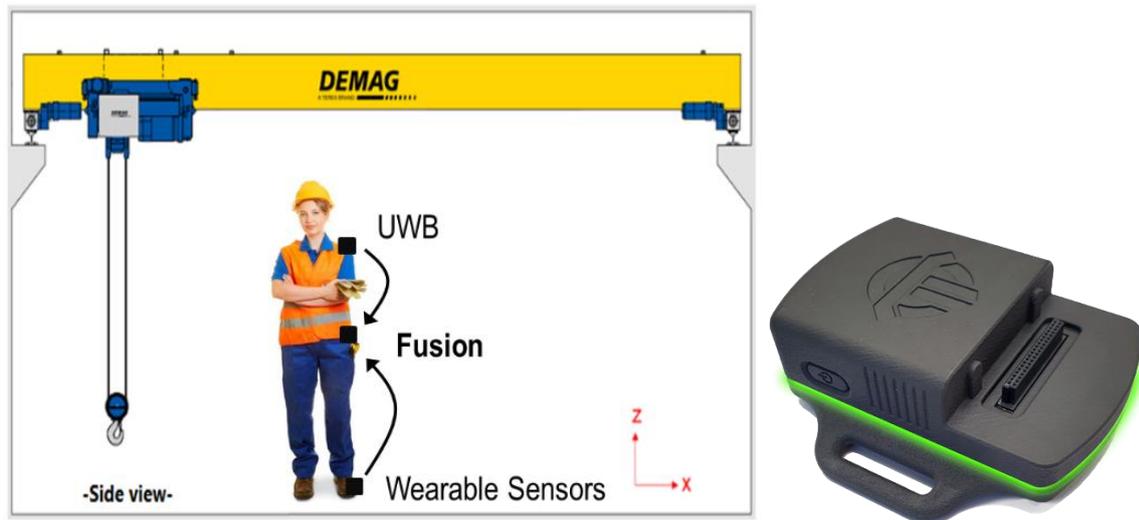


Bild 19: Anwendungsszenario Bedienerlokalisierung mit Wearables und IMU

7 3D-Visualisierung und Simulation

Das Ziel der 3D-Visualisierung und Simulation ist es, die in OPTIMUM entwickelten Assistenzfunktionen zu veranschaulichen und anschließend in einer virtuellen Umgebung zu simulieren. Dies ermöglicht die Demonstration der innovativen Neuerungen und deren Vergleich mit konventionellen Kranbedienungsfunktionen.

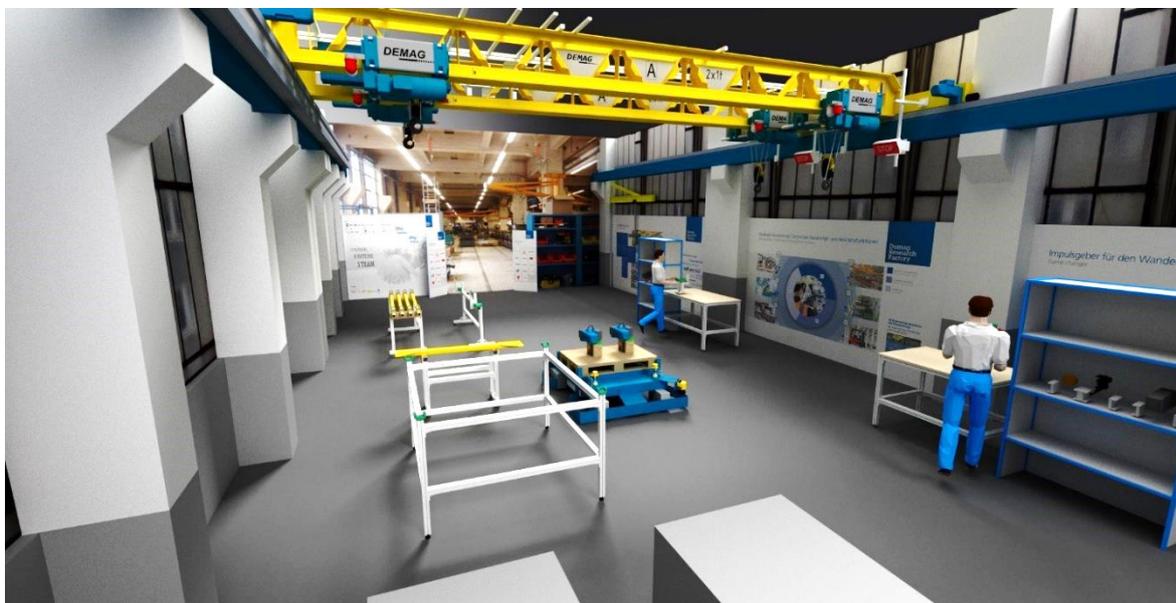


Bild 20: 3D-Visualisierung des MH Demonstrators mit TaraVRBuilder

Die im Planungstool erstellten Fabriklayouts lassen sich in die Simulations-Anwendung übertragen, sodass hier keine zusätzlichen 3D-Modelle benötigt werden. Die in der Planungsphase verwendeten 3D-Geometriemodelle finden in Simulationsmodulen ihre Wiederverwendung (Bild 20).

Zum Aufbau eines Simulationsmodells für die in OPTIMUM entwickelten Technologien werden folgende Simulationsmodule benötigt:

- Kransystem bestehend aus
 - mehreren Kranen
 - pro Kran mehreren Laufkatzen mit je einem Hebezeug
- Bediener
- Fahrzeuge, FTS
- Kontextabhängige Objekte (z. B. eingeschränkte Zonen)

Für die Kommunikation mit Steuerungssystemen bietet das Simulationstool eine Plugin-Schnittstelle, über die die bidirektionale Anbindung an das verteilte Steuerungssystem DOME (Distributed Object Model Environment) des Partners IFAK realisiert wurde. Über diese Plugin-Schnittstelle sind auch alle anderen Simulationskomponenten mit der verteilten Steuerung verbunden.

Der Benutzer kann den virtuellen Kran per Smartphone bedienen - genau wie auch den Kran im realen Demonstrator. In der 3D-Simulation gibt es Module, um das Verhalten der Krane, der Bediener und der Fahrzeuge zu simulieren. Die Positionsdaten der einzelnen Objekte, die sich aus dem simulierten Verhalten ergeben, werden dann über das DOME-Plugin an die DCP übertragen.

Im Falle der Bediener und Gabelstapler, die keine Steuerungsanwendung benötigen, werden die im Simulationsmodell generierten Positionsdaten an die IIoT-Plattform gesendet. Im realen Demonstrator bezieht die IIoT-Komponente die Positionsdaten direkt vom Positionstag über UWB und stellt sie auf dem OPC UA-Informationsmodell der IIoT-Plattform zur Verfügung. Daher hat der für die Simulation verwendete Ansatz im Wesentlichen das gleiche Endergebnis wie im realen Demonstrator, bei dem die IIoT-Plattform über die Positionsdaten des entsprechenden Bedieners oder Fahrzeugs verfügt.

Die IIoT-Plattform verhält sich in der Simulation wie im realen Demonstrator, da sie keine direkte Schnittstelle zu den physischen Komponenten hat. Die verteilte Steuerung ist im Simulationsfall so genau wie möglich an die des realen Demonstrators angepasst. Der Datenfluss von der HMI zur IIoT-Plattform und zur DCP ist genau derselbe, da er nur Standard-Netzwerkverbindungen mit entsprechenden Kommunikationsprotokollen erfordert (Bild 21).

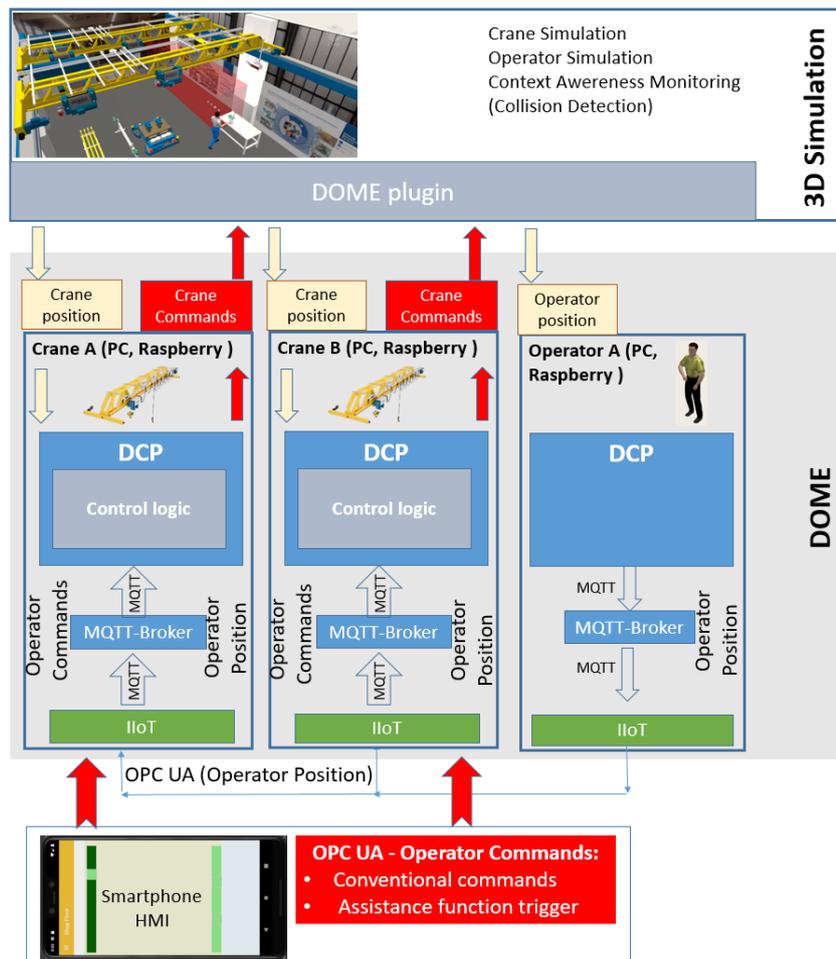


Bild 21: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen virtuellem Demonstrator und realer Steuerung (DCP)

8 Cyber Security

Das OPTIMUM Security Framework implementiert Cyber Security-Maßnahmen in das Architekturkonzept des verteilten Steuerungssystems.

Nach eingehender Analyse der Systemtopologie von IloT-Systemen im Allgemeinen wurden Bedingungen für ein Architekturkonzept für die Cyber Security und darauf aufbauend die Anforderungen für ein solches System mit OPTIMUM-Architektur definiert.

Es wurde eine Bestandsaufnahme der in einem industriellen Steuerungsgerät auf Basis der OPTIMUM-Architektur (IDev) vorhandenen Schnittstellen durchgeführt und ermittelt, wie diese Schnittstellen mit anderen Geräten interagieren können.

Diese Aufstellung diene als Basis zur Identifikation notwendiger und möglicher Absicherungsmaßnahmen in Bezug auf Cyber Security.

Um das System auf konkrete Schwachstellen untersuchen zu können, wurde eine Schwachstellenanalyse nach dem STRIDE-Modell [12] durchgeführt (Bild 22). Dafür wurde zunächst ein repräsentativer Anwendungsfall aus dem deutschen Demonstrator konstruiert, der alle möglichen Interaktionen zwischen Teilnehmern eines OPTIMUM-Systems abdeckt.

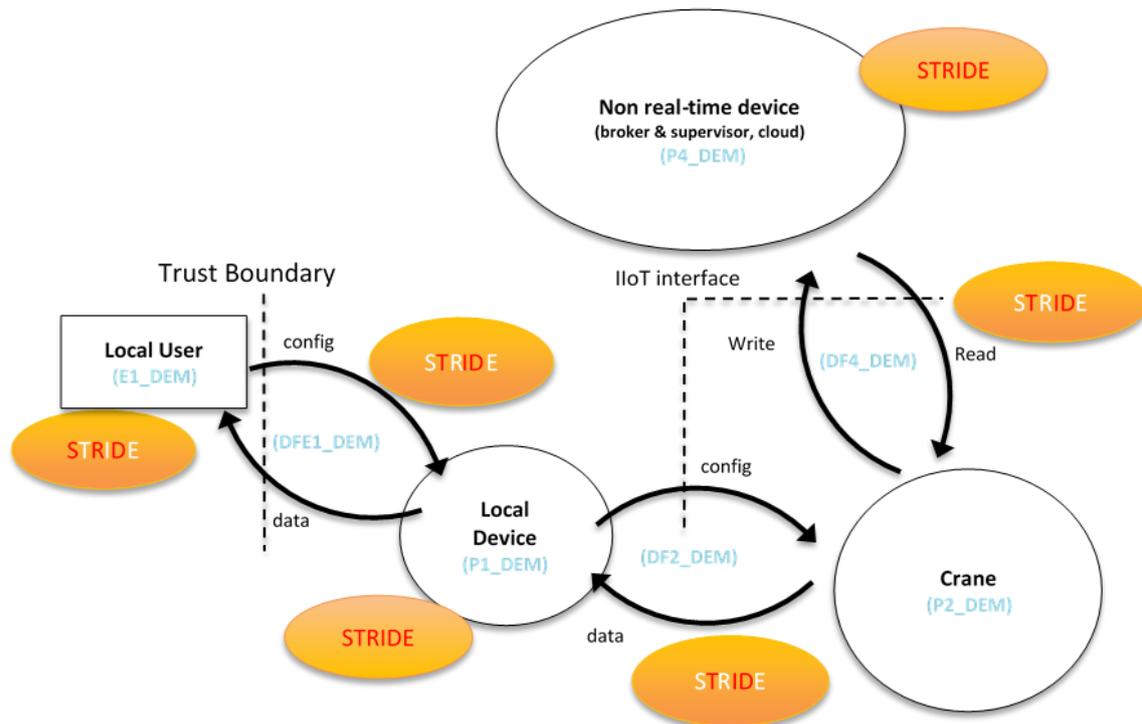


Bild 22: Schwachstellenanalyse mit der STRIDE-Methodik

Die Analyse dieses Anwendungsfalls ergab eine Reihe von Schwachpunkten, die mit geeigneten Maßnahmen eingedämmt oder behoben wurden.

Zunächst wurde sich mit grundlegenden Prinzipien der Datensicherheit beschäftigt. Die Kommunikationsstränge – und hier in erster Linie die drahtlosen – wurden gegen Abhören und Datenmanipulation abgesichert.

Hierzu wurde die Einführung von TLS-gesicherter (Transport Layer Security) Kommunikation auf Basis einer OPTIMUM-PKI (Public Key Infrastructure) vorgeschlagen, in deren Zentrum eine lokale Certificate Authority (CA) steht, die im lokalen OPTIMUM-System für Ausstellung, Verifikation und Verwaltung von Systemzertifikaten zuständig ist.

Geräte werden über einen speziellen Provisionierungsprozess mit lokaler Zertifizierung der CA ausgestattet und können unter Verwendung dieser OPTIMUM-eigenen Zertifikate eine gesicherte Kommunikation untereinander aufbauen.

Zur Implementation dieser Funktionalität kommt ein Backend-Server zum Einsatz, auf dem sowohl eine Certificate Authority implementiert wurde - also auch ein Webservice, der die Funktionalität u. a. der CA für alle Kommunikationsteilnehmer nach außen als RESTful-API zur Verfügung stellt.

Ein in Zusammenhang mit der Verteilung von Zertifikaten wichtiger Punkt ist die Verwahrung der zu den Zertifikaten gehörenden geheimen Schlüssel, die unbedingt vor dem Zugriff Dritter auf den Geräten geschützt werden müssen, um Missbrauch zu verhindern.

Hierzu wurde die Integration von speziellen Mikrocontrollern für Cyber Security, sogenannte

Secure Elements (SE), gewählt. Diese Bausteine bieten nicht nur die Möglichkeit zum sicheren Speichern von geheimen Informationen wie z. B. privaten Schlüsseln, sondern bieten auch kryptographische Operationen nach außen an. Jedes OPTIMUM-Gerät wird mit einem solchen SE ausgestattet, um dort private Schlüssel und Zertifikate sicher abzulegen.

Mit diesen Maßnahmen konnten die wichtigen Aspekte der Vertraulichkeit, Integrität und Authentizität der Daten in der Kommunikation zwischen den Systemteilnehmern hergestellt werden.

Im Bereich der Zugangskontrolle bezüglich der Nutzer des Systems waren weitere Maßnahmen notwendig, die auf der TLS-gesicherten Gerätekommunikation aufbauen.

Für die Nutzeranmeldung war es erforderlich, zwei unterschiedliche Verfahren anzubieten: eines für Systemadministratoren mit Benutzername und Kennwort für z. B. Wartungs- und Konfigurationsarbeiten. Das zweite für Anwender im Bereich des OPTIMUM-Systems, die Maschinen und Geräte nutzen. Hier wurde ein 2-Faktor-Authentisierungsansatz (2FA) mit NFC-Badge und Kennwort/Fingerabdruck gewählt.

Die Benutzeranmeldung über einen PC o. ä. erfolgt für Administratoren und Anwender klassisch unter Verwendung von Benutzername und Kennwort. Die Verbindung der auf dem PC laufenden Applikation erfordert ein OPTIMUM-Zertifikat auf PC-Seite.

Die Benutzeranmeldung von operativem Personal im Produktionsumfeld erfolgt über eine App auf der HMI (z. B. Tablet). Nach Aufrufen der App muss sich der Benutzer zunächst mit seinem Dienstaussweis identifizieren und dann in einem zweiten Schritt unter Angabe einer PIN am System authentisieren.

Für beide Arten der Anmeldung wurde im Backend eine Benutzerdatenbank implementiert, in der neben den eigentlichen Benutzerdaten auch die Autorisierungen für den jeweiligen Nutzer hinterlegt werden. Diese regeln, welche Dienste im System dem Anwender zur Verfügung stehen und welche Maschinen in welchem Umfang genutzt werden dürfen.

Auf diese Art wurde die Zugangskontrolle umgesetzt, um tatsächlich nur zugelassenen Personen Systemzugang zu gewähren.

Ein weiteres Element zur Absicherung des Systems ist ein einfach zu bedienender Provisionierungsprozess für Geräte, die neu ins System eingeführt werden sollen. Hierfür wurde ebenfalls eine HMI-App entwickelt, die über eine TLS-gesicherte Verbindung an das Backend angebunden ist. Über ein Verfahren, basierend auf einer NFC-Kopplung des zu provisionierenden Geräts mit der App auf dem Tablet/Smartphone in Kombination mit einem nach dem SCP03-Protokoll gesicherten Tunnel zum Backend, kann ein neues Systemzertifikat sicher auf dem SE des neuen OPTIMUM-Geräts abgelegt werden. Der Benutzer der App braucht keinerlei Wissen über die zugrunde liegenden Prozesse.

In [5] und [10] wird ein erweitertes Security-Konzept vorgestellt, das über die integrierten Sicherheitsfunktionen der verwendeten Kommunikationsprotokolle hinaus geht und u. a. eine detaillierte Rechtevergabe (Autorisierung) ermöglicht.

Zusammenfassung

Die in OPTIMUM entwickelten Technologien haben das Potential, Maschinen- und Hebezeughersteller zu befähigen, Hardwarevarianten der eingesetzten Steuerungstechnik zu reduzieren und gleichzeitig die Modularität der eingesetzten Software zu erhöhen. Kontext- und Positionsinformationen ermöglichen Assistenzfunktionen, die zu höherer Effizienz, Komfort und Safety (funktionale Sicherheit) führen und somit zu Chancen für neue, innovative Produkte am Markt. Unternehmen, die heute klassische Steuerungstechnik vertreiben, werden befähigt, auf die Herausforderungen der komponentenbasierten, verteilten industriellen Steuerung zu reagieren.

Ausgewählte Ergebnisse des Projektes OPTIMUM werden über die aktive Mitarbeit mehrerer Partner in verschiedene, industrienah strategische Arbeitskreise von Verbänden oder der Plattform Industrie 4.0 hineingetragen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Persico, G.; Hanisch, K., Cermann, H.: 3D Engineeringtools zur Planung, Visualisierung und Simulation von Krananlagen im Kontext Industrie 4.0, In: Tagungsband der Kranfachtagung 2020, Magdeburg
- [2] Hölzke, F.; Danielis, P.; Golatowski, F.; Timmermann, D.: A Fusion Approach for the Localization of Humans in Factory Environments. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS-2018), pp. 59-64, ISBN: 978-1-5386-6531-2, Saint-Petersburg, Russland, Mai 2018
- [3] Hölzke, F.; Raddatz, H.; Golatowski, F.; Timmermann, D.; Lategahn, J.: Evaluating the Synergy of Relative and Absolute Indoor Localization in Industrial Spaces. In: Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 1-6, Lisbon, Portugal, Oktober 2019
- [4] Persico, G.; Raddatz, H.; Tran, D. L.; Riedl, M.; Varutti, P.; Tekkalmaz, M.: Communication Solutions for the Integration of Distributed Control in Logistics Systems. In: Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 1-6, DOI: 10.1109/IECON.2019.8927834, Lisbon, Portugal, Oktober 2019
- [5] Persico, G.; Raddatz, H.; Tekkalmaz, M.; Meisberger, K.; Yu, T.; Riedl, M.: Sichere Kommunikation für kollaborative Steuerungssysteme. In: Proceedings 11. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KommA), pp. 1-3, Lemgo, Deutschland, Springer, Oktober 2020
- [6] Persico, G.; Raddatz, H.; Tran, D. L.; Riedl, M.; Tekkalmaz, M.: Verteilte Steuerungen für den Einsatz in Logistiksystemen. In: Proceedings VDI-Kongress Automation 2020, Baden-Baden, Deutschland, ISBN: 978-3-18-092375-8, VDI-Verlag, Juli 2020
- [7] Golatowski, F.; Raddatz, H.; Hölzke, F.; Janchivnyambuu, E.; Danielis, P.; Timmermann, D.: An OPC UA-based Crane Model Using Time-Sensitive Networking Technology. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICPS48405.2020.9274709, Tampere, Finnland, Juni 2020
- [8] Raddatz, H.; Mahmoud, E.; Hölzke, F.; Danielis, P.; Timmermann, D.; Golatowski, F.: Evaluation and Extension of OPC UA Publish/Subscribe MQTT Binding. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICPS48405.2020.9274696, Tampere, Finnland, Juni 2020
- [9] Hölzke, F.; Heller, J.; Deatcu, S. A.; Golatowski, F.; Timmermann, D.: Step Detection through Ultra-Low Complexity Zero Crossing Analysis, 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), China, Dezember 2020
- [10] Yu, T.; Raddatz, H.; Meisberger, K.; Tekkalmaz, M.; Persico, G.; Riedl, M.: IT Security for Collaborative Machines and Human-Machine Interaction; 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1-8, DOI: [10.1109/ETFA45728.2021.9613609](https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613609), Vasteras, Schweden, September 2021
- [11] Patwari, N.; Ash, J. N.; Kyperountas, S.; Hero, A. O.; Moses, R. L.; Correal, N. S.:

Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. Signal Process. Mag., pp. 54–69, 2005

- [12] Kohnfelder, L.; Garg, P.: The threats to our products. Microsoft Interface, <https://adam.shostack.org/microsoft/The-Threats-To-Our-Products.docx>, April 1999

Abkürzungsverzeichnis:

2FA	2-Faktor-Authentisierungsansatz
3D	Dreidimensional
3D-VS	3D-Visualisierung
A	Anker
API	Application Programming Interface
CA	Certificate Authority
CAN	Controller Area Network
CAO	Control Application Object
CAS	Context Awareness Service
DCP	Distributed Control Platform
DOME	Distributed Object Model Environment
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
HW	Hardware
IDev	Industrieller Device
IIoT	Industrial Internet of Things
IMU	Inertial Measurement Unit
LOC	Localization
MH	Material Handling
MP	Montageplatz

MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NFC	Near Field Communication
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OPTIMUM	OPTimised Industrial IoT and Distributed Control Platform for Manufacturing and Material Handling
OS	Operating System
PC	Personal Computer
PKI	Public Key Infrastructure
R	Regal
RFID	Radio-Frequency Identification
SE	Secure Element
SP	Stellplatz
STRIDE	Spoofing / Tampering / Repudiation / Information disclosure / Denial of service / Elevation of privilege
T	Tag
TLS	Transport Layer Security
UWB	Ultra Wide Band
WA	Warenausgang
WE	Wareneingang
WiFi	Wireless Fidelity
ZUPT	Zero Velocity Update

Beteiligte Projektpartner:

Giuliano Persico	DEMAG Cranes & Components GmbH, Wetter
Anja Fischer	DEMAG Cranes & Components GmbH, Wetter
Frank Golatowski	Universität Rostock
Fabian Hölzke	Universität Rostock
Hannes Raddatz	Universität Rostock
Matthias Riedl	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Thomas Bangemann	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Duy Lam Tran	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Karsten Meisberger	NXP, Hamburg
Hagen Borstell	THORSIS Technologies GmbH, Magdeburg
Klaus Hanisch	TARAKOS, Magdeburg
Henry Cermann	TARAKOS, Magdeburg
Metin Tekkalmaz	ERSTE, Ankara
Julian Lategahn	COMNOVO GmbH, Dortmund

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

LaseASTO (Area Surveillance and Truck Operation) – Zugangskontrolle und Bereichsüberwachung von automatischen Stapelkränen

Lars Mohr



Lars Mohr, M. Sc.
LASE Industrielle Lasertechnik GmbH
Rudolf-Diesel-Straße 111
46485 Wesel

LaseASTO (Area Surveillance and Truck Operation) – Zugangskontrolle und Bereichsüberwachung von automatischen Stapelkranen

Das System LaseASTO erkennt und klassifiziert automatisch die Lkws und die Fahrer der Lkws in einer „Region of Interest – ROI“, also in einem vordefinierten Bereich von Interesse. Zum Einsatz kommen in diesem System mindestens zwei Mehrlagenlaserscanner, die zum Beispiel am Containerkran über dem Übergabebereich vom Kran auf den Lkw montiert sind, um den Übergabebereich oder „Überwachungsbereich“ zu scannen. Die gemessenen 3D-Punktwolken, also Scandaten beider Scanner, ergeben eine Darstellung des Szenarios im Überwachungsbereich unter dem Kran. Eine Segmentierung der erhaltenen 3D-Punktwolke liefert die Länge, Breite und Höhe der einzelnen Objekte. Anhand von Größeninformationen und weiterer Attribute, wie dem Mittelpunkt und der Anzahl der Punkte, aus denen das erkannte Objekt besteht, wird das Objekt als Lkw oder Fahrer des Lkw klassifiziert. Sobald der Fahrer erkannt wurde, wird er vom LaseASTO verfolgt, bis er eine Sicherheitszone innerhalb des Überwachungsbereichs erreicht, in die Fahrerkabine zurückkehrt oder den Einsatzbereich verlässt. Ob die aktuelle Position des LKW-Fahrers im Überwachungsbereich eine Sicherheitszone erreicht hat oder nicht, wird kontinuierlich an den Kranfahrer übermittelt, der anhand dieser Informationen feststellt, wann es sicher ist, einen Container zu laden oder zu entladen. Alarme werden nicht ausgelöst, wenn Kisten oder Ähnliches bereits im Arbeitsbereich erkannt wurden. Nur Personen lösen hier einen Alarm aus, wenn sie sich nicht im Sicherheitsbereich befinden oder weitere Personen von außen in den Arbeitsbereich eintreten.

1 Überblick

Für die Verladung von zum Beispiel Containern in Containerhäfen mittels RTG's (Rubber Tire Gantry Crane), RMG's (Rail Mounted Gantry Crane) oder STS-Kranen (Ship to Shore Krane) ist in vielen Szenarien das Zusammenspiel von Menschen und Maschinen notwendig. So muss beispielsweise ein Lkw-Fahrer mit seinem Lkw in einen Übergabebereich von einem Kran einfahren, der durchaus im automatisierten Betrieb arbeitet. Aufgrund von Sichtbehinderungen durch Witterungseinflüsse oder Ausfall von Sicherheitseinrichtungen kann es beim Absetzen oder Aufnehmen der Ladung zwischen der Krananlage und den sich im Übergabebereich/Arbeitsbereich befindlichen Personen zu Personenschäden und Ausfallzeiten kommen. Um dies zu verhindern, hat LASE das LaseASTO System entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein Sicherheitssystem, das mit Mehrlagen-Laserscannern ausgestattet ist, um Objekte und Subjekte in Arbeitsbereichen von Krananlagen zu erkennen und zu verfolgen.

Das System ist in der Lage, die Position von Personen in Arbeitsbereichen zu erkennen, zu lokalisieren und kontinuierlich zu tracken, wenn zum Beispiel ein Container be- oder entladen wird. Das System unterteilt den Arbeitsbereich in zwei Überwachungsbereiche: einen Gefahrenbereich und einen Sicherheitsbereich. Der Gefahrenbereich ist der Bereich, in dem z. B. das Beladen von Containern stattfindet. Befindet sich eine erkannte Person in diesem Bereich, wird eine Notabschaltung der Krananlage durchgeführt. Befindet sich die Person hingegen im Sicherheitsbereich des Überwachungsbereichs, kann ein z. B. Containerhandling gefahrlos durchgeführt werden.



Bild 1: LaseASTO installiert an RMG

Bild 1 zeigt das LaseASTO System, montiert an einem RMG. Das System bildet über zweimal je 32 Scanebenen, ausgehend von zwei Mehrlagen-Laserscannern, einen Gefahrenbereich (rot) aus. Im Gefahrenbereich befindet sich der Sicherheitsbereich (grün). Der Sicherheitsbereich ist der Bereich, in dem sich zum Beispiel eine Person aufhalten darf und gleichzeitig der Betrieb der Anlage gefahrenfrei für die Person weiterhin durchgeführt werden darf.

2 System-Layout

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, besteht das System aus zwei Mehrlagen-Laserscannern, die über dem zu überwachenden Arbeitsbereich montiert werden. Die genauen Montageorte und die Montagesituation hängen vom Krantyp und der Infrastruktur ab. Des Weiteren beinhaltet das System einen Schaltschrank mit der Stromversorgung, Anschlussmöglichkeiten und einen IPC (Industrie PC). Auf dem IPC arbeitet die LaseASTO Software, welche permanent die von den Mehrlagen-Laserscannern übermittelten Messdaten verarbeitet. Der IPC der LASE Messanlage ist über Ethernet, Profibus oder Profinet mit der Kransteuerung verbunden. Basierend auf den gelieferten Daten aus dem LaseASTO System kann die Kransteuerung den Betrieb stoppen oder die Kranfahrt in einem gewissen Rahmen verlangsamen. Das geschieht je nachdem, wie die Anlage konfiguriert ist. Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau bzw. die Hauptkomponenten der Messanlage.

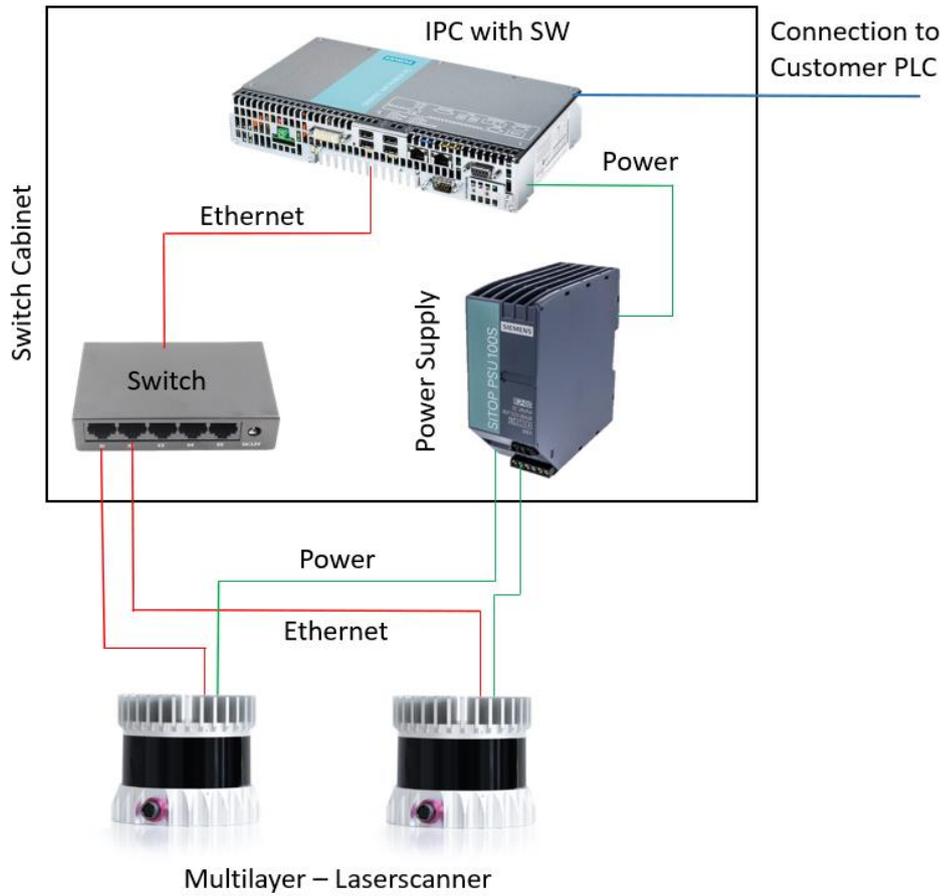


Bild 2: LaseASTO Systemkomponenten



Bild 3: LaseASTO installiert am RTG



Bild 4: LaseASTO Darstellung am RTG

Bild 3 zeigt eine Installation eines der beiden Mehrlagen-Laserscanner an einem Querträger eines RTG in einem Containerhafen. Bild 4 stellt erneut den Gefahrenbereich (rot) dar. Im Gefahrenbereich befindet sich der Sicherheitsbereich (grün). Im Vergleich zu Bild 1 ist das Layout in diesem Szenario anders, aber die Messaufgabe wiederum ist die gleiche.

Quellenverzeichnis:

Eigene Quellen [LASE]

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Neue Applikationsmöglichkeiten in der Automatisierung in schwierigem Umfeld durch 120 GHz Radar und bildgebendem Radar im 77 GHz Bereich

Thomas Hörl-Weinhold



ppa. Thomas Hörl-Weinhold
VP Industry Business Development
Symeo GmbH
an Indie Semiconductor company
Prof.-Messerschmitt-Str. 3
85579 Neubiberg

Neue Applikationsmöglichkeiten in der Automatisierung in schwierigem Umfeld durch 120 GHz Radar und bildgebendem Radar im 77 GHz Bereich

Die industrielle Umgebung bietet ein ideales Umfeld für Radar Applikationen. Durch Nebel und Staub haben optische Sensoren teils Probleme bei der Verfügbarkeit. Die Radar-Technik hat sich mittlerweile zu einem Standard in der Sensorwelt entwickelt und neue Frequenzbänder und technologische Fortschritte eröffnen immer neue Applikationsmöglichkeiten. Ein paar davon werden in diesem Beitrag angesprochen, wie z. B. 120 GHz ISM Band oder ein Ausblick in die Welt des bildgebenden Radars!

1 Die Symeo GmbH

Die Symeo GmbH gibt es mittlerweile seit 2005 in Neubiberg/München. Seit fast 20 Jahren entwickeln und fertigen wir hochwertige und zuverlässige Radarsensoren (Bild 1).

Unsere Hauptapplikationen sind im Moment die Kollisionsvermeidung zwischen Kränen oder die Automatisierung von Kran- oder Katzbewegungen.

INDIE TO ACQUIRE SYMEO – OCTOBER 25, 2021 NEWS

indie
SEMICONDUCTOR

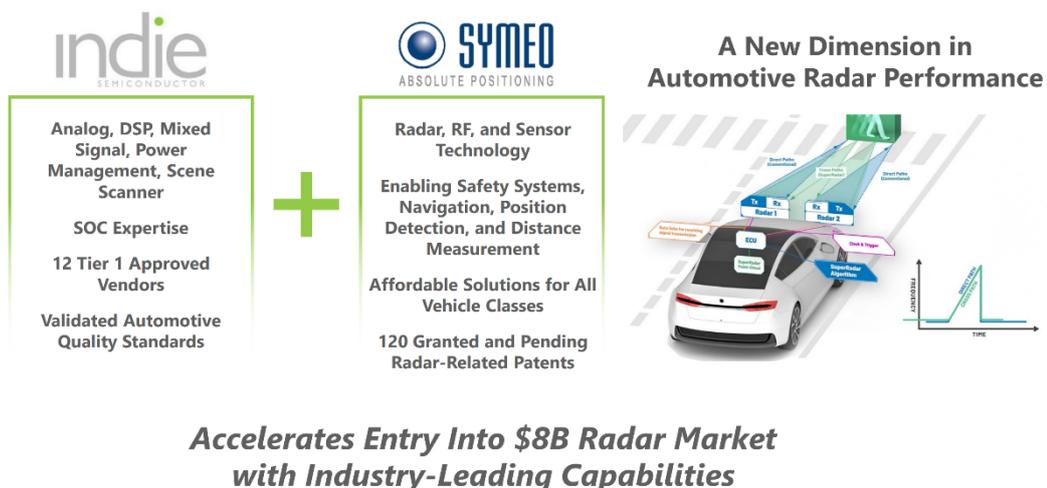


Bild 1: Symeo und IndieSemiconductor Inc.

Hauptsächlich stammen unsere Kunden aus der Stahlindustrie oder Häfen. Verstärkt kommen in den letzten Jahren auch Müllverbrennungs- oder Kompostieranlagen und andere Industriezweige hinzu.

Außerdem haben wir eine lange Historie bei Telemetrie-Boxen in der Bahnindustrie.

Die Firma beschäftigt mittlerweile über 40 Mitarbeiter an den Standorten Neubiberg und Nürnberg. Durch Indie Semiconductor können wir ab diesem Jahr auf sehr viele neuen Standorte weltweit verfügen und dort in Zukunft ebenfalls in verschiedenen Zielmärkten unsere Vorort-Präsenz verstärken.

1.1 Branchen in denen Radar als Sensor zum Einsatz kommt

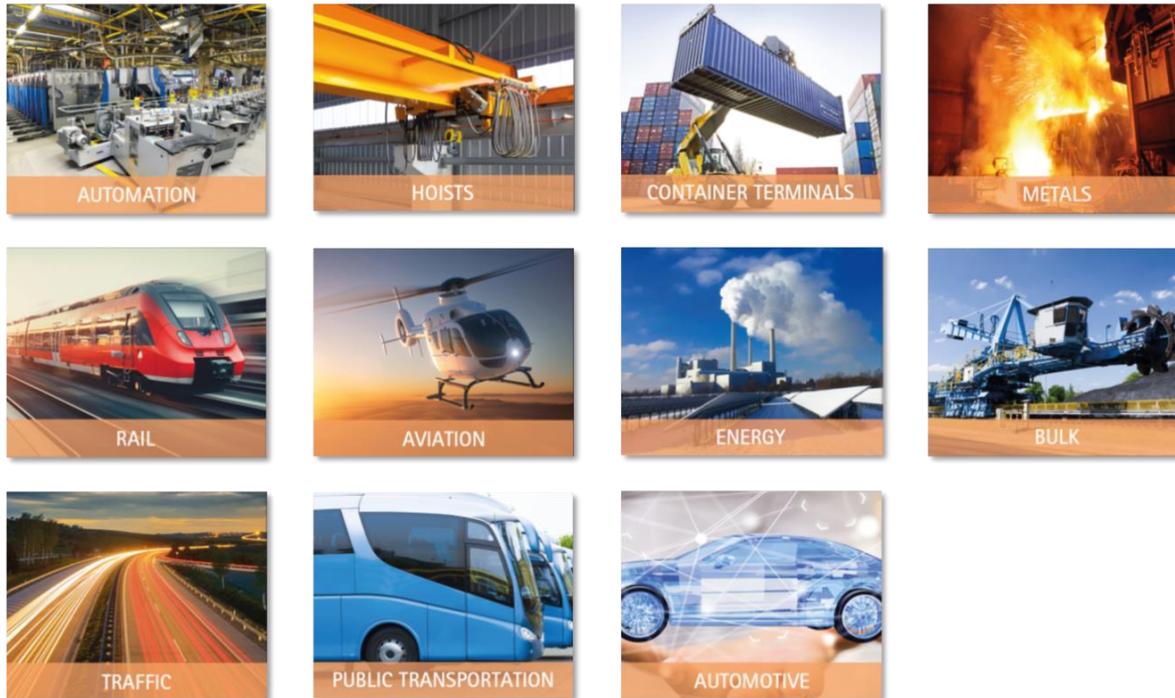


Bild 2: Märkte für Radartechnologie

1.2 Die einzelnen Frequenzbereiche und mögliche Anwendungsbereiche

Frequency	Strength	Weakness	Regulatory Status
24 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • High range • High unambiguous velocity • Regulatory status 	<ul style="list-style-type: none"> • Low bandwidth • Large size 	<ul style="list-style-type: none"> • Unlicensed in most regions and applications • ISM band
60 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • Very high bandwidth • Small size 	<ul style="list-style-type: none"> • Medium range 	<ul style="list-style-type: none"> • Mostly unlicensed • FCC only fixed equipment • ISM band
77 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • High bandwidth • Small size 	<ul style="list-style-type: none"> • Medium range 	<ul style="list-style-type: none"> • Partly unlicensed • mostly restricted to vehicles
122 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • Very small size 	<ul style="list-style-type: none"> • Short range 	<ul style="list-style-type: none"> • ISM band • still evolving

Bild 3: ISM Bänder und Vor- und Nachteile

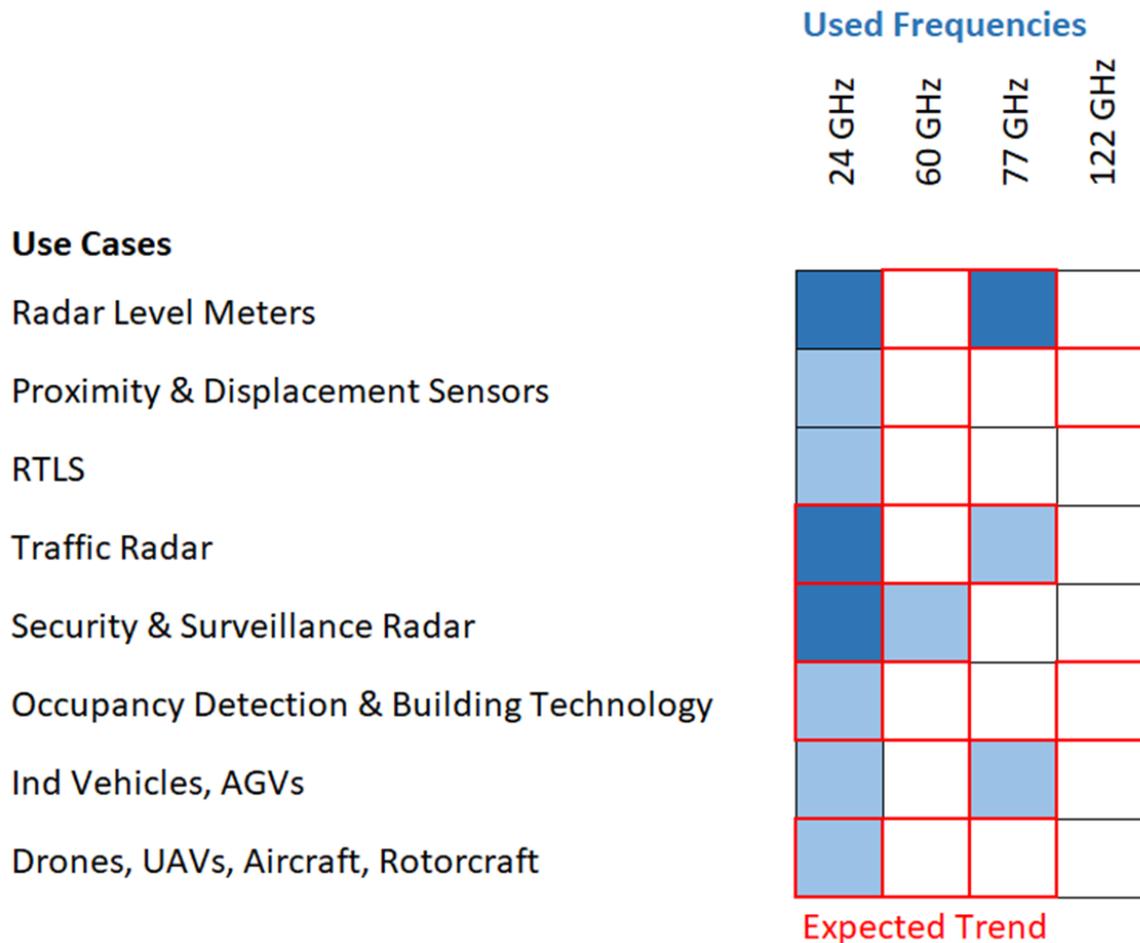


Bild 4: Frequenzbänder und Beispiele für Applikationsklassen

2 Ein neuer Frequenzbereich bei 120 GHz

Bei 122 GHz bis 123 GHz gibt es erste ICs (z. B. von Silicon Radar in Frankfurt a. O.), die 1D Radarmessungen mit deutlich kostengünstigeren und handlicheren Sensoren ermöglichen (Bild 5). Es handelt sich ebenfalls - wie die Bänder bei 24/60 GHz – um ein lizenzfreies ISM Band (Industrial, Service and Medical Band).



Bild 5: Symeo LPR-1DHP 350 Sensor im 122 GHz Band

Die kleineren Baugrößen ermöglichen ein breiteres Einsatzgebiet in industriellen Applikationen. Durch das, im Vergleich zum 60 GHz ISM Band, kleinere Frequenzband (1GHz) ist die absolute Genauigkeit etwas geringer (typischerweise ± 8 mm).

Solche Sensoren empfehlen sich zum Beispiel für Anwendungen, die man im Moment noch mit Ultraschallsensoren zu lösen versucht. Im Außeneinsatz auf mehreren Metern Entfernung ergeben sich bei Ultraschall dort jedoch häufig Unzuverlässigkeiten durch Störungen von Wind etc.

Man kann im Radar-Primärmodus bis zu 50 Meter messen. Beispiele sind Hubhöhen von Logistikgeräten, Wasserstände unterhalb von Brücken, Wasserstände in Klärbecken, Anwesenheitsdetektionen von Coils usw..

Gleichzeitig gibt es auch die Möglichkeit diese Sensoren im sogenannten Sekundärmodus zu betreiben, also zwei aktive Sensoren vermessen die Distanz zueinander. Durch die dort erzielbare Reichweite von 100 bis 150 Metern (je nach Umfeld) ermöglicht es eine kostengünstige Ausstattung für z. B. Krankatzmessungen oder die Positionierung von günstigeren Kranen im Logistikumfeld (Bild 6).

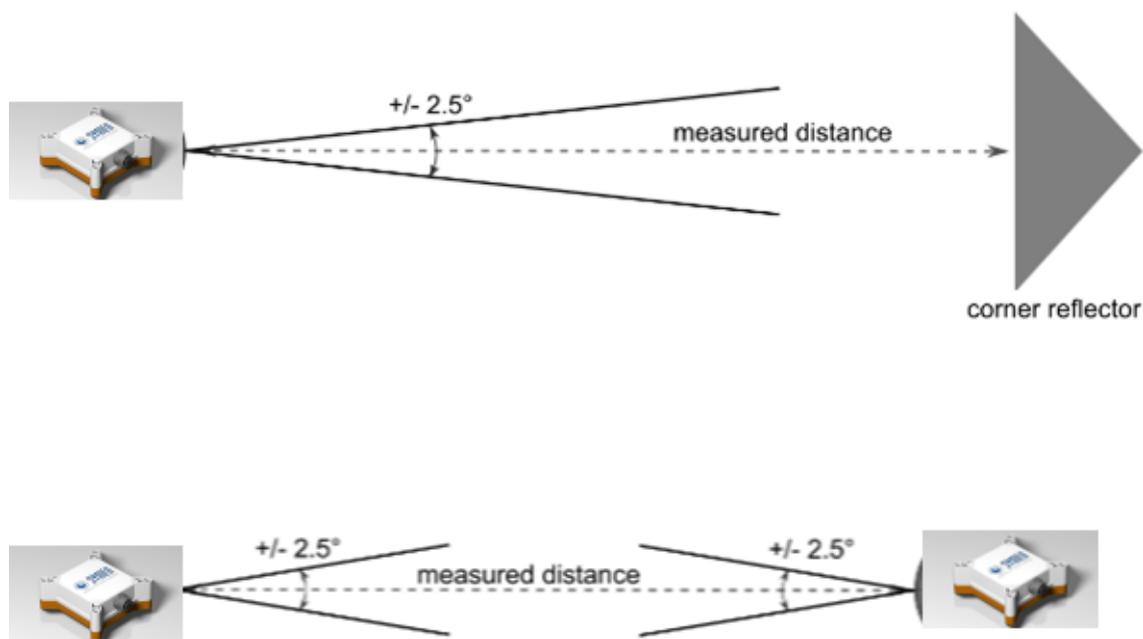


Bild 6: Symeo LPR-1DHP 350 Primär- und Sekundärmodus

3 Der Stand bei bildgebendem Radar und ein Ausblick

Bildgebendes Radar muss durchaus kritisch gesehen werden. Vor ca. 5 Jahren waren die Erwartungen in diese Technologie sehr hoch. Mittlerweile hat die Industrie aber festgestellt, dass vor allem die Applikationssoftware, also die Interpretation bzw. Auswertung der Rohdaten, deutlich mehr Zeit braucht (vgl. auch Meldungen zum autonomen Fahren). In komplexen Umfeldern mit sich ändernden Variablen ist es schwierig, ein ähnlich aussagekräftiges „Bild“ zu erzeugen, das vergleichbar wäre mit optischen Bildern. Getrieben durch Megatrends wie das autonome Fahren (unter allen Umweltbedingungen!) wurden viele Initiativen angestoßen im Halbleiterbereich, um leistungsfähigere Systeme zu ermöglichen.

3.1 Aktuelles „normales“ bildgebendes Radar bei 77 GHz

Wir betrachten hier in Bild 7 ein optisches Bild einer Szene, fotografiert aus einem Boot in Richtung Ufer. Im nächsten Bild 8 sehen Sie die Radar-Rohdaten aus einem, nach heutigem Stand, durchaus leistungsfähigen bildgebenden Radar.



Bild 7: Optisches Bild von einem Boot in Richtung Ufer (Florida, Test Symeo)

20191009-234010_192.168.1.104_rawData_log00002.bin, count = 993, 9.01s

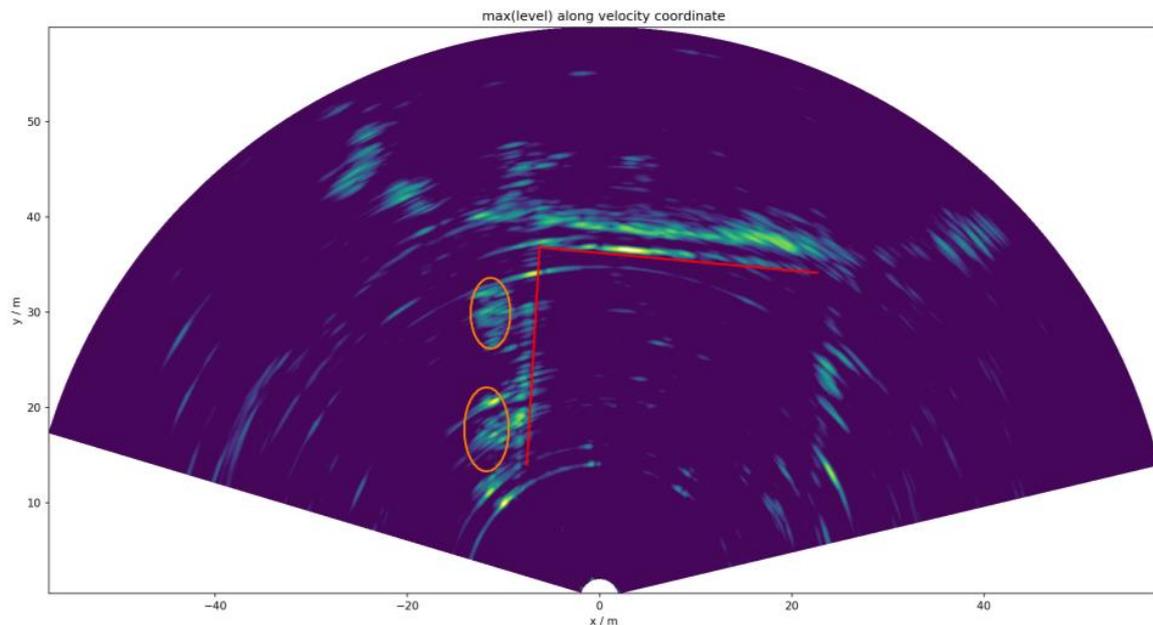


Bild 8: Symeo AVR-110 QDM Radarbild der Bootszene (Rohdaten)

Die Aussagekraft des „Bildes“ ist bisher für das menschliche Auge schwer zu interpretieren. Man kann die Uferlinie erkennen und die zwei Schiffe (eingekreist), die dort angelegt haben.

3.2 Das Prinzip Superradar

Symeo hat beim bildgebenden Radar eine Technologie patentiert, Superradar, die es ermöglicht, mehrere Radare kooperieren zu lassen. Diese Basistechnologie verändert die Möglichkeiten grundlegend, in dem deutlich höhere Auflösungen möglich sind auf kleinerem Raum. Aber hier ebenso wird es noch einige Zeit dauern, bis diese Technologie nutzerfreundlich in industrielle Anwendungen umsetzbar ist.

3.3 SAR – Synthetic Aperture Radar

Eine weitere Technologie, welche die Sensorwelt verändern wird, ist sogenanntes SAR (Synthetic Aperture Radar).

Ein Synthetic Aperture Radar gehört zur Klasse der abbildenden Radare und wird als Sensor zur Fernerkundung genutzt. Das Prinzip ist bekannt aus militärischen Anwendungen (Bild 9).

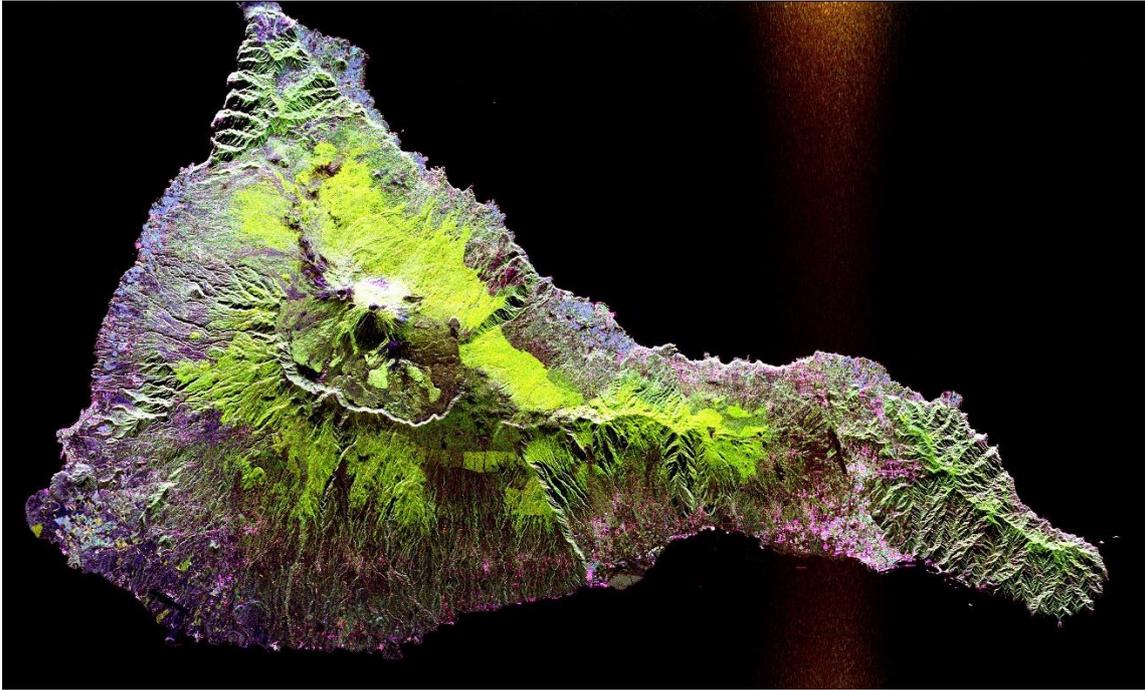


Bild 9: Radaraufnahme (SIR-C/X-SAR) des Vulkans Teide auf Teneriffa aus dem Space Shuttle Endeavour Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=117320> [1]

Solche Bilder benötigen bisher die Aufnahme aus großen Entfernungen (Space Shuttle, Flugzeug etc.)

In den folgenden beiden Bildern 10 und 11 sieht man eine Szene, in der ein SAR-Bild aus sehr kleiner Entfernung aufgenommen wurde (Radar seitlich an einem Versuchsfahrzeug montiert).



Bild 10: Google Maps Fahrtweg (blau) mit einem seitlichen Radar an einem Versuchsfahrzeug [Symeo]

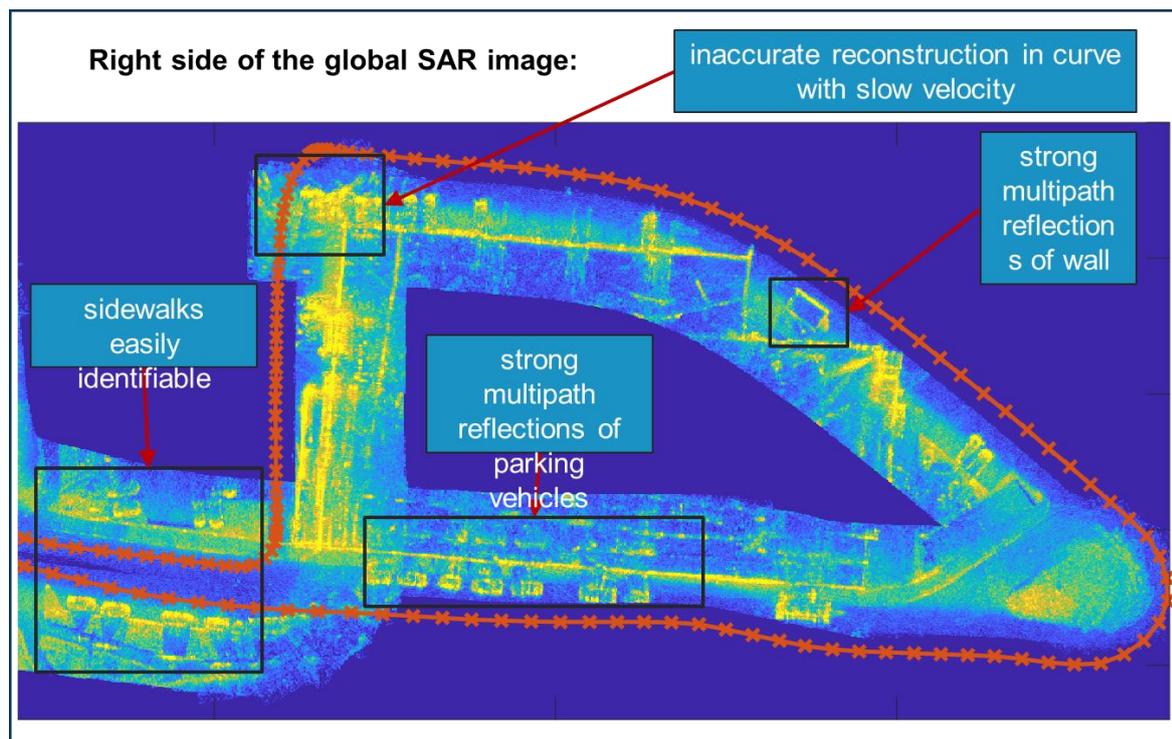


Bild 11: SAR erzeugtes Bild im Vergleich mit dem rechten Bereich von Bild 10 [Symeo]

Hier sehen wir tatsächlich ein sehr brauchbares Bild unserer Umgebung. SAR Anwendungen kann man sich an industriellen Fahrzeugen (z. B. Mährescher, Bagger, Lokomotiven usw.) für die Umgebungsüberwachung/vermessung etc. vorstellen.

Zusammenfassung

Eine Einschätzung über die Zukunft von Radar in der Industrie

Radar ist grundsätzlich eine sehr spannende Technologie, mit der teils unbefriedigende Ergebnisse in schwierigem Umfeld verbessert werden können oder überhaupt erst ermöglicht werden. Die Technologie ist einerseits unabhängig von Sichtverhältnissen oder Umgebungsbedingungen (z. B. Wind, Sonneneinstrahlung etc.).

Andererseits besitzt die Technologie auch ihre physikalischen Besonderheiten, Stichwort Reflektionen und Auslöschungen des Signals.

Die Besonderheiten von Radarwellen als Technologie im industriellen Umfeld benötigen etwas Erfahrung und Gewöhnung. In den letzten Jahren hat sich die Innovationsfreude der Industrie als Kunde und die steigende Erfahrung der Hersteller ausgezahlt in immer besser werdenden Systemen: Leichter zu parametrieren, Unterstützung von länderspezifischen Frequenzregularien, bessere Systeme, um Auslöschungen in reflektierendem Umfeld zu verhindern (z. B. Diversity Antennen) und vieles mehr.

Das Ergebnis ist, dass man heute durchaus von einem „Standard“-Sensor im industriellen Umfeld sprechen kann.

Getrieben auch von immensen Investitionen rund um das Thema autonomes Fahren, entstehen viele neue Firmen (z. B. im Halbleiter Bereich) mit neuen Innovationen (z. B. Superradar, ICs im 300 GHz Bereich, Healthcare Applikationen usw.)

In naher Zukunft werden große Themen angegangen: hochauflösendes bildgebendes Radar, hochgenaues Radar im Submillimeter-Bereich, stark verkleinerte Hardware-Lösungen usw.

Aber der eigentlich größte Meilenstein werden Produkte in Zukunft sein, die auf einer „echten“ Fusion verschiedener Technologien aufbauen. Kameras, die gleichzeitig ein Bild erzeugen aus Optik, Radar, Lidar, Laser etc. und das Endergebnis ist mehr als nur die Summe der Einzelteile. Ein Gerät, das Ihnen beispielsweise gleichzeitig die Geschwindigkeit, die Abmessungen einer Bramme, die Dicke, die Oberflächenstruktur, die Temperaturverteilung und einen Logistikcode „lesen“ kann und das alles in einem Umfeld mit Hitze, Wasserdampf und hohem Verschmutzungsgrad.

Damit das auch gelingt, braucht es die Innovation der Hersteller und Sie, die Industrie mit Innovationsfreude!

Quellenverzeichnis:

- [1] Radaraufnahme (SIR-C/X-SAR) des Vulkans Teide auf Teneriffa aus dem Space Shuttle Endeavour
Quelle: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=117320>

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Produkt- und Verfahrensentwicklung einer innovativen hochgedämmten Kransteuerzentrale

Dirk Pannier
Liesa Hübner
Stefan Krause

KRAFOTEC
KRANBAU WITTENBERG

Dipl. -Ing. Dirk Pannier (Referent)
KRAFOTEC GmbH
Dessauer Straße 280
06886 Lutherstadt Wittenberg



Dipl.-Ing. Liesa Hübner
Wirtsch.-Ing. Stefan Krause
Institut für Strukturleichtbau und
Energieeffizienz gGmbH
Limbacher Str. 56
09113 Chemnitz, Deutschland

Produkt- und Verfahrensentwicklung einer innovativen hochgedämmten Kransteuerzentrale – Ergebnisse eines FuE-Vorhabens

Im Rahmen des ZIM-FuE-Vorhabens CoolCraneControl wurden unterschiedliche Lösungen zur Erzielung einer energieeffizienten Klimatisierung einer Kransteuerzentrale für Anwendungen mit hohen thermischen Belastungen entwickelt. Dabei sind sowohl aktive Maßnahmen durch den Einsatz innovativer Klimatisierungslösungen betrachtet worden als auch passiv durch den Einsatz hochdämmender Werkstoffe in Verbindung mit Schutzschilden untersucht worden.

1 Einleitung und Motivation

Die Motivation zur Entwicklung einer innovativen energieeffizienten und hochgedämmten Kransteuerzentrale (Schaltschrank) ergibt sich aus dem Bedarf der zwingend erforderlichen Kühlung der Steuer- und Leistungselektronik in Einsatzbereichen wie Stahlwerken, Gießereien, Chemiewerken aber auch in Papierfabriken und allgemein in Bereichen, in denen die Kransteuerzentrale starker Temperaturstrahlung ausgesetzt ist. Hohe Temperaturen, Staub, Feuchtigkeit und Ölnebel sind standzeitverkürzende Faktoren sensibler Elektrotechnik. Ein Ausfall dieser Technik der Kransteuerzentrale bedingt einen Ausfall des Kranes und somit Produktionsausfall und generiert hohe Folgekosten. Die Abmessungen der Kransteuerzentralen nehmen dabei Größen von Containern an, wie aus dem nachstehenden Bild 1 deutlich wird.



Bild 1: Ausführungsbeispiel einer Kransteuerzentrale Fa. KRAFOTEC

Die in der Kransteuerzentrale eingebauten Komponenten der Steuerungs- und Regeltechnik sind temperaturempfindlich in der Form, dass die im Wesentlichen verbauten Komponenten für eine maximale Betriebstemperatur von 50°C ausgelegt sind [1]. Allerdings führen Dauerbelastungen durch Temperaturen im Bereich von 50°C zu einer verkürzten Lebensdauer, so dass gesagt werden kann, dass eine um 10 K niedrigere Temperatur im Inneren der Schaltschränke zu einer Verdoppelung der Lebensdauer führt.

Ein extremes Herunterkühlen zur Maximierung der Lebensdauer der elektronischen Komponenten wird jedoch nicht empfohlen infolge des Risikos der Kondensatbildung und dem Faktor der Energiekosten. Als Idealtemperatur zwischen Lebensdauer der Komponenten und Aufwand für die Schaltschrank-Klimatisierung wird in der Regel eine Temperatur von 35°C im Inneren des Schaltschranks gewählt (vgl. [2], [3], [4]).

Der Wärmeeintrag konventioneller Steuerzentralen erfolgt dabei von „innen“ in Form der Verlustwärme der elektronischen Komponenten (siehe dazu Bild 2). Damit ergibt sich das Erfordernis einer Kühlung der Schaltschrankschränke unabhängig der von außen einwirkenden zusätzlichen thermischen Lasten.

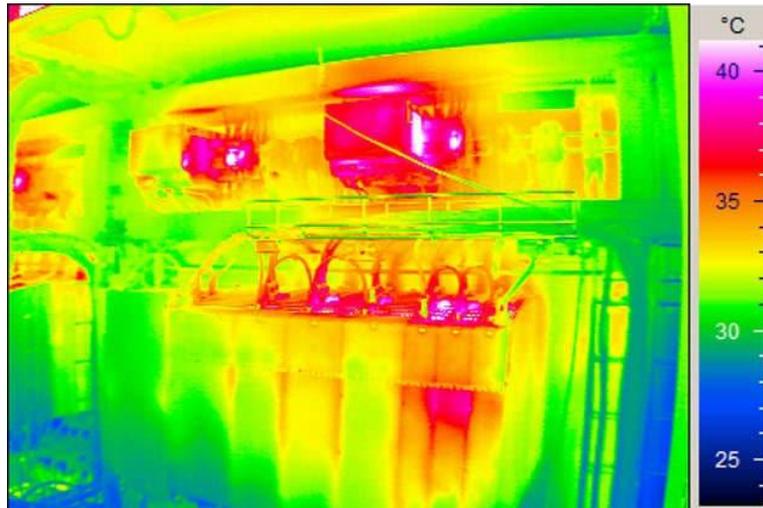


Bild 2: Thermografische Aufnahme eines unzureichend klimatisierten Schaltschranks [4]

Die notwendige Kühlung der Schaltschränke stellt damit je nach Jahreszeit und Umgebung eine große Herausforderung dar, gerade, wenn z. B. die Umgebungstemperatur wie in Gießereien oder Stahlwerken deutlich höher.

Eine zu hohe Temperatur im Schaltschrank führt im besten Fall automatisch zur kurzfristigen Abschaltung. Im schlechteren Fall droht ein permanenter Ausfall der Komponenten [2]. Zum Schutz der Steuer- und Leistungselektronik wird die herkömmlich noch ungedämmte Kransteuerzentrale dabei rein elektrisch über Kompressionskältemaschinen und Ventilatoren klimatisiert (vgl. [5], [6]).

Wärmeschutzmaßnahmen, wie heute im Hochbau und der Gebäudetechnik und dem Rohrleitungsbau üblich, kommen nicht zum Einsatz, was im Widerspruch zu den gesetzlich vorgegebenen Klimaschutzzielen (im Sinne der Energieeffizienz) steht.

Die Defizite der Lösungen zur Klimatisierung von Kransteuerzentralen in Bereichen mit hoher thermischer Belastung wie Gießereien, Stahlwerken und Papierfabriken sind demnach:

- keine Wärmedämmung der Hüllkonstruktion, bei hohen Umgebungstemperaturen (>35°C) und bei Strahlungsexposition durch produktionsbedingte Quellen heizt sich die Steuerzentrale auf,
- hoher elektrischer Energiebedarf für Klimatisierung der Steuer- und Leistungselektronik wird benötigt,

- zu hohe Betriebstemperaturen führen zu verkürzten Lebensdauern der elektrischen und elektronischen Bauteile,
- Schaltgeräte werden typischerweise bei 30 oder 35 °C geprüft, diese Temperaturen sind für einen störungsfreien Betrieb nicht zu überschreiten (Schaltschranktemperatur),

Ausgehend von den Defiziten des Standes der Technik bei Kransteuerzentralen für den Einsatz bei hohen Umgebungstemperaturen ergibt sich der Bedarf nach neuen Lösungen auf der Grundlage der im Rahmen des Vorhabens zu entwickelnden hochgedämmten und energieeffizienten Kransteuerzentrale für Anwendungen in Stahlwerken, Gießereien, Papierfabriken sowie Chemiewerken. Im Fokus steht dabei die optimale Anpassung des Kühlsystems für die mit Hochleistungsdämmstoffen gedämmte Kransteuerzentrale.

Die angestrebten technischen Funktionalitäten bestehen in der Entwicklung einer energieeffizienten Kransteuerzentrale für Anwendungsbereiche mit hoher thermischer Belastung, wobei die hohe Energieeffizienz erreicht werden soll mittels der Kombination aktiver (energieeffiziente Kühlung) und passiver (Hochwärmedämmung, Strahlungsschutzschild) Maßnahmen. Die damit erzielbaren Funktionalitäten zielen dabei auf den verminderten Energieverbrauch zur Aufrechterhaltung der Funktionsweise des Kranes sowie die Minderung der Ausfallzeiten des Kranes ab.

2 Klimatisierungslösung mittels Flächenkühlung

Das E-Haus der beispielhaften Kransteuerung besteht aus zwei Räumen. In der Kabine wird der größere Teil der elektrischen Leistung bewegt. Einen Einblick in die Kabine wird in Bild 3 dargestellt.



Bild 3: Innenausstattung Antriebskomponentenraum (Kabine) in der Steuerzentrale

Im E-Raum befinden sich eine allgemeine SPS Steuerung und dazugehörige Regelungstechnik (Bild 4, links). Das Raumvolumen beläuft sich auf 30 m³. Der gesamte Energiefluss im E-Raum liegt bei 1,8 kW. Bei einer Energieverlustleistung von 10 % entstehen dabei 180 W Abwärme.

In der Kabine (Bild 4, rechts) findet ein Energiefluss von 48 kW statt. Die dabei entstehende Verlustenergie beläuft sich auf ca. 4,8 kW und verteilt sich in der Kabine bei 85 m³. Die

größten Hotspots sind in Bild 4 rot dargestellt. Aufgrund der hohen Leistungskonzentration werden dort etwa 90 % der Abwärme erzeugt. Hier könnte eine lokale Kühlung hinter den Montageplatten einen gezielten Abtransport ermöglichen.

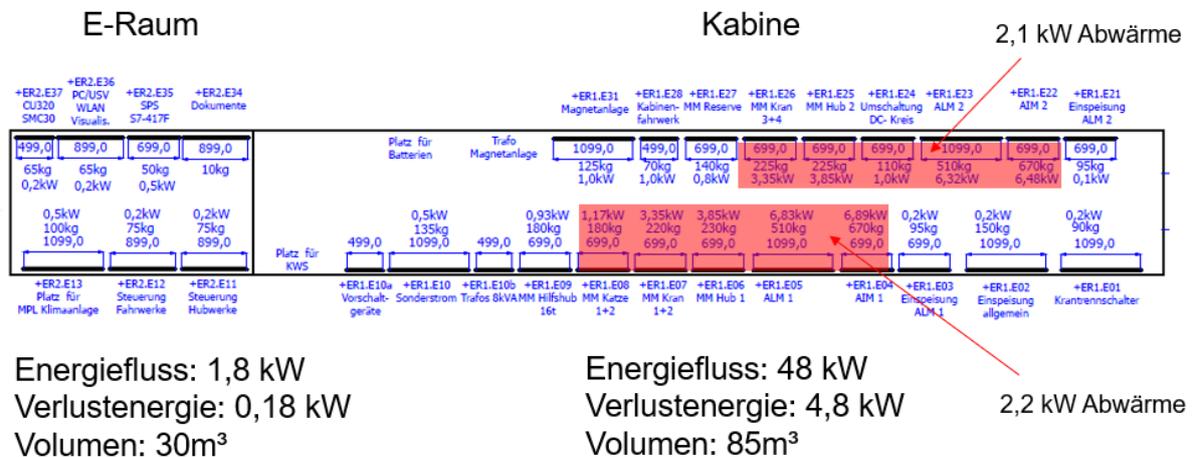


Bild 4: Montageplattenanordnung E-Raum Draufsicht

2.1 Lösung 1 - Lokales Kühlsystem

Bei der erarbeiteten „lokalen Klimatisierungsvariante“ sollen die energiereichsten lokalen Wärmequellen gezielt über ein Kühlsystem angesteuert werden, ähnlich einer flüssig gekühlten CPU-Kühlung. Dabei wird die entstehende Abwärme der Hotspots über ein Kühlmedium (flüssig) transportiert und nach außen abgeführt (Bild 5). Die verbleibende allgemeine Abwärme kann über herkömmliche Deckenklimatechnik erfolgen. Für die allgemeine Grundklimatechnik kann ein kleinerer Verdampfer mit geringerem Energieverbrauch zum Einsatz kommen. Die Hotspots der Anlagensteuerung müssen bei der Anlagenplanung ermittelt werden, um passende lokale Kühlkörper anzubringen. Die Positionierung erfolgt somit lokal. Die dafür zu installierenden Kühlleitungen sind zusätzlich in der Anlagenplanung mit aufzuführen.

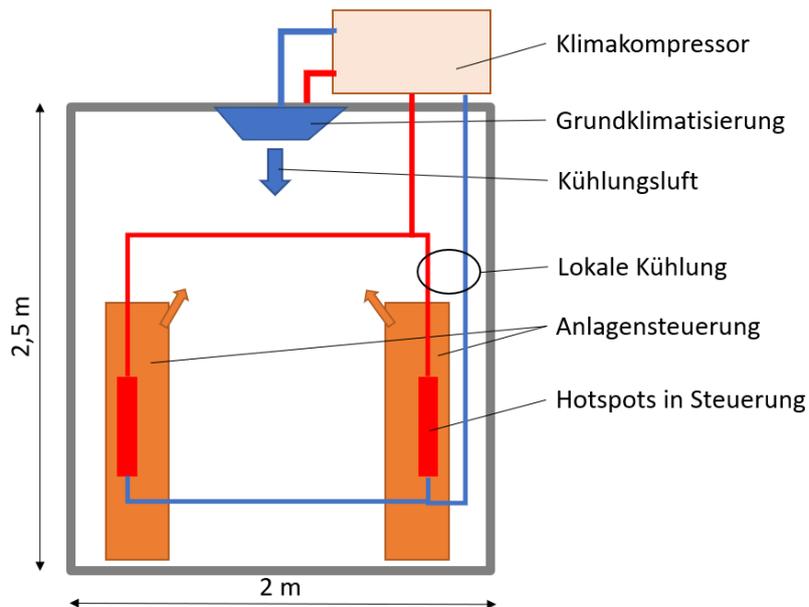


Bild 5: Klimatisierungskonzept Variante "Lokales Kühlsystem"

2.2 Lösung 2 - Teillokales Klimatisierungssystem

Das erarbeitete „Teillokale Kühlsystem“ soll über die Wandflächen mit Flächenklimatisierungslösungen wie beispielsweise Kapillarrohmmatten erfolgen. Die entstehende Strahlungskühlung muss einen Großteil der entstehenden Abwärme abführen. Für die restliche Klimatisierung kann eine herkömmliche Deckenklimatisierung genutzt werden. Das Modell ist in Bild 6 dargestellt. Bei dem erarbeiteten System erfolgt die globale Kühlung über ein Wandsystem mit eingebauten Kapillarmatten. Die Unterbringung der energiesparenden Klimatisierung wird im Wandaufbau realisiert.

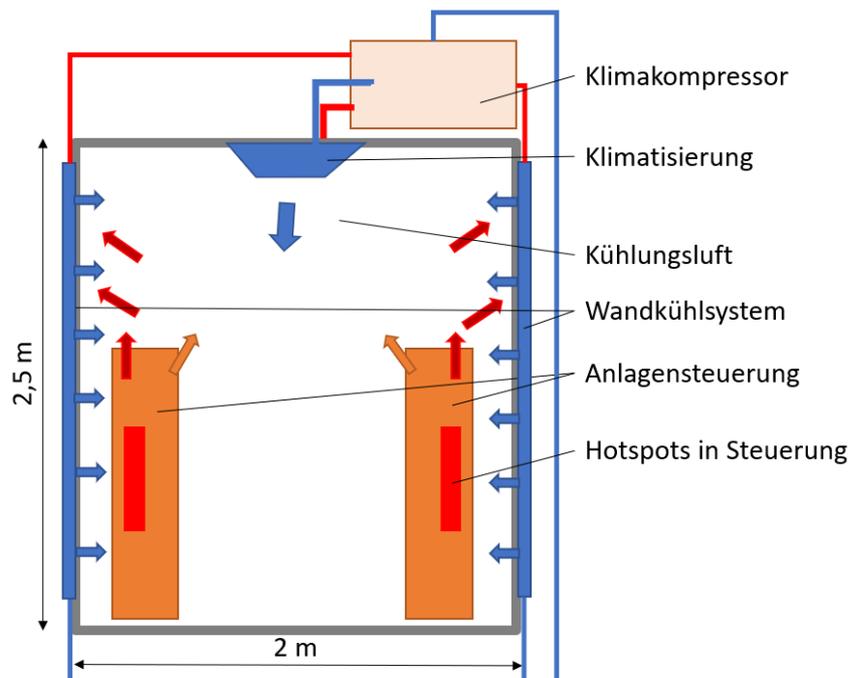


Bild 6: Klimatisierungskonzept Variante "Teillokales Kühlsystem"

Anhand thermodynamischer Untersuchungen konnten mit den erarbeiteten Werten erste Abschätzungen für eine Energiebilanz erarbeitet werden. Dabei wurde der Stand der Technik mit einer herkömmlichen SPS Sandwichlösung der zu entwickelnden Dämmsystemlösung gegenübergestellt. Für die Betrachtung wurde die gewählte beispielhafte Kransteuerzentrale genutzt. Bei der Bilanz wurden folgende Parameter verwendet:

Globale Bedingungen:

- Hallentemperatur innen unter Decke 60°C
- Kransteuerzentrale innen 25°C
- Einströmtemperatur in Kapillarrohrleitung 6°C
- Einströmgeschwindigkeit 0,01 m/s

Stand der Technik:

- SPS Sandwich 40 mm
- Lambda 0,025 W/(mK)
- Mit Trapezblech

VIP Variante 40 mm

- 2 x 20 mm VIP versetzt
- Lambda 0,03 W/(mK)
- Mit Trapezblech

VIP Variante 20 mm

- 2 x 10 mm VIP versetzt
- Lambda 0,03 W/(mK)
- Mit Trapezblech

Anhand der erarbeiteten Wärmeflusskurven können weitere Berechnungen für die Bilanz durchgeführt werden. Die Ergebnisse vom aktuellen Stand der Technik sind in Bild 7 zusammengefasst und dargestellt.

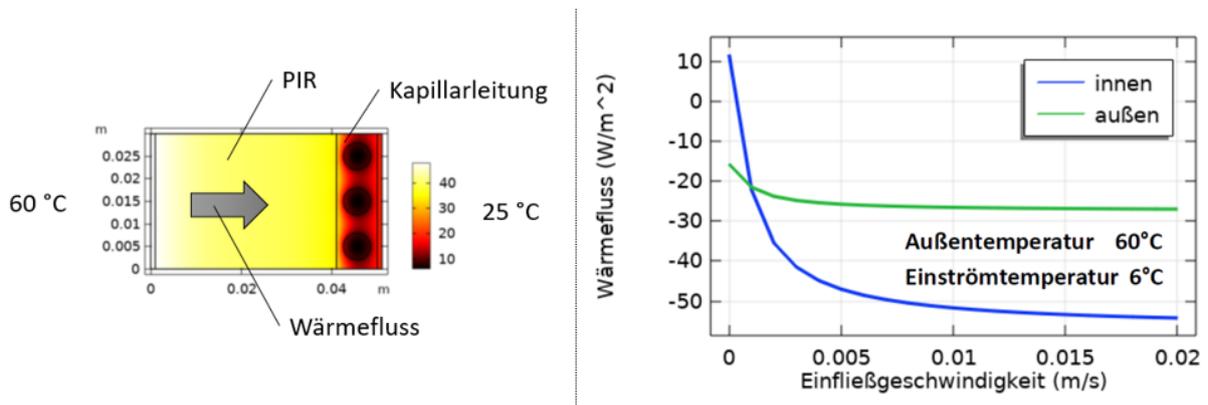


Bild 7: Analytische Ermittlung des Wärmeflusses im 40 mm SPS Element mit PIR Dämmung

Bei der zweiten analytischen Betrachtung wurde eine 40 mm starke VIP Kieselensäuredämmung verwendet. Die Ergebnisse sind in Bild 8 dargestellt.

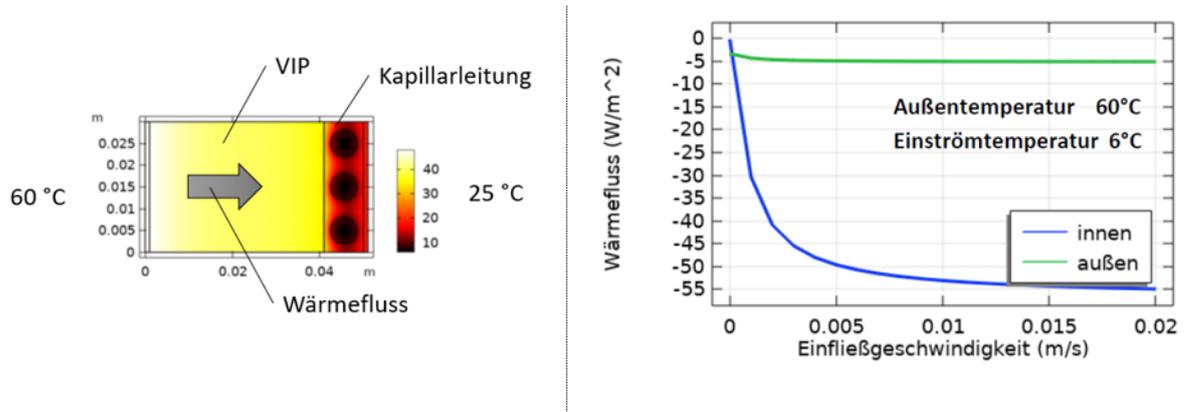


Bild 8: Analytische Ermittlung des Wärmeflusses im 40 mm VIP Kieselensäure Dämmung

Mit den Ergebnissen aus der analytischen Betrachtung der verschiedenen Dämmsysteme konnte eine Bilanzierung an der beispielhaften Kransteuerzentrale durchgeführt werden. Die Tabelle 1 stellt die Energiebilanz am Beispiel einer Kransteuerzentrale dar. Anhand der Gegenüberstellung konnte festgestellt werden, dass hier eine Einsparung von 2,1 kW mit einer hochdämmenden Kransteuerung realisiert werden kann.

Tabelle 1: Energiebilanz am Beispiel einer Kransteuerzentrale 40 mm PIR vs. 40 mm VIP

Bezeichnung	PIR	VIP	Diff
Kühlleistung			
Oberfläche Steuerzentrale [m ²]	187	187	
Dämmfläche ohne Heizung	127	127	
Heiz- und Kühlfläche [m ²]	60	60	
Kühlleistung im Sommer bei 0,01 m/s			
Kühlleistung nach innen in [W]	-3120	-3120	
Verlustleistung bei Kühlfläche in [W]	-1620	-300	-1320
Verlustleistung bei Dämmfläche in [W]	-960	-180	-780
Verlustleistung gesamte Oberfläche [W]	-2580	-480	-2100
Benötigte Kühlleistung gesamt [W]	-5700	-3600	-2100

Eine weitere Betrachtung ist die Jahresbilanz bei konstanter Nutzung im Schichtbetrieb in einer Gießerei. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Durch eine hochdämmende Wärmedämmung bei einer Kransteuerzentrale kann die Hälfte an laufenden Kosten gegenüber einer herkömmlichen Steuerung reduziert werden.

Tabelle 2: Verbrauch und Kostenabschätzung am Beispiel einer Kransteuerzentrale
40 mm PIR vs. 40 mm VIP

Bezeichnung	PIR	VIP	Diff
Verbrauch bei konstanter Kühlung mit einer Nettoleistung von 3120 kW			
Kühlleistung in [kW/h]	5,7	3,6	2,1
Kühlleistung am Tag [kW/h]	136,8	86,4	
Kühlleistung in der Woche [kW/h]	957,6	604,8	
Kosten bei 25 Cent je kw/h [€]	239,4	151,2	
Im Jahr [€]	12448	7862	4586

Zusätzlich wurden die Anschaffung der Dämmung und der jährliche Verbrauch in Dekaden betrachtet. Dabei zeigt sich, dass auch eine 20 mm VIP Dämmung gegenüber dem Stand der Technik schon nach 10 Jahren Nutzungsdauer einen großen Vorteil im Verbrauch und den Kosten hat. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 mit 10 Jahren und 20 Jahren Nutzungsdauer bei konstanter durchgehender Nutzung dargestellt.

Tabelle 3: Zeitliche Darstellung der Energiekosten mit Anschaffungskosten von Dämmung einer beispielhaften Kransteuerzentrale



Nicht berücksichtigt dabei sind eventuell auftretende weitere Kostenspareffekte durch weniger aufwändige Wartungsintervalle der Klimageräte sowie die voraussichtlich geringeren Investitionskosten durch deutlich kleinere Klimageräte.

3 Einsatz von Hochwärmedämmung

Für den Einbauort der VIP an der Steuerzentrale liegen verschiedene Möglichkeiten vor. Im Stand der Technik werden verwendete Dämmelemente von außen an dem Kransteuerskelett installiert. Für die weitere Analyse wurden alle möglichen Einbauorte für hochdämmende VIP mit Vor- und Nachteilen betrachtet und gegenübergestellt. Die Betrachtung erfolgte mit allen notwendigen Randbedingungen und wurde mit den jeweiligen fachspezifischen Bereichen abgestimmt.

Das tragende Skelett einer Kransteuerzentrale ist der Ausgangspunkt dieser Analyse. Je nach Einbauposition werden die Möglichkeiten definiert. Für mögliche Installationsrealisierungen werden folgende Einbauorte als realisierbar gesehen:

- Einbauort innerhalb des Skeletts
- Einbauort im Skelett
- Einbauort außerhalb des Skeletts

Für die Analyse wird ein Teilbereich aus dem Container jeweils einzeln zu den möglichen Einbauorten betrachtet. Das nachfolgende Bild 9 zeigt den gewählten Teilbereich.

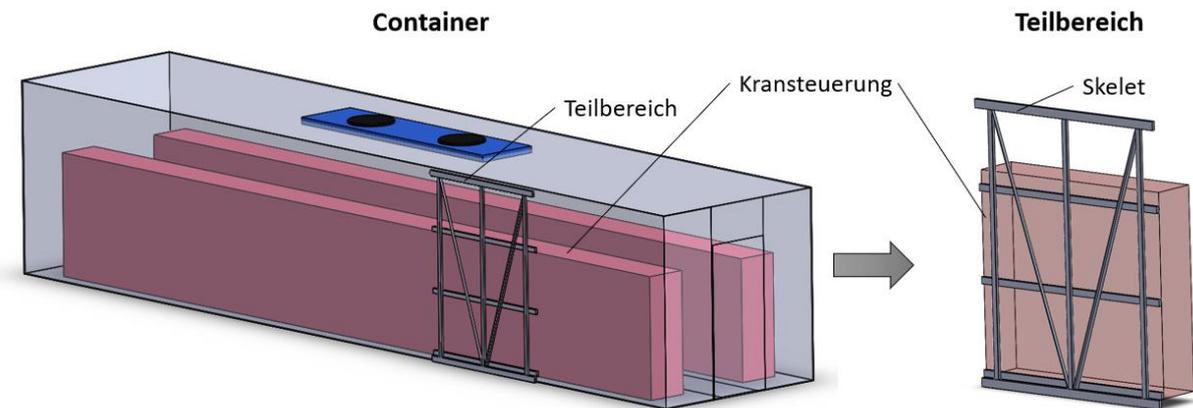


Bild 9: Teilbereich für Einbauortanalyse

In den beschriebenen Analysen werden folgende gleichbleibende Parameter untersucht.

- Auslegung der VIP für Normgrößen und Sonderabmessungen
- Wärmebrücken im Dämmsystem
- Montagefreundlichkeit
- Verletzbarkeit der VIP bei Montage und Reparaturarbeiten im Container

Die erachteten Einbaumöglichkeiten werden in den folgenden Unterabschnitten analysiert und beschrieben. Im letzten Unterabschnitt werden die erarbeiteten Einbausituationen gegenübergestellt und in einer Bewertungsmatrix verglichen.

3.1 Einbauort innerhalb des Skeletts

Der Einbau der VIP Dämmung im Inneren des Skeletts ist eine Möglichkeit, um eine energieeffiziente Kransteuerzentrale zu realisieren. Bild 10 stellt diese Möglichkeit in einem Teilabschnitt dar.

Für die beschriebenen und zu bewertenden Parameter wurden folgende Erkenntnisse erarbeitet:

- Die Auslegung der VIP ist in Normgrößen gut möglich. Je nach Abstand der Rippen und Abmessungen im Randbereich können diese gut gefertigt werden.
- Als mögliche Wärmebrücken werden die Querrippen für die Montage der Steuerungspanels gesehen. Diese werden benötigt, um den Verbund mit dem Skelett zu realisieren.
- Die Montage ist gut realisierbar, muss jedoch vor dem Einbau der Steuerung erfolgen.

- Die Verletzbarkeit der VIP wird hier als hoch eingestuft, da die innenliegende Dämmung vor der Steuerungsmontage eingebaut werden muss.

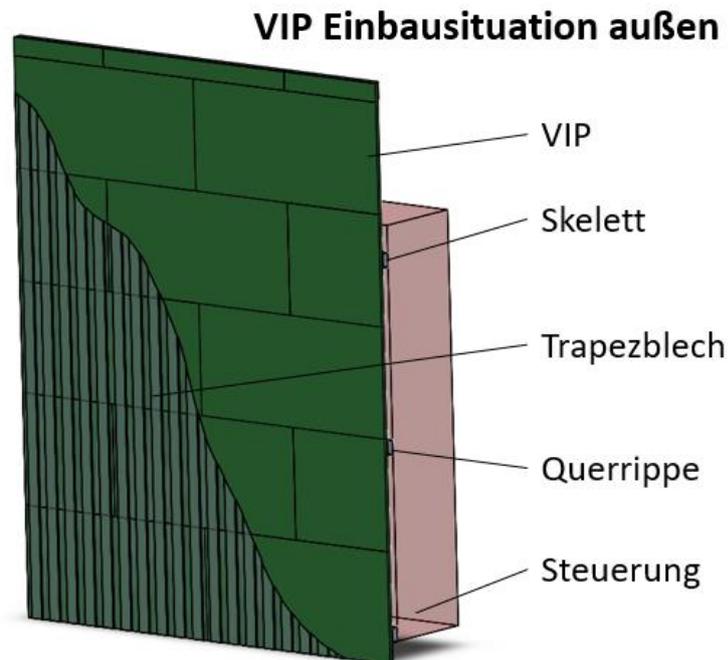


Bild 10: Teilabschnitt der Einbausituation innerhalb des Skeletts

3.2 Einbauort im Fachwerk des Skeletts

Der Einbauort im Fachwerk des Skeletts wird als weitere Möglichkeit zur Montage der VIP Dämmung gesehen. Bild 11 stellt die Einbausituation dar.

Für die beschriebenen und zu bewertenden Parameter wurden folgende Erkenntnisse erarbeitet:

- Die Auslegung der VIP ist in Normgrößen schwer realisierbar. Aufgrund des Gefaches müssten hier viele Sondermaße hergestellt werden.
- Als mögliche Wärmebrücken wird hier das ganze Skelett gesehen. Bei sehr hohen Werten für Delta T innen und außen ist mit einem hohen Energieverlust zu rechnen.
- Die Montage ist gut realisierbar. Ein Einbau kann auch nach der Installation der Steuerungstechnik erfolgen.
- Die Verletzbarkeit der VIP wird hier als normal eingestuft. Je nach Steuerzentralenaufbau können die VIP von innen mit einer Aluhaut geschützt werden.

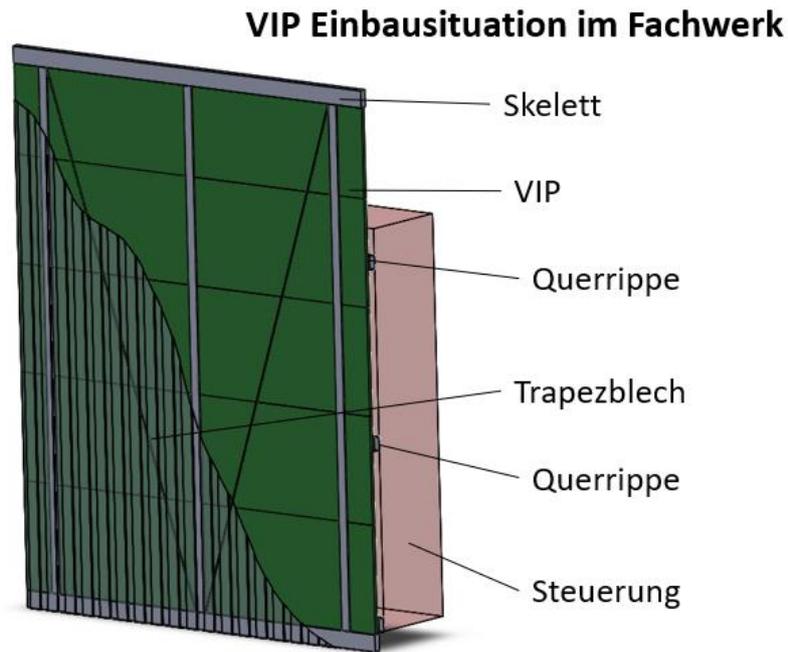


Bild 11: Teilabschnitt der Einbausituation im Fachwerk des Skeletts

3.3 Einbauort außerhalb des Skeletts

Der Einbauort der VIP Dämmung außerhalb des Skeletts ist eine weitere Möglichkeit. Sie kommt dem derzeitigen Stand der Technik nah, ist jedoch aufgrund der Randbedingungen und Einsatzmöglichkeiten der VIP Dämmung einzeln zu betrachten. Das nachfolgende Bild 12 zeigt die Einbausituation in einem Teilabschnitt.

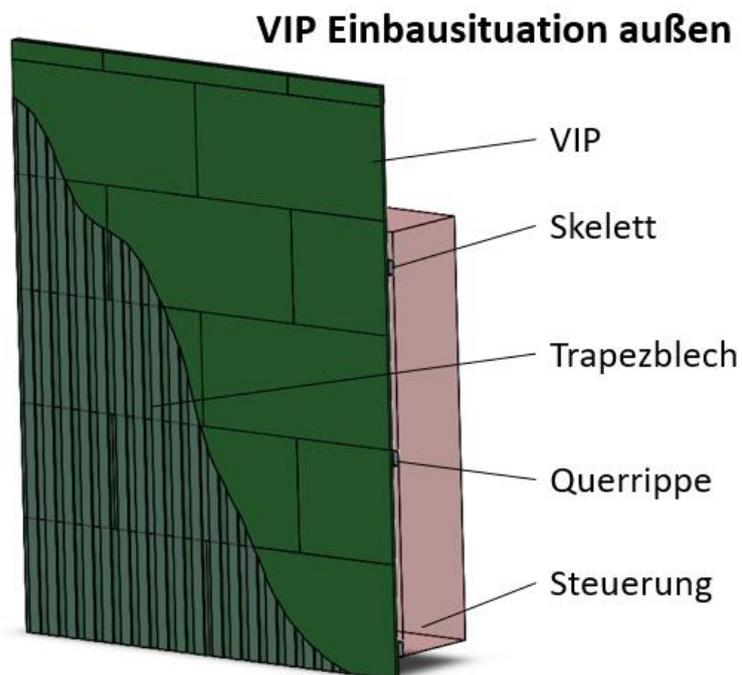


Bild 12: Teilabschnitt der Einbausituation außerhalb des Skeletts

Für die beschriebenen und zu bewertenden Parameter wurden folgende Erkenntnisse erarbeitet:

- Die Auslegung der VIP ist in Normgrößen sehr gut realisierbar. Aufgrund der durchgehenden Montage können hier viele Normgrößen verwendet werden. Lediglich im Randbereich und im Türbereich kann es zu Sondergrößen kommen.
- Als mögliche Wärmebrücken werden hier die Aufhängepunkte am Skelett, welche zum Transport benötigt werden, gesehen.
- Die Montage ist gut realisierbar. Ein Einbau kann auch nach der Installation der Steuerungstechnik erfolgen.
- Die Verletzbarkeit der VIP wird hier als gering eingestuft. Je nach Steuerzentralenaufbau können die VIP von innen mit einer Aluhaut geschützt werden.

3.4 Gegenüberstellung der erarbeiteten Einbausituationen

Die Gegenüberstellung der erarbeiteten Einbausituationen erfolgte anhand einer Bewertungsmatrix. Die Ergebnisse sind in Bild 13 übersichtlich dargestellt. Die Bewertung erfolgte über ein Punktesystem. Von +3 für sehr gut, 0 neutral und bis -3 für sehr schlecht.

Eigenschaft	VIP Dämmsituation		
	innen	Im Skelett	Außen
Auslegung der VIP	+1	-3	+3
Wärmebrücken	-2	-3	+2
Montagefreundlichkeit	+1	-2	+3
Schutz VIP	-2	+1	+2
SUMME	-2	-7	+10

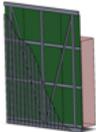
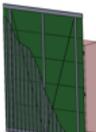
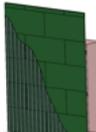




Bild 13: Gegenüberstellung der VIP Einbausituationen

(+3 für sehr gut, 0 neutral, -3 für sehr schlecht)

Der außenliegende Einbauort ist laut Bewertungsmatrix und dem aktuellen Erkenntnisstand die beste VIP Dämmsituation. Folgende Vorteile werden hier gesehen:

- Sehr gute Auslegung der VIP mit Normgrößen
- Geringe Wärmebrücken
- Sehr gute Montagefreundlichkeit
- Guter Schutz der VIP

4 Entwicklung wissenschaftlicher Demonstratoren

Bei der Entwicklung des Demonstratorkonzeptes wurde im ersten Schritt ein konstruktives Demonstratormodell erarbeitet. Dabei konnten die entwickelten Teilvarianten in einem gesamten Modell einfließen. Ziel des konstruktiven Konzeptes war es, eine Machbarkeit im Gesamtverbund zu untersuchen. Hier sind alle final erarbeiteten Anforderungen eingeflossen. In Bild 14 links ist das erarbeitete CAD Modell abgebildet. Aus diesem Modell wurde ein finales Konzept für die Demonstration des innovativen Wandaufbaus, welches eine praktische Machbarkeit nachweisen soll, konzipiert. Dabei wurde ein Teilabschnitt für den Demonstratorbau aus dem CAD Modell genutzt, um einen zu realisierenden Wandaufbau in Kombination des Versuchsplanes zu erarbeiten (siehe Bild 14 rechts).

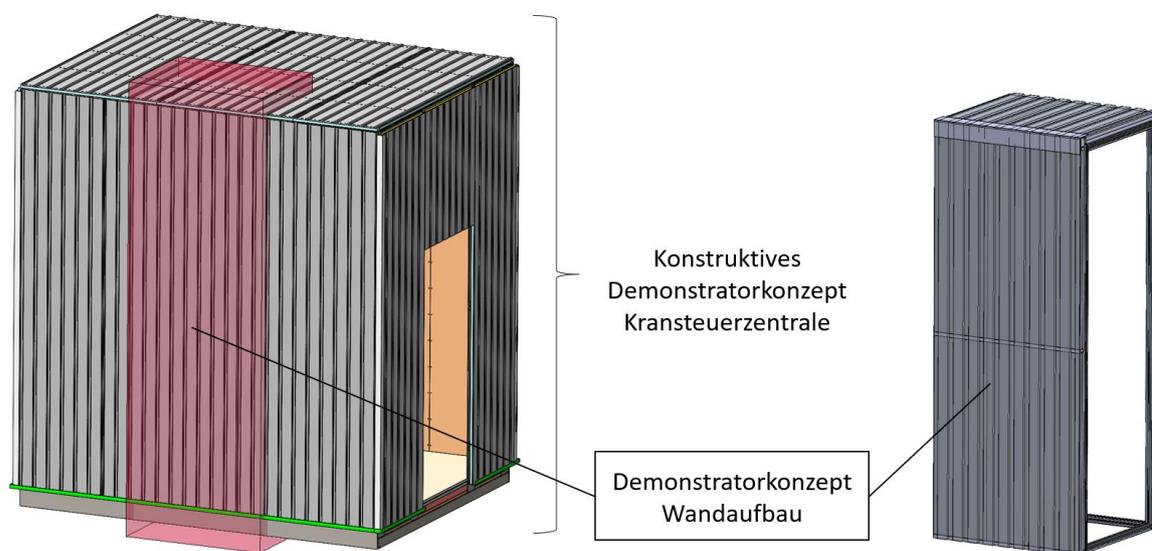


Bild 14: Entwicklung der Demonstratorkonzepte

links: konstruktives Demonstratorkonzept; rechts Demonstratorkonzept Wandaufbau Teilausschnitt

Mit dem gewählten Teilausschnitt konnte der final zu realisierende Demonstrator konstruktiv geplant und erarbeitet werden. Dabei sind alle zu erprobenden Aufgaben mit eingeflossen. In Bild 15 ist das finale Demonstratormodell als Teilausschnitt vom Schutzschild abgebildet. Dabei soll zu Demonstrationszwecken ein Ausschnitt mit dem finalen Schutzschild und der entwickelten Befestigungsstrategie realisiert werden.

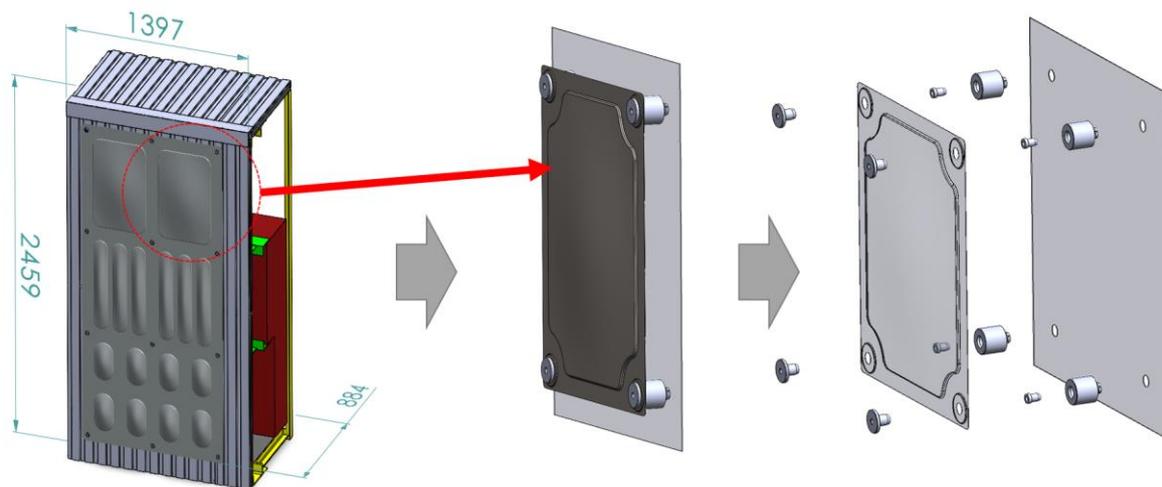


Bild 15: Finales Demonstratormodell vom Teilausschnitt und Demonstratormodell Schutzschild mit erarbeiteter Befestigungsstrategie

Neben dem wissenschaftlichen Kleindemonstrator zur Validierung der Füge-technologien Schutzschild Kransteuerzentrale sowie der Untersuchung der Wärmeübertragung wurde ein Großdemonstrator konzipiert und entworfen.

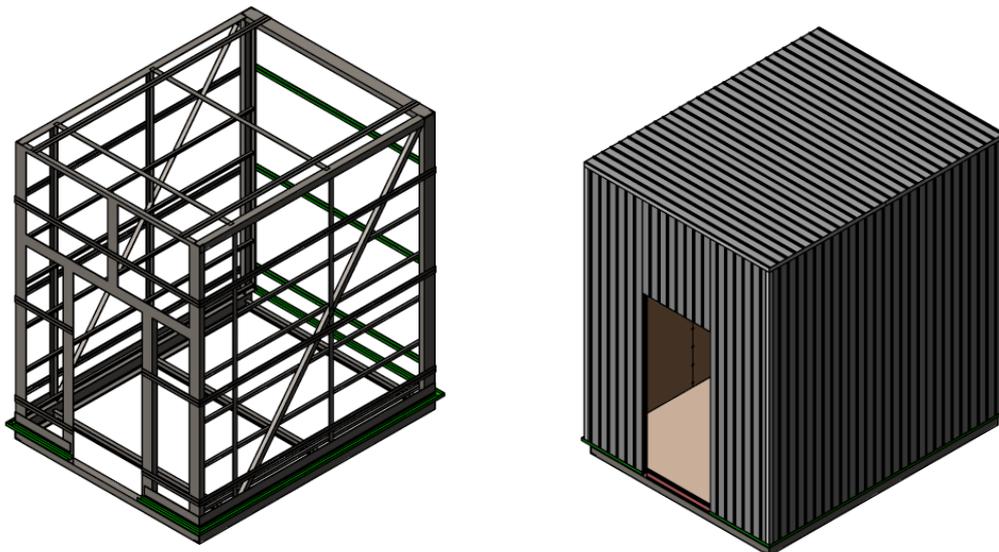


Bild 16: Stahlbau- (links) und Endkonstruktion (rechts) Großdemonstrator

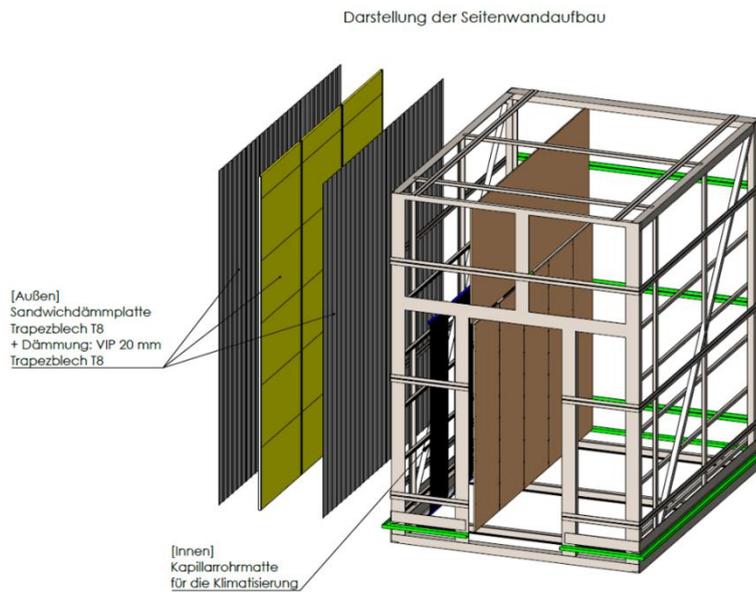


Bild 17: Seitenwandaufbau des Großdemonstrators mit integrierter Hochwärmedämmung (VIP) und Wandkühlung (Kapillarrohrmatten)

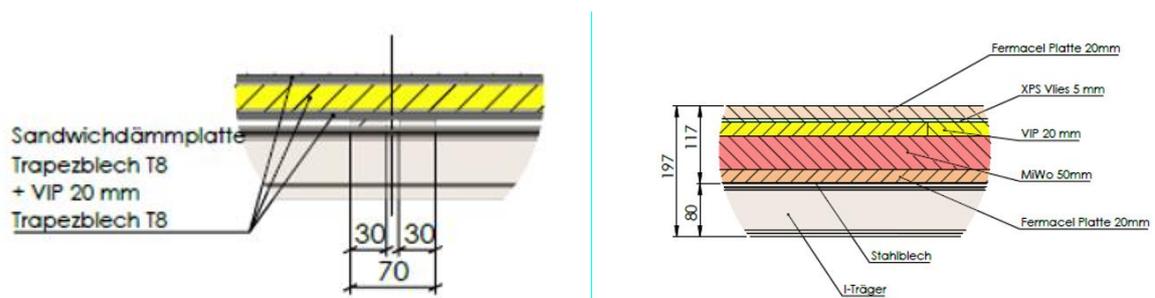


Bild 18: Dachgruppenaufbau (links) und Bodenaufbau (rechts) des Großdemonstrators mit integrierter Hochwärmedämmung (VIP)

5 Ausblick

Aktuell erfolgt die Fertigstellung der Demonstratoren sowie deren Beprobung. Nach Abschluss dieser Arbeiten wird geprüft, einen Prototyp der Kransteuerzentrale inklusive aller TGA-Komponenten sowie der entwickelten Notfallkonzeptlösungen zu fertigen und unter Realbedingungen zu testen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Rahmen des FuE-Vorhabens technische Lösungen für die Entwicklung einer energieeffizienten Kransteuerzentrale entwickelt und erprobt wurden. Die Kombination der energieeffizienten Klimatisierung durch Flächenkühlung mit dem Einsatz von Hochwärmedämmung ermöglicht eine Halbierung des Energieverbrauchs zur Klimatisierung und leistet damit einen Beitrag zur Energieverbrauchsreduktion.

Hinweis:

Das Verbundprojekt „CoolCraneControl“ wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz durch den Projektträger VDI/VDE-IT und entstand im Rahmen des Innovationsnetzwerks INNODÄMM – Entwicklung und Anwendung hochdämmender Werkstoffe. Projektpartner sind das Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH, KRAFOTEC GmbH sowie die Sika Werke Leipzig GmbH (assoziiert).

Quellenverzeichnis:

- [1] Vogel Communications Group. [Online] <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/wann-ist-ein-kuehlgeraet-wirklich-notwendig-a-654886/>.
- [2] Koester, C.: Der wohltemperierte Schaltschrank. Hamburg: Pfannenberg Europe GmbH, 2017.
- [3] Rittal AG. Ist ein Kühlgerät wirklich nötig? Polyscope. 2018.
- [4] Döppert, M.: TIPPS ZUR SCHALTSCHRANK-KLIMATISIERUNG. Der KONSTRUKTEUR. 2017.
- [5] Richter, A.: Kälte- u. Klimatechnik. [Online] <https://www.kaelte-richter.de/referenzen/sonderanlagenbau/krankuehlung/>.
- [6] FrigorTec GmbH. [Online] <https://www.frigortec.com/mediathek/pdf/cranefrigor-broschure-deutsch.pdf>.

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

LAKOS-Tech

**DMS-Kraftsensoren als Lastkollektivspeicher.
In Kombination von funktionaler Sicherheit gemäß
SIL3|PLe und IO-Link-Kommunikation.
Die Retrofit-Lösung für Krananlagen.**

Matthias Müller



Matthias Müller
Müller Industrie-Elektronik GmbH
Justus-von-Liebig-Straße 24
31535 Neustadt am Rübenberge

LAKOS-Tech

DMS-Kraftsensoren als Lastkollektivspeicher. In Kombination von funktionaler Sicherheit gemäß SIL3/PLe und IO-Link-Kommunikation. Die Retrofit-Lösung für Krananlagen.

1 Innovation durch Kombination – Lastkollektivspeicher + funktionale Sicherheit + IO-Link zu Industrie 4.0

Das Lastkollektiv, definiert gemäß der FEM-Richtlinien 9.755 und 9.511 als „Maßnahme zum Erreichen sicherer Betriebsperioden von motorisch angetriebenen Serienhubwerken“, ist entfernt vergleichbar der Wartungs- und Inspektionsintervalle bei Kraftfahrzeugen (Bild 1).

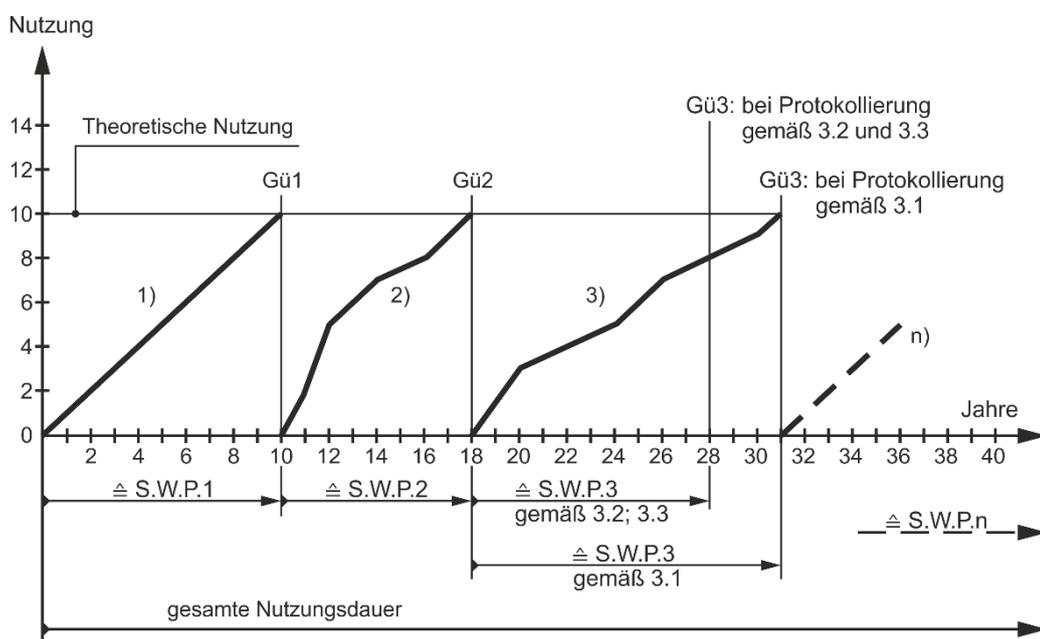


Bild 1: Lastkollektiv gemäß FEM-Richtlinien [1]

Aufsummiert werden die Menge der Belastungen (gehobene Lasten) über einen definierten Zeitraum. Kommt es zeitunabhängig zu einer Über- oder Unterschreitung der Gesamtbelastung, löst dies, abweichend vom vorgegebenen Prüfintervall, eine vorgezogene oder entsprechend verzögerte sicherheitstechnische Inspektion aus.

1.1 Innovationsimpuls

Innovationsauslöser für LAKOS-Tech war, die Kombination aus Lastkollektivspeicher und Überlast-Messsystem hochsicher und IO-Link fähig zu machen. Mit allen Vorzügen, die eine IO-Link IODD abbildet und die nötigen Informationen für Industrie 4.0 Anwendungen liefert: digitales Monitoring, mobile Fernauswertung und Überprüfung relevanter Prozess- und Hubwerte von Krananlagen.

1.2 Wirkweise

Bei LAKOS-Tech werden Standard DMS-Kraftsensoren mit doppeltem Ausgang, also 2 unabhängigen Kanälen, kombiniert ausgewertet, 1 x Sicherheit, 1 x Dateninformationen. Die Sicherheits-Relevanz wird mittels dem gemäß SIL3|PLe vom TÜV Rheinland zertifizierten <SafetyMessModule> vom Typ SMM und der <Sicherheitssteuerung> Typ SCU-DR gewährleistet. Die Belastungsanalyse und eine resultierende Restlebensdaueranzeige werden wie noch weitere Analysefunktionen über das IO-Link-Daten-Monitoring dargestellt (Bild 2).

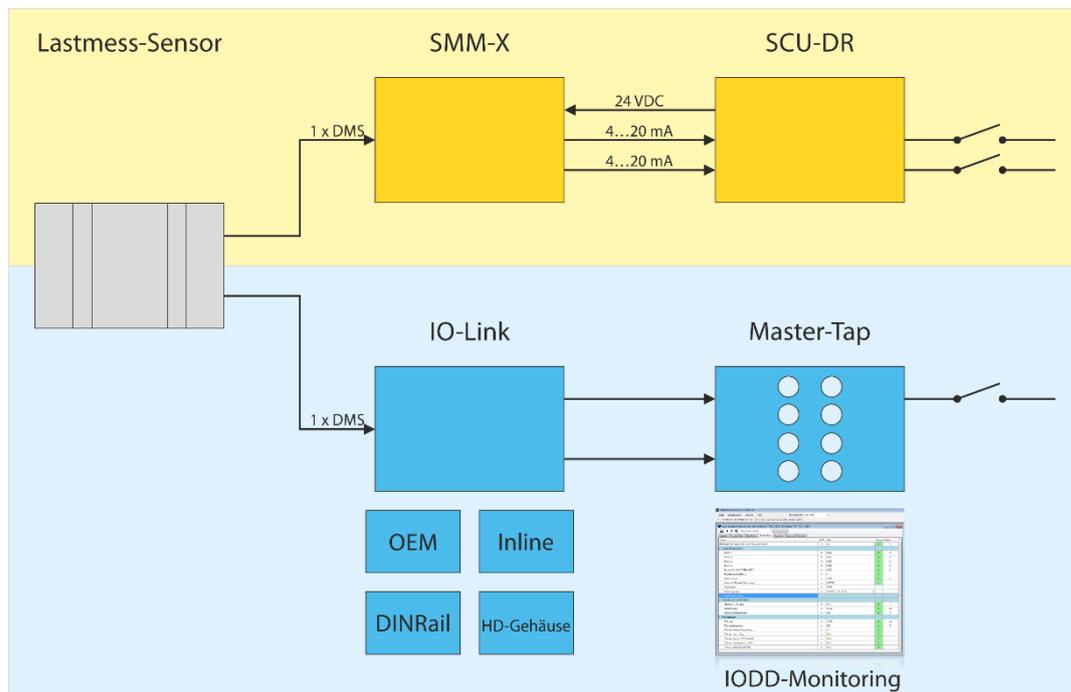


Bild 2: Wirkweise LAKOS-Tech

1.3 Verfügbarkeit

Realisierbar mit allen DMS Last-/Kraftmess-Sensoren mit doppeltem Ausgang, ist die Entwicklung der LAKOS-Technologie an Lastmessbolzen mit adaptierter <Universal-Kraftmesszelle IO-Link> vom Typ MULC-IO im ersten Schritt abgeschlossen und erfolgreich am Markt eingeführt (Bild 3).

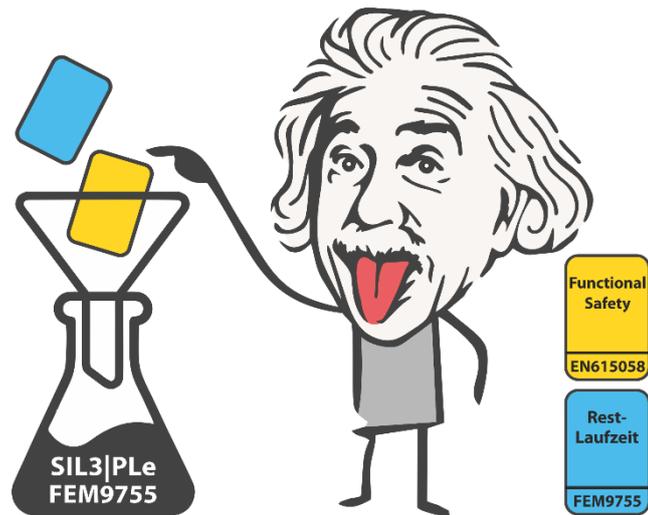


Bild 3: Kombination von funktionaler Sicherheit und IO-Link-Kommunikation

Quellenverzeichnis:

- [1] Grafik: FEM9.755_Order_426352. Firmenlizenz erteilt für Müller Industrie-Elektronik GmbH Bestellung 426352. Sekretariat der FEM Sektion IX, c/o VDMA, Fachgemeinschaft Fördertechnik, 60498 Frankfurt
- [2] ...

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Crane Assembly and Service Processes meet Virtual Reality

Kranmontage- und Serviceprozesse
treffen auf die Virtuelle Realität

Andreas Weigel

Louisa Sauter



Andreas Weigel (Referent)
VETTER Krantechnik GmbH
Kalteiche-Ring 22
35708 Haiger

Crane assembly and service processes meet VR

When crane assembly and service processes can be experienced in virtual reality (VR), completely new perspectives on these processes emerge. But before these mechanisms of VR take effect, well thought-out (IT) governance is required. Fundamentals such as hybrid business models and organizational frameworks must also be considered. To this end, interviews were conducted with 12 employees from two German medium-sized organizations. This enabled insights to be gained into which prerequisites are helpful for the successful implementation of assembly and maintenance processes in VR.

1 Introduction

Working in hybrid value chains has a strong influence on the business activities of German organizations [1]. The increasing complexity of our economy, accelerated by continuous change and technological progress, poses unprecedented challenges for market players [2, 3]. Within hybrid value chains, product-related services are often a central element. These include assembly, maintenance work, inspections, and the repair of machines and industrial plants. In our case, customer-specific requirements for highly customized crane solutions can often no longer be met by manufacturers alone. In addition, today's cranes have a high degree of specialization, which can only be offered in cooperation between the players within the entire value chain. If actors are left out of this work, the risk potential often increases. For example, for the new development of a crane, at least the participation of the manufacturer (here: VETTER Krantechnik) and the service provider (here: VETTER Kranservice) is required in order to develop viable products against the background of statics, feasibility, and assembly opportunities. If one partner is not involved (e.g., service provider), safety cannot be ensured when assembling the crane. Nevertheless, the production of tangible goods and the provision of intangible services therefore often take place within the boundaries of the organization. Work processes outside the organization's value chain are rarely known and integrated into the organization's value chain to a limited extent. The innovation potential (technical and social) can therefore not be fully exploited.

The assembly and maintenance of cranes are processes that are often associated with potential hazards [4] that include for instance great heights of crane installations or uncomfortable weather conditions associated with outdoor maintenance [5]. It is precisely these hazards that make it difficult to fully experience the processes on and around a crane if one is not the service technician [6]. However, the insights gained during assembly and service processes are necessary to already improve crane assembly conditions and maintenance during the design phase. Although maintenance processes are evaluated in the respective service organization, feedback and evaluation of the actual design based on the experience of the service employees often do not take place. If designers are enabled to evaluate the designs in terms of assembly and maintenance, this can result in improved conditions for maintenance and repair. This evaluation is often difficult to achieve because cranes are maintained e.g., at a very high altitude or under other dangerous conditions, so the service employees must be specially trained. Since the situation is not experiential, designers have limited ability to put themselves in the shoes of the service employees. Furthermore, the real wear and failure behavior of components and their maintenance is only known in this level of detail by the service employees. A possible answer to this

problem could be that primarily employees not involved in maintenance processes get to experience this.

Virtual Reality (VR) offers the opportunity to experience service processes virtually and to actively work on them [7]. There is already research on how VR should be designed [6, 8], but how should VR simulations be embedded in organizational processes? Previous literature has not conclusively examined this, so this study addresses the following research question: *What organizational requirements do crane assembly and service processes need to perform in VR simulations?*

2 Related Work

Hybrid business models and the associated changes in the organization of work pose major challenges for organizations [1]. The technological development discussed under the term Industry 4.0 [9] is essential for this. Current solution approaches are aimed at improving the integration of all value creation partners. Hybrid value creation can also be understood as an innovation strategy [10]. Existing approaches to this include the collaborative development of business models and processes [11]. However, it can be observed that physical products and services are usually developed separately. That is, services are only inserted "alongside the product" into the existing value creation process of organizations [1]. However, a completely integrated view of hybrid products is still rarely observed in research.

(IT) governance is the management system through which an organization's (IT) portfolio is directed and controlled [12] and is concerned with the centralization and decentralization of management decisions about business applications: in the case of this research of IT architectures and technology components. IT governance mechanisms, including decision-making structures, formal processes, and communication approaches, can positively influence business performance. This relationship is largely determined by the strategic direction of IT [13]. Effective IT governance that includes top management commitment increases the strategic controllability of IT, contributing to IT's effectiveness and impact on the business. [14]. It is often assumed that top management is a key factor in successful IT governance [15, 16]. CEOs, therefore, have a major impact on the effectiveness of IT in the organization and should actively take supportive actions to ensure that strategic visions are internalized. In addition, alignment between organizations (e.g., via IT) plays a role as an intermediary between IT governance and business performance.

Five constructs were derived from the literature to further specify IT governance. These constructs are strategic alignment, value creation, risk management, resource management, and performance measurement [17, 18]. This is accompanied by the concretization into an IT artifact, i.e., the definition of a system or a technical basis and its impact [19, 20]. In hybrid business models, the challenge is that each organization focuses only on concretizing individual parts. There is then few to no opportunity to discuss relative priorities holistically, and there is a risk that the activities of others will be ignored, glossed over, or not appreciated in their complexity [21]. VR simulation of the process can address these shortcomings [7].

With the development of head-mounted displays (HMD), rapid technological progress in recent years has enabled new ways to enter and experience VR [22]. Current trends and solutions are already demonstrating the possibilities that VR offers. In the context of collaborative work, learning, and perspective taking, VR offers great potential [6, 7, 23]. VR provides users with a three-dimensional experience in a virtual space. Within VR, objects as well as processes can be represented with a very high level of detail. In addition, a closed VR space allows for a very focused interactive experience [23]. Thus, VR technologies are ideally suited for the described simulation of service processes.

3 Method

A group of organizations was considered, consisting of a production organization and a service organization that are locally separated, but are connected via a hybrid value chain. A total of six runs of a VR experiment were conducted: four runs with mixed pairs (production and service) and two runs with one same pair each (production or service) to validate our results (Table 1).

Table 1: Overview of the participants

No.	Organization	Age	Gender	Position
1-1	Manufacturer	26	male	Design / Development
1-2	Service provider	19	male	Trainee
2-1	Manufacturer	34	male	Chief of IT
2-2	Service provider	23	male	Trainee
3-1	Manufacturer	32	male	Design / Development
3-2	Manufacturer	29	female	Sales
4-1	Service provider	25	male	Service technician
4-2	Manufacturer	29	male	IT
5-1	Service provider	51	male	CEO
5-2	Manufacturer	25	male	Design / Development
6-1	Service provider	26	male	Trainee
6-2	Service provider	27	female	Trainee

In each of these six experimental setups, the same scenario, the assembly process of a crane in VR had to be performed by the two participants. Physically, the participants were in two different rooms. Participants were selected regardless of age and gender, but it is necessary to say that all participants were from a limited group of employees from the two organizations under research. During the matching process, it was exclusively considered from which organizations the participants came. In VR, each participant was represented as a virtual human avatar so that participants could follow each other's movements and actions. In addition, communication between participants was enabled through the HMD via voice-over-IP. The entire assembly process in VR was performed collaboratively by two

people at a time. Before the experiment, each participant was asked individually about their prior knowledge and experience with the process. Exemplary questions were: "What experience do you have with cranes in general?" and "Have you ever participated in a crane assembly?". This was followed by the experiment in which the participants had to perform an assembly in the multi-user mode of a VR industrial environment (Figure 1).



Figure 1: Screenshot of the experiment

After the collaborative VR experiment, which lasted an average of 60 minutes, each participant was interviewed individually. For this, we used questions such as "To what extent did you experience the process of assembling the crane?", "What role can VR play in your daily work in the future?" and "What is the relationship between real assembly and assembly in VR?". For this purpose, we used a semi-structured guide with open-ended questions [24]. This allowed for the widest possible range of responses and allowed participants to speak freely about their experiences. Furthermore, Sarker's guide to qualitative research was applied [25]. This means that the first version of the questionnaire was evaluated after one experiment. Minor adjustments were then made to the questionnaire based on this evaluation. After a total of twelve interviews, we concluded that there were few opportunities for new insights in this area.

MAXQDA software was used to analyze the interview data. An open coding method was used to analyze the qualitative data. Ultimately, the coding methods included open coding, axial coding, and selective coding [26]. In the first step, two researchers independently open coded the data. This was followed by axial coding, in which individual findings were compared and grouped to identify relevant aspects of the research [27]. The axial codes found were then grouped by themes. In the event of disagreement between researchers, a researcher who was not involved in the coding process was brought in for discussion and a common axial code was determined.

4 Findings

Overall, the interviews showed that there is a high level of motivation for strategic alignment along the value chain on both organizational sides. Participants of the manufacturer organization were asked about their prior knowledge of the simulated service processes. The basic assumption here was that they had little prior practical experience with actual service processes. This research was able to confirm in all interviews with participants from the manufacturer organization that there is only a rudimentary understanding of service processes (assembly and maintenance) on their products. Many do have individual steps in mind or a rough idea of the service processes. Especially when it comes to challenges during the service processes, they lack a detailed idea of the processes to be able to consider them prospectively in their crane design. In order to establish a **strategic alignment** between the two organizations, the participants therefore see potential in the use of VR for their work.

I have no idea how to assemble a crane, just a rudimentary basic understanding, but I don't have all the steps in my head and certainly not what the components look like and what sequence to follow. Interview 4-2

I can imagine that you get more of a feel for the assembly process and how it all works so that you simply experience it properly again. Most of our design engineers haven't been on an assembly line for ages or so. So, you just get to see it all again. Interview 1-1

Participants described that the VR simulation created an awareness of service processes for them. Even though the VR simulation was simplified in some places compared to reality and the waiting times (e.g., when the mortar had to dry) were shortened, they were aware that reality is different. The VR simulation made use of alternative solutions, e.g., to represent heavy loads or a long waiting time. The participants perceived this and, despite the simplified representation, understood the actual challenges that can arise during a service process in reality. By simplifying the mapping of individual work processes (such as fastening the composite anchor plate), it was achieved that the user does not get bored during the VR scenario, which, among other things, should ensure the sustainable integration and use of the VR. In VR development, the simplified representation and use of alternative design solutions (e.g., gravity glove) have the advantage that a more lightweight solution makes development and adaptation more efficient in the context of **resource management**. Many scenarios can be mapped in VR without having to re-adapt the basic functions and design solutions (e.g., bridging waiting times and displaying heavy loads) without compromising the quality of the mapped VR scenarios.

Yes, I thought it was good, because I personally have never been to an assembly [...] and I think something like that helps to understand it better. Apart from the time frame, how long something like that takes. But otherwise, the individual steps, already help you to have a better understanding of it. Interview 3-2

For me, clearly, I have no idea how to build a crane, even though I've already done it a few times. But I don't have all the steps in my head, and I certainly don't know what the components are called and where they belong. Interview 4-2

As part of **risk management**, it must also be ensured that no risk is created by the simplified representation of service processes in the VR scenarios. This could, for example, be that the employees of the manufacturer organization get a simplified picture of the service processes. In the interviews, however, it became clear that despite the simplified representation in VR, the participants are aware that the service processes in reality take much longer and that the conditions at the service side of the crane can vary and, therefore, are constantly associated with new challenges.

So, when I also think about the fact that they don't have such a cool glove, then I see the whole thing quite differently. So, it's still simplified. I noticed that there are a lot of steps. It's really subdivided into individual steps, but we only ever screwed in one screw, for example. These are things where I think to myself, what I've done now was already a lot, but they really have to do it again in duplicate and triplicate and also have to wait until this mortar has dried and so on. In any case, I now have more understanding of what they do and how they do it, and especially for the fact that it is a bit more complex than that. Interview 1-2

There are of course things that only occur in reality. When the colleague is drilling the hole on the composite anchor plate. Then he notices when he is drilling, when he is exerting force, he notices when he somehow encounters a flaw, when he encounters any cavities, and so on. This is very, very important, because if someone encounters a cavity, he cannot place the crane there. Interview 5-1

When asked if the simulation of service processes in VR could be profitable or helpful for their daily work, whether from a service or manufacturer perspective, the participants responded with great hope for the technology. Possible areas of application and ways to potentially improve existing service and design processes were addressed. Overall, regarding the **value delivery** of the VR solution, e.g., the simplicity associated with using VR for evaluation purposes during design work was described. VR use was compared with the traditional process, where only after completion (or in the case of innovations by building a prototype) it is possible to experience the design in realistic proportions in the hall environment.

I expect from VR that I can simply check things in VR during construction. That's not possible now, because it is finished at some point and then produced, and then you assemble it once in reality. In VR, you can just look at how these two parts can be put together. That is much easier to understand in the design. Of course, you notice things like that when you're building a prototype, and then you're guaranteed to change something about it, because then you notice things when you're assembling it. But with VR, it would be possible to try these things out quickly and flexibly in advance. Interview 1-1

When colleagues from the manufacturer see our processes, this can be used positively in many ways. Firstly, of course, in development, you can look at a few things as a

developer to see: Okay, the process is like this now. I need to do this and that, but if I design it differently, then I get better at it or realize it's the wrong sequence. On the other hand, if you're sitting in an office somewhere and you don't have a lot to do with assembly, I think you can get a lot of understanding of what we're doing. Interview 4-1

As a designer, you construct something and sometimes you get a fright when you come down to the hall and see the things, that happens often. Interview 1-1

Participants additionally mentioned added value in the process of onboarding new service employees. The VR demonstrator can be used to familiarize with the assembly and maintenance process in a safe room, either alone or together with experienced service employees in a multiuser mode. Mistakes can be made, and alternative ways can be tested without incurring costs for the organization. New service employees gain initial insights into the service processes and are made aware of frequently occurring challenges before they perform on the first proper maintenance or assembly. They can evaluate their work reflectively in the VR environment which provides them an expanded view of challenges occurring on the job. Accordingly, they are already familiar with some challenges and know what to pay attention to.

I think it would certainly be interesting for a manufacturer employee to experience the service processes, especially if there are innovations that can easily be experienced in VR. It would also be a good way for my new service colleagues to learn about the processes. It would also be interesting for the design engineer or the salesman. Interview 4-1

In general. So, I think that would certainly be interesting for a service technician, especially if there are any innovations and you would implement them there, or just for learning, that would certainly also be a nice thing. Interview 4-2

For organizations, the key is how performance can ultimately be measured using VR. Two key perspectives can be used for **performance measurement**: First, the use of the VR application in crane design must add value, and second, service processes must improve sustainably. Some interviews showed that the crane designers on the side of the manufacturer organization not only see potential in the use but can well imagine the use of VR technology as part of their design work and especially as an enlargement of the perspective on downstream service processes. It can help them consider service process challenges extensively during the design process, which subsequently results in more efficient crane assembly and maintenance processes. On the service side, performance measurements are also mentioned concerning assembly and maintenance processes. The service employees are made aware of possible challenges through the VR simulation and are provided with a space for learning. The use of VR in multiuser mode also enables a direct exchange between design engineers and service employees. They have the opportunity to view crane designs together and talk about possible challenges. Likewise, alternative design solutions can be discussed through input from the service side and trial assembly can be carried out.

[...] you will probably have a different understanding of it if you only see it on a CAD drawing than if you are standing directly in front of one or have at least seen it in VR. And

this then continues via training, via simple understanding among employees, I believe, because it is always interesting to get a taste of someone else's working world and then you have the parts where it is really interlocked, i.e. assuming there is something that is difficult for maintenance and you can then communicate and say 'Okay, for the next edition of the crane, maybe we'll move the fuse box to the other side so that you can get to it better. Interview 6-2

I can imagine getting into VR with the service employee and taking a look at the whole thing. [...] And then you can simply explain some of the details to them or they can try things out where they might have doubts in advance and could dispel those doubts or you could simply show them with the installer, that's how I imagined it, he's trying it out in VR right now and can say, yes, I can imagine it like that or no, I can't imagine it like that. Interview 1-1

The following table summarizes the five dimensions identified as requirements for the successful implementation of VR assembly and maintenance processes.

Table 2: IT Governance requirements for crane assembly and service processes in VR

Dimensions	Example in VR
Strategic Alignment	A common objective to optimize the hybrid value chain through VR simulation must be in place.
Resource Management	The investment in VR, on the one hand, the development of the software, on the other hand, the time then to be spent in VR, must contribute to optimization.
Risk Management	Processes and associated risks must be mapped transparently through VR, including the associated risk of oversimplification in VR.
Value Delivery	The VR simulation must promise added value for the organization or the hybrid value chain.
Performance Measurement	The VR simulation must be followed by a measurable optimization of the real work processes.

5 Discussion

The influence of hybrid value chains on the business activities of German organizations could be underlined in this research [1]. The application example addressed in this paper offers a way to see how hybrid value creation can be understood and used as an innovation strategy [10]. In this context, VR simulations to cope with the complexity of our processes have been identified as a proven option [7]. The use of VR thus provides a strategy for a complete view of hybrid products.

To answer our RQ (*What organizational requirements do crane assembly and service processes need to perform in VR simulations?*) we enriched the IT governance requirements identified in the literature (*strategic alignment, resource management, risk*

management, value delivery, and performance measurement) with examples related to VR crane assembly and service processes [17, 18]. The examples given (Table 2) could be derived from the interview results and thus provide direct insight from experiments conducted in the organizational practice. The aim was to provide a strategic approach for organizations that are connected via a value chain to consider as prerequisites for a successful integration and sustainable use of VR technology. A particularly fundamental prerequisite is the common strategic objective of the organizations. An important element is the concretization of VR technology as a commonly used IT artifact, which is seen on both sides as suitable and useful for promoting strategic alignment along the value chain [19, 20]. In both organizations, it is therefore fundamentally important that there is a consensus on the objectives of the use of VR technology and why these objectives create a common added value (value delivery) for the organizations along the value chain. Efficient management of resources relates to both the development of the VR simulation and the time that employees ultimately spend in VR. The task for IT governance is to define and specify both in terms of the agreed objectives.

The interviews also identified risks (risk management) associated with the VR simulation. However, these can be minimized by presenting them transparently at the beginning in order to take them sufficiently into account during development and integration. In practice, this means that the priorities of both organizations must be adequately considered, discussed, and prioritized for the design of the VR simulation [7, 21]. VR simulation for the representation of crane assembly and service processes means to a certain degree always visualizing an abstraction of reality. This simultaneously creates the risk of simplification by the user. So, when employees of the manufacturing organization experience the service processes in VR, they have to be aware that the VR simulation is an abstraction and simplification of reality (unrealistic assembly times, simplified representation for lifting heavy weights, etc.). Therefore, it is important for the users to be aware of the actual aim of the VR use, so that there arise no false assumptions about the work of the service employees.

6 Limitations and Outlook

This research provides interesting qualitative results in the field of IT governance research related to VR. However, this research has its limitations. Other aspects will also have an impact on IT governance concerning hybrid value chains. However, the objective of this research was to develop an approach that can be easily applied in practice.

The strengths of this research are the identification of IT governance examples related to VR that are reflected in the strategic alignment of organizations in a hybrid value chain. These findings are of interest to practitioners and researchers alike. As with any qualitative evaluation, the interviews give us a sense of the facts and allow us to develop theory. The relationship between IT governance, in terms of the five constructs, and VR support could be demonstrated. In theory, virtual realities provide the opportunity to not only view processes in perspective but also to execute them virtually. The adaptation of value creation across organizational boundaries was not considered in detail in this context, but promising starting points were identified.

Acknowledgement

I would like to acknowledge that this research is part of the aSTAR research project. The project was funded by the Federal Ministry of Education and Research of the Federal Republic of Germany (BMBF, funding code 02L18B010), the European Social Fund and the European Union.

References:

- [1] Leimeister, J. M.; C. Glauner, C.: Hybride Produkte—Einordnung und Herausforderungen für die Wirtschaftsinformatik. In: *Wirtschaftsinformatik* 50 (3), 2008, pp. 248–251
- [2] Kagermann, H.: Change through digitization—Value creation in the age of Industry 4.0. In: *Management of permanent change*. Springer, 2015, 23–45
- [3] ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in engineering design and manufacturing. In: *CIRP annals* 61 (2), 2012, pp. 793–814
- [4] Neitzel, R. L.; Seixas, N. S.; Ren, K. K.: A review of crane safety in the construction industry. In: *Applied occupational and environmental hygiene* 16 (12), 2001, pp. 1106–1117
- [5] Weigel, A.; Baumgart, T.; Zeuge, A. et al.: Competence transfer in virtual realities: Can virtual reality bring products and services together?, In: *WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation* (forthcoming), 2022
- [6] Weigel, A.; Zeuge, A.; Baumgart, T. L.; Niehaves, B.: *Bittersweet Virtual Reality Collaboration: Necessary and Sufficient Conditions*, 2021
- [7] Weigel, A.; Hoffmann, J.; Klesel, M.: Can Virtual Realities reduce the Gap between Organizations? Insights from a Case Study on the Potential of VR-Supported Perspective Taking. In: *Proceedings of the 28th European Conference on Information Systems*, 2020
- [8] Weigel, A.: A design journey: Towards a virtual reality simulation and training application. In: *Proceedings on Digitalization at the Institute for Advanced Study of the University of Siegen*, 2020
- [9] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft-Industrie 4.0*, Fraunhofer Verlag Stuttgart, 2013
- [10] Möslein, K. M.; Kölling, M.: Interaktive hybride Wertschöpfung als Innovationsstrategie. In: *Innovationsfähigkeit in einer modernen Arbeitswelt, Beiträge der Tagung des BMBF, Frankfurt, 2007*, pp. 195–202

- [11] Bullinger, H.-J.; Neuhuttler, J.; Nagele, R.; Woyke, I.: Collaborative development of business models in smart service ecosystems. In: 2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), IEEE 2017, 1–9
- [12] Peterson, R.: Crafting information technology governance. In: Information System Management 32 (6), 2004, pp. 1–24
- [13] Wu, S.P.-J.; Straub, D. W.; Liang, T.-P.: How information technology governance mechanisms and strategic alignment influence organizational performance. In: MIS quarterly 39 (2), 2015, pp. 497–518
- [14] Buchwald, A.; Urbach, N.; Ahlemann, F.: Business value through controlled IT: Toward an integrated model of IT governance success and its impact. In: Journal of Information Technology 29 (2), 2014, pp. 128–147
- [15] Weill, P.; Ross, J. W.: IT governance: How top performers manage IT decision rights for superior results. Harvard Business Press, 2004
- [16] Liang, T.-P.; Chiu, Y.-C.; Wu, S. P.; Straub, D.: The Impact of IT Governance on Organizational Performance. In: Proceedings of the 17th American Conference on Information Systems, 2011
- [17] Yaokumah, W.; Brown, S.: An empirical examination of the relationship between information security/business strategic alignment and information security governance domain areas. In: Journal of Law and Governance 9 (2), 2014
- [18] Wilkin, C. L.; Chenhall, R. H.: A review of IT governance: A taxonomy to inform accounting information systems. In: Journal of Information Systems 24 (2), 2010, pp. 107–146
- [19] Blackwell, L.; Ellison, N., Elliott-Deflo, N.; Schwartz, R.: Harassment in social virtual reality: Challenges for platform governance. In: Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction 3 (CSCW), 2019, pp. 1–25
- [20] McCloy, R.; Stone, R.: Virtual reality in surgery. In: Bmj 323 (7318), 2001, pp. 912–915
- [21] Boland Jr, R. J.; Tenkasi. R. V.: Perspective making and perspective taking in communities of knowing. In: Organization science 6 (4), 1995, pp. 350–372
- [22] Gleasure, R.; Feller, J.: Emerging technologies and the democratisation of financial services: A metatriangulation of crowdfunding research. In: Information and Organization 26 (4), 2016, pp. 101–115
- [23] Martín-Gutiérrez, J.; Mora, C. E.; Añorbe-Díaz, B.; González-Marrero, A.: Virtual technologies trends in education. In: EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education 13 (2), 2017, pp. 469–486
- [24] Weber, R. P.: Basic content analysis. Sage, 1990

- [25] Sarker, S.; Xiao, X.; Beaulieu, T.: Qualitative Studies in Information Systems: A Critical Review and Some Guiding Principles. In: Management Information System Quarterly 37 4), 2013, pp. iii–xviii
- [26] Glaser, B. G.; Strauss, A. L.: Discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research. Routledge, 2017
- [27] Corbin, J.; Strauss, A.: Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory. Sage publications, 2014

www.ilm.ovgu.de/kranfachtagung

Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

39106 Magdeburg
Universitätsplatz 2
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 58604
Telefax: 0391 - 67 42646
ilm@ovgu.de

ISBN-13: 978-3-948749-11-8