

Design eines Robotiksystems zur Entleerung von Seecontainern

Design of a robotic system for emptying sea containers

Nils Hoppe¹
Jasper Wilhelm²
Christoph Petzoldt²
Rafael Mortensen Ernits²
Lennart Rolfs²
Thies Beinke²
Michael Freitag^{1,2}

¹ Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen, Deutschland

² BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen, Deutschland

Die Entladung von Seecontainern erfolgt in der Regel manuell. Die körperlich anstrengende und monotone Arbeit führt hierbei zu einer hohen Mitarbeiterfluktuation. Autonome Entladesysteme konnten sich zur Reduktion dieses Unsicherheitsfaktors bisher jedoch nicht etablieren. Der Beitrag geht auf die Rahmenbedingungen und den Prozess der Containerentladung ein. Dazu werden grundlegende Anforderungen beschrieben. Darauf basierend wird ein alternativer Ansatz für die automatisierte Entladung von Seecontainern vorgestellt, wobei einige neu entwickelte Subsysteme detailliert beschrieben werden.

[Schlüsselwörter: Seecontainerentladung, Semi-autonomes Entladesystem, Konstruktion, Produktentwicklung]

Unloading of sea containers is usually done manually. The physically strenuous and monotonous work leads to a high employee turnover. Autonomous unloading systems have not yet been able to establish to reduce this uncertainty factor. This article deals with the general conditions and the process of container unloading. Therefore basic requirements are described and an alternative approach for the automated unloading of sea containers is presented, whereby some of the newly developed sub-systems are described in more detail.

[Keywords: sea container unloading, semi-autonomous unloading system, design, product development]

1 Einleitung

Im großvolumigen Versandhandel werden die Prozesse innerhalb der Lieferkette zwischen Hersteller und Endkunde von den Händlern häufig an Kontraktlogistikdienstleister übertragen. Die angebotene Ware wird dabei direkt an den Dienstleister geliefert, der die Lagerverwaltung übernimmt, die Artikel bei Bestellung kommissioniert

und an den Kunden versendet. Die Anlieferung der einzelnen Artikel erfolgt häufig gebündelt in identischen Umverpackungen, die zu mehreren hundert in Seecontainer gepackt werden. Die Entladung dieser Container im Wareneingang erfolgt in der Regel manuell [UNC19]. Da diese Arbeit körperlich sehr fordernd und monoton ist und in der Regel nicht in klimatisierten Hallen durchgeführt wird, herrscht in der Entlademannschaft eine große Mitarbeiterfluktuation, was in der Prozessplanung einen großen Unsicherheitsfaktor darstellt [SVM16]. Systeme, die die Entladung autonom, also vollautomatisch durchführen, um die Prozessqualität und Sicherheit zu verbessern, konnten sich am Markt bisher jedoch noch nicht etablieren [WBF20].

Der Beitrag beschreibt einen neuen Ansatz für die automatisierte Entladung von Seecontainern und stellt ein daraus abgeleitetes semi-autonomes Entladesystem vor, das im Rahmen des Forschungsprojekts IRiS (Interaktives Robotiksystem zur Entleerung von Seecontainern) entwickelt wurde. Der semi-autonome Ansatz dieses Systems ermöglicht dem Bediener jederzeit in den Entladeprozess eingreifen zu können, um das System in komplexen Situationen zu unterstützen.

Aufbauend auf der Steuerungsarchitektur des Systems und dem Ansatz der Interaktion zwischen Bediener und System über einen digitalen Zwilling [WBF20][PWH20] wird in diesem Beitrag die Hardware des Systems vorgestellt. Neben dem Gesamtaufbau des Systems wird dabei insbesondere auf die Auslegung und Funktionsweise der Subsysteme mit Fokus auf der Kinematik eingegangen.

Im Beitrag werden zunächst die Randbedingungen in der containerisierten Warenanlieferung, die Situation im Container und die Umgebungsbedingungen im Wareneingang betrachtet. Anschließend wird der manuelle Entladeprozess und die Leistungsdaten (Packstücke pro Stunde) der manuellen Entladung analysiert. Auf dieser

Grundlage erfolgt die Definition der wesentlichen Anforderungen an ein automatisches Entladesystem. Nach dieser Prozessanalyse wird der Stand der Technik betrachtet und die am Markt befindlichen Systeme zur automatischen Containerentladung hinsichtlich ihrer Eignung für den beschriebenen Anwendungsfall diskutiert. Anschließend wird das neu entwickelte semi-autonome Entladesystem vorgestellt.

Dabei wird zunächst auf den Prozess eingegangen, den das System auf Grundlage der Anforderungen durchlaufen soll. Dabei wird der manuelle Entladeprozess vom Menschen auf das Entladesystem übertragen und durch entsprechende Aktuatoren adaptiert. Bei der Beschreibung der konstruktiven Umsetzung des Systems werden zunächst die übergeordneten Funktionsgruppen und ihr Zusammenspiel im Entladeprozess thematisiert. Anschließend werden die einzelnen Komponenten detaillierter erläutert und insbesondere die Auslegung der Kinematik hinsichtlich der Entladeleistung beschrieben. Abschließend wird ein Ausblick auf die ausstehende Evaluation des Systems gegeben und Möglichkeiten der Adaption an andere Entladeszenarien diskutiert.

2 Ausgangssituation und Anforderungen

Für die Definition der Systemanforderungen wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, in deren Rahmen der manuelle Entladeprozess, die Bedingungen im Container sowie die Randbedingungen der Einsatzumgebung betrachtet wurden. Diese werden nachfolgend vorgestellt.

2.1 Umgebungsbedingungen

Die Anlieferung der Container geschieht in der Regel über mehrere parallel angeordnete Ladeluken an der Außenseite der Lagerhalle, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind. Diese können als Kopf- oder Sägezahnrampe ausgeführt sein und erlauben die Heckseitige Be- oder Entladung davor abgestellter Container.

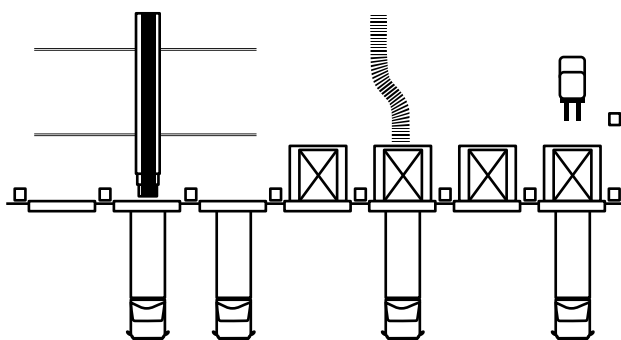


Abbildung 1. Einrichtungen bei der heckseitigen Entladung von Containern und Aufliegern am Wareneingang. Festverbauter, verfahrbarer Teleskopgurtförderer (links), flexibler Scherenrollenbahn (Mitte) und Gabelstapler für Paletten.

Ist der Höhenunterschied zwischen Hofffläche und Hallenboden zum ebenerdigen Entladen der Container nicht ausreichend, können Tiefenrampen eingesetzt werden. Zum Befahren des Containers wird die Distanz und Höhen-differenz zwischen Hallen- und Containerboden über eine Überladebrücke ausgeglichen. [Mar06]

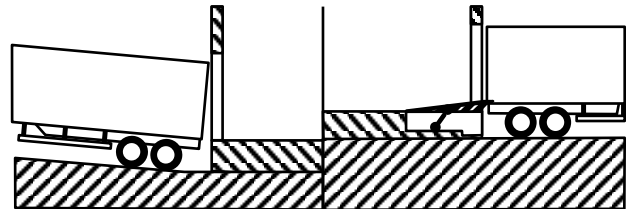


Abbildung 2. Winkerversatz bei Tiefenrampe (links) oder durch Verwendung einer Überladebrücke (rechts)

Wie einleitend beschrieben erfolgt die Anlieferung der Waren in Seecontainern. Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen 40-Fuß-Container. Im Inneren weist dieser eine Länge von 12 m und eine Breite von 2,33 m auf. Die Innenhöhe der Container liegt bei 2,39 m in der Standardausführung bzw. bei 2,69 m in der dargestellten High-Cube-Variante. [Sma]

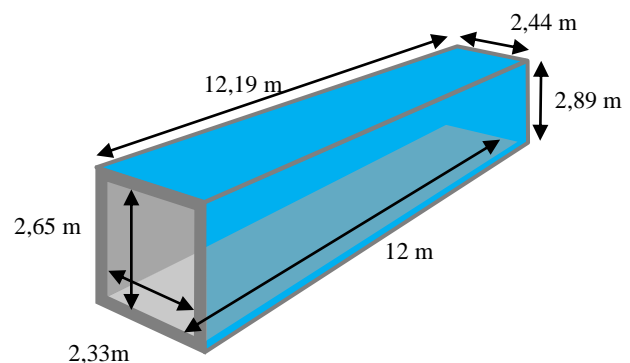


Abbildung 3. Maße eines 40-Fuß-High-Cube Containers. Angelehnt an [Sma].

Die geschlossene Bauweise der Container hat bei der Entladung zwei Nachteile. Zum einen müssen die für die Entladung eingesetzten Mitarbeiter unabhängig von der Tageszeit künstliche Beleuchtung einsetzen um in den Containern überhaupt arbeiten zu können. Zum anderen wirkt sie sich auf die Temperaturen im Containerinneren aus, in der die Entlademannschaft arbeiten muss.

Während die Temperaturen im Containerinneren im Winter nur unwesentlich über der Außentemperatur liegen, heizen sich diese im Sommer in der Sonne stark auf. Bei starker Sonneneinstrahlung kann es dabei zu einer Überhitzung von über 25°C zur Umgebungstemperatur kommen [Sch16]. Betrachtet man die historischen Wetterdaten in Abbildung 4, so zeigt sich, dass sich bereits an einem durchschnittlichen Julitag in Norddeutschland zur Mittagszeit bei einer Außentemperatur von knapp über 20 °C eine Containerinnentemperatur von über 45°C einstellen kann.

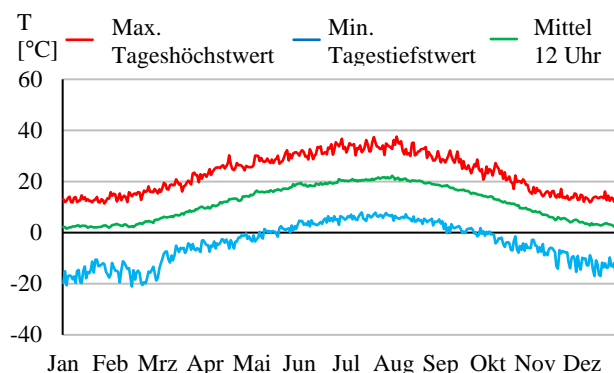


Abbildung 4. Minimale, maximale und durchschnittliche Tagestemperaturwerte im Zeitraum von 1949 bis 2019 nach Daten des [DWD]

2.2 Entladeprozess

Die Belastung der Arbeiter unter diesen klimatischen Bedingungen wird deutlich, wenn man sich den manuellen Entladeprozess und die zu entladenen Packstücke genauer anschaut. Die Prozessaufnahme wurde am Wareneingang eines Kontraktlogistikbieters durchgeführt. Dabei wurde neben den zu entladenen Paketen auch deren Anordnung im Container betrachtet und die einzelnen Prozessschritte aufgenommen. Außerdem wurde die Leistung (Pakete pro Stunde) der manuellen Entladung bestimmt.

Die Paketgrößen in verschiedenen Containern können stark variieren und liegen in den untersuchten Fällen zwischen 300 mm × 200 mm × 110 mm und 800 mm × 600 mm × 685 mm. Das Gewicht der Pakete am oberen Ende der Größenskala kann dabei bis zu 35 kg betragen und eine Reihe nebeneinanderliegender Pakete ein Gesamtgewicht von bis zu 150 kg aufweisen. Bei mehreren 100 bis mehreren 1.000 Packstücken pro Container und einem umzuschlagenden Gesamtgewicht von mehreren Tonnen ist die körperliche Belastung entsprechend hoch.

Obwohl zwischen den Containern eine große Varianz bezüglich der Paketgrößen herrscht, ist der Inhalt einzelner Container vergleichsweise homogen gepackt und die Anzahl unterschiedlicher Paketgrößen gering. Bei großen Stückzahlen eines Artikels kann der Container sogar sortenrein gepackt sein. Unterschiedliche Artikel und damit verschieden große Pakete werden in der Regel nacheinander in den Container geladen und eine Durchmischung findet beim Übergang zwischen den Artikeln in einer Lage statt. Ein Bild, das sich in einem Container finden kann, ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei der Ordnungsgrad in der Regel deutlich größer ist.

Zu sehen ist, dass sich durch das gleichmäßige Packmuster lange, unter mehreren Kartons verlaufende Kanten bilden, wobei sich einige sogar über die gesamte Containerbreite erstrecken. Durch Verwendung eines geeigneten Endeffektors ließe sich bei der automatisierten Entladung

dadurch in viel Fällen eine ganze Reihe von Paketen auf einmal entnehmen und der Prozess dadurch beschleunigen.



Abbildung 5. Packmuster einer Lage von Kartons in einem Standard-See-Container in Anlehnung an [PWH20]

In der Prozessaufnahme wurde festgestellt, dass sich die Arbeiter abhängig von der Paketgröße und dem vorliegenden Packmuster Lage für Lage von oben nach unten durch den Container arbeiten.

Um die Pakete in den oberen Reihen zu erreichen dient der meistens in der Höhe verstellbare Teleskopgurtförderer den Arbeitern häufig als Tritt, oder es werden vorherige Lagen nicht komplett bis zum Containerboden entladen und die verbleibenden Kartons als Stufen belassen. Dennoch kann es insbesondere bei den größeren, unhandlichen und schweren Paketen passieren, dass diese aus über 2,5 m herunterfallen.

Die Pakete können in der Regel ohne viel Kraftaufwand aus den Lagen gezogen werden. Es können aber auch Situationen auftreten, in denen die Pakete sehr dicht gepackt sind und beim Herausziehen verklebten. Versuche, bei denen die Paketreihen seitlich durch die Containerwände eingeklemmt wurden, haben gezeigt, dass das Herausziehen in diesem Fall nur in zwei Schritten, von innen nach außen möglich ist. Die benachbarten Pakete müssen dabei zunächst zurückgehalten werden um ein zusätzliches Verkeilen zu verhindern. Dabei wurde für Pakete mit den Maßen 370 mm × 280 mm × 600 mm und einem Gewicht von 36 kg eine Kraft von 220 N ermittelt. Kleinere Pakete (300 mm x 210 mm x 435 mm, 11,5 kg) konnten mit 150 N aus der geklemmten Lage gezogen werden.

Prozesstechnisch betrachtet führen die Arbeiter dabei folgende Aktionen aus:

1. Nächstes zu entnehmendes Paket *identifizieren*
2. Auf Pakethöhe *annähern*
3. Paket *greifen*
4. Paket *herausziehen*
5. Paket *ablegen*
6. Paket aus dem Container *befördern*

Während für den letzten Schritt des Beförderns der Pakete aus dem Container hinaus ein nachgeführter Teleskopgurtförderer oder eine Scherenrollenbahn verwendet wird, sind die vorherigen Schritte Handarbeit.

Auf diese Weise schafft ein Team aus zwei Mitarbeitern in einem Container im Mittel 419 Pakete pro Stunde zu entladen. Die Daten wurden über mehrere Tage erhoben und Stundenweise in Abbildung 6 zusammengefasst.

Wird die Durchschnittlichen Entladeleistung von 419 Paketen/h ohne Berücksichtigung der Pausen betrachtet, erhöht sich der Durchsatz auf 463 Pakete/h. Beschränkt man sich auf die Zeitfenster mit besonders hohen Durchsätzen (obere 10%), liegt die durchschnittliche Leistung bei 768 Pakete/h bzw. pausenbereinigt bei 838 Pakete/h. Die Größe der Pakete ist aus den analysierten Daten nicht ersichtlich. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass in den Fällen mit hoher Paketanzahl pro Stunde viele kleine Pakete aus dem Container entladen wurden.

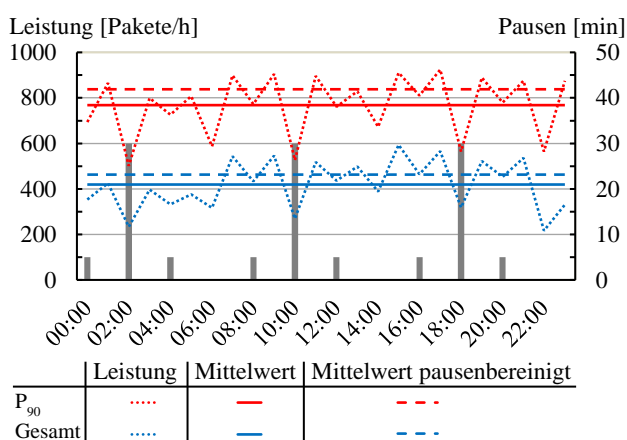


Abbildung 6. Analyse der Entladeleistung bei der manuellen Containerentladung in Anlehnung an [PWH20]

Die ausgewerteten Daten dienen als Grundlage für die Mindestanforderungen an die Entladeleistung, die ein autonomes Entladesystem aufbringen muss. Einige weiteren, grundlegenden Anforderungen werden im Folgenden zusammengefasst.

2.3 Anforderungen an die automatische Entladung

Da sich dieser Beitrag auf die mechanische Beschreibung des Systems beschränkt, werden die Steuerungstechnischen Anforderungen, die sich hieraus ergeben, nicht näher behandelt. Zu beachten ist, dass die Autonomie autonomer Systeme in komplexen Situationen versagen kann, was in unzureichender Systemverfügbarkeit resultiert. Daher sind halbautonome Systeme zu präferieren, bei denen menschliche Bediener eingreifen können. [PWH20]

Für die Entladung an mehreren Ladeluken ist ein mobiles System erforderlich, das zwischen diesen verfahren und damit flexibel eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zur Festinstallation vor jedem Tor können die Investitionskosten so gering gehalten werden.

Für die automatische Entladung von Containern im beschriebenen Umfeld ist ein System erforderlich, das sauber gestapelte Pakete selbstständig entladen kann. Ladesituationen, in denen die Pakete eng gepackt sind, sollte dabei ebenso entladbar sein wie lockere. Bei der fortschreitenden Entleerung muss das System in der Lage sein in den Container hineinzufahren. Dabei müssen Steigungen und Kanten durch Überladerampen oder ein Gefälle des Containers überwunden werden können.

Die Entladeleistung sollte dabei mindestens der manuellen Entladung durch zwei Mitarbeiter entsprechen und bei über 800 Paketen pro Stunde liegen. Um die Prozesszeiten zu verkürzen nutzt das System idealerweise die Ordnung in den Containern und greift mehrere Kartons gleichzeitig und nach Möglichkeit eine ganze Reihe auf einmal.

Da die Pakete bzw. die darin enthaltenen Waren nicht durch gesondertes Verpackungsmaterial vor Beschädigungen geschützt sind, ist beim Handling entsprechende Vorsicht geboten.

Die Kartons müssen nach der Entnahme aus dem Container befördert werden. Hierzu muss das System entweder eine entsprechend ausgeführte Fördertechnik mitbringen oder die Anbindung entsprechender Lösungen ermöglichen und die Kartons an diese übergeben.

3 Stand der Technik

Um die Probleme der manuellen Entladung von Paketen zu umgehen, sind am Markt verschiedene Systeme zu finden, die unterschiedliche Ansätze hinsichtlich der Entladestrategie, der Greiftechnik und des Abförderns der Packstücke verfolgen. Der Automatisierungsgrade der bestehenden Systeme reicht dabei von der bloßen Unterstützung des Mitarbeiters durch handgeführte Greifer über die Bewegung des Entladesystems mittels Handsteuerung, bis zur vollautomatischen Entladung.

Während die handgesteuerten Systeme bereits seit mehreren Jahren angeboten werden, sind die autonomen Entladesysteme erst seit kurzer Zeit auf dem Markt zu finden. Im nachfolgenden werden die entsprechenden Systeme vorgestellt.

3.1 Beumer Parcel Picker

Der *Parcel Picker* der *Beumer Group* ist ein fest installiertes System, das zur Unterstützung des zum Entladen eingesetzten Arbeiters konzipiert ist. Vom Prinzip her handelt es sich um einen Teleskopgurtförderer mit sehr breitem, bis auf den Boden des Containers reichenden Gurt, der in der Höhe und vom Winkel verstellt werden kann.

Das Herausziehen der Pakete wird vom Arbeiter nach wie vor per Hand durchgeführt, allerdings wird hierzu eine

Art Stange mit angefügtem Sauger verwendet, die das Entladen aus einer angenehmeren Position ermöglicht. Die einzeln herausgezogenen Pakete fallen auf die Fördertechnik und werden aus dem Container transportiert.

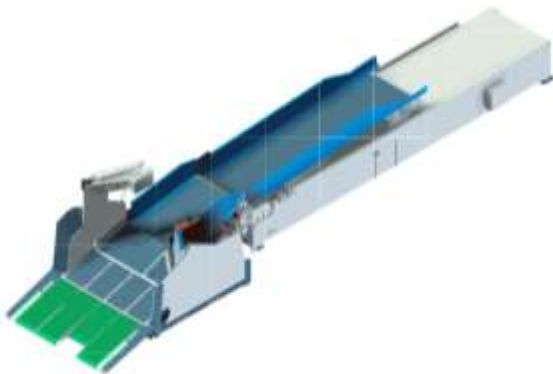


Abbildung 7. Parcel Picker der Beumer Group [Beu19]

Für tiefer liegende Pakete oder solche, bei denen ein Sturz aus großer Höhe nicht kritisch ist, kann der Förderer auch komplett auf den Boden gefahren werden und die Pakete wie Schüttgut mit einer Schaufel aufnehmen (Bulk-Entladung).

3.2 Cartonmover

Der *Cartonmover* ist ein mobiles System zur Containerentladung, das flexibel zwischen mehreren Ladeluken eingesetzt werden kann.



Abbildung 8. Cartonmover Container-Entladesystem [Car11]

Der *Cartonmover* bewegt sich radgetrieben in den Container hinein. Eine Bedienperson fährt auf dem System mit und steuert die Sauggreifer auf die korrekte Position.

Die Sauggreifer zum Herausziehen der Pakete können mehrere Pakete gleichzeitig greifen und sind seitlich verfahrbar. Hierdurch wird die Fördertechnik zum Abfordern der Pakete nicht blockiert, die Entladung einer Paketreihe muss aber in zwei Schritten erfolgen.

3.3 Copal C2

Der *C2* von *Copal* basiert wie der *Parcel Picker* auf einem Teleskopgurtförderer, über den der Paketgreifer mit der Bedienerkabine in den Container geschoben wird. An-

ders als der *Parcel Picker* ist der Teleskopgurtförderer jedoch mit einem Fahrtrieb ausgestattet und kann sich zwischen mehreren Ladeluken seitlich hin und her bewegen.



Abbildung 9. C2 Container Unloader von Copal [Cop13]

Der Sauggreifer des *C2* kann mehrere Pakete gleichzeitig aus der Lage herausziehen und verfügt im Gegensatz zum *Cartonmover* über keine zusätzliche Fördertechnik um die Pakete an den Teleskopgurtförderer zu übergeben. Stattdessen folgt auf das Herausziehen der Pakete eine Drehung um die Hochachse, bevor diese abgelegt werden. Ganze Paketreihen können dadurch nicht entladen werden.

Neben einem Sauggreifer für die Paketentladung kann das System auch mit einem Endeffektor zum Greifen von Säcken im Einzelgriff ausgerüstet werden.

3.4 Bastian Solutions Ultra

Das System *Ultra* von *Bastian Solutions* ist ein mobiles, autonom agierendes Entladesystem, das neben der Entladung auch für die Beladung von Containern eingesetzt werden kann.



Abbildung 10. Ultra von Bastian Solutions [Zog18]

Das System verfügt über einen in der Höhe verstellbaren Arm, über den die Pakete gefördert werden. An dessen Ende befindet sich ein versenkbarer Sauggreifer, der die Pakete mit bis zu 22 kg im Einzelgriff aus der Lage herauszieht. Durch die Verwendung von Mecanumrädern ist ein flexibler Einsatz zwischen mehreren Ladeluken möglich.

3.5 Daifuku Wynright RTL-U

Das mobile Entladesystem *RTL-U* der Firma *Daifuku Wynright* nutzt für die autonome Entladung von Containern einen 6-Achs-Roboter, der mit einem Sauggreifer ausgerüstet ist. Das System kann selbstständig in einen Container hineinfahren und zwischen verschiedenen Ladeluken eingesetzt werden.



Abbildung 11. RTU der Winryght Corp. [Wyn16]

Der Roboter greift die obersten Pakete einer Lage jeweils einzeln, zieht diese aus der Reihe heraus und legt sie auf dem Förderband ab. Sobald ausreichend Platz über einer Paketreihe ist, kann das System mehrere Pakete parallel von oben ansaugen und entnehmen. Die Anzahl der Pakete ist hierbei aber stark begrenzt.

3.6 Siemens Rubus

Das fest installierte *Rubus*-System von *Siemens* kann Container vollautomatisch entladen. Das Abfordern der Pakete ähnelt vom Prinzip dem des *Parcel Pickers* und die Pakete werden wie Schüttgut behandelt. Anders als die vorherigen Systeme bewegt sich das System aber nicht in den Container hinein, sondern zieht eine Trägerschicht unter den Paketen aus dem Container heraus. Für die Vereinzelung wird der obere Teil des mitgezogenen Paketstapels von einem schweren Vorhang teilweise zurückgehalten und so zum Einsturz gebracht.



Abbildung 12. Entladesystem Rubus von Siemens [Sie19]

3.7 Honeywell Intelligrated Robotic Unloader

Der *Robotic Unloader* von *Honeywell Intelligrated* ist ein mobiles Entladesystem, das von der verbauten Fördertechnik dem *Parcel Picker* ähnelt. Über das höhenverstellbare und neigbare Förderband, das sich über die gesamte Containerbreite erstreckt, können Pakete ähnlich einem Muldenkipper aufgenommen und abgefördert werden. Zusätzlich verfügt das System über einen unabhängig von der

Fördertechnik positionierbaren Sauggreifer, der eine Reihe von Paketen in mehreren Schritten aus der Lage ziehen kann und anschließend auf dem Förderband ablegt.



Abbildung 13. Robotic Unloader der Firma Honeywell Intelligrated [Hon19]

Die gezeigten technischen Systeme können die Mitarbeiter bei der Containerentladung entlasten oder ersetzen. Während die handgesteuerten Lösungen aufgrund des dauerhaften menschlichen Einsatz nicht den Anforderungen an die autonome Entladung entsprechen, erfüllen die autonomen Systeme nicht die Anforderungen hinsichtlich Mobilität oder Tragkraft, oder weisen nicht die sorgsame Handhabung auf, die vergleichbar mit der manuellen Entladung ist [PWH20] oder speziell umgerüstete Container. Darüber hinaus sind viele der vorgestellten autonomen Systeme so neu, dass noch keine Angaben zu ihrer Robustheit existieren. Im Fall des Versagens der Autonomie in den komplexen Entladesituationen ist dementsprechend ein semiautonomer Ansatz erforderlich, der mit dem in diesem Beitrag vorgestellte System adressiert wird.

4 Das IRiS-System

Auf Grundlage der Anforderungen wurde das in Abbildung 14 dargestellte semi-autonome Entladesystem entwickelt. Insgesamt weist das System Abmessungen von $5,2 \text{ m} \times 2,2 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$ auf und kann damit nicht nur in einen 40-Fuß-Container einfahren um diesen zu leeren, sondern auch in einem 20-Fuß-Container transportiert werden.

Die Basis bildet ein Gerüstkörper aus Aluminiumprofilen, welche die einzelnen Subsysteme miteinander verbinden, bzw. darin eingehängt sind. Das System ist in die Subsysteme bzw. funktionellen Untergruppen Fahrwerk, die Vakuumerzeugung und -verteilung, die Hauptsensorik und Distanzmessung, die Steuerung sowie Energieversorgung und -verteilung, die Fördertechnik, den Greifer und die Hubkinematik aufgeteilt.

Die einzelnen Subsysteme und ihre Funktionsweise werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer behandelt. Da sich der Aufbau und die Fähigkeiten des Greifers und der Kinematik zur Höhenverstellung von den bestehenden Entladesystemen abheben, werden diese detaillierter vorgestellt und auf ihre Besonderheiten eingegangen.

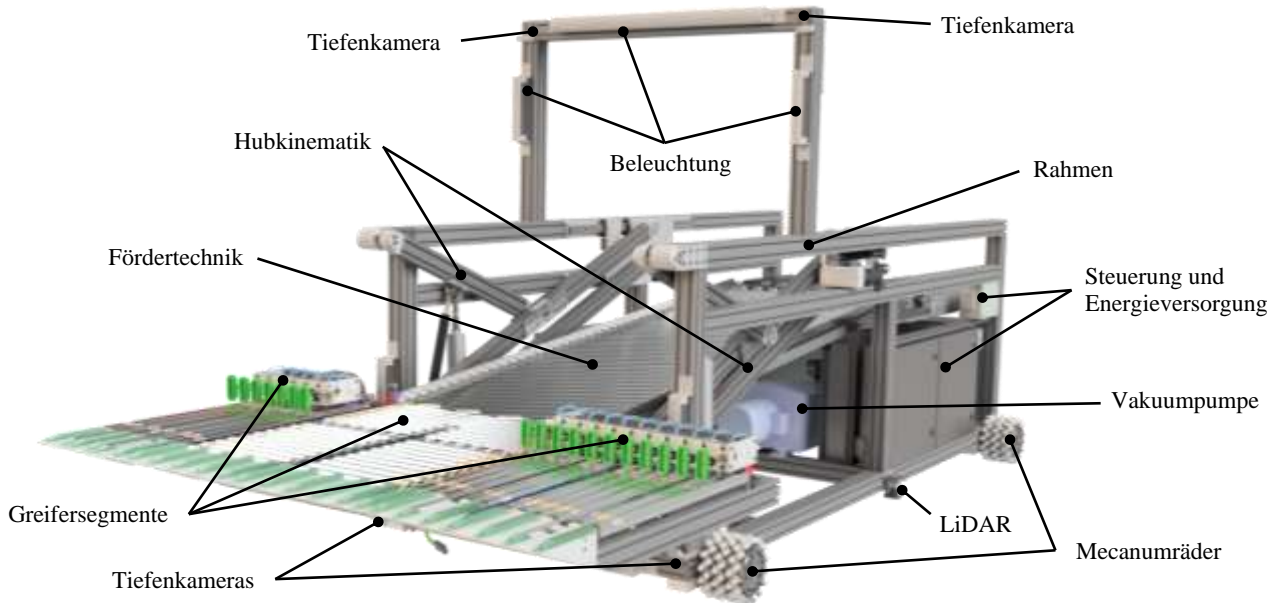


Abbildung 14. Aufbau des IRIS-Systems mit den verschiedenen Hauptkomponenten [FHP20]

Zunächst wird der zugrundeliegende Prozess (Abbildung 15) erläutert und die Grundfunktionalität des Gesamtsystems anhand der Schritte aus 2.2 beschrieben.

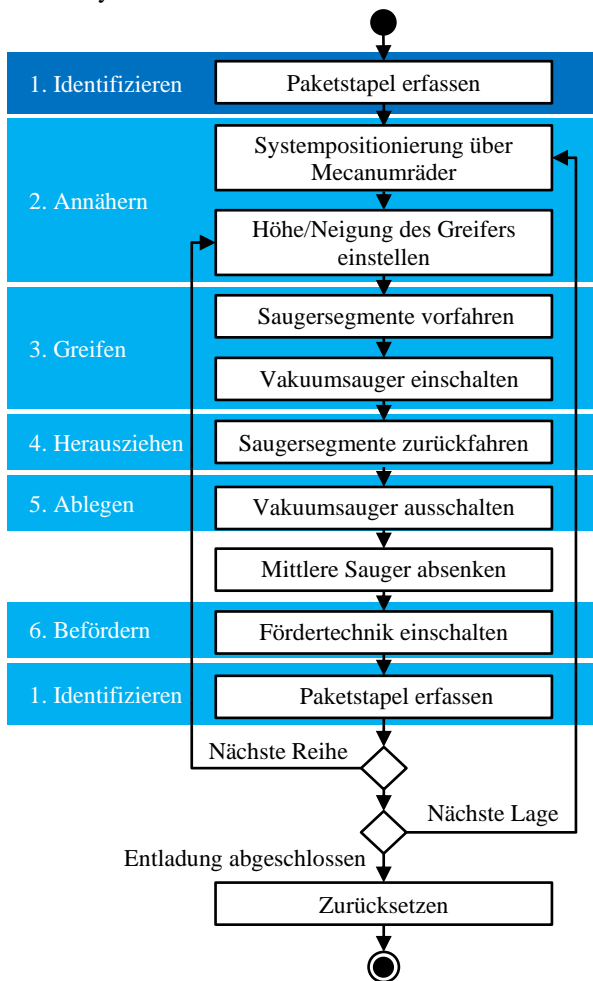


Abbildung 15. Vereinfachte Darstellung des Entladeprozesses

1. Identifizieren

Zur Erfassung der Pakete sind an dem System vier Tiefenkameras angebracht, die die Pose der Pakete erfassen. Die Pakete befinden sich immer im Blickfeld von mindestens zwei Kameras und können damit unabhängig von der Position des Greifers und seiner partiellen Verdeckung erfasst werden. Wurde die Packsituation erfasst, wird eine Entladestrategie für die nächste zu entladene Paketreihe entwickelt und die Entnahme kann gestartet werden.

2. Annähern

Bevor die Pakete aus der Lage gezogen werden, wird das System positioniert. In Längsrichtung geschieht dies durch den Fahrtrieb. Wie in Abbildung 16 dargestellt besitzt das System durch die verwendeten omnidirektionalen Mecanumräder alle drei Freiheitsgrade in der Ebene und kann zwischen den Entladevorgängen seitwärts vor den verschiedenen Toren verfahren werden.

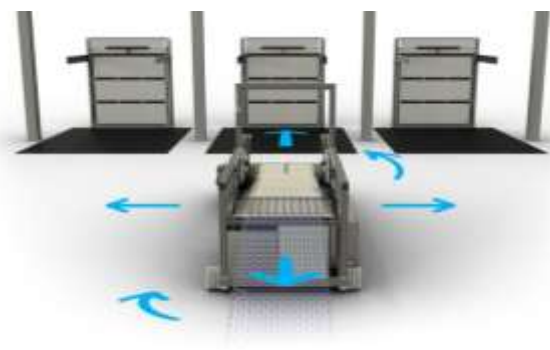


Abbildung 16. Freiheitsgrade durch Verwendung von Mecanumrädern: Seitlicher Wechsel zwischen den Toren, Hineinfahren in den Container und Rotation.

Um den Greifer an der Unterkante der einzelnen Paketreihen auszurichten wurde eine Kinematik entwickelt, mit

der die in Abbildung 17 dargestellten Bewegungen durchgeführt werden können. Die Kinematik ist dabei so ausgelegt, dass der Greifer beim Anheben parallel geführt wird und bei Veränderung der Höhe keine Nachjustierung des Systems in Längsrichtung erforderlich macht. Dadurch kann auf zusätzliche Aktuatoren verzichtet und die Komplexität der Steuerung reduziert werden, was sich positiv auf die Robustheit des Systems auswirkt.



Abbildung 17. Freiheitsgrade des Greifers: Vertikalbewegung und Neigen des Greifers in Anlehnung an [PWH20]

Neben der Veränderung der Höhe ist es auch möglich die Neigung des Greifers zu verändern um Pakete am Boden des Containers aufzunehmen oder einen Winkelversatz auszugleichen, der sich durch das Hineinfahren über eine Überladebrücke ergeben kann oder durch örtliche Gegebenheiten, wie z.B. Tiefenrampen auftritt.

3. Greifen, 4. Herausziehen, 5. Ablegen

Nach dem Positionieren des Greifers kann dieser die Pakete einer Reihe greifen, aus der Lage ziehen und auf der Fördertechnik ablegen. Hierzu wurde der in Abbildung 18 dargestellt Greifer entwickelt, der eine komplette Reihe von Paketen in einem Schritt aus der Lage entnehmen kann und das System vom Stand der Technik abhebt.

Der Greifer besteht aus drei einzelnen Segmenten, die wiederum mehrere Vakuumsauger zusammenfassen. Zum Greifen der Pakete werden die Segmente nach vorne gefahren. Basierend auf dem identifizierten Packmuster und der abgeleiteten Entladestrategie werden dann die einzelnen Sauggreifer individuell aktiviert um entweder einzelne Pakete oder die gesamte Paketreihe aus der Lage zu greifen.



Abbildung 18. Vorwärtsbewegung der drei unabhängig verfahrbaren Greifensegmente in Anlehnung an [PWH20]

Anschließend werden die Pakete herausgezogen und durch das Unterbrechen des Vakuums auf den Förderrollen abgelegt. Die Segmente werden dann in ihre Ausgangslage zurückbewegt. Das mittlere Segment wird dabei abgesenkt und gibt über die integrierten Rollen den Weg für das Abfordern der Pakete frei.

6. Befördern

Nach dem Absenken des mittleren Segments entsteht eine durchgängige Transportebene, über die die Pakete auf dem Greifer über das Entladesystem an eine angehängte Fördertechnik wie z.B. einen Teleskopgurtförderer oder eine Scherenrollenbahn übergeben werden können.

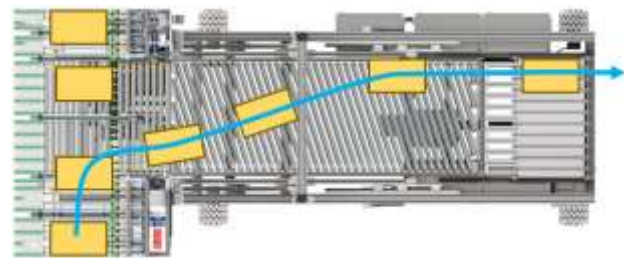


Abbildung 19. Materialfluss auf dem Entladesystem über Rollenförderer im Greifer, Schrägrollenförderer und Riemenförderer [FHP20]

Wie in Abbildung 19 gezeigt, werden die entnommenen Pakete über die integrierte Fördertechnik zunächst in die Mitte des Greifers befördert und von dort über das abgesenkte mittlere Segment auf einen Schrägrollenförderer weitergeleitet, der zwischen dem Greifer und dem Rahmen eingehängt ist. Neben dem Transfer der Pakete zwischen dem Greifer und der an das Entladesystem angeschlossenen Fördertechnik werden die Pakete durch den Schrägrollenförderer ausgerichtet. Dies geschieht, indem die Pakete durch die Schrägstellung der Rollen gegen eine Führung gefördert werden. Der Förderer ist außerdem in vier Sektoren mit steigenden Transportgeschwindigkeiten unterteilt, wodurch eine Vereinzelung der Pakete erreicht wird.

Sobald der Bereich vor den Sauggreifern frei ist, kann der Prozess von vorne beginnen und wird solange wiederholt, bis der Entladevorgang des Containers vollständig abgeschlossen wurde.

4.1 Hubkinematik

Die von ihrer Funktion bereits beschriebene Hubkinematik wird im Folgenden detaillierter erläutert. Das zugrundeliegende Prinzip basiert auf dem in [BEG10] vorgestellten mechanischen Aufbau, wurde aber insbesondere hinsichtlich des Antriebskonzepts weiterentwickelt.

Abbildung 20 zeigt ein mechanisches Modell der Kinematik. Zwei parallel am Greifer montierte Streben sind an den Enden drehbar in zwei Linearführungen gelagert. Eine weitere Strebe ist im Mittelpunkt der oberen verbunden und kann über einen Elektrozyylinder rotiert werden und

die Hauptstreben damit heben. Die Schlitten in den Linearführungen sind über einen weiteren Elektrozyylinder verbunden. Durch vergrößern des Abstandes, der normalerweise übereinanderliegenden Lagerpunkte, verschiebt sich auch der Abstand der Lager am anderen Ende der Streben und die in Abbildung 17 gezeigte Neigung stellt sich ein.



Abbildung 20. Mechanisches Modell der Hubkinematik

Die Elektrozyylinder werden aufgrund ihrer Einbaulage und den ungünstigen Hebellängen mit einem Vielfachen der Gewichtskraft belastet. Dafür ist der notwendige Hub verglichen mit dem Arbeitsbereich des Systems geringer (Verhältnis kleiner 1:5) und sie weisen eine kurze Einbaulänge auf. Um die Last zu reduzieren und damit kleinere Baugrößen verwenden zu können, werden unterstützende Gasdruckfedern eingesetzt, die die Normalkraft im Elektrozyylinder mehr als halbieren. Abbildung 21 zeigt den entsprechenden Kraftverlauf beim Ausfahren des Zylinders mit und ohne Gasdruckfeder.

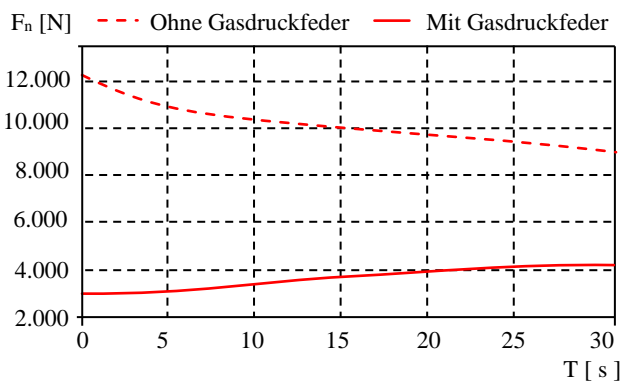


Abbildung 21. Kraftverläufe beim Ausfahren der Elektrozyylinder mit und ohne Unterstützung durch die Gasdruckfeder

Der Kraftverlauf ist dabei für eine zusätzliche Masse auf dem Greifer von 200 kg dargestellt. Fehlt diese, ist die Kraftunterstützung durch die Gasdruckfeder so groß, dass auf den Elektrozyylinder eine Zugkraft wirkt.

Die dabei auf den Zylinder wirkende Normalkraft ist in Abbildung 22 dargestellt. Dabei ist gut zu sehen, wie diese beim Heben und Senken mit und ohne Zuladung in einem Bereich zwischen ungefähr -4.000 N und +4.000 N schwankt. Es zeigt sich auch der Reibanteil der Federkraft beim Komprimieren der Gasdruckfeder, die beim Senken des Greifers zusätzlich wirkt und damit die Normalkraft im Zylinder weiter senkt.

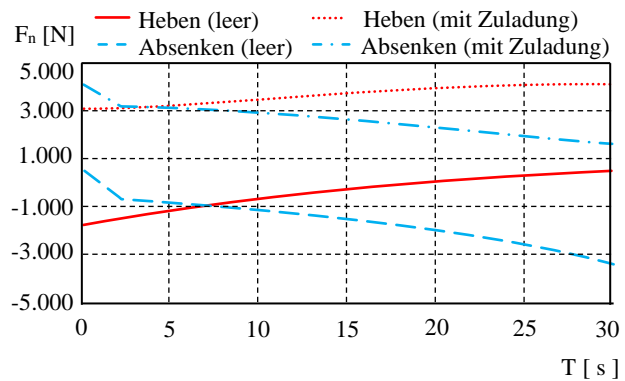


Abbildung 22. Kraftverläufe der Elektrozyylinder beim Heben und Senken des Greifers mit und ohne Zuladung

Der Antrieb der Elektrozyylinder erfolgt über Getriebemotoren, die so ausgelegt sind, dass der Elektrozyylinder eine Kraft von 5 kN bei einer Lineargeschwindigkeit von mehr als 2 m/min erzeugen kann.

4.2 Greifer

Die Grundfunktionalität des Greifers wurde bereit erläutert. Der Aufbau eines der individuell verfahrbaren Segmente ist in Abbildung 23 dargestellt. Es fasst mehrere ovale Vakuumsauggreifer zusammen, die parallel angeordnet sind und jeweils drei Freiheitsgrade aufweisen. Die Sauggreifer sind gelenkig mit einem Federstößel verbunden, an dem sich wiederum der Anschluss an die Vakuumversorgung befindet.

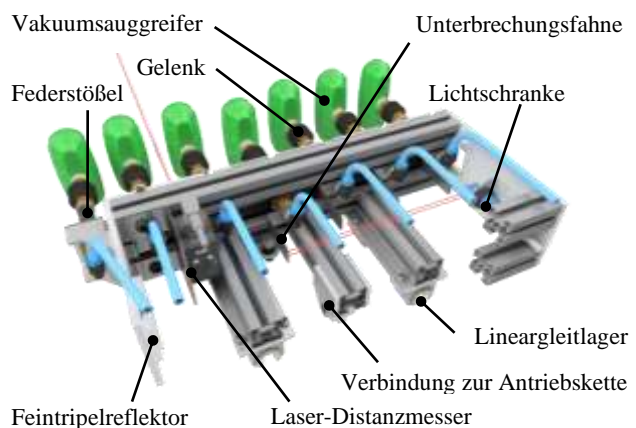


Abbildung 23. Aufbau und Komponenten eines Greifersegments im Schnitt

Die Gelenke ermöglichen einen Winkelversatz von $\pm 20^\circ$ und können damit unter anderem die Neigung des Greifers beim Entladen der unteren Paketreihe ausgleichen. Durch die Federstößel kann ein Tiefenversatz benachbarter Pakete von 25 mm ausgeglichen werden und der Kontakt zwischen Paket und Sauger wird sichergestellt. Um den maximalen Federweg nicht zu überschreiten und die Pakete vor Beschädigungen zu schützen, befindet sich eine Lichtschranke mit Reflektor hinter den Federstößeln. Beim Überschreiten des Federwegs wird diese von einer Metallfahne

an den Stößeln unterbrochen und die Vorwärtsbewegung des Segments gestoppt.

Der Antrieb der Segmente erfolgt über eine an der Unterseite angebrachte Verbindung zur Antriebskette. Über parallele Gleitlager wird die Bewegung linear geführt. Der Aufbau des Antriebs ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Kette wird dabei direkt über einen Motor angetrieben und am Ende umgelenkt.

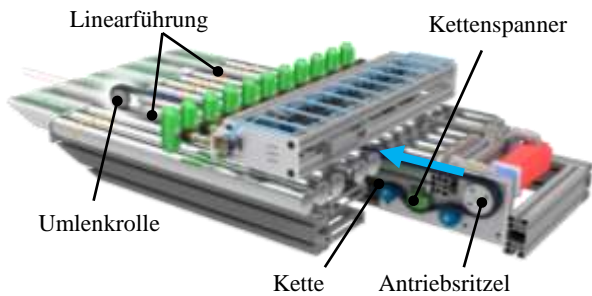


Abbildung 24. Antrieb der seitlichen Greifersegmente

Da der Abtransport der Pakete über die im mittleren Segment integrierten Förderrollen stattfindet, wird dieses nach dem Herausziehen der Pakete abgesenkt. Die beide aufeinanderfolgenden Bewegungen werden über den Kettenantrieb ausgeführt (Abbildung 25). Hierzu werden drei Ketten eingesetzt, die synchron über eine Antriebswelle angetrieben werden. Die mittlere der drei Ketten ist dabei nach vorne versetzt um das Segment stabil zu halten. Nach dem Heben des Segments rollt dieses über Führungsrollen auf einer Lauffläche parallel zu den Ketten nach vorne.

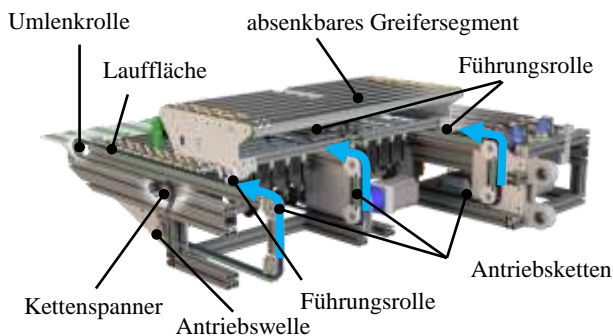


Abbildung 25. Antrieb des mittleren, absenkbaaren Greifersegments

Durch diesen Mechanismus ist der Greifer in der Lage eine ganze Reihe von Paketen auf einmal zu entladen. Durch die Segmentierung des Greifers sind außerdem die beschriebenen Situationen mit Klemmungen und erhöhtem Kraftaufwand beim Herausziehen der Pakete zu entladen, womit das System die aufgestellten Anforderungen erfüllt und sich von den existierenden Lösungen abhebt.

Die Motoren zum Verfahren der Greifer sind so dimensioniert, dass für das Herausziehen einer Reihe weniger als

2 Sekunden benötigt werden. Unter Berücksichtigung, dass der Abtransport der Pakete auch parallel mit dem Verfahren des Greifers geschehen kann, sollte die Entladung einer Reihe nicht länger als 5 Sekunden benötigen. Der Einfluss auf die theoretische Entladeleistung wird im Folgenden erläutert.

4.3 Theoretische Entladeleistung

Um eine möglichst hohe Entladeleistung zu erreichen befinden sich in einem Container im Idealfall viele kleine Pakete. Im Regelfall kann hiervon allerdings nicht ausgegangen werden. Im schlechtesten Fall ist ein Container mit großen Paketen befüllt, bei deren Entladung pro Paket große Strecken zurückgelegt werden müssen. Bei Paketen mit den Maßen 685 mm × 800 mm × 600 mm (Breite, Höhe, Tiefe) würde ein 40-Fuß-High-Cube-Container lediglich 225 Pakete beinhalten, die sich auf 20 Lagen zu 3 Reihen á drei Pakete aufteilen. Bei einer Entladeleistung von 800 Paketen pro Stunde müsste das System in diesem Fall einen Container in etwas mehr als 15 Minuten leeren. Eine Lage müsste in 50 Sekunden entladen werden. In dieser Zeit müsste das System 600 mm in den Container hineinfahren (angenommene Positioniergeschwindigkeit von 50 mm/s), den Greifer auf die oberste Paketreihe in etwa 2 m Höhe anheben sowie anschließend dreimal hintereinander eine Reihe von Paketen aus der Lage ziehen (5 Sekunden) und den Greifer zweimal um 800 mm absenken. Die notwendige Lineargeschwindigkeit der Elektrozyylinder läge für diesen Fall bei etwa 2 m pro Minute und damit im Rahmen der Antriebsdimensionierung.

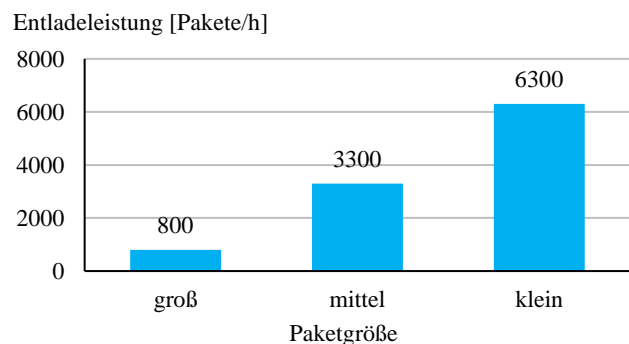


Abbildung 26. Theoretische Entladeleistung für unterschiedliche Paketgrößen

Unter den gleichen Voraussetzungen könnte das System bei vielen kleinen Paketen (200 mm × 110 mm × 300 mm) eine Entladeleistung von 6.300 Paketen pro Stunde erreichen. Bei mittelgroßen Paketen (300 mm × 210 mm × 435 mm) könnten 3.300 Pakete pro Stunde erreicht werden (siehe Abbildung 26).

Diese theoretisch möglichen Werte sind in den anstehenden Labor- und Feldtests zu evaluieren. Insbesondere die Extremfälle mit großen Paketen und den damit verbundenen hohen Geschwindigkeiten der Hubkinematik sind hinsichtlich der Prozessstabilität zu überprüfen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das neu entwickelte IRiS-Entladesystem für die semiautonome Containerentladung vorgestellt. Dafür wurden die grundlegenden Rahmenbedingungen und der Prozess bei der Entladung von containerisierter Ware dargelegt und Anforderungen an ein autonomes Entladesystem betrachtet. Bestehende Systeme wurden präsentiert und ihre Eigenschaften diskutiert. Anschließend wurde die Funktionsweise des IRiS-Systems erläutert und die neu entwickelten mechanischen Subsysteme vorgestellt.

Das System befindet sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Aufbau. Weiterer Forschungsbedarf besteht neben der Erprobung und Evaluation des Systems unter Labor- und Realbedingungen in der Erforschung weiterer Einsatzgebiete und der Adaption der entwickelten Technik an diese.

5.1 System-Evaluation

Die Evaluation des Systems erfolgt in mehreren Schritten. Im Rahmen von Labortests wird zunächst die Funktionalität der einzelnen Module und ihrer Grundfunktionen und anschließend deren Zusammenspiel im Gesamtsystem überprüft und nachgewiesen. Die Teststrategie der physischen Komponenten orientiert sich dabei an den Subsystemen des Systems. In den Modultests wird im Anschluss an die Montage der Unterbaugruppen deren grundlegend Funktionalität überprüft. Im nächsten Schritt werden wir mit Funktionstests die Durchführung der Grundfunktionen des Systems auf Modulebene durchführen. Anschließend werden in einem Labortest komplexe Bewegungsabläufe der Subsysteme und abschließend das Zusammenspiel sämtlicher Subsysteme und die korrekte Funktionalität des Gesamtsystems überprüft. Für die Tests des Gesamtsystems werden Verschiedene Entladesituationen mit unterschiedlichen Paketgrößen, -ausrichtungen, -gewichten und Packmustern in einem Container in einer Testumgebung nachgestellt.

Nach erfolgreichem Abschluss der Labortests erfolgt der Feldtest unter realen Betriebsbedingungen an zwei bestehenden Toren im Wareneingang eines Unternehmens der Kontraktlogistik. Das IRiS-System wird dafür in die bestehende Fördertechnik in der Halle integriert. Modifikationen sind lediglich für den Anschluss an das bestehende Fördersystem vorgesehen. Das System wird im laufenden Betrieb an konventionellen Toren den Inhalt der Container in die bestehende Fördertechnik einschleusen. Die Container werden nicht speziell vorbereitet, sondern sind mit unterschiedlichen Paketen in zunächst unbekannter Stapelung befüllt. In diesem Feldtest soll nachgewiesen werden, dass das System in der Lage ist, zehn Standardcontainer in Folge erfolgreich zu entladen. Dabei sollen 80% der Pakete ohne Personeneingriff entladen werden. Die angestrebte Entladeleistung von über 800 Paketen pro Stunde soll in den Messreihen bestätigt werden.

Zusätzlich zur Entladeleistung wird im Feldtest die Mensch-Technik-Schnittstelle und die Steuerung des Systems durch eine repräsentative Benutzergruppe evaluiert. Zu diesem Zweck werden die voraussichtlichen Anwendern des Systems ($n \geq 5$) die Bedienung des Leitstandes erproben. Neben der Informationsaufbereitung und dem Zugriff über ein konventionelles Benutzerinterface wird hierbei auch die Teleoperation und die Steuerung des Systems über einen Digitalen Zwilling überprüft.

5.2 Adaption

Neben dem Nachweis der Funktionalität ist die Erweiterung des Anwendungsbereiches durch eine Anpassung des Systems geplant. Die möglichen Einsatzszenarien, die das System in seinem konzipierten Zustand noch nicht abdecken kann, die aber durch Modifikationen oder Kombination mit anderen Komponenten potentiell in Frage kommen, werden hierfür zunächst identifiziert. Hierzu können z.B. andere Randbedingungen am Einsatzort oder andere Packstücke, wie z.B. inhomogene Kartons oder Sackware gehören.

Für die Entladung von Säcken wäre z.B. die Kombination von IRiS mit einem Nadelgreifer, wie er in [MBF19] beschrieben ist, denkbar. Weitere Lösungsansätze gilt es zu recherchieren und für die Kombination aufzubereiten, sodass der semiautonome Ansatz, den das IRiS-System verfolgt, zukünftig für die Entladung eines breiten Spektrums an Waren verwendet werden kann.

Förderhinweis

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „IRiS – Interaktives Robotiksystem zur Entleerung von Seecomainern“, das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur unter dem Kennzeichen 19H17016C gefördert wird.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

LITERATUR

- [Beu19] Beumer Group GmbH & Co. KG: *BEUMER Parcel Picker : Schnell, ergonomisch und sicher*. URL <https://www.beumergroup.com/app/uploads/2019/03/BEUMER-Parcel-Picker-DE.pdf>. – Aktualisiert: März 2019
- [BEG10] Burwinkel, M. ; Ehn, T. ; Gorltd, C. ; Rohde, M. ; Uriarte, C.: *System zum Handhaben von Stückgütern für das, vorzugsweise automatische, Be- und Entladen eines Laderaumes*, Patent. Veröffentlichungsnr. DE102010015299A1
- [Car11] Carton Mover BV: *Carton Mover*. URL <http://cartonmover.com/>. – Aktualisiert: 2011
- [Cop13] Copal Handling Systems: *Launch of the C2 Container Unloader*. 01.07.2013. URL <https://www.copalhandlingsystems.com/news/content/launch-of-the-c2-container-stripper/>
- [DWD] DWD Deutscher Wetterdienst: *CDC - Climate Data Center*. URL <https://cdc.dwd.de/portal/201912031600/view1>
- [FHP20] Freitag, M. ; Hoppe, N. ; Petzoldt, C. ; Wilhelm, J. ; Rolfs, L. ; Mortensen Ernits, R. ; Beinke, T.: *Digitaler Zwilling zur Mensch-Technik-Interaktion*. In: *Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt. GITO Berlin, 2020*, im Druck
- [Hon19] Honeywell Intelligrated: *Robotic Unloader*. URL <https://www.intelligrated.com/en/resources/videos/robotic-unloader>. – Aktualisiert: 17.04.2019
- [Mar06] Martin, H.: *Transport- und Lagerlogistik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2006
- [MBF19] Mortensen Ernits, R. ; Beinke, T. ; Freitag, M. ; Rhode, M.: *Automatic Unloading of Coffee Sacks out of Sea Containers : Special Pile Situations and Challenges for Grip-ping*. In: *Proceedings of International Conference of Material Handling, Constructions and Logististics, 2019*, S. 229–234
- [PWH20] Petzoldt, C. ; Wilhelm, J. ; Hoppe, N. ; Rolfs, L. ; Beinke, T. ; Freitag, M.: *Control architecture for digital twin-based human-machine interaction in a novel robotic container unloading system*. In: *Proceedings of International Conference on System-Integrated Intelligence, 2020*, im Druck
- [Sch16] Scharnow, R.: *Containerhandbuch : Die Ware im Container*. URL <https://www.containerhandbuch.de/chb/scha/index.html>
- [Sie19] Siemens: *RUBUS: Höchste Entladeleistung*. URL <https://www.siemens-logistics.com/de/paketlogistik/entladen>
- [Sma] Smart Box Industries LLC: *Containers - Smartbox*. URL <http://smartbox.ae/smart/containers> – Überprüfungsdatum 06.07.2020
- [SVM16] Stoyanov, T. ; Vaskevicius, N. ; Mueller, C. ; Fromm, T. ; Krug, R. ; Tincani, V. ; Mojtahedzadeh, R. ; Kunaschk, S. ; Mortensen Ernits, R. ; Canelhas, D. ; Bonilla, M. ; Schwertfeger, S. ; Bonini, M. ; Halfar, H. ; Pathak, K. ; Rohde, M. ; Fantoni, G. ; Bicchì, A. ; Birk, A. ; Lilienthal, A. ; Echelmeyer, W.: *No More Heavy Lifting: Robotic Solutions to the Container Unloading Problem*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23 (2016), Nr. 4
- [UNC19] UNCTAD: *Review of maritime transport 2019*. New York, Geneva : United Nations, 2019 (Review of maritime transport)
- [WBF20] Wilhelm, J. ; Beinke, T. ; Freitag, M.: *Improving Human-Machine Interaction with a Digital Twin*. In: *Dynamics in Logistics : Springer International Publishing, 2020*, S. 527–540
- [Wyn16] Wynright Corp.: *Robotics Container Unloader (RTU) - Standard*. URL <https://robotics.wynright.com/pdf/RTL-U-Standard.pdf>
- [Zog18] Zoghoghzy, J.: *Robotic Truck Loading is the Future of Shipping Dock Automation | Bastian Solutions*. URL <https://www.bastiansolutions.com/blog/robotic-truck-loading-is-the-future-of-shipping-dock-automation/>. – Aktualisiert: 19.04.2018

Nils Hoppe, M.Sc., Research Associate in the Faculty of Production Engineering of the University of Bremen.

Address: BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik, Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Phone: +49 421 218-50181, Fax: +49 421 218-98-50181, E-Mail: hpp@biba.uni-bremen.de

Jasper Wilhelm, M.Sc., Christoph Petzoldt, M.Sc., Rafael Mortensen Ernits, M.Sc., Lennart Rolfs, M.Sc. and Dr.-Ing Thies Beinke, Research Associates at BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik.

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag, Director of BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik and head of the research group Planning and Control of Production and Logistics Systems, Faculty of Production Engineering, University of Bremen