

2 Containerterminals

In diesem Kapitel wird das Umfeld der untersuchten Optimierungsprobleme beschrieben. Dazu werden zunächst die Umschlagsprozesse auf einem Containerterminal in Abschnitt 2.1 dargestellt. In Abschnitt 2.2 wird der allgemeine Aufbau eines Terminals skizziert und in Abschnitt 2.3 folgt eine Beschreibung der häufig eingesetzten Geräte mit ihren jeweiligen Besonderheiten und Kombinationsmöglichkeiten.

2.1 Umschlagsprozesse auf Containerterminals

Das Kerngeschäft eines Containerterminals besteht im Umschlag von Containern. Das Terminal wird dabei von verschiedenen Verkehrsträgern (auch Carrier genannt) angefahren. Bei den Verkehrsträgern kann es sich um Schiffe, Binnenschiffe [50, 51], Züge (auch Bahn genannt) oder Lastkraftwagen (kurz LKW, auch Fuhre genannt) handeln. Die Verkehrsträger liefern bei jedem Besuch einen oder mehrere Container an das Terminal an, holen einen oder mehrere Container ab oder beides. Entsprechend unterscheidet man bei Umschlagsprozessen zum einen nach der Transportrichtung und zum anderen nach dem Verkehrsträger. Die wichtigsten Umschlagsprozesse an Containerterminals sind also Anliefern Fuhre, Ausliefern Fuhre, Anliefern Bahn, Ausliefern Bahn sowie Löschen (entspricht Anliefern Schiff) und Laden (entspricht Ausliefern Schiff) [204].

Oft wird innerhalb der Verkehrsträger noch weiter differenziert, z.B. werden Schiffe unterschieden in große *Tiefseeschiffe* für den Interkontinentalverkehr, kleinere Seeschiffe für kürzere Distanzen (die in Europa oft *Feederschiffe*, kurz *Feeder*, genannt werden und für die Anbindung der Ostseehäfen genutzt werden) und *Binnenschiffe*.

Die Zeiten, zu denen die Seeschiffe und Züge am Terminal ankommen, werden meist in Form von sich periodisch wiederholenden Fahrplänen vereinbart. Die Ankünfte von LKW erfolgen dagegen oft ungeplant. Zwar gibt es erste Ansätze von Vormeldesystemen, mit denen LKW-Fahrer den Zeitpunkt ihrer geplanten Abfertigung am Terminal ankündigen sollen, oft mit dem Anreiz einer bevorzugten Abfertigung [88, 239]. Während solche Systeme in Asien und Australien sehr verbreitet sind [167], stellen sie in Europa eher die Ausnahme dar. Dies hat zur Folge, dass sich oft starke Ballungen von LKW-Ankünften (z.B. in den Morgen- und Abendstunden) an-

statt eines aus Sicht des Terminalbetreibers sinnvollerer gleichmäßigen LKW-Stroms ergeben.

Die umgeschlagenen Containeranzahlen sind sehr stark vom Verkehrsträger abhängig und liegen meist bei wenigen Containern pro LKW, bei einigen Dutzend Containern pro Zug und bei bis zu mehreren Tausend Containern pro Schiffsabfertigung. Hieraus leiten sich auch unterschiedliche *Dringlichkeiten* für die einzelnen Prozesse ab: Für die Abfertigung eines Schiffes sind meist Höchstdauern oder Mindestumschlagsproduktivitäten mit den Schiffsreedern vereinbart (vgl. [90]), für deren Nichteinhaltung sogar teilweise Strafen festgelegt werden. Entsprechend ist der zügige und vor allem kontinuierliche Fortschritt der Lösch- und Ladeprozesse am Schiff für den Terminalbetreiber sehr wichtig [204]. Dabei spielt insbesondere die rechtzeitige Bereitstellung von Containern beim Laden (*Lader*) des Schiffes eine wichtige Rolle, da deren Staupositionen im Schiff oft vom Reeder vorgegeben oder nach dessen Vorgaben vom Terminal geplant werden. Deswegen ist jeder einzelne Container für das Fortführen des Ladeprozesses erforderlich. Insbesondere bei großen Schiffen können kurze Verzögerungen bei der Bereitstellung von Ladern überbrückt werden, indem weitere Container, deren Verladung kurze Zeit später geplant war, im Ladeprozess vorgezogen werden [46, 109]. Dies wird für die vorliegende Arbeit als *Überholen* und der vorgezogene Transport dann als *Überholer* bezeichnet. Voraussetzung dafür ist, dass ein Überholer frühzeitig bereitgestellt wird und dass dieser Überholer nicht oberhalb des verzögerten Containers im Schiff positioniert werden muss, sondern daneben. Dies ist umso wahrscheinlicher, je breiter das Schiff ist. Damit gewinnen Überholer mit steigender Schiffsgröße eine zunehmende Bedeutung.

Beim Löschen von Containern eines Schiffes hat der Terminalbetreiber meist größere Flexibilität bezüglich der Reihenfolge der zu löschenden Container (*Löschers*), so dass die Prozesse am Terminal sich hier einfacher gestalten lassen und die zügige Durchführung jedes einzelnen Löschers weniger kritisch für die Gesamtabfertigung ist. Auch bei der Abfertigung von Zügen gibt es in der Regel keine *Reihenfolgerestriktionen* zwischen den einzelnen Containern, weil diese zumindest in Europa auf dem Zug nicht übereinander gestapelt werden und somit in beliebiger Reihenfolge bearbeitet werden können. Dadurch kann die verspätete Bereitstellung einzelner Containers an der Bahn in der Regel leichter ausgeglichen werden.

Auch für die Beladung von LKW gibt es zumeist keine Reihenfolgerestriktionen und die Abfertigung hat meist eine geringere Priorität verglichen mit der Schiffsabfer-

tigung. Dennoch stellt die Bearbeitungszeit eines LKW heute ein nicht zu unterschätzendes Qualitätskriterium eines Containerterminals dar. Deswegen versuchen viele Terminalbetreiber hier eine gewisse Maximaldauer bei der Abfertigung einzuhalten, die meist in der Größenordnung von zehn bis fünfzehn Minuten liegt [19, 58, 177, 211]. Wird diese Maximaldauer bei der Abfertigung überschritten, spricht man von einer verspäteten Abfertigung oder kurz Verspätung.

2.2 Aufbau eines Containerterminals

2.2.1 Klassifizierung und allgemeiner Aufbau

Grundsätzlich können Umschlagsanlagen für Container sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Dies hängt sowohl von den zu bedienenden Verkehrsträgern (Carriern) als auch vom *Modalsplitt* ab, der die Verteilung der Umschlagsmengen zwischen den einzelnen Verkehrsträgern beschreibt [175]. Anhand des Modalsplitts kann die folgende Klassifizierung von Containerterminals erfolgen:

1. *Transshipmentterminal*: Hier liegt der Schwerpunkt des Containerumschlags bei der Schiff-Schiff-Verladung, meist zwischen großen Tiefseeschiffen. Hinterlandverkehre spielen dabei eine untergeordnete Rolle [106, 108, 121, 180, 188, 190, 218]. Ein typisches Beispiel für ein Transshipmentterminal bildet das PSA Containerterminal in Singapur [73].
2. *Import-Export-Terminal*: Bei Import-Export-Terminals findet der Großteil der Containerströme zwischen Seeschiff und Hinterland statt [106, 108, 188, 190, 218]. Typische Beispiele für Import-Export-Terminals sind die Containerterminals der sogenannten Nordrange, z.B. Rotterdam oder Hamburg, weil ein Großteil des mitteleuropäischen Festlandes über diese Häfen an den Welthandel angebunden ist. Diese Import-Export-Terminals, bei denen sowohl an der Landseite als auch an der Wasserseite ein relevanter Teil des Umschlags anfällt, stehen im Fokus der vorliegenden Arbeit.
3. *Intermodalterminal*: Als Intermodalterminals werden häufig Containerumschlagsanlagen bezeichnet, auf denen hauptsächlich Container zwischen Straße und Schiene umgeschlagen werden [5, 74, 159]. Solche Terminals finden sich oft im Hinterland von Hafenstädten, wie zum Beispiel in Hannover [5].

Im allgemeinen Sprachgebrauch ist meistens von Containerterminals nur dann die Rede, wenn das Terminal an einem Hafen gelegen ist und Container an Tiefseeschiffen umgeschlagen werden. Diese Definition wird auch im Folgenden verwendet.

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der wesentlichen Bestandteile eines Terminals, die im Einzelfall allerdings sehr unterschiedlich angeordnet sein können und auch nicht bei jedem Containerterminal vollständig vorkommen müssen. Eine vergleichbare Darstellung findet man zum Beispiel bei Steenken et al. [211].

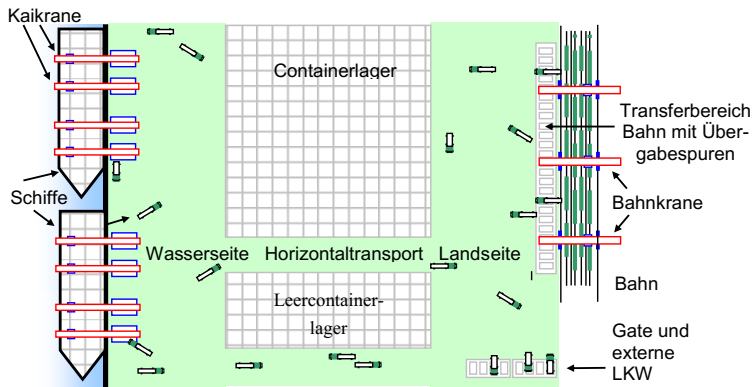


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Containerterminals

2.2.2 Wasserseite

Auf der linken Seite von Abbildung 3 erkennt man die Seeschiffe, die von sogenannten *Kaikranen* (auch Containerbrücken oder engl. quay cranes, kurz QC) bedient, also gelöscht und beladen werden. Die Kaikrane können sich auf Schienen entlang der Kaimauer bewegen. Anders als in Abbildung 3 dargestellt, ist der Kai nicht an allen Terminals in einer geraden Linie ausgerichtet, sondern abhängig von den örtlichen Gegebenheiten gibt es sehr viele verschiedene Formen von Containerterminals. Dabei ist zu beachten, dass die Kaikrane in der Regel nur an dem geraden Kaiabschnitt arbeiten können, an dem sie sich befinden, weil die Schienen keinen Wechsel in einen anderen Kaiabschnitt mit anderer Ausrichtung zulassen. Je nach Größe der geraden Abschnitte der Kaimauer ergeben sich in jedem Abschnitt ein oder mehrere *Liegeplätze*, an denen Schiffe abgefertigt werden können. Eine Besonderheit stellt ein sogenannter *eingerrückter Liegeplatz* dar, an dem ein Schiff mit Kaikranen von beiden Seiten be-

dient werden kann. Über einen solchen Liegeplatz verfügte zum Beispiel das inzwischen geschlossene Ceres Paragon Containerterminal in Amsterdam [27, 91, 207].

Zum Weitertransport der Container von und zu den Kaikranen auf dem Terminal wird der sogenannte *Horizontaltransport* benötigt. Hierfür werden in der Regel Flurfördergeräte eingesetzt, die sich relativ frei auf dem Terminal bewegen können, was durch die grüne Fläche in obigem Schaubild angedeutet ist. An vielen Terminals erfolgt eine organisatorische Trennung des Horizontaltransports in Wasser- und Landseite. Oftmals werden in diesen beiden Bereichen auch unterschiedliche Gerätetypen verwendet.

2.2.3 Lager

Da die Auslieferung eines Containers in der Regel deutlich nach der Anlieferung erfolgt [23, 31], ist ein Containerterminal mit einem Containerlager ausgestattet. Die Zeit zwischen An- und Auslieferung wird auch *Verweildauer* genannt und liegt für beladene Container meist in der Größenordnung von wenigen Tagen, für leere Container kann sie aber auch deutlich größer sein. Für diese Zeit werden die Container im Containerlager verwahrt. Um eine Erreichbarkeit des Lagers sowohl von der Wasser- als auch von der Landseite zu gewährleisten, ist das Containerlager meist zentral auf dem Terminal positioniert (vgl. Abbildung 3).

In seltenen Fällen werden die Container in nur einer Ebene entweder auf dem Erdboden oder auf Containerchassis gelagert. Der Nachteil ist der enorme Flächenverbrauch und im letzteren Fall die dauerhafte Bindung der Chassis während der gesamten Verweildauer. Eine solche Lagerung findet zum Beispiel auf einigen Intermodalterminals in den USA statt, bei denen ausreichend Lagerfläche vorhanden ist [211].

Aufgrund der großen Anzahl zu lagernder Container und der meist begrenzten Terminalfläche werden die Container an den meisten Terminals zur Lagerung übereinander gestapelt [72, 142]. Die Stapelung kann entweder durch den Horizontaltransport oder durch eigene Stapelgeräte für das Lager erfolgen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Da die Stapelgeräte für das Lager meist nur einen begrenzten Bereich überspannen, ist die Lagerfläche für die Container in der Regel in mehrere Bereiche, auch Lagerblöcke genannt, unterteilt [72]. Dies dient auch der einfacheren Verwaltung der Containerstandorte. Die drei Dimensionen eines Lagerblockes werden dabei oft als Bay, Row oder Reihe und Tier bezeichnet. Dies ist in Abbildung 4 veranschaulicht [120, 179, 227].

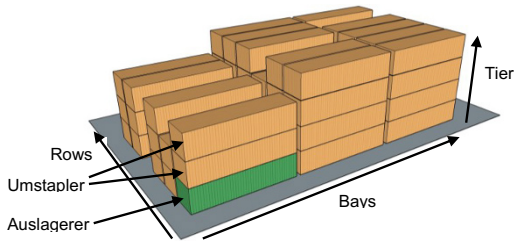


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Lagerblockes

Ein Nachteil der Stapelung von Containern im Lager tritt auf, wenn ein Container wieder ausgelagert werden soll, der von einem oder mehreren anderen Containern überstapelt und damit für das Stapelgerät nicht direkt von oben zugänglich ist. In diesem Fall müssen die über dem auszulagernden Container stehenden Container sukzessive auf einen anderen Stellplatz im Lager transportiert werden. Dieser Transport wird als Umstapeltransport, Umstapelauftrag, Umstapelung oder kurz *Umstapler* bezeichnet. Auch der betroffene (umzustapelnde) Container wird oft Umstapler genannt. In der Regel werden umzustapelnde Container an einem nahegelegenen Stellplatz, zumindest aber im gleichen Lagerblock, wieder abgestellt. In Abbildung 4 ist beispielsweise ein Auslagerer (dunkelgrüner Container) mit zwei Umstaplern (helle, darüber stehende Container) dargestellt. Durch den zusätzlichen Zeitverbrauch des Umstaplers ergibt sich oft eine deutlich längere Gesamtbearbeitungsdauer für Auslieferprozesse [32]. Dadurch wird der ohnehin meist zeitkritische Ladeprozess an Seeschiffen (vgl. Abschnitt 2.1) noch zusätzlich verlängert.

Die Häufigkeit von Umstaplern hängt u.a. von der *Datenqualität* ab, also davon, wie viele verlässliche Informationen über den Weitertransport des Containers zum Zeitpunkt der Anlieferung und damit der Einstapelung vorliegen. Schlechte Datenqualität führt zu einer schlechten Einstapelung und somit zu vielen Umstaplern [142].

Um trotz schlechter Datenqualität eine zügige Beladung der Schiffe zu erreichen, werden die Exportcontainer oftmals rechtzeitig vor Abfertigungsbeginn noch einmal neu im Lager sortiert, so dass sie mit möglichst wenig Umstaplern und kurzen Wegen [219, S.15] zum späteren Liegeplatz des Schiffes transportiert werden können. Dieser Prozess wird als Vorstau, Umlagerung oder *Housekeeping* bezeichnet [108, S. 571] und ist insbesondere bei hoch ausgelasteten Lagern und Lagern mit großer Stapelhöhe sehr wichtig, da hier besonders viele Umstapler auftreten [39, 111]. Bei großen Termi-

nals erfolgt bei Bedarf dabei sogar noch eine Umlagerung in andere Lagerblöcke. Dies erfordert zwar unter Umständen einen enormen Geräteeinsatz, ist jedoch, sofern es in betriebsschwachen Zeiten erledigt werden kann, aus Sicht des Terminals eine bessere Alternative, als die Abfertigungsdauer des Schiffes zu verlängern oder sogar den Reedern vertraglich zugesicherte Liegezeiten oder Produktivitäten nicht einzuhalten.

Für das Vorhalten von Leercontainern gibt es an einigen Containerterminals spezielle Leercontainerlager (vgl. Abbildung 3), weil bei Leercontainern meist deutlich höhere Verweildauern am Terminal auftreten als bei Vollcontainern. Da Leercontainer im Gegensatz zu Vollcontainern bei gleicher Bauart austauschbar sind, erfolgt im Leercontainerlager meist eine deutlich höhere Stapelung der Container.

2.2.4 Landseite

An der sogenannten Landseite eines Containerterminals werden Abfertigungen von LKW- und Bahntransporten realisiert. Diese dienen meist als Versorgungsweg für nicht auf dem Seewege erreichbare Länder oder Regionen. Wirtschaftstarke, kontinental geprägte Regionen sind deswegen oft über längere Straßen- oder Schienenverbindungen an ein Import-Export-Terminal und damit an den Seeverkehr angebunden. Während bei diesen Terminals ein großer Teil der Umschlagsmenge über die Landseite abgefertigt wird, spielt die Landseite bei Transshipmentterminals nur eine untergeordnete Rolle, d.h. die meisten Container erreichen und verlassen das Terminal auf dem Seewege. Große Transshipmentterminals gibt es z.B. in Hongkong und Singapur. Der Containertransport zwischen den landseitigen Umschlagsanlagen und dem Containerlager wird in der Regel ähnlich wie an der Wasserseite mit Hilfe von Geräten für den Horizontaltransport realisiert, d.h. ähnlich wie an der Wasserseite erfolgt die Abfertigung von Zügen (und teilweise auch von LKW) abseits des Containerlagers. Bei Zugabfertigungen am Containerbahnhof gibt es viele Parallelen zur wasserseitigen Schiffsabfertigung, denn auch dort treffen Verkehrsträger ein, die zunächst entladen und dann wieder beladen werden. Insbesondere an größeren Containerbahnhöfen werden hierfür meist Portalkransysteme verwendet, die ein oder mehrere Gleise überspannen und bedienen können.

Bevor die Container vom Zug entladen werden, findet die Erfassung der Containernummern, der Bauart der Container sowie die Überprüfung auf eventuelle Schäden statt, weil die Verantwortung mit der Entladung des Containers vom Zug auf den Terminalbetreiber übergeht. Dieser Vorgang wird auch als *Checken* bezeichnet.

Im Gegensatz zu Schiffen und Zügen befördern LKW meist nur eine geringe Anzahl von Containern. In den allermeisten Fällen kann nur ein Container pro LKW befördert werden. Bei sogenannten Kombi- oder Multitransporten handelt es sich um zwei bis drei Container, in Ausnahmefällen um bis zu vier. Die Erfassung und Prüfung der Container erfolgt in der Regel am sogenannten Checkgate, das in der Regel unmittelbar an der LKW-Zufahrt zum Terminal positioniert ist (vgl. Abbildung 3).

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der LKW-Ankünfte über den Tag (vgl. Abschnitt 2.1) müssen die Umschlagsressourcen für die LKW-Abfertigung für die Last in Spitzenzeiten (Peaksituationen) ausgelegt sein. Außerdem führt die unangekündigte Ankunft der LKW dazu, dass kein Vorstau der Container erfolgen kann (vgl. Abschnitt 2.2.3), so dass hier vermehrt Umstapler anfallen können.

2.3 Auf Containerterminals eingesetzte Gerätetypen

2.3.1 Klassifizierung der Geräte

Für eine grundsätzliche Klassifizierung der Geräte eines Containerterminals bietet sich die Unterscheidung von Transport- und Stapelgeräten an [71], wobei bei ersteren zwischen aktiven und passiven Geräten unterschieden wird:

- *Stapelgeräte*: Reine Stapelgeräte, wie zum Beispiel Kaikrane (Abbildung 5 links), Bahnkrane oder Lagerkrane (Abbildung 5, zweites Gerät von links), können Container zwar selbständig aufnehmen, sind aber, z.B. über Schienen, an einen festen Standort gebunden und damit wenig mobil. Für längere und flexible Transporte über das Terminal sind sie daher nicht geeignet.
- *Passive Transportgeräte*: Demgegenüber sind reine Transportgeräte, wie zum Beispiel AGVs (Abbildung 5, zweites Gerät von rechts) oder Zugmaschinen mit Chassis, nicht in der Lage, einen Container selbstständig aufzunehmen, d.h. sie sind sowohl bei der Aufnahme als auch beim Absetzen eines Containers auf die Hilfe von Stapelgeräten angewiesen. Deswegen werden sie auch als passive Transportgeräte bezeichnet [86, 211].
- *Aktive Transportgeräte*: Eine Kombination von Stapel- und Transportgerät bilden zum Beispiel Portalhubwagen (auch straddle carrier oder van carrier genannt, vgl. Abbildung 5, rechts). Sie können einen Container sowohl selbstständig aufnehmen und absetzen als auch über weitere Strecken und unabhängig

von Schienen transportieren und werden deswegen als aktive Transportgeräte bezeichnet [211]. Darüber hinaus ermöglichen sie je nach Bauart eine Stapelung von Containern, was insbesondere zur flächeneffizienten Lagerung von Containern in Containerlagern genutzt wird.

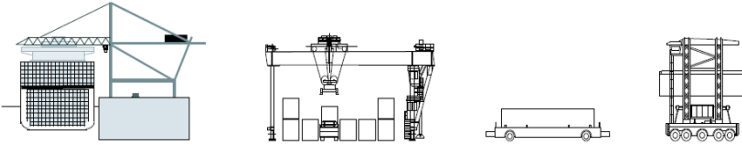


Abbildung 5: Auswahl von Geräten für Containerterminals von links nach rechts: Kaikran, Lagerkran, AGV und Portalhubwagen (aus Meersmans und Dekker [159], mit freundlicher Genehmigung von © Rommert Dekker, 2016. All Rights Reserved)

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist für den Umschlag eines Containers und die damit verbundene Bewegung über das Terminal mehr als ein Gerät erforderlich. Deswegen muss eine sogenannte *Übergabe* des Containers zwischen zwei Geräten stattfinden. Diese findet meist in speziell dafür eingerichteten Übergabe- oder Transferbereichen statt (siehe auch Abbildung 3). Dabei wird zwischen synchronen und asynchronen Übergaben unterschieden:

- *Synchrone Übergabe*: Ist eines der an der Übergabe beteiligten Geräte passiv, müssen beide Geräte an der Übergabeposition ankommen, bevor die Übergabe stattfinden kann, und beide Geräte können erst nach erfolgter Übergabe wieder weiterarbeiten. Deswegen wird diese Art der Übergabe im Folgenden auch als synchrone Übergabe bezeichnet. Dabei können also Wartezeiten bei beiden beteiligten Geräten auf den jeweiligen Partner entstehen.
- *Asynchrone Übergabe*: Demgegenüber spricht man von einer asynchronen Übergabe, wenn beide beteiligten Geräte in der Lage sind, selbständig einen Container aufzunehmen. Dabei kann das bringende Gerät den Container auf dem Boden oder an einer anderen geeigneten Stelle absetzen und unmittelbar danach seine Arbeit fortsetzen. Das holende Gerät kann zu einem beliebigen, späteren Zeitpunkt kommen und den Container aufnehmen. Dabei kann keine Wartezeit auf den Übergabepartner entstehen, außer wenn das holende Gerät an der Übergabeposition ankommt, bevor der Container dort abgesetzt wurde. Dies

lässt sich aber durch eine geeignete Steuerung verhindern, z.B. indem das abholende Gerät erst beauftragt wird, nachdem der Container abgesetzt wurde.

Der Übergabebereich erfüllt im asynchronen Fall eine *Pufferfunktion* und stellt (anders als bei der synchronen Übergabe) in diesem Fall ein Lager dar. Sofern dieses Lager eine ausreichende Kapazität aufweist, kann das bringende Gerät auch nacheinander mehrere Container dort abstellen, bevor diese vom Partnergerät abgeholt werden. Das Entfallen der Wartezeit und die daraus resultierende höhere Produktivität der Geräte sowie die Pufferfunktion des Transferbereiches sind wichtige logistische Vorteile der asynchronen Übergabe, die auch von Vis und Harika [223] belegt und quantifiziert werden. Dem stehen allerdings meist höhere Anschaffungskosten für aktive Horizontaltransporter gegenüber.

Nach dieser grundsätzlichen Klassifizierung der Geräte werden in den folgenden Unterabschnitten einige häufig verwendete Gerätetypen beschrieben. Dabei wird in 2.3.2 bis 2.3.4 zunächst auf die Stapelgeräte eingegangen, bevor in Abschnitt 2.3.5 die Beschreibung der wichtigsten Transportgeräte folgt.

2.3.2 Kaikrane

Der Haupteinsatzzweck von Kaikranen auf Containerterminals besteht im Löschen und Laden von Containerschiffen. Dies wird von einem Katzsystem erledigt, das an einem Ausleger befestigt ist, der über die gesamte Schiffsbreite reicht (vgl. Abbildung 6 links). In Längsrichtung des Schiffes kann der Kaikran auf Schienen verfahren. Aufgrund des sehr hohen Gewichts eines Kaikranes von bis zu mehreren tausend Tonnen kann dieses Verfahren nur sehr langsam erfolgen und erfordert deswegen viel Zeit. Damit gehört der Kaikran zu den Stapelgeräten eines Containerterminals.

Während der Übergabe des Containers zwischen Kaikran und Horizontaltransport findet in der Regel eine Erfassung der Containernummer sowie die Überprüfung auf eventuelle Schäden statt. Anders als bei Bahn und LKW (vgl. Abschnitt 2.2.4) kann diese Überprüfung noch nicht auf dem Schiff erfolgen, weil die Container auf dem Schiff entweder überhaupt nicht oder zumindest nicht von allen Seiten erreichbar sind und damit nicht zuverlässig auf Schäden überprüft werden können.

Bei neueren *Zweikatzkranen* (vgl. Abbildung 6 rechts) erfolgt diese Containererfassung auf einer speziellen *Laschplattform* direkt auf dem Kaikran. Der Transport zwischen Schiff und Laschplattform wird dabei von der wasserseitigen Katze, der sogenannten *Hauptkatze* durchgeführt. Diese wird weitgehend manuell gesteuert. Im

Gegensatz dazu wird der Transport des Containers zwischen Laschplattform und Horizontaltransport von der zweiten Katze, der sogenannten *Portalkatze*, ausgeführt, die auch automatisch betrieben werden kann. Aus logistischer Sicht bietet die Laschplattform eine zusätzliche Puffermöglichkeit für Container.

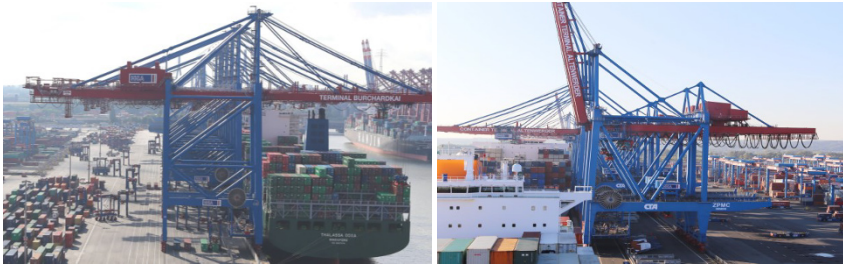


Abbildung 6: Foto von Kaikranen mit einer Katze (links) und zwei Katzen (rechts),
(Mit freundlicher Genehmigung von © HHLA 2016. All Rights Reserved)

Um die Produktivität der Kaikrane zu steigern, kommen verschiedene Arbeitsweisen zum Einsatz, die sich zum einen in der Anzahl der gleichzeitig bewegten Container (Multimodus) und zum anderen in der Arbeitsrichtung unterscheiden. Diese neuen Arbeitsweisen stellen wichtige Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit eines Containerterminals dar [194] und haben auch einen Einfluss auf die Prozesse im Containerlager. Deswegen werden die Arbeitsweisen der Kaikrane in den folgenden Unterabschnitten kurz beschrieben.

2.3.2.1 Gleichzeitige Bewegung mehrerer Container (Multitransport)

Die gleichzeitige Bewegung mehrerer Container (*Multitransport*) wird in der Regel durch technische Vorrichtungen am sogenannten Spreader des Krans realisiert, die es erlauben, mehrere Container gleichzeitig zu transportieren. Die Container können dabei nebeneinander, hintereinander oder übereinander angeordnet sein.

- *Tandem*: Sind die Container nebeneinander angeordnet, wird dies als *Tandemtransport* bezeichnet. Neben den Gewichtsrestriktionen beim Transport mehrerer Container, die für alle drei möglichen Anordnungen gelten, muss beim Tandemmodus eine eventuell vorhandene Laschplattform breit genug sein, um die Container gleichzeitig absetzen zu können. Gleiches gilt für die Übergabepositionen zum Horizontaltransport. Falls es sich um passive Transporter handelt,

müssen diese im richtigen Abstand und möglichst genau parallel positioniert sein. Diese Arbeitsweise wird zum Beispiel am Newport Terminal in Pusan, Südkorea angewendet [201, 203]. Bei aktivem Horizontaltransport können die Container dagegen auf dem Boden abgestellt werden, so dass dieses Problem entfällt, weil die Container in der Regel einzeln weiter transportiert werden.

- *Twin*: Die Bewegung von zwei hintereinander angeordneten Containern durch den Kaikran wird als *Twintransport* bezeichnet. Da die Staupositionen für die Container in Längsrichtung des Schiffes in sogenannten Bays im Abstand von 40 oder 45 Fuß baulich voneinander getrennt sind, ist der Twinmodus nur für 20-Fußcontainer möglich. Bei der Übergabe zum Horizontaltransport ist zu beachten, dass die Container entweder einzeln oder gemeinsam weiter transportiert werden können. Ein einzelner Weitertransport von im Twinmodus gelöschten Containern ist allerdings nur für aktive Horizontaltransporter praktikabel, da die Container vom Kaikran in der Regel gleichzeitig abgesetzt werden sollen. Gleiches gilt analog für Ladetransporte, d.h. bei aktiven Ladetransporten können die Container auch einzeln aus dem Lager zum Kaikran gefahren und dort so hintereinander positioniert werden, dass der Kaikran sie gemeinsam aufnehmen kann. Beim Einsatz passiver Horizontaltransporter müssen die Container dagegen gemeinsam transportiert werden, da der Kaikran in der Regel nicht in der Lage ist, zwei Container gleichzeitig von zwei Horizontaltransportern abzunehmen. D.h. bei passiven Horizontaltransportern müssen die Twinpaare bereits am Lager auf dem Horizontaltransport zusammengestellt werden. Diese Problematik muss bereits in der Planungsphase bei der Erstellung der Arbeitspakete des Kaikrans berücksichtigt werden.
- *Piggyback*: Der gleichzeitige Transport von Containern übereinander am Kaikran wird Piggyback genannt und ist in der Praxis nur sehr selten anzutreffen, da der untere Container nicht direkt am Kaikran befestigt werden kann, sondern stattdessen mit dem oberen Container durch Twistlocks verbunden wird.

Grundsätzlich können alle drei genannten Arbeitsmodi beliebig kombiniert werden, so dass bis zu acht Container gleichzeitig bewegt werden können. Die praktische Umsetzung ist in diesem Fall aber aufgrund der Gewichtsrestriktionen der Kaikrane fast nur für Leercontainer oder sehr leichte Container möglich. Abbildung 7 zeigt einen gleichzeitigen Transport von vier 20'-Containern bei einem Kaikran.



Abbildung 7: Twin-Tandemtransport an einem Kaikran (Mit freundlicher Genehmigung von © Engel und Gielen 2016. All Rights Reserved)

2.3.2.2 Verschiedene Arbeitsrichtungen der Kaikrane

Kaikrane ermöglichen grundsätzlich nur zwei Arbeitsrichtungen, nämlich Löschen und Laden. Dennoch hat sich in den letzten Jahren eine weitere Arbeitsweise etabliert, die sich durch die abwechselnde Durchführung dieser beiden Bewegungen ergibt, d.h. der Kaikran ändert nach jeder Bewegung seine Arbeitsrichtung. Diese Arbeitsweise wird auch als *Double Cycle* [202] oder *Dual Cycle* [1] bezeichnet und zum Beispiel an den Containerterminals in Pusan [201, 203] und Hamburg Altenwerder verwendet [85].

Der wesentliche Vorteil dieser Arbeitsweise liegt darin, dass der Kaikran die Länge seiner Leerfahrten, also der Fahrten ohne Container, drastisch reduzieren kann, denn die relativ langen Fahrten zwischen Schiff und Kai werden nur noch als Lastfahrt, also mit Container, durchgeführt [1]. Leerfahrten finden nur noch innerhalb des Schiffes oder zwischen zwei Übergabepositionen statt und sind damit im Vergleich deutlich kürzer. Allgemein werden solche Kombinationen von Bewegungen, bei denen ein Gerät einen Container an der gleichen Stelle oder in deren unmittelbaren Nähe aufnimmt, an der es vorher einen Container abgesetzt hat, als *Doppelspiel* bezeichnet [77]. Die Anzahl dieser Doppelspiele gilt als Indikator für eine effiziente Steuerung von Geräten und wird deswegen bei der Diskussion der Kennzahlen wieder aufgegriffen (vgl. Abschnitt 5.6).

Durch die Anwendung von Dual Cycle ergeben sich höhere Produktivitäten bei gleichzeitig verringertem Energieverbrauch. Song [203] quantifiziert den Produktivitätsgewinn eines Kaikrans durch Dual Cycle mit rund 30%, während Goodchild und Daganzo [65, 66] die Produktivitätsverbesserung mit 10% bis 20% abschätzen, abhängig davon, ob die Arbeitsweise nur an Deck oder auch im Raum angewendet wird.

Im Gegenzug erfordert Dual Cycle einen deutlich höheren Aufwand bei der Planung der Transporte und es ist eine stärkere Aufmerksamkeit der Menschen erforderlich, da diese stets im Auge behalten müssen, bei welchen Containern es sich um Löscher und um Lader handelt [203]. Dies kann entweder durch geeignete IT-Systeme oder durch besondere Regeln für den Dual Cycle Betrieb, z.B. für die Belegung der Laschplattformen, unterstützt werden.

Außerdem ist die Arbeitsweise Dual Cycle meist nicht durchgängig möglich, weil während einer Schiffsabfertigung meist mehrere Bays eines Schiffes vollständig gelöscht und wieder beladen werden müssen. Dabei muss zunächst eine gewisse Anzahl an Containern gelöscht werden, bevor der erste Container geladen werden kann, wenn die Bay zu Beginn voll beladen ist. Ebenso können am Ende der Bearbeitung einer Bay zuletzt nur noch Container geladen werden. Genauere Vorgaben für die Arbeitsplanung von Dual Cycle sowie Ansätze für eine Optimierung des Dual Cycle Anteils einer Schiffsabfertigung finden sich bei Goodchild und Daganzo [65, 66], (vgl. auch Abschnitt 3.3.3).

Besonders attraktiv ist die Arbeitsweise Dual Cycle nicht nur aufgrund der effizienten Arbeitsweise des Kaikrans, sondern auch beim Horizontaltransport können sich positive Effekte einstellen [1, 85]. Darauf wird unten in Abschnitt 2.3.5 eingegangen.

Dual Cycle hat auch deutliche, positive Effekte auf die Lagerauslastung. Dies wird insbesondere bei der Abfertigung großer Schiffe mit sehr großen Löscher- und Lademengen deutlich. Werden nämlich zunächst mehrere tausend Container gelöscht, bevor mit dem Laden begonnen wird, muss das Lager die gesamte Menge der gelöschten Container kurzfristig aufnehmen [137, 175]. Erst danach werden die ersten Lader ausgelagert und die Lagerauslastung sinkt wieder. Wird dagegen verstärkt Dual Cycle eingesetzt, finden, abgesehen von einigen notwendigen Löschern zu Beginn (siehe oben) die Ein- und Auslagerungen im Lager etwa zeitgleich statt, so dass die Lagerauslastung während der gesamten Schiffsabfertigung nahezu konstant bleibt.

Wie oben beschrieben, stellen sowohl der gleichzeitige Transport mehrere Container durch den Kaikran (und ggf. den Horizontaltransport) als auch die Arbeitsweise Dual Cycle erhöhte Anforderungen an die am Prozess beteiligten Systeme und Menschen. Dies gilt sowohl für die Planung der Arbeitsprozesse als auch für die Komplexität bei der Durchführung, also den operativen Ablauf. Dennoch ist zumindest theoretisch auch die Kombination aller genannten Formen von Multitransporten mit der Ar-

beitsweise Dual Cycle möglich, wenn auch ohne geeignete IT-Unterstützung nicht praktikabel.

2.3.3 Bahnkrane

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, werden häufig spezielle Bahnkrane zur Abfertigung von Zügen an Containerterminals eingesetzt. Hierbei handelt es sich in der Regel um Portalkrane, die sich auf eigenen Schienen entlang der Bahngleise des Containerbahnhofs bewegen können. Am Kran ist eine Katze befestigt, die entlang des Portals verfahren kann. An der Katze befindet sich wiederum ein Hubwerk mit einem Spreader, mit dem sich Container aufnehmen, hochheben und transportieren lassen [142]. Zumeist überspannen die Portale mehrere Bahngleise und sind durch zusätzliche Ausleger (auch *Cantilever* genannt) an einer oder beiden Seiten in der Lage, Container in einem Transferbereich außerhalb des Portals aufzunehmen oder abzusetzen (vgl. Abbildung 8).

Da die Container im Vorstau nicht immer parallel zu den Gleisen angeordnet werden, sondern oft auch orthogonal oder schräg (vgl. Abbildung 8), kann eine Drehung des Containers durch den Bahnkran erforderlich werden. Aus diesem Grund sind Bahnkrane oftmals mit einer Drehvorrichtung ausgestattet, bei der entweder der Spreader oder die ganze Fahrerkabine gedreht wird.

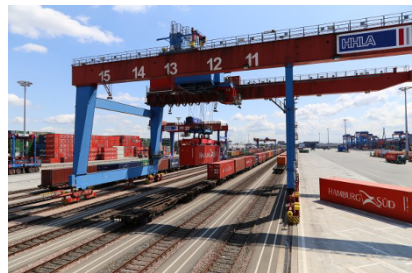
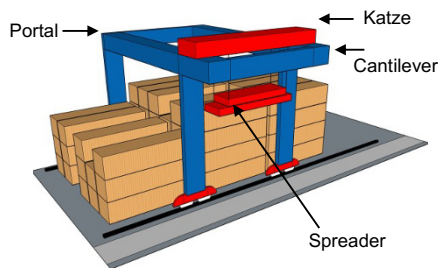


Abbildung 8: Portalkran mit einseitigem Cantilever (links) und Einsatz als Bahnkran für den Transferbereich am Containerterminal Burchardkai (rechts, mit freundlicher Genehmigung von © HHLA 2016. All Rights Reserved)

Neben schienenengebundenen Bahnkranen können auch schienenunabhängige Krane bei der Bahnabfertigung eingesetzt werden, wie zum Beispiel RTGs (vgl. 2.3.4.1) oder bei

kleineren Bahnanlagen auch Reachstacker (vgl. 2.3.5.4) oder Portalhubwagen (vgl. 2.3.5.3).

Grundsätzlich gibt es bei der Arbeitsweise eines Bahnkrans sehr viele Parallelen zu einem Kaikran. Insbesondere ist grundsätzlich der gleichzeitige Transport von mehreren Containern als Twin möglich. Ähnlich wie am Kaikran werden Züge ent- und beladen, wobei die Terminologie Löschen hier in der Regel nicht verwendet wird. Auch die Kombination dieser beiden Arbeitsrichtungen (vgl. Dual Cycle 2.3.2.2) ist möglich. Im Vergleich zum Schiff ist sie sogar einfacher umsetzbar, da die parallele Bearbeitung mehrerer Züge möglich ist und die Bahnkrane deutlich leichter und mobiler als Kaikrane sind und damit zügig und problemlos auch längs des Zuges verfahren können. Dieses Verfahren ist sogar parallel zur Bewegung der Katze des Bahnkrans möglich.

2.3.4 Lagerkrane

Containerlager können entweder durch aktive Geräte des Horizontaltransports, wie zum Beispiel Portalhubwagen, oder durch Lagerkrane bedient werden. Letztere werden insbesondere in Verbindung mit passiven Horizontaltransportern eingesetzt oder, wenn eine besonders flächeneffiziente Lagerung erforderlich ist. Die Lagerkrane können entweder auf Rädern oder auf Schienen betrieben werden. Bei Kranen auf Schienen kann zwischen seitlicher Übergabe des Containers und Übergabe am Kopfende der Lagerblöcke unterschieden werden. Daraus ergeben sich verschiedene Kransysteme, deren Besonderheiten in den folgenden Unterabschnitten beschrieben werden.

Alle diese Kransysteme sind jeweils für die Bedienung des Lagers im Rahmen der Umschlagsprozesse verantwortlich, d.h. sie erledigen den Teil des Containertransports, der in das Lager, aus dem Lager oder innerhalb des Lagers stattfindet. Daraus ergeben sich die folgenden Arten von Transportaufträgen für die Lagerkrane:

1. *Einlagerung*: Ein Container wird vom Lagerkran aus dem Übergabebereich eines Lagerblockes aufgenommen (nachdem ihn ein Fahrzeug des Horizontaltransports dort bereitgestellt hat), ins Lager transportiert und dort am vorgesehenen Stellplatz abgestellt.
2. *Auslagerung*: Ein Container wird vom Lagerkran im Lager aufgenommen, zu einer vorgegebenen Transferposition transportiert und dort abgestellt (z.B. auf einem Fahrzeug des Horizontaltransports oder auf dem Erdboden).

3. *Umstapler*: Ist ein auszulagernder Container nicht der oberste in seinem Stapel, müssen zusätzliche Umstapelaufträge angelegt werden (vgl. 2.2.3). Hierbei handelt es sich also um Containerbewegungen, bei denen der Start- und der Zielstellplatz innerhalb des gleichen Lagerblockes liegen.
4. *Umlagerer*: Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, können Container zeitlich deutlich vor ihrer Auslagerung im Rahmen des Housekeepings neu positioniert werden. Bei Verwendung von Lagerkränen versucht man in der Regel, die Container innerhalb des gleichen Lagerblockes auf eine neue Position zu stellen. Damit liegen Start und Ziel im gleichen Lagerblock und die Bewegung ist ähnlich zu der eines Umstaplers. Im Gegensatz dazu sind Umlagerer aber zeitlich nicht kritisch. Aus diesem Grund werden sie zumeist in betriebsschwachen Zeiten vom Lagerkran ausgeführt [106, 219].

Multitransporte sind bei Lagerkränen kaum verbreitet, weil dies eine recht komplexe Auswahl der Stellplätze voraussetzen würde. Lediglich Bian et al. [9] betrachten Tandemtransporte von Lagerkränen, nennen aber keine Terminals, bei denen diese Technik eingesetzt wird. Aus diesem Grund wird für die vorliegende Arbeit angenommen, dass die Container von Lagerkränen einzeln befördert werden.

2.3.4.1 Gummibereifte Portalkrane (RTGs)

Ähnlich wie Bahnkrane, bestehen gummibereifte Portalkrane (engl. Rubber tired gantry cranes, *RTG*) aus einem Portal, das auf jeder Seite mit Reifen versehen ist. RTGs benötigen zur Fortbewegung keine Schienen und können sich damit in der Ebene relativ frei fortbewegen. Aufgrund des großen, unübersichtlichen Aufbaus kann diese Bewegung aber nur relativ langsam erfolgen, insbesondere, wenn dabei ein Container transportiert wird. Der Transport mit der Katze entlang der Portalbrücke kann dagegen relativ zügig erfolgen.

Die Größe des Portals eines RTGs ist meist so ausgelegt, dass es die Breite eines Lagerblockes und zusätzlich noch eine oder mehrere Fahr- und Übergabespuren für den Horizontaltransport überspannt (siehe Abbildung 9), so dass die Übergabe zum Horizontaltransport auf Höhe der Lagerposition erfolgen kann, um Fahrten der RTGs zu vermeiden [109]. Auf diese Weise werden auch externe LKW abgefertigt.

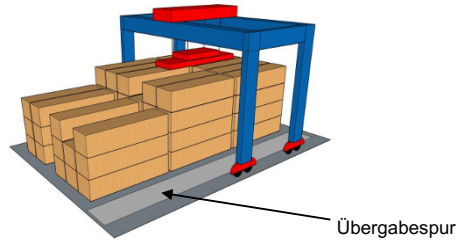


Abbildung 9: RTG und Übergabespur zum Horizontaltransport

Um auch bei Leerfahrten die Bewegung des Portals eines RTGs zu vermeiden, wird meist versucht, innerhalb einer Bay eines Lagerblockes ausschließlich Container für das gleiche Schiff einzulagern. Die Container können dann bei der späteren Auslagerung unmittelbar nacheinander durch ein RTG wieder ausgelagert werden. Durch diese möglichst unterbrechungsfreie Arbeit eines RTGs in einer Lagerbay ergibt sich eine gute Produktivität des RTGs, die idealerweise mit der des Kaikrans übereinstimmt. Entsprechend erfolgt die Arbeitsplanung oft so, dass es eine 1:1-Zuordnung zwischen einem RTG und einem Kaikran gibt, bis die Container einer Bay im Lager (oder mehrerer nebeneinander liegender Bays) vollständig auf das Schiff verladen sind.

Falls bei einer Auslagerung eines Containers durch ein RTG Umstapler anfallen, wird in der Regel versucht, einen neuen Stellplatz für den Umstapler in der gleichen Bay des Lagerblockes zu finden, damit das RTG nicht verfahren muss. Die Umstapler werden dabei vom gleichen RTG bearbeitet, das auch die Auslagerung vornimmt, da nicht mehrere RTGs in der gleichen Bay arbeiten können.

Durch RTGs bediente Lagerblöcke sind in der Regel parallel zur Kaimauer angeordnet, meist in mehreren Reihen parallel nebeneinander [43, 152, 201, 228]. Jede Reihe kann ebenfalls in mehrere Lagerblöcke unterteilt sein und von einem oder mehreren RTGs bedient werden. Ein RTG kann dabei noch relativ leicht in einen benachbarten Lagerblock in der gleichen Reihe fahren. Ein Wechsel des RTG in eine andere Reihe wird aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit und der schlechten Manövrierfähigkeit des Portals möglichst selten durchgeführt [183].

RTGs sind die am häufigsten zur Bedienung von Containerlagern eingesetzten reinen Stapelgeräte. Sie werden an zahlreichen Terminals weltweit eingesetzt und in der Regel manuell bedient. Lediglich am Tobishima Terminal in Japan werden automatische RTGs betrieben [75, 99].

2.3.4.2 Schienengebundene Portalkrane (RMGs)

Schienengebundene Portalkrane sind grundsätzlich sehr ähnlich aufgebaut wie gummi-bereifte Portalkrane. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass das Portal auf Schienen statt auf Rädern bewegt wird. Der Nachteil dieser Konstruktion liegt darin, dass der Arbeitsbereich durch die Position der Schiene beschränkt ist. Damit ist ein Wechsel in einen anderen Lagerblock in einer anderen Reihe (wie beim RTG) nicht möglich. Demgegenüber können RMGs aber problemlos und mit relativ hoher Geschwindigkeit in Längsrichtung des Lagerblockes, also entlang der Schiene, fahren [201]. Dies bietet mehrere Vorteile. Zum einen können die Stellplätze für Umstapler problemlos auch in anderen Bays als der auszulagernde Container gewählt werden. Dadurch müssen nicht in jeder Bay Stellplätze für Umstapler freigehalten werden, sondern es genügt, pro Lagerblock eine gewisse Anzahl von Stellplätzen freizuhalten. Somit kann der Lagerblock höher ausgelastet werden. Durch diese Möglichkeit ergibt sich noch eine weitere Option für die Bearbeitung von Umstaplern. Falls der Zielstellplatz für einen Umstapler nämlich bewusst in einer anderen Bay gewählt wird, entsteht dadurch die Möglichkeit, dass mehrere RMGs im gleichen Lagerblock zusammen an der Auslagerung eines Containers und dessen Umstaplern arbeiten können. Denn sobald ein RMG mit einem umzustapelnden Container die Bay, in der ein Auslagerer freigestapelt werden soll, verlassen hat, kann ein anderes RMG diese Bay anfahren und mit dem nächsten Umstapler bzw. dem Auslagerer beginnen. Dadurch kann sich eine Kooperation mehrerer Lagerkrane ergeben und auch Auslagerungen mit mehreren Umstaplern können zügig ausgeführt werden. Diese Kooperation mehrerer RMGs kann jedoch auch nachteilig sein, weil es vermehrt zu gegenseitigen Behinderungen der Krane kommen kann. Je nach Bauart und technischer Ausgestaltung der RMGs besteht die Gefahr, dass sich die Container oder Krane während der Arbeit berühren, denn zum Heben und Absenken des Containers werden oftmals Seilzüge eingesetzt, bei denen der Container in jeder Richtung leicht pendeln kann. Aus diesem Grund beträgt der Mindestabstand zweier RMGs beim Aufnehmen und Absetzen von Containern mehr als die maximale Containerlänge.

Diese Mindestabstände der RMGs sind eine mögliche Ursache für *Kranbehinderungen*. Allgemeiner wird im Folgenden von einer Behinderung eines RMGs gesprochen, wenn ein Kran sein nächstes Ziel aufgrund der Position eines anderen Krans im gleichen Block nicht auf direktem Wege oder nur mit Zeitverzögerung erreichen kann. Kann er sein Ziel vorübergehend überhaupt nicht anfahren, weil ein anderer Kran ge-

rade an einer nahegelegenen Position arbeitet, kann es sogar dazu kommen, dass der Kran zeitweise anhalten und auf den anderen Kran warten muss.

Trotz der Gefahr von Behinderungen überwiegen die Vorteile des RMGs gegenüber dem RTG, so dass RMGs heute an zahlreichen Containerterminals eingesetzt werden. Dabei haben sich je nach Layout des Terminals unterschiedliche Anforderungen für die RMGs entwickelt, so dass es grundsätzlich verschiedene Typen von RMGs gibt, die sich zum einen in der Anzahl der eingesetzten RMGs pro Lagerblock und zum anderen in der Anzahl der pro Block verwendeten Schienenpaare unterscheiden. Die unterschiedlichen RMG-Typen und ihre Besonderheiten werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Ein Vergleich der verschiedenen Typen von RMGs für Lager-systeme findet sich u.a. bei Johnson [98, 99], Kemme [108] und van Valkengoed [219].

2.3.4.3 RMG mit seitlichem Ausleger (Cantilever)

Die Schiene, auf der ein RMG fährt, erschwert die Übergabe von Containern mit dem Horizontaltransport an der Längsseite eines Lagerblockes, da sie je nach Ausgestaltung entweder überhaupt nicht vom Horizontaltransport überfahren werden kann oder hier zumindest erhöhte Vorsicht aufgrund der möglichen Kollisionsgefahr geboten ist. Um ein Überfahren der Schiene durch den Horizontaltransport zu vermeiden, können RMGs mit Cantilever eingesetzt werden, die sehr ähnlich wie Bahnkrane konstruiert sind (vgl. Abbildung 8). Dadurch bildet die Schiene des RMGs die Grenze zwischen Lagerbereich und Übergabe zum Horizontaltransport. Es kann zwischen RMGs mit einem und zwei Cantilevern unterschieden werden. Bei letzteren sind Containerübergaben an beiden Längsseiten des Lagerblockes möglich. In beiden Fällen werden die RMGs in der Regel von einem Menschen bedient. Lediglich am Newport Terminal in Pusan werden automatische Cantilever-RMGs eingesetzt [201, 203]. Insgesamt hat das RMG mit seitlichem Ausleger sehr viele Ähnlichkeiten zum RTG. Außer in Pusan werden RMGs mit seitlichem Ausleger aktuell z.B. am Wan-Hai Terminal in Tokio und am Evergreen Terminal in Kaohsiung, Taiwan [99] eingesetzt.

Es gibt auch Containerterminals, bei denen die RMGs neben dem Lager und dem Übergabebereich zum Horizontaltransport auch noch Bahngleise überspannen [5]. Dadurch wird eine integrierte Bedienung von Lager und Bahn ermöglicht. Dies erlaubt zwar einen sehr flexiblen und effizienten Einsatz der RMGs, kann aber andererseits auch einen Engpass darstellen. Durch die größere Spannweite der Krane erhöhen sich

nämlich die Fahrstrecken der Katze, so dass die Produktivität des RMGs geringer ist. Damit ist eine zeitgleiche und gute Versorgung von Bahn und Wasserseite nicht mehr sichergestellt. Aus diesem Grund kommt diese Konstruktion nur bei Terminals mit kleiner Umschlagsleistung an der Bahn oder an Intermodalterminals zum Einsatz.

2.3.4.4 RMG mit Übergabe am Kopfende des Lagerblockes

Der größte Vorteil von RMGs und damit ein ausschlaggebender Aspekt für seine zunehmende Verbreitung in den letzten Jahren ist die zuverlässige und genaue Positionierung des Krans mit Hilfe der Schienen und die damit verbundene Möglichkeit der Automatisierung, d.h. schienengebundene Portalkrane ermöglichen einen automatischen Betrieb, bei dem das Aufnehmen, Transportieren, Absetzen und Stapeln von Containern ohne menschliche Eingriffe möglich sind.

Lediglich bei Containerübergaben zu einem menschlich bedienten Horizontaltransport ist je nach technischer Ausgestaltung und den Sicherheitsrichtlinien des jeweiligen Landes ein menschliches Eingreifen erforderlich. Dies wird in der Regel über eine Fernsteuerung des Krans realisiert [129]. Die Fernsteuerer (engl. remote operator) steuern den sicherheitskritischen Teil der Bewegung mit Hilfe eines Joysticks und eines Kamerasystems.

Bei automatisierten RMGs wird aus Sicherheitsgründen die Einfahrt von Horizontaltransportern, insbesondere von externen LKW, in den Lagerbereich vermieden. Anders als bei RTGs oder bei RMG-Lagern mit seitlicher Übergabe findet deswegen die Übergabe von Containern bei automatischen RMGs in der Regel nicht an den Längsseiten des Lagerblockes statt, sondern an den Kopfseiten. Dort sind für jeden Lagerblock Übergabespuren für externe LKW und ggf. separate Spuren für die Horizontaltransporte zur Bahn in der gleichen Ausrichtung wie die Containerstapel angeordnet, so dass die Container ohne Drehung zwischen RMG und Horizontaltransport übergeben werden können (vgl. Abbildung 10). Es gibt auch RMGs, die eine Übergabe sowohl am Kopfende als auch an den Längsseiten des Blockes erlauben. Diese sind zum Beispiel am Thamesport in England im Einsatz [99]. Da diese Bauweise selten verwendet wird, wird sie im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet.



Abbildung 10: Von RMG bediente Lagerblöcke mit landseitigen Übergabepositionen am Containerterminal Burchardkai (Mit freundlicher Genehmigung von © HHLA 2016. All Rights Reserved)

Für die Bedienung eines Lagerblockes mit Übergabe am Kopfbende haben sich vier verschiedene RMG-Systeme etabliert, die sich zum einen in der Anzahl der Krane und zum zweiten in der Anzahl der Schienenpaare unterscheiden, auf denen die Lagerkrane fahren. Diese vier Kransysteme und ihre Besonderheiten werden nun beschrieben.

Single RMG

Das einfachste RMG-System, das sogenannte *Single RMG*, besteht nur aus einem Kran pro Lagerblock (siehe Abbildung 11 links). Dieser ist sowohl für die Bedienung landseitiger Transporte als auch für die Bedienung der Wasserseite verantwortlich. Der Vorteil dieses Systems liegt im einfachen, platzsparenden und effizienten Design des Lagerblockes. Dennoch wird das Single RMG-System heute kaum genutzt, weil es einen wesentlichen Nachteil mit sich bringt: Falls der Kran gestört ist oder sogar für längere Zeit ausfällt, ist der ganze Lagerblock nicht mehr funktionsfähig. Insbesondere können dort eingestapelte Container nicht mehr ausgelagert werden, was sehr kritisch ist, falls diese kurzfristig auf ein Schiff verladen werden sollen und dessen Abfahrt sich dadurch verzögert.

Ein Beispiel für die Nutzung eines Single RMG stellt das ECT Terminal in Rotterdam dar. Dies war gleichzeitig das erste Containerterminal, das ein automatisches RMG-System zur Bedienung eines Containerlagers einsetzte [99, 188-189].

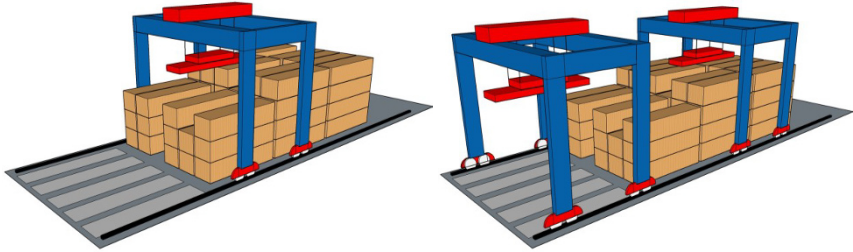


Abbildung 11: Single RMG (links) und Twin RMG (rechts),
jeweils mit Übergabebereich zum Horizontaltransport

Twin RMG

Eine Weiterentwicklung des Single RMG stellt das *Twin RMG* dar (vgl. Abbildung 11 (rechts)). Hierbei wird ein zweiter Kran pro Lagerblock eingesetzt, der im wesentlichen baugleich zu dem ersten Kran ist und sich auf dem gleichen Schienenpaar bewegt. Durch diesen Aufbau arbeitet der wasserseitige Kran für die Wasserseite und der andere Kran für die Landseite. Umstapel- und Umlagerbewegungen können von beiden Kranen bearbeitet werden.

Im Falle einer Störung oder Wartung eines Krans kann dieser zu seiner Wartungsposition gefahren werden, die sich in der Regel am äußersten Ende der Schienen außerhalb des Lagerbereichs und jenseits des Übergabebereiches befindet. Dadurch kann der andere Kran den Übergabebereich noch erreichen und damit beide Seiten des Lagerblockes bedienen. So kann die Funktionsfähigkeit des Lagerblockes auch mit einem aktiven RMG noch aufrecht erhalten werden, was einen deutlichen Vorteil gegenüber dem Single RMG darstellt. Einen weiteren Vorteil bildet die höhere Produktivität des Lagerblockes, die durch den zweiten Kran ermöglicht wird. Außerdem ist es durch diese höhere Produktivität oftmals möglich, eine größere Lagerkapazität pro Lagerblock zu bedienen und dadurch mit vertretbarem Geräteeinsatz eine gute Umschlagsleistung zu erzielen. Auch dadurch, dass nur ein Schienenpaar pro Lagerblock erforderlich ist, unterstützt das Twin RMG eine hohe Lagerkapazität auf einer gegebenen Fläche, was insbesondere auf Terminals mit knapper Fläche ein wichtiges Kriterium ist. Twin RMGs sind aktuell an mehreren Terminals weltweit im Einsatz, unter anderem am DPW Antwerp Gateway in Belgien [99], bei APMT in Portsmouth, Virginia [53, 99, 108] und am Euromax Terminal in Rotterdam [99].

DRMG (Double RMG)

Ähnlich wie beim Twin RMG arbeiten auch beim *DRMG*-System zwei Krane pro Lagerblock. Der zweite Kran ist allerdings beim *DRMG* auf einem eigenen Schienenpaar angeordnet und etwas größer als der andere Kran konstruiert, so dass er den kleineren Kran auf dem inneren Schienenpaar überfahren kann. Falls der große Kran dabei einen Container transportiert, muss dieser mit der Katze vorher an eine seitliche Position gefahren werden, die auch Überholposition genannt wird, so dass der Container seitlich am kleinen Kran vorbeigeführt wird (vgl. Abbildung 12 links). Falls der große Kran keinen Container transportiert, kann eine Überholung unter gewissen Umständen auch stattfinden, ohne dass die Katze auf die Überholspur gefahren wird. Dies hängt von der genauen Konstruktion der Krane ab. Hierbei ist die Position der Katze des kleinen Krans zu beachten, da diese höher ist als das Portal des kleinen Krans und somit Kollisionsgefahr mit dem Spreader des großen Krans besteht (Abbildung 12 links).

Diese Konstruktion des *DRMG* ermöglicht es, dass beide Krane die Übergabebereiche an beiden Seiten des Lagerblockes bedienen können, und erlaubt somit einen sehr flexiblen Einsatz der Krane in Abhängigkeit von der jeweiligen betrieblichen Situation. Auf diese Weise können z.B. Lastspitzen an einer Seite des Lagerblockes besser aufgefangen oder beide Krane auch dann ausgelastet werden, wenn an der Landseite keine Aufträge anstehen, zum Beispiel nachts und am Wochenende.

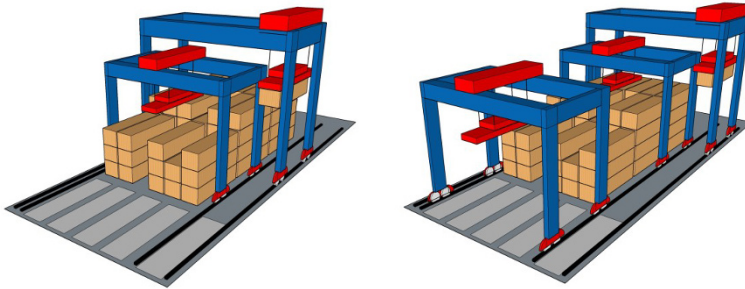


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Lagerblockes mit DRMG (links) und mit TRMG (rechts), jeweils mit seitlicher Überholmöglichkeit des großen Krans

Wie beim Twin RMG kann der Betrieb des Lagerblockes auch im Falle einer Kranstörung durch den anderen Kran aufrecht erhalten werden [129]. Durch die Überfahrmöglichkeit kann dies beim *DRMG* sogar erfolgen, ohne dass der gestörte Kran zu einer

speziellen Wartungsposition gefahren wird. Lediglich wenn der kleine Kran gestört ist, kann der große Kran auf den Lagerbereich, an dem der kleine Kran steht, aufgrund der Konstruktion der Krane nicht zugreifen. Ein DRMG-System befindet sich aktuell am Containerterminal Altenwerder (CTA) in Hamburg im Einsatz [129, 205, 206].

TRMG (Triple RMG)

Beim TRMG-System werden drei Lagerkrane pro Block eingesetzt (vgl. Abbildung 12 rechts). Dabei werden die Vorteile von Twin- und DRMG-System kombiniert, indem zwei kleinere, baugleiche Krane wie beim Twin RMG auf dem inneren Schienenpaar fahren und ein größerer Kran mit Überholmöglichkeit wie beim DRMG auf dem äußeren Schienenpaar fährt. Damit steht für jede Seite des Lagerblockes ein Kran zur Verfügung und der dritte, größere Kran kann je nach Bedarf auf einer der beiden Seiten unterstützen oder für Umstapler oder Umlagerer innerhalb des Lagerblockes eingesetzt werden. Dadurch ergibt sich eine höhere Produktivität des Lagerblockes als bei den anderen Kransystemen und auch im Fall von Kranstörungen oder -wartungen ist, anders als bei den Systemen mit zwei Kranen, noch eine relativ hohe Produktivität gewährleistet. TRMGs werden aktuell am Containerterminal Burchardkai in Hamburg eingesetzt [49, 108].

Gemeinsames Bewegungsmuster der vier Kransysteme

Die vier oben beschriebenen Lagerkransysteme verhalten sich sehr ähnlich, d.h. sie haben ein relativ ähnliches Bewegungsmuster, auf das in diesem Abschnitt näher eingegangen wird. Abbildung 13 zeigt die wesentlichen Abarbeitungsschritte eines Auftrags im Zeitverlauf. Dieses Bewegungsmuster bildet die Grundlage für die spätere Entwicklung eines auf alle vier Kransysteme anwendbaren Optimierungsverfahrens.

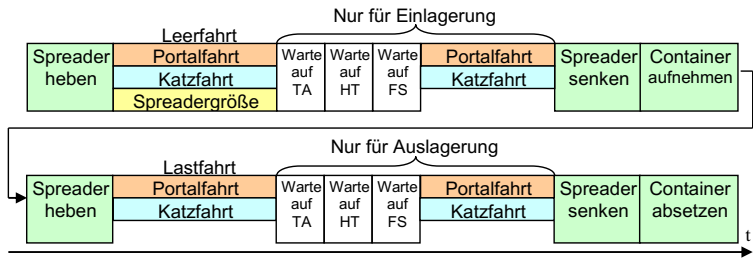


Abbildung 13: Bewegungsmuster eines RMGs im zeitlichen Verlauf eines Auftrags (Zykluszeit)

In der ersten Zeile sind dabei die Schritte der Leerfahrt dargestellt, die mit der Aufnahme des Containers durch den Spreader des Krans endet. In der zweiten Zeile ist die Lastfahrt abgebildet, während der der eigentliche Transport des Containers stattfindet und die mit dem Absetzen des Containers am Zielort endet. Beide zusammen ergeben die gesamte Auftragsdauer, die auch Zykluszeit genannt wird [57]. Man erkennt, dass beide Teilfahrten bis auf die Anpassung der Spreadergröße, welche nur bei der Leerfahrt erforderlich ist, identisch ablaufen. Ein ähnliches Auftragsmodell ist auch bei Saanen [188, S.209] zu finden. Dort wird allerdings die Anpassung der Spreadergröße nicht als eigener Schritt dargestellt. Da dies in der Regel sehr langsam geschieht, kann eine Veränderung der Spreadergröße von 20 auf 40 Fuß oder umgekehrt rund eine halbe Minute in Anspruch nehmen. Besonders bei kurzen Leerfahrwegen, wie sie insbesondere bei Doppelspielen vorkommen, kann dies zu einer erheblichen Verlängerung der Auftragszeit führen. Deswegen wird es in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt. Bei Lagerkränen mit Übergabe am Kopfende des Lagerblockes spricht man von einem Doppelspiel, wenn bei der Auslagerung eines Containers nach dem Absetzen im Übergabebereich unmittelbar nachfolgend ein anderer Container aus dem gleichen Übergabebereich aufgenommen und im Block eingelagert wird. Dabei fällt in der Regel nur eine kurze Leerfahrt des Krans an, die darin besteht, eine neue Position innerhalb des gleichen Übergabebereichs anzufahren.

Jede einzelne Fahrt eines Lagerkrans beginnt in der Regel damit, dass der Spreader des Krans auf eine Mindesthöhe angehoben wird, die es erlaubt, die im Lager stehenden Container zu überfahren. Anschließend erfolgt die Bewegung von Portal und Katze zum Fahrtziel. Dies kann bei den meisten Kranen gleichzeitig stattfinden. Parallel dazu findet auch die Anpassung der Spreadergröße statt. Diese wird in der Regel noch nicht während des Anhebens des Spreaders begonnen, da es bei einer Vergrößerung des Spreaders sonst zu Kollisionen mit auf den umliegenden Stellplätzen stehenden Containern kommen könnte.

Falls es sich bei einer Leer- oder Lastfahrt um eine Fahrt zu einer Übergabeposition handelt, muss der Kran in einigen Fällen vor der Einfahrt in den Übergabebereich an der sogenannten Halteposition warten, also seine Fahrt unterbrechen. Dies ist genau dann der Fall, wenn mindestens einer der folgenden drei Fälle eintritt:

1. **Warten auf Einfahrt in den Transferbereich (TA):** Der Kran kann nicht in den Übergabebereich einfahren, weil sich ein anderer Kran darin befindet. Dies kann nur beim DRMG oder TRMG auftreten. Die Krane dürfen sich jedoch

nicht gleichzeitig darin befinden, weil sie aufgrund der Bauweise nicht gleichzeitig eine Übergabe durchführen können. Aus diesem Grund wartet ein Kran außerhalb des Übergabebereichs, bis der andere Kran diesen wieder verlassen hat. Ausnahmen von dieser Regel sind nur dann zulässig, wenn der Transferbereich so groß ist, dass mehrere Krane gleichzeitig dort arbeiten können. Da so große Übergabebereiche wenig verbreitet sind, wird dies in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.

2. **Warten auf Horizontaltransport (HT):** Der Kran soll nicht in den Übergabebereich einfahren, weil das Fahrzeug des Horizontaltransports, mit dem die Übergabe stattfinden soll, noch nicht eingetroffen ist. Dies geschieht, um den Übergabebereich nicht längere Zeit zu blockieren. Bei einem Absetzen des Containers durch den Lagerkran kann dieser Fall nur bei einer synchronen Übergabe auftreten (vgl. Abschnitt 2.3.1).
3. **Warten auf Fernsteuerer (FS):** Der Kran benötigt zur Übergabe einen Fernsteuerer, zum Beispiel weil es sich um eine Übergabe mit einem externen LKW handelt. In diesem Fall wartet der Kran ebenfalls vor dem Übergabebereich, bis sich ein Fernsteuerer aufgeschaltet hat und der Fahrauftrag unter manueller Kontrolle abgeschlossen werden kann.

Liegt keiner der drei genannten Gründe (mehr) vor, kann der Kran in den Übergabebereich einfahren. Dazu werden Portal und Katze des Krans an die Zielposition innerhalb des Übergabebereichs verfahren. Sind beide Bewegungen beendet, beginnt das Aufnehmen bzw. Absetzen des Containers. Dabei wird der letzte Streckenabschnitt unmittelbar vor der Landung des Spreaders bzw. des Containers in der Regel mit einer sehr langsamen Absetzbewegung vollzogen, damit es durch den ruckartigen Aufprall nicht zu Beschädigungen des Spreaders oder des Containerinhalts kommt. Dies wird auch als *Schleichfahrt* bezeichnet und wird zum Beispiel auch von Saanen [188] beschrieben. Bei einigen Kransystemen wird auch der Start des Anhebens des Spreaders oder des Containers als Schleichfahrt durchgeführt. Ist die Landung abgeschlossen, kann das Aufnehmen oder Absetzen des Containers beginnen, das im wesentlichen in der Ver- oder Entriegelung des Containers am Spreader besteht.

Durch das Warten der Krane an der Halteposition können sich teilweise recht umständliche Fahrwege der Krane ergeben, wie das in Abbildung 14 dargestellte Beispiel zeigt. Dabei befindet sich der große Kran gerade im Transferbereich, während der

kleine Kran an der Halteposition darauf wartet, dass er ebenfalls in den Transferbereich einfahren darf. Dazu muss der große Kran nach der Aufnahme seines Containers zunächst seine Katze entlang der roten durchgezogenen Linie auf die Überholposition fahren. Anschließend kann der große Kran aus dem Transferbereich herausfahren, während der kleine Kran gleichzeitig einfahren kann (jeweils entlang der grünen gestrichelten Linien).

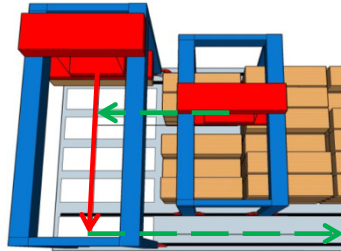


Abbildung 14: DRMG-Fahrwege bei Aktivität im gleichen Transferbereich (Draufsicht)

Gibt es für einen Kran, dessen letzter Auftrag eine Auslagerung in einen Transferbereich war, keinen Folgeauftrag, so ist es für das DRMG und TRMG sinnvoll, diesen Kran aus dem Übergabebereich heraus zu steuern, damit dieser für eventuelle Übergaben des anderen Krans frei ist und der Auftrag des anderen Krans nicht durch das in Abbildung 14 beschriebene Fahrverhalten unnötig verzögert wird. Aus diesem Grund werden den Kranen sogenannten *Parkfahrten* zugewiesen, wenn sie sich im Übergabebereich befinden und nicht unmittelbar einen Folgeauftrag bekommen. Das Ziel dieser Parkfahrt wird entweder knapp außerhalb des Übergabebereiches gewählt oder an einer fest definierten Parkposition. Für den großen Kran kann diese Parkposition so gewählt werden, dass sich die Katze auf der Überholposition befindet und den kleinen Kran auf keinen Fall behindert. Bei Single und Twin RMGs sind Parkfahrten in der Regel nicht nötig, weil es entweder keinen anderen Kran gibt oder dieser in der Regel nicht im gleichen Transferbereich arbeitet.

Wird die Katze des großen Krans nicht in die Überholposition gebracht oder steht der kleine Kran auftragslos im Lagerblock, kann es ebenfalls dazu kommen, dass der Kran im Weg steht und andere Krane bei der Ausführung ihrer Aufträge behindert. Neben dem DRMG und TRMG kann dies auch beim Twin RMG auftreten. Ähnlich zu den Parkfahrten, wird dem im Weg stehenden Kran in diesem Fall eine *Ausweichfahrt*

zugewiesen. Das Ziel dieser Ausweichfahrt wird in der Regel so gewählt, dass andere Krane bei ihren folgenden Aufträgen nicht behindert werden. Während einer Park- oder Ausweichfahrt kann dem Kran jederzeit ein anderer Auftrag zugeordnet werden, so dass der Kran sein Ziel verwirft und sofort das Ziel des neuen Auftrags anfährt.

2.3.4.5 Brückenkran, Overhead Bridge Cranes

Eine seltene Form von Kransystemen zur Bedienung von Containerlagern sind Brückenkrane (engl. overhead bridge cranes). Diese Krane bewegen sich ebenfalls auf Schienen, die auf einen Ständerwerk oberhalb des Lagerblockes statt auf dem Erdboden verlegt sind. Dem Nachteil dieser aufwendigeren Konstruktion steht der Vorteil der höheren Bewegungsgeschwindigkeit gegenüber [36]. Brückenkrane zur Lagerbedienung werden teilweise am Pasir Panjang Terminal in Singapur verwendet [36, 99].

2.3.5 Horizontaltransport

Für den Transport von Containern über die Fläche eines Containerterminals werden verschiedene, in der Regel terminaleigene, Flurförderfahrzeuge eingesetzt. Die am häufigsten eingesetzten Typen dieser Flurförderfahrzeuge werden in diesem Abschnitt erläutert. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 aufgezeigt, wird dabei unterschieden zwischen aktiven Fahrzeugen, die Container selbst aufnehmen können und passiven Fahrzeugen. Häufig eingesetzte passive Fahrzeuge sind vor allem Einheiten aus Zugmaschine und Containerchassis (2.3.5.1) und bei moderneren Terminals auch fahrerlose Transportfahrzeuge, aus dem englischen auch *automated guided vehicles*, AGV, benannt (2.3.5.2). Häufig eingesetzte aktive Flurförderfahrzeuge sind Portalhubwagen (2.3.5.3) und Reachstacker (2.3.5.4).

Neben der Bauart der Fahrzeuge ist bei Horizontaltransportern auch die Organisation zu unterscheiden. Häufig sind die Fahrzeuge in relativ kleine Gruppen gegliedert, wobei jede Gruppe zum Beispiel fest einem Kaikran oder Bahnkran zugeordnet ist. In Anlehnung an die englische Bezeichnung wird eine solche Gruppe auch als *Gang* und die Organisationsform als *Gangstruktur* bezeichnet. Speziell bei manuell bedienten Fahrzeugen ist dies eine naheliegende Organisation, weil für jeden arbeitenden Kai- oder Bahnkran das Personal für einen Gang bestellt werden muss, der dann in der Regel für die Dauer einer Schicht zusammenarbeitet [7, 90, 211].

Arbeitet der Kaikran dann im reinen Lösch- oder Lademodus, entstehen allerdings meist recht lange Leerfahrten der Horizontaltransporter [204], da diese zum Beispiel

beim Löschen nach jedem Absetzen eines Containers im Lager wieder zum Kaikran zurückkehren müssen. Damit entspricht die Länge der Leerfahrt immer der Länge der vorhergehenden Lastfahrt. Beim reinen Ladebetrieb des Kaikrans verhält es sich entsprechend umgekehrt.

Arbeitet der Kaikran dagegen im Dual Cycle Betrieb, müssen abwechselnd Löscontainer vom Kaikran ins Lager und Ladecontainer aus dem Lager zum Kaikran gefahren werden. Dabei kann der Horizontaltransport nach jeder Bewegung eines Containers zum Kaikran ein Doppelspiel durchführen, indem er dort einen Löscontainer aufnimmt. Im Fall passiver Horizontaltransporter kann die Leerfahrt sogar völlig entfallen, d.h. der Kaikran nimmt zuerst den Ladecontainer vom Horizontaltransporter ab und setzt später an der gleichen Position des Fahrzeugs einen Löscontainer wieder auf. Hierbei entsteht allerdings eine gewisse Wartezeit des Horizontaltransports, die jedoch in den meisten Fällen von kürzerer Dauer als eine Fahrt ist, auf jeden Fall aber weniger Energie erfordert [1].

Auch durch das Einlagern von Löscontainern in der Nähe der Ladecontainer lassen sich bei Dual Cycle Leerfahrten verkürzen. Das Einsparpotential hängt dabei wesentlich vom Layout des Terminals und von der Planung der Lagerflächen für Import- und Exportcontainer ab [213, 236]. In den meisten Fällen sind die entstehenden Leerfahrten im Lager aber kürzer als die ohne Dual Cycle erforderliche Leerfahrt zum Kaikran [65]. Insgesamt reduziert sich also durch die Arbeitsweise Dual Cycle sowohl die Länge der Leerfahrten des Horizontaltransports als auch die Anzahl der Fahrten des Horizontaltransports zum Kaikran und damit die Wahrscheinlichkeit von dort auftretenden Verkehrsbehinderungen.

Um diese Fahrwegsreduzierungen nicht nur bei Dual Cycle realisieren zu können, kann man insbesondere automatische Horizontaltransporter zu größeren organisatorischen Einheiten, sogenannten *Pools*, zusammenfassen. Dadurch ergeben sich meist bessere Voraussetzungen für eine Optimierung der Leerfahrwege der Horizontaltransporter [26, 204, 229]. Die Organisation kann dabei so erfolgen, dass eine Gruppe von Fahrzeugen mehreren statt einem einzelnen Kaikran, einem ganzen Schiff, an dem mehrere Kaikrane arbeiten, der ganzen Wasserseite oder sogar dem ganzen Terminal zugeordnet ist. In diesem Fall steht für die Auswahl eines Folgeauftrages eine deutlich größere Menge an möglichen Folgeaufträgen zur Verfügung und es kann mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Folgeauftrag mit kurzer Leerfahrt gefunden werden, sofern eine IT-gestützte, automatische Auftragssteuerung verwendet wird [26].

Ein einfacher Ansatz zum Pooling von Horizontaltransportern, der auch von Song [202, 203] vorgeschlagen wird, sieht einen gemeinsamen Pool von Fahrzeugen für zwei nebeneinander arbeitende Kaikrane vor, von denen einer lüschet und der andere lädt. Dann können die Fahrzeuge nach dem Absetzen eines Laders am ladenden Kai- kran nach einer kurzen Leerfahrt einen Lüschcontainer am lüschenden Kai- kran aufnehmen, was ebenfalls zu einer erheblichen Einsparung von Leerfahrten führen kann.

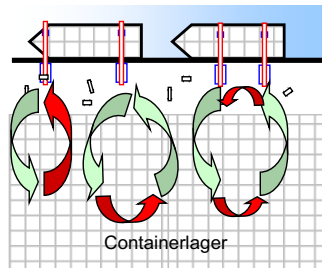


Abbildung 15: Schematischer Vergleich von Leerfahrwegen (dunkelrot) und Lastfahrwegen (hellgrün) bei Gangstruktur (links), Dual Cycle (Mitte) und Pooling über zwei Kaikrane (rechts)

In Abbildung 15 sind die Leer- und Lastfahrten des Horizontaltransports bei Gangstruktur (links), Dual-Cycle (Mitte) und Pooling über zwei Kaikrane (rechts) schematisch dargestellt.

Bei vollautomatisch arbeitenden AGVs wird häufig ein Pool aus allen Fahrzeugen gebildet [69, 188]. Auch ein Pooling, das sowohl wasser- als auch landseitige Horizontaltransporter einbezieht, kann sich lohnen. Dabei können im Idealfall alle Fahrzeuge jeden Auftrag bearbeiten und sind damit vollständig austauschbar [113], wodurch sich sehr gute Potentiale für Optimierungen der Leerfahrten ergeben [211, 208].

2.3.5.1 Zugmaschinen mit Containerchassis

Die verbreitetste Art des Horizontaltransports für Container ist die Kombination aus Zugmaschine und Containerchassis. Hier wird bei terminalinternen Transporten eine sehr ähnliche Technik verwendet wie bei LKW, die auch weltweit zum Containertransport auf öffentlichen Straßen eingesetzt werden. Das Containerchassis liegt dabei vorne auf einer Sattelfläche auf und kann bei den terminaleigenen Zugmaschinen sehr einfach und automatisch abgestellt werden, so dass eine synchrone Containerübergabe zu anderen Geräten stattfinden kann, ohne dass die Zugmaschine die Übergabe abwar-

ten muss. Dies ermöglicht eine hohe Produktivität der Zugmaschinen. Es gibt aber auch Terminals, an denen Zugmaschine und Chassis nicht getrennt werden und stattdessen eine dauerhafte Einheit bilden. Zugmaschinen werden weltweit an sehr vielen Containerterminals eingesetzt, vor allem in Asien, wie z.B. an den Terminals Wan-Hai und Tobishima in Tokio und am Evergreen Terminal in Kaohsiung in Taiwan. In Europa werden sie z.B. am Thamesport Terminal in England eingesetzt [99].

Oftmals wird auch die Möglichkeit genutzt, mehrere Container hintereinander auf dem Chassis zu transportieren (Twintransport). Außerdem sind auf öffentlichen Wegen größere LKW im Einsatz, die in Mitteleuropa bis zu drei TEU transportieren können. Dabei wird der eine Teil der Container direkt auf der Zugmaschine transportiert und ein weiterer Teil auf dem Anhänger. Außerhalb des öffentlichen Wegenetzes kommen auch längere Multitrailer zum Einsatz, bei denen ein LKW mehrere Anhänger zieht [52].

Auch Tandemtransporte des Kaikrans können unterstützt werden [98], indem das Tandempaar von zwei Zugmaschinen getrennt zum Kaikran gefahren bzw. von dort abgeholt wird. Die synchrone Übergabe kann jedoch erst erfolgen, wenn beide Zugmaschinen zur Übergabe bereit sind. Dadurch können Wartezeiten bei Kaikran und Zugmaschine entstehen. Zugmaschinen in Verbindung mit Tandemtransporten der Kaikrane werden zum Beispiel am Newport Terminal in Pusan eingesetzt [201, 203].

2.3.5.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge (AGVs)

Die Entwicklung von fahrerlosen Transportfahrzeugen fand ursprünglich unabhängig von dem Gedanken statt, damit Container zu transportieren. Aus diesem Grund verfügen sie heute über eine bewährte Technik für Steuerung, Antrieb und Navigation der Fahrzeuge. Im weiteren Verlauf der Arbeit sind mit AGVs stets automatische Fahrzeuge für den Containertransport gemeint. AGVs werden zum Beispiel am Containerterminal Altenwerder in Hamburg eingesetzt [97, 188, 205, 206].

Um den Vorteil der fahrerlosen Transportsysteme zu nutzen und den Nachteil der passiven Eigenschaft dieses Horizontaltransports zu umgehen, wurde eine Variante der AGVs entwickelt, die sogenannten *Lift-AGVs* [99, 194]. Lift-AGVs ermöglichen es mit Hilfe einer im Fahrzeug integrierten Hebevorrichtung, den Container an der Transferposition anzuheben und in eine dort installierte Haltevorrichtung (Rack) einzuhängen. Wird die Hebevorrichtung dann abgesenkt, verbleibt der Container im Rack und das Lift-AGV kann mit einer neuen Fahrt beauftragt werden, bevor das Partnergerät

den Container aus dem Rack aufgenommen hat. Analog kann ein Partnergerät einen Container im Rack absetzen und das Lift-AGV kann ihn zu einem späteren Zeitpunkt selbständig aus dem Rack heben und weitertransportieren.

Ebenfalls zu den fahrerlosen Transportfahrzeuge gehören automatische Portalhubwagen. Abgesehen von der Automatisierung haben sie ähnliche Eigenschaften wie manuell gefahrene Portalhubwagen, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

2.3.5.3 *Portalhubwagen*

Portalhubwagen, die auch straddle carrier (kurz SC) oder van carrier (kurz VC) genannt werden, sind deswegen sehr verbreitet auf Containerterminals, weil sie sowohl für den Horizontaltransport von Containern über die Terminalfläche als auch für die Einstapelung im Containerlager geeignet sind. Durch den innerhalb des Portals anheb- baren Spreader (vgl. Abbildung 16 links) können Container eigenständig aufgenommen, angehoben, über längere Strecken auf dem Terminal transportiert und in bis zu vier Lagen übereinander gestapelt werden (vgl. Abbildung 16 Mitte). Portalhubwagen werden zum Beispiel am Containerterminal Burchardkai in Hamburg eingesetzt [49].

Damit die Stellplätze im Containerlager für die Portalhubwagen anfahrbar sind, werden zwischen den Containerreihen im Lager Abstände gelassen (vgl. Abbildung 16 Mitte), die es den Portalhubwagen ermöglichen, mit jeweils einer Spur des Fahrwerks rechts und links der Containerreihe in das Lager einzufahren und Container an beliebiger Position in der Reihe aufzunehmen oder abzusetzen. Befinden sich mehrere Fahrzeuge in der gleichen Reihe, können sie sich nicht passieren und behindern sich gegenseitig. Auch in Nachbarreihen arbeitende Portalhubwagen können in der Regel aufgrund des engen Reihenabstandes nicht passiert werden.

Sind auszulagernde Container von anderen Containern überstapelt, müssen der oder die darüber stehenden Container vorher auf einen anderen Stellplatz gestellt werden (vgl. Umstapler in Abschnitt 2.2.1). Ähnlich wie beim RTG (vgl. 2.3.4.1) und anders als beim RMG (vgl. Abschnitt 2.3.4.2) wird dieser Umstapler in der Regel vom gleichen Gerät ausgeführt, das auch die Auslagerung vornimmt. Für einen weiteren Portalhubwagen würde in der Regel ein zusätzlicher Anfahrweg zum Lagerblock resultieren, der beim RMG nicht anfällt, da sich dieses ohnehin im gleichen Lagerblock befindet.

Es gibt inzwischen auch automatische, fahrerlose Portalhubwagen. Diese werden auch Auto-Straddle Carrier (kurz Auto-Strads genannt) und sind bezüglich Steuerung

und Routenfindung den AGVs recht ähnlich. Sie sind in der Lage, Container selbstständig aufzunehmen und abzusetzen. Neben den Geräten mit Stapelhöhen von drei oder vier Lagen kommen dabei auch sogenannte Shuttle Carrier zum Einsatz, die nur noch ein oder zwei Lagen hoch stapeln können und deren Fokus entsprechend mehr auf dem schnellen Horizontaltransport als auf der hohen Stapelung liegt. Die Stapelung wird dann manchmal von Lagerkränen übernommen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Automatische Portalhubwagen werden z.B. am Patrick Terminal in Brisbane eingesetzt [58, 99, 211].

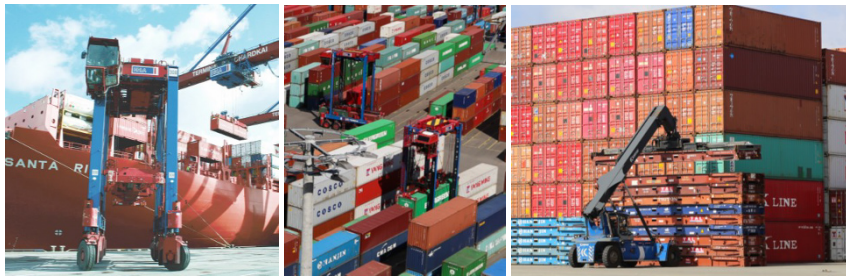


Abbildung 16: Portalhubwagen (links), Portalhubwagen von oben mit Containerlager (Mitte), Reachstacker (rechts), (mit freundlicher Genehmigung von © HHLA 2016. All Rights Reserved)

2.3.5.4 Reachstacker

Reachstacker sind ähnlich wie Portalhubwagen in der Lage, Container eigenständig aufzunehmen und abzusetzen. Die Containeraufnahme befindet sich dabei allerdings nicht im Portal des Fahrzeugs, sondern an einem teleskopierbaren Lastenarm. Ein Vorteil dieser Konstruktion ist zum einen, dass durch den teleskopierbaren Lastenarm eine höhere Stapelhöhe der Container erreicht werden kann als mit einem Portalhubwagen. Außerdem muss der Container nicht von beiden Seiten für das Fahrwerk zugänglich sein. Dadurch ist eine kompaktere Stapelung ohne Zwischenräume möglich. Außerdem ist zum Beispiel bei der Zugabfertigung eine seitliche Beladung möglich, so dass das Bahngleis nicht überfahren werden muss. Als Nachteile stehen dem ein recht hoher Platzbedarf sowohl beim Rangieren als auch beim Fahren sowie ein geringeres Hubgewicht gegenüber. Dennoch sind Reachstacker aufgrund ihrer sehr flexiblen und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten an vielen Containerterminals im Einsatz, besonders für Leercontainer oder an kleineren Bahnumschlagsanlagen (vgl. Abbildung 16 rechts).

2.3.6 Typische Geräteausstattungen von Containerterminals

Grundsätzlich können die vorstehend beschriebenen Geräte in sehr vielen verschiedenen Kombinationen eingesetzt werden, die nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschrieben werden. Dennoch haben sich typische Layouts für Terminals mit Seeanschluss herausgebildet, die an vielen Terminals verwendet werden. Ein guter Überblick darüber findet sich bei Brinkmann [19] sowie Nam und Ha [168]. Die wesentliche Gemeinsamkeit der verschiedenen Layouts besteht darin, dass zur Abfertigung der Schiffe stets Kaikrane verwendet werden. Bei der weiteren Ausgestaltung des Terminals in Richtung Lager und Landseite ergeben sich die wesentlichen Unterschiede hauptsächlich durch die unterschiedliche Bedienung des Containerlagers. Dabei sind drei Layouttypen besonders verbreitet, die in Tabelle 1 bezüglich ihrer wesentlichen Eigenschaften gegenübergestellt werden.

	Reiner Betrieb mit Portalhubwagen	RTGs und Zugmaschinen mit Chassis	Terminal mit automatischen RMGs
Stapeldichte	Gering	Mittel bis hoch	Hoch
Flexibilität	Hoch	Mittel	Gering
Personaleinsatz	Hoch	Hoch	Gering
Automatisierung	Gering bis mittel	Gering bis mittel	Hoch
Beispiele	CTT, Hamburg Patrick, Brisbane NTB, Bremerhaven	CTO, Odessa Tobishima, Nagoya Pasir Panjang, Singapur	CTA / CTB, Hamburg ECT / Euromax, Rotterdam Newport, Pusan

Tabelle 1: Typische Geräteausstattungen mit Bewertung und Beispielen

Der Betrieb eines Containerterminals ausschließlich mit Portalhubwagen ermöglicht zwar nur eine relativ geringe Stapelhöhe der Container und erfordert einen hohen Personaleinsatz, aber dafür kann das Terminal sehr einfach an wechselnde Anforderungen angepasst werden, d.h. bei Lastspitzen in einzelnen Bereichen des Terminals können die Portalhubwagen flexibel ihren Arbeitsbereich wechseln und in den kritischen Bereichen unterstützen. Die Portalhubwagen werden dabei in der Regel manuell gesteuert, d.h. der Automatisierungsgrad des Terminals ist relativ gering.

Auf Containerterminals mit hohem Umschlagsvolumen (z.B. Singapur) oder auf Terminals mit stark begrenzter Fläche wie Rotterdam oder Hamburg, werden häufig Lagerkrane zur Stapelung von Containern eingesetzt [188, S.112], weil diese eine deutlich höhere Stapeldichte der Container ermöglichen [109]. Eine bereits seit mehreren Jahrzehnten häufig genutzte Gerätekombination besteht aus RTGs (vgl. Abschnitt

2.3.4.1) und Zugmaschinen mit Containerchassis (vgl. Abschnitt 2.3.5.1). Hierbei handelt es sich ausschließlich um manuell gesteuerte Geräte, was in Regionen mit niedrigem Lohnniveau einen verbreiteten Ansatz darstellt.

Ähnlich wie RTGs ermöglichen auch die schienengebundenen RMGs eine höhere Stapelung der Container auf geringer Fläche. Dem Nachteil, dass RMGs nicht flexibel in verschiedenen Lagerblöcken eingesetzt werden können, steht der Vorteil gegenüber, dass ein höherer Automatisierungsgrad möglich ist (vgl. Abschnitt 2.3.4.4). Außerdem können die RMGs sehr flexibel auch mit verschiedenen Typen von Horizontaltransportern zusammenarbeiten. Es ist sowohl eine Kombination mit Portalhubwagen und asynchroner Übergabe möglich, wie zum Beispiel am Containerterminal Burchardkai in Hamburg [49], als auch ein Betrieb mit synchroner Übergabe zu Zugmaschinen mit Chassis, externen Trucks oder automatischen AGVs, wie am CTA in Hamburg [97, 129, 205, 206]. Auch nahezu beliebige Kombinationen dieser Gerätetypen sind möglich. Aufgrund ihres ebenfalls hohen Automatisierungspotentials bieten sich in Kombination mit automatischen RMGs besonders AGVs an.

Ein weiterer Vorteil des RMG-Systems stellt die direkte Übergabemöglichkeit zwischen RMG und externen LKW dar, auch wenn hierbei aus Sicherheitsgründen teilweise die Unterstützung durch einen Fernsteuerer benötigt wird (vgl. 2.3.4.4). Anders als bei Terminals mit RTG oder RMG mit Cantilever werden für automatische RMG-Terminals oft Layouts gewählt, bei denen die Lagerblöcke orthogonal zur Kai-seite angeordnet sind [176, 179], statt parallel wie bei den meisten RTG Terminals [152]. Die Übergaben finden dann am Kopfende der Lagerblöcke statt, wodurch sich eine vollständige Trennung der (möglicherweise automatisierten) wasserseitigen Transporte von den landseitigen, oft manuell gesteuerten Fahrzeugen, realisieren lässt. Dadurch ergibt sich für Import-Export-Terminals allerdings der Nachteil, dass Container oft vom Lagerkran während ihrer Verweildauer über die gesamte Länge des Lagers transportiert werden müssen, weil sie zum Beispiel an der Landseite ein- und an der Wasserseite wieder ausgelagert werden. Weitere Aspekte und Beispiele der Automatisierung und der dabei verwendeten Layouts finden sich bei Saanen [191].

Abbildung 17 zeigt ein typisches Layout eines automatischen Terminals. Im oberen Bereich sind die Kaikrane zur Bearbeitung der Schiffe dargestellt. Unterhalb davon ist der Horizontaltransport zwischen Kaikran und Lagerbereich dargestellt. Die von RMGs bedienten Lager sind dabei orthogonal zum Kai angeordnet und es wird davon ausgegangen, dass eines der vier in Abschnitt 2.3.4.4 beschriebenen Kransysteme ein-

gesetzt wird. An der Landseite dieser Lagerblöcke erfolgt die Anbindung von externen LKW und Horizontaltransporten zur Bahn. Aufgrund des hohen Automatisierungspotentials und der daraus resultierenden Eignung für automatische Schedulingverfahren bildet dieses Layout den Fokus der vorliegenden Arbeit. Wie in Tabelle 1 dargestellt, ist die geringe Flexibilität bei ungleich verteilter Last zwischen Wasser- und Landseite oder zwischen den einzelnen Lagerbl cken der wesentliche Nachteil dieses Terminallayouts. Auf diesen Aspekt wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch näher eingegangen.

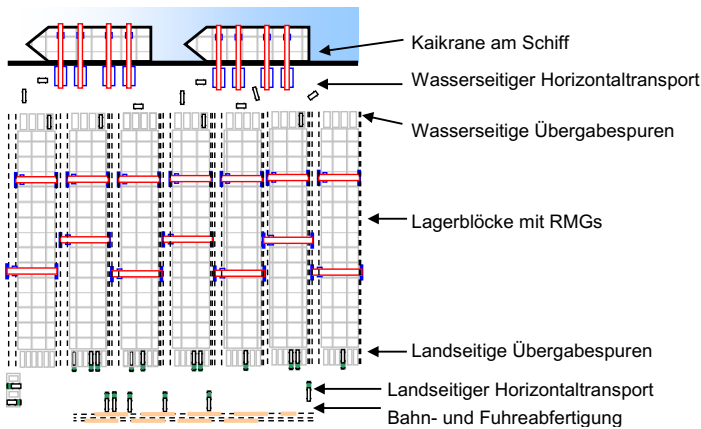


Abbildung 17: Aufbau eines automatisierten Containerterminals mit orthogonal zum Kai ausgerichteten und von RMGs bedienten Lagerbl cken

2.3.7 Literaturübersicht zu Umschlagsger ten

Zum Abschluss dieses Kapitels werden einige Literaturhinweise gegeben, in denen sich weitere Details zu Umschlagsger ten an Containerterminals finden.

Brinkmann [19] bietet eine Beschreibung des generellen Aufbaus eines Containerterminals und eine Übersicht der am häufigsten eingesetzten Geräte. Dabei werden auch die gängigsten Gerätekombinationen beschrieben und es erfolgt jeweils eine Bewertung der verschiedenen Varianten anhand von ökonomischen, logistischen und weiteren Entscheidungskriterien. Brinkmann liefert neben einer guten Übersicht über die Entscheidungskriterien beim Design eines Containerterminals auch Hinweise, welche Gerätekombinationen für welche Terminalgr  e und für welchen Terminaltyp ge-

eignet sind und üblicherweise eingesetzt werden. Ein gute Übersicht dazu bieten auch Carlo et al. [29]. Franke [57] beschreibt die übliche Produktivität der Geräte und gibt Empfehlungen für deren Anzahl.

Vis [221] liefert einen umfangreichen Vergleich zwischen automatischen Stapelkranen (RMG) und manuell gesteuerten Portalhubwagen zur Bedienung von Containerlagern. Der Zeitverbrauch für die einzelnen Arbeitsschritte wird unter Einbeziehung verschiedener technischer Parameter der beiden Geräte abgeschätzt und in ein Simulationsmodell integriert. Vis kommt zu dem Ergebnis, dass RMGs in allen betrachteten Fällen bezüglich der Produktivität besser oder gleich gut wie Portalhubwagen abschneiden, während die Anschaffungskosten allerdings deutlich höher sind.

Auch Nam und Ha [168] vergleichen verschiedene Terminals und stellen dabei vor allem automatische und manuelle bediente Terminals gegenüber. Diese werden bezüglich verschiedener Kriterien wie Flächenbedarf, Stapelhöhe, Produktivität und Kosten hauptsächlich anhand koreanischer Terminals bewertet. Dabei wird erörtert, welche Anzahl von Horizontaltransportern abhängig vom eingesetzten Gerätetyp benötigt wird.

Zhu et al. [240] beschreiben ein neues System eines Horizontaltransports, bei dem die Container zwischen Kaikran und Lager mit Hilfe eines automatischen Katzsystems transportiert werden. Dieses System benötigt relativ wenig Platz, so dass die Lagerblöcke eng an der Kaimauer platziert werden können.

Kim et al. [110] bewerten verschiedene Layouts von Terminals mit Hilfe eines analytischen Ansatzes und vergleichen dabei insbesondere eine Anordnung der Lagerblöcke mit seitlicher Übergabe, wobei zwischen paralleler und orthogonaler Ausrichtung zur Kaimauer unterschieden wird. Sie liefern eine Abschätzung für die Fahrwege der Horizontaltransporter und stellen dabei fest, dass diese bei einer parallelen Anordnung der Lagerblöcke kürzer ausfallen.

Klaws et al. [127] entwickeln einen Vorschlag für ein RMG-System mit seitlicher Übergabe. Dabei sollen die Lagerblöcke orthogonal zum Kai angeordnet sein und von zwei oder drei RMGs bedient werden, die auf der gleichen Schiene fahren. Für den Horizontaltransport sollen AGVs verwendet werden, die auf eigenen Fahrspuren zwischen die Lagerblöcke fahren können. Landseitige Abfertigungen werden nicht berücksichtigt.

Optimierung von automatischen Lagerkransystemen
auf Containerterminals

Speer, U.

2017, XVII, 380 S. 97 Abb., 3 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-17269-5