

Untersuchung von Doppelspielen eines Portalkrans auf Umschlagterminals

Volodymyr Alieksieiev, Technische Universität Hamburg

Jesse-James Winter, Technische Universität Hamburg

Jannick von Harlem, Technische Universität Hamburg

Michaela Grafelmann, Technische Universität Hamburg

Carlos Jahn, Technische Universität Hamburg

Hermann Lödding, Technische Universität Hamburg

Kurzfassung

Die Leistungsfähigkeit von Umschlagterminals ist ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit und die Attraktivität des Kombinierten Verkehrs (KV). Dieser kann einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele Deutschlands leisten. Wichtigstes Arbeitssystem von KV-Umschlagterminals ist häufig ein Portalkran. Seine Leistung beeinflusst die Abfertigungsleistung eines Terminals und somit des Kombinierten Verkehrs. Steuerungsstrategien der Portalkrane können helfen, die Abfertigungszeit der Verkehrsträger, den Energiebedarf und die Betriebskosten der Krananlagen zu reduzieren und logistische und betriebswirtschaftliche Zielerreichung eines Terminals zu verbessern. Eine dieser Strategien ist die Doppelspielstrategie. Bei der Doppelspielstrategie erfolgen Beladungen und Entladungen der Verkehrsmittel alternierend mit dem Ziel, Leerfahrtzeiten zu reduzieren. Ziel dieses Beitrags ist es, den Einfluss der Doppelspiele auf die Kranleistung und den Energiebedarf der Krananlagen zu untersuchen und ihren optimalen Einsatz im operativen Kranbetrieb zu diskutieren.

Schlagwörter: Portalkran, Doppelspiel, Umschlagterminal

1 Einleitung

Der Kombinierte Verkehr (KV) ist eine Form des Güterverkehrs, bei dem die lange Strecke (Hauptlauf) mit einem umweltfreundlichen Verkehrsträger (Schiene oder Wasserstraße) und die kurzen Vor- und Nachläufe als LKW-Straßenverkehr abgewickelt werden. Ziel ist es, so die Umweltfreundlichkeit von Eisenbahn- und Schiffstransporten mit der Flexibilität von LKW zu verbinden [1, 2]. Um eine konkurrenzfähige Alternative zum LKW-Direktverkehr zu ermöglichen, ist eine hohe Leistungsfähigkeit von Umschlagterminals, auf denen die Verkehrsträger gewechselt werden, von elementarer Bedeutung. Portalkrane, die den gesamten Verladebereich auf KV-Terminals überspannen und das Hauptarbeitssystem vieler KV-Terminals sind, beeinflussen die gesamte Terminalleistung. Die Leistungssteigerung von Portalkranen ist somit nicht nur für die logistische Zielerreichung eines Terminals wichtig, sondern auch für die Leistung und die Attraktivität des Kombinierten Verkehrs insgesamt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Leistung der Portalkrane zu steigern. Die naheliegendste Möglichkeit ist die Steigerung der Personal- bzw. Anlagenkapazität, bspw. durch Überstunden oder die zusätzlichen Portalkrane bzw. Umschlagequipment. Diese Maßnahme ist jedoch sehr kostenintensiv. Eine weitere Möglichkeit ist es, die unproduktiven Leerfahrten eines Portalkrans zu reduzieren. Diese entstehen vor allem bei Umschlagvorgängen

zwischen einem Verkehrsmittel und dem Abstellbereich. So findet die Beladung eines Zuges auf vielen Terminals erst nach dessen kompletten Entladung statt. Bei dieser sogenannten Einzelspielstrategie entstehen längere Leerfahrzeiten zwischen dem Abstellbereich und dem entsprechenden Ladegleis, da der Kran nach jeder Entladung bzw. Beladung eine Leerfahrt zum nächsten Entladungs- bzw. Beladungsstartpunkt zwischen Ladegleis- und Abstellbereich durchführt (siehe Abbildung 1a). Eine der Möglichkeiten, die Leerfahrten eines Portalkrans zu reduzieren, ist die Doppelspielstrategie (siehe Abbildung 1b). Bei einem Doppelspiel wird eine alternierende Be- und Entladung eines Verkehrsmittels durchgeführt. Dazu wird bspw. nach der Entladung einer Ladeeinheit im Lagerbereich eine zu beladende Ladeeinheit aus dem Abstellbereich entnommen und auf den frei gewordenen Platz auf dem Verkehrsmittel beladen, so dass Beladung und Entladung abwechselnd stattfinden. Dies verringert die Leerfahrzeiten zwischen den Abstell- und Ladegleisbereichen auf den Terminals und ermöglicht eine höhere Umschlagleistung. Abbildung 1 verdeutlicht zudem, dass die Doppelspielstrategie das Potential hat, die besonders energieintensiven Brückenwege zu reduzieren. Im dargestellten idealisierten Beispiel sind in jeder Spalte jeweils ein zu beladender und ein zu entladender Container vorhanden. In diesem Fall legt die Brücke beim Beladen und beim Entladen jeweils die Zuglänge zurück (Einzelspielstrategie), bei der Doppelspielstrategie dagegen nur einmal.

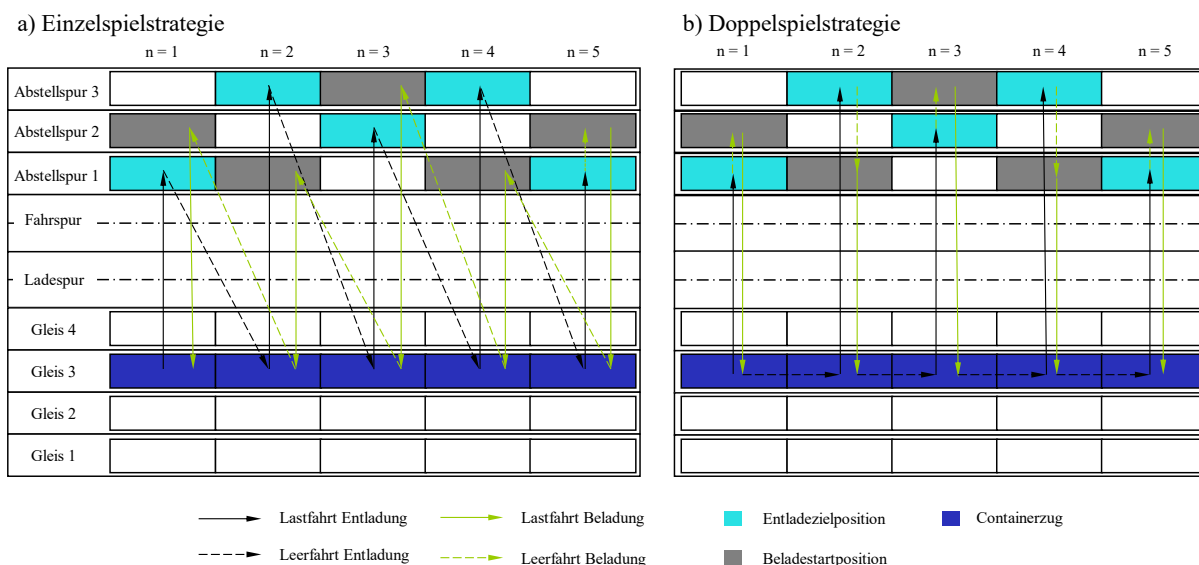


Abbildung 1: Prinzip der Einzel- und Doppelspielstrategien eines Portalkrans bei einem Umschlag zwischen Zug und Abstellbereich für fünf Spalten (n = 1..5), idealisierte Darstellung.

Die Auswirkungen der Doppelspiele auf die logistischen und betriebswirtschaftlichen Zielgrößen eines Terminals wurden bisher anhand von aufwändigen Optimierungs- und Simulationsmodellen und hauptsächlich auf Seehafenterminals untersucht. Dieser Beitrag untersucht die Doppelspiele auf KV-Terminals und analysiert ihren Einfluss auf die Leistung und den Energiebedarf eines Portalkrans. Dafür gliedert sich der Beitrag folgendermaßen: Zuerst werden die wesentlichen Vorarbeiten zu Doppelspielen beschrieben (Abschnitt 2). Anschließend stellen wir das Untersuchungskonzept und die Ergebnisse vor (Abschnitt 3). Der Abschnitt 4 fasst den Beitrag zusammen und liefert einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Stand der Technik

Doppelspiele wurden bereits in einigen wissenschaftlichen Arbeiten erforscht. Eine wesentliche Grundlage bilden die Arbeiten von Goodchild et al. [3–5], die die Doppelspiele von Containerbrücken bei der Verladung von Containern in Seehäfen untersuchen. Die Arbeiten zeigen, dass die Doppelspiele die Abfertigungszeit von Schiffen um ca. 10% reduzieren können. [6] und [7] nutzen mathematische Optimierung (Mixed Integer Linear Programming), um die Doppelspiele von Containerbrücken in Seehäfen zu steigern. Die Ergebnisse von [6] zeigen, dass die rechnergestützte Reihenfolgebildung von Brückenspielen eine deutlich optimalere Lösung gegenüber den konventionellen (manuellen) Planungsansätzen ergibt. [7] stellt eine Erweiterung der Untersuchungen in [4] und [6] vor und erreicht noch größere Einsparung der Abfertigungszeit. [8] entwickelt ein Optimierungsmodell, das die Zykluszeit der Schiffabfertigung mithilfe von Doppelspielen reduziert und dabei die Schiffsbalancierung berücksichtigt. [9] vergleichen in ihrem Beitrag den Einsatz von Einzel- und Doppelspielstrategien auf Hinterlandterminals und damit den Umschlag zwischen Schiene und Straße. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Doppelspielstrategie die Auslastung, die Abfertigungsgeschwindigkeit und die Produktivität von Portalkranen steigern kann. Gleichzeitig heben sie die höhere Komplexität im Einsatz von Doppelspielen gegenüber der konventionellen Einzelspielstrategie hervor.

Die beschriebenen Arbeiten beruhen auf vergleichsweise komplexen Optimierungsmodellen. Sie eignen sich daher nicht dazu, die Wirkzusammenhänge zwischen den wesentlichen Einfluss- und Zielgrößen eines Terminals auf einfache und nachvollziehbare Art und Weise zu untersuchen. Darüber hinaus mangelt es an Arbeiten, die die Anwendung von Doppelspielen auf KV-Terminals erforschen. Da die Portalkrane auf diesen Terminals häufig längere Fahrzeiten als Containerbrücken in Seehäfen haben (bspw. bei der Zugabfertigung), können die Ergebnisse von Seehafenterminals nicht einfach auf KV-Terminals übertragen werden.

Ziel unserer Forschung ist es, den Einfluss von Doppelspielen auf logistische und betriebswirtschaftliche Zielgrößen eines KV-Terminals anhand von einigen grundlegenden Wirkzusammenhängen zu untersuchen. Der folgende Abschnitt erläutert das Untersuchungskonzept.

3 Konzept

Die in diesem Abschnitt beschriebene Untersuchung beruht auf dem Layout eines sogenannten 4-Gleis-Terminalsmoduls von [2, S. 31-33]. Das Modul besteht aus vier Ladegleisen, einer Ladespur und einer Fahrspur für LKWs, zwei bis vier Abstellspuren für die Zwischenlagerung von Containern sowie einer variablen Anzahl an Portalkranen. Für die Untersuchung wird die Konfiguration mit drei Abstellspuren und einem Portalkran ausgewählt (vgl. Abbildung 1). Die geometrischen Parameter des betrachteten Terminallayouts sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Längen der Abstell- und Gleisplätze sind gleich und folgen den Annahmen von Lampe [2, S. 85].

Die Geschwindigkeit der Brücke des Portalkrans beträgt 2 m/s, der Laufkatze 1,33 m/s [2, S. 108-109]. Da die Laufkatze und die Kranbrücke des Portalkrans in der Regel simultan bewegt werden, entspricht die Fahrzeit des Krans dem maximalen Wert der Kranbrücken- bzw.

Laufkatzenfahrzeit des jeweiligen Kranauftrags [10, S. 73]. Ein Kranauftrag bezeichnet dabei das einmalige Transportieren eines Containers von einem Startort zu einem Zielort mit einem Kran (vgl. [11, S. 319]).

Tabelle 1: Geometrische Parameter des betrachteten Terminallayouts (in Anlehnung an [2, S. 84-85])

Breite Gleisplatz:	$b_{Gl} = 4,5 \text{ m}$	Länge Gleisplatz	$L_{Gl} = 17,6 \text{ m}$
Breite Abstellplatz:	$b_{Ab} = 3,3 \text{ m}$	Länge Abstellplatz	$L_{Ab} = 17,6 \text{ m}$
Breite Ladespur:	$b_{La} = 4,75 \text{ m}$	Breite Fahrspur	$b_{Fa} = 4,75 \text{ m}$

Die Fahrzeiten der Kranbrücke und der Laufkatze berechnen sich vereinfachend aus dem Verhältnis von Weglänge und Geschwindigkeit¹ (vgl. [10, S. 76]). Die Weglängen ergeben sich aus dem Terminallayout und den jeweiligen Start- und Zielpositionen der Kranbrücke und der Laufkatze.

Für die Lastaufnahme und -abgabezeiten wird in Anlehnung an Möller [10, S. 175] in Summe ein Wert von 30 Sekunden angenommen. Somit berechnet sich die jeweilige Fahrzeit (Leer- oder Lastfahrzeit) wie folgt (vgl. [10, S. 73-81]):

$$t_{Fahrt} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} t_{Br} \\ t_K \end{array} + t_{Auf} + t_{Ab} \right. \quad (1)$$

t_{Fahrt}	Fahrtzeit in min
t_{Br}	Kranbrückenfahrzeit in min
t_K	Laufkatzenfahrzeit in min
t_{Auf}	Aufnahmezeit in min
t_{Ab}	Lastfahrzeit in min

Das Be-Entladeverhältnis (BEV) bei der Abfertigung eines Verkehrsträgers entspricht dem Quotienten der Anzahl zu beladender und zu entladender Kranaufträge:

$$BEV = \frac{\text{AnzBKA}}{\text{AnzEKA}} \quad (2)$$

BEV	Be-Entladeverhältnis
AnzBKA	Anzahl der beladenden Kranaufträge
AnzEKA	Anzahl der entladenden Kranaufträge

Im Folgenden wird zur Vereinfachung angenommen, dass der Verkehrsträger vollständig mit Ladeeinheiten beladen ist und sich auf dem Zug keine leeren Gleisplätze befinden. Zudem soll der Zug vollständig entladen werden, sodass die Anzahl der Entladekranaufträge der Anzahl der Gleisplätze entspricht. Ferner nehmen wir an, dass die Kapazität der Abstellspuren ausreicht und die Anzahl der Abstellplätze je Abstellspur der Anzahl der Gleisplätze entspricht. Unter diesen Annahmen gilt:

$$\text{AnzEKA} = \text{AnzGP} = \text{AnzAP}_k \quad (3)$$

AnzGP	Anzahl der Gleisplätze
AnzAP_k	Anzahl der Abstellplätze pro Abstellspur k
AnzEKA	Anzahl der entladenden Kranaufträge

¹ Die Beschleunigungen und die Verlangsamungen von Brücke und Laufkatze des Portalkrans werden in diesem Beitrag nicht berücksichtigt.

Bei einem $BEV = 1$ kann die größte Anzahl von Doppelspielen durchgeführt werden, weil jedem Beladekranaufrag ein Entladekranaufrag gegenübersteht. Ist die Anzahl der Belade- und Entladekranaufräge ungleich ($BEV \neq 1$), kann für einen Teil der Container kein Doppelspiel ausgeführt werden. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$AnzDS_{max} = \min(AnzBKA; AnzEKA) \quad (4)$$

$AnzDS_{max}$ Maximale Anzahl der Doppelspiele
 $AnzBKA$ Anzahl der Beladekranaufräge
 $AnzEKA$ Anzahl der Entladekranaufräge

Ob die potentiell durchführbaren Doppelspiele auch wirtschaftlich sind, hängt jedoch von den genauen Start- und Zielpositionen der Container auf dem Zug und im Abstellbereich des Terminals ab: Ist die Fahrzeit eines Doppelspiels größer als die Fahrzeiten der alternativen Einzelspiele, lohnt sich ein Doppelspiel nicht. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn der Fahrweg von der Entladezielposition eines Kranaufrags zur Beladestartposition des nächsten Kranaufrags sehr lang ist.

Um unwirtschaftliche Doppelspiele zu vermeiden, haben wir einen Prüfalgorithmus in die Simulation integriert. Der Algorithmus funktioniert für den Umschlag vom Zug in den Abstellbereich folgendermaßen: Nach der Aufnahme des zu entladenden Containers in der Spalte n des Ladegleises (vgl. Abbildung 1), wird geprüft, ob es in der Spalte $n \pm x$ des Abstellbereichs einen freien Stellplatz gibt. Der Parameter n bezeichnet dabei die Nummer der aktuellen Spalte und x die Laufvariable. Initial ist $x = 0$. Nach jedem Durchlauf, in dem der Algorithmus keinen freien Container findet, erfolgt ein erneuter Durchlauf mit $x = x + 1$, sodass die Nachbarspalten links und rechts durchsucht werden. Sollten im gesuchten Bereich mehrere Stellplätze vorhanden sein, wird der nächste zur Entladung angefahren.

Nach der Entladung prüft der Algorithmus analog zur Suche des Entladeplatzes, ob es in der aktuellen oder ggf. in vier umliegenden Spalten mindestens einen zu beladenden Container gibt. Sollen mehrere Container im Suchbereich vorhanden sein, wird der nächste von ihnen angefahren, aufgenommen und auf dem Zug verladen². Die Fahrten zu den umliegenden Spalten verursachen im Vergleich zur idealen Abfertigung (vgl. Abbildung 1) zusätzliche Brückenwege. Wenn es keinen zu beladenden Container in dem Bereich gibt, erfolgt ein konventionelles Einzelspiel. Der Portalkran fährt also leer zum nächsten zu entladenden Container. Der Algorithmus dient zum einen dazu, unwirtschaftliche Doppelspiele mit langen Fahrstrecken innerhalb des Abstellbereichs zu vermeiden. Zum anderen hat er zum Ziel, längere Fahrwege auch bei der Entladung zu vermeiden. Es ist jedoch anzumerken, dass der Algorithmus von der Annahme ausgeht, dass es keine spezifischen Vorgaben für die Zuordnung der Container auf die Gleis- oder Abstellplätze gibt.

In der Praxis werden Verkehrsträger häufig nicht vollständig be- und entladen, so dass das Verhältnis der Be- und Entladungen in vielen Fällen ungleich eins ist. Im Weiteren wird daher der Einfluss von Doppelspielen auf die Kranleistung bei drei exemplarischen Werten von BEV

² Der Algorithmus berücksichtigt grundsätzlich keine unproduktiven Containerumladungen, die beim Beladungsprozess entstehen können. Er schließt jedoch bei der Ermittlung der Entladezielposition diejenige Stellplätze aus, in denen sich die Container für den darauffolgenden beladenden Kranaufrag befindet, sodass unmittelbare Umladungen vermieden werden können.

(1; 0,5 und 0,2) simulativ mithilfe der Software *Microsoft Excel* untersucht. Dafür werden für jeden BEV-Wert zehn Abfertigungsaufträge mit jeweils 30 Kranaufträgen pro Abfertigungsauftrag simuliert, so dass folgende Kennzahlen entstehen (siehe Tabelle 2). Unter der oben beschriebenen Annahme, dass der Zug immer vollständig beladen ankommt, ergeben sich bei drei Untersuchungen unterschiedliche Zuglängen (siehe Tabelle 2, vgl. Gl. 2 und Gl. 3).

Tabelle 2: Eingangsparameter für die Simulation der Einzel- und Doppelspielstrategien

<i>BEV</i>	<i>Anzahl der Entladekranaufräge</i>	<i>Anzahl der Beladekranaufräge</i>	<i>Zuglänge</i>
<i>[-]</i>	<i>[-]</i>	<i>[-]</i>	<i>[Gleisplätze]</i>
1,0	15	15	15
0,5	20	10	20
0,2	25	5	25

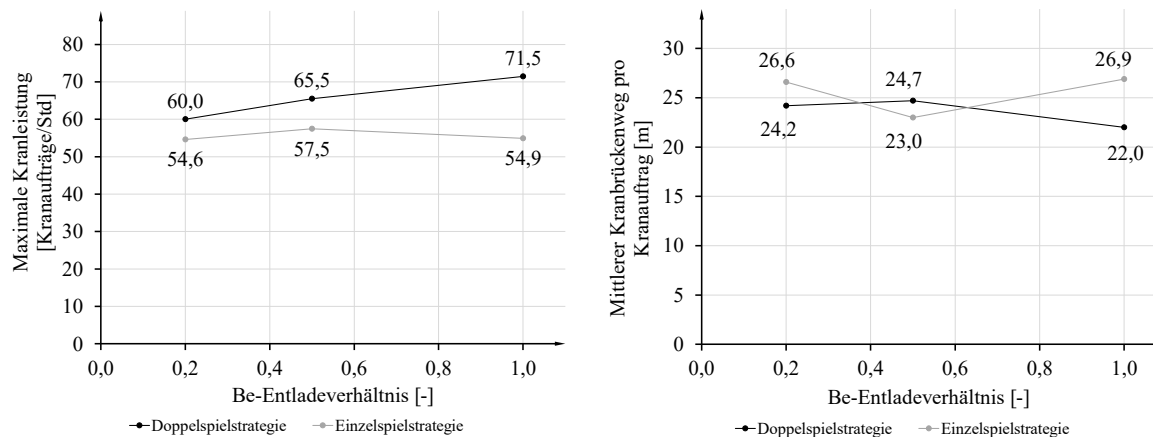
Die maximale Stapelhöhe auf dem Abstellspur entspricht für die Untersuchung $SH_{max} = 5$. Die Stapelhöhen der jeweiligen Abstellplätze werden stochastisch zwischen den Werten eins bis fünf verteilt. Die vertikalen Positionen der zu beladenden Container im Stapel werden mit einer Gleichverteilung zufällig zugeordnet. Die Positionen der sich in der Abstellspur befindenden und auf den Zug zu verladenden Container werden ebenfalls zufällig mithilfe einer Gleichverteilung zugeordnet. Bei der Entladung wird der oben beschriebene Algorithmus verwendet. Zur Ermittlung der Leerfahrtzeit des ersten Entladekranaufrags im Abfertigungsauftrag wird der Mittelwert der Leerfahrtzeiten der Entladekranaufräge des jeweiligen Abfertigungsauftrags verwendet. Tabelle 3 und Abbildung 2a zeigen die Untersuchungsergebnisse.

Tabelle 3: Ergebnisse der simulativen Untersuchung des Doppelspieleffekts für drei exemplarische Werte des Be-Entladeverhältnisses (Be- und Entladung nach Kürzester-Weg-Prinzip)

<i>BEV</i>	<i>Potentielle Anzahl der Doppelspiele</i>	<i>Maximale Kranleistung (Einzelspielstrategie)</i>	<i>Maximale Kranleistung (Doppelspielstrategie)</i>	<i>Leistungssteigerung durch Doppelspielstrategie</i>	<i>Mittlere zeitliche Einsparung pro Kranaufrag</i>
<i>[-]</i>	<i>[Kranaufräge]</i>	<i>[Kranaufräge/ Stunde]</i>	<i>[Kranaufräge/ Stunde]</i>	<i>[-]</i>	<i>[Sekunden]</i>
1,0	15	54,9	71,5	30,2%	15,8
0,5	10	57,5	65,5	13,9%	8,0
0,2	5	54,6	60,0	9,9%	6,2

Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Doppelspielstrategie bei allen drei BEV-Werten die Kranleistung steigert. Dieser Effekt sinkt mit der Verringerung des BEV-Wertes und somit der potentiellen Anzahl der Doppelspiele (vgl. Gl. 2 und Gl. 4). Da die Doppelspiele die Leerfahrten eines Portalkrans reduzieren, zeigt sich die größte mittlere zeitliche Einsparung pro Kranaufrag bei der größten Anzahl der Doppelspiele.

Zur Untersuchung des Energiebedarfs eines Portalkrans werden zusätzlich die mittleren Kranbrückenwege pro Kranauftrag bei drei oben beschriebenen Werten von BEV berechnet. Der Energiebedarf einer Laufkatze ist deutlich geringer als der der Kranbrücke (vgl. [12, S. 342]) und wird in diesem Beitrag deswegen vernachlässigt. Abbildung 2b stellt die mittleren Kranbrückenwege für verschiedene Werte des BEV für Einzel- und Doppelspielstrategien gegenüber:



a) Maximale Kranleistung

b) Mittlerer Kranbrückenweg pro Kranauftrag

Abbildung 2: a) Maximale Kranleistung und b) Mittlerer Kranbrückenweg pro Kranauftrag in Abhängigkeit vom Be-Entladeverhältnis bei der Anwendung der Doppel- und Einzelspielstrategien

Für $BEV = 1$ und $BEV = 0,2$ sinkt der mittlere Kranbrückenweg pro Kranauftrag bei der Doppelspielstrategie, so dass kein Zielkonflikt zwischen dem Energiebedarf und der maximalen Kranleistung entsteht.

Für $BEV = 0,5$ ist dagegen der Kranbrückenweg mit der Doppelspielstrategie um 1,7 m je Kranauftrag oder 7% größer, als bei der Einzelspielstrategie, so dass ein Mehrbedarf an Energie entsteht. Wir führen das darauf zurück, dass die Brückenwege zur Erzielung des Doppelspiels (vgl. Ausführungen zum Prüfalgorithmus) größer sind, als der durch das Doppelspiel vermiedene Brückenweg der Einzelspiele (vgl. Abbildung 1). Eine wesentliche Ursache hierfür dürfte der auf die Kranleistung ausgerichtete und vergleichsweise einfach gestaltete Prüfalgorithmus sein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag untersucht das Potential der Anwendung von Doppelspielen auf Umschlagterminals des Kombinierten Verkehrs, deren Hauptarbeitssysteme Portalkrane sind. Das Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Doppelspiele auf logistische Zielgröße (Kranleistung) und die betriebswirtschaftliche Größe (Energiebedarf eines Portalkrans) eines Umschlagterminals zu erforschen. Die Untersuchung erfolgt dabei exemplarisch für den Umschlag zwischen Zug und Abstellbereich eines KV-Terminals. Über drei exemplarische Verhältnisse der Anzahl der zu beladenden und zu entladenden Kranaufträge (BEV) zeigt sich bereits bei einer sehr einfachen Reihenfolgebildung eine deutliche Steigerung der Kranleistung bei der Anwendung der Doppelspielstrategie auf. Die Doppelspielstrategie verspricht daher für Umschlagterminals ein wesentliches Leistungspotential. Im Vergleich dazu ist der Einfluss der

Doppelspielstrategie zunächst mit dem beschriebenen Prüfalgorithmus weniger ausgeprägt und für ein BEV sogar leicht negativ.

Ein lohnendes Forschungsziel sollte daher die Verbesserung des Prüfalgorithmus sein, um weitere Leistungssteigerungen und einen durchgängig geringeren Energiebedarf zu erreichen. Eine weitere mögliche Forschungsrichtung ist die Untersuchung weiterer Werte vom BEV. Da alle entladenen Container auch wieder beladen werden, soll sich der Mittelwert des BEV bei einem längeren Untersuchungszeitraum einem Wert von eins annähern. Diese Hypothese kann in weiteren Forschungen auch für kleinere BEV-Schritte ebenfalls überprüft werden, um den Zielkonfliktbereich ggf. genauer zu parametrieren.

Außerdem können weitere Untersuchungen mit realistischeren Bedingungen erfolgen. Dafür können z.B. die Beschleunigung und die Verzögerung des Portalkrans und deren Auswirkung auf die Fahrzeiten berücksichtigt werden. Darüber hinaus stellt die Modellierung der Wirkzusammenhänge zwischen dem Kranauftragsbestand und der Kranleistung sowie zwischen dem Energiebedarf und dem Kranfahrtweg bei der Anwendung von Doppelspielen eine interessante Forschungsrichtung dar. Bei der Analyse des Energiebedarfs sollten auch die Katzenwege und weitere mögliche Eingangsparameter (bspw. technische Parameter des Motors) mitberücksichtigt werden.

Schließlich sollte der Transfer geeigneter Prüfstrategien für Doppelspiele auf KV-Terminals Ziel sein, um die Leistungsfähigkeit des Kombinierten Verkehrs weiter zu verbessern.

Literatur

- [1] United Nations, *Terminology of Combined Transport*. New York and Geneva, 2001.
- [2] H. Lampe, *Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des kombinierten Verkehrs Schiene-Straße* (Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2005) (Logistik, Verkehr und Umwelt). Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2006.
- [3] A. Goodchild, "Crane Double Cycling in Container Ports: Algorithms, Evaluation, and Planning," PhD Thesis, UC Berkeley: University of California Transportation Center., 2005. [Online]. Verfügbar unter: <https://escholarship.org/uc/item/0nt8t1db>
- [4] A. V. Goodchild und C. F. Daganzo, "Double-Cycling Strategies for Container Ships and Their Effect on Ship Loading and Unloading Operations," *Transportation Science*, Jg. 40, Nr. 4, S. 473–483, 2006, doi: 10.1287/trsc.1060.0148.
- [5] A. V. Goodchild und C. F. Daganzo, "Crane double cycling in container ports: Planning methods and evaluation," *Transportation Research Part B: Methodological*, Jg. 41, Nr. 8, S. 875–891, 2007, doi: 10.1016/j.trb.2007.02.006.
- [6] H. Zhang und K. H. Kim, "Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals," *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 56, Nr. 3, S. 979–992, 2009, doi: 10.1016/j.cie.2008.09.008.
- [7] R. Zhang, Z. Jin, Y. Ma und W. Luan, "Optimization for two-stage double-cycle operations in container terminals," *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 83, S. 316–326, 2015, doi: 10.1016/j.cie.2015.02.007.
- [8] Y. Chu, X. Zhang und Z. Yang, "Multiple quay cranes scheduling for double cycling in container terminals," *PloS one*, Early Access. doi: 10.1371/journal.pone.0180370.

- [9] Y. Lan und L. Wang, "Comparison between Two Different Handling Modes of Gantry Cranes in Railway Container Terminals," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Jg. 1176, S. 52001, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1176/5/052001.
- [10] H. C. Möller, *Beitrag zur Potenzialanalyse im kombinierten Verkehr für Güterverkehrszentren* (Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2001) (Logistik für die Praxis). Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2002.
- [11] M. Grafelmann, V. Aliksieiev, H. Lödding und C. Jahn, "Logistics objective conflicts at intermodal terminals," (20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023, p. 313), 2023, doi: 10.22032/dbt.57778.
- [12] V. Papaioannou, S. Pietrosanti, W. Holderbaum, V. M. Becerra und R. Mayer, "Analysis of energy usage for RTG cranes," *Energy*, Jg. 125, S. 337–344, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.122.