

# Schlussbericht vom 28.03.2025

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 22590 N

## Thema

Betriebskennlinien für Portalkrane – Analyse der Leistungsfähigkeit von Umschlagterminals zur Steuerung der Lkw-Ankünfte

## Berichtszeitraum

01.08.2022 bis 30.11.2024

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität Hamburg, Institut für Maritime Logistik (MLS), Am Schwarzenberg-Campus 4 (D), 21073 Hamburg

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Hamburg, Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT), Denickestraße 17, 21073 Hamburg



DLR Projektträger

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
1    Kurzfassung .....	5
2    Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....	7
2.1    AP 1: Detaillierte Spezifikation und Projektmanagement .....	7
2.2    AP 2: Prozessaufnahme und Datenbeschaffung/ -aufbereitung .....	9
2.3    AP 3: Entwicklung des Simulationsmodells .....	12
2.4    AP 4: Modellierung und Evaluation von Betriebskennlinien für KV-Terminals.....	24
2.5    AP 5: Entwicklung eines Vorgehens zur Termin- und Kapazitätsplanung.....	33
2.6    AP 6: Implementierung eines Monitorings- sowie Auslastungs- und Buchungssystems 36	
2.7    Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	40
2.8    Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU .....	41
3    Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer .....	42
3.1    Einschätzungen zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts.....	42
3.2    Realisierte und geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer .....	42
4    Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben .....	49
5    Durchführende Forschungseinrichtungen .....	50
Literaturverzeichnis .....	51

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Durchlaufelement eines Kranauftrags .....	10
Abbildung 2: Durchlaufelement eines Abfertigungsauftrags.....	11
Abbildung 3: Vorgehen einer Simulationsstudie .....	13
Abbildung 4: Struktur eines KV-Terminals: .....	14
Abbildung 5: Schematische Struktur des Simulationsmodells.....	16
Abbildung 6: Simulierte Betriebskennlinien.....	18
Abbildung 7: Durchlaufdiagramm des Portalkrans (Simulationsszenario mit geringerer Last)...	19
Abbildung 8: Durchlaufdiagramm des Portalkrans (Simulationsszenario mit höherer Last).....	20
Abbildung 9: Simulativer Vergleich der Zugankunftsmuster auf die Kranauslastung.....	22
Abbildung 10: Ideale Leistungskennlinie und ideale Durchlaufzeitkennlinie für Kranaufträge ...	25
Abbildung 11: Ideale und reale Kennlinien für Kranleistung und Durchlaufzeit eines Auftrags..	26
Abbildung 12: Kennlinien für Abfertigungsaufträge (a) und Kranaufträge (b) .....	30
Abbildung 13: Direkt- und Indirektumschläge zwischen Zügen und Lkw.....	31
Abbildung 14: Effekt der Verschwendungen und Verbesserungsmaßnahmen auf logistische Zielgrößen eines KV-Terminals .....	32
Abbildung 15: Termin- und Kapazitätsplanung auf Basis des Durchlaufdiagramms.....	34
Abbildung 16: Benutzerschnittstelle des Monitoringssystems für KV-Terminals .....	37
Abbildung 17: Konzept des Auslastungs- und Buchungssystems.....	38

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Glossar der für das Forschungsprojekt wesentlichen Definitionen .....	8
Tabelle 2: Ausgewählte Annahmen des Simulationsmodells .....	17
Tabelle 3: Eingabe- und Ausgabewerte des Simulationsmodells.....	17
Tabelle 4: Experimentendesign für den Vergleich von Fahrzeugankunftmuster.....	21
Tabelle 5: Eingabewerte für das Simulationsmodell .....	21
Tabelle 6: Simulationsergebnisse für die Szenarien mit und ohne Termin- und Kapazitätsplanung .....	34
Tabelle 7: Realisierte Transfermaßnahmen.....	42
Tabelle 8: Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende) .....	46

## 1 Kurzfassung

In Deutschland ist der Verkehrssektor für rund 20 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Der Güterverkehr mit Lkw verursacht nahezu ein Drittel dieser Emissionen. Pro Tonnenkilometer ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Straßengüterverkehr etwas achtmal so hoch wie im Schienengüterverkehr und etwa 3,5 mal so hoch wie in der Binnenschifffahrt (Umweltbundesamt 2023; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022). Der kombinierte Verkehr (KV), bei dem Langstreckentransporte auf emissionsärmere Verkehrsträger (Schiene, Wasser) verlagert werden und Lkw nur den vor- und nachläufigen Transport übernehmen, spielen daher eine zentrale Rolle für die Erreichung der deutschen Nachhaltigkeitsziele. Allerdings verursacht der Umschlag auf den Terminals heute Nachteile, die die Wettbewerbsfähigkeit des KV einschränken: Die Umschlagsvorgänge verlängern die Transportzeiten und führen zu hohen Kosten (Gburek und Wittenbrink 2014). In der Folge kann das Potenzial des KV heute noch nicht ausreichend genutzt werden.

Schlüssel für eine Verbesserung ist die Steuerung der Portalkrane als das wesentliche Arbeitssystem der Terminals. Sie schlagen die Ladeeinheiten (Container, Wechselbrücken, oder Sattelaufleger) zwischen den Verkehrsträgern um und bestimmen damit Umschlagsdauer und -kosten. Wichtigste Zielgrößen im Terminalbetrieb sind die schnelle und pünktliche Abfertigung von Zügen und Schiffen und die Reduzierung von Wartezeiten bei der Lkw-Abfertigung (Clausen und Kaffka 2013). Bezüglich beider Zielgrößen offenbaren Studien erhebliche Defizite (Reis et al. 2013). Zusätzliche Leistungsverluste und Liegezeiten entstehen aktuell auch durch den geringen Anteil an Direktumschlägen zwischen den Verkehrsträgern: Der Großteil der Umschläge erfolgt zurzeit noch über eine Zwischenabstellfläche auf dem Terminal.

Die skizzierten Probleme sind vor allem darauf zurückzuführen, dass Planung und Steuerung der Abläufe zurzeit vielfach erfahrungsbasiert und nicht immer methodisch erfolgen. Hierzu fehlt es zurzeit zum einen an einfachen, nachvollziehbaren Modellen, die die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen und Einflussgrößen ausreichend genau abbilden können. Entsprechend ist es zurzeit nicht möglich, den Betriebszustand des Terminals modellbasiert zu beschreiben, die Leistungsfähigkeit einfach zu analysieren und zu beurteilen sowie Verbesserungsmaßnahmen festzulegen und zu beurteilen. Zum anderen fehlt es derzeit an vergleichsweise einfachen Methoden, um Termine und Kapazitäten modellbasiert planen zu können, die in kleinen und mittleren KV-Terminals anwendbar sind.

Im Forschungsprojekt wurde das Trichtermodell aus der Produktionslogistik erfolgreich auf den Portalkranbetrieb eines KV-Terminals übertragen. Darauf basierend wurden Durchlaufdiagramme und Betriebskennlinien für zwei wesentliche Auftragsarten der KV-Terminals – Kranaufträge und Abfertigungsaufträge – abgeleitet. Diese Modelle ermöglichen es zum einen, den Zielkonflikt zwischen einer hohen mittleren Kranleistung und einer kurzen mittleren Durchlaufzeit von Kran- und Abfertigungsaufträgen systematisch und allgemeingültig zu beschreiben. Zum anderen bilden sie eine Grundlage für die im Projekt entwickelten Monitorings- bzw. Auslastungs- und Buchungssysteme.

Darüber hinaus erfolgte im Forschungsprojekt die Entwicklung der Teilmodelle für drei wesentliche operative Verschwendungsarten – Zwischenlagerung, Umstapler und Leerfahrten – sowie für die entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen – Direktumschläge, Stapellogiken und Doppelspiele. Diese Teilmodelle beschreiben zum einen die jeweiligen Verschwendungen bzw. Maßnahmen in Abhängigkeit von ihren Stellgrößen. Zum anderen ist es möglich, durch ihre Integration

in die Kennlinienmodelle die einzelnen Effekte sowie den Gesamteffekt auf die logistischen Zielgrößen eines KV-Terminals zu beschreiben.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zeigen, dass ein großes Potential zur Steigerung der Umschlagleistung und zur Entschärfung des Zielkonflikts in KV-Terminals vorhanden ist. Diese ist durch die Umsetzung der modellierten Verbesserungsmaßnahmen erreichbar. Die im Projekt gelungene quantitative Modellierung der Wirkzusammenhänge soll den KV-Terminals helfen, (1) den aktuellen Betriebspunkt im Zielkonflikt zwischen logistischen Zielgrößen zu bestimmen, (2) Einzeleffekte von Verbesserungsmaßnahmen sowie das Gesamtpotential der Verbesserung der logistischen Zielgrößen für den konkreten Anwendungsfall zu ermitteln und (3) einen gewünschten Betriebspunkt im entschärften Zielkonflikt zwischen der hohen Kranleistung und der kurzen Durchlaufzeit der Abfertigungsaufträge zu bestimmen.

Der Bericht besteht aus folgenden Teilen: Zuerst beschreibt Abschnitt 2 die in den jeweiligen Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse. Außerdem wird Auskunft über die Notwendigkeit und die Angemessenheit geleisteter Arbeiten sowie über den wissenschaftlich-technischen und den wirtschaftlichen Nutzen für KMU gegeben. Abschnitt 3 stellt die Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer vor. Abschnitt 4 beinhaltet die Angaben zu den aus Zuwendung finanzierten Ausgaben. Abschnitt 5 enthält Informationen zu den Forschungseinrichtungen, die das Projekt durchgeführt haben.

## **2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Dieser Abschnitt beschreibt die Ziele, die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse jeweils pro Arbeitspaket (Abschnitte 2.1-2.6). Abschnitt 2.7 berichtet über die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten. Abschnitt 2.8 beschreiben den wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen der erzielten Ergebnisse für Kleine und Mittlere Unternehmen (KMU).

### **2.1 AP 1: Detaillierte Spezifikation und Projektmanagement**

---

*MLS: 1 Monat, IPMT: 1 Monat*

---

Für ein erfolgreiches Kooperationsprojekt ist es erforderlich, die Aktivitäten der beiden Institute gut abzustimmen und ein gemeinsames Begriffsverständnis zu erarbeiten.

#### **Ziel**

Ziel des ersten Arbeitspaketes war daher, im ersten Schritt die wesentlichen Terminologien des Produktionsmanagements und der Umschlag- und Transportlogistik abzugleichen und für das Forschungsvorhaben gültige Definitionen festzulegen (AP 1.1). Dazu zählen sowohl der Abgleich von relevanten Kenn- und Zielgrößen als auch die Definitionen von Systemen, Elementen und Schnittstellen, um eine einheitliche Modellierung der Kennlinien für Umschlagterminals des KV zu ermöglichen. Im Fokus stehen die Zwischenabstellflächen und der Portalkran als Arbeitssystem mit den wasser- und landseitigen Übergabepositionen bzw. Schnittstellen. Im zweiten Schritt (AP 1.2) werden gemeinsam anzuwendende Methoden des Projektmanagements festgelegt, um die Arbeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiter bzw. Mitarbeiterinnen zu koordinieren.

#### **Durchgeführte Arbeiten**

Für das Forschungsprojekt sind aus dem Produktionsmanagement vor allem die Kenngrößen Kapazität, Leistung, Bestand, Auslastung, Prozesszeit und Durchlaufzeit relevant. Aus der Umschlag- und Transportlogistik sind weitere bzw. mehrere Begriffsdeutungen für Kenngrößen gebräuchlich, wie z. B. Umstapler, Direktumschläge und Doppelspiele. Die Kenngrößen sind auf Grundlage ihrer Definition verglichen und Unterschiede herausgearbeitet worden. Anschließend wurden geeignete Definitionen für das Forschungsvorhaben erarbeitet. Als Methoden des Projektmanagements wurden Meilensteintrendanalyse und Gantt-Charts gewählt. Es wurden regelmäßige, fixe Termine gesetzt, zu denen bestimmte Meilensteine des Projekts erledigt worden sein müssen. Es galt dabei fortlaufend festzulegen, in welchen Zeitperioden der Ist-Zustand kontrolliert werden soll. Zudem gab es regelmäßige Stand-Up Meetings. Besprochen wurden in diesen Meetings Aufgaben, die bereits abgeschlossen wurden, Probleme, Hindernisse, die überwunden wurden, sowie Aufgaben, die bis zum nächsten Termin zu erledigen sind. Ein Gantt-Chart, welches das Arbeitsdiagramm enthält, wurde als Grundlage der Meetings eingesetzt. Das Diagramm wurde um Teilaufgaben erweitert sowie Projektbegleitende Ausschüsse (PAs), vorhabenbezogene Aufwendungen bzw. Dienstleistungen der Wirtschaft (vAWs), Publikationen, etc. eingetragen. Ein Citavi-Cloud-Ordner und ein Nextcloud-Ordner vereinfachten den institutsübergreifenden Austausch von Informationen.

## Ergebnisse

Es wurde ein Glossar erstellt, welches die relevanten Begriffe umfasst (siehe Tabelle 1). Die verwendeten Begriffe basieren auf den Definitionen des Produktionsmanagements (in Anlehnung an Lödding 2016; Nyhuis und Wiendahl 2012), ergänzt durch die Definitionen der Transportlogistik (basierend auf Basallo-Triana et al. 2022; Egli 2002; Goodchild 2005; Lampe 2006; Möller 2002; Seitz 2016). Die wesentlichen Begriffe sind in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Glossar der für das Forschungsprojekt wesentlichen Definitionen*

<b>Kenngröße</b>	<b>Definition</b>
Abfertigungsauftrag	Summe der Kranaufträge, die benötigt werden, um ein Verkehrsmittel (Zug, Schiff oder Lkw) abzufertigen
Auftragsbestand	Anzahl der Aufträge in der Bearbeitung und in der Warteschlange
Auslastung	Verhältnis der Anzahl der fertiggestellten Aufträge pro Zeiteinheit zur maximal möglichen Anzahl der fertiggestellten Aufträge pro Stunde
Direktumschlag	Umschlag einer Ladeeinheit von einem Verkehrsmittel auf ein anderes ohne Zwischenlagerung
Doppelspielstrategie	Abfertigungsstrategie, bei der die Beladung und die Entladung eines Verkehrsmittels alternierend erfolgt
Einzelspielstrategie	Abfertigungsstrategie, bei der die Beladung eines Verkehrsmittels nach seiner vollständigen Entladung erfolgt
Indirektumschlag	Umschlag einer Ladeeinheit von einem Verkehrsmittel auf ein anderes mit Zwischenlagerung
Kapazität	Maximale mögliche Anzahl der fertiggestellten Aufträge pro Stunde
Kranauftrag	Ein einmaliges Transportieren einer Ladeeinheit von einem Startort zu einem Zielort innerhalb des Terminals mittels Portalkran
Lagerbestand	Anzahl der Ladeeinheiten, die sich bei der Zwischenlagerung in der Zwischenabstellfläche befinden
Lastfahrt	Vollfahrt von einem Startort zu einem Zielort eines Kranauftrags mit einer Ladeeinheit
Leerfahrt	Anfahrt zum Startort eines Kranauftrags ohne Ladeeinheit
Leistung	Anzahl der fertiggestellten Aufträge pro Stunde
Umstapler	Ein unproduktiver Kranauftrag, der benötigt wird, um auf eine durch andere Ladeeinheiten blockierte Ladeeinheit zuzugreifen

Es wurden darüber hinaus Dokumente (Templates) erstellt und das Projektmanagement entsprechend des zur Verfügung stehenden wissenschaftlich-technischem Personals je Forschungseinrichtung (FE) angepasst.



## **2.2 AP 2: Prozessaufnahme und Datenbeschaffung/ -aufbereitung**

---

*MLS: 2 Monate, IPMT: 2 Monate*

---

### **Ziel**

Ziel des AP 2 war es, durch Beobachtungen und Prozessaufzeichnungen ein umfassendes Verständnis der Prozesse und logistischen Parameter in KV-Terminals zu entwickeln. Durch Exkursionen zu diversen KV-Terminals, Interviews mit Terminalbetreibern und anderen Unternehmen der Branche sowie die Analyse von Betriebsdaten bildete dieses Arbeitspaket die Grundlage für die Modellierung und Bewertung des Terminalbetriebs.

### **Durchgeführte Arbeiten**

AP 2 war in die folgenden Hauptaktivitäten gegliedert:

- AP 2.1: Interviewvorbereitung und Durchführung
- AP 2.2: Definition der Auftragsarten und Hierarchie sowie der grundlegenden Zeitanteile
- AP 2.3: Validierung der Ergebnisse durch Rückmeldungen der Projektpartner

#### **AP 2.1: Interviewvorbereitung und Durchführung**

AP 2.1 zielte darauf ab, kritische Einblicke in die Betriebsabläufe an KV-Terminals zu gewinnen, indem direkt mit Terminalbetreibern und Industriepartnern zusammengearbeitet wurde. Der Schwerpunkt lag auf den logistischen Kenngrößen, wie den Ankunfts- und Abfuhrmustern von Lkw und Zügen, dem Kranbetrieb, Durchlaufzeiten von Verkehrsmitteln und der Auslastung der Zwischenabstellfläche und der Portalkrane, um reale Praktiken, Herausforderungen und Restriktionen der KV-Terminals zu erfassen und so die Grundlage für die anschließende Simulation und Modellierung zu schaffen.

Um diese Ziele zu erreichen sind strukturierte Interviewleitfäden und Fragebögen entwickelt worden. Diese ermöglichten eine systematische und konsistente Datenerfassung. Es wurden neun Terminals besucht und die Forschungsfortschritte und -ergebnisse mit 19 Partnerunternehmen diskutiert. Die Interviews wurden mit Terminalbetreibern und anderen Industriepartnern durchgeführt. Dabei sind wichtige logistische Kenngrößen systematisch aufgezeichnet worden.

Die Interviews und Beobachtung haben wesentliche Einblicke in die gegensätzlichen Logistikziele von KV-Terminals ermöglicht. Insbesondere der Zielkonflikt zwischen hoher Kranauslastung und kurzen Durchlaufzeiten sowie der Bedarf koordinierter Ankunfts- und Abfuhrmuster von Lkw waren häufig genannte Themen. Diese Erkenntnisse unterstützen die Entwicklung des Simulationsmodells und dienen als Grundlage für nachfolgende Arbeitspakete und Analysen.

#### **AP 2.2: Definition der Auftragsarten sowie der grundlegenden Zeitanteile**

Für die Prozessaufnahme wurden insgesamt sechs Terminals besichtigt und die entsprechenden Kontaktpersonen interviewt. Im zweiten Schritt (AP 2.2) sind auf Basis der durchgeführten Prozessaufnahmen und einer Literaturrecherche die wichtigsten Auftragsarten und Hierarchien definiert worden. Ihre grundlegenden Zeitanteile und Durchlaufelemente sind basierend auf den in AP 2.1 durchgeführten Interviews sowie den bestehenden Vorarbeiten von beiden FE ermittelt

worden. Die während der Definition getroffenen Annahmen wurden mit interessierten Unternehmen (KV-Terminalbetreibern und Beratungsunternehmen der Branche) besprochen.

## Ergebnisse

Zu den wichtigsten Auftragsarten in KV-Terminals zählen Kranaufträge und Abfertigungsaufträge. Ein Kranauftrag beschreibt analog zum Transportauftrag (vgl. Egli 2002; Seitz 2016) oder zum Kranspiel (vgl. Möller 2002) das Handling einer Ladeeinheit, z. B. ihre Beladung auf ein oder Entladung von einem Verkehrsmittel. Die Prozesszeit eines solchen Auftrags besteht aus der Leerfahrt zum Startort, der Aufnahme einer Ladeeinheit, der Lastfahrt zum Zielort und der Ablage der Ladeeinheit. Zusammen mit der Wartezeit auf Bearbeitung bildet die Prozesszeit die Durchlaufzeit eines Kranauftrags am Kran (Alieksieiev et al. 2024a). Abbildung 1 zeigt das Durchlaufelement eines Kranauftrags.

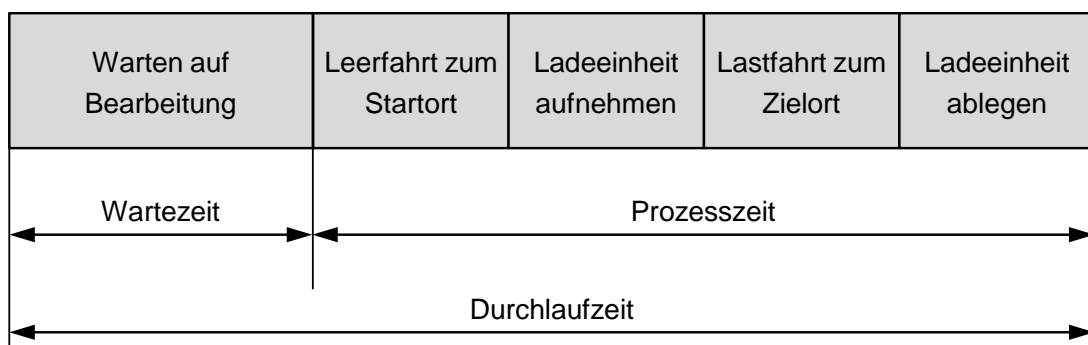


Abbildung 1: Durchlaufelement eines Kranauftrags (in Anlehnung an Möller 2002; Egli 2002; Alieksieiev et al. 2024a)

Ein Abfertigungsauftrag besteht aus einem oder mehreren Kranaufträgen, die zur vollständigen Abfertigung eines Verkehrsmittels benötigt werden. Dazu gehört die Entladung und Beladung aller dem Terminal bzw. dem Transportmittel zugewiesener Ladeeinheiten des jeweiligen Transportmittels. Dementsprechend stellt die Prozesszeit eines Abfertigungsauftrags die Summe der Prozesszeiten entsprechender Kranaufträge dar. Die Bearbeitung eines Abfertigungsauftrags kann unterbrochen werden, zum Beispiel wenn ein Auftrag mit höherer Priorität, bspw. ein potentieller Direktumschlag, eingeht. Darüber hinaus kann der Abfertigungsauftrag vor der Bearbeitung und nach der Bearbeitung Wartezeiten aufweisen. Wartezeiten können durch Belegung des Equipments, fehlende Freigaben im nachfolgenden Schienennetz, Wagenprüfungen oder Wartungsarbeiten ausgelöst werden. Zusammen mit der Unterbrechungszeit und den Wartezeiten bildet die Prozesszeit die Durchlaufzeit eines Abfertigungsauftrags am Kran (Alieksieiev et al. 2024a). Abbildung 2 zeigt das Durchlaufelement eines Abfertigungsauftrags.

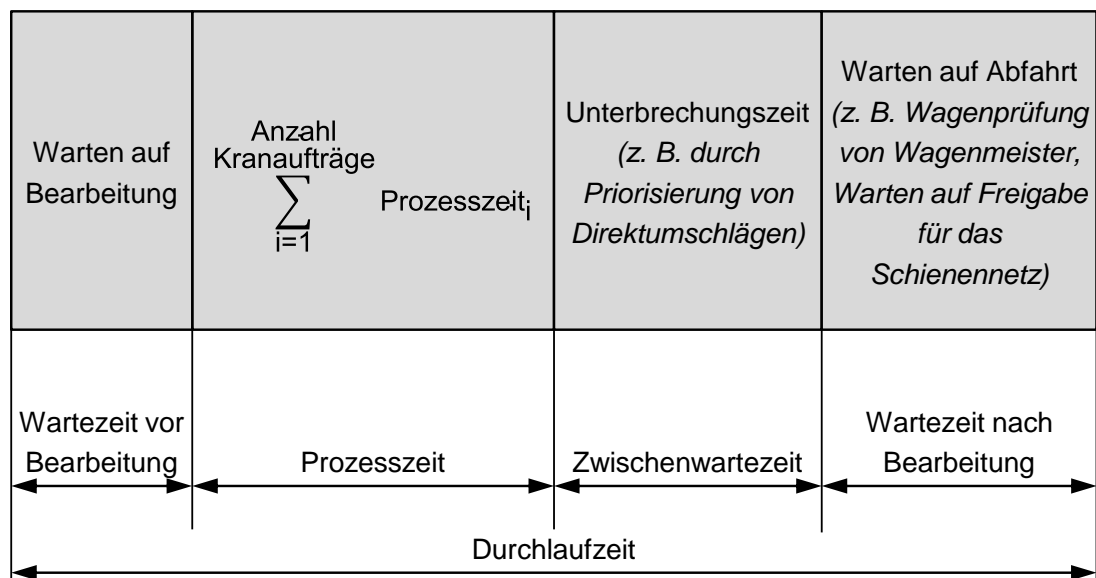


Abbildung 2: Durchlaufelement eines Abfertigungsauftrags (in Anlehnung an Alieksieiev et al. 2024a)

### AP 2.3: Validierung der Ergebnisse durch Rückmeldungen der Projektpartner

Zur Validierung der gesammelten Daten und zur Verfeinerung der Prozessbeschreibungen wurden Feedback-Sitzungen mit Projektpartnern und Fachleuten aus der Industrie durchgeführt. Kernaktivitäten dabei waren die Vorstellung und Diskussion erster Ergebnisse mit Terminalbetreibern und Forschungspartnern, die Verifikation der aufgenommenen Parameter und Daten mit Fokus auf den Zwischenankunftszeiten, dem Kranbetrieb, und den Kraufträgen sowie Abfertigungsaufträgen, der iterativen Präzisierung der Daten basierend auf Einblicken in den operativen Betrieb von KV-Terminals sowie Feedback von Partnerunternehmen und KV-Terminalbetreibern.

Die validierten Ergebnisse dieser Phase waren ausschlaggebend bei der Definition der Eingabewerte für das Simulationsmodell, welches in AP 3 erstellt worden ist.

## 2.3 AP 3: Entwicklung des Simulationsmodells

---

*MLS: 6 Monate, IPMT: 1 Monat*

---

### Ziel

Das Ziel von AP 3 war die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Simulation von Betriebskennlinien und zur simulativen Überprüfung des in AP 5 entwickelten Konzeptes zur Termin- und Kapazitätsplanung in KV-Terminals. Die Simulation ist ein etabliertes Tool in der Produktion und Logistik zur Unterstützung der Planung, Steuerung und Überwachung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse (vgl. Wenzel 2018, S. 1). Sie wird zur Untersuchung einer Vielzahl strategischer, taktischer und operativer Problemstellungen verwendet (vgl. Baudach et al. 2013, S. 341; Gutenschwager et al. 2017, S. 47).

Dieses Arbeitspaket wurde in die folgenden Aktivitäten unterteilt:

- AP 3.1: Schaffung eines ausführbaren Simulationsmodells
- AP 3.2: Verifikation und Validierung des Simulationsmodells

### Durchgeführte Arbeiten

#### *AP 3.1: Schaffung eines ausführbaren Simulationsmodells*

Zur Durchführung von Simulationsstudien im Bereich der Produktion und Logistik hat sich ein bestimmtes Vorgehen bewährt (vgl. Rabe et al. 2008, S. 5). Dieses sogenannte Simulationsvorgehensmodell ist in der VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1 festgehalten und wird hier in Abbildung 3 vereinfacht dargestellt. Als Simulationsstudie wird hierbei die Durchführung eines Projektes zur Beantwortung einer spezifischen Fragestellung verstanden (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 141). Dieses Vorgehensmodell wird eingesetzt, um ein ausführbares Modell eines KV-Terminals zu erstellen.

Die VDI-Richtlinie 3633 befasst sich mit der Durchführung von Simulationsstudien und bietet ein systematisches Vorgehen für die Planung, Durchführung und Auswertung von Simulationsstudien, um sicherzustellen, dass diese Studien zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse liefern. Nachfolgend sind wesentliche Punkte des Vorgehens in BePoT, angelehnt an die Richtlinie, aufgeführt.

**Punkt 1: Definition der Zielsetzung.** Dieser Arbeitsschritt umfasst eine klare Festlegung der grundlegenden Fragestellung und Ziele der Simulation. Darauf aufbauend erfolgt die Aufgabendefinition. Diese leiten sich aus den Projektzielen ab.

**Punkt 2: Aufbau des Simulationsmodells.** Die Systemanalyse, die für die Erstellung eines Konzeptmodells von Nöten ist, beinhaltet die Identifikation der Systemkomponenten und deren Wechselwirkungen. Zudem ist die Definition von Randbedingungen und Annahmen entscheidend. So wurde etwa festgelegt, dass zunächst nur bimodale KV-Terminals (Straße-Schiene) abgebildet werden sollen, da diese eine klassische Form von KV-Terminals darstellen (Kaffka 2013, S. 263). Zudem wurden aufgrund der Heterogenität von Aufbau, eingesetztem Equipment, der Umschlag-

leistung und somit auch der angebotenen zusätzlichen Dienstleistungen und Depotleistungen zunächst nur der operative Bereich unterhalb des Portalkrans betrachtet (vgl. rote Bereiche in Abbildung 4).

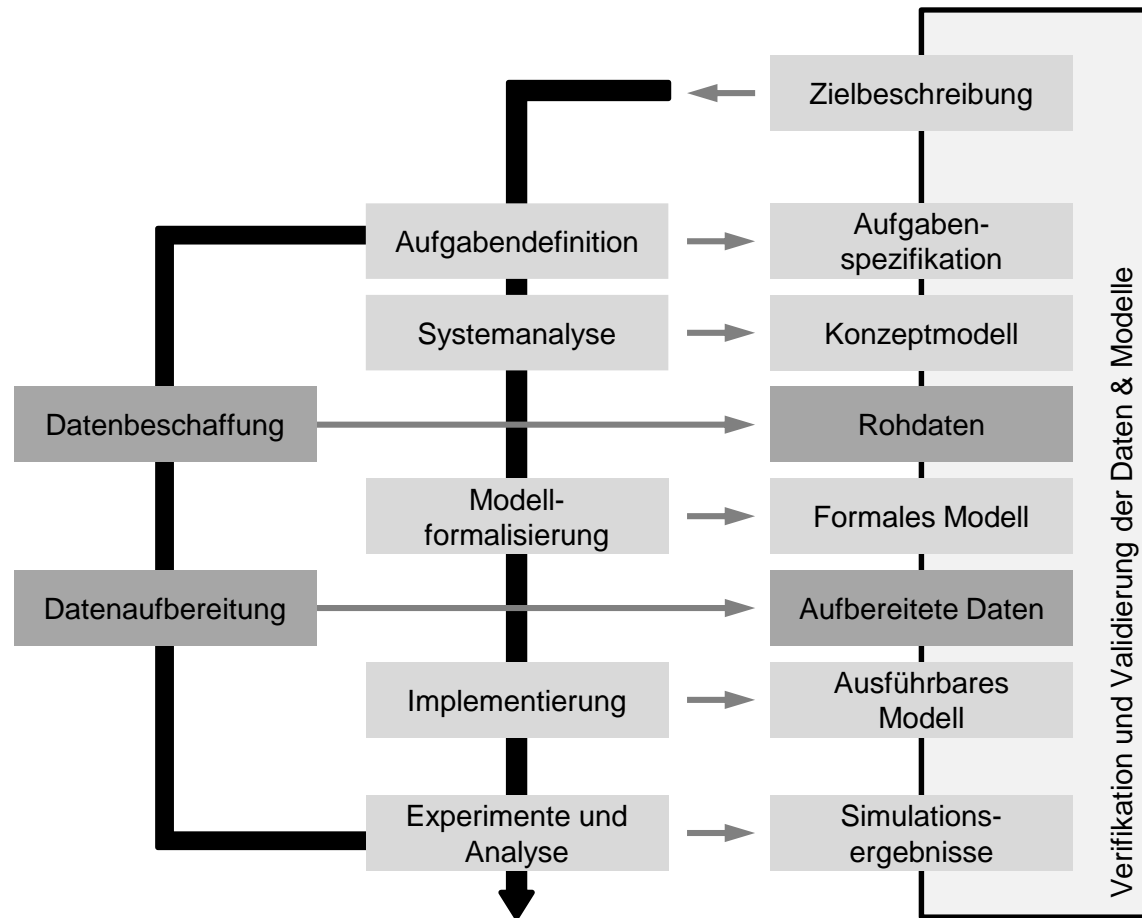
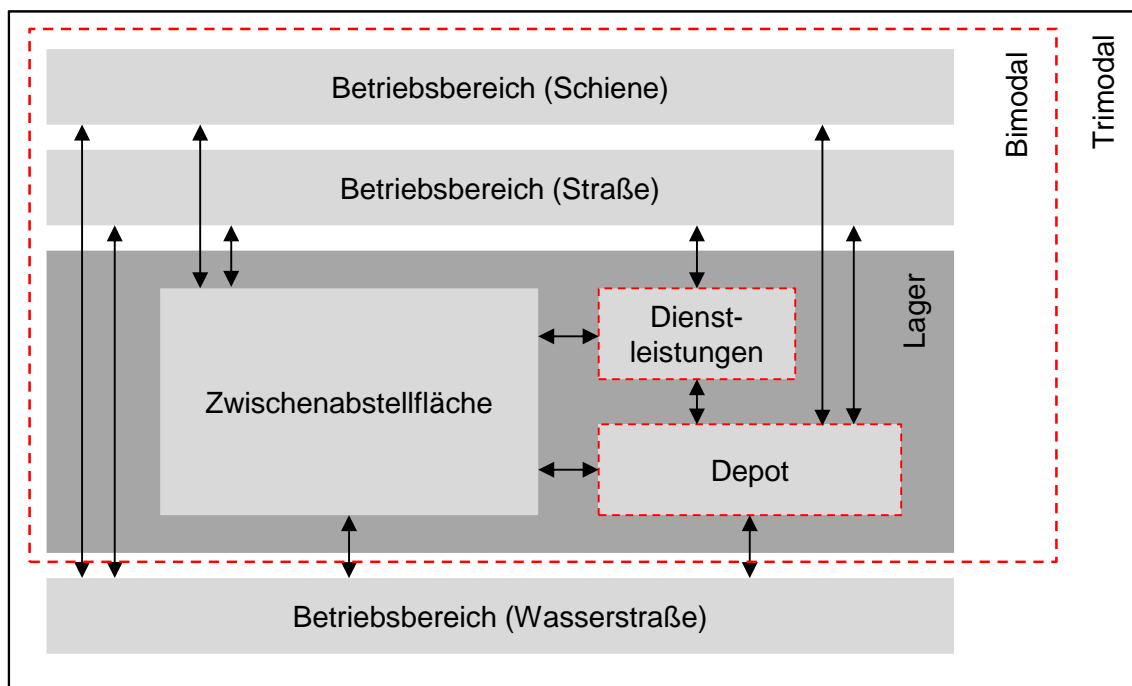
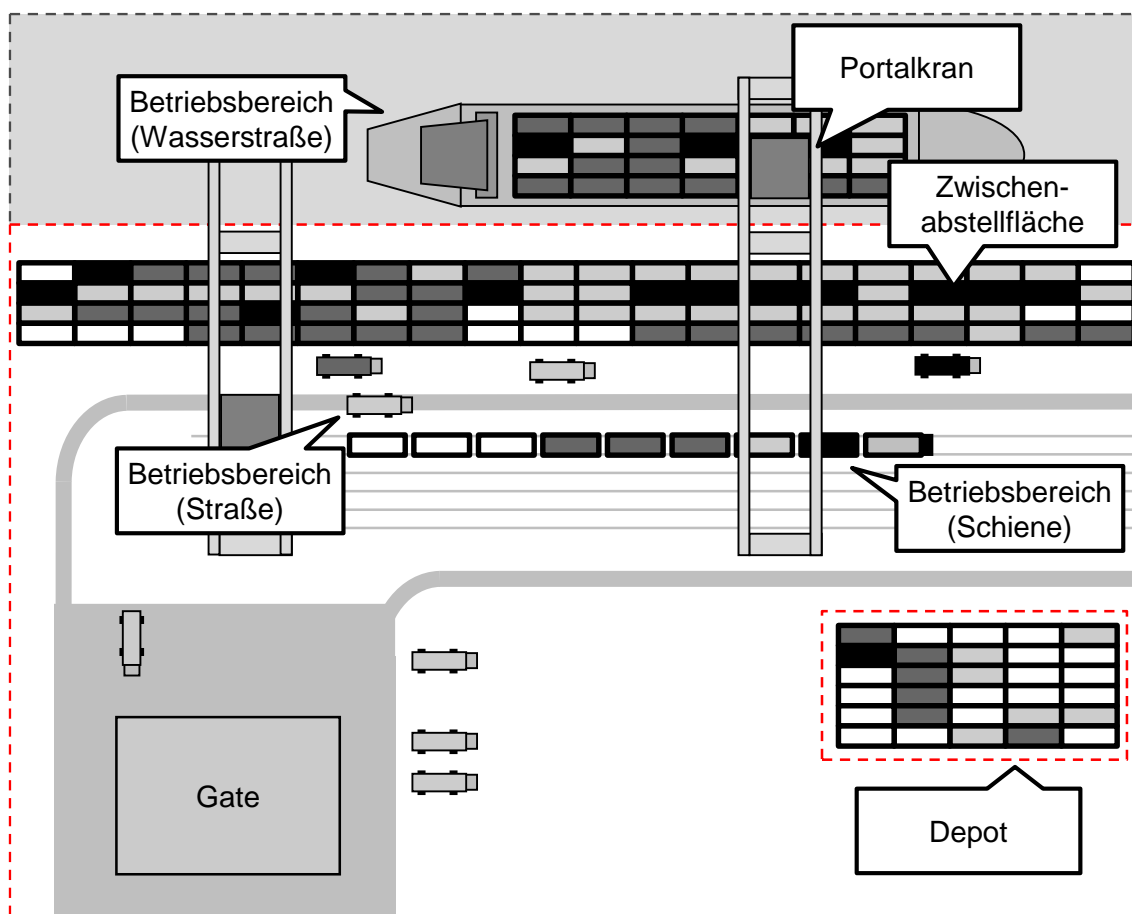


Abbildung 3: Vorgehen einer Simulationsstudie (eigene Abbildung in Anlehnung an VDI 3633, Blatt 1)

Auch die Auswahl einer geeigneten Simulationsmethode sowie der passenden Software war zu klären. Tecnomatix Plant Simulation (Entwickler: Siemens) ist eine leistungsfähige Simulationsumgebung für die ereignisdiskrete Simulation von Produktions- und Logistikprozessen. Sie dient der Abbildung komplexer, besonders dynamischer Unternehmensprozesse, die u.a. zur Simulation und Parametrierung von Betriebskennlinien genutzt werden (vgl. <https://www.siemens.com/PLM>) (vgl. Engehausen 2021; Trzyna 2015). Die Software wurde in der Version 2201 für das Projekt BePoT ausgewählt. Plant Simulation wird sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis häufig eingesetzt. Die vorhandenen Bausteine ermöglichen eine unkomplizierte Abbildung von Standardprozessen, während die offene Gestaltung die Ergänzung durch neue Bausteine und Funktionen ermöglicht.



a) Funktionsbereiche eines KV-Terminals (basierend auf Böse 2007, S. 140; Kaffka 2013, S. 264)



b) Layout eines KV-Terminals (Eigene Abbildung nach Krüger et al. 2023)

Abbildung 4: Struktur eines KV-Terminals: a) Funktionsbereiche eines KV-Terminals; b) Layout eines KV-Terminals

Die Erstellung des Konzepts und die Modellformalisierung für das Simulationsmodell bauten insbesondere auf den in AP 2.1 erzielten Ergebnissen auf. Die bestimmten Durchlaufelemente der Aufträge wurden entsprechend in dem Simulationsmodell umgesetzt. Dazu wurden die relevanten Objekte (wie die Aufträge und Ressourcen) angelegt. Auch die Ankunftsprozesse über die einzelnen Verkehrsträger wurden mithilfe von Fahrplänen bzw. Ankunftslisten abgebildet, um u. a. die Zuverlässigkeit und Robustheit des Simulationsmodells testen zu können. Anschließend wurde die Steuerungslogik für das Reihenfolgebildungsverfahren implementiert und Vorgaben für die Planungslogik (Prioritäten) erstellt. Neben der grundlegenden Modellierung der Terminalprozesse galt es insbesondere die Buchungslogik der Lkw-Ankünfte als Variationsparameter zu berücksichtigen, um die in AP 5 erstellte Logik des Access Management Systems zu bewerten. Das erstellte Simulationsmodell sollte dabei in der Lage sein die relevanten Zielgrößen auszuwerten. Das konzeptionelle Modell wurde mithilfe der ausgewählten Simulationssoftware implementiert. Ausgabewerte des Modells betreffen u. a. den Zu- und Abgang, Durchlaufzeiten, den Anteil der Direktumschläge und Lkw-Wartezeiten.

An den oben genannten Rahmenbedingungen orientiert wurde das Simulationsmodell mit dem Ziel entwickelt, Betriebskennlinien für Portalkrane zu simulieren. Das Simulationsmodell verfügt über eine Benutzeroberfläche, die die Modifikation wichtiger Eingabeparameter wie z. B. die Anzahl der Übergabepositionen, Gleise und Züge erlaubt und damit die Simulation und vergleichende Analyse verschiedener Terminal-Konfigurationen ermöglicht. Darüber hinaus unterstützt das Modell die Auswahl von Steuerungsstrategien (z. B. Betrieb mit einem oder mehreren Portalkranen, unterschiedliche Lagerstrategien (FIFO, LIFO), etc.), um unterschiedliche Betriebsszenarien darzustellen. Die Simulationsergebnisse dienen sowohl zur Verifizierung und Validierung des Modells als auch als Grundlage für die Erstellung der Betriebskennlinien. Somit unterstützen sie eine umfassende Systemanalyse. Abbildung 5 zeigt die schematische Struktur des Simulationsmodells. Dabei repräsentieren die grauen Quadrate die möglichen Positionen eines Auftrags im Terminal. Bewegungen eines Auftrags zwischen den Positionen werden mittels Portalkran durchgeführt. So wird das horizontale und vertikale Verfahren des Portalkrans im KV-Terminal abgebildet. In BePoT wurden mehrere, modular aufgebaute Simulationsmodelle erstellt. Diese Modelle repräsentieren allesamt die Kernkomponenten eines bimodalen KV-Terminals und unterscheiden sich in ihren Ausführungen je nach der zu beantwortenden Fragestellung.

**Punkt 3: Verifikation und Validierung des Modells.** Die Verifikation und Validierung sollen die verschiedenen Phasen einer Simulationsstudie begleiten. Sie dienen dazu, die Korrektheit und Eignung der Ergebnisse zu überprüfen. Bei der Verifikation werden die Syntax des Codes und die formale Korrektheit des Modells überprüft. Bei der Validierung wird sichergestellt, dass das Simulationsmodell die Realität in den relevanten Aspekten hinreichend genau abbildet. Es soll damit festgestellt werden, ob es das geeignete Modell zur Beantwortung der Fragestellung ist. Dafür wurden Regeln und Techniken entwickelt, die für ein systematisches Vorgehen hilfreich sind (vgl. VDI 3633, Blatt 1, S. 37). Die Überprüfung der Modellgenauigkeit erfolgte in BePoT durch den Vergleich mit realen Daten (bzw. Rücksprache mit der Praxis), Angaben aus der Literatur (u.a. Lampe 2006) und experimentellen Ergebnissen des Simulationsmodells (siehe AP 3.2). Die Kalibrierung des Modells, um sicherzustellen, dass es die realen Bedingungen korrekt widerspiegelt werden, wird auch in AP 3.2 thematisiert.

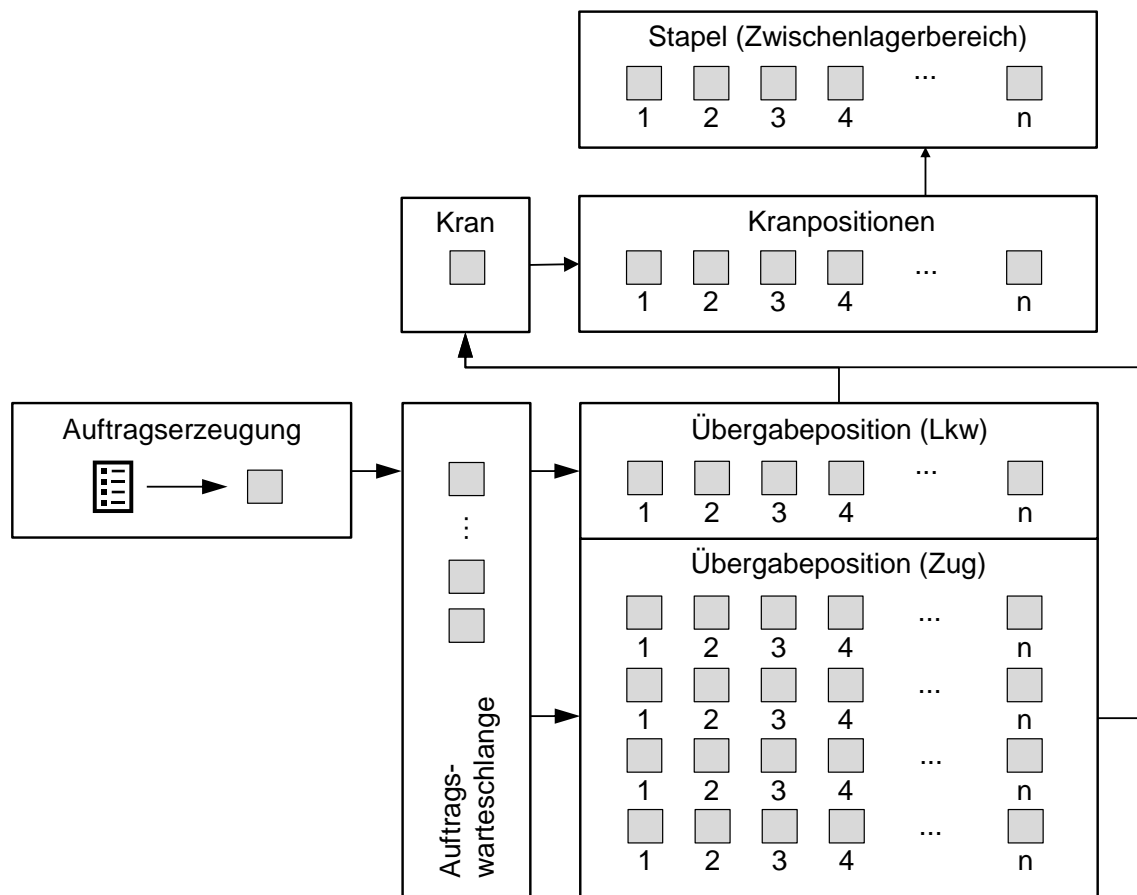


Abbildung 5: Schematische Struktur des Simulationsmodells

**Punkt 4: Durchführung der Simulation.** Die Festlegung der Simulationsparameter und -szenarien geschah im Zusammenhang mit AP 4. So wurden etwa verschiedene Verteilungen für die Zwischenankunftszeiten der Verkehrsmittel genutzt, um unterschiedliche Belastungssituationen darzustellen.

Zu Beginn jedes Simulationslaufes werden Zug- und Lkw-Ankünfte basierend auf einer zufallsverteilten Zwischenankunftszeit (ZAZ) für eine Einschwingphase von 100 Kранаufträgen generiert. Anschließend wird im Simulationsmodell ein 24-Stunden-Betrieb dargestellt (siehe Tabelle 2 für weitere Annahmen). Die Lkw kommen nach dem Zufallsprinzip mit einer oder zwei Ladeeinheiten an, während die Anzahl der Ladeeinheiten pro Zug einer Dreiecksverteilung folgen. Die ZAZ der Ladeeinheiten ist normalverteilt mit einer Standardabweichung von 5 Minuten. Das Modell unterscheidet nicht zwischen verschiedenen Ladeeinheit-Typen (z. B. Größe, Gewicht, Stapelfähigkeit). Sobald dem ankommenden Ladeeinheiten eine Übergabeposition zugewiesen wurde, werden sie mit einem Zeitstempel in einer Liste gespeichert und vom Kran nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet. Die Zwischenabstellfläche ist als ein Stapel pro Reihe modelliert worden, wobei nur die Fahrzeit des Krans entlang der Zwischenabstellfläche berücksichtigt wird. Es wurden keine umfassenden Lagerstrategien implementiert. Die Kranbearbeitungszeiten werden anhand einer Dreiecksverteilung (Minimum 1:45, Modus 2:00, Maximum 2:15 Minuten) und mit einer festen Verfahrzeit von 4 Sekunden zwischen zwei Stapeln abgebildet. Tabelle 2 fasst relevante Parameter, Einflussgrößen und Annahmen des Simulationsmodells zusammen.



Tabelle 2: Ausgewählte Annahmen des Simulationsmodells

Parameter	Annahme
Anzahl der Übergabepositionen / Lagerreihen	28
Anzahl Gleise	4
Anzahl Krane	1
Anzahl Ladeeinheiten pro Lkw	20 % der Lkw kommen mit zwei Ladeeinheiten an
Anzahl Ladeeinheiten pro Zug	Dreiecksverteilung ( $c=23$ , $a=18$ , $b=28$ )
Bearbeitungszeit des/der Kran(s/e)	Dreiecksv. ( $c=2:00$ , $a=1:45$ , $b=2:15$ ) [Minuten]
Verfahrzeit des/der Kran(s/e)	4 Sekunden zwischen zwei Reihen/Stacks

Das Simulationsmodell erfasst standardisierte Ausgabewerte. Dabei handelt es sich um Zeitstempel verschiedener Ereignisse (Ankünfte und Abfahrten von Lkw und Zügen sowie Aufnahme und Abgabe von Ladeeinheiten durch den Portalkran) und Leistungskennzahlen (Wartezeiten, Bearbeitungszeiten, mittlere Durchlaufzeiten von Kran- und Abfertigungsaufträgen, mittlerer Auftragsbestand, Anzahl der Fahrzeuge und Ladeeinheiten sowie mittlere Kranleistung und Kranauslastung). Aus diesen Ausgabedaten können die Betriebskennlinien abgeleitet werden. Für jede Betriebskennlinie wird die mittlere Leistung des Portalkrans ( $LA_m$ ) und die mittlere Durchlaufzeit ( $ZDL_m$ ) eines Ladeeinheiten über den mittleren Auftragsbestand ( $BA_m$ ) aufgetragen. Durchlaufdiagramme erhöhen das Verständnis, indem sie die kumulierten Zu- und Abgänge pro Simulationsszenario bzw. Betriebspunkt darstellen. Tabelle 3 zeigt die typischen Eingabe- und Ausgabewerte des Simulationsmodells. Je nach Untersuchungsgegenstand werden einzelne Eingabewerte ebenfalls berücksichtigt.

Tabelle 3: Eingabe- und Ausgabewerte des Simulationsmodells

Eingabewerte [Sekunden]	Ausgabewerte		
$ZAZ_m$	$BA_m$	$LA_m$	$ZDL_m$
260	$BA_{m,K260}$	$LA_{m,K260}$	$ZDL_{m,K260}$
...	...	...	...
7200	$BA_{m,K7200}$	$LA_{m,K7200}$	$ZDL_{m,K7200}$

**Punkt 5: Analyse der Simulationsergebnisse.** Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte im Hinblick auf die definierten Ziele. (Basis für die Ableitung von Näherungsgleichungen sowie zur Evaluierung des Vorgehens zur Termin- und Kapazitätsplanung im weiteren Sinne).

## Ergebnisse

Die Ergebnisse des **ersten Experiments** zu den simulierten Zielkonflikten der KV-Terminals sind auf der ASIM SPL 2023 vorgestellt worden (Grafelmann et al. 2023). Das dort vorgestellte Modell konzentriert sich auf ein bimodales KV-Terminal mit einem Portalkran. Es zielt darauf ab, simulierte Betriebskennlinien für Portalkrane abzuleiten. Die Eingabe- und Ausgabewerte entsprechen den Werten in Tabelle 3. Mit diesen Betriebskennlinien kann der Zielkonflikt zwischen einer hohen mittleren Kranleistung und kurzer mittlerer Durchlaufzeit der Kranaufträge in KV-Terminals analysiert werden. Bei der Simulation werden Streuung in den Eingangsdaten u. a. bei Ladung, Umschlag und Transportzeiten berücksichtigt.

Die Abbildung 6 veranschaulicht die simulierten Verläufe der mittleren Kranleistung und der mittleren Durchlaufzeit von Kranaufträgen abhängig von dem mittleren Auftragsbestand. Die Leistungskurve indiziert, dass bei Steigerung des mittleren Bestandes die mittlere Kranleistung zunächst ebenfalls proportional steigt. Ab einem gewissen mittleren Bestand kann eine Sättigung beobachtet werden. Ab diesem Bestandsniveau führen zusätzliche Aufträge in der Warteschlange zu geringfügigen Leistungszuwächsen. In diesem Bereich nähert sich die Leistungskurve asymptotisch der maximal möglichen Leistung an. Gleichzeitig kann bei der Durchlaufzeitkurve bei geringem Bestandsniveau keine bzw. kaum Steigung beobachtet werden. Sobald der Bestand weiter steigt, steigt auch die Durchlaufzeit stetig an. Dies führt dazu, dass bei steigendem Bestand die Vorteile einer hohen Kranauslastung durch die Nachteile hoher Durchlaufzeit – und damit auch Wartezeiten für die Aufträge – marginalisiert werden. Somit kann der Zielkonflikt zwischen einer niedrigen Durchlaufzeit und hoher Kranleistung für KV-Terminals aufgezeigt werden.

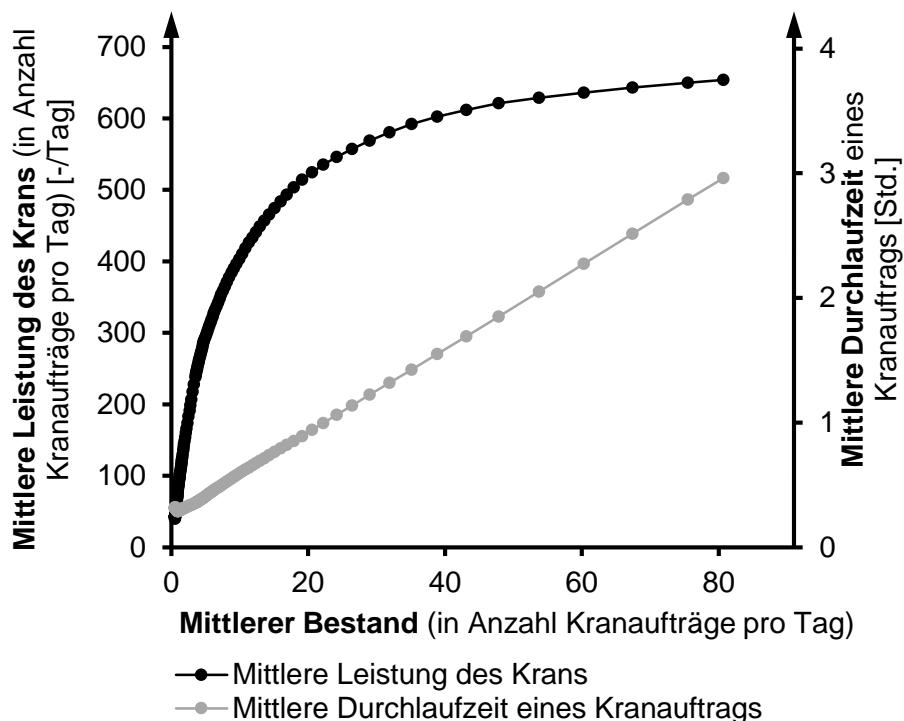


Abbildung 6: Simulierte Betriebskennlinien für mittlere Kranleistung und mittlere Durchlaufzeit eines Kranauftrags

Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen Durchlaufdiagramme für zwei unterschiedliche Belastungsszenarien dar. In beiden Abbildungen indizieren die sprunghaften Zugewinne der Zugangskurve

die Zugankünfte. In Abbildung 7 wird ein Szenario mit einem höheren mittleren Zwischenankunftszeit (ZAZ = 610 Sekunden) dargestellt. Dies führt zu einer geringeren Kranauslastung und erhöhten Warte- und Stillstandzeiten. Die Abgangskurve folgt der Zugangskurve unmittelbar, was darauf hindeutet, dass sich keine oder nur wenige Warteschlangen bilden und der Portalkran wenig ausgelastet ist.

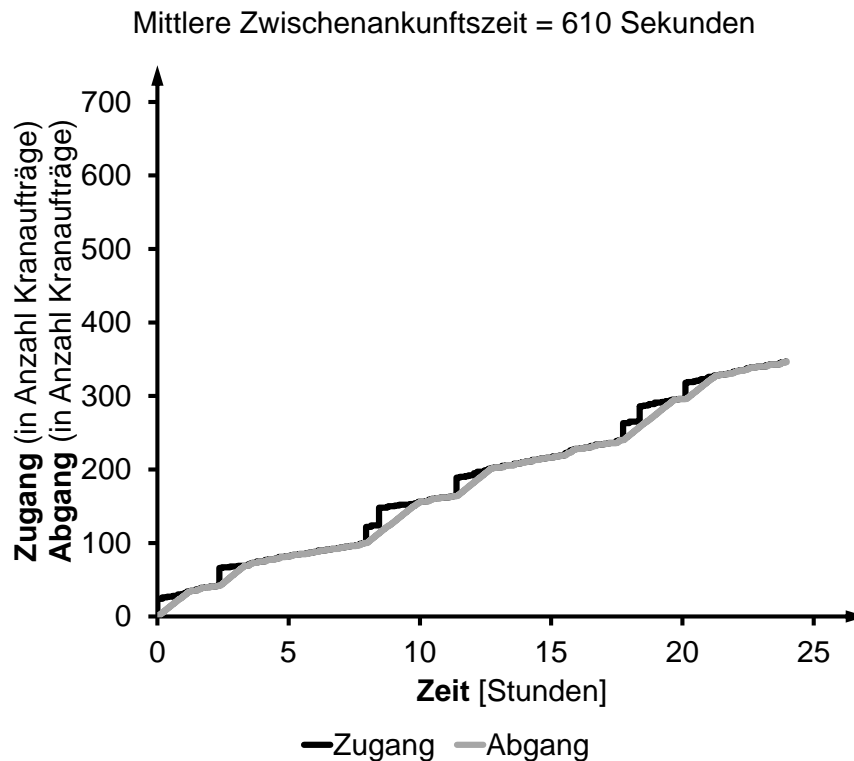


Abbildung 7: Durchlaufdiagramm des Portalkrans (Simulationsszenario mit geringerer Last)

Im Gegensatz dazu wird in Abbildung 8 ein Szenario mit geringerer Zwischenankunftszeit (ZAZ = 270 Sekunden) vorgestellt. Von dieser Abbildung kann aufgrund des linearen Verlaufs der Abgangskurve und dem Abstand von Zugangs- zur Abgangskurve, ein höherer Bestand und eine höhere Kranauslastung abgeleitet werden.

Diese Diagramme verdeutlichen die Auswirkungen der Ankunfts Muster auf das logistische Verhalten des Terminals und die Notwendigkeit einer Belastungssteuerung, um übermäßige Durchlaufzeiten zu vermeiden. Andernfalls kann es zu Wartezeiten und Überlastung des Portalkrans und somit des KV-Terminals kommen. So bieten diese Grafiken wertvolle Erkenntnisse zur Verbesserung des Betriebs von KV-Terminals.

In einem **zweiten Experiment** sind die Auswirkungen koordinierter Zugankünfte auf das Bestands-Leistungsverhältnis von Portalkranen untersucht worden. Die Ergebnisse wurden auf der ICPLT-Konferenz 2025 vorgestellt (Shahrivar et al. 2025). Den in ASIM 2023 vorgestellten simulativen Kennlinien liegen Annahmen der Warteschlangentheorie (starre Krankapazitäten, unabhängige Ankunftszeiten der Züge und Lkw, vgl. Winter et al. 2021; Hopp und Spearman 2008, S. 284–289) zugrunde. Die Ergebnisse zeigen, dass im Falle der unabhängigen bzw. zufällig verteilten Zwischenankunftszeit sehr hohe Bestände nötig sind, um eine hohe Leistung zu erreichen. Dies

führt zu langen Durchlaufzeiten. Daher wird in diesem Experiment die Annahmen der Warteschlangentheorie verletzt, indem Zugankünfte und somit auch die Kranbelastung gezielt gesteuert werden.

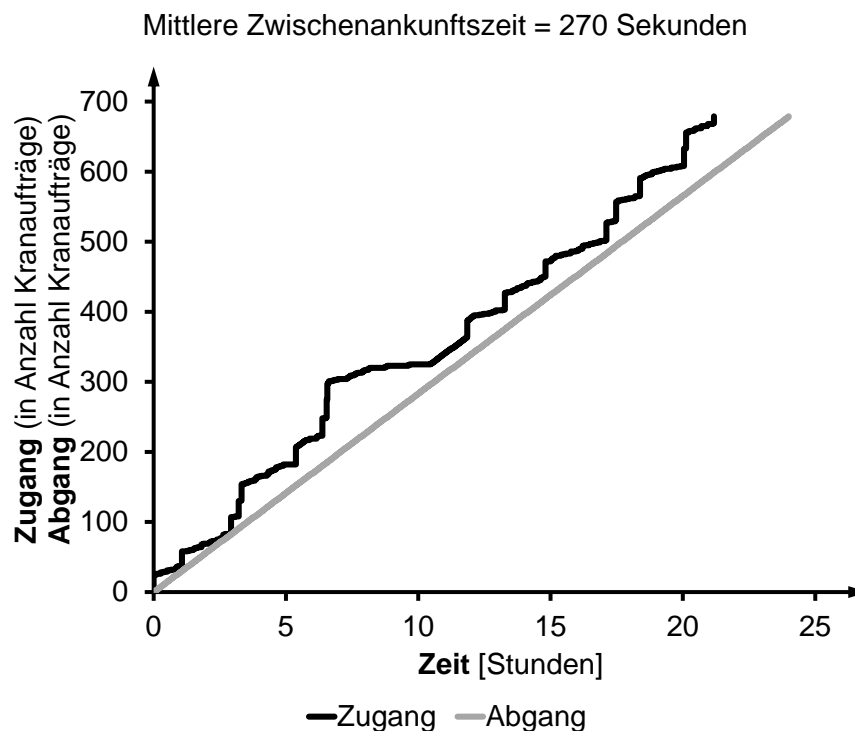


Abbildung 8: Durchlaufdiagramm des Portalkrans (Simulationsszenario mit höherer Last)

Daher ist das Forschungsziel dieses Experimentes der simulative Vergleich von unkoordinierten und koordinierten Zug- und Lkw-Ankünften. Dieser Versuchsaufbau entspricht der Implementierung eines Zeitfensterbuchungssystems (Truck Appointment Systems – TAS) oder vergleichbaren Systemen im KV-Terminal. Frühere Studien (vgl. Hu, Q.: Wiegmanns, B. et al. 2019; Rizzoli et al. 2002; Malavasi et al. 2006) haben die Vorteile des Ankunftsmanagements aufgezeigt. Ein Buchungssystem, das in KV-Terminals zugeschnitten ist, ist im Rahmen dieses Projektes konzipiert worden.

Die Methodik baut auf Shahrivar et al. 2025 und früheren Forschungsarbeiten (Clausen et al. 2012; Nyhuis und Wiendahl 2012; Lödding 2016; Aliksieiev et al. 2024a) auf. Es soll analysieren, wie sich koordinierte Lkw-Ankünfte auf die bestandsabhängige mittlere Kranauslastung ( $A_m$ ) in KV-Terminals auswirkt. Das Simulationsmodell stellt ein bimodales Terminal mit zwei Kranen, Zwischenlagerung und definierten Be- und Entladevorgängen dar. Das Experimentdesign sieht vor, dass Fahrzeuge (Züge und Lkw) entweder zufällig oder koordiniert ankommen. Für beide Fälle wird die Zwischenankunftszeit variiert (siehe Tabelle 4). Es wird ein Modalsplit von 96 % Lkw und 4 % Züge angenommen.

Tabelle 4: Experimentendesign für den Vergleich von Fahrzeugankunftsmuster

Ankunftsmuster der Fahrzeuge	Mittlere Zwischenankunftszeit (ZAZ <sub>m</sub> )			
	ZAZ <sub>m,1</sub>	ZAZ <sub>m,2</sub>	...	ZAZ <sub>m,23</sub>
Zufällig	E1	E2	...	E23
Koordiniert	E24	E25	...	E46

Die ZAZ ist auf Basis der in Hopp und Spearman 2008 dargelegten Prinzipien der Warteschlangentheorie berechnet worden, wobei die Bearbeitungszeit für alle Fahrzeuge konstant 3:45,6 Minuten beträgt. Die Eingabewerte sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Eingabewerte für das Simulationsmodell

Item	Eingabewert									
A <sub>m</sub> [-]	0,98	0,94	...	0,9	0,85	...	0,5	0,4	...	0,08
ZAZ <sub>m</sub> [s]	112	227	...	292	344	...	627	690	...	2256

Formel (3.1) kann zur Berechnung der Eingabewerte herangezogen werden.

$$A_m = \frac{t_{p,m}}{2 \cdot ZAZ_m} \quad (3.1)$$

A <sub>m</sub>	Mittlere Auslastung [-]
t <sub>p,m</sub>	mittlere Prozesszeit [s]
ZAZ <sub>m</sub>	mittlere Zwischenankunftszeit [s]

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass koordinierte Zugankünfte im Vergleich zu zufälligen Zugankünften bei gleichbleibender Kranauslastung den benötigten mittleren Bestand erheblich reduzieren. Diese Reduzierung des Bestands steht in direktem Zusammenhang mit kürzeren Durchlaufzeiten, da weniger Staus zu kürzeren Wartezeiten für Züge und Lkw führen. Darüber hinaus stellt die Studie fest, dass die Koordinierung von Zugankünften einen positiven Effekt auf die Lösung des Konflikts zwischen hoher Kranauslastung und kurzer Durchlaufzeit haben. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Koordinierung der Lkw-Ankünfte mit den Zugankünften die logistische Zielerreichung der KV-Terminals weiter verbessern könnte, indem die Häufigkeit der direkten Umladungen erhöht und unproduktive Lageraktivitäten minimiert werden. Diese Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass die Koordination von Zug- und Lkw-Ankünften eine vielversprechende Strategie darstellt, um den Zielkonflikt in KV-Terminals zu entschärfen. Durch die

Senkung des für ein bestimmtes Auslastungsniveau erforderlichen mittleren Bestandes führt die Koordination zu einer verbesserten Leistung und Effizienz des Terminals. Die Ergebnisse dieses Experimentes sind in Abbildung 9 dargestellt.

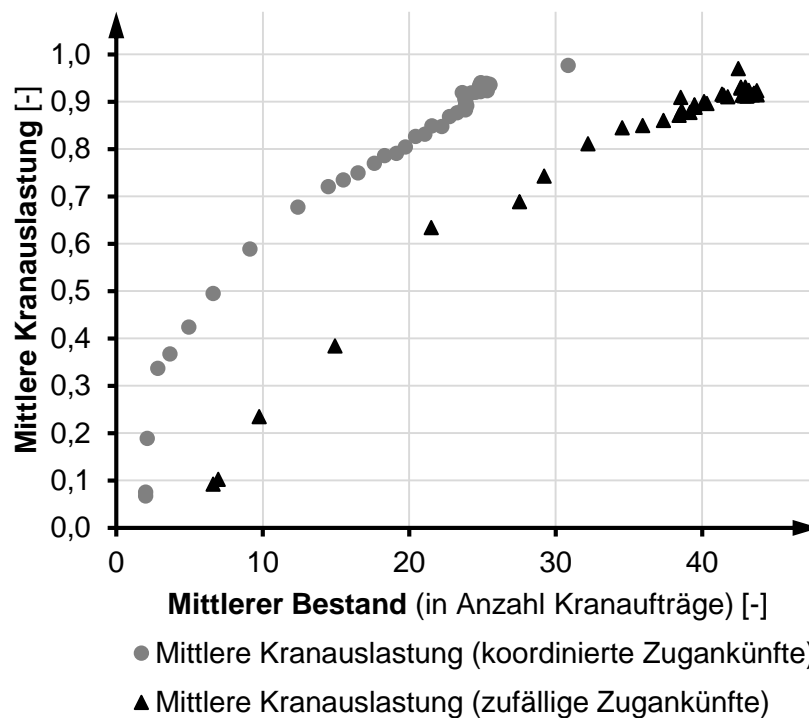


Abbildung 9: Simulativer Vergleich der Zugankunftsmuster auf die Kranauslastung

In einem **dritten Experiment** wird der Effekt von Direktumschlägen auf die Kranleistung untersucht. Diverse Studien haben gezeigt, dass Direktumschläge die Effizienz von KV-Terminals deutlich steigern können. Da sie den Zwang Ladeeinheiten zwischenzulagern reduzieren, können so Lagerkosten und unproduktive Kranbewegungen verringert werden sowie die Kranleistung durch das gleichzeitige Bearbeiten eines Zuges und eines Lkw maßgeblich gesteigert werden. Da Direktumschläge die effizientesten Umschlagsbewegungen im KV-Terminal sind, spielt die Synchronisierung von Zug- und Lkw-Ankünfte eine große Bedeutung für die Leistung von KV-Terminals. Sie wirken sich ebenfalls stark auf die Kapazität von KV-Terminals aus (Basallo-Triana et al. 2022). Obwohl verschiedene Studien mathematische Optimierung und Simulation zum Aufzeigen von Leistungssteigerungspotentialen in KV-Terminals genutzt haben (Basallo-Triana et al. 2022; Möller 2002; Lampe 2006; Nellen et al. 2022), ist bisher kein strukturierter, simulationsbasierter Ansatz zur Analyse des Effekts von Direktumschlägen auf logistische Leistungsindikatoren in KV-Terminals vorgestellt worden.

In diesem Experiment wird ein KV-Terminal mit verschiedenen Direktumschlaganteilen simuliert. Anschließend werden Betriebskennlinien für die Portalkrane abgeleitet, die die Leistung des KV-Terminals für verschiedene Direktumschlaganteile (0-100%) darstellen. Dieser integrierte Rahmen bietet umsetzbare Erkenntnisse zur Steigerung der Umschlagkapazität und zur effektiven Ausbalancierung des terminallogistischen Zielkonflikts. Die Ergebnisse dieser Studie werden auf der ASIM SPL 2025 vorgestellt.

### *AP 3.2 Verifikation und Validierung des Simulationsmodells*

Für AP 3.2 ist ein iterativer Verifikations- und Validierungsprozess (V&V) implementiert worden. V&V ist hierbei essentiell, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Simulationsmodells zu gewährleisten. Die Verifizierung konzentriert sich auf die Bestätigung, dass das Modell logisch strukturiert ist und den beabsichtigten Entwurfsspezifikationen entspricht, während die Validierung die Genauigkeit des Modells bei der Darstellung des realen Umschlagterminalbetriebs bewertet (Rabe et al. 2008). Dies beinhaltet in diesem Projekt insbesondere die Prüfung, ob das Modell in sich konform und logisch aufgebaut ist bzw. die Anforderungen des Realsystems hinreichend erfüllt. Die Zusammenarbeit mit Fachleuten aus der Branche – darunter Terminalbetreibern, Simulationsexperten und Beratungsunternehmen – ist ein wesentlicher Bestandteil dieses Prozesses gewesen und lieferte wichtige Erkenntnisse, die in die Modellanpassungen und -verbesserungen eingeflossen sind. Umfassende Tests und Analysen der Ausgabedatensätze wurden durchgeführt, was eine kontinuierliche Bewertung und Verfeinerung der Leistung des Modells ermöglicht hat. Dieser kooperative und methodische Ansatz hat sichergestellt, dass das Simulationsmodell nicht nur theoretischen Standards entspricht, sondern auch mit den praktischen betrieblichen Gegebenheiten übereinstimmt. Dadurch sind die Anwendbarkeit und Glaubwürdigkeit der Ergebnisse und Methodik für eine Übertragung auf reale Anwendungen gewährleistet.

Die Verifikation und Validierung findet an verschiedenen Stellen der Studie wiederkehrend statt und kann stets zu Anpassungen des Modells oder der Simulationsszenarien führen. Dafür sind folgende Aspekte relevant:

**Punkt 6: Dokumentation.** Abschließend erfolgte die Erstellung eines umfassenden Berichts über die durchgeführten Simulationsexperimente sowie die Speicherung der Ausgabetabellen der Simulationsläufe. Die Dokumentation umfasst Annahmen, Randbedingungen, Modellparameter und schließlich die Ergebnisse.

**Punkt 7: Kommunikation der Ergebnisse.** Die Präsentation der Simulationsmodells und Einblicke in die Ergebnisse vor relevanten interessierten Unternehmen erfolgte während der projektbegleitenden Sitzungen, u.a. in den Projektbegleitenden Ausschüssen (PA2, PA3 und PA4).

## 2.4 AP 4: Modellierung und Evaluation von Betriebskennlinien für KV-Terminals

---

*MLS: 5 Monate, IPMT: 9 Monate*

---

### Ziel

Ziel von AP 4 war es, Betriebskennlinien für wesentliche Auftragsarten in KV-Terminals zu modellieren und zu evaluieren, um die wesentlichen logistischen Zielgrößen in Abhängigkeit vom Auftragsbestand zu untersuchen.

### Durchgeführte Arbeiten

Ausgehend von den in AP 2 ermittelten Zeitanteilen und Durchlaufelementen für die zwei wichtigsten Auftragsarten (Kranauftrag, Abfertigungsauftrag) wurden entsprechende ideale Kran- und Abfertigungsprozesse definiert. Basierend darauf erfolgte die Definition der wichtigsten Kenngrößen (idealer Mindestbestand an jeweiligen Aufträgen, maximal mögliche Kran- und Abfertigungsleistung). Sie wurden anschließend jeweils mathematisch beschrieben. Im Weiteren wurden ideale Kennlinien für Kran- und Abfertigungsleistung sowie für die Durchlaufzeiten von Kran- und Abfertigungsaufträgen abgeleitet. Darüber hinaus wurden Teilmodelle für wesentliche operative Verschwendungen – Zwischenlagerung, Umstapler und Leerfahrten – sowie für die entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen – Direktumschläge, Stapellogiken und Doppelspiele – abgeleitet. Abschließend wurde das Konzept für die Integration der Teilmodelle in das Kennlinienmodell entwickelt.

### Ergebnisse

#### *Grundlegende Modellierung der Betriebskennlinien*

Die Definition eines idealen Prozesses bildet eine wichtige Grundlage der Modellierung von Betriebskennlinien. In der Produktionslogistik beschreibt der ideale Produktionsprozess den Prozess, bei dem weder das Arbeitssystem auf den Auftrag wartet (100% Auslastung) noch der Auftrag auf die Bearbeitung von einem Arbeitssystem (keine Wartezeit) (Nyhuis und Wiendahl 2012). Ein idealer Abfertigungsprozess ähnelt dem idealen Produktionsprozess. Bei einem idealen Abfertigungsprozess befindet sich zu jedem Zeitpunkt nur ein Abfertigungsauftrag im System, so dass sich keine Warteschlange von Aufträgen bildet, aber auch keine Wartezeiten des Krans entstehen. Der ideale Mindestbestand, der bei einem idealen Prozess für eine maximale Auslastung eines Arbeitssystems benötigt wird, entspricht im Falle eines idealen Abfertigungsprozesses einem Abfertigungsauftrag. Die maximal mögliche Leistung eines Portalkrans in Anzahl der Abfertigungsaufträge lässt sich als Quotient der Umschlagskapazität eines Portalkrans und der mittleren Prozesszeit berechnen (Alieksieiev et al. 2024a, vgl. Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$LA_{\max, PK, AA} = \frac{KAP_{PK}}{t_{p, AA, m}} \quad (4.1)$$

$LA_{\max, PK, AA}$

maximal mögliche Leistung eines Portalkrans (in Anzahl der Abfertigungsaufträge pro Stunde) [-/Stunde]



$KAP_{PK}$ 

Kapazität eines Portalkrans [Minuten/Stunde]

 $t_p, AA, m$ 

mittlere Prozesszeit eines Abfertigungsauftrags [Minuten]

Da ein Abfertigungsauftrag mehrere Kranaufträge beinhalten kann (siehe Abschnitt 2.2), welche annähernd zeitgleich vom Terminal bearbeitet werden müssen, ist der ideale Mindestbestand an Kranaufträgen größer als eins. Eine Formel zur Berechnung des idealen Mindestbestandes an Kranaufträgen wurde im Rahmen der APMS-Konferenz 2024 (Alieksieiev et al. 2024a) veröffentlicht. Wird die mittlere Prozesszeit eines Abfertigungsauftrags in Formel (4.1) durch die mittlere Prozesszeit eines Kranauftrags ersetzt, kann die maximal mögliche Kranleistung in Anzahl Kranaufträge berechnet werden.

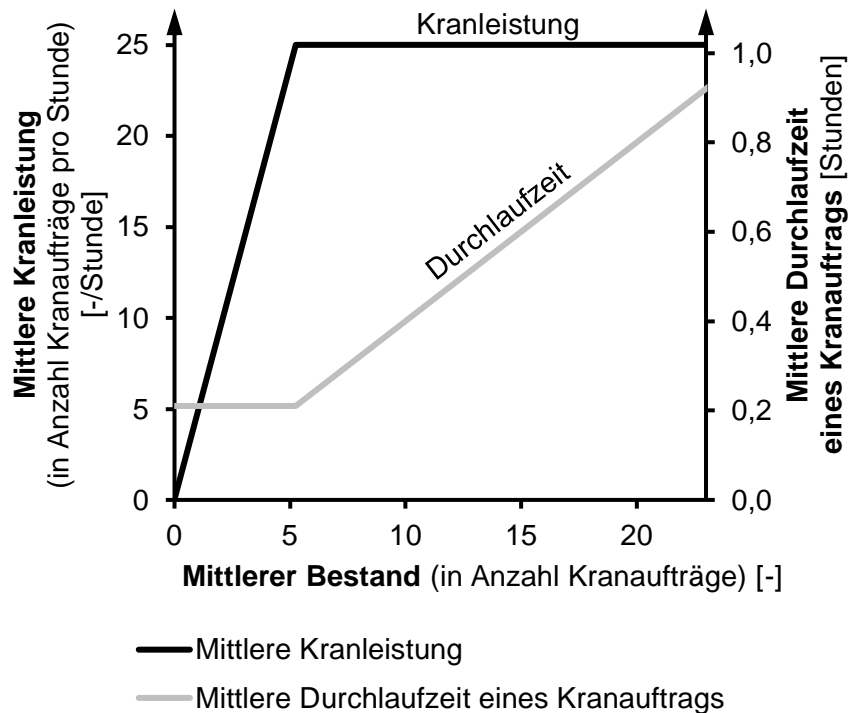


Abbildung 10: Ideale Leistungskennlinie und ideale Durchlaufzeitkennlinie für Kranaufträge (idealer Mindestbestand an Kranaufträgen = 5,25, maximal mögliche Kranleistung = 25 Kranaufträge/Stunde, minimale Durchlaufzeit = 0,2 Stunden bzw. 12 Minuten) (Alieksieiev et al. 2024a)

Die minimale Durchlaufzeit berechnet sich nach der Trichterformel (vgl. Bechte 1984) als Quotient des idealen Mindestbestandes und der maximal möglichen Kranleistung (Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$ZDL_{\min} = \frac{BIA_{\min}}{LA_{\max}} \quad (4.2)$$

 $ZDL_{\min}$ 

minimale Durchlaufzeit eines Auftrags [Stunden]

 $BIA_{\min}$ 

idealer Mindestbestand (in Anzahl der Aufträge) [-]

 $LA_{\max}$ 

maximal mögliche Leistung eines Portalkrans (in Anzahl der Aufträge pro Stunde) [-/Stunde]

Ideale Kennlinien ermöglichen es, den Auftragsbestand in Bearbeitung und die entsprechende mittlere Durchlaufzeit zu ermitteln (Nyhuis und Wiendahl 2012). Abbildung 10 zeigt beispielhafte

Verläufe idealer Kennlinien für mittlere Kranleistung und mittlere Durchlaufzeit eines Kranauftrags.

Die Bedingungen des idealen Prozesses entsprechen jedoch nicht den eines realen Prozesses (Nyhuis und Wiendahl 2012). In der Terminalpraxis überschneiden sich die Ankünfte und somit auch die Durchlaufzeiten von Zügen und Lkw, wodurch Auslastungsschwankungen entstehen. Die Varianz der Auslastung definiert die Abweichung einer realen Kennlinie von der idealen Kennlinie. Um die Auslastungsschwankungen auszugleichen und eine bestimmte mittlere Kranleistung zu gewährleisten, ist zusätzlich zum idealen Mindestbestand ein zusätzlicher Pufferbestand nötig (Nyhuis und Wiendahl 2012). Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen idealen und realen Kennlinien.

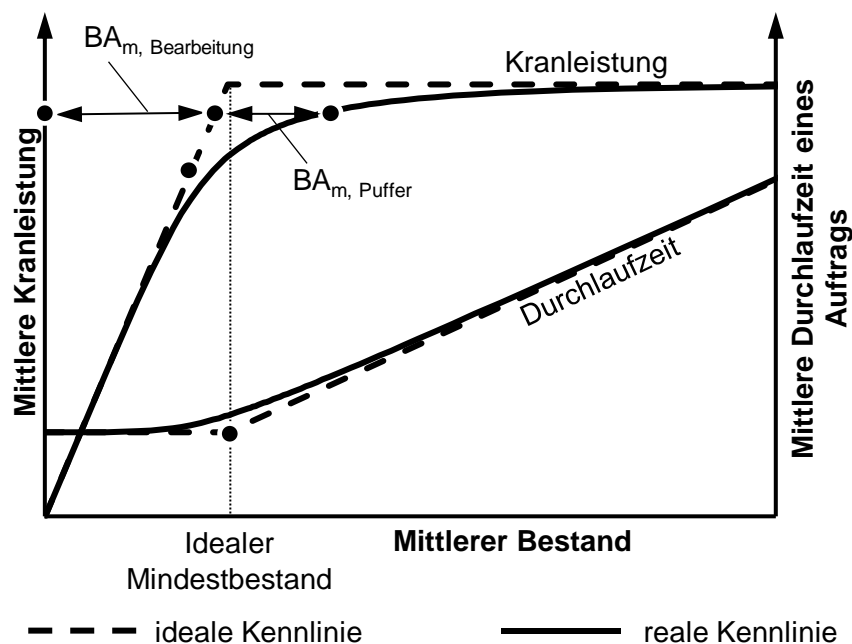


Abbildung 11: Ideale und reale Kennlinien für Kranleistung und Durchlaufzeit eines Auftrags (in Anlehnung an Nyhuis und Wiendahl 2012; Aliksieiev et al. 2024a)

Für eine Näherung des mittleren Auftragsbestands für eine bestimmte mittlere Leistung ergeben sich entsprechende grundlegende Gleichungen für die Abfertigungsaufträge (Gl. 4.3) und für die Kranaufträge (Gl. 4.4) (Nyhuis und Wiendahl 2012).

$$BA_{m, AA} = BA_{m, \text{in Bearbeitung, AA}} + BA_{m, \text{Puffer, AA}} \quad (4.3)$$

$$BA_{m, KA} = BA_{m, \text{in Bearbeitung, KA}} + BA_{m, \text{Puffer, KA}} \quad (4.4)$$

$BA_{m, AA}$	Mittlerer Bestand (in Anzahl der Abfertigungsaufträge) [-]
$BA_{m, \text{in Bearbeitung, AA}}$	Mittlerer Bestand in Bearbeitung (in Anzahl der Abfertigungsaufträge) [-]
$BA_{m, \text{Puffer, AA}}$	Mittlerer Pufferbestand (in Anzahl der Abfertigungsaufträge) [-]
$BA_{m, KA}$	Mittlerer Bestand (in Anzahl der Kranaufträge) [-]
$BA_{m, \text{in Bearbeitung, KA}}$	Mittlerer Bestand in Bearbeitung (in Anzahl der Kranaufträge) [-]
$BA_{m, \text{Puffer, KA}}$	Mittlerer Pufferbestand (in Anzahl der Kranaufträge) [-]

Ein wesentlicher Faktor, der die Auslastungsschwankung und somit den benötigten mittleren Pufferbestand in KV-Terminals beeinflusst, ist die Varianz der Prozesszeit eines Abfertigungsauftrags, die von der Varianz der Anzahl der Kranaufträge pro Abfertigungsauftrag und von der Varianz der Prozesszeit einzelner Kranaufträge abhängt (siehe Abschnitt 2.2). Ein weiterer Faktor ist die Varianz der Zwischenankunftszeit von Zügen und Lkw, die z. B. durch ihre Verspätungen bedingt ist. Eine Möglichkeit, den mittleren Auftragsbestand in Abhängigkeit der mittleren Auslastung eines Krans sowie der Varianz von Prozess- und Zwischenankunftszeiten zu berechnen, bietet die Kingman-Gleichung aus der Warteschlangentheorie (Kingman 1961 in Notation von Nyhuis und Wiendahl 2012; Winter et al. 2021):

$$BA_m = A_m + \frac{A_m^2}{1-A_m} \cdot \left( \frac{t_{p,v}^2 + ZAZ_v^2}{2} \right) \quad (4.5)$$

$BA_m$	Mittlerer Bestand (in Anzahl der Aufträge) [-]
$A_m$	Mittlere Auslastung [-]
$t_{p,v}$	Variationskoeffizient der Prozesszeit der Aufträge [-]
$ZAZ_v$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit der Aufträge [-]

Der erste Summand in der Gleichung (4.5) beschreibt den Auftragsbestand in Bearbeitung, während der Zweite den Pufferbestand repräsentiert (vgl. Abbildung 11). Die mittlere Auslastung in der Gleichung (4.5) lässt sich als Quotient der mittleren Leistung und der maximal möglichen Leistung berechnen (Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$A_m = \frac{LA_m}{LA_{max}} \quad (4.6)$$

$A_m$	Mittlere Auslastung [-]
$LA_m$	Mittlere Leistung (in Anzahl der Aufträge pro Stunde) [-/Stunde]
$LA_{max}$	Maximal mögliche Leistung (in Anzahl der Aufträge pro Stunde) [-/Stunde]

Wichtige Annahmen der Kingman-Gleichung sind starre Kapazitäten des Arbeitssystems und unabhängige Zwischenankunfts- und Prozesszeiten (vgl. Kingman 1961; Winter et al. 2021). Im Falle eines Portalkranbetriebs in KV-Terminals bedeutet das, dass die Kapazität des Portalkrans konstant ist und die Verkehrsmittel (Züge und Lkw) unabhängig voneinander am Terminal ankommen und bearbeitet werden. Unter diesen Bedingungen lässt sich die Kingman-Gleichung direkt für die Modellierung des mittleren Bestands an Abfertigungsaufträgen anwenden (Aliaksieiev et al. 2024a):

$$BA_{m,AA} = A_m + \frac{A_m^2}{1-A_m} \cdot \left( \frac{t_{p,v,AA}^2 + ZAZ_{v,AA}^2}{2} \right) \quad (4.7)$$

$BA_{m,AA}$	Mittlerer Bestand (in Anzahl der Abfertigungsaufträge) [-]
$A_m$	Mittlere Auslastung [-]

$t_{p,v,AA}$	Variationskoeffizient der Prozesszeit der Abfertigungsaufträge [-]
$ZAZ_{v,AA}$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit der Abfertigungsaufträge [-]

Analog zur Gleichung (4.5) beschreibt der erste Summand in der Gleichung (4.7) den Auftragsbestand in Bearbeitung, der im Falle der Abfertigungsaufträge analog zu einem Produktionssystem maximal eins sein kann (siehe Ausführungen zum idealen Mindestbestand in Anzahl der Abfertigungsaufträge sowie Nyhuis und Wiendahl 2012 und Aliksieiev et al. 2024a). Der zweite Summand beschreibt entsprechend den mittleren benötigten Pufferbestand (siehe auch Abbildung 11). Die Varianz der Prozesszeiten der Abfertigungsaufträge, die den Pufferbestand beeinflusst, ist sehr hoch, was größtenteils durch die großen Unterschiede in der mittleren Anzahl von Kranaufträgen pro Zug und Lkw bedingt ist. Daher erfordert die Auftragsstruktur in KV-Terminals hohe mittlere Pufferbestände, um ein bestimmtes Leistungsniveau am Portalkran zu gewährleisten (Aliksieiev et al. 2024a).

Für die Modellierung von Betriebskennlinien für Kranaufträge ist es allerdings nicht möglich, die Kingman-Gleichung direkt anzuwenden. Grund hierfür ist das Chargenankunftsverhalten von Kranaufträgen: Beim Zugang eines Abfertigungsauftrags können mehrere Kranaufträge gleichzeitig zugehen. Unter den oben beschriebenen Bedingungen der Kingman-Gleichung konnte eine Näherungsgleichung für den Auftragsbestand in Kranaufträgen aus der Gleichung (4.7) und den Zusammenhängen zwischen Kran- und Abfertigungsaufträgen abgeleitet werden (Aliksieiev et al. 2024a):

$$BA_{m,KA} = A_m \cdot BIA_{m,KA} + \frac{A_m^2}{1-A_m} \cdot \left( \frac{t_{p,v,AA}^2 + ZAZ_{v,AA}^2}{2} \right) \cdot AnzKA_{AA,m} \quad (4.8)$$

$BA_{m,KA}$	Mittlerer Bestand (in Anzahl der Kranaufträge) [-]
$A_m$	Mittlere Auslastung [-]
$BIA_{m,KA}$	Idealer Mindestbestand (in Anzahl der Kranaufträge) [-]
$t_{p,v,AA}$	Variationskoeffizient der Prozesszeit der Abfertigungsaufträge [-]
$ZAZ_{v,AA}$	Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit der Abfertigungsaufträge [-]
$AnzKA_{AA,m}$	Mittlere Anzahl der Kranaufträge in einem Abfertigungsauftrag [-]

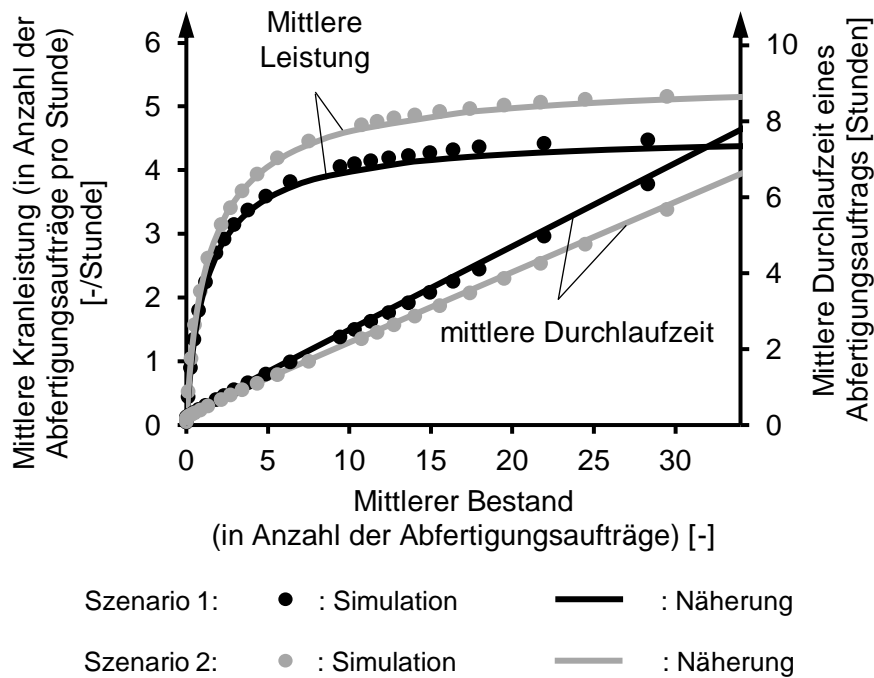
Analog zu den Gleichungen (4.5) und (4.7) repräsentiert der erste Summand in der Gleichung (4.8) den Kranauftragsbestand in Bearbeitung. Da der ideale Mindestbestand an Kranaufträgen die mittlere Anzahl der Kranaufträge in einem Abfertigungsauftrag beschreibt, ergibt sich aus seiner Multiplikation mit der mittleren Kranauslastung der mittlere Bestand an Kranaufträgen in Bearbeitung (siehe Aliksieiev et al. 2024a für die Ableitung des idealen Mindestbestands an Kranaufträgen und vgl. die Ableitung des Bestandes in Bearbeitung in der Näherung von Nyhuis und Wiendahl 2012). Für die Näherung des mittleren Pufferbestands an Kranaufträgen wird der mittlere Pufferbestand an Abfertigungsaufträgen mit der mittleren Anzahl der Kranaufträge pro Abfertigungsauftrag multipliziert (Aliksieiev et al. 2024a).

Um die abgeleiteten Näherungsgleichungen zu evaluieren, wurden umfassende Simulationsversuche durchgeführt. Dafür wurden Kennlinienverläufe für Kran- und Abfertigungsaufträge unter verschiedenen Eingangsbedingungen (bspw. unterschiedliche mittlere Prozesszeit eines Abfertigungsauftrags sowie Gleis- bzw. Spurzuordnung von Zügen bzw. Lkw) simuliert und den entsprechenden genäherten Kennlinienverläufen nach Gleichungen (4.7)-(4.8) gegenübergestellt (Aliksieiev et al. 2024a)

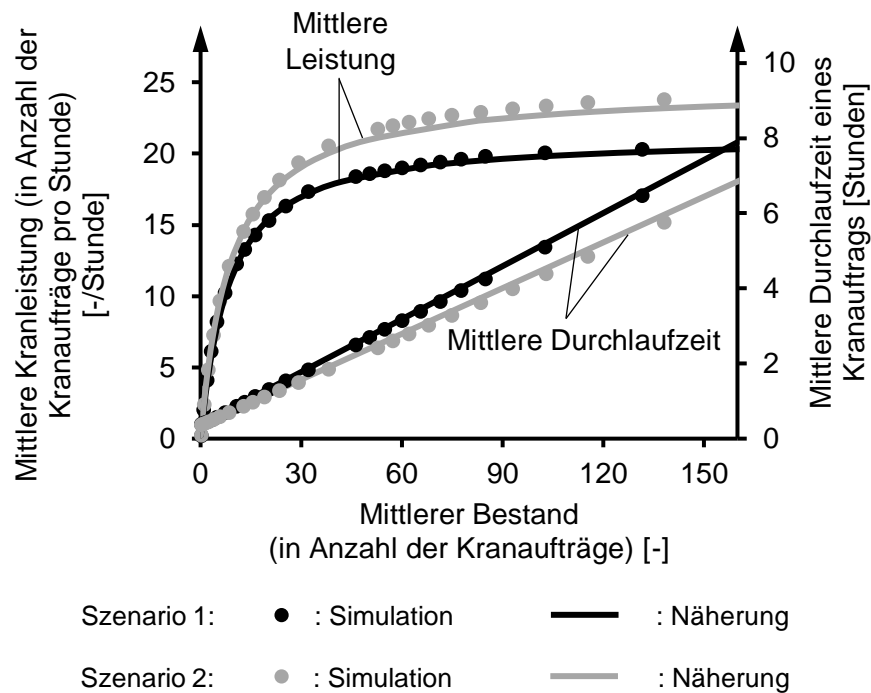
Abbildung 12 zeigt simulierte und genäherte Kennlinienverläufe für Abfertigungsaufträge und Kraftraufträge für zwei beispielhafte Szenarios mit unterschiedlichen Prozesszeiten und maximal möglichen Leistungen. Die genäherten Durchlaufzeitkennlinien wurden dabei aus dem genäherten mittleren Bestand für verschiedene Werte der mittleren Leistung mithilfe der Trichterformel ermittelt (vgl. Formel 4.2 und Bechte 1984).

In den Abbildungen ist erkennbar, dass die genäherten Kennlinien nur eine geringe Abweichung von den simulierten Kurven aufweisen. Die mittlere absolute Abweichung beträgt dabei ca. 2 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Kingman-Gleichung und die Trichterformel eine ausreichend genaue Näherung des mittleren Bestandes und der mittleren Durchlaufzeit für beide Auftragsarten in KV-Terminals ermöglichen. Um jedoch eine hohe mittlere Leistung zu erreichen, sind sehr hohe Bestände erforderlich, die sehr lange Durchlaufzeiten verursachen (Aliksieiev et al. 2024a).

Eine Möglichkeit die hohe Leistung bei geringeren Beständen und kürzeren Durchlaufzeiten zu erreichen, bietet die Belastungssteuerung in den Terminals. Dies ist z. B. durch die Koordination der Zug- bzw. Lkw-Ankünfte möglich (vgl. Nyhuis und Wiendahl 2012; Wesebaum et al. 2013; Winter et al. 2021 für den Einfluss der Belastungsflexibilität auf produktionslogistische Zielgrößen). Im AP 3 wurde daher der Einfluss der Belastungssteuerung am Beispiel der koordinierten Zugankünfte simulativ untersucht.



a) Simulierte und genäherte Kennlinien für Abfertigungsaufträge (Szenario 1:  $t_{p,m,AA} = 13$  Minuten,  $LA_{max} = 4,6$  Abfertigungsaufträge/Stunde; Szenario 2:  $t_{p,m,AA} = 11$  Minuten,  $LA_{max} = 5,4$  Abfertigungsaufträge/Stunde) (Aliexsieiev et al. 2024a)



b) Simulierte und genäherte Kennlinien für Kraufträge (Szenario 1:  $t_{p,m,AA} = 13$  Minuten,  $LA_{max} = 21,2$  Kraufträge/Stunde; Szenario 2:  $t_{p,m,AA} = 11$  Minuten,  $LA_{max} = 24,7$  Kraufträge/Stunde) (Aliexsieiev et al. 2024a)

Abbildung 12: Kennlinien für Abfertigungsaufträge (a) und Kraufträge (b) (simuliert und genähert)

### Teilmodell: Zwischenlagerung und Direktumschläge

Direktumschläge sind eine Möglichkeit die maximal mögliche Kranleistung eines KV-Terminals zu steigern (siehe auch Tabelle 1). Abbildung 13 veranschaulicht einen Direktumschlag und einen Indirektumschlag von einem Zug auf einen Lkw. In diesem Arbeitspaket wurde der Effekt von Direktumschlägen auf logistische Zielgrößen modelliert. Die Ergebnisse wurden auf der HICL 2024 vorgestellt (Alieksieiev et al. 2024c). Außerdem ist eine Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Zeitschrift geplant.

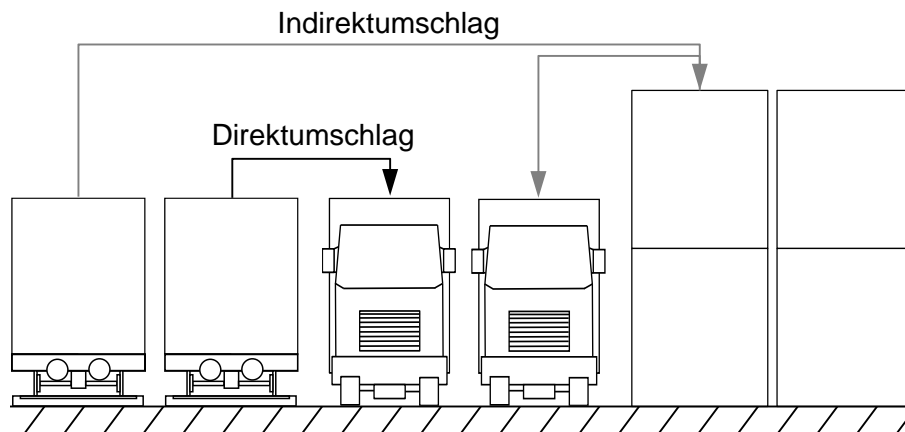


Abbildung 13: Direkt- und Indirektumschläge zwischen Zügen und Lkw (Möller 2002)

### Teilmodell: Kranleerfahrten und Doppelspiele

Darüber hinaus ist die Kranproduktivität z. B. durch die unproduktiven Kranleerfahrten begrenzt, wenn ein Zug oder ein Lkw zuerst entladen und danach beladen wird. Eine Möglichkeit, die Leerfahrten eines Portalkrans zu reduzieren, bietet die Doppelspielstrategie, bei der die Entladung und die Beladung der Verkehrsmittel alternierend erfolgt (vgl. Lan und Wang 2019). In diesem Arbeitspaket wurden das Potential von Doppelspielen eines Portalkrans und ihr Effekt auf terminallogistische und betriebswirtschaftliche Zielgrößen eines KV-Terminals untersucht.

Die Anzahl der möglichen Doppelspiele bei der Zugabfertigung hängt von der Anzahl der auf den Zug zu beladenden und von dem Zug zu entladenden Ladeeinheiten ab. Da für ein Doppelspiel immer eine zu beladende und eine zu entladende Ladeeinheit benötigt wird, bestimmt die kleinste Anzahl der zu beladenden bzw. zu entladenden Ladeeinheiten die maximale Anzahl der Doppelspiele (Alieksieiev et al. 2024b):

$$\text{AnzDS}_{\max} = \min (\text{AnzBLE}; \text{AnzELE}) \quad (4.9)$$

$\text{AnzDS}_{\max}$	Maximale Anzahl der Doppelspiele [-]
$\text{AnzBLE}$	Anzahl der zu beladenden Ladeeinheiten [-]
$\text{AnzELE}$	Anzahl der zu entladenden Ladeeinheiten [-]

Erste Modellierungsergebnisse sowie ein darauf basierendes einfaches Reihenfolgebildungsverfahren wurden im Rahmen der 32. Internationalen Kranfachtagung 2024 in Dresden vorgestellt und veröffentlicht (Alieksieiev et al. 2024b) sowie im Rahmen einer betreuten Masterarbeit weiterentwickelt.

### Teilmodell: Umstapler und Stapellogik

Umstapler sind unproduktive Kranaufträge, die benötigt werden, um an eine gewünschte Ladeeinheit zuzugreifen, falls dieser durch andere Ladeeinheiten blockiert ist. Diese Vorgänge erfordern zusätzliche Krankapazität und verringern somit die produktive Kranleistung (vgl. Kim 1997). Die mittlere Anzahl der Umstapler pro eine Ladeeinheit im Lagerbestand hängt von den Stellgrößen Lagerbestand, Stapelhöhe und Anzahl der Stellplätze und von der eingesetzten Stapellogik. In diesem Arbeitspaket wurden Umstapler in Abhängigkeit von ihren Stellgrößen modelliert. Außerdem erfolgte eine Modellierung des Einflusses der Umstapler auf die logistischen Zielgrößen eines KV-Terminals. Die Modellierung liefert eine Grundlage für die Entwicklung verbesserter Stapellogiken. Die Veröffentlichung der Modellierungsergebnisse ist als Teil einer Dissertation geplant.

### Gesamtmodell

Die entwickelten Teilmodelle können in das Kennlinienmodell integriert werden, um die Einzeleffekte der Verschwendungen und der Verbesserungsmaßnahmen auf die logistischen Zielgrößen sowie das gesamte Verbesserungspotential zu ermitteln. Abbildung 14 zeigt das Konzept eines solchen integrierten Modells anhand eines Beispiels. Im Ausgangszustand („Reales Szenario“, siehe Abbildung 14a) verbraucht der betrachtete Portalkran vergleichsweise große Anteile seiner Betriebszeit für unproduktive Zwischenlagerungen (Einlagerung in die Zwischenabstellfläche), Leerfahrten, Umstapler und Wartezeiten. Das führt zu einer langen mittleren Durchlaufzeit von Kranaufträgen und entsprechend zu einem hohen mittleren Auftragsbestand, um eine Kranleistung von 20 Kranaufträge/Stunde zu erreichen. Bei einer Reduzierung der jeweiligen Verschwendungen („Verbessertes Szenario“, siehe Abbildung 14a) wird eine signifikant kürzere mittlere Durchlaufzeit und ein geringerer mittlerer Bestand für das gleiche Leistungsniveau benötigt, was zu steileren Kennlinienverläufen führt (siehe Abbildung 14b). Nach der Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen kann das Management des KV-Terminals seinen neuen Betriebspunkt bewerten und sich ggf. neu positionieren. Alternativ kann die gestiegene Wartezeit auch für die Annahme neuer Aufträge genutzt werden.

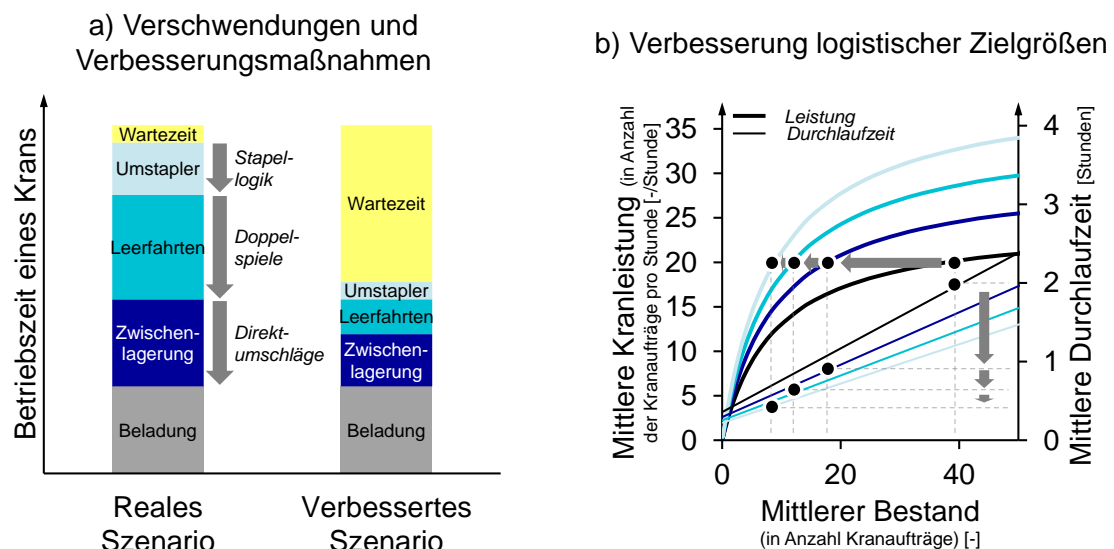


Abbildung 14: Effekt der Verschwendungen und Verbesserungsmaßnahmen auf logistische Zielgrößen eines KV-Terminals; a): Verschwendungen und Verbesserungsmaßnahmen; b) Verbesserung logistischer Zielgrößen



## **2.5 AP 5: Entwicklung eines Vorgehens zur Termin- und Kapazitätsplanung**

---

*MLS: 5 Monate, IPMT: 8 Monate*

---

### **Ziel**

Ziel von AP 5 war ein Vorgehen zur Termin- und Kapazitätsplanung für KV-Terminals zu entwickeln, das die in AP 4 entwickelten logistischen Modelle nutzt, um die Auslastung von Portalkranen und mögliche Umschlagtermine vorherzusagen. Dies bildet die Grundlage für das in AP 6 zu entwickelnde Auslastungs- und Buchungssystem.

### **Durchgeführte Arbeiten**

Die Industriepartner wurden hinsichtlich des aktuellen Standes der Termin- und Kapazitätsplanung in KV-Terminals interviewt. Dabei wurde insbesondere die Planbarkeit von Zug- und Lkw-Ankünften ermittelt. Auf Basis der vorhandenen Informationen wurden die in AP 3 und AP 4 erstellten Ist-Durchlaufdiagramme um Plan-Werte für Zug- und Lkw-Abfertigungsaufträge sowie für die Plan-Kapazität des Portalkrans erweitert.

Im nächsten Schritt wurden wesentliche Unsicherheiten bei der Planung von Zug- und Lkw-Ankünften anhand einer Literaturanalyse und der Interviews mit Projektpartnern ermittelt. Auf Basis des erweiterten Durchlaufdiagramms und unter Berücksichtigung der möglichen Unsicherheiten wurde das Vorgehen zur Termin- und Kapazitätsplanung ausgearbeitet. Dieses Vorgehen wurde im nächsten Schritt mithilfe von einer ereignisdiskreten Simulation und Interviews mit Projektpartnern evaluiert.

### **Ergebnisse**

Die Interviews mit Industriepartnern und einer Literaturanalyse ergaben, dass die Planung von Zug- und Lkw-Abfertigungsaufträgen in KV-Terminals unterschiedlich ist. Während die Züge in der Regel nach einem festen Fahrplan folgen und mit einer langen Vorlaufzeit eingeplant werden, werden die Lkw-Ankünfte entweder sehr kurzfristig oder gar nicht eingeplant. Darüber hinaus beeinflussen die in der Terminallogistik vorhandenen Unsicherheiten die Wirksamkeit der Termin- und Kapazitätsplanung. Anhand einer Literaturanalyse und auf Grundlage von Interviews mit Projektpartnern wurden folgende wesentliche Unsicherheiten bei der Umschlagsplanung identifiziert (vgl. Hofmann 2016):

- Zeitliche Unsicherheit bei den Ankünften von Zügen und Lkw
- Unsicherheit in Bezug auf die Anzahl der umzuschlagenden Ladeeinheiten pro Zug- bzw. Lkw-Auftrag.

Zusammen mit der vergleichsweise festen Plan-Kapazität des Portalkrans bilden somit die Plan-Abgänge von Zügen eine Grundlage für eine Termin- und Kapazitätsplanung mit Durchlaufdiagramm nach Mundt 2024. Da die Lkw im KV grundsätzlich kürzere Strecken fahren und daher in der Planung flexibler als Züge sind, dient das entwickelte Vorgehen dazu, die Kapazitätslücken

beim Abgleich der möglichen Abgänge aus Kapazitätssicht und der Plan-Abgänge von Zügen zu identifizieren und in diese Lücken die Lkw-Abgänge einzuplanen (siehe Abbildung 15).

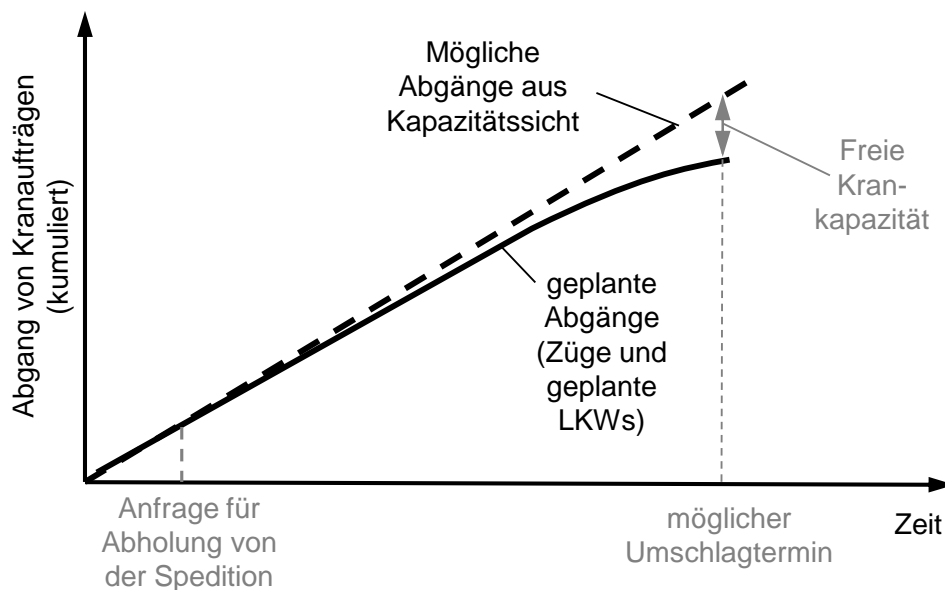


Abbildung 15: Termin- und Kapazitätsplanung auf Basis des Durchlaufdiagramms- Vorgehenskonzept (vgl. Mundt 2024)

Die entsprechenden Plan-Zugänge für die Lkw sollen mit einer aus dem Betriebspunkt auf der Kennlinie (siehe AP 4) ermittelten mittleren Durchlaufzeit mittels einer Rückwärtsterminierung bestimmt werden. So soll die Wartezeit bei der Terminplanung berücksichtigt werden können (vgl. Mundt und Lödding 2020; Mundt 2024). Analog zum von Mundt entwickelten Verfahren zur Auftragsannahme und -terminierung in der Auftragsfertigung (Mundt 2024), ist das entwickelte Vorgehen zur Termin- und Kapazitätsplanung in der Lage, den Rückstand zu regeln. Dafür wird der zur Einplanung stehende Plan-Abgang aus Kapazitätssicht der nächsten Planungsperiode um den Rückstand aus der aktuellen Planungsperiode reduziert. Damit wird die Kapazität für die Abarbeitung des Rückstandes in der folgenden Planungsperiode reserviert.

Im nächsten Schritt wurde das entwickelte Vorgehen simulativ evaluiert. Dabei wurde das Vorgehen in einem Simulationsmodell implementiert, das bereits in vorherigen Arbeitspaketen genutzten Terminalparameter und die in diesem Arbeitspaket ermittelten Prozessunsicherheiten auf den Terminals abbildet.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse für die Szenarien mit und ohne Termin- und Kapazitätsplanung

Szenarien	Zielgrößen	
	Mittlere Zwischenankunftszeit eines Abfertigungsauftrags	Mittlere Durchlaufzeit eines Abfertigungsauftrags
Mit Termin- und Kapazitätsplanung	31 Minuten	13,2 Minuten
Ohne Termin- und Kapazitätsplanung	26 Minuten	28,2 Minuten

Tabelle 6 zeigt beispielhaft die Ergebnisse des simulativen Vergleichs der Zwischenankunfts- und Durchlaufzeiten für die Szenarios mit und ohne Termin- und Kapazitätsplanung für eine mittlere

Kransauslastung von 50%. Für das Szenario ohne Termin- und Kapazitätsplanung sind lediglich die Züge geplant (gemäß dem Fahrplan), wobei die Lkw zufällig ankommen. Für das Szenario mit Termin- und Kapazitätsplanung werden auch die Lkw nach der oben beschriebenen Logik eingeplant. Die Ergebnisse der Simulation für die mittlere Kranauslastung von 50% zeigen, dass das entwickelte Vorgehen es ermöglicht, die mittlere Durchlaufzeit von Zügen und Lkw deutlich zu senken. Die steigende mittlere Zwischenankunftszeit weist aber darauf hin, dass dabei die Auslastungsverluste auftreten können (vgl. Mundt 2024).

Abschließend erfolgte eine Plausibilitätsprüfung des Vorgehens mithilfe von Einzelinterviews mit Partnern und der Diskussion im Projektbegleitenden Ausschuss. Die Partner bestätigten ein grundsätzliches Potential des Vorgehens, das sowohl die Planungssicherheit für die Terminals, als auch die Durchlaufzeiten von Lkw-Abfertigungsaufträgen vorhersagen und reduzieren kann. Die Vorhersage der Durchlaufzeiten kann auch die Planungssicherheit von Speditionsunternehmen erhöhen. In Interviews und der Diskussion mit Partnern wurden auch mögliche Limitationen des Vorgehens diskutiert. Diese sind z. B. die gewünschte Flexibilität der Speditionsunternehmen bzw. der Lkw-Fahrenden und zum Teil mangelnde bzw. verzögerte Informationen über die Termin- und Mengenabweichungen bei der Ankunft von Zügen und Lkw.

## **2.6 AP 6: Implementierung eines Monitorings- sowie Auslastungs- und Buchungssystems**

---

*MLS: 5 Monate, IPMT: 3 Monate*

---

### **Ziel**

Ziel des letzten Arbeitspaketes war die Erstellung eines Demonstrators für das Monitoring- sowie für das Auslastungs- und Buchungssystem. Die Entwicklung soll die Anforderungen durch die beteiligten Akteure berücksichtigen, die im Zuge des Projektes gesammelt und während dieses Arbeitspaketes evaluiert werden. Hierzu zählen voraussichtlich u. a. eine einfache Anwendung und Implementierung des Systems, ein möglichst geringer Datenbedarf und geringe Softwareanforderungen.

### **Durchgeführte Arbeiten**

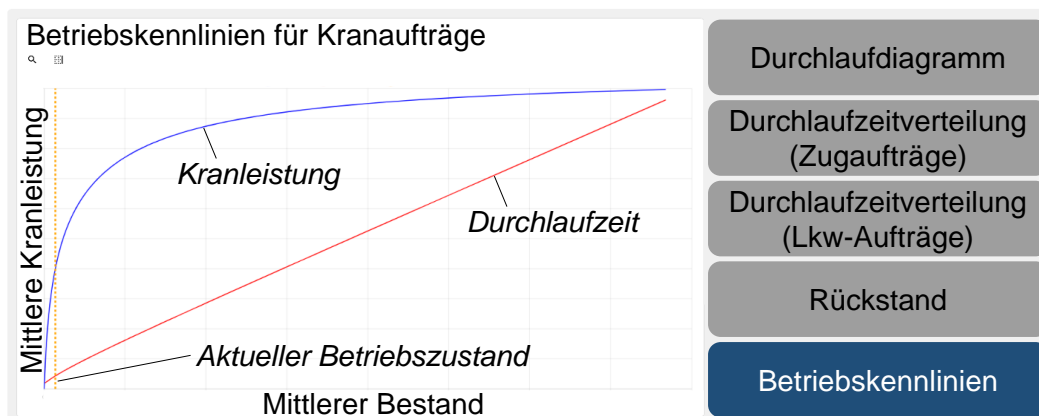
Im ersten Teil des Arbeitspaketes wurde das Monitoringssystem auf Basis der digitalen Web-App-Plattform des Instituts für Produktionsmanagements und -technik entwickelt. In dieses System wurden die in AP 4 entwickelten Durchlaufdiagramme und Kennlinienmodelle sowie weitere Diagramme zur Analyse von Rückmeldedaten und zum Monitoring des Umschlagprozesses eines Terminals integriert. In einem weiteren Schritt wurde das Konzept eines Auslastungs- und Buchungssystems auf Basis des in AP 5 entwickelten Vorgehens zur Termin- und Kapazitätsplanung entwickelt. Abschließend wurde eine Rückmeldedatenanalyse eines KV-Terminals aus dem Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt, in der die realen Auftragsdaten in das System integriert wurden. In einer Diskussion mit dem Projektpartner wurden das System vorgestellt und die Ergebnisse der Rückmeldedatenanalyse diskutiert.

### **Ergebnisse**

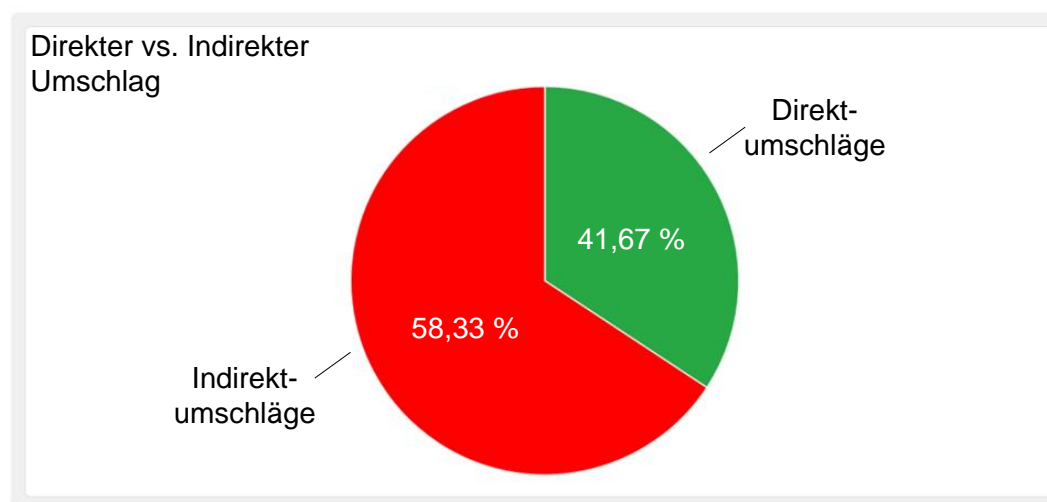
AP 6 ist in zwei Unteraufgaben unterteilt. In AP 6.1 soll ein Demonstrator für das Monitoring entwickelt werden. Darauf aufbauend, wird in AP 6.2 ein Auslastungs- und Buchungssystem konzeptioniert und implementiert. Beide Systeme sollen anschließend in AP 6.3 mit Projektpartnern validiert werden.

#### **6.1 Erstellung eines Demonstrators für das Monitoring**

Das entwickelte Monitoringssystem soll es den Terminalbetreibern ermöglichen, wesentliche logistische Kennzahlen zu überwachen, mögliche Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten und Effekte dieser Maßnahmen zu bewerten. Als Eingangsparameter für das Monitoringssystem sollen Rückmeldedaten aus dem Kranbetrieb genutzt werden. Abbildung 16 zeigt beispielhafte Auswertungen der künstlich generierten Rückmeldedaten mit dem Monitoringssystem.



a) Betriebskennlinien und Betriebspunkt



b) Übersicht der Direkt- und Indirektumschläge

Abbildung 16: Benutzerschnittstelle des Monitoringssystems für KV-Terminals ; a) Betriebskennlinien und Betriebspunkt; b) Übersicht der Direkt- und Indirektumschläge

Abbildung 16a zeigt beispielhaft die Verläufe der mit der Näherungsgleichungen aus AP 4 modellierten Betriebskennlinien für die mittlere Abfertigungsleistung (blaue Kurve) und die mittlere Durchlaufzeit eines Abfertigungsauftrags (rote Kurve) in der Benutzerschnittstelle des Monitoringssystems. Darüber hinaus ist in der Abbildung der Betriebspunkt gezeigt (gelbe Gerade), der aus den Rückmeldedaten ermittelt wurde. Aus dieser Darstellung kann man zum einen ableiten, dass die mittlere Auslastung des betrachteten Portalkrans nicht hoch ist und die mittlere Durchlaufzeit vergleichsweise gering ist. Zum anderen sind in dieser Abbildung die Effekte möglicher Bestandserhöhung bzw. -reduzierung auf die Abfertigungsleistung und -durchlaufzeit sichtbar.

Abbildung 16b zeigt eine Übersicht beispielhafter Umschlagsstruktur aus der Sicht der Ladeeinheiten. Mit dieser Auswertung kann man die Anteile von direkt und indirekt (mit einer Zwischenlagerung) umgeschlagenen Ladeeinheiten ermitteln und neben dem Direktumschlagsanteil auch die Auslastung der Zwischenabstellfläche (über den Anteil der Indirektumschläge) analysieren.

## 6.2 Implementierung des Auslastungs- und Buchungssystems

Das Ziel von AP 6.2 war die Implementierung des Auslastungs- und Buchungssystems basierend auf dem in AP 5 eingeführten Termin- und Kapazitätsplanungsansatzes. Dieses System bietet eine digitale Buchungsschnittstelle, die es Terminalbetreibern ermöglicht, die Ankunft von Lkw in vordefinierten Zeitfenstern zu planen und so den Terminalbetrieb zu koordinieren, indem Termine mit der verfügbaren Krankapazität abgestimmt werden. Durch die Synchronisierung der Ankunftspläne mit der tatsächlichen Kapazität des Terminals ist das System darauf ausgelegt, Staus zu reduzieren, die Effizienz der Abfertigung zu optimieren und den Gesamtdurchsatz des Terminals zu erhöhen.

Für die Implementierung des Systems ist folgender Ansatz gewählt worden. Das System wurde als Ergänzung zum Monitoringsystem (WP 6.1) konzipiert und bietet einen strukturierten Buchungsmechanismus für Lkw-Ankünfte, der auf der Echtzeit-Kapazität des KV-Terminals basiert. Dabei wird auf der linken Seite die aktuelle Auslastung des Terminals angezeigt. Je weiter in der Zukunft desto weniger Informationen hat ein KV-Terminal in der Regel über die erwarteten Abgänge. Daher ist die Wahrscheinlichkeit für freie Kapazitäten und eine zügige Bearbeitung, d. h. kurze Durchlaufzeit, erhöht. Diesen Umstand macht sich das Buchungssystem zu nutzen. Auf der rechten Seite kann ausgewählt werden, ob ein Lkw liefern und / oder Abholen soll. Anschließend werden diverse potentielle Zeitslots basierend auf der aktuellen Auslastung des Terminals angeboten. Für jeden Zeitslot kann basierend auf historischen Daten die voraussichtliche Durchlaufzeit angegeben werden. Somit ist das System so gestaltet, dass es bei minimalen Datenanforderungen mit verschiedenen KV-Terminalkonfigurationen kompatibel ist.

Bei erfolgreicher Einführung des Auslastungs- und Buchungssystems wird erwartet, dass Lkw-Ankünfte besser gesteuert werden können. So können Engpässe und Staus in KV-Terminals vermieden werden. Gleichzeitig bietet es auch die Möglichkeit Zug- und Lkw-Ankünfte zu synchronisieren. Dies führt aufgrund eines steigenden Direktumschlaganteils zu geringeren Wartezeiten und verbesserter Kapazitätsauslastung. Nutzer des Auslastungs- und Buchungssystems sind in erster Linie Lkw-Fahrende. Ein erstes Konzept des Auslastungs- und Buchungssystems ist in Abbildung 17 dargestellt.

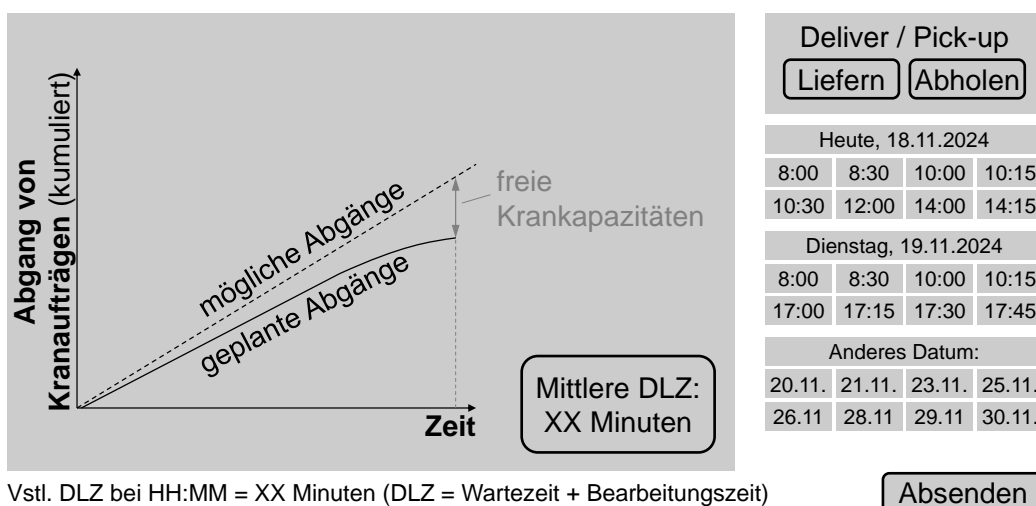


Abbildung 17: Konzept des Auslastungs- und Buchungssystems

### **6.3 Validieren des Systems mit Projektpartnern**

Der Fokus von AP 6.3 liegt auf der systematischen Validierung des Monitoringsystems (AP 6.1) sowie des Auslastungs- und Buchungssystems (AP 6.2). Auch hierzu ist eng mit den Projektpartnern zusammengearbeitet worden. Der Validierungsprozess beinhaltet u. a. Daten eines KV-Terminals, die im System zunächst getestet und anschließend in einem Vororttermin besprochen wurden.

Das Konzept des Auslastungs- und Buchungssystems ist im abschließenden PA (18.11.2024) vorgestellt worden. Ziel hier ist die gemeinsame Diskussion und Bewertung der Benutzerfreundlichkeit und der betrieblichen Auswirkungen des Systems gewesen. Das generelle Feedback war eher positiv. Allerdings sind folgende Aspekte als verbesserungswürdig beschrieben worden. Zunächst einmal werden zu viele Zeitslots angeboten, die eine unrealistische Erwartung der Lkw-Fahrenden wecken könnte. Ferner müsste die Plattform in mehreren Sprachen angeboten werden, da diese in vielen Fällen kein Deutsch sprechen können. Zu guter Letzt war ein großer Diskussionspunkt die Motivation der Lkw-Fahrenden zu wecken. Hier wurden sowohl Belohnungs- als auch Bestrafungssysteme diskutiert. Belohnungssysteme wurden dabei deutlich positiver bewertet.

Alle Systeme, die in AP 6 entwickelt wurden, sind entweder mit Daten von KV-Terminals getestet oder mit KV-Terminalbetreibern diskutiert worden. Die Validierung, die in WP 6.3 durchgeführt wurde, zeigt, dass das integrierte System nicht nur die beabsichtigten Ziele erreicht, sondern durch sein theoretisch fundiertes und praktisch wirksames Design auch eine solide Grundlage für eine breitere Anwendung und zukünftige Verbesserungen schafft.

## **2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die Projektziele zu erreichen. Die im Projekt erbrachten Leistungen stimmen vollständig mit dem begutachteten und genehmigten Antrag überein. Der im Antrag veranschlagte Aufwand war daher für die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens erforderlich und gerechtfertigt. Dabei wurden keine zusätzlichen Ressourcen eingesetzt.



## **2.8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU**

Im Projekt wurden wesentliche terminallogistische Zusammenhänge sowie der Effekt der operativen Verschwendungen und ihrer Verbesserungsmaßnahmen auf logistische Zielgrößen eines KV-Terminals modelliert. Wichtiger innovativer Beitrag der Projektergebnisse liegt in der initialen grundlegenden und allgemeingültigen Modellierung wichtiger logistischer Wirkzusammenhänge auf den KV-Terminals sowie der Identifikation und Quantifizierung des Effekts von wesentlichen Verschwendungen und entsprechenden Verbesserungsmaßnahmen auf die terminallogistischen Zielgrößen. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Modelle sind für die KMU-Terminals ohne großen zeitlichen und monetären Aufwand anwendbar. Sie können den Terminals helfen, anhand von nur vergleichsweise wenigen Eingangsdaten (1) ihren aktuellen Betriebspunkt im Zielkonflikt zwischen hoher Kranleistung und geringer Durchlaufzeit von Verkehrsträgern zu ermitteln, (2) quantitative Einzeleffekte von im Projekt untersuchten Verschwendungen für ihren konkreten Anwendungsfall zu bestimmen, (3) Einzeleffekte der im Projekt aufgezeigten Verbesserungsmaßnahmen zu ermitteln, (4) das Gesamtpotential der Verbesserung logistischer Zielgrößen bei Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen zu quantifizieren und (5) einen gewünschten Betriebspunkt im entschärften Zielkonflikt zwischen hoher Kranleistung und geringer Durchlaufzeit anhand eigener Betriebsziele festzulegen.

Im regelmäßigen Austausch mit den Projektpartnern aus der Industrie wurde eine hohe Relevanz der untersuchten Forschungsthemen bestätigt. Diese zeigte sich auch in der zunehmenden Anzahl der involvierten Industriepartnern in der Projektlaufphase. Außerdem wurde das Transferpotential der Projektergebnisse auf andere Arbeitssysteme und Terminalarten bestätigt.

### 3 Fortschreibung des Plans zum Ergebnistransfer

Dieser Abschnitt schätzt die Realisierbarkeit des Transferkonzepts ein (Abschnitt 3.1) und listet die zum Berichtszeitpunkt realisierten und geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer auf (Abschnitt 3.2).

#### 3.1 Einschätzungen zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Das Transferkonzept wurde erfolgreich umgesetzt. Die Projektergebnisse wurden mit 19 Vertretern der Wirtschaft diskutiert. Darunter waren sieben Umschlagterminals, zehn Software- und Beratungsunternehmen aus der Branche und zwei Forschungsgesellschaften. Die Projektergebnisse wurden mit realen Industriedaten evaluiert. Die Zwischenergebnisse wurden regelmäßig auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen vorgestellt und in entsprechenden Tagungsbänden veröffentlicht.

#### 3.2 Realisierte und geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit:

Tabelle 7: Realisierte Transfermaßnahmen

	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeit- raum	Fortschreibung
<b>A</b> Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Information der PA-Mitglieder sowie Ergebnisdiskussionen.	<b>A1</b> Vorstellung des Projektes und der geplanten Aufgaben und Diskussion.	Beginn der Projektlaufzeit	<b>A1</b> Erste Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses fand am 07.02.2023 online statt.
		<b>A2</b> Zwischenpräsentation der Ergebnisse (zum Simulationsmodell und Kennlinientheorie).	Ein Drittel der Projektlaufzeit	<b>A2</b> Zweite Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses fand am 28.11.2023 in Hamburg statt.
		<b>A3</b> Zwischenpräsentation der Ergebnisse (zum Vorgehenskonzept für die Termin- und Kapazitätsplanung).	Zwei Drittel der Projektlaufzeit	<b>A3</b> Dritte Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses fand am 02.09.2024 in Hamburg statt.
		<b>A4</b> Abschlusspräsentation, Validierung und Diskussion der Ergebnisse und Absprache weiterer Transfermaßnahmen.	Ende der Projektlaufzeit	<b>A4</b> Vierte Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses fand am 18.11.2024 in Hamburg statt.

	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum	Fortschreibung
<b>B</b> Besuchte Veranstaltungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen auch außerhalb des PA bei Veranstaltungen. Die Forschungsergebnisse werden fortlaufend diskutiert (auch projektextern).	<b>B1</b> Austausch über die Ergebnisse bei Veranstaltungen für KV-Umschlagterminals.	verschiedene	<b>B1</b> Austausch erfolgte beim 7. TerminalTag 2022, beim 8. TerminalTag 2023 und beim 9. TerminalTag 2024 der Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V. in Berlin.  Regelmäßige Gespräche mit Ansprechpersonen der KV-Terminals
<b>C</b> Internetdarstellung	Veröffentlichung aktueller Ergebnisse und Neuigkeiten online.	<b>C1</b> Veröffentlichung auf der institutseigenen Homepage des MLS unter <a href="https://www.tuhh.de/mls/">https://www.tuhh.de/mls/</a> und des IPMT unter <a href="https://www.tuhh.de/ipmt/">https://www.tuhh.de/ipmt/</a>	fortlaufend	<b>C1</b> Internetdarstellung wurde auf der institutseigenen Homepage des MLS unter <a href="https://www.tuhh.de/mls/forschung/vergangene-projekte-auszug/bepot">https://www.tuhh.de/mls/forschung/vergangene-projekte-auszug/bepot</a> realisiert.  Zudem Beitrag im Newsletter des Studiendekanats „Management-Wissenschaften und Technologien“ <a href="https://www.tuhh.de/t3resources/sdw/user_upload/Newsletter_Nr._4_SD_W_WiSe22_23.pdf">https://www.tuhh.de/t3resources/sdw/user_upload/Newsletter_Nr._4_SD_W_WiSe22_23.pdf</a>
<b>D</b> Wissenschaftliche Publikationen	Veröffentlichung von (Teil-)Ergebnissen des Forschungsprojektes als Beitrag in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen.	<b>D1</b> Einreichung von Artikeln bei Fachzeitschriften und für Konferenzbände.	Mitte bis Ende der Projektlaufzeit	<b>D1</b> Erste Zwischenergebnisse wurden in Proceedings der ASIM-Konferenz 2023 veröffentlicht (Grafelmann, Michaela and Aliksieiev, Volodymyr and Lödding, Hermann and Jahn, Carlos (2023). Logistics Objective Conflicts at Intermodal Terminals. In Sören Bergmann, Niclas Feldkamp, Rainer Souren, Steffen Straßburger (Eds.) <i>20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023</i> Universitätsverlag Ilmenau: 313-322 [Abstract] [doi])  Erste Ergebnisse zur Modellierung von Betriebskennlinien wurden in Proceedings der APMS-Konferenz 2024 veröffentlicht (Aliksieiev, V., Shahrivar,

	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeit- raum	Fortschreibung
				<p>R.B., Jahn, C., Lödding, H. (2024). Modeling of Logistics Objectives at Rail-Road Inland Transshipment Terminals. In: Thüerer, M., Riedel, R., von Cieminski, G., Romero, D. (eds) Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments. APMS 2024. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 733. Springer, Cham. <a href="#">[doi]</a></p> <p>Erste Ergebnisse zur Modellierung von Direktumschlägen wurden auf der Hamburger Internationalen Logistikkonferenz (Hamburg International Conference of Logistics) 2024 vorgestellt. Die Kurzfassung wurde im wissenschaftlichen Programm der Konferenz veröffentlicht (Aliksieiev, V., Winter, J.-J., Shahrivar, R.B., Jahn, C., Lödding, H. (2024). Modeling of Direct Transshipments at Rail-Road Combined Transport Terminals. In: Scientific Program of Hamburg International Conference of Logistics (HICL) 2024. Hamburg, 26-27 September 2024. <a href="#">[www]</a>)</p>
<b>E</b> Fachtagungen	Veröffentlichung von (Teil-) Ergebnissen des Forschungsprojektes bei Fachtagungen.	<b>E1</b> Vorträge im Rahmen von einzelnen Veranstaltungen der 36 regionalen Logistikinitiativen in Deutschland und Tagungen der regionalen Industrie- und Handelskammern sowie der Berufsverbände und -vereinigungen.	Mitte bis Ende der Projektlaufzeit	<b>E1</b> Der Tagungsbeitrag zur Untersuchung von Doppelspielen eines Portalkrans wurde im Tagungsband der 32. Internationalen Kranfachtagung an der TU Dresden veröffentlicht (Aliksieiev, V., Winter, J.-J., von Harlem, J., Grafelmann, M., Jahn, C., Lödding, H. (2024). Untersuchung von Doppelspielen eines Portalkrans auf Umschlagterminals. In: Thorsten Schmidt (Hrsg.) 32. Internationale Kranfachtagung „Krane im

	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeit- raum	Fortschreibung
				<i>Zeitalter der Energie- wende“</i> . (ISBN: 978-3- 86780-764-7). Selbstverlag der Technischen Universität Dresden. [doi]).
<b>F</b> Gremienarbeit	Mitarbeiter der Forschungs- stelle sind Mit- glieder in ver- schiedenen Gremien, die mehrmals pro Jahr tagen, so dass Ergeb- nisse bereits während der Laufzeit prä- sentiert und kritisch disku- tiert werden können.	<b>F1</b> FILOG e.V., Prof. Jahn ist Vor- sitzender des Bei- rats der For- schungs-gemein- schaft Innovative Logistik e.V. <b>F2</b> DEMAKO e.V., Prof. Jahn ist Vor- sitzender des Vor- standes des Deut- schen Maritimen Kommunikations- verbands e.V. <b>F3</b> FSP LuM, Prof. Jahn ist Sprecher des Forschungs- schwerpunktes Logistik und Mobi- lität der TU Ham- burg	Mitte bis Ende der Projektlauf- zeit	<b>F1, F2</b> Austausch erfolgte im Rahmen des Vorstands- kreises der DGON (Deut- sche Gesellschaft für Or- tung und Navigation) e.V. <b>F3</b> Die Zwischenergebnisse des Projektes wurden mit den Mitgliedern des FSP LuM diskutiert. Die Projek- tinformationen wurden auf der Webseite des FSP unter <a href="https://www.tuhh.de/tuhh/forschung-und-transfer/forschungsorganisation/forschungsschwerpunkte-der-tuhh/fsp-logistics-management-technology">https://www.tuhh.de/tuhh/forschung-und-transfer/forschungsorganisation/forschungsschwerpunkte-der-tuhh/fsp-logistics-management-technology</a> veröffent- licht.
<b>G</b> Akademische Lehre	Übernahme der Ergebnisse in die akademi- sche Lehre.	<b>G1</b> Aufnahme in die Vorlesungs- reihen „Hafenlo- gistik“ der TU Hamburg <b>G2</b> Mitarbeit stu- dentischer Hilfs- kräfte <b>G3</b> Anfertigung von Studien-/Pro- jekt/- Abschluss- arbeiten	Mitte bis Ende der Projektlauf- zeit kontinuierlich  kontinuierlich	<b>G1</b> Ergebnisse des Projek- tes werden ab dem Som- mersemester 2025 in der Vorlesung „Hafenlogistik“ vorgestellt. <b>G2</b> Mitarbeit durch eine stu- dentische Hilfskraft seit 16.12.2022 am MLS. Drei Projektarbeit und eine Masterarbeit wurden am MLS in der Projektlaufzeit abgeschlossen. <b>G3</b> Zwei Projektarbeiten und vier Masterarbeiten wurden am IPMT in der Pro- jektlaufzeit abgeschlossen.

## Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende):

Tabelle 8: Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/ Zeitraum	Fortschreibung
<b>H</b> Pressemitteilungen	Eine umfassende Verbreitung der Ergebnisse an verschiedene Fachmedien.	<b>H1</b> Aufnahme in den Newsletter des angeschlossenen Fraunhofer CML <b>H2</b> Versand der Pressemitteilung u.a. an Fachzeitschriften für Betreiber von Umschlag-terminals	bis Ende Juni 2025	<b>H1</b> Aufnahme des Überblicks über die Projektergebnisse in die Newsletter des Fraunhofer CML und der TU Hamburg. <b>H2</b> Aufnahme in die Fachzeitschrift „Logistik Heute“
<b>I</b> Vereine/Verbände	Eine umfassende textliche Aufarbeitung der Ergebnisse zur nationalen Verbreitung.	<b>I1</b> Versand einer textlichen Aufarbeitung an Vereine/ Verbände	bis Ende Juni 2025	<b>I1</b> Versand einer Zusammenfassung der Projektergebnisse an SGKV e.V. und BVL e.V.
<b>J</b> KMU-Beratung	Begleitung von Anwendungsfällen der Ergebnisse bei KMU.	<b>J1</b> Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis der Umschlagterminals	Januar 2025	<b>J1</b> In mehreren Treffen mit Cuxport GmbH wurde der Transfer der Projektergebnisse in die betriebliche Praxis diskutiert
<b>K</b> Akademische Lehre	Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre.	<b>K1</b> Übernahme der Ergebnisse in die Vorlesungsreihen „Hafenlogistik“ der TU Hamburg	Sommersemester 2025	<b>K1</b> Übernahme des Einblicks über die Projektergebnisse in die Vorlesungsreihe „Hafenlogistik“ der TU Hamburg
<b>L</b> Forschungsbericht online	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.	<b>L1</b> Bereitstellung des Abschlussberichts frei zugänglich auf der Institutswebseite des MLS unter <a href="https://www.tuhh.de/mls/">https://www.tuhh.de/mls/</a> <b>L2</b> Bereitstellung des Abschlussberichts frei zugänglich auf der Institutswebseite des IPMT unter <a href="https://www.tuhh.de/ipmt/">https://www.tuhh.de/ipmt/</a>	bis Ende Juni 2025	<b>L1</b> offen <b>L2</b> offen



Alieksieiev, V.; Winter, J.-J.; Harlem, J. v.; Grafelmann, M.; Jahn, C.; Lödding, H. (2024): Untersuchung von Doppelspielen eines Portalkrans auf Umschlagterminals. In: 32. *Internationale Kranfachtagung*, S. 65–73. <https://doi.org/10.15480/882.14471>

### **Durchgeführte studentische Arbeiten:**

Während der Projektlaufzeit wurden am Institut für Maritime Logistik (MLS) und am Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) folgende studentische Arbeiten zum Projektthema betreut:

#### **MLS:**

- Masterarbeiten:

Augspurg, D. (2024) Ladeeinheitenmix auf Umschlagterminals des kombinierten Verkehrs. Betreuerin: Nicole Nellen

- Projektarbeiten:

Mohammed, M. A., Nawaz, M., Adikhansa, Y. (2024) Operational Optimization for Inland Container Terminals Management and Gantry Crane Performance. Betreuerin: Rafat Beigpoor Sharivar

Shashikumar, V. H.; Maraleebidu, N.; Joseph, G. T.; Somanna, V. (2024) Lean Management in Combined Transport Terminals. Betreuerin: Nicole Nellen

Dohms, S.; Augspurg, D.; Rogg, M. (2023) Optimierung von Lkw-Ankünften an Terminals des Kombinierten Verkehrs. Betreuerin: Michaela Grafelmann

#### **IPMT:**

- Masterarbeiten:

Winter, J.-J. (2024) Modellierung von Direktumschlägen auf Terminals des Kombinierten Verkehrs. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev.

Rusch, C. (2025) Entwicklung eines modellbasierten Vorgehens zur Termin- und Kapazitätsplanung auf Terminals des Kombinierten Verkehrs. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev

Sundar Gowthaman, A. (2024) Development of an Operation Procedure for Combined Transport Terminals based on a Double Cycle Strategy. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev

Shaikh, O. (2024) Model-based Process Data Analysis at Combined Transport Terminals. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev, Julian Petersen.

- Projektarbeiten:

Winter, J.-J. (2023) Modellierung der Doppelspiele eines Portalkrans auf Umschlagterminals. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev

Rusch, C. (2024) Modellierung der Umladungen auf Umschlagterminals. Betreuer: Volodymyr Alieksieiev



## **4 Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben**

- wissenschaftlich-technisches Personal am MLS

Für das Forschungsprojekt wurden Zuwendungen für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter für die Laufzeit von 24 Monaten geplant. Im Zeitraum vom 01.12.2022 bis zum 30.11.2024 wurden die vorgesehenen 24 MM eingesetzt.

- wissenschaftlich-technisches Personal am IPMT

Für das Forschungsprojekt wurden Zuwendungen für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter für die Laufzeit von 24 Monaten geplant. Im Zeitraum vom 01.12.2022 bis zum 30.11.2024 wurden die vorgesehenen 24 MM eingesetzt.

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Zuwendungen für Gerätebeschaffung beantragt.

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Zuwendungen für Leistungen Dritter beantragt.

## **5 Durchführende Forschungseinrichtungen**

Das Forschungsprojekt wurde gemeinsam vom Institut für Maritime Logistik (MLS) und vom Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der TU Hamburg durchgeführt.

### **Forschungseinrichtung 1:**

Technische Universität Hamburg  
Institut für Maritime Logistik (MLS)  
Am Schwarzenberg-Campus 4 (D)  
21073 Hamburg  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn  
Projektbearbeiterinnen: Michaela Grafelmann, Dr. Rafat Beigpoor Shahrivar  
Tel.: 040 42878 4451

### **Forschungseinrichtung 2:**

Technische Universität Hamburg  
Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT)  
Denickestraße 17  
21073 Hamburg  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding  
Projektbearbeiter: Volodymyr Alieksieiev  
Tel.: 040 42878 3233

## Literaturverzeichnis

Aliksieiev, V.; Shahrivar, R. B.; Jahn, C.; Lödding, H. (2024a): Modeling of Logistics Objectives at Rail-Road Inland Transshipment Terminals. In: Matthias Thüerer, Ralph Riedel, Gregor von Cieminski und David Romero (Hg.): *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments*, Bd. 733. Cham: Springer Nature Switzerland (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 92–107.

Aliksieiev, V.; Winter, J.-J.; Harlem, J. v.; Grafelmann, M.; Jahn, C.; Lödding, H. (2024b): Untersuchung von Doppelspielen eines Portalkrans auf Umschlagterminals. In: *32. Internationale Kranfachtagung*. DOI: 10.15480/882.14471.

Aliksieiev, V.; Winter, J.-J.; Shahrivar, R. B.; Jahn, C.; Lödding, H. (2024c): Modeling of direct transshipments at rail-road combined transport terminals. Hamburg International Conference of Logistics (HICL) 2024. Hamburg, 2024. Online verfügbar unter [https://www.tuhh.de/t3resources/hicl/pdf/HICL2024\\_Scientific\\_Program.pdf](https://www.tuhh.de/t3resources/hicl/pdf/HICL2024_Scientific_Program.pdf).

Basallo-Triana, M. J.; Bravo-Bastidas, J. J.; Vidal-Holguín, C. J. (2022): A rail-road transshipment yard picture. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 159, S. 102629. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102629.

Baudach, J.; Voll, R.; Eufinger, L.; Meier, F.; Sender, J.; Goedicke, I.; Thaller, C. (2013): Modellentwicklung. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 327–403.

Bechte, W. (1984): *Steuerung der Durchlaufzeit durch Belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Dissertation, Universität Hannover, 1980. Düsseldorf: VDI-Z (70, 2).

Böse, J. W. (2007): *Planungsinstrumente zur Realisierung von Prozeßinnovationen mit Beispielen aus der Verkehrslogistik*. Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2006. Aachen: Shaker (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik). Online verfügbar unter [http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc\\_library=BVB01&doc\\_number=016096032&line\\_number=0002&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA](http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=016096032&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2022): *Klimaschutz in Zahlen. Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland*. Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/klimaschutz-in-zahlen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/klimaschutz-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile&v=8).

Clausen, U.; Kaffka, J. (2013): Entwicklung von Prioritätsregeln für Umschlagvorgänge in Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation. Development of Priority Rules for Handlings in Inland Port Containerterminals with Simulation. In: *Simulation in Produktion und Logistik: Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*.

Clausen, U.; Kaffka, J.; Meier, F. (2012): CONTSIM–Container Terminal Management with Simulation. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54, S. 332–340. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.752.

Egli, J. (2002): *Transportkennlinien: ein Ansatz zur Analyse von Materialflusssystemen*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2001. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Unternehmenslogistik).

Engehausen, F. (2021): *Modellierung und Auslegung der Reihenfolgebildung mit Rüstfamilien*. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg.

Gburek, G.; Wittenbrink, P. (2014): BME/DHBW-Umfrage „Kombinierter Verkehr 2014— Chancen und Risiken.

Goodchild, A. (2005): Crane Double Cycling in Container Ports: Algorithms, Evaluation, and Planning. PhD Thesis. UC Berkeley: University of California Transportation Center. Online verfügbar unter <https://escholarship.org/uc/item/0nt8t1db>.

Grafelmann, M.; Aliksieiev, V.; Lödding, H.; Jahn, C. (2023): Logistics objective conflicts at intermodal terminals. 20. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2023, p. 313. DOI: 10.22032/dbt.57778.

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hofmann, F. (2016): Modellierung, Optimierung und Simulation von Umschlagprozessen in Binnenterminals. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover; Shaker Verlag.

Hopp, W. J.; Spearman, M. L. (2008): Factory physics. 3. ed., internat. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin (The McGraw-Hill/Irwin series).

Hu, Q.; Wiegmans, B.; Corman, F.; Lodewijks, G. (2019): Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. In: *Flex Serv Manuf J* 31 (3), S. 807–831. DOI: 10.1007/s10696-019-09345-8.

Kaffka, J. (2013): Kombiniertes Verkehr. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): Verkehrs- und Transportlogistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 253–274.

Kim, K. H. (1997): Evaluation of the number of rehandles in container yards. In: *Computers & Industrial Engineering* 32 (4), S. 701–711. DOI: 10.1016/S0360-8352(97)00024-7.

Kingman, J. F. C. (1961): The single server queue in heavy traffic. In: *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.* 57 (4), S. 902–904. DOI: 10.1017/S0305004100036094.

Lampe, H. (2006): Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des kombinierten Verkehrs Schiene-Straße. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2005. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Logistik, Verkehr und Umwelt).

Lan, Y.; Wang, L. (2019): Comparison between Two Different Handling Modes of Gantry Cranes in Railway Container Terminals. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1176, S. 52001. DOI: 10.1088/1742-6596/1176/5/052001.

Lödding, H. (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Malavasi, G.; Quattrini, A.; Ricci, S. (2006): Effect of the distribution of the arrivals and of the intermodal unit sizes on the transit time through freight terminals. In: J. Allan, C. A. Brebbia, A. F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone und C. J. Goodman (Hg.): Computers in Railways X. COMPRAIL 2006. Prague, Czech Republic, 10.07.2006 - 12.07.2006. Southampton, UK: WIT Press, S. 905–914.

Möller, H. C. (2002): Beitrag zur Potenzialanalyse im kombinierten Verkehr für Güterverkehrszentren. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2001. Dortmund: Verl. Praxiswissen (Logistik für die Praxis).

Mundt, C. (2024): Modellbasierte Auftragsannahme und -terminierung. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg.

Mundt, C.; Lödding, H. (2020): Order Acceptance and Scheduling with a Throughput Diagram. In: Bojan Lalic, Vidosav Majstorovic, Ugljesa Marjanovic, Gregor von Cieminski und David Romero (Hg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Digital Transformation and Innovation of Production Management Systems*, Bd. 591. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 351–359.

Nellen, N.; Lange, A.-K.; Jahn, C. (2022): Potentials of direct container transshipment at container terminals. Epubli. DOI: 10.15480/882.4704.

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P. (2012): *Logistische Kennlinien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S. (2008): *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom\\_att\\_2=simple\\_viewer](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom_att_2=simple_viewer).

Reis, V.; Meier, J. F.; Pace, G.; Palacin, R. (2013): Rail and multi-modal transport. In: *Research in Transportation Economics* 41 (1), S. 17–30. DOI: 10.1016/j.retrec.2012.10.005.

Rizzoli, A. E.; Formara, N.; Gambardella, L. M. (2002): A Simulation Tool for Combined Rail-Road Transport in Intermodal Terminals. In: *Mathematics and Computers in Simulation* (59), S. 57–71.

Seitz, K.-F. (2016): *Modellierung von Transportprozessen in Lieferketten*. Dissertation. [Erstausgabe]. [Garbsen]: PZH-Verlag (Berichte aus dem IFA, 2016, Band 4).

Shahrivar, R. B.; Mohr, A.; Aliksieiev, V.; Lödding, H.; Jahn, C. (2025): Effect of coordinated train arrivals on the logistics objectives of rail-road intermodal terminals. 7th Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic. Darmstadt, 2025.

Trzyna, D. (2015): *Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion*. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Hamburg.

Umweltbundesamt (2023): Emissionsdaten. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich\\_personenverkehr\\_grafik](https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr_grafik).

VDI 3633, Blatt 1: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*.

Wenzel, S. (2018): Simulation logistischer Systeme. In: Horst Tempelmeier (Hg.): *Modellierung logistischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–34.

Wesebaum, S.; Prüssing, P.; Nyhuis, P. (2013): Verbesserung logistischer Ziele durch Belastungsflexibilität. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb: ZWF* 5 (108), S. 305–309.

Winter, M.; Schoop, B.; Lödding, H. (2021): Produktionskennlinien mit Belastungsflexibilität. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (11), S. 762–765. DOI: 10.1515/zwf-2021-0187.