

Potentiale eines flurfreien Transportsystems für Standardseecontainer

Entwicklung und exemplarische Anwendung einer
Analysesystematik zur Technologiebewertung

Ann-Kathrin Rohde

September 2020

Fachbereich Produktionstechnik

Universität Bremen

POTENTIALE EINES FLURFREIEN TRANSPORTSYSTEMS FÜR STANDARDSEECONTAINER

- Entwicklung und exemplarische Anwendung einer
Analysesystematik zur Technologiebewertung -

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. & Pat. Ing. Ann-Kathrin Rohde

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag

Prof. Dr.-Ing. Jens Heger (Leuphana Universität Lüneburg)

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2020

Zusammenfassung

Die weltweit verteilte Herstellung von Gütern führt zu einem stetig wachsenden, globalen Logistiknetzwerk; auch die Größe der transportierenden Schiffe steigt stetig an. Die Anpassung derzeitiger Systeme und insbesondere auch der dem Seeverkehr nachgestellten landseitigen Logistikprozesse an diese Gegebenheiten ist erforderlich, um den effizienten Transport der Gütermengen langfristig zu gewährleisten. Viele der weltweit transportierten Waren werden in Standardseecontainern transportiert, die in den Containerhäfen von den Schiffen entladen und ins Hinterland verbracht werden und andersherum. Eine große Herausforderung liegt in der Bereitstellung größerer Lagerkapazitäten in direkter Verbindung zu den Häfen zur Aufnahme größerer Containermengen, grundsätzlich und unter dem Einfluss der Schiffsgrößenentwicklung. Häufig ist eine direkte Expansion der vorhandenen Flächen auf Grund der umgebenden Strukturen (Gebäude, Straßen, o.ä.) erschwert oder nicht möglich. Insbesondere unter dem Augenmerk einer möglichst geringen Belastung der bestehenden Strukturen und des Fachkräftemangels liefert die Anwendung herkömmlicher Technologien keine langfristig zufriedenstellende Lösung. Um die Anforderungen lokal bedienen zu können, müssen insbesondere auch die landseitigen Prozesse in den Seehäfen, deren Technologiekonzepte und die Prozesse zur Hinterlandanbindung durch die Detektion und Nutzung von neuen Technologien verbessert werden.

Im Rahmen dieses Dissertationsvorhabens wird eine Analysesystematik zur szenariospezifischen Einschätzung des Einsatzpotentials von Technologien, die einen Containertransport auf einer neuen Infrastrukturebene ermöglichen, entwickelt. Diese wird nach einer methodischen Recherche und Festlegung einer Klassifizierung dienlicher Technologien entworfen und exemplarisch umgesetzt. Die Konzeption der Analysesystematik basiert auf der initialen Festlegung der Parameter unter Anwendung der QFD-Methode. Die Parametrierung ermöglicht nach einer initialen Szenariobeschreibung eine technische Systemauslegung mit dem Zielkriterium der Erreichung der geforderten Förderleistung, die auf den Eingangsdaten der Szenariobeschreibung und den Technologiespezifikationen basiert. Das Ergebnis der Auslegung für verschiedene Technologien wird in der szenariospezifischen Systemspezifikation zusammengefasst. Die Systematik beschreibt weiterführend die Integration unternehmensspezifischer Gewichtungen um eine Nutzwertanalyse vorzunehmen und derart die Technologiebewertung in eine Rangfolge zu überführen, die zu einer technologiebasierten, szenario- und unternehmensspezifischen Empfehlung zum Einsatz eines Containertransportsystems, das eine neue Infrastrukturebene nutzt, führt. Die technologiespezifische Analysesystematik wird zur Evaluation für exemplarische Technologien umgesetzt und für verschiedene Fallbeispiele angewendet sowie einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die entwickelte Systematik kann zukünftig von Terminalbetreibern oder Infrastrukturplanern genutzt werden, um hiermit entsprechende Vorhaben und Konzepte zu überprüfen.

Abstract

The worldwide distribution of goods leads to a steadily growing, global logistics network. Additionally, the size of the transporting ships is also increasing. In order to ensure the efficient transport of goods in long-term, current systems and, in particular, the onshore logistics processes that are adapted to the maritime transport have to be adapted to these conditions. Many goods of global transportation are transported in standard sea containers, which are unloaded from ships in container ports and forwarded to the hinterland and vice versa. In order to meet the requirements of increasing number of container traffics and especially under the influence of the ship size development, a major challenge lies in the provision of larger storage capacities in direct connection to the terminals to accommodate larger and peak levels of container volumes. But in many cases, a direct expansion of the existing terminal areas is difficult or impossible due to the surrounding structures (buildings, streets, etc.). The use of traditional technologies (e.g. Straddle Carrier) does not provide satisfying solutions in long-term because they burden highly on existing structures and skills shortages have a big influence on them. In order to serve the requirements locally, notably the land-side processes in seaports, their technology concepts and the processes for their hinterland connection have to be improved by the detection and use of new transportation technologies.

Within the doctoral thesis at hand, an evaluation systematics is being developed that allows a scenario-specific assessment of the application of technologies that facilitate autonomic container transport on a different infrastructure level than usual. It is designed and exemplarily implemented after a methodical search of and classification determination for adequate technologies. The conception of the systematics is based on the definition of the parameters using the QFD method. The parameterization of the scenario and technologies allows the dimensioning of appropriate technical systems in consideration of achieving the required delivery rate. Within the scenario-specific system specification, the results of the design for different technologies are summarized. Additionally, the systematics include the description of the integration of company-specific weightings. On this basis, a value benefit analysis can be carried out. Thus, a ranking order with regard to the technology assessment can be defined, which leads to a technology-based, scenario- and company-specific recommendation for the use of a container transport system on a different infrastructure level than usual. The technology-specific assessment systematic is implemented exemplarily and applied for various case studies as well as subjected to a sensitivity analysis. In the future, the developed systematic can be used by terminal operators or infrastructure planners to design and evaluate appropriate technologies and concepts that facilitate autonomic container transport on a different infrastructure level than usual.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen. Wissenschaftlich betreut wurde die Arbeit von Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Freitag, Leiter des Fachgebietes Planung und Steuerung produktionstechnischer und logistischer Systeme (PSPS), Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen und Mitglied der Geschäftsführung des BIBA, der mir durch sein fachliches Interesse und die produktive Zusammenarbeit stets eine große Unterstützung war. Ihm gilt daher mein besonderer Dank.

Herrn Professor Dr.-Ing. Jens Heger, Professor für Ingenieurwissenschaften, insb. Modellierung und Simulation technischer Systeme und Prozesse am Institut für Produkt- und Prozessinnovation (PPI) an der Leuphana Universität Lüneburg, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme der Begutachtung.

Den Kollegen am BIBA, die mich während dieser Zeit begleitet und gefördert bzw. die durch kritische Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich an dieser Stelle ganz herzlich. Besonders hervorzuheben sind hierbei Herr Dr.-Ing. Michael Lütjen und Herr Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Echelmeyer. Ein großes Dankeschön möchte ich an dieser Stelle auch den Projektkollegen von Eurogate Technical Services Hamburg aussprechen, die mich bei der Analyse der Ist-Situation und im Rahmen der Ausgestaltung tatkräftig unterstützt haben, besonders Herr Dipl.-Ing. Jens Fahrbach. Zudem danke ich Herrn Dipl.-Ing. Werner Beck und Herrn Lutz Peper, die mir in vielen Gesprächen in einer mentorgleichen Art Mut gemacht haben, an meinem Weg festzuhalten und die Erstellung dieses Werkes zu einem guten Ende zu führen.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinem Mann und Fachkollegen Herrn Dipl.-Ing. Moritz Rohde bedanken, der mir durch fachliche Diskussionen und Anregungen sowie insbesondere auch durch sein großes Verständnis und die Schaffung von zeitlichen Freiräumen bei der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen hat – ohne dich wäre dies so nicht möglich gewesen. Ein großes Dankeschön gilt auch meiner Familie und meinen Schwiegereltern, die ein großes Interesse an meiner ihnen fachfremden Thematik haben, uns im Alltag sehr unterstützen und mir den Mut und das Vertrauen geschenkt haben, mich dieser Aufgabe zu stellen; insbesondere meine Mutter hat mir auch durch ihre kritische Durchsicht des Manuskripts bei der Erstellung der Arbeit sehr geholfen. Auch viele Freunde haben ihren Anteil am Gelingen; ich bin Dankbar für all eure herzliche, mentale Unterstützung.

Ein letzter, besonders liebevoller Dank gilt meinen Kinder Carlotta und Piet, die ihre Mama oft in Ruhe mussten, damit sie am Schreibtisch vorankommen konnte.

Ann-Kathrin Rohde

Bremen im September 2020

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	15
1.1	Motivation	15
1.2	Zielstellung der Arbeit	15
1.3	Methodisches Vorgehen und Gliederung der Arbeit	17
2.	Konkretisierung der Problemstellung und des zu untersuchenden Systems	21
2.1	Charakteristika und Funktionen eines Containerterminals.....	21
2.1.1	Maritimer Warenfluss	21
2.1.2	Seehäfen	22
2.1.3	Containerterminal.....	23
2.1.4	Grundlagen Standard-Überseecontainer.....	25
2.1.5	Gängige Containertransportsysteme	31
2.2	Trends des maritimen Containertransports.....	42
2.2.1	Steigende Umschlagzahlen.....	42
2.2.2	Wettbewerb der Seehäfen	44
2.2.3	Entwicklung der Schiffsgrößen	45
2.2.4	Beeinflussung der Trends auf die landseitigen Logistikprozesse.....	47
2.2.5	Bedarf an flurfreien Containertransporttechnologien	50
2.2.6	Anforderungen an eine Analysesystematik zur Bewertung des Potentials eines flurfreien Containertransportsystems.....	51
2.3	Stand der Forschungen relevanter Ansätze und Methoden zur Technologiebewertung.....	52
2.3.1	Technologiefrüherkennung und Technologieplanung	54
2.3.2	Einzelmethoden zur Technologiebewertung.....	55
2.3.3	Integrative Ansätze zur Technologiebewertung.....	57
2.3.4	Bewertung der Einzelmethoden und integrativen Ansätze	59
2.3.5	Ableitung des Forschungsbedarfes.....	62
3.	Identifikation und Analyse von Technologien zum flurfreien Containertransport	65
3.1	Technologiesuche.....	65
3.1.1	Morphologische Analyse	65
3.1.2	Analyseergebnis.....	67
3.2	Technologiebeschreibungen	68
3.2.1	Containerseilbahn.....	68
3.2.2	RailCab.....	68

3.2.3	Container-Magnetschwebebahn	69
3.2.4	Containerbahn	70
3.2.5	SkyTech	70
3.2.6	Concar	70
3.2.7	EagleRail.....	71
3.2.8	GRail.....	71
3.2.9	Freight Shuttle System (FSS).....	71
3.2.10	ACT	72
3.2.11	AutoCon.....	72
3.2.12	Automatisierte, konventionelle Containerfahrzeuge (AKCTS)	72
3.2.13	Wurfmaschine.....	73
3.2.14	Cargo Lifter	73
3.2.15	Drohne	73
3.2.16	Tube Cargo Express.....	74
3.2.17	Underground Container Mover	75
3.2.18	Cargo Cap und Swiss Cargo Tube	75
3.2.19	Underground Automated Trucks.....	76
3.2.20	Pipelines.....	76
3.3	Bewertung der Technologiesuche.....	76
4.	Konzeption der komparativen Analysesystematik	79
4.1	Identifikation relevanter Systemparameter	79
4.1.1	Beschreibung des Fallbeispiels.....	80
4.1.2	Ableitung der Systemparameter aus dem Fallbeispiel.....	81
4.1.3	Generalisierung und Beschreibung der Systemparameter.....	82
4.1.4	Ableitung der Analysesystematik.....	84
4.2	Beschreibung des Untersuchungsszenarios	88
4.2.1	Systemlänge.....	88
4.2.2	Arbeitsweise.....	88
4.2.3	Systematische Beschreibung der zu überwindenden Geo-Objekte.....	89
4.2.4	Gewünschte Förderleistung.....	98
4.3	Technologiespezifische Bewertung.....	98
4.3.1	Technologiespezifikation	98
4.3.2	Technische Systemauslegung.....	105
4.3.3	Bewertung der technischen Systemauslegung	105
4.4	Unternehmensspezifische, betriebswirtschaftliche Bewertung.....	107

4.4.1	Unternehmenskennzahlen	107
4.4.2	Unternehmensspezifische und betriebswirtschaftliche Systemauslegung	108
4.4.3	Bewertung der unternehmensspezifischen und betriebswirtschaftlichen Parameter	108
4.5	Zusammenfassung des Systematik	109
5.	Exemplarische Metrisierung ausgewählter Technologien	113
5.1	Konzeption eines Containerluftseilbahnsystems	113
5.1.1	Grundlagen Seilbahnen.....	113
5.1.2	Einsatzbereiche verschiedener Seilbahnvarianten.....	124
5.1.3	Festlegung der Funktionalitäten.....	125
5.1.4	Gestaltung der technischen Elemente	126
5.2	Berechnungsmodelle für die leistungsbezogene Parametrierung	130
5.2.1	Containerluftseilbahn.....	130
5.2.2	Automatisierte konventionelle Containertransportsysteme	140
6.	Implementierung der Analysesystematik und Evaluation	151
6.1	Analysetool	151
6.1.1	Umsetzung der Szenariobeschreibung.....	151
6.1.2	Automatisierte leistungsbezogene Metrisierung (Technologiespezifikation)	152
6.1.3	Umsetzung der unternehmensspezifischen Bewertung der Ergebnisse	154
6.2	Fallbeispieluntersuchung	155
6.2.1	Untersuchungsszenarios.....	155
6.2.2	Ableitung der szenariospezifischen Parameter zur Eingabe in das Analysetool.....	157
6.2.3	Ergebnis der technologiespezifischen Analyse.....	158
6.3	Sensitivitätsanalyse.....	161
6.3.1	Sensitivitätsanalyse für Szenario 1	161
6.3.2	Sensitivitätsanalyse für Szenario 2	163
6.3.3	Sensitivitätsanalyse für Szenario 3	163
6.3.4	Sensitivitätsanalyse für Szenario 4	164
6.3.5	Sensitivitätsanalyse für Szenario 5	165
6.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.....	166

6.4	Bewertung der Ergebnisse der Fallbeispieluntersuchung.....	167
7.	Diskussion der Ergebnisse	171
7.1	Zusammenfassung der Untersuchungen.....	171
7.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse	172
7.3	Auswirkungen der Arbeit	173
8.	Zusammenfassung und Ausblick	175
9.	Anhang	179
9.1	Ergebnis der Patentrecherche	179
9.2	Containerseilbahn (Quelle: Doppelmayr).....	180
9.3	Methodische Entwicklung eines Containerseilbahnsystems.....	181
9.4	Datenblätter der größten Personen- und Materialseilbahnen.....	182
9.5	Weitere Informationen zu den Evaluationsszenarios.....	189
9.5.1	Szenario 1: JWP	189
9.5.2	Szenario 2: Valparaiso.....	190
9.5.3	Szenario 3: Antwerpen.....	192
9.5.4	Szenario 4: Rotterdam.....	194
9.5.5	Szenario 5: Cikarang Dry Port.....	195
9.6	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen	195
9.6.1	Szenario 1	195
9.6.2	Szenario 2	196
9.6.3	Szenario 3	197
9.6.4	Szenario 4	198
9.6.5	Szenario 5	200
10.	Abkürzungsverzeichnis	202
11.	Abbildungsverzeichnis	205
12.	Tabellenverzeichnis	210
13.	Formelverzeichnis	212
14.	Literaturverzeichnis	213

1. Einleitung

1.1 Motivation

Der globale Seeverkehr stellt einen der wichtigsten Handelsströme dar. Der meistgenutzte Ladungsträger ist der Container: mehr als 16 Prozent des weltweiten Handelsvolumens wird in diesen standardisierten Ladungsträgern transportiert, zu denen auch der Standardseecontainer zählt (Verband für Schiffbau und Meerestechnik (VSM), 2018). Zudem sind eine Vergrößerung der Containerschiffgrößen zur Bewältigung des wachsenden Seehandels (Schönknecht, 2009) und eine Konzentration des Umschlags an Hauptumschlagshäfen (Jiang, et al., 2015) zu beobachten. Auch durch diese Entwicklungen steigt die Bedeutung effizienter logistischer Prozessketten erheblich. Um diese Anforderungen lokal bedienen zu können, müssen insbesondere auch die landseitigen Prozesse in den Seehäfen und die anschließenden Prozesse zur Hinterlandanbindung durch die Detektion und Nutzung von Optimierungspotentialen optimiert werden. Eine große Herausforderung liegt in der Bereitstellung größerer Lagerkapazitäten, da eine direkte Expansion der vorhandenen Flächen auf Grund der umgebenden Strukturen häufig erschwert ist (Hall, 2007). Um bei der Anbindung an Expansionsflächen nicht die bestehende hafennahe, ohnehin meist stark ausgelastete Infrastruktur weiter zu belasten, gilt es Technologien einzusetzen, die eine andere als die konventionell genutzte Infrastrukturebene nutzen und somit „flurfrei“¹ transportieren. Die szenariospezifische Formulierung der Ausgestaltung sowie Bewertung der Technologien ist bisher nicht beschrieben. Die vorliegende Arbeit untersucht vor diesem Hintergrund Technologien, die einen flurfreien Transport von Containern ermöglichen und entwickelt eine Analysesystematik, durch die, basierend auf einer parameterbasierten Systemauslegung, verschiedene Technologien zum flurfreien Containertransport szenariospezifisch gegenübergestellt werden.

1.2 Zielstellung der Arbeit

Vorrangiges Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Analysesystematik und ihre exemplarische Umsetzung in einem Analysetool, mittels dem eine szenariospezifische Einschätzung der Einsetzbarkeit technischer Systems, die dem Zweck eines flurfreien Transports von Standardseecontainer dienen, vorgenommen werden kann. Die entwickelte Systematik wird für die technologische Bewertung exemplarisch umgesetzt, soll aber auch auf andere, zweckgleiche Technologien übertragen werden können.

Der vorliegenden Arbeit liegen im Wesentlichen die folgenden Forschungsfragen zugrunde:

1. Welche Transportsysteme können einen flurfreien Containertransport realisieren?
2. Was sind mögliche konkrete Anwendungsszenarien für einen flurfreien Containertransport und welche Herausforderungen in der logistischen Kette treffen sie?

¹ Definition von „flurfrei“: I.S. dieser Arbeit sind mit flurfrei alle Ebenen bezeichnet, die konventionell nicht im überwiegenden Maße für Infrastruktur genutzt werden (Straßen, Schienen).

3. Wie können potentielle Anwendungsszenarien für einen flurfreien Containertransport und Technologien, die diesen ermöglichen verallgemeinert beschrieben werden?

4. Welche Auslegungs- und Berechnungsgrundlagen sind für die Bewertung der Einsetzbarkeit eines flurfreien Containertransportsystems evident und welche Ausprägungen können sie haben?

Aus den Forschungsfragen können die folgenden untergeordneten Ziele abgeleitet werden:

- Untersuchung des Betrachtungsgegenstands und relevanter Trends (1),
- klassenbasierte Detektion von Technologien, die zum flurfreien Transport von Containern eingesetzt werden können (2),
- Formulierung von Auslegungsgrundlagen zu generalisierter Beschreibung eines Szenarios, für den Einsatz eines flurfreien Containertransportsystems (3),
- Definition von Parametern, mit denen die Eignung der technischen Systeme überprüft werden kann (komparativ und metrisierend²) (4),
- Exemplarische Anwendung der konzipierten Analysegrundsätze (5), sowie
- Implementierung der technologiebasierten Analysesystematik in ein Analysetool zur allgemeingültigen Ersteinschätzung der Realisierbarkeit und zur Empfehlung passender Ausgestaltungsvarianten in Bezug auf konkrete Fälle (6) und
- Evaluierung des Analysetools anhand verschiedener Fallbeispiele (7) sowie
- Bewertung der Nutzbarkeit des Analysetools für andere Technologiekonzepte zum flurfreien Containertransport (8).

Im Ergebnis werden durch diese Arbeit zunächst Technologien zum flurfreien Containertransport identifiziert. Zudem werden im Rahmen der beispielhaften Ausgestaltung einer konkreten Technologie mit dem Ziel eines flurfreien Containertransportsystems Klassen festgelegt, denen Szenarien möglicher Einsatzfälle zugeordnet werden können. Weiterführend werden Auslegungsgrundlagen für das Bewertungstool entwickelt und umgesetzt. Darauf folgend erfolgt die Implementierung der technologiebasierten Bewertung in das im Rahmen der Arbeit zu entwickelnde Analysetool, das der Ersteinschätzung des Potentials der Installation eines entsprechenden automatisierten, flurfreien Containertransportsystems dient. Dieses Tool ermöglicht somit eine technologiebasierte, allgemeingültige Einschätzung der erreichbaren Leistungen und Effekte für konkrete Anwendungsfälle durch verschiedene Systemvarianten. Das Analysetool wird zu Validationszwecken für verschiedene Fallbeispiele angewendet und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

² Als Metrisierung wird in der vorliegenden die Definition von messbaren Eigenschaften, also die technologiespezifische Zuordnung von Kennwerten zu definierten Parametern, verstanden.

1.3 Methodisches Vorgehen und Gliederung der Arbeit

Zur Zielerreichung verfolgt die Arbeit das *Vorgehensmodell nach Krallmann* (Krallmann, et al., 2007). Der Entwicklungsprozess ist in Abbildung 1 dargestellt und enthält die fünf Phasen: Projektbegründung, IST-Analyse, Soll-Konzeption, Realisierung und Implementierung. Das Modell hat sich in der Praxis in einer Vielzahl von Projekten zur problemorientierten Untersuchung organisatorischer und informationeller Systeme bewährt. Dabei werden im Ursprungsmodell auch die Partizipation der Beteiligten sowie das Projektmanagement berücksichtigt; diese Elemente werden zur Strukturierung der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.

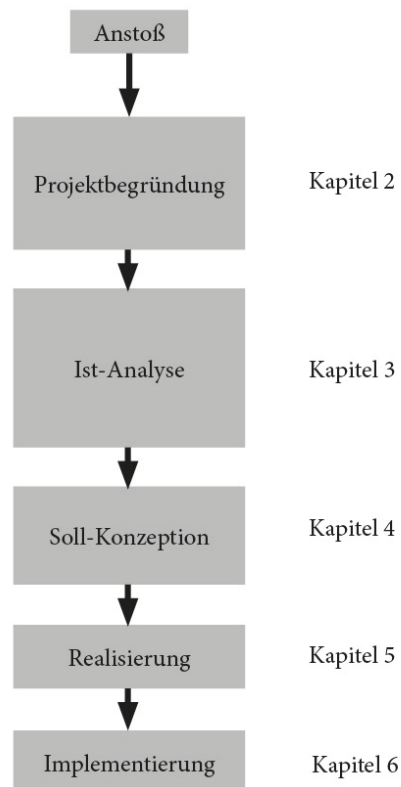


Abbildung 1: Zugrundeliegendes Vorgehensmodell in Anlehnung an (Krallmann, et al., 2007)

In der Anwendung des Vorgehensmodells nach Krallmann führt das zweite Kapitel (2) nach der Einleitung in die Themenstellung der Arbeit zum Betrachtungsgegenstand hin. Dies erfolgt durch eine Darlegung des Anstoßes für die Auseinandersetzung und Relevanz der in der vorliegenden Arbeit behandelten Thematik im Sinne einer Herleitung der Problemstellung und Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands. Hierfür enthält das zweite Kapitel Informationen zur Entwicklung des weltweiten Warenstroms, Basisinformationen zum Thema Seehäfen sowie speziell zu Containerterminals und deren Prozesse und es werden Basisinformationen zum standardisierten Seecontainer sowie zu gängigen, konventionellen Containertransportsystemen zusammengestellt. Zudem legt es relevante Trends des maritimen Containertransports dar; zu diesen zählen die mengenmäßige Entwicklung des weltweiten Containertransports, die Nutzung immer größerer Containerschiffe sowie der Wettbewerbsdruck der Häfen untereinander. Abschließendes Teilergebnis des Kapitels ist die zusammenfassende Darlegung des

Betrachtungsgegenstandes und der Gründe für die Relevanz der Untersuchungen. Zudem werden im zweiten Kapitel die Anforderungen an eine Analysesystematik zur Bewertung des Potentials flurfreier Containertransportsysteme definiert sowie der Stand der Forschungen relevanter Ansätze und Methoden zur Technologiebewertung beschrieben und darauf aufbauend ihre Anwendbarkeit auf den untersuchten Betrachtungsgegenstand bewertet.

An das zweite Kapitel schließt sich im dritten Kapitel die IST-Analyse an, in der im Sinne einer quantitativen und qualitativen Erfassung des IST-Zustands des Untersuchungsgegenstands unter Berücksichtigung des Untersuchungsziels unterschiedliche Technologien zum flurfreien Transport von Containern ermittelt und beschrieben werden (3). Somit untersucht das dritte Kapitel technische Ideen zum flurfreien Containertransport. Die Suche nach einsetzbaren Technologien erfolgt dabei methodisch anhand einer *morphologischen Analyse* (Methodenauswahl auf Basis der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Methoden), die durch eine Analyse wissenschaftlicher Artikel, eine Internetrecherche sowie eine Marktrecherche umgesetzt wurde.

Das anschließende vierte Kapitel (4) enthält im Rahmen der Soll-Konzeption die Gestaltung der in der Entwicklung stehenden Analysesystematik zur Technologiebewertung. Dafür wird zunächst ein konkretes Einsatzszenario beschrieben, anhand dessen die relevanten Parameter identifiziert und allgemeingültige Parameter zur Beschreibung von Untersuchungsszenarios, zur Beschreibung potentieller Technologien und zur unternehmenswirtschaftlichen, betriebswirtschaftlichen Bewertung abgeleitet werden. Durch die Anwendung der *QFD-Methode* (Methodenbeschreibung in Kapitel 2.3.2) wird eine anwenderorientierte Auswahl der Parameter sichergestellt. Darauf aufbauend erfolgten eine nähere Untersuchung der Parameter und Festlegung ihrer Merkmalsausprägungen, unterteilt in die Ausprägungen „Szenariobeschreibung“, „technologische Systemauslegung“ und „unternehmens-spezifisch betriebswirtschaftliche Auslegung“. Insofern möglich, werden die spezifischen Parameter der im dritten Kapitel identifizierten Technologien definiert. Ergänzend erfolgt die Festlegung der Systematik zur unternehmensspezifischen Ermittlung der gegenseitigen Stellenwerte der Bewertungskriterien vor dem Hintergrund der Umsetzung der komparativen Bewertung flurfreier Containertransportsysteme. Die Konzeption der Systematik schließt mit der Beschreibung zur Normierung der Ergebnisse mit dem Ziel einer *Nutzwertanalyse*, die die unternehmensspezifische Gewichtung der Bewertungsfaktoren mittels *paarweisem Vergleich* (Methodenbeschreibung in Kapitel 2.3.2) aufgreift, ab. Eine zusammenfassende Beschreibung der Analysesystematik und darin enthaltender Parameter sowie der hierauf basierenden Entscheidungsfindung zur Potentialbewertung leitet zum anschließenden Kapitel 5 (Realisierung) über.

Im fünften Kapitel (5) erfolgt im Rahmen der Realisierung eine exemplarische, metrisierende Umsetzung für ausgewählte Technologien. Eine Klassifizierung und Bewertung der im dritten Kapitel detektierten Technologien führt zur Auswahl der Containerseilbahn und automatisierter, konventioneller Containertransportsysteme (AKCTS), anhand derer die exemplarische vollständige technologiespezifische Anwendung der beschriebenen Systematik in diesem Kapitel umgesetzt wird. Im Anschluss an die Auswahl führt das Kapitel in das Thema „Seilbahnen“ ein; dabei werden zunächst gängige Seilbahnsysteme beschrieben und vor dem Hintergrund des gewünschten Szenarios des Transports eines Seecontainers einer tiefergehenden Analyse ihrer

Einsetzbarkeit unterzogen. Hierin sind auch Ausführungen zum Stand der Wissenschaft in Bezug auf den betrachteten Themenkomplex inkludiert. Im Anschluss werden die im vierten Kapitel festgelegten, systemrelevanten Parameter der Containerseilbahn und der automatisierten, konventionellen Containertransportsysteme in einer qualitativen und quantitativen Bewertung extrahiert. Hierzu zählen Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der technologiespezifischen Förderleistung sowie des Entwicklungsstatus und des spezifischen Flächenbedarfs. Die betriebswirtschaftlichen und unternehmensspezifischen Bewertungsphasen werden nicht umgesetzt, da die Datenlage hierzu unzureichend ist. Aus den Untersuchungen werden konkrete Parametrierungen der ausgewählten Technologien abgeleitet, um diese in der Folge in der konkreten Umsetzung des technologiebasierten Analysetools durch eine Zusammenführung der komparativen und metrisierenden Bewertung im Kapitel 6 zu implementieren.

Im Kapitel (6) erfolgt im Rahmen der Implementierung die exemplarische Umsetzung der Berechnungssystematik in ein Excel-basiertes Analysetool. Mit Hilfe dieses Werkzeugs ist es nach der Implementierung der Informationen möglich, auf Basis der Kategorisierung des untersuchten Anwendungsfalls sowie der Eingabe von Systemparametern eine Aussage darüber zu treffen, inwiefern und in welcher Ausgestaltung der Einsatz einer Containerseilbahn oder eines automatisierten, konventionellen Containertransportsystems möglich ist. Das Analysetool wird mit dem Ziel seiner Evaluierung für verschiedene Fallbeispiele angewendet und die Ergebnisse diskutiert. Durch die Integration weiterer Technologien dient das Analysetool zukünftig der automatischen technischen Ausgestaltung automatisierter, flurfreier Containertransporttechnologien sowie der Darlegung der Effekte ihres Einsatzes im Hinblick auf konkrete Einsatzszenarien. Die unternehmensspezifische, betriebswirtschaftliche Betrachtung wird in der Beschreibung der Systematik aufgegriffen aber nicht in gleicher Weise wie die technologiespezifische Metrisierung umgesetzt. Die Evaluation des entwickelten Analysetools erfolgt anhand von Fallbeispieluntersuchungen, die mit einer Sensitivitätsanalyse ergänzt werden (ebenda). In den abschließenden Kapiteln werden die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Konzepte des flurfreien Containertransports sowie die Auswirkungen der Arbeit beschrieben (7) und die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst sowie offene Forschungsfragen zu dem bearbeiteten Thema benannt (8).

2. Konkretisierung der Problemstellung und des zu untersuchenden Systems

In diesem Kapitel erfolgt eine Heranführung an die Problemstellung, in dem das System „*maritimer Containertransport*“ sowie relevante Teilsysteme und Zukunftstrends beschrieben werden. Das Kapitel gibt somit einen Überblick und enthält grundlegende Informationen zu Aufbau, Prozessen und Nutzung bestehender Systeme. In diesem Sinne erfolgt zunächst die Beschreibung der Charakteristika und Funktionen des Systems *Containerterminal*. Die Darlegung des Grundlagenwissens zum Teilsystem *Standard-Überseecontainer* sowie eine Zusammenfassung und rudimentäre Nutzungsauswertung des Teilsystems *gängige Containertransportsysteme* ergänzen die Systembeschreibung. Hieran schließt sich die Beschreibung von *Zukunftstrends des maritimen Containertransports*: insb. Entwicklung der Containerumschlagszahlen, Konsolidierung und Wettbewerb der Häfen, Schiffsgrößenentwicklung sowie der daraus abgeleiteten Bedeutung der Lagerung von Containern in Seehäfen an. Die das Kapitel und die Vorüberlegungen abschließende Ableitung des in der vorliegenden Arbeit betrachteten Themenkomplexes des *seehafenbezogenen, flurfreien Containertransportes* und Feststellung des Bedarfs an flurfreien Containertransportsystemen bilden die Überleitung zu den folgenden Kapiteln.

2.1 Charakteristika und Funktionen eines Containerterminals

Hier erfolgt zunächst eine Eingliederung und Beschreibung des Aufbaus und der Prozesse des Systems *Containerterminal*. Weiterführend wird das Teilsystem *Standard-Überseecontainer* beschrieben und eine Übersicht zu Art und Nutzung gängiger *Containertransportsysteme* aufgeführt.

2.1.1 Maritimer Warenfluss

Der Transport von Gütern erfolgt entlang einer Transportkette³, die neben verschiedenen Transportprozessen auch Umschlags⁴- und Lagerprozesse beinhaltet (vgl. Abbildung 2). Beim maritimen Transport wird der Hauptlauf der Transportkette via Seeschiff über die Weltmeere gewährleistet. Der Sammelbegriff *Güter* beschreibt im Allgemeinen (a) Massengüter, die flüssig oder schüttbar sind, (b) Container und (c) Stückgüter, die weiter in konventionelle und Massenstückgüter unterschieden werden (Brinkmann, 2005).

Diese Arbeit widmet sich dem Transport von containerisierter Ware; diesem ist zumeist eine intermodale Transportkette zuzuordnen. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die Güter in einem Ladungsträger verbleiben und durch unterschiedliche, mindestens zwei verschiedene, Verkehrsträger transportiert werden (Schönknecht, 2009). Zusammenfassend liegt der Fokus dieser Arbeit auf den dem maritimen Transport von Standard-Überseecontainern nach ISO-

³ DIN 30781 definiert eine „*Transportkette*“ als: „Die Transportkette ist eine Folge von technischen und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei denen Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden.“

⁴ Das ein-, aus- und umlagern der Güter wird als *Umschlag* bezeichnet.

Normung⁵ insbesondere vor- und nachgelagerten, landseitigen Transportprozessen sowie der zugehörigen Lagerung auf terminalinternen und -externen Expansions- und Entlastungsflächen.

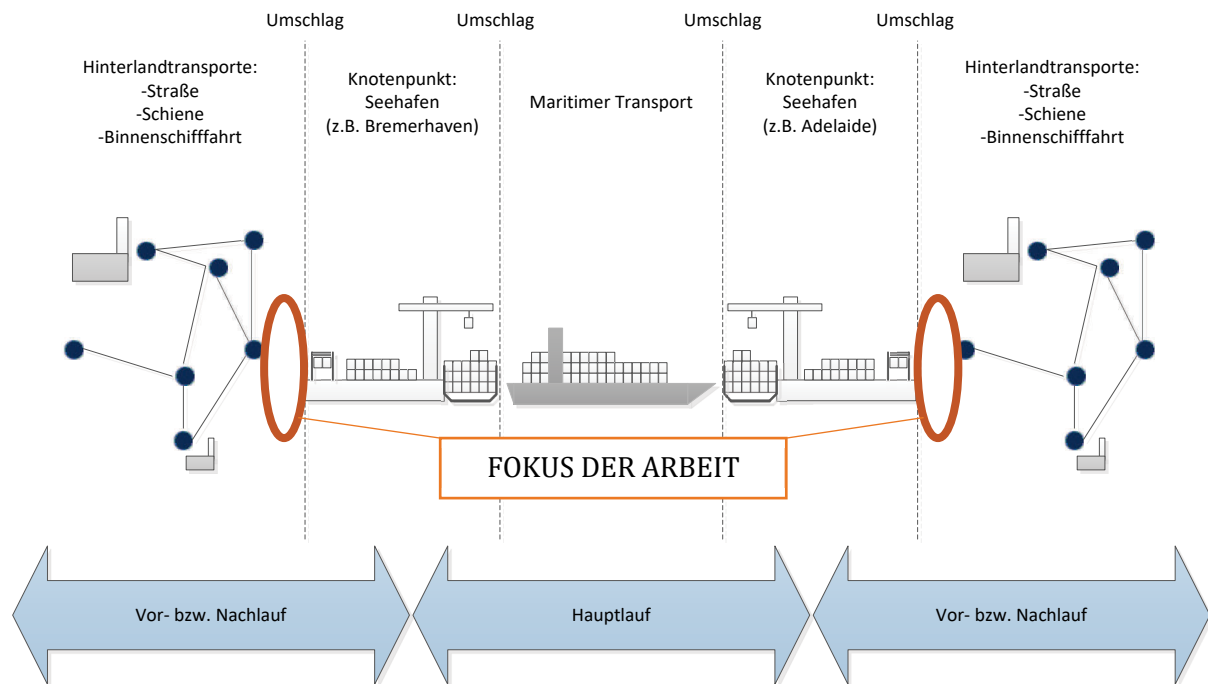


Abbildung 2: Intermodale Transportketten für die maritime Containerlogistik, e.D. in Anlehnung an (Schönknecht, 2009))

2.1.2 Seehäfen

Ein Hafen befindet sich im Allgemeinen an einem See, Fluss, Meer oder Ozean und ist von den spezifischen geophysikalischen Gegebenheiten geprägt (Polonia, 2016). Ein *Seehafen* ist als ein Hafen definiert, der von seegängigen Schiffen angelaufen werden kann, und der Anschluss an andere Verkehrsmittel wie bspw. Straße, Schiene oder Binnenschifffahrt bietet. Diese Verkehrsmittel werden für die sogenannten Hinterlandtransporte⁶ eingesetzt. Im Unterschied zu natürlichen Häfen (bspw. Buchten) weisen Seehäfen eine spezifische physische Infrastruktur auf, die zur Bewältigung der Aufgabe des Ladens und Löschens von Gütern (oder Personen) sowie den angrenzenden Prozessen dient (Scaccianoce, 2016).

Bis ins 19. Jahrhundert war die Entwicklung der Seehäfen insbesondere durch ihre spezifische Einbettung und die Entwicklung des sie umgebenden Siedlungsraumes und der Wirtschaft beeinflusst, so dass bei ihrer Untersuchung ein „historischer Methodenansatz“ angewendet werden kann (Freeman, 1997). Die erste industrielle Revolution führte zu einer extremen Zunahme der Produktvariabilität und -vielfalt (Freeman & Louca, 2001); auch die Seehäfen erfuhren eine Mechanisierung (bspw. zur Errichtung neuer Wasserstraßen: Krane und

⁵ ISO - International Organisation for Standardisation

⁶ Als *Hinterland* wird das kontinentale Einzugsgebiet von See- und Binnenhäfen bezeichnet. Die Verbindung zwischen einem Seehafen und dem Hinterland ist sehr wichtig für die Leistungsfähigkeit des Hafens, da der An- und Abtransports der Güter hiervon abhängt.

Dampfbagger sowie Dampfschiffe und Eisenschiffe, deren Entwicklung wiederum den Bedarf an tieferen und größeren Liegeplätzen an den Kajen schürte (Stopford, 2009). Die weitere industrielle Entwicklung führte zu technischen Innovationen für die effizientere Be- und Entladung innerhalb planbarer Zeitkorridore (Scaccianoce, 2016). Die zweite industrielle Revolution mit ihren Neuerungen in den Bereichen Stahlbau, Elektrizität und Motoren war, im Fokus des maritimen Gütertransports, insbesondere Treiber für die Entwicklung von spezialisierten Schiffsklassen, wie bspw. Passagierschiffe, Frachtschiffe, Trampschiffe und hieraus folgend für die Erweiterung und Errichtung neuer Schiffsliegeplätze und der Etablierung des Dienstleistungssektors dieses Bereiches (Stopford, 2009). Zusammenfassend korreliert die Entwicklung der Seehäfen somit stark mit dem Wandel der techno-ökonomischen Paradigmen und der Entwicklung der umgebenden Substrukturen und der Wirtschaft. Dabei muss herausgestellt werden, dass insbesondere dann, wenn Hafenstadt und Hafen sehr eng beieinander liegen oder der Hafen sogar vollkommen vom Stadtgebiet umschlossen ist, infrastrukturelle Engpässe auftreten, da der Transport der steigenden Warenmengen in Kombination mit dem generellen Anstieg der privaten und öffentlichen Mobilität zu einer Überlastung der historisch als ausreichend dimensioniert angelegten Infrastruktur (insb. Straße und Schiene) führt (Hall, 2007).

2.1.3 Containerterminal

Seehafenterminals werden im Allgemeinen entsprechend der umgeschlagenen Güterarten oder deren Beförderungsart wie folgt eingeteilt (Brinkmann, 2005):

- Terminals für flüssige Massengüter
- Terminals für schüttbare Massengüter
- **Containerterminals**
- Terminals für Stückgüter
- Ro/Ro⁷-Terminals

Historisch hat die Einführung des Containers als standardisierter Ladungsträger (Containerisierung) die Gestaltung der logistischen Kette revolutioniert, da hierdurch eine ideale Anpassung der Organisation, Technologien und Prozesse auf den Containertransport erfolgen konnte (Nuhn, 2010). Nach dem heutigen Stand ist ein Containerterminal nach *Brinkmann* grundsätzlich in vier Funktionsbereiche unterteilt (vgl. Abbildung 3):

1. Umschlagsbereich zwischen Schiff und Terminal / Terminal und Schiff an der Kaye
2. Lagerplatz/Yard (Containerstau- oder Containerstapelfläche)

⁷ RoRo steht für „Roll-on-Roll-off“ – dies bedeutet, dass die Ladung, die die speziell konstruierte RoRo-Schiffsart transportiert, über Rampen direkt an Bord gerollt wird. Neben Baumaschinen und landwirtschaftlichen Maschinen werden so z.B. auch Sattelzüge, Sattelaufleger, LKW-Zugmaschinen, PKW und auch Schwergüter transportiert. Wenn die Ladung nicht selbstständig fahren kann, wird sie gezogen oder auf eine rollbare Plattform gestellt und so in das Schiff verladen. *Ro/Ro* ist somit ein Verfahren des Güterumschlags, bei dem die Güter selbstrollend oder rollbargemacht auf ein Schiff befördert werden.

3. Umschlagsbereich zwischen Terminal und Hinterlandverkehr

4. Packingbereich.

Im erstgenannten Bereich, dem *Umschlagsbereich zwischen Schiff und Terminal*, werden an der Kaje festgemachte Containerschiffe be- und entladen. Zur Bewältigung dieser Aufgabe werden in Häfen mit geringer Umschlagsleistung bordeigene Hebezeuge und in allen mittelgroßen und großen Containerterminals landseitig installierte Containerbrücken und -krane genutzt.

Der zweite Funktionsbereich (*Lagerplatz / Yard*) dient sowohl der Aufnahme von gelöschten und der Abgabe von zu verlandenden Containern als auch ihrer Lagerung. Die Container verbleiben teils einige Stunden, teils bis zu mehreren Wochen in diesem Bereich, wobei dem Versender nach Überschreiten einer vertraglich definierten Lagerzeit Zusatzkosten entstehen. Die Containerverweilzeit auf dem Terminal wird in der Fachsprache als *Dwell Time* bezeichnet.

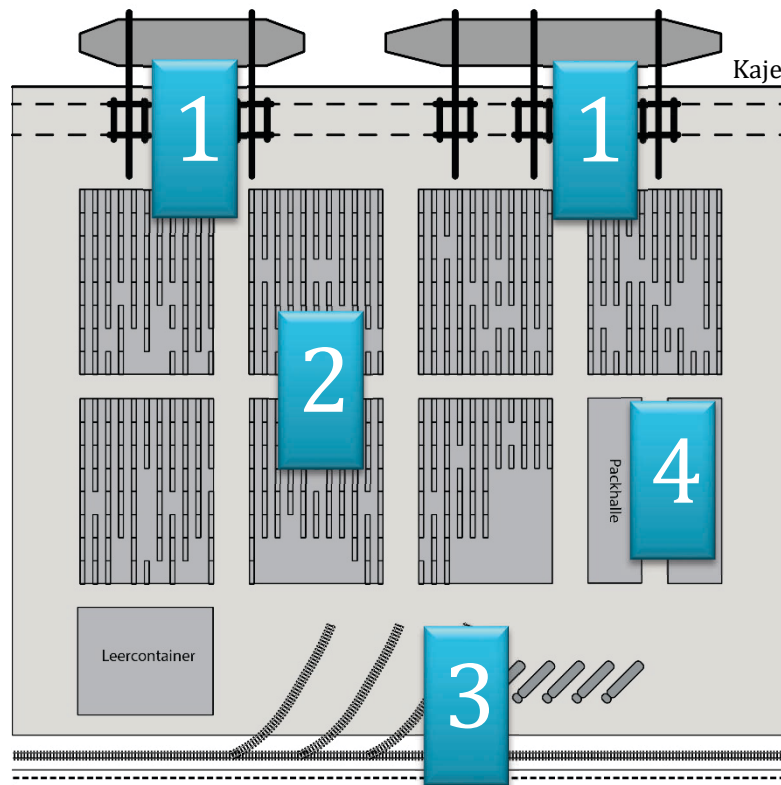


Abbildung 3: Schematischer Aufbau Containerterminal, (in Anlehnung an (Brinkmann, 2005))

Die Ausgestaltung des Containerlagerbereiches kann in *Block-, Flächen- oder Regallagern* erfolgen (siehe Abbildung 4). In einem Blocklager werden die Container in Stapeln und ohne Zwischenräume z.B. mit Portalkranen ein- und ausgelagert. In einem Flächenlager sind Verkehrswege zwischen den gestapelten Containern angelegt, so dass sie von Containerfahrzeugen direkt abgestellt und aufgenommen werden können. Bei der Regallagerart stehen entsprechend große Lagerregale zur Verfügung, in die die Container durch Vertikal- und Horizontalförderer ein- und ausgelagert werden.

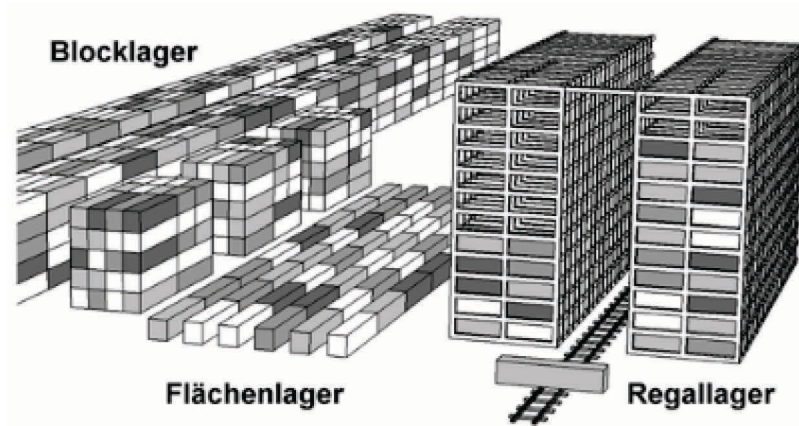


Abbildung 4: Containerlager: Blocklager, Flächenlager, Regallager (Brinkmann, 2005)

Bei der Regallagerung wird hierfür die geringste Fläche benötigt; zudem kommen keine Umstapelvorgänge vor, da jeder Container einen frei zugänglichen Lagerplatz hat. So können die meisten Container übereinander gelagert werden, die Installationskosten sind allerdings hoch. Das Blocklager benötigt für die Einlagerung einer bestimmten Anzahl Container weniger Platz als ein Flächenlager, da keine Fahrspuren bereitgehalten werden müssen und die Stapelhöhe im Blocklager, auf Grund der eingesetzten Lagertechnologien, höher ist als im Flächenlager. Es ist festzuhalten, dass der Aufwand von Umstapelvorgängen bei zunehmender Stapelhöhe steigt.

Die Gestaltung des dritten Funktionsbereiches eines Seehafens (*Umschlagsbereich Terminal / Hinterland*) geht mit der vorherrschenden Art der Hinterlandanbindung einher. LKW-Stationen, innerhalb derer die LKW mit den auf dem Terminal genutzten Fahrzeugen beladen werden, werden häufig in den Lagerbereich integriert oder örtlich direkt angeschlossen, um möglichst kurze Fahrwege für die Terminalfahrzeuge erforderlich zu machen. Eine Bahnverladung findet hingegen zumeist außerhalb des Lagerbereiches statt, wobei die Be- und Entladung meistens mit Portalkränen auf sog. Vorstellgleise⁸ erfolgt.

Im vierten Bereich (*Packingbereich*), der nicht zwingend auf jedem Containerterminal zu finden ist, werden als Dienstleistung Waren aus Containern entladen oder in Container geladen. Diese Dienstleistung kann erforderlich sein, wenn Ladungsmengen gesplittet (LCL) und Teilladungen zum Weitertransport übergeben werden müssen. An einigen Häfen sind auch Möglichkeiten zur Anlieferung von losen Gütern, die erst am Containerterminal im Packing-Bereich containerisiert werden, zu finden.

2.1.4 Grundlagen Standard-Überseecontainer

Ein Container ist laut DUDEN ein „der rationelleren und leichteren Beförderung dienender [quaderförmiger] großer Behälter [in standardisierter Größe]“ und findet zum Transport von

⁸ Als Vorstellgleis werden Gleisgruppen in terminalnähe oder auf dem Terminalgelände bezeichnet, auf denen die Zugchassis zur Beladung abgestellt werden. Oft sind ganze Züge auf Vorstellgleisen abstellbar. Zum Abfahrtszeitpunkt wird der Triebwagen angekoppelt und muss demnach nicht während der Beladezeit freigestellt werden.

Gütern Verwendung. Sowohl in der DIN 668 (DIN ISO 668, 2013) mit dem Titel "Serie 1 Frachtcontainer – Klassifizierung, Abmessungen und Gesamtgewichte" als auch in der DIN 830 (DIN ISO 830, 1999): "ISO-Container - Terminologie" werden Container wie folgt definiert:

Container: Transportbehälter, der

- von dauerhafter Beschaffenheit ist und daher genügend widerstandsfähig für den wiederholten Gebrauch ist,
- besonders dafür gebaut ist, den Transport von Gütern mit einem oder mehreren Transportmitteln ohne Umpacken der Ladung zu ermöglichen,
- für den mechanischen Umschlag geeignet ist,
- so gebaut ist, dass er leicht be- und entladen werden kann,
- einen Rauminhalt von mindestens 1 m³ hat.
- Fahrzeuge und Verpackungen sind keine Container.

Container werden in erster Linie nach ihrer Größe differenziert. Als *Kleincontainer* werden Container mit einem Rauminhalt zwischen einem und drei Kubikmetern bezeichnet. Ihr Ladegewicht beträgt ca. 1000 kg. Kleincontainer sind oft geschlossen, kranbar⁹ und mit vier Rollen und einer Deichsel versehen; sie werden für empfindliche Güter eingesetzt oder für Güter, die als Einzelstücke eine teure Versandverpackung benötigen (wie beispielsweise Elektroartikel, Arzneimittel, Porzellan, etc.).

Mittelcontainer weisen einen Rauminhalt von mehr als 3 m³ und eine Länge von weniger als 6 m auf. Die Behälter besitzen ein maximales Volumen von bis zu 10,5 m³, eine Lastgrenze von 6 t und ein Eigengewicht von ca. einer Tonne.

Container mit einem Rauminhalt von mehr als 3 m³ und einer Länge von mindestens 6 m werden als *Großcontainer* bezeichnet. Zu den Großcontainern gehören u.a. die folgenden Ladeeinheiten:

- Großcontainern finden international Verwendung und werden nach *DIN ISO 668* bevorzugt in den Längenabmessungen 10, 20 und 40 Fuß eingesetzt. Die Großcontainer, die den Vorschriften der ISO-Richtlinie entsprechen, tragen die Bezeichnung ISO- oder Überseecontainer. Diejenigen Container, die sich sowohl nach den europäischen Normen als auch nach Merkblättern der UIC¹⁰ und den Vorgaben der DIN 15190 (DIN ISO 15190, 1994) richten, werden als Binnencontainer bezeichnet. Im Gegensatz zum Überseecontainer, bei dem die Bemaßung in Fuß (') erfolgt, wird beim Binnencontainer in Millimeter (mm) bemaßt.
- Wechselbehälter (auch Wechselaufbau, Wechselbrücke, Wechselpritsche, Wechselkoffer) zählen ebenfalls zu den Großcontainern. Sie können genauso wie ein Container vom Fahrzeug getrennt werden, sind aber im Gegensatz zum Überseecontainer zumeist nicht stapelbar. Wechselbehälter werden insbesondere im Straßengüterverkehr verwendet; Wechselbrücken verfügen teilweise über systemzugehörige, ausklappbare Stehhilfen, so

⁹ „Kranbar“ bedeutet, dass ein Gegenstand mit einem Kran angehoben und transportiert werden kann. Hierfür sind z.T. bereits Werksseitig entsprechende Anschlagsvorrichtungen zum Anbringen eines Krangeschirrs angebracht.

¹⁰ Union Internationale des Chemins de fer (Normung bei europäischen Eisenbahnen)

dass das Zugfahrzeug mit Auflieger oder ein Chassis ohne weitere Hilfe unter einer aufgeständerten Wechselbrücke platzieren und diese aufnehmen kann und umgekehrt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Außen- und Innenabmessungen sowie das Eigengewicht und das maximal zulässige Gesamtgewicht der verschiedenen Containertypen ablesbar. Die unterschiedlichen Containertypen sind mit einer Buchstabenkennung gekennzeichnet (Spalte: Typ). Binnencontainer sind mit B und Überseecontainer sind mit 1A bis 1D bezeichnet. Die gängigsten Containergrößen sind der 20 Fuß-Container (1C) und der 40 Fuß-Container (1A). Standard-Überseecontainer weisen zumeist eine Außenhöhe von 8' 6" (2591 mm) auf. Alle Container, die diese Höhe übersteigen, werden mit dem Ausdruck „High-Cube-Container“ versehen (1AA bzw. 1CC).

Typ	Außenabmessungen			Innenabmessungen			Zulässiges Gesamtgewicht [kg]	Eigengewicht [kg]
	Länge [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]		
1A	12.192	2.438	2.438	11.998	2.330	2.197	30.480	ca. 3.200
1AA	12.192	2.438	2.591	11.998	2.330	2.350	30.480	ca. 3.600
1B	9.125	2.438	2.438	8.931	2.330	2.197	25.400	ca. 2.500
1BB	9.125	2.438	2.591	8.931	2.330	2.350	25.400	ca. 2.800
1C	6.058	2.438	2.438	5.867	2.330	2.197	24.000	ca. 2.200
1CC	6.058	2.438	2.591	5.867	2.330	2.350	24.000	ca. 2.400
1D	2.991	2.438	2.438	2.802	2.330	2.197	10.1620	ca. 1.800
B12	12.192	2.500	2.600	12.000	2.440	2.260	30.480	ca. 3.600
B9	9.14	2.500	2.600	8.931	2.440	2.260	25.400	ca. 3.300
B7	7.150	2.500	2.600	7.028	2.440	2.260	16.000	ca. 3.000
B6	6.058	2.500	2.600	5.900	2.440	2.260	24.000	ca. 2.500

Tabelle 1: Hauptdaten für Großcontainer (e.D. in Anlehnung an (Baumgarten & Ihde, 1994))

Ein großer *Vorteil der Überseecontainer* ist die bis zu 9-fache Stapelmöglichkeit von Containern, wohingegen im Binnenverkehr nur eine 3-fache Stapelung der Binnencontainer möglich ist. Ein Nachteil der festgelegten Abmessungen der Überseecontainer ist das nicht abgestimmte Innenmaß auf das Europalettenmaß¹¹. Vergleicht man einen 20'-ISO-Container (1C) mit einer maximalen Innenweite von 2,33 m mit einem B6-Binnencontainer mit einer Innenweite von

¹¹ Europalette (DIN-Palette) mit den Abmessungen 1200 × 800 × 150 mm (L × B × H)

2,44m, so stellt man fest, dass die Auslastung der Fläche bei der Beladung mit palettierter Ware beim ISO-Container nur 79 Prozent (11 Europaletten) und beim Binnencontainer 93 Prozent (14 Europaletten) beträgt.

Die auf den Container wirkenden Kräfte werden entsprechend der *Konstruktion* der Überseecontainer durch eine tragende Stahlrahmenkonstruktion aufgenommen (siehe Abbildung 5); diese bildet das Grundgerüst des Containers und besteht aus vier Eckpfosten sowie je zwei Boden- und Seitenlängsträgern und je zwei Boden- und Dachquerträgern. Die Seitenwände der in der Standardbauart gebauten Überseecontainer werden in gesicktem Stahlblech ausgeführt und sind mit der Dach- und Bodenkonstruktion verschweißt. Die Seiten- sowie die Stirnwände und das Dach sind die am wenigsten belasteten Teile (Deutsche Transportversicherer, 2016). An allen Ecken der Container sind sogenannte Corner Castings angebracht; zudem verfügen die Container über Gabeltaschen, in die zum Transport die Gabeln von Flurförderzeugen eingebracht werden können. Die Bezeichnungen der verschiedenen Elemente eines Standardcontainers sind in Abbildung 5 dargestellt.

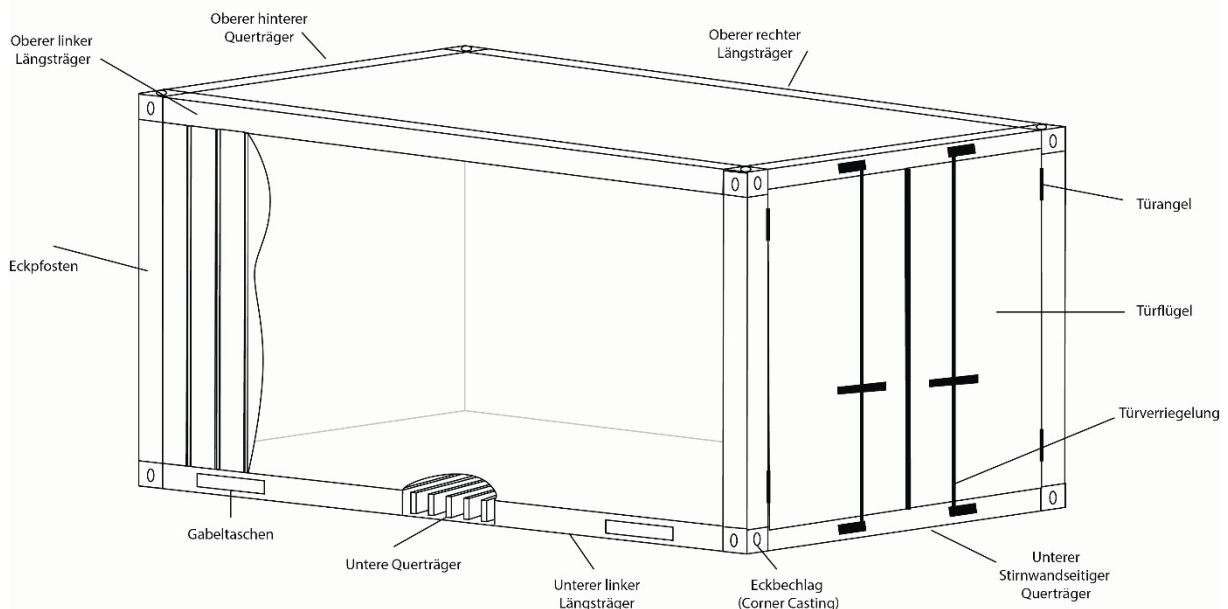


Abbildung 5: Aufbau eines ISO-Containers (e.D. in Anlehnung an (Arnold, et al., 2008))

Neben der allseitig geschlossenen Standardausführung gibt es Ladeeinheiten, die sich an der gleichen Maßhaltigkeit orientieren, dabei aber an die spezifischen Erfordernisse des Transports bestimmter Waren angepasst sind: bspw. Open-Side Container, Open-Top Container, Schüttgutcontainer (Bulkcontainer), Thermalcontainer, Tankcontainer (DIN ISO 6346, 1996).

Neben den Hauptabmessungen sind die Abmessungen und die Lage der acht Eckbeschläge (engl.: *Corner Castings*, corner fittings), die zum Verladen, Umschlagen, Transportieren und Stapeln dienen, genormt. Dabei können während des Seetransportes zur Sicherung der Container alle Corner Castings untereinander Kräfte aufnehmen, wohingegen beim Transport auf Trailern ausschließlich die unteren und beim Anheben des Containers durch Krane ausschließlich die oberen Corner Castings genutzt werden. Die Verankerung von Containern untereinander oder mit einer Trägervorrichtung erfolgt durch eine formschlüssige Verbindung mittels *Twist Locks*

(Drehzapfen). Diese werden in die in den Corner Castings befindlichen Langlöcher eingeführt und dort automatisch oder manuell zur Verriegelung mittels mechanischer oder hydraulischer Kraft um 90° manuell oder automatisch verdreht (siehe Abbildung 6).

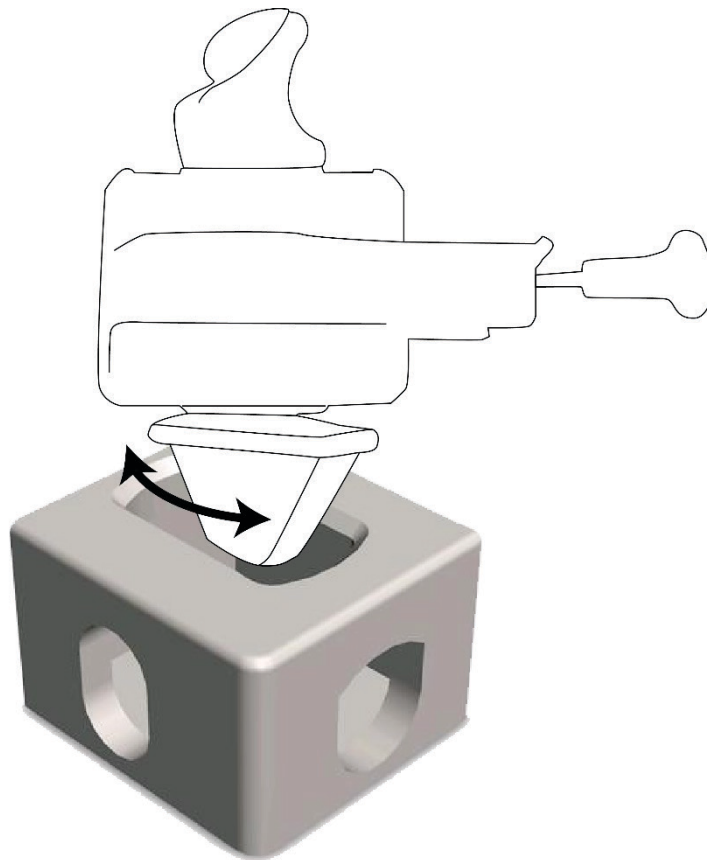


Abbildung 6: Prinzipskizze der Verriegelung eines Twist Locks in einem Corner Casting

Zum Umschlagen eines Containers kommt häufig eine spezielle Trägervorrichtung zum Einsatz: der sogenannte *Spreader* (siehe Abbildung 7). Ein Spreader ist gemäß DUDEN als ein „Tragrahmen für Container an Hebezeugen“ definiert. Es gibt ihn in starrer Ausführung in den gängigen Containergrößen oder auch variabel einstellbar. Der Spreader kommt an den unterschiedlichen technischen Systemen zum Einsatz, die einen Container anheben oder transportieren und ist mit mindestens vier Twist Locks bestückt.

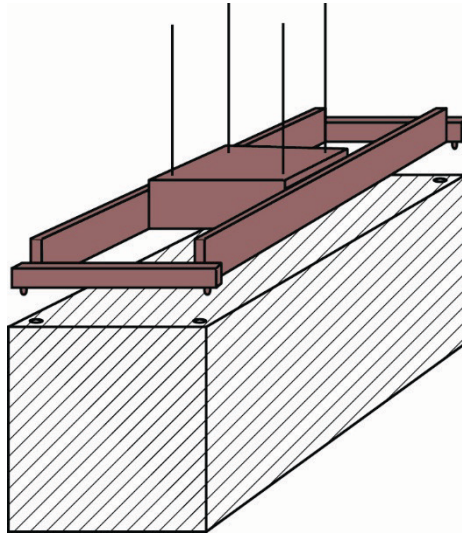
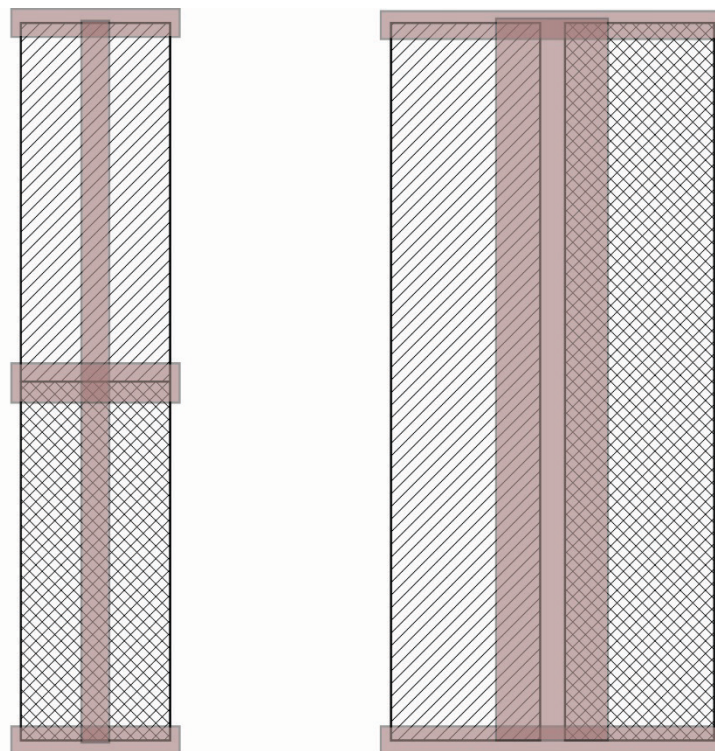


Abbildung 7: Prinzipskizze eines Topspreaders

Um unterschiedliche Containergrößen greifen zu können, sind einige Spreader mit teleskopierbaren Tragarmen ausgerüstet. Weiterhin gibt es Systeme, die zur schnellen Be- und Entladung im Twinbetrieb (Twin-Lift) arbeiten, wobei eine simultane Aufnahme von zwei 20'-Containern hintereinander realisierbar ist. Eine gleichzeitige Aufnahme von zwei 40'-Containern nebeneinander wird als Tandem-Lift bezeichnet (vgl. Abbildung 8). Auch die zeitgleiche Aufnahme von drei und vier Containern ist bereits konzeptionell beschrieben. Das Gewicht des Spreaders beträgt je nach Ausführung ca. 1,5 bis 10,5t.



Twin-Lift von zwei 20ft. Containern

Tandem-Lift von zwei 40ft. Containern

Abbildung 8: Spreader für die Aufnahme von mehreren Containern zeitgleich

Neben dem Topspreader gibt es auch den Seiten- und den Front-/Stirnwandspreader. Während mit einem Topspreader die Containeraufnahme von oben erfolgt, findet der Greifvorgang mit einem Seitenspreader auf der Längsseite eines Containers und mit einem Frontspreader an der Stirnseite statt. Im Gegensatz zum Topspreader, mit dem beladene Container umgeschlagen werden können, werden mit den Seiten- und dem Frontspreader ausschließlich leere Container befördert.

Weiterhin kann beim Umschlag von Container auch eine sogenannte *Containertraverse* verwendet werden. Dabei werden Haken in die Corner Castings eingebracht, an denen Ketten befestigt sind, die mittels Kranhaken oder -balken angepickt werden können. Diese Art der Lastaufnahme ist ohne menschlichen Einsatz beim Einbringen der Haken nicht zu gewährleisten und für stark frequentierte, automatisierte Umschlagsprozesse demzufolge nicht effizient einsetzbar. Dieses System bietet aber eine hohe Flexibilität, da an die Ketten auch andere Güter zum Transport angeschlagen werden können.

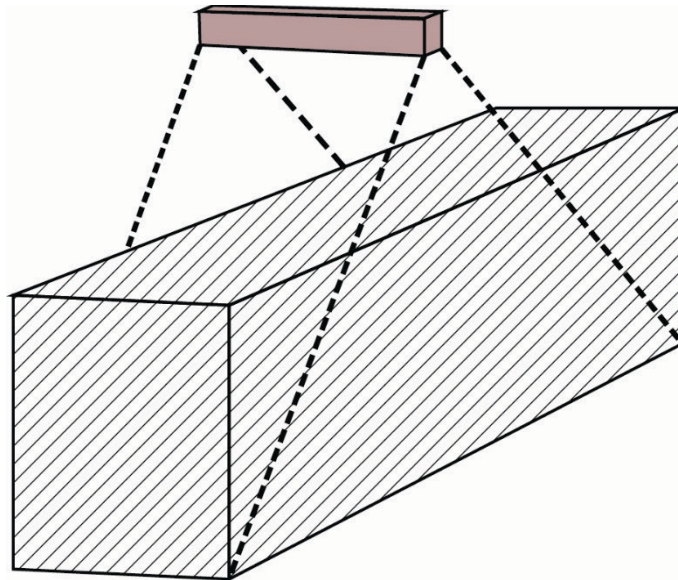


Abbildung 9: Containertraverse

2.1.5 Gängige Containertransportsysteme

Die am Terminal für den Containertransport eingesetzten Betriebsmittel werden nach ihrem Einsatz für den Vertikal- oder Horizontalumschlag unterschieden. Dabei sind Betriebsmittel für den Transport in vertikaler Richtung meist als stationäre oder mobile Kranstrukturen ausgelegt, wohingegen horizontale Transporte meist per Flurfördermittel realisiert werden. Nachfolgend wird auf die gängigen Transportsysteme für den Horizontaltransport von Containern eingegangen. Hierfür kommen nach *Brinkmann* grundsätzlich folgende Systeme zum Einsatz (Brinkmann, 2005):

- Horizontaltransporte im Terminal
 - Portalhubwagen (Straddle-Carrier / Van Carrier)
 - Containerstapler
 - Auslegerstapler / Reach-Stacker
 - Shuttle Carrier

- Zugmaschinen mit Chassis / Rolltrailer
- Zugmaschinen mit Anhänger / Multitrailer (MTT¹²)
- fahrerlose Tieflader (AGV)

Zusätzlich zu den Containerfahrzeugen für den Horizontalverkehr werden insbesondere im Lagerbereich, bei der Verladung am LKW und im Bahnverladebereich zusätzlich gummibereifte Stapelkrane (Rubber-Tyred-Gantry-Cranes, RTG) sowie schienengebundene Stapelkrane (Rail-Mounted-Gantry-Cranes, RMG) und Automated Stacking Cranes (ASC) eingesetzt, die durch eine Kombination mit anderen Containerfahrzeugen an die vor- und nachgelagerten Terminalprozesse angeschlossen werden.

Im Folgenden werden die verschiedenen Containertransportmittel und ihre Anwendungsbereiche näher beschrieben: (a) Van Carrier / Shuttle Carrier, (b) Reach Stacker / Containerstapler, (c) Multitrailer-Trains / Zugmaschinen mit Chassis oder Anhängern, (d) Automated Guided Vehicles, (e) Rubber Tyred Gantrycranes, (f) Rail Mounted Gantrycranes und (g) Automated Stacking Cranes.

(a) Van Carrier

Van Carrier (VC), auch Straddle Carrier (SC), Portalhubwagen oder Portalstapelwagen genannt, werden sehr häufig auf Containerterminals in Europa eingesetzt. Der Einsatzbereich der VC ist vielfältig: sie werden für das Stapeln und Verfahren von Containern sowie für das Be- und Entladen von Transportmitteln, wie z.B. LKW, eingesetzt. Gegenüber anderen Flurförderzeugen sind sie flexibler und können zeitgleich eine hohe Anzahl an Containerbewegungen ausführen. Die Container werden von diesen Systemen an den oberen Corner-Castings aufgenommen; dies kann automatisiert erfolgen. Dabei kann der Container direkt auf dem Boden stehend aufgenommen und abgestellt werden und je nach technischer Ausführung des VC bis zu vier Container durch den VC übereinandergestapelt werden (1-über-3). Sie sind sowohl für die Abfuhr und Zufuhr an der Kaje als auch im Containerlager und im Bereich zwischen dem Lager und den Hinterlandverkehren zur LKW-Beladung einsetzbar und damit sehr vielseitig. Für die Bahnbeladung kommen sie eher nicht zum Einsatz, da sie den Beladepunkt überfahren müssen. Allerdings sind sie in der Anschaffung und im Unterhalt (Wartungs- und Energiekosten) im Gegensatz zu anderen Systemen kostenintensiv. Bei längeren Fahrwegen sind sie nicht wirtschaftlich einsetzbar, da sie geringere Höchstgeschwindigkeiten haben und hohe Energiekosten aufweisen.

Containertransportperformance¹³: für kurze und mittlere Strecken effizient, hohe Flexibilität

Lagerkapazität: 450-500 TEU pro Hektar

¹² MTT: Multitrailer-Train

¹³ Die *Containertransportperformance* ist eine vom Autor bereitgestellte Kennung und soll einen ersten Überblick über Stärken und Schwächen unter dem Fokus der vorliegenden Arbeit vermitteln.

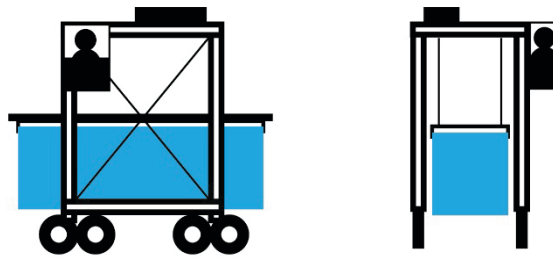


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Van Carrier

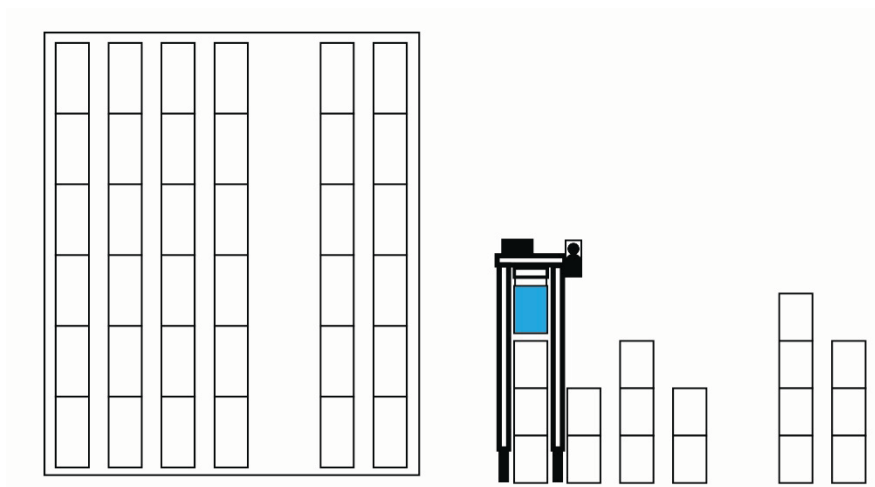


Abbildung 11: Containerlager unter Verwendung eines Van Carrier-System (Drauf- und Seitenansicht)

Automated Guided Straddle Carrier (AGSC) weisen eine Produktivitätssteigerung gegenüber SC und AGVs auf. Sie arbeiten fahrerlos und sind somit in der Lage, die Container selbstständig an einer beliebigen Stelle aufzunehmen oder abzusetzen und finden ihren Fahrweg bspw. durch Induktion. Die Flexibilität der AGSC ist bei starren Navigationssystemen geringer als bei manuell betriebenen SC. Es müssen bei AGSC hohe Sicherheitsanforderungen bedacht werden, da sehr große und schwere Güter transportiert werden. Geteilte Arbeitsbereiche (Mensch / Maschine) sind daher eher nicht üblich.

Shuttle-Carrier sind eine kostengünstigere Alternative zu den Straddle-Carriern. Sie sind schneller und leichter und können genauso für den Transport von Containern auf dem Terminal sowie für die Beladung von Transportmitteln eingesetzt werden. Der Nachteil ist jedoch, dass sie lediglich bis zu 1-über-1 stapeln können.

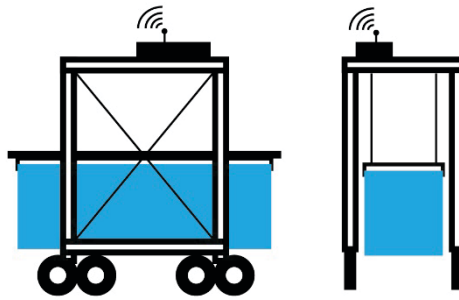


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Automated Shuttle Carriers

(b) Containerstapler

Diese Fahrzeuge funktionieren prinzipiell wie Gabelstapler. Sie werden für das Stapeln und Verfahren von leeren Containern sowie für das Be- und Entladen von Transportmitteln (Hinterlandverkehre) eingesetzt. Der Containerstapler ist gegenüber dem Straddle-Carrier bei geringen Umschlagszahlen vorzuziehen. Im Vergleich mit dem Reach Stacker kann der Containerstapler Leercontainer höher stapeln. Des Weiteren erreichen Containerstapler eine hohe Umschlagsleistung durch schnelle Lastaufnahme, Wendigkeit und Flexibilität. Jedoch sind auch sie bei längeren Transportwegen unrentabel. Zusätzlich benötigen sie durch den Quertransport der Container breite Fahrwege (im platzoptimierten Lagerbereich nachteilig).

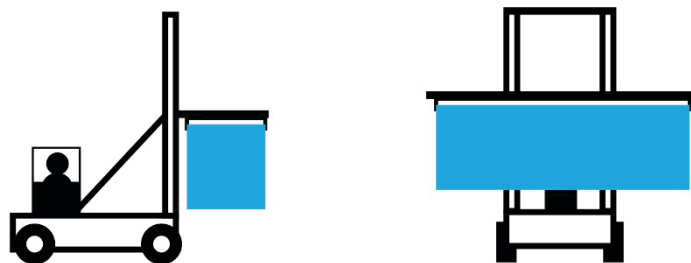


Abbildung 13: Schematische Darstellung eines Containerstaplers

Reach Stacker (RS) haben weitestgehend die gleichen Eigenschaften wie Containerstapler (außer Stapelhöhe Leercontainer). Sie können leere Container in bis zu vier Reihen hintereinander und bis zu fünf Container übereinanderstapeln, da der Spreader (Lastaufnahmemittel) nicht an einem vertikalen Hubgerüst montiert ist, sondern am Ende eines schrägen, teleskopierbaren Armes. Die Aufnahme der Container erfolgt an den oberen Corner Castings. Gegenüber dem Containerstapler ist der Reach Stacker in der Lage den Spreader inkl. Container um die vertikale Achse zu verdrehen und kommt damit mit engeren Fahrwegen aus. Da die RS die Containerreihen seitlich anfahren müssen, bedürfen sie allerdings breiterer Fahrwege zwischen den Containerreihen, als VC, die konstruktionsbedingt über die Containerstapelreihen fahren können. RS werden häufig in Kombination mit z.B. Zugmaschinen/Chassis eingesetzt. Für größere Fahrwege ist der RS

unrentabel aber RS werden insbesondere in Terminals mit geringen Umschlagsleistungen oder großen Flexibilitätsanforderungen effizient eingesetzt.

Containertransportperformance: für kurze Strecken und geringere Umschlagszahlen effizient, hohe Flexibilität

Lagerkapazität: 350-400 TEU pro Hektar, 950-1000 TEU pro Hektar (Leercontainer)

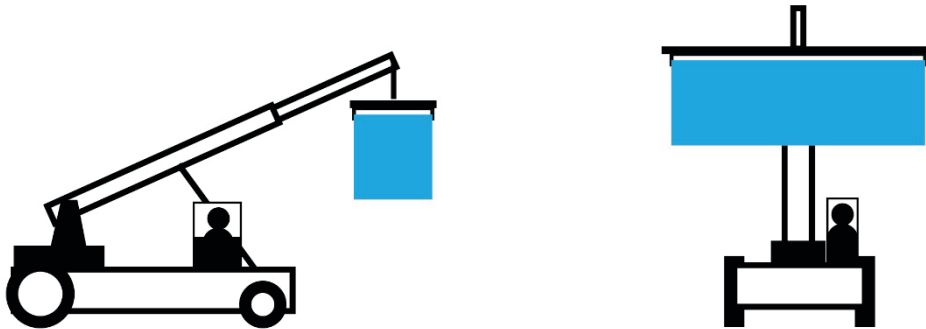


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Reach Stackers (RS)

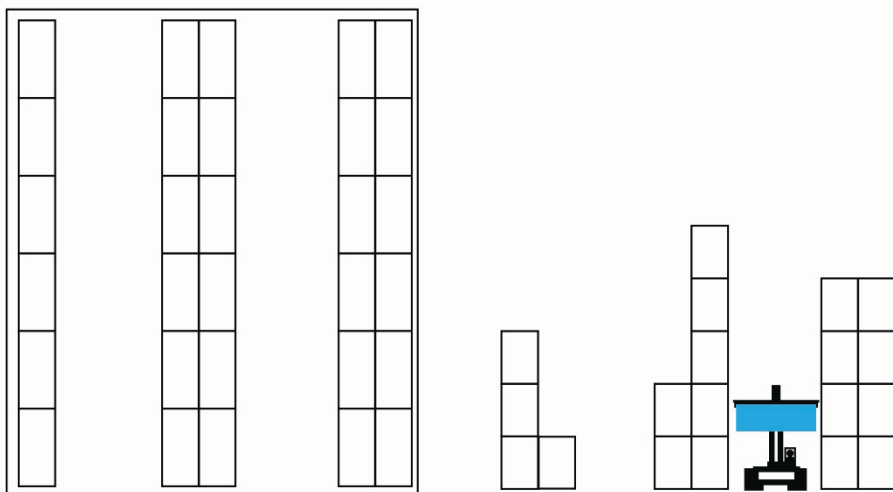


Abbildung 15: Containerlager unter Verwendung eines Reach Stacker-Systems (Drauf- und Seitenansicht)

(c) Zugmaschine mit Auflieger / Rolltrailer

Zugmaschinen (ZM) mit Auflieger sind spezielle Sattelzugmaschinen, die für den Horizontaltransport von Containern (ein oder zwei TEU) auf dem Terminal eingesetzt werden. Ein Auflieger ist dabei ein Fahrgestell das auf der ZM aufgelegt wird und auf dem ein/zwei Container (max. 2 TEU) abgesetzt werden kann. Die Aufnahme- und Absetzvorgänge des Aufliegers können vom Fahrer ohne Verlassen des Fahrzeugs vorgenommen werden. Im Vergleich zu den Straddle-Carriern können auch über längere Strecken höhere Fahrtgeschwindigkeiten erreicht werden. Zudem haben sie geringere Anschaffungs- und Wartungskosten. Allerdings

werden zusätzliche Geräte für das Be- und Entladen von Containern vom bzw. auf das Chassis benötigt.

Der **Trailerzug**, auch **Multitrailer Train** (MTT) genannt, stellt eine Erweiterung des Systems Zugmaschine mit Auflieger dar. Es können bis zu drei Chassis angehängt werden, so dass ein Transport von bis zu 8 TEU gleichzeitig möglich ist. Allerdings können auch hiermit die Container nicht selbstständig be- und entladen werden. Darüber hinaus sind die Trailerzüge auf Grund ihrer Länge schwer zu manövrieren, so dass breite Fahrstraßen benötigt werden. Auf öffentlichen Straßen sind derartige Züge nicht zulässig.

Containertransportperformance: für mittlere und größere Strecken effizient, Transport von gleichzeitig bis zu 8 TEU

Lagerkapazität: System ist nur für eine kurzfristige Lagerung ausgelegt

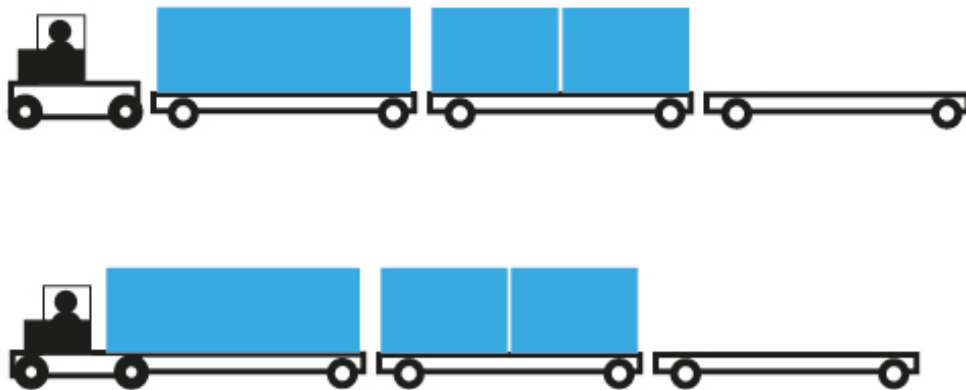


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines MTT : Zugmaschine mit Chassis und Zugmaschine mit Auflieger und zwei Chassis

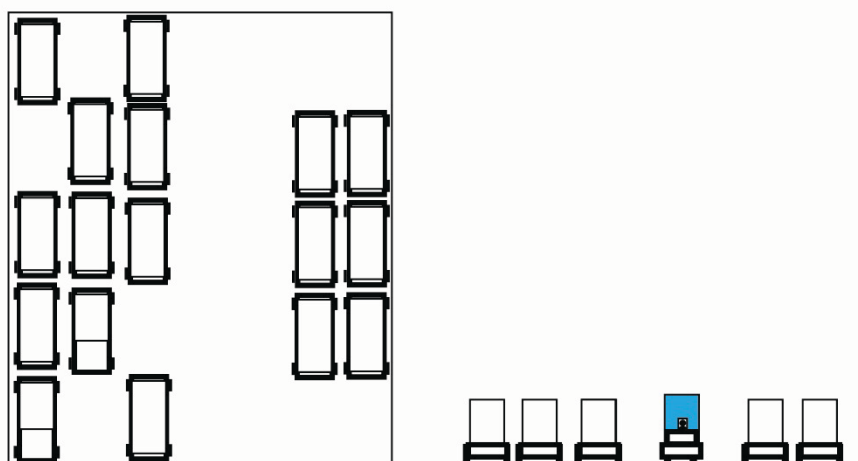


Abbildung 17: Containerlager unter Verwendung eines Chassis-System (Drauf- und Seitenansicht)

LKW-Chassis werden für den Weitertransport der Container ins Hinterland, als Transportfahrzeuge für Container im Ro/Ro-Verkehr sowie als Zwischenlager für Container auf dem Terminal eingesetzt. Im Vergleich zu den Straddle-Carriern weisen sie deutlich geringere

Anschaffungs- und Unterhaltungskosten auf. Weiterhin bieten sie den Vorteil, dass bei der Nutzung als Zwischenlager keine Umschlagsgeräte notwendig sind. Für das Verfahren eines jeden Chassis ist eine Zugmaschine erforderlich.

(d) Automated Guided Vehicle (AGV)

AGV arbeiten automatisiert oder vollständig autonom und reduzieren damit die Personal- und dadurch auch die Betriebskosten. Zur fahrerlosen Navigation gibt es unterschiedliche Technologien: bspw. werden Magnetschleifen oder Transponder im Boden installiert. Der Einsatzbereich ist auf den Transport von Containern zwischen Containerbrücke und Yard sowie ggf. dem Yard und einer automatisierten Übernahmestation für den Hinterlandverkehr eingeschränkt. Obwohl durch den Einsatz von AGVs ein großer Fortschritt beim Horizontaltransport erzielt wurde, sind auch hier Nachteile zu nennen: Die AGVs fahren mit einer relativ niedrigen Geschwindigkeit, so dass dadurch eine hohe Anzahl von Fahrzeugen vorgehalten werden muss. Außerdem sind erhöhte Sicherheitsanforderungen notwendig; Bereiche, in denen AGV verkehren sind zumeist im Betrieb für das Betreten durch Menschen gesperrt. Für die Be- und Entladung der Container an der Kaje kann die Containerbrücke eingesetzt werden; im Lagerbereich müssen zusätzliche Fahrzeuge oder Systeme eingesetzt werden, da das System nicht in der Lage ist, selbstständig Container aufzunehmen und abzugeben. Der Einsatz einer AGV-Flotte bedarf eines passenden Sicherheitskonzepts und kann je nach Ausgestaltung zu sehr komplexen IT-Systemen führen.

Containertransportperformance: für mittlere und lange Strecken effizient, fahrweggebunden

Lagerkapazität: System ist nicht direkt für die Arbeit im Containerlager nutzbar



Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Automated Guided Vehicles

(e) Rubber Tyred Gantrycrane (RTG)

Ins Deutsche übersetzt bedeutet Rubber Tyred Gantrycrane: gummibereifte Stapelkrane. Diese Lagerkrane werden insbesondere bei der Aus- und Einlagerung von Containern in Blocklager genutzt. Die RTG können mehrere Containerreihen überspannen. Für den horizontalen Transport der Container zwischen Kaje und Yard werden in derartigen Systemen zusätzliche Transportsysteme, wie z.B. Zugmaschinen/Chassis benötigt. Da die RTG ein weites Feld überspannen können, ist die erreichbare Lagerkapazität sehr hoch, jedoch kann die Notwendigkeit von Umstapelvorgängen negative Auswirkungen auf die Produktivität haben. Im Vergleich zu RMG weisen RTG eine geringere Stabilität auf.

Containertransportperformance: nicht für längere horizontale Transportvorgänge nutzbar

Lagerkapazität: 750-800 TEU pro Hektar

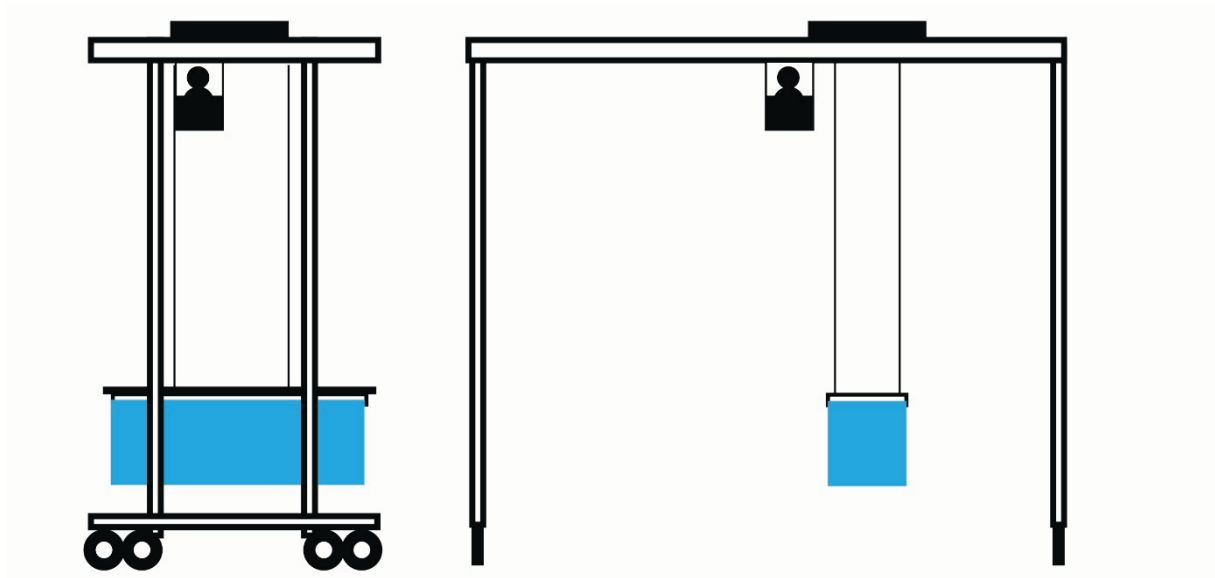


Abbildung 19: Schematische Darstellung eines Rubber Tired Gantrycranes

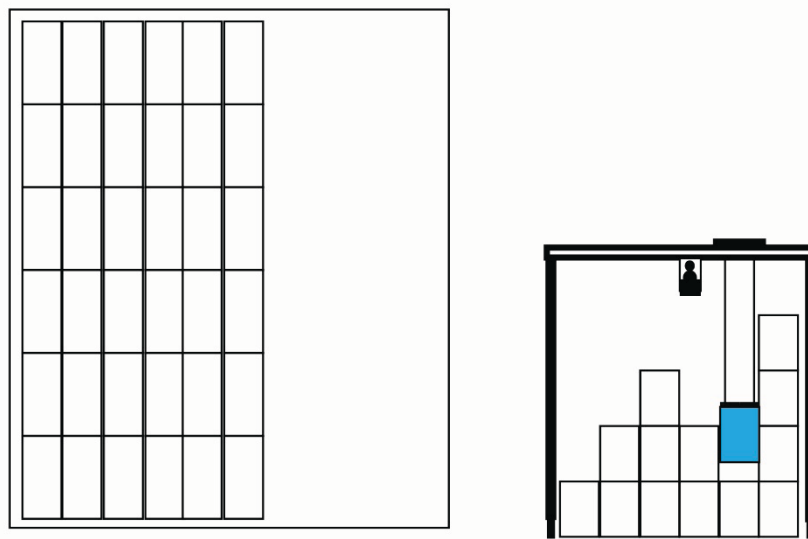


Abbildung 20: Containerlager unter Verwendung eines Rubber Tired Gantrycrane-System (Drauf- und Seitenansicht)

(f) Rail Mounted Gantrycrane (RMG)

Diese Systeme kommen ebenfalls insbesondere in Blocklagern zum Einsatz; auch sie können mehrere Containerreihen überspannen. Die Antriebe werden elektrisch, meist über Leitungstrossen, versorgt. Damit arbeiten diese Krane energieeffizienter als die RTG (dieselelektrische- oder Dieselantriebe) und können auf Grund der Schienenführung schneller verfahren. Ebenso wie die RTG- müssen auch RMG-Systeme mit Zusatzsystemen, wie z.B. MTT-Systemen, ergänzt und an den seehafenseitigen und teilweise auch hinterlandseitigen Umschlag

angeschlossen werden. Da die RMG im Vergleich zu den RTG eine größere Stabilität aufweisen, können sie in der Breite größere Dimensionen erreichen und sogar über die äußeren Elemente hinausgehend Containerreihen oder LKW- und Zugbeladungsleise bedienen.

Containertransportperformance: nicht für längere horizontale Transportvorgänge nutzbar

Lagerkapazität: 1000 TEU pro Hektar

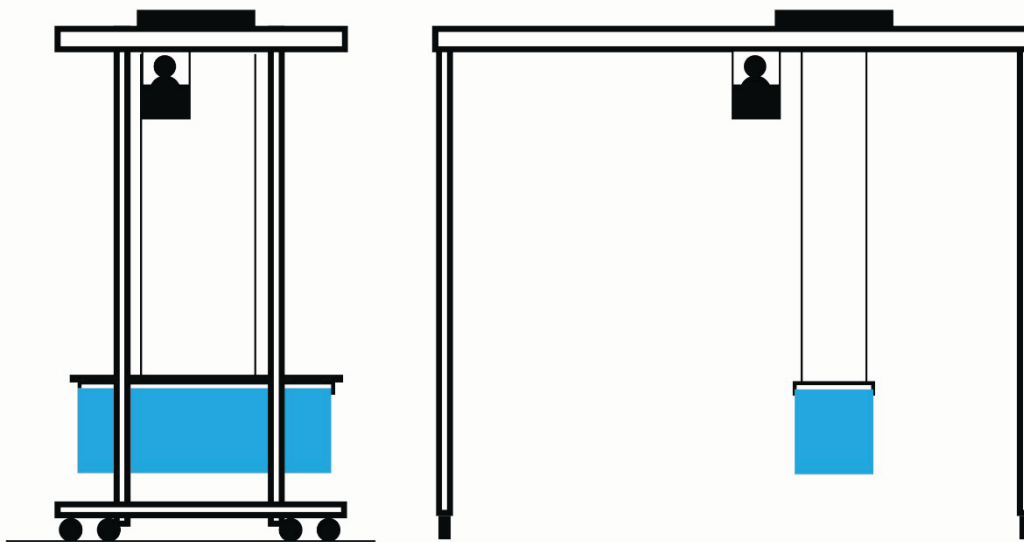


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Rail Mounted Gantrycranes

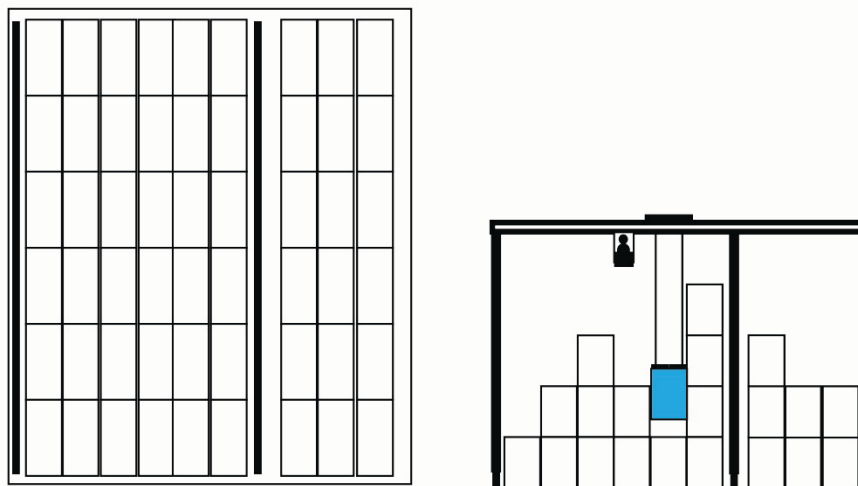


Abbildung 22: Containerlager unter Verwendung eines Rail Mounted Gantrycrane-System (Drauf- und Seitenansicht)

(g) Automatisierte Stapelkrane (ASC)

Automatisierte Stapelkrane (ASC - aus dem engl. Automated Stacking Crane) arbeiten wie große Portalroboter, die auf starren Führungsschienen laufen und für die autonom erfolgende Ein- und Auslagerung von Containern in Blocklagern eingesetzt werden. Die Container können durch die ASC vom Boden oder von Containerfahrzeugen / LKW aufgenommen und auf derartige Fahrzeuge

oder auf andere Container abgestellt werden. Die Container werden an den oberen Corner Castings angepickt. ASC können bis zu 12 Containerreihen überspannen und bis zu fünf Container übereinander stapeln, wobei dann Umstapelvorgänge notwendig werden können (Terex Germany GmbH & Co KG, 2016).

Containertransportperformance: nicht für längere horizontale Transportvorgänge nutzbar

Lagerkapazität: ca. 1000 TEU pro Hektar

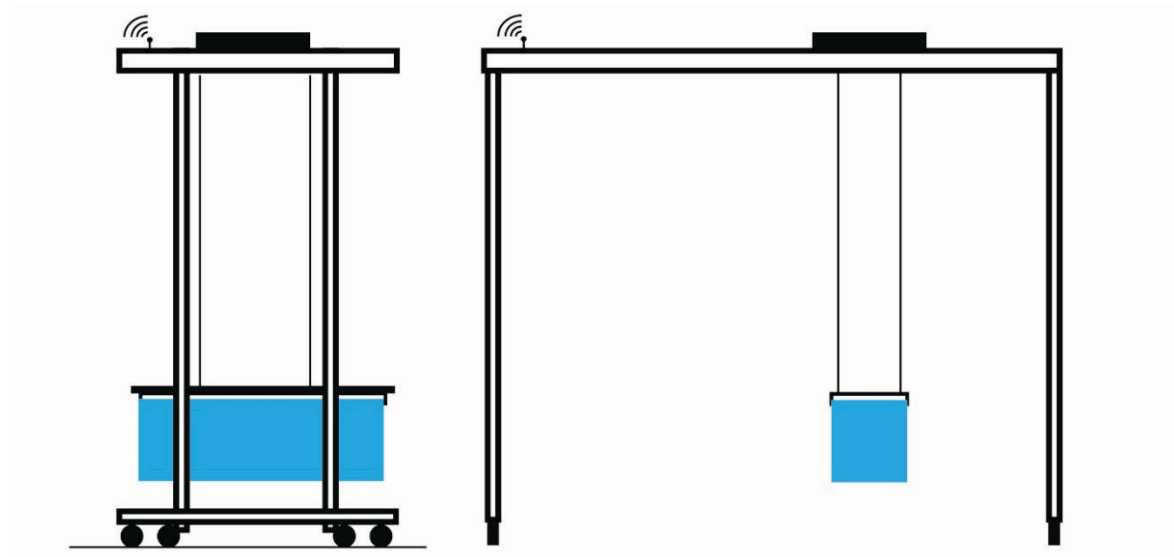


Abbildung 23: Schematische Darstellung eines Automatisierten Stapelkrans

Zusammenfassung der Einsatzmöglichkeiten konventioneller Containertransportsysteme

Die Auswahl der für den Transport zwischen der Kaje, dem Lager und den Anschlussmodalitäten (LKW, Binnenschiff, Bahn) eingesetzten Containertransportsysteme erfolgt für die Planung der technischen Logistik der Terminals auf der Basis verschiedener Rahmenbedingungen. Hierzu zählen benötigte Lagerkapazität, zur Verfügung stehende Landfläche, Schiffsgrößen, Kostengefüge (u.a. Lohnkosten), die gewünschte Flexibilität der Systeme, Umweltbedingungen (z.B. Wind-, Eis- und Schneeverhältnisse), angestrebte seeseitige Umschlagsleistung, TEU-Faktor¹⁴, zur Verfügung stehende Hinterlandanbindungen, Restriktionen durch den Untergrund sowie Terminalaufbau und -größe. Transportsystem und Terminallayout sind dabei eng verzahnt. [(Brinkmann, 2005) und (Kalmar Head Office Cargotec Finland Oy, 2017), (Böse, 2011)].

Die oben beschriebenen Containertransportsysteme unterscheiden sich in ihrem Haupteinsatzzweck sowie in ihren Eigenschaften teils signifikant. In Abbildung 24 werden die systemspezifischen Lagerkapazitäten visualisiert. Tabelle 2 stellt die Eigenschaften der beschriebenen Systeme gegenüber.

¹⁴ Der *TEU-Faktor* gibt an, wie viel Prozent der Container 40ft lang sind (bspw. bedeutet ein TEU-Faktor von 1,6, dass 60 Prozent der betrachteten Container 40ft lang sind)

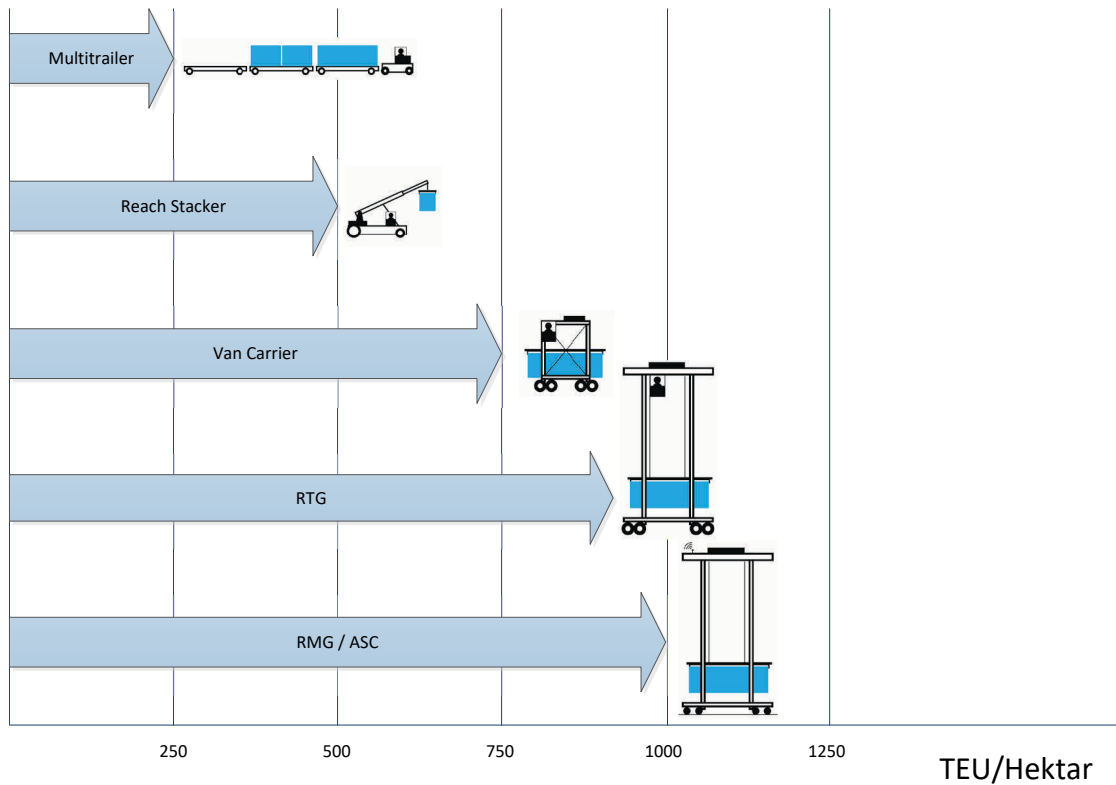


Abbildung 24: Technologiespezifische maximale Lagerkapazitäten in TEU pro Hektar, e.D. in Anlehnung an (Kalmar Industries Oy Ab, 2008)

	<i>VC</i>	<i>RS</i>	<i>MTT</i>	<i>AGV</i>	<i>AGSC</i>	<i>RTG</i>	<i>RMG</i>	<i>ASC</i>
Eigenständige Aufnahme und Abgabe von Containern	xxx	xxx	o	o	xxx	xxx	xxx	xxx
Flexible Verfahrswege	xxx	xxx	xx	o	x	x	o	o
Sehr hohe Lagerdichte	x	xx	o	o	xxx	xxx	xxx	xxx
Hoher Automatisierungsgrad	o	o	o	xxx	xxx	o	o	xxx
Umschlagsleistung am Schiff	xxx	x	xxx	xxx	xxx	o	o	o
Transport über Langstrecke	xx	x	xxx	xx	xx	x	x	x
Einsatzflexibilität	xx	xxx	x	x	xx	x	o	o

Legende: xxx: sehr gut; xx: gut; x: weniger gut; o: nicht oder gar nicht geeignet

Tabelle 2: Vergleich Containertransportsysteme, e.D. in Anlehnung an (Kalmar Industries Oy Ab, 2008))

Unter den konventionell eingesetzten Containertransportsystemen können demzufolge Multitrailer Trains, AGV sowie automatisierte und manuell betriebene Van Carrier einen effizienten Containertransport über längere Strecken gewährleisten. Auf eine Überwindung von größeren Höhenunterschieden und Strecken mit großen Steigraten sind konventionelle Containertransportsysteme nicht ausgelegt.

2.2 Trends des maritimen Containertransports

Der maritime Containertransport ist wie obenstehend beschrieben ein wichtiges Element des weltweiten Warentransports und findet insbesondere auf einigen, stark frequentierten Haupthandelsrouten statt, die z.B. zwischen Europa und Fernost oder Nordamerika und Asien verlaufen. Neben den bekannten Aufgaben der Terminals als Gateway und Hub für globale Warenströme und der entsprechenden Lagerung zu Konsolidierungszwecken vor und nach dem Seetransport ermöglichen Containerterminals auch eine Entkopplung der Modalitäten und zählen somit zu den wichtigsten Regulatoren in Transportketten (Rodrique & Notteboom, 2009). Der indirekte Umschlag wird durch die ausgeweitete Nutzung des Containerlagerprozesses im Sinne eines Pufferprozesses ermöglicht. Diese Entkopplung ist notwendig, da die maximalen seeseitigen und landseitigen Umschlagsleistungen starke Diskrepanzen aufweisen (Schönknecht, 2009). Die ansteigende global verteilte Produktion und die steigende Nachfrage führen analog zu steigenden Warenmengen im maritimen Verkehr, wobei das wirtschaftliche Interesse zusammenfassend in einem möglichst kostengünstigen und dennoch qualitativen Transport der Güter liegt. Das Ziel der Erreichung eines effizienten maritimen Containertransports begründet die Vergrößerung der Transportkapazitäten der Transporteinheiten (Schiffe) und die Reduktion der angelaufenen Häfen auf den Routen. Auch nach *Jiang et al., 2015* zählen die steigenden Umschlagszahlen, ein intensiver Wettbewerb der Seehäfen und die Zunahme der Schiffsgrößen zu den wichtigen Zukunftstrends und bedeutsamen Herausforderungen des maritimen Containerumschlags (Jiang, et al., 2015). Nachfolgend wird auf die Trends im maritimen Containertransport eingegangen und der Nutzen eines flurfreien Containertransportsystems dargelegt.

2.2.1 Steigende Umschlagzahlen

Die weltweite Herstellung von Gütern bedarf eines eng vernetzten, globalen Logistiknetzes. Derartigen grenzüberschreitenden Wertschöpfungsketten wird eine erhebliche Bedeutung für den Welthandel beigemessen (Raschen, 2015). Der weltweite Transport der Güter erfolgt zumeist per Schiff (Seefracht). Laut International Chamber of Shipping (ICS) werden 90 Prozent der grenzüberschreitenden Warentransporte auf dem Seeweg transportiert (Bundeszentrale für politische Bildung, 2017). Das Seefrachtaufkommen steigerte sich laut United Nation Committee for Trade and Development (United Nations Conference on Trade and Development, 2016) zwischen den Jahren 2000 bis 2014 um über 70 Prozent. Die transportierte Gesamtmenge von 9,2 Billionen Tonnen im Jahr 2012 bedeutet gegenüber dem Negativausschlag während der Weltwirtschaftskrise im Jahr 2009 eine Steigerung um 11 Prozent (OECD, 2015).

Per Seefracht werden insbesondere die in Abbildung 25 genannten Erzeugnisse transportiert: Rohöl und Ölprodukte sowie Gas werden in Tankschiffen transportiert, für den Transport schüttbarer Fracht (bspw. Getreide, Kohle, Eisenerz) werden Massengutschiffe eingesetzt; neben auf den Transport rollender Ladung (bspw. Autos) spezialisierter Schiffe kommen zudem Schiffe für den Stückguttransport sowie Containerschiffe zum Einsatz. Für den Transport von Gütern in Containern werden je nach Stückgutgröße Einzelladungen in einen Container geladen (FCL¹³)

oder zu Ladungseinheiten zusammengefasst und als LCL¹⁵ versendet. Der Containerverkehr nimmt etwas mehr als 10 Prozent des Gesamthandelsvolumens ein (Verband für Schiffbau und Meerestechnik (VSM), 2018).

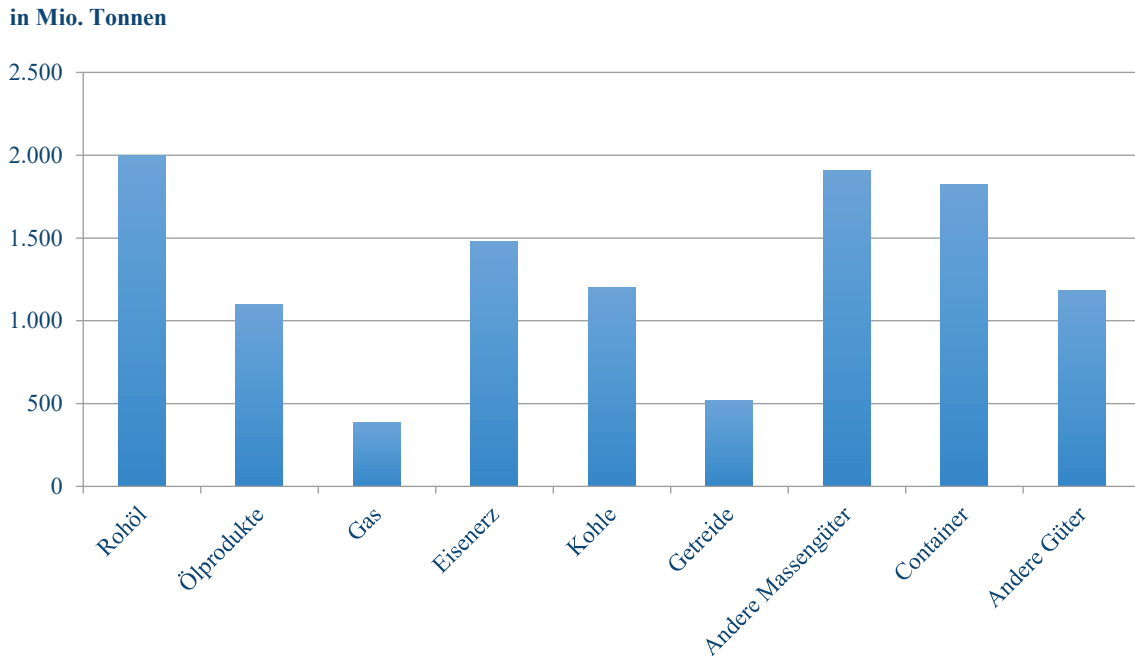


Abbildung 25: vorl. Handelsvolumen in der Seefracht, weltweit 2017 (Verband für Schiffbau und Meerestechnik (VSM), 2018)

Der weltweite Containerumschlag ist in den vergangenen Dekaden signifikant angestiegen (vgl. Abbildung 26). Obgleich die Wirtschaftskrise 2007-2010 einen deutlichen Rückgang der Transportzahlen verursacht hat und das Frachtvolumen um bis zu 25 Prozent gegenüber 2008 zurückgingen (Jiang, et al., 2015), konnte bereits 2011 wieder ein höheres Volumen als 2008 festgestellt werden und die jährliche Steigerung hat sich bis dato im einstelligen positiven Bereich stabilisiert. Im Jahr 2015 wurden mehr als 1.500 Millionen Tonnen in der Seefracht per Container transportiert (Verband für Schiffbau und Meerestechnik (VSM), 2018). Dies macht einen Anteil von rund 10 Prozent am gesamten per Seefracht transportierten Handelsvolumen aus (vgl. Abbildung 25).

¹⁵ FCL steht für „Full Container Load“: der gesamte Behälter wird von der Warensendung eines einzelnen Versenders ausgefüllt. Im Gegensatz hierzu werden beim LCL („Less than Container Load“) die Warensendungen mehrerer Versender, die einen Container jeweils nur zum Teil ausfüllen, in einem Sammelcontainer zusammengefasst.

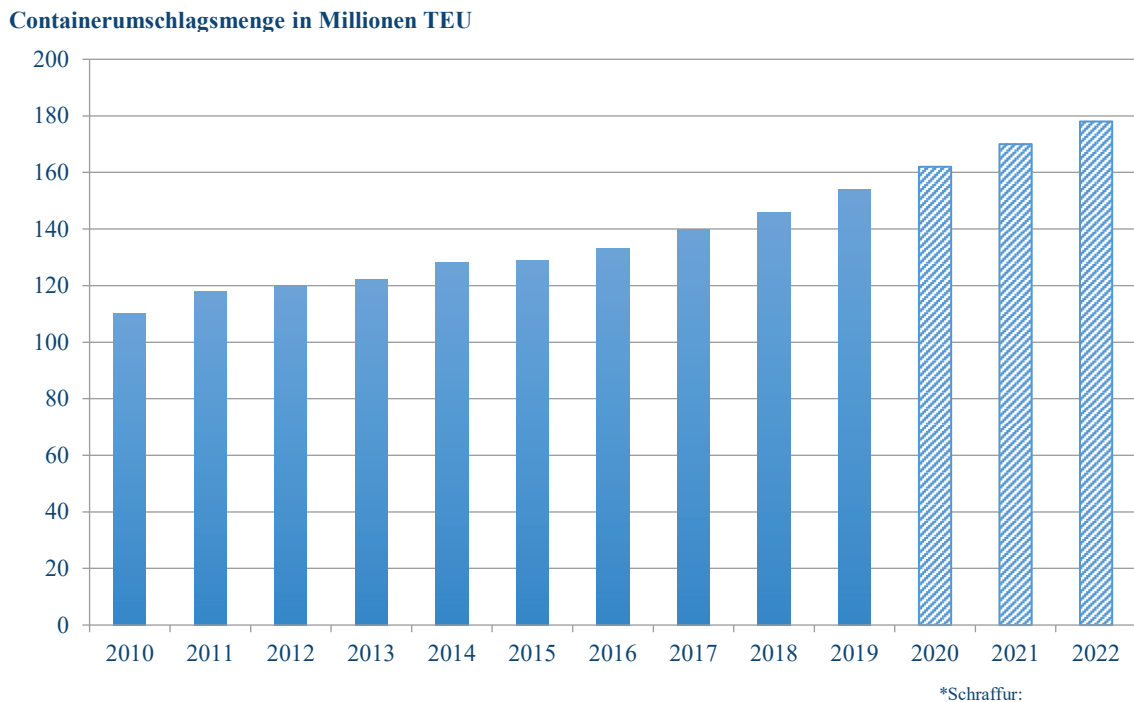


Abbildung 26: Entwicklung des jährlichen weltweiten Containerumschlags (IHS Global Insight, 2018)

Die Prognose des ITF zum weltweit in Containern umschlagenen Frachtvolumen beschreibt bis 2050 eine Vervierfachung gegenüber 2015 (OECD, 2015). Zudem verschieben sich demnach die globalen Handelsströme: die Nordpazifikroute löse den Nordatlantik als wichtigsten Handelskorridor ab, und die Entfernung, die die transportierten Güter durchschnittlich zurücklegen, werde um ungefähr zwölf Prozent steigen.

Die aufgeführten Entwicklungen des internationalen Transportaufkommens containerisierter Ware belegen das Potential und die Notwendigkeit prozessualer, organisationaler, logistischer, infrastruktureller und technischer Optimierungen innerhalb dieses Branchensegments. Das Aufkommen von immer mehr Waren impliziert, dass die Kapazitäten an der Kaje und in den nachfolgenden Prozessbereichen angepasst und erweitert werden müssen.

2.2.2 Wettbewerb der Seehäfen

Der Umschlag containerisierter transportierter Güter zwischen dem Land- und dem Seetransport erfolgt in für den Containerumschlag ausgerüsteten Seehäfen. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 27 die Entwicklung der Größe verschiedener Häfen über die Jahre 2013 – 2017. Aktuell liegen die zehn größten Containerhäfen alle auf dem asiatischen Kontinent; insbesondere in der Volksrepublik China. Gemessen am Umschlag in TEU¹⁶ befand sich der weltweit größte Containerhafen im Jahr 2017 mit knapp 40 Millionen TEU in Shanghai. Der größte europäische

¹⁶ TEU: Twenty-foot-equivalent-unit - 20-Fuß-Einheit. Maßeinheit im Containerverkehr. Zur Vereinheitlichung der Kapazitäts- und Durchsatzmessung werden Container verschiedener Länge auf diese Längeneinheit umgerechnet. (Springer Gabler Verlag, 2017)

Containerhafen war mit 13,74 Millionen TEU Rotterdam, innerhalb Deutschlands waren Hamburg mit rund 8,82 Millionen TEU und Bremerhaven mit 5,54 Millionen TEU die wichtigsten Umschlagsplätze für Container. Zu den größten Terminalbetreibern zählten 2014 die Unternehmen China Merchants Holding Int. mit 80 Millionen TEU, Hutchison Port Holdings mit rund 78 Millionen TEU, Cosco Pacific mit über 67 Millionen TEU, PSA International mit mehr als 65 Millionen TEU und DP World mit knapp 60 Millionen TEU (Statista, 2016).

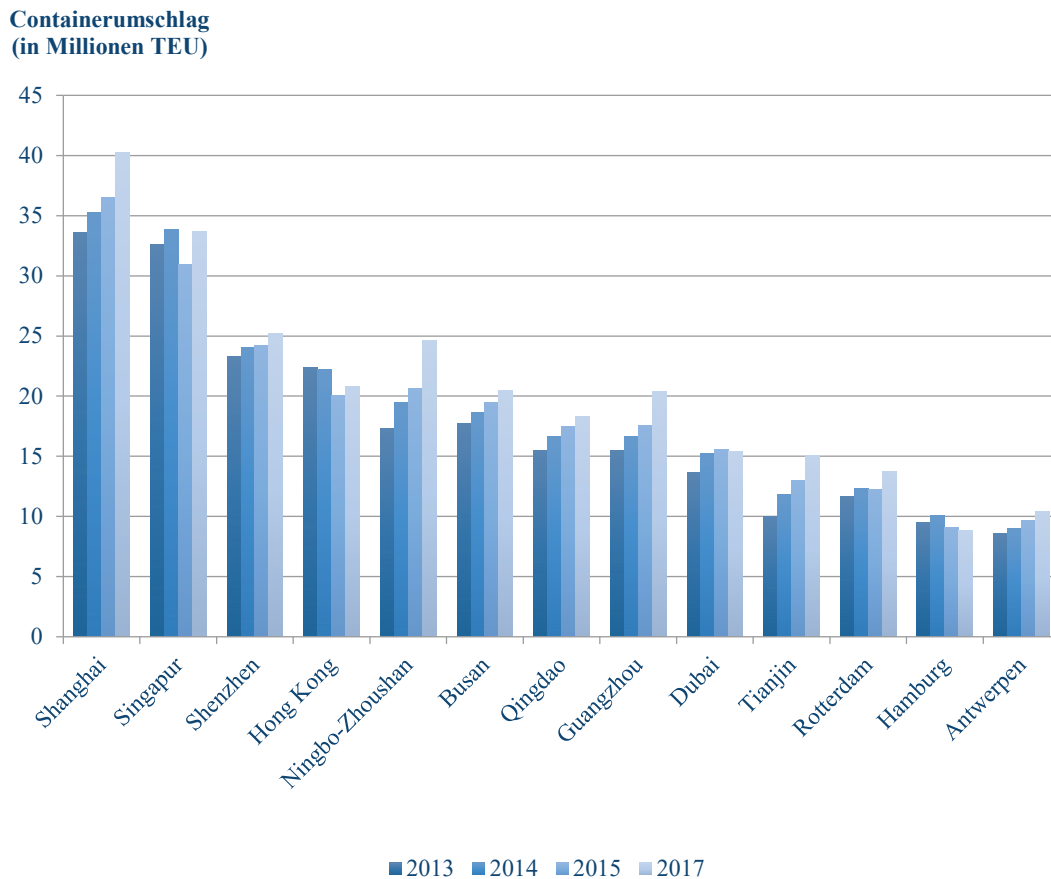
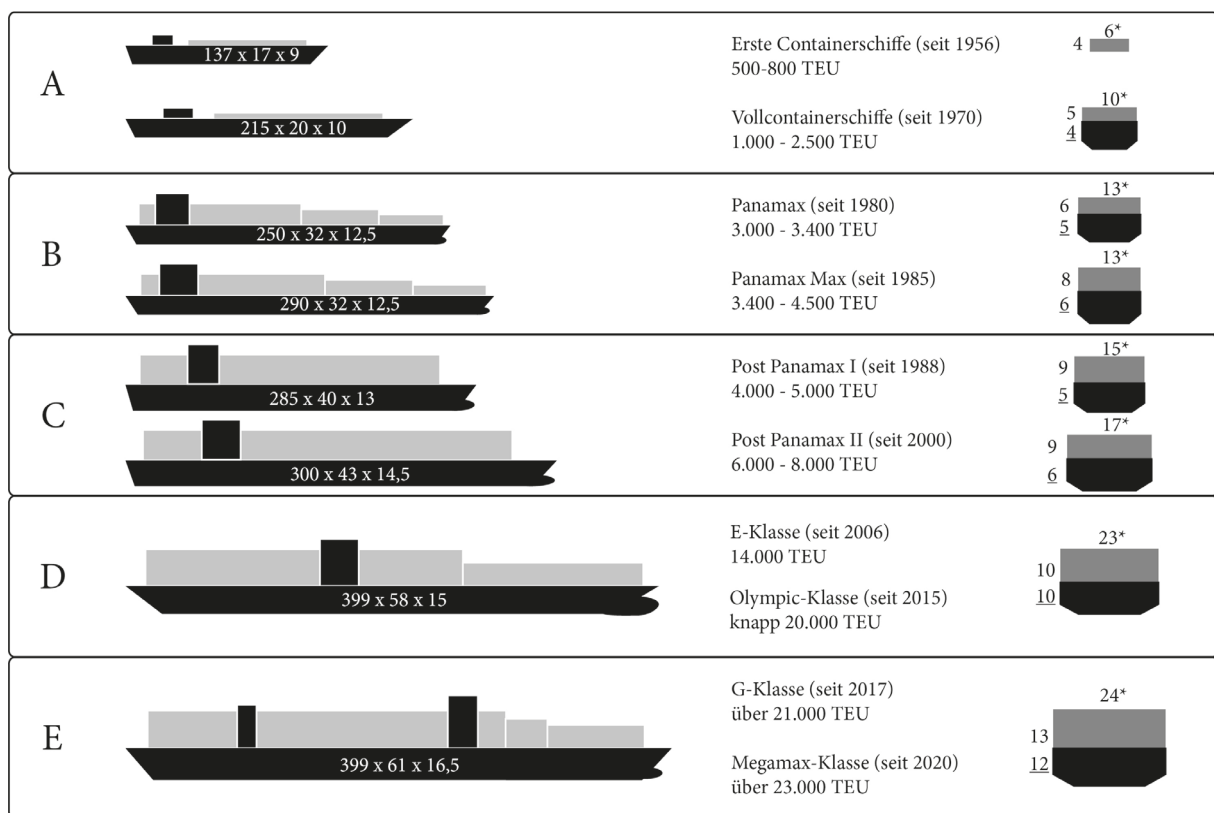


Abbildung 27: Entwicklung des Umschlags an ausgewählten Häfen (Alphaliner, 2016) und (Statista, 2018)

2.2.3 Entwicklung der Schiffsgrößen

Neben dem zahlenmäßigen Wachstum der containerisiert transportierten Warenmenge beeinflusst auch das Containerschiffwachstum die notwendige Leistungsfähigkeit der Terminals und somit den Bedarf von Kapazitätsanpassungen. Der Trend, nach dem immer größere Containerschiffe gebaut und in den Dienst gestellt werden, ist schon seit Jahrzehnten zu beobachten. Durch größere Transportmengen pro Schiff können die Transportkosten je Container reduziert werden (Economies of Scale). Nach *Poehls* (Poehls, 2000) liegen die Voraussetzungen für die stetige Zunahme der Containerschiffgrößen im Wachstum des weltweiten Seehandels und im technologischen Fortschritt, der den Bau und den Einsatz von immer größeren Containerschiffen ermöglicht. Begrenzende Faktoren für die Größenzunahme sind nach *Poehls*

(Poehls, 2002) und *Hautau* (Hautau, 2000) die Rollperiode der Schiffe¹⁷ und Zurrkräfte der Deckscontainer, der Tiefgang, die Festigkeit und Steifigkeit der Stahlkonstruktion, die Verfügbarkeit von Großmotoren und ihre technischen Kenngrößen sowie die Anpassung der terminalseitigen Förder- und Transporttechnik an die Schiffsgröße. Schiffsgrößencluster (vgl. Abbildung 28) orientieren sich insbesondere auch an einer Aufrechterhaltung der Möglichkeit des Befahrens der wichtigsten Meeresengen im weltweiten Schiffsverkehr; hierzu zählen insbesondere der Suez- und der Panama-Kanal sowie die Straße von Malakka. Das größte Containerschiff (Stand September 2020) hat eine maximale Ladekapazität von 23.964 TEU (HMM Algeciras) (Hafen Hamburg Marketing, 2020). Die steigenden Schiffsgrößen beeinflussen u.a. die Attraktivität der Häfen, maßgeblich durch die generelle Anlaufmöglichkeit der großen Schiffe (Brinkmann, 2005).



* Container nebeneinander; Container über Deck; Container unter Deck

Abbildung 28: Schiffsklassen, e.D. in Anlehnung an (Rodrique, et al., 2009))

¹⁷ Die Rollperiode ist ein Begriff aus der Schiffbautechnik. Das Stabilitätsmoment am Schiff ergibt sich aus der Multiplikation des Hebelarms und der Gewichtskraft; wobei die Hebelarme unter Seegang starken Veränderungen unterliegen und die Stabilität gefährden können. Das Rollen eines Schiffes beschreibt die „Eigenschwingungen des Schiffes nach einem äußeren Anstoß“. Somit entspricht ein rollendes Schiff einem physikalischen Pendel – die Amplituden nehmen über die Schwingungsdauer ab (Müller & Krauß, 1980). Die Rollperiode bemisst demnach die Zeitspanne, des vollständigen Durchlaufens einer Rollbewegung von Umkehrpunkt zu Umkehrpunkt. Als Beispiel: Ein Containerschiff der Panamax-Klasse hat bei von $GMc = 0,8m$ eine Rollzeit von ca. 29 Sekunden (U+S Ausschuss der See-BG, 2003), wobei GMc ein Indikator für die Gestalt der Hebelarmkurve ist, mit der das Schiff angeregt wird.

Im Jahr 2017 belief sich die weltweite Containerschiff flotte auf über 5.000 Schiffe; die 3.000-8.000 TEU Schiffsklasse weist akkumuliert den größten Anteil der Gesamtladepazität der weltweiten Flotte auf (Statista, 2018). Die größte Reederei (Stand Juni 2018) ist APM-Maersk hat einen Marktanteil von 17,9% und betreibt 713 Schiffe (4 Mio. TEU); gefolgt von MSC (14,4%, 515 Schiffe, 3,2 Mio. TEU) und COSCO Group (12,5%, 479 Schiffe, 2,8 Mio. TEU) (Alphaliner, 2018). Die größten Schiffe heute fassen ca. 23.000 TEU – also 23.000 zwanzig Fuß-Container und sind knapp 400 Meter lang und mehr als 60 Meter breit.

2.2.4 Beeinflussung der Trends auf die landseitigen Logistikprozesse

Die oben beschriebenen Trends im maritimen Güterverkehr beeinflussen die landseitigen Prozesse und Technologien in der Logistikkette wie im Folgenden aufgeführt. Die Leistungsfähigkeit in Bezug auf den Umschlag sowie die seeseitige Erreichbarkeit (Tiefgang, Tideabhängigkeit) und landseitige Anbindung eines Hafens wirken sich direkt auf den Wettbewerb zwischen den Häfen aus (ISL, 2000). Auch nach *Brinkmann* ist neben der grundsätzlichen Erreichbarkeit, die Liegezeit der Schiffe im Hafen für die Wettbewerbsfähigkeit ausschlaggebend (Brinkmann, 2005). Die Konsolidierung der Warenmengen auf großen Schiffen führt dazu, dass die Umschlagsperformance eines Terminals zum einen auf die Bewältigung immer größerer Mengen, zum anderen auf die Abarbeitung von Peaks ausgelegt sein muss. Die Erhöhung der Warenmengen und somit der Umschlagszahlen und auch der Einsatz immer größerer Containerschiffe stellt die landseitigen Konzepte und Technologien somit vor neue Herausforderungen. Um große Containerschiffe und große Warenmengen abfertigen zu können und dabei geringe Liegezeiten der Schiffe zu gewährleisten, müssen die Leistungen bzw. Kapazitäten aller landseitigen Funktionsbereiche eines Containerterminals zumindest zeitweilig angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass, wie in Abbildung 29 dargestellt, die seeseitige Umschlagsleistung deutlich über der landseitigen Umschlagsleistung liegt (Schönknecht, 2009). Entsprechend ist es eine besondere Herausforderung, die landseitige Umschlagsleistung an die o.g. Herausforderungen anzupassen. Auch eine Studie des International Transport Forum erläutert den Zusammenhang der Großcontainerschiffsentwicklung und des erhöhten Flächenbedarfs in den Terminals. Dieser begründet sich laut Studie in der Notwendigkeit, Puffer- und Lagerflächen vorzuhalten, um die extremen Peaks der Großschiffbe- und -entladung abzuarbeiten (OECD, 2015). Im Folgenden werden die Auswirkungen der oben beschriebenen Trends auf die Funktionsbereiche 1-3 eines Containerterminals beschrieben und mögliche Lösungen zur Kapazitätsanpassungen untersucht.

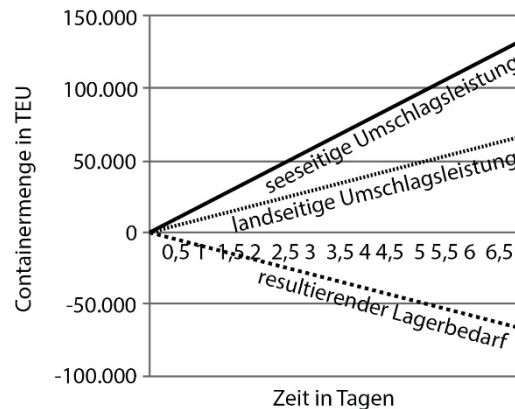


Abbildung 29: Vergleich von see- und landseitiger Umschlagsleistung eines Terminals (Schönknecht, 2009)

Funktionsbereich 1: Umschlag Schiff und Terminal / Terminal und Schiff an der Kaye

Die Liegezeit eines Containerschiffs im Hafen wird insbesondere durch die Anzahl der umzuschlagenden Container und die Umschlagsleistung des Containerterminals beeinflusst (Schönknecht, 2009). Dabei ist die Gesamtliegezeit eines Schiffes nach Schönknecht, 2009 wie folgt definiert (Schönknecht, 2009):

$$t_L = t_H + t_U \quad \text{Gl. (1)}$$

wobei:

t_L = Gesamtliegezeit eines Schiffes im Hafen [h]

t_H = Zeiten für Festmachen, Zollkontrollen usw. [h]

t_U = Containermengenabhängige Umschlagszeit [h]

Reale Daten, aus denen das Verhältnis der Nebenzeiten t_H und der containermengenabhängigen Umschlagszeit t_U eindeutig abzuleiten sind, sind nicht frei verfügbar. Nach Schönknecht zeigt sich für Schiffsgrößen ab ca. 7.000-8.000 TEU eine gewisse Stagnation des Anstiegs der Gesamtliegezeiten und containermengenabhängigen Umschlagsleistung. Bei Schiffsgrößen von bis zu 1.000 TEU hat Schönknecht, 2009 eine durchschnittliche Schiffs-liegezeit von ca. 220 Sekunden pro umgeschlagenem Container ermittelt; dieser Wert reduziert sich auf ca. 98 Sekunden im Cluster 1.000-2.000 TEU und ca. 60 Sekunden im Cluster 2.000-3.000 TEU auf einen stagnierenden Wert von ca. 25 Sekunden ab dem Cluster von 7.000 TEU. Dies lässt sich durch den geringer werden Anteil und damit Einfluss der Nebenzeiten je Container bei steigenden Containerzahlen erklären. Die Umschlagsleistung am Schiff wird durch die technischen Möglichkeiten des Entladeequipments und den Abfluss der Container von der Kaye ins Yard und weiterführend beeinflusst. Sie kann durch den erhöhten Einsatz von technischem Equipment (bspw. Erhöhung der zur Entladung eingesetzten Containerbrücken) oder die Entladung von mehreren Containern je Arbeitsgang (bspw. Twin- oder Doublespreader, vgl. Abbildung 8) erhöht werden. Die Schiffsgrößenentwicklung beeinflusst zudem die Technologie, da die Spannweiten der Geräte derart erhöht werden müssen, dass die volle Breite der Containerschiffe abgedeckt werden kann.

Die seeseitige Umschlagsleistung liegt dabei deutlich über der landseitigen Umschlagsleistung zwischen Yard und Hinterland; diese Diskrepanz wird durch die Pufferfunktion des Yards

aufgefangen. Der Gesamtzusammenhang verdeutlicht die Notwendigkeit der effizienten Anschlussprozesse an die Kaje, besonders auch im Sinne der Erhaltung und Optimierung der Wettbewerbsfähigkeit des jeweiligen Containerterminals.

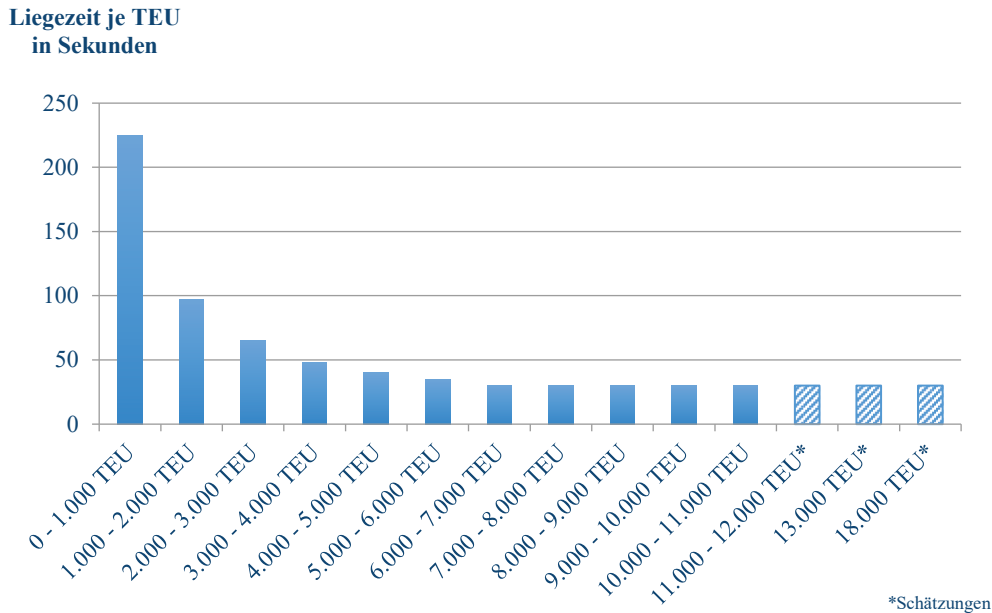


Abbildung 30: Schiffsliegezeit pro umgeschlagenem TEU in Abhängigkeit von der Schiffsgröße; am Beispiel Hamburger Hafen 2007 e.D. in Anlehnung an (Schönknecht, 2009)

Funktionsbereich 2: Lagerplatz/Yard

Wird eine höhere Ent- bzw. Beladefrequenz an der Kaje erreicht, so ergibt sich somit ein größeres Transportaufkommen für Container zwischen der Kaje und dem Yard. Dieser Bedarf kann bspw. durch den Einsatz zusätzlicher Transportfahrzeuge abgedeckt werden, wobei die Anzahl der Transportfahrzeuge an die terminalinterne Infrastruktur angepasst sein muss, damit es nicht zu Staubildungen kommt. Zusätzlich oder alternativ kann der Einsatz von Transportfahrzeugen empfehlenswert sein, die einen höheren Automatisierungsgrad aufweisen.

Zudem ergibt sich aus einer größeren Umschlagsleistung an der Kaje ein größerer Lagerbedarf im Yard. Dieser Bedarf ergibt sich für Exportgüter, da eine Konsolidierung der Gütermengen vor der Beladung auf ein Schiff, um somit eine Entkopplung zu den landseitigen Hafenanschlüssen zu gewährleisten, notwendig ist. Für Importgüter besteht ebenfalls ein zielort- oder routenspezifischer Konsolidierungsbedarf, insbesondere für die Anbindung des Hinterlandes via Binnenschiff und Schiene. Auch für den straßenseitigen Transport in Hinterland ergeben sich erhöhte Lagerbedarfe, da die seeseitigen und landseitigen Transportprozesse nicht gänzlich auf einander abstimmbare sind und da die LKWs auf Grund begrenzt zur Verfügung stehender Beladeflächen und -systeme sowie auf Grund der Restriktionen der umgebenden Infrastruktur nicht gleichzeitig die vom Schiff entladenen Container entnehmen können. Die Sortieranforderungen und damit Lageranforderungen in den Terminals steigen mit zunehmender Umschlagszahl (Schönknecht, 2009), wobei zusätzlich eine trendmäßige Vergrößerung der Vielfalt der Quell- und Zielorte der Container festzustellen ist (Schönknecht, 2009). Die Großcontainerschiffsentwicklung verschärft die Effekte dieser Faktoren weiter, da in einem

Zeitintervall t immer mehr ungeordnete Container in eine stauplangerechte Reihenfolge und umgekehrt konvertiert werden müssen. Eine bedarfsgerechte Erhöhung der Lagerkapazität im Yard kann durch eine Erhöhung der zur Verfügung stehenden Lagervolumina erreicht werden.

Um diese zu erreichen, müssen die zur Verfügung stehenden Lagervolumen vergrößert oder neue, unabhängige Lagervolumen angeschlossen werden. Dabei kann eine Vergrößerung des Lagervolumens prinzipiell durch eine Ausdehnung des Lagervolumens in der Höhe oder in der Breite erfolgen. Hierbei ist allerdings festzustellen, dass eine Erweiterung des Lagervolumens in der Höhe zumeist durch die eingesetzte Lagertechnik und auch durch die maximale Stapelhöhe der Container begrenzt ist.

In Bezug auf eine Terminalerweiterung in der Breite führt eine direkte Flächenausdehnung des Lagervolumens zu längeren Fahrwegen der Containerfahrzeuge zwischen den Lagerflächen, den Hinterlandanbindungen und der Kaye und somit zu einem weniger effizienten Terminallayout. Insbesondere Häfen, bei denen in der Vergangenheit bei steigenden Umschlagszahlen keine Entkopplung der Seehäfen und Hafenstädte durch eine Migration der Hafenanlagen in Richtung meeresnaher Orte erfolgte (Hall, 2007), liegen inmitten gewachsener Infrastrukturen. Diese räumliche Verflochtenheit führte vielerorts zu intensiven Konflikten über die Landnutzung (Hall & Robbins, 2007). Hier ist eine direkte Flächenausdehnung oft nicht möglich, da diese teilweise oder vollständig von baulichen Strukturen (bspw. Straßen, Schienen, Gebäude, Hafenbecken usw.) umgeben sind. In diesen Fällen könnte eine Vergrößerung des Lagervolumens durch die Etablierung neuer, unabhängiger Lagervolumen – sogenannter Expansionsflächen – erfolgen. Diese Expansionsflächen sind entsprechend nicht direkt mit dem Terminallagervolumen verbunden und es müssen neue Transportprozesse zwischen dem Mutterterminal und der Expansionsfläche etabliert werden, die dazu eingerichtet sind, die umgebenden Strukturen effizient zu überwinden.

Funktionsbereich 3: Umschlagsbereich zwischen Terminal und Hinterlandverkehr

Wie voranstehend beschrieben, erhöht eine größere Eingangsmenge bzw. Ausgangsmenge am Terminal entsprechend auch die Mengen und somit die Kapazitätsbedarfe für vom Hinterland ein- bzw. ausgehende Güterströme. Die Verteilung der Kapazitätsanforderungen auf die unterschiedlichen Hinterlandmodalitäten (Straße, Schiene, Wasser) kann dabei unterschiedlich ausgeprägt sein. Die Leistung des Abflusses bzw. Zuflusses kann durch eine Erhöhung der Anzahl bzw. Frequenz der An- und Abfahrten der Transportmittel erreicht werden.

Eine Erhöhung der Anzahl bzw. Frequenz der An- und Abfahrten der Transportmittel führt allerdings auch direkt zu einer vermehrten Belastung der hafennahen Infrastruktur. Dies ist insbesondere mit Blick auf die hauptsächlich genutzten Straßengüterverkehre und die ohnehin häufig stark belasteten hafennahen Infrastrukturen kritisch zu sehen.

2.2.5 Bedarf an flurfreien Containertransporttechnologien

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die jährlich weltweit transportierte Warenmenge stetig und ca. 16 Prozent der Güter in Containern transportiert werden. Das Interesse eines möglichst kostengünstigen Transports der zu transportierenden Warenmengen führt am Markt damit einhergehend insbesondere dazu, dass die eingesetzten Containerschiffe immer größer wurden und werden, um derart eine größtmögliche Warenmenge je Transporteinheit

transportieren zu können und weiterführend dazu, dass die Anzahl der angelaufenen Häfen geringer wird. Für die Auswahl der angelaufenen Häfen sind neben strukturellen Standortfaktoren Faktoren wie bspw. minimaler Tiefgang des Hafens oder Liegezeiten ausschlaggebend. Weltweit müssen die großen Häfen neben hafenspezifischen Faktoren (Standort und technische Ausstattung) zur Wahrung ihrer Konkurrenzfähigkeit somit insbesondere auch liegezeitspezifische Performance Indikatoren bestmöglich bedienen.

Wie im voranstehenden Kapitel beschrieben, sind verschiedene Ansätze für die Kapazitätserhöhung der Funktionsbereiche 1-3 eines Containerterminals vorstellbar. Insbesondere mit Blick auf die beschriebenen Hemmnisse des Einsatzes zusätzlicher Transportfahrzeuge ist festzustellen, dass Technologien, die die herkömmliche, ebenerdige Transportebene nutzen, vielfach nicht zur Kapazitätserhöhung eingesetzt werden können, da sie die bereits stark belastete Infrastruktur zusätzlich belasten, sowohl terminalintern als auch hafennah. Auch zur Anbindung einer hafennahen Expansionsfläche unter Überwindung von den Terminal umgebenden Strukturen sind herkömmliche, ebenerdig transportierende Transportfahrzeuge eher ungeeignet.

Für die genannten Fälle ist der Einsatz eines „flurfreien“ Containertransportsystems, also eines Transportsystems, dass in einer anderen Transportebene als der herkömmlichen, ebenerdigen Transportsysteme verkehrt, sinnvoll. Flurfreien Containertransportsystemen kommt mit Blick auf die genannten Hemmnisse der Leistungs- und Kapazitätserhöhung somit eine hohe Relevanz zu, da eine derartige Technologie sowohl zur automatisierten terminalinternen Anbindung, als auch bei der Überwindung von terminalumgebenden Strukturen und somit der Anbindung von Expansionsflächen, als auch zur Entlastung der Hafenhinterlandanbindungen relevante Effekte erzielen könnten.

2.2.6 Anforderungen an eine Analysesystematik zur Bewertung des Potentials eines flurfreien Containertransportsystems

Um die Einsetzbarkeit eines flurfreien Containersystems wissenschaftlich bewerten zu können bedarf es einer hierfür passenden Methode zur Technologiebewertung flurfreier Containertransporttechnologien, die folgenden Anforderungen gerecht werden muss:

Anforderung 1 (Technologieerkennung): Da Technologien zum flurfreien Containertransport bisher nicht etabliert sind, muss die Analysesystematik für Systeme mit sehr frühen Stadien im Produktlebenszyklus dienlich sein und eine systematische Identifikation von Technologien inkl. der dazugehörigen Daten und Informationen umfassen, da diese später als Basis der umfassenden Bewertung und Auswahl der Technologie dienen.

Anforderung 2 (Szenariobezug): Die Analysesystematik muss einen hohen Szenariobezug zulassen um derart eine Bewertung unterschiedlichster Szenarien zu gewährleisten, jeweils aus Unternehmenssicht oder Sicht eines Technologielieferanten.

Anforderung 3 (Bewertungsqualität): Es lassen sich grundsätzlich qualitative und quantitative Methoden unterscheiden, wobei qualitative Methoden und Ansätze insbesondere auch subjektive Einschätzungen und implizites Wissen von Fachpersonal integrieren und quantitative Methoden sich auf explizites Datenmaterial stützen. Eine multikriterielle Bewertung beachtet bei der Bewertung eine Vielzahl an Kriterien. Die Analysesystematik soll Methoden quantitativer sowie

andererseits qualitativer Analyseelemente in ihren Bewertungsablauf integrieren und andererseits den Anforderungen einer multikriteriellen Bewertung gerecht werden, um derart der sehr hohen Komplexität der Bewertung gerecht zu werden.

Anforderung 4 (Systematik): Letztlich muss die Analyse-Systematik durch ein strukturiertes Konzept beschrieben werden, um eine hohe Transparenz ihrer Anwendung zu erreichen. Für die Entwicklung eines Analysetools ist zudem eine Toolunterstützung der Umsetzung der Analyse-Systematik wichtig.

2.3 Stand der Forschungen relevanter Ansätze und Methoden zur Technologiebewertung

In diesem Kapitel werden allgemeine Ansätze zur Technologiebewertung beschrieben und durch die Darlegung ausgewählter Methoden zur Beurteilung und Bewertung von Technologien vertieft. Die beschriebenen Methoden dienen insbesondere zur Technologiefrüherkennung und Technologieplanung und sind auf eine Technologiebewertung für einen zukünftigen Technologieeinsatz ausgerichtet. Die Darstellung von Einzelmethoden wird durch die Darlegung von integrativen Ansätzen ergänzt. Die Auswahl der beschriebenen Methoden erfolgte unter Berücksichtigung der Anwendbarkeit und ihrer Relevanz in der Praxis. Abschließend werden die verschiedenen Methoden und Ansätze auf ihre Anwendbarkeit zur Technologiebewertung flurfreier Containertransporttechnologien anhand der oben beschriebenen Anforderungen überprüft und der Handlungsbedarf abgeleitet.

Die beiden Begriffe „Technologie“ und „Technik“ werden im allgemeinen Sprachgebrauch häufig synonym verwendet und ihre genaue inhaltliche Abgrenzung ist auch in der Literatur nicht eindeutig (Cleemann & Pfeiffer, 1992). Formal ist der „Technologiebegriff“ zu verwenden, wenn die Gesamtheit der Nutzung allgemeingültiger naturwissenschaftlich-technischer Effekte in Bezug auf einen bestimmten technischen Anwendungsfall beschrieben werden (Kröll, 2007), wobei insbesondere die Ziel-Mittel-Relationen im Vordergrund stehen (Cleemann & Pfeiffer, 1992) (Bullinger, 1994). Demgegenüber ist unter dem „Technikbegriff“ die Menge nutzenorientierter, gegenständlicher Gebilde, die Menge menschlicher Handlungen und ihre Verwendung in Sachsystemen zu verstehen (Ropohl, 1996); also die Artefakte und ihr konkreter Einsatz (Kröll, 2007) und die konkrete Anwendung von Technologien. Da zur Zielerreichung eines flurfreien Transports von Seecontainern verschiedene Transporttechnologien zum Einsatz kommen können, muss zur Bewertung der Zielerreichung eine Technologiebewertung vorgenommen werden.

Die Bewertung einer Technologie ist von der Technikfolgeabschätzung abzugrenzen. Gemäß *VDI-Richtlinie 3780* umfasst die Technikfolgeabschätzung u.a. die Abschätzung der Folgen der Techniken und ihre Beurteilung anhand definierter Ziel- und Wertekataloge (bspw. Umweltqualität, Gesundheit, Sicherheit) sowie die Ableitung von adäquaten Handlungsempfehlungen, wohingegen die Technologiebewertung Aussagen zu den erwartenden

Auswirkungen der Nutzung oder Produktion einer bestimmten Technologie trifft. Die erwartete Zielerreichung kann bspw. anhand von KPI¹⁸ überprüft werden.

Die Technologiebewertung kann Basis unterschiedlichster Entscheidungssituationen entlang des Lebenszyklus einer Technologie (Hall, 2002) sein und stellt Analysen und Urteile zu unterschiedlichen Technologien als Informationsbasis spezifisch bereit (Haag, et al., 2011). Durch ihren Einsatz soll die Qualität der Entscheidungen nachvollziehbar und transparent gestaltet werden. Die Technologiebewertung zeichnet sich i.A. durch die Analyse und Beurteilung des Erfüllungsgrades eines oder mehrerer vorgegebener Zielkriterien durch ein bestimmtes technologisches System aus. Die Zielkriterien können sich u.a. am Handlungsfeld, an der Technologie selbst oder auch an betriebswirtschaftlichen, organisatorischen, sozialen, politischen und gesellschaftlichen Zusammenhängen orientieren (Kröll, 2007). Das jeweils angestrebte Ergebnis kann unterschiedlicher Art sein, wie z.B. die Erstellung einer Rang- oder Reihenfolge, eine Alternativenpriorisierung oder eine Einflussanalyse (Haag, et al., 2011). Neben der Bewertung konkreter Technologien kann auch die Beurteilung von Technologiekonzepten, Entwicklungszielen, oder Zwischenergebnissen im Fokus der Betrachtungen stehen.

Eine Eingruppierung der zur Verfügung stehenden Verfahren und Methoden, die insbesondere auf unternehmerische Entscheidungen abzielen, kann durch ihre aufgabenspezifische Zuordnung erfolgen:

- Technologiefrüherkennung
- Technologieplanung
- Technologieentwicklung
- Technologieverwertung

Die für die Arbeit relevanten Gruppen sind die *Technologiefrüherkennung und -planung*; diese werden nachstehend eingehender beschrieben. Weiterführend lässt sich nach Nach Pfeiffer, Weiß und Haag et al. ein Großteil der bekannten Ansätze zur Technologiebewertung nach der Art der methodischen Bewertung entsprechender folgender Gruppen strukturieren (Pfeiffer & Weiß, 1995), wobei die notwendige Informationstiefe und damit auch die Komplexität der Bewertung und die Güte des Bewertungsergebnisses von der rein klassifikatorischen zur metrisierenden Bewertung zunimmt:

- Klassifikatorische Bewertung (bspw. Technologielisten)
- Komparative Bewertung (Technologien werden zueinander ins Verhältnis gesetzt)
- Metrisierende Bewertung (Zuordnung numerischer Werte zu den Technologien).

Nachfolgend werden wesentliche Ansätze zur Technologiebewertung und Technologieplanung dargelegt und im darauffolgenden Kapitel die Methoden beschrieben sowie auf ihre Anwendbarkeit für den zugrundeliegenden Betrachtungsgegenstand untersucht.

¹⁸ Key Performance Indicator (KPI): Leistungskennzahl(en), anhand derer der Erfolg oder der Erfüllungsgrad hinsichtlich bestimmter Ziele innerhalb einer Organisation gemessen und beschrieben werden kann

2.3.1 Technologiefrüherkennung und Technologieplanung

Das Hauptziel der Technologiefrüherkennung liegt in der frühzeitigen Detektion von Änderungsanbahnungen im unternehmerischen Umfeld, die einen Einfluss auf die verwendeten Technologien haben; dies können u.a. Weiterentwicklungspotentiale oder Leistungsgrenzen sein (Haag, et al., 2011). Eine Orientierung kann anhand des Produktlebenszyklus oder bspw. durch eine Eingruppierung nach *Little* in Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologien erfolgen (Little, 1986). Aus den Ergebnissen kann subsequent die Ableitung einer unternehmensspezifischen Technologiestrategie erfolgen. Da die Detektion von sich anbahnenden Änderungen nur sehr schwachen Signalen folgen kann, müssen die Bewertungsmethoden entsprechend hierauf angepasst sein und mit den hohen Unsicherheiten, einer großen Komplexität und unvollständigen Informationslagen umgehen.

Für die Technologiefrüherkennung beschreiben *Haag et al.* folgende quantitative¹⁹ Methoden als besonders geeignet: *Kosten-Nutzen-Analyse*, *Nutzwertanalyse*, *Trendextrapolation*, *Regressionsanalyse*, *Modellsimulation*. Als qualitative Methoden der Technologiefrüherkennung werden die *Szenario-Technik* sowie die *Delphi-Methode* genannt; zudem finden in der Technologiefrüherkennung nach *Haag et al.* verschiedene Basismethoden, wie bspw. die *Argumentenbilanz* und *Checklisten* ihren Einsatz.

Bei der unternehmerischen Technologiefrüherkennung ist die Integration verschiedener Sichtweisen dienlich. Auf die Kundensicht sind u.a. die *Lead-User-Analyse*, das *Quality Function Deployment*, die *Szenario-Technik* oder die *Trendanalyse* ausgerichtet. *Lead-Supplier-Analysen* sowie die *Analyse von FuE-Projekten* sind auf eine Lieferanten- und Wettbewerbersicht ausgerichtet. Um die Innovationskraft einer Technologie bewerten zu können, können *Wissenschafts- und Technikindikatoren* herangezogen werden, wie bspw. Zitate, wissenschaftliche Publikationen, Patentanmeldungen o.ä. (Brandkamp, 2000). Die initiale Untersuchung der Einflussnahme untersuchter Technologien kann mittels sog. *Technikfolgeabschätzung* erfolgen; diese Methode zielt auf die Untersuchung der Risiken und Chancen, u.a. für die Umwelt und Gesellschaft, von neuen technischen Entwicklungen, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind, ab (Brandkamp, 2000).

Für die vorliegende Arbeit ist die Technologiefrüherkennung zur Detektion dienlicher Technologien und zur Definition der Kundenanforderungen an ein flurfreies Containertransportsystem relevant.

Die unternehmerische Technologieplanung zielt auf die Definition und Dimensionierung der Technologiestrategie ab und enthält u.a. folgende Aufgaben: Technologieauswahl, Ermittlung der möglichen technologischen Leistungsfähigkeit, Festlegung möglicher Technologiequellen sowie die wirtschaftliche Bewertung. Ein Aufzeigen von Handlungsalternativen kann bspw. durch einen *morphologischen Kasten* erfolgen.

¹⁹ Quantitative Methoden beruhen auf einer zählbaren Bewertung der Untersuchungsgegenstände wohingegen qualitative Verfahren quantitative Informationen integrieren, jedoch in hohem Maße auf Experteneinschätzungen beruhen.

In der unternehmerischen Technologiebewertung fällt insbesondere die Detektion der „richtigen“ Technologie, die einen nachhaltigen ökonomischen Mehrwert aufweisen wird, in den Bereich der Technologieplanung. Eine solide Informationsbasis sowie die Auswahl und korrekte Anwendung von passenden Methoden und Bewertungsmaßstäben sind für den Erfolg der Technologieplanung sehr wichtig (Haag, et al., 2011), da die Tragweite der Entscheidungen und die Komplexität der Entscheidung mitunter sehr groß sind. Zur Vorselektion von Handlungsoptionen können einfache, meist qualitative Bewertungsmethoden eingesetzt werden, wie z.B. *Portfolioansätze* (Pfeiffer & Dögl, 1986) oder die integrierte Anwendung von Portfolios auf Basis von quantitativen Bewertungsansätzen (z.B. *Nutzwertanalysen*). Bei der Auswahl von Handlungsoptionen steht aus unternehmerischer Sicht die Betriebswirtschaftlichkeit im Fokus; zur monetären Technologiebewertung kann z.B. die *Kapitalwert- bzw. Cashflow-Methode* oder in Erweiterung hierzu eine *Entscheidungsbaumanalyse* Anwendung finden. Zur Bewertung des Risikos können zudem Ansätze der Investitionsrechnung (bspw. *Amortisationsrechnungen oder Break-Even-Analyse*) hinzugezogen werden. Um die durch die lückenhafte Informationsdichte entstehenden Unsicherheiten zu eliminieren kann eine *Sensitivitätsanalyse* erfolgen (Haag, et al., 2011).

2.3.2 Einzelmethode zur Technologiebewertung

Methoden zur Technologiebewertung sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Entscheidungsfindung für komplexe Fragestellungen durch ein zielgerichtetes Handeln unterstützen, und die Entscheidungsqualität verbessern sollen. Unter Einbeziehung der VDI-Richtlinie 3780 (VDI 3780, 1991), die insbesondere wissenschaftliche, methodische Prinzipien der Technologiebewertung behandelt, werden nachfolgend Einzelmethode zur Technologiebewertung beschrieben. Diese können im Allgemeinen in Bezug auf unterschiedlichste Arbeitsfelder eingesetzt werden.

- **Trendexploration:** es handelt sich hierbei um eine Prognose-Methode, bei der vergangene Entwicklungen als beständig angenommen und in die Zukunft übertragen werden. Hierfür wird der Verlauf einer Zeitreihe einer mathematisch-statistischen Analyse unterzogen und eine Funktion über die Zeit abgeleitet. Diese kann zur Ermittlung zukünftig erwarteter Werte herangezogen werden. Bei dieser Methode werden allerdings keine dynamischen Randbedingungen beachtet.
- **Historische Analogiebildung:** diese Methode geht ebenso wie die Trendexploration von einer Ableitbarkeit zukünftiger Ereignisse auf Basis vergleichbarer, früheren Entwicklungen aus. Auch hier erfolgt keine Beachtung von dynamischen Randbedingungen und die Zulässigkeit der Festlegung des Vergleichskonstruktes ist häufig fraglich.
- **Brainstorming:** diese intuitiv-heuristische Methode dient dem Ideengenerieren, indem ein Personenkreis mit einer Fragestellung konfrontiert wird. Die Einfälle des Personenkreises werden protokolliert, eine Bewertung erfolgt erst nachrangig.
- **Delphie-Expertenumfrage:** diese Ideenfindungs- und Prognosemethode basiert auf der systematischen Erhebung und Auswertung von Meinungen und Zukunftsprognosen von Fachleuten. Diese werden nach ihrer Erhebung zu Hauptaussagen zusammengefasst und den Experten wiederum zur Validation vorgelegt. Der Erfolg dieser Methode ist stark von den befragten Fachleuten abhängig. Von der Mehrheit abweichende Auffassungen werden dieser Methode folgend nicht beachtet.

- **Morphologische Klassifikation:** diese Methode ist eine rational-heuristische Suchmethode. Durch eine systematische Auffächerung von Technologiemerkmale und Merkmalsausprägungen, die durch die Auswertung der möglichen Kombinationen zu unterschiedlichen Systemtypen führt, werden unterschiedliche Lösungsoptionen ermittelt. Es ist eine deskriptive (Übersicht unterschiedlicher Systemtypen) und antizipative Anwendung (Generierung bisher unbekannter Systemtypen aus der Kombination bekannter Elemente) möglich.
- **Relevanzbaum-Analyse:** diese Methode ermöglicht eine problemspezifische Interpretation anhand einer graphentheoretischen Baumstruktur. Hierdurch ist die Bewertung komplexer, mehrstufiger Bedingungsgefüge, ggf. auch mit einer Quantifizierung, möglich. Die Methode kann durch die Darstellung bzw. Strukturierung bekannter Zusammenhänge zudem zur Detektion von unbekanntem Abhängigkeiten beitragen.
- **Risiko-Analyse:** diese Methode ist eine Ausprägung der Relevanzbaum-Analyse. Hier werden technologischen Risiken ihren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie Bedingungen für das Eintreten und Folgen des Eintretens zugeordnet. Durch die Verknüpfung von Subsystemen und ihrer gegenseitigen Beeinflussung wird eine Gesamtrisikoprüfung abgeleitet.
- **Verflechtungsmatrix-Analyse:** diese Methode ermöglicht die Untersuchung wechselseitiger Abhängigkeiten zwischen möglichen Ereignissen. Hierfür werden die Ereignisse sowie ihre gegenseitigen Beeinflussungen in einer Matrix eingetragen.
- **Modell-Simulation:** durch ein mathematisches Verfahren zur modellbasierten Lösung werden in der Modell-Simulation einfache bis komplexe Optimierungsaufgaben gelöst. Dabei wird der Untersuchungsbereich in einem mathematischen Modell abgebildet und unterschiedlichen Bedingungskonstellationen unterworfen. Diese Methode ist insbesondere für vernetzte Systeme geeignet, bei denen die Folgeabschätzung auf Grund der Komplexität nicht intuitiv abschätzbar ist. Es können sich durch unzureichende Datenbestände, Quantifizierung qualitativer Faktoren oder Formalisierung der Zusammenhänge Ungenauigkeiten der Methode ergeben.
- **Szenario-Gestaltung:** diese qualitativ-literarische Methode dient der Beschreibung komplexer Zukunftsszenarien. Dabei wird ein zukünftiger Entwicklungszustand durch die Formulierung expliziter Ausgangsbedingungen beschreiben.
- **Kosten-Nutzen-Analyse:** diese Methode ermöglicht einen wirtschaftlichen Vergleich von Alternativen auf Basis der Umrechnung aller Aufwendungen und Erträge in Geldeinheiten. Somit werden auch sekundäre Effekte und qualitativer Auswirkungen durch Umwandlung in Geldwerte berücksichtigt.
- **Nutzwert-Analyse:** durch die Nutzwert-Analyse können anhand eines entscheidungstheoretischen Modells, das die Gesamtnutzwerte zu vergleichbaren Varianten umfasst, verschiedene Lösungsansätze verglichen werden. Hierfür werden verschiedene Bewertungskriterien festgelegt. Eine Gewichtung der Bewertungskriterien führt zu einem strukturierten, rationalen Wertvergleich.
- **Patentanalyse:** hierdurch erfolgt eine Abschätzung des Reifegrads anhand eines Aktivitätsindex bspw. aus der Summe der Patentanmeldungen zu dem spezifischen Thema
- **Quality Funktion Deployment:** dieses Planungs- und Analyseverfahren dient der systematischen Planung eines Produktes anhand der kunden- und marktseitigen Qualitätsanforderungen. Darüber hinaus werden aus den ermittelten Anforderungen die

zur Herstellung des Zielproduktes notwendigen Qualitätssicherungsmaßnahmen abgeleitet.

- **Rangreihenmethode:** hierdurch erfolgt eine intuitive Beurteilung von Gesamtvarianten durch ihre Sortierung in eine Rangfolge.
- **Sensitivitätsanalyse:** diese Analyse dient der Untersuchung der Verschiebung der Ergebnisse, wenn geringfügige Änderungen in den Annahmeparametern vorliegen. Hierdurch werden die Auswirkungen eines potentiellen Fehlers bei den Annahmen ersichtlich und tragen so zur Reduktion des Einflusses von z.B. wegen zu geringer Informationen auftretender, falscher Annahmen, bei.
- **Wirkungsnetz:** durch Wirkungsnetze erfolgt ein Aufzeigen der z.B. stofflichen oder informellen Verflechtungen zwischen den Prozessen. Hierfür erfolgt eine Detektion der wichtigsten positiven und negativen Einflussfaktoren sowie eine Darstellung der Ursache-Wirkungsbeziehungen bzw. des Aufwands und Nutzen.

2.3.3 Integrative Ansätze zur Technologiebewertung

In Ergänzung zu den beschriebenen Einzelmethoden werden nachfolgend integrative Ansätze zur Technologiebewertung beschrieben. Integrative Ansätze bündeln verschiedene Elemente bewährter Methoden zur Technologieerkennung und -bewertung zu neuen Bewertungsansätzen, um derart eine möglichst systematische sowie ganzheitliche Technologiebewertung zu gewährleisten. Die in Folgenden präsentierten integrativen Ansätze zur Technologiebewertung sind insbesondere für Technologien mit einem sehr geringen Technologiereifegrad entwickelt und sind somit den Anforderungen des Betrachtungsgegenstandes naheliegend.

Kotzab et al., 2006 nutzen zur Evaluierung und Analyse eines phasenspezifischen innerbetrieblichen Logistiksystems eine Kennzahlenanalyse (Data Envelopment Analysis) sowie eine simulationsbasierte Prozessanalyse (Kotzab, et al., 2006). Hierfür werden sehr genaue prozessspezifische Parameter zur Definition des Simulationsmodells benötigt.

Zur Bewertung von Logistiktechnologien im Hinblick auf definierte logistische Prozesse in der Handelslogistik wird von *Auffermann & Lange, 2016* eine Nutzwertanalyse angewendet (Auffermann & Lange, 2016). Diese fußt auf den Ergebnissen eines Technologiescreenings, im Rahmen dessen sie eine Identifikation relevanter Technologien, Sammlung von Technologien, Bewertung der Technologien sowie Beobachtung von Technologien durchführen.

Nach dem Ansatz von *Hieronymus et al., 1996* der auf eine unternehmerische strategische Planung des Technologieeinsatzes ausgelegt ist, erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfs durch Technologiefrüherkennung und eigene Visionen (Hieronymus, et al., 1996). Im Anschluss erfolgt eine Analyse und Prognose durch technologische Konkurrenzanalysen, Bedarfsanalysen und -prognosen sowie Technologieprognosen und eine Ableitung von technologischen Entscheidungsalternativen. Das abschließende Treffen der Technologieentscheidung fußt auf der Bewertung der technologischen Entscheidungsalternativen anhand von Ist- und Soll-Positionierungen (bspw. mittels Technologie-Portfolios oder Stärken-/Schwächen-Profilen).

Brandenburg, 2002 beschreibt einen Ansatz für die unternehmerische Planung und Bewertung von technologischen Produktinnovationen für eine frühe Phase der Produktinnovationsplanung (Brandenburg, 2002). Der Ansatz fußt dabei auf fünf aufeinander aufbauenden Modellen: dem

Vorgehensmodell, dem Zukunftsmodell, dem Informationsmodell, dem Bewertungsmodell und dem Umsetzungsmodell. Das Vorgehensmodell soll dabei eine Abbildung des Planungsprozesses sowie eine ganzheitliche und integrierte Modellierung der frühen Phasen des Produktinnovationsprozesses umfassen. Das Zukunftsmodell soll eine systematische Analyse der Gestaltungsbereiche des Unternehmens sowie eine Identifikation und Modellierung zukünftiger Chancen, Anforderungen und Potentiale, unter Anwendung der Methode Quality Function Deployment, beschreiben. Das Informationsmodell soll eine Strukturierung der planungs- und bewertungsrelevanten Informationen in Form einer Wissensbasis umfassen und Informationen, die bei der Planung der Zukunftsprojekte (Produktideen, Innovationsvorhaben) nötig sind, speichern. Das Bewertungsmodell umfasst schließlich ein Bewertungssystem auf Basis entscheidungstheoretischer Algorithmen zur Verbesserung der Entscheidungsqualität sowie eine adäquate und effektive Priorisierung und Terminierung von Innovationsvorhaben unter Anwendung einer multikriteriellen Bewertung. Das Umsetzungsmodell soll die Zusammenführung der Planungs- und Bewertungsergebnisse in Innovations-Roadmaps umfassen und eine Handlungsorientierung für die Umsetzung der Produktideen im weiteren Verlauf des Innovationsprozesses bieten. Dieser Ansatz dient somit insbesondere der Planung und Bewertung verschiedener Produktideen.

Im Ansatz zur ganzheitlichen Technologiebewertung von *Hall, 2002* werden im Rahmen der Exploration Daten über neue Kundenanforderungen oder potentielle Konkurrenzaktivitäten sowie Informationen über die zu bewertende Technologien gesammelt (Hall, 2002). Im Rahmen der Bewertung werden Informationen aus der Explorationsphase verarbeiten und interpretieren. Im Ergebnis wird eine Matrix ausgegeben, in der die Kundenanforderungen den charakterisierenden Merkmalen der zu betrachtenden Technologie gegenübergestellt werden. Charakteristische Merkmale sind Prozessdimensionen, Strukturaspekte, Wirtschaftlichkeit, Gesellschaftsaspekte und Umweltaspekte. Eine Technologie wird dabei durch die Prozessdimensionen Flexibilität, Produktivität, Verfügbarkeit, etc. charakterisiert. Strukturaspekte geben technische und physikalische Aspekte der Technologie wieder. Die Wirtschaftlichkeit beschreibt Auswirkungen einer Technologie auf die Kosten- und Gewinnstruktur des Unternehmens. Der Gesellschaftsaspekt beschreibt Auswirkungen einer Technologie auf soziale Systeme und der Umweltaspekt Auswirkung einer Technologie auf die Umwelt und ihre Ressourcen.

Kröll, 2007 beschreibt einen Ansatz zur Technologiebewertung zur Planung des Technologieeinsatzes für frühe Phasen in der Produktentstehung von Elektronikprodukten, der aber auf andere Branchen und Bereiche übertragbar ist (Kröll, 2007). Der Ansatz stützt sich auf eine Bewertung des Reifegrades von Technologien im Hinblick auf einen erfolgreichen Einsatz in der späteren Serienentwicklung und folgt den Stufen Analyse und Abbildung, Technologiebeschreibung, alternative Technologiemodelle, Technologiebewertung sowie Umsetzung. In der Analyse und Abbildung von Produktfunktionen erfolgt eine systematische Analyse sowie die Erfassung und Beschreibung der umzusetzenden Funktionen eines Produkts. Das Modell zur Technologiebeschreibung umfasst die Überführung der Funktionen in ein Funktionsmodell, die Auswahl von Technologieelementen zur Erfüllung der Funktionen, die Vernetzung der Technologieelemente und die Spezifikation der Technologieelemente. Im Rahmen der Abbildung alternativer Technologiemodelle erfolgt die Darstellung verschiedener Technologiealternativen in entsprechenden Technologiemoellen. Das Modell zur

Technologiebewertung umfasst die Definition der Bewertungskriterien, die Durchführung der Bewertung, die Zusammenführung der Bewertungsergebnisse zu einer multikausalen Aussage und die Interpretation der Aussage. Im Rahmen der Umsetzung einer Technologiealternative erfolgt der Einsatz der Technologiealternative als Produkt. Zur Gegenüberstellung der einzelnen Alternativen dient im Ansatz nach Kröll, 2007 eine multikriterielle Bewertung der Technologien bzgl. Qualität, Flexibilität, Kosten und technologischem Reifegrad

Dem Ansatz nach *Oberschmidt, 2010* zur Bewertung für Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme folgend findet zunächst die Klärung der Problemstellung statt (Oberschmidt, 2010). Nachfolgend erfolgt die Festlegung der Optionen sowie Auswahl der Kriterien. Danach wird eine Bestimmung der Kriterien-Ausprägungen je Option sowie eine Gewichtung der Kriterien vorgenommen und es erfolgt eine Aggregation zur Gesamtbewertung je Option. Diese werden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen und in Handlungsempfehlungen überführt.

2.3.4 Bewertung der Einzelmethoden und integrativen Ansätze

Die dargelegten Methoden und integrativen Ansätze werden nachfolgend anhand der unter 2.2.6 beschriebenen Anforderungen bewertet.

Anforderung 1 wird durch die Analyse der Methode bzw. des Ansatzes hinsichtlich ihrer Eignung zur *Technologiefrüherkennung* bewertet. Anforderung 2 wird durch die Analyse der Methode bzw. des Ansatzes hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Szenarien und die Bewertungsmöglichkeit von spezifischen Szenarien (*Szenariobezug*) und Anforderung 3 durch die Analyse der Methode bzw. des Ansatzes hinsichtlich der *Qualität* der Bewertung mit Blick auf die Integration qualitativer sowie quantitativer Analyseelemente sowie einer multikriteriellen Analyse bewertet. Anforderung 4 wird durch die Analyse der *Systematik* der Methode bzw. des Ansatzes hinsichtlich der Definition einer strukturierten Analyse und einer Toolunterstützung bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung der Einzelmethoden sind in Tabelle 3 dargestellt.

<i>Methode / Ansatz</i>	<i>Technologiefrüh- erkennung</i>	<i>Szenariobezug</i>	<i>Qualität</i>			<i>Systematik</i>	
			<i>Qualitative Analyse</i>	<i>Quantitative Analyse</i>	<i>Multikriterielle Analyse</i>	<i>Strukturiertes Konzept</i>	<i>Tool- unterstützung</i>
<i>Trendexploration</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Historische Analogiebildung</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Brainstorming</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Delphi-Expertenumfrage</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Morphologische Klassifikation</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Relevanzbaum-Analyse</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Risiko-Analyse</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Verflechtungsmatrix- Analyse</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Modellsimulation</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Szenario-Gestaltung</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Kosten-Nutzen-Analyse</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Nutzwert-Analyse</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Patentanalyse</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Quality Funktion Deployment</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Rangreihenmethode</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Sensitivitätsanalyse</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Wirkungsnetze</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

: Merkmal nicht ausgeprägt : Merkmal teilweise ausgeprägt : Merkmal ausgeprägt

Tabelle 3: Bewertung der Einzelmethoden zur Technologiebewertung

Die Untersuchung der Methoden aus den Bereichen Technologiefrüherkennung und -planung als Instrumente des strategischen Technologiemanagements zur Unterstützung von Technologieentscheidungen ergab, dass keine der analysierten Einzelmethoden den Anforderungen an eine szenariobasierte Analysesystematik zur Technologiebewertung von flurfreien Containertransportsystemen gerecht wird. Dies bedeutet allerdings nicht, dass sie nicht in einem integrativen Ansatz Verwendung finden können.

Die relevanten, bekannten integrativen Ansätze zur Technologiebewertung wurden unter denselben Gesichtspunkten wie die Einzelmethoden bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung der Einzelmethoden sind in Tabelle 4 dargestellt.

Methode / Ansatz	Technologie- erkennung	Szenariobezug	Qualität			Systematik	
			Qualitative Analyse	Quantitative Analyse	Multikriterielle Analyse	Strukturiertes Konzept	Tool- unterstützung
<i>Kotzab et al., 2016</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Auffermann & Lange, 2016</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ansatz nach Hieronymus et al., 1996</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Ansatz nach Brandenburg, 2002</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Ansatz nach Hall, 2002</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Ansatz nach Kröll, 2007</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>Ansatz nach Oberschmidt, 2010</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

: Merkmal nicht ausgeprägt
 : Merkmal teilweise ausgeprägt
 : Merkmal ausgeprägt

Tabelle 4: Bewertung der integrativen Ansätze zur Technologiebewertung

Die Untersuchung der integrativen Ansätze zur Technologiebewertung ergab, dass diese den umfassenden Anforderungen nicht gerecht werden. Der Ansatz von *Kotzab et al., 2016* fokussiert auf einen deutlich späteren Einsatz der Bewertung als es für den Untersuchungsgegenstand dienlich ist – entsprechend können keine validen Zahlen zur Kennzahlenanalyse und simulationsbasierten Prozessanalyse erhoben werden. Der Ansatz von *Auffermann & Lange, 2016* orientiert sich stark an einer Bewertung des Einsatzes bekannter Technologien für einen Anwendungsfall und ist somit ebenfalls nicht ausreichend für den Anwendungsfall geeignet. Beim Ansatz nach *Hieronymus et al., 1996* fehlt insbesondere der Szenariobezug und eine Bewertung einer Technologie ausschließlich anhand von Technologieportfolios ist für den Anwendungsfall nicht ausreichend. Auch beim Ansatz nach *Brandenburg, 2002* fehlt insbesondere der Szenariobezug, da er sich eher auf eine unternehmerische Produktplanung als auf eine

Technologiebewertung konzentriert. Ebenso fehlt bei *Hall, 2002* insbesondere der Szenariobezug und weiterführend sind die Bewertungsmuster nicht auf einen dem Anwendungsfall entsprechende Bewertung ausgelegt. Der Ansatz nach *Kröll, 2007* umfasst weder eine Technologieerkennung, noch ist dieser zur Umsetzung in einem Tool besonders geeignet und ist entsprechend ebenfalls nicht für den Anwendungsfall nutzbar. Der Ansatz nach *Oberschmidt, 2010* beschränkt sich auf Grund des Themenbereichs Energieversorgung auf die Auswahl der Optionen und Alternativen auf die bereits eingesetzten, verfügbaren bzw. technisch machbaren Alternativen der regenerativen Energieversorgung und es ist keine Technologiefrüherkennung integriert. Entsprechend ist keiner der untersuchten, relevanten integrativen Ansätze zur Technologiebewertung für die szenariospezifische Bewertung flurfreier Transportsysteme geeignet.

2.3.5 Ableitung des Forschungsbedarfes

Seit den 1950er Jahren hat die Containerisierung die Effizienz des intermodalen Transports erhöht und den Wettbewerb zwischen den Seehäfen intensiviert (Nuhn, 2010), (Wan, et al., 2013). Die Containersierung veränderte das Gesamtgefüge der hafenumgebenden Wirtschaft und Struktur, da eine ladungsträgerspezifische Konzentration erfolgte und die technischen Hilfsgeräte so speziell an die Möglichkeiten der Handhabung der standardisierten Behälter ausgerichtet werden konnten (Hall, 2007).

Das Wachstum des internationalen Handels und das Wachstum der per Containerschiff transportierten Warenmengen stellt das intermodale Transportsystem vor große Herausforderungen. Wie obenstehend beschrieben ist, liegt der Engpass der intermodalen Ketten dabei nicht in der Schnittstelle zwischen Schiff und Hafen sondern vielmehr in der Schnittstelle zwischen Hafen und Hinterland (Heaver, 2006) sowie in der Anpassung der Lagerkapazitäten zur Entkopplung der seeseitigen und landseitigen Transportaufkommen. Ergänzend hierzu ist festzustellen, dass die Zunahme der Schiffsgrößen und die damit einhergehende Konzentration von Umschlagsmengen in bestimmten Zeitfenstern sowie der gleichzeitige Wettbewerbsdruck, der eine möglichst kurze Liegezeit der Schiffe erforderlich macht diesen Effekt noch verschärfen²⁰. Aus den in den Kapiteln 2.1.1 bis 2.2.4 beschriebenen Gegebenheiten ist ein erhöhter, flexibler Lagerflächenbedarf in den Containerterminals abzuleiten. Hierfür bedarf es einer Expansion bestehender Flächen. Um für die landseitigen Logistikprozesse in Containerhäfen langfristig effektive Lösungen unter den o.g. Rahmenbedingungen zu ermöglichen, bedarf es somit im Grundsatz der Flexibilisierung und Erweiterung der containerabführenden Prozesse. Insbesondere vor dem Hintergrund einengender umgebender Strukturen, wie bspw. Hafenstädte, sowie der unzulänglichen Eignung herkömmlicher Containertransportsysteme für den Transport über längere Strecken (vgl. Kapitel 2.1.5) müssen, wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben prozessuale

²⁰ Aus einer Pressemitteilung der EUROGATE-Gruppe vom 02.08.2018: „Großcontainerschiffe mit einer Ladekapazität von mittlerweile 20.000 TEU und mehr stellen die Containerterminals vor große Herausforderungen. Ihr zunehmender Einsatz führt zu deutlich höheren Belastungsspitzen für Mensch und Material beim Umschlag. Da die Zahl der zu bewegenden Container pro Schiff steigt, sind nicht nur die Containerbrücken und Straddle Carrier nebst ihren Bedienern einer höheren Belastung ausgesetzt. Auch das Terminalgelände und die staatlichen Infrastrukturen wie Bahn und Straße zur Hinterland-Anbindung werden durch den Umschlag stärker in Anspruch genommen. [...]“

und technische Lösungen gefunden werden, die die herkömmliche Infrastrukturebene nicht weiter belasten und trotzdem eine seehafennahe Expansion auf zur Verfügung stehende Flächen ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund liegt der vorliegenden Arbeit die Überlagerung des Subsystems *Containerterminal* und einer Technologie zum *flurfreien Containertransport* zugrunde. Hieraus ergibt sich der Betrachtungsgegenstand zu einem technologischen System, welches dem Transport von Standardseecontainern ausgehend von bzw. eingehend in oder innerhalb eines Containerterminals dienen soll und dabei eine andere als die konventionelle Infrastrukturebene nutzt.

In der Literatur und in populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen sind bereits verschiedene Technologien beschrieben, die hierfür eingesetzt werden können, jedoch fehlt bisher die Definition einer Systematik, die einen Bewertungsansatz liefert, mit dessen Hilfe eine szenariospezifische Einschätzung des Einsatzpotentials von Technologien, die einen flurfreien Containertransport ermöglichen, erfolgen kann. Die bestehenden Methoden und Ansätze liefern keine ausreichend auf die Anforderungen abgestellte Lösung. Ein Analysetool, mit dem die Möglichkeit des Einsatzes eines technischen Systems zum flurfreien Containertransport aus technischer Sicht bewertet werden kann, ist in der wissenschaftlichen Literatur bisher nicht beschrieben. Hieran knüpft der Forschungsbedarf an, dem sich die vorliegende Arbeit widmet. Um diese Fragestellung zu bearbeiten gilt es eine entsprechende Systematik zu entwickeln, der eine ebenfalls zu entwickelnde allgemeingültige Klassifizierung für Technologien zum flurfreien Containertransport zu Grunde liegt. Die Systematik zur Technologiebewertung sowie die hiermit verbundenen Bewertungsparameter müssen abgeleitet und werden und die Anwendung exemplarisch evaluiert werden. Ein zu entwickelndes Analysetool integriert die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit.

3. Identifikation und Analyse von Technologien zum flurfreien Containertransport

Zur Identifikation von Technologien, die einem flurfreien Transport von Containern dienen erfolgt in diesem Kapitel eine systematische Suche. Dies erfolgt durch die Festlegung von Klassen und ihren Ausprägungen, die unterschiedliche Ausgestaltungsvarianten eines technologischen Systems definieren und eine anschließende morphologische Analyse (Methodenauswahl auf Basis von Tabelle 3). Den Ergebnissen der methodischen Identifikation werden im Anschluss Technologien bzw. technische Konzepte zugeordnet, die die jeweiligen Varianten repräsentieren und auf den genannten Einsatzzweck passen oder transferiert werden könnten. Das Kapitel umfasst abschließend eine klassenbasierte Bewertung der Suchergebnisse.

3.1 Technologiesuche

In der wissenschaftlichen Literatur wurden weltweit bereits verschiedene Technologieansätze zu automatisierten Containertransportsystemen beschrieben, u.a. (Yang, et al., 2004), (Hwan, et al., 2012), (Ioannou & Jula, 2008), (Binsbergen, et al., 2014), (Rijsenbrij, et al., 2006). *Hwan et al., 2012, Ioannou & Jula, 2008* und *Binsbergen et al., 2014* beschreiben Technologien, die dem automatisierten Containertransport dienen und insbesondere auf dem Terminal zum automatisierten Transport der Container zwischen den Funktionsbereichen 1 und 2 sowie 2 und 3 eingesetzt werden können (vgl. Abbildung 3). Einen aktuellen Überblick über Systeme, die über die Terminalgrenzen hinausgehen bietet insbesondere der Journalbeitrag von *Shin, Roh und Hur* mit dem Titel *Technical Trends Related to Intermodal Automated Freight Transport Systems (AFTS)* (Shin, et al., 2018). Die in den genannten Beiträgen detektierten Technologien und Rechercheergebnisse werden jeweils anhand unterschiedlicher Merkmale klassifiziert: *Hwan et al.* differenzieren die Nutzung automatischer Fahrzeuge, die auf dem Antrieb durch Linearmotoren basieren, von Shuttles an Hängebahnen und von automatisierten Lagersystemen. *Ioannou & Jula, 2008* nutzen die gleichen Gruppen wie *Hwan et al., 2012* und ergänzt diese durch die Kategorie der Nutzung von AGVs. *Shin et al., 2018* beschreiben die Arbeitsweise der untersuchten Technologien anhand der Merkmale Erfinderland, Transportebene, Transportmethode, Antriebsart, Steuerungssystem, Beladungstechnologie, Transportgüter, Antriebssystem und Kommerzialisierungslevel; wohingegen *Binsbergen et al., 2014* die Systeme entsprechend der genutzten Basismodalität nach Schienen- und Binnenschiffahrtssystemen sowie „neue Modalitäten: Combi-Road und Underground Logistic System“ kategorisiert. Bei *Rijsenbrij et al., 2006* finden sich ebenfalls die Kategorien Shuttles an Hängebahnen und Nutzung von AGVs, die durch die Kategorien automatisierte Trucks und Multitrailer-Systeme, automatisierte Züge und automatisierte, gekapselte Systeme für Container und Paletten ergänzt werden. Um die Zielstellung der vorliegenden Arbeit zu treffen, ist die Nutzung der Kategorisierung der beschriebenen Arbeiten nicht hinreichend.

3.1.1 Morphologische Analyse

Für die Suche nach *automatisierten, flurfreien Containertransportsystemen* erfolgt zunächst die Definition der im Folgenden morphologisch zu analysierenden Klassifikationsmerkmale. Diese lehnen sich teilweise an die o.g. Klassifikationen an.

Die *Transportebene* (Merkmal 1) soll gemäß der Definition von „flurfrei“ auf Seite 1 nicht in der gleichen Ebene liegen wie die, in der die herkömmlich genutzte Infrastruktur verläuft. Im Querschnitt der Topologie eines Siedlungsraumes verbleiben damit für die Nutzung die Ebenen „überirdisch“ oder „unterirdisch“ (siehe Abbildung 31). Ein weiteres Merkmal ist die *Fahrwegausgestaltung* (Merkmal 2), die entweder „fest“ oder „flexibel“ sein kann. Ein flexibler Fahrweg kann sowohl eine Variation der Verlaufsbahn der Containerbewegung zwischen dem Start- und dem Zielpunkt und/oder eine Verlagerung des Start- und/oder Zielpunktes bedeuten. Bei einem starren Fahrweg sind somit sowohl Start- und Zielpunkt, als auch die Verlaufsbahn nicht ohne größere Maßnahmen änderbar. Das dritte Merkmal ist der *Antriebsort* (Merkmal 3), welcher „global“, also an einem zentralen Ort aufgestellt und an allen Antriebseinheiten wirkend, oder „lokal“, also an den einzelnen Antriebseinheiten montiert und wirkend, sein kann – hiermit wird festgelegt, ob das System selbst den Antrieb bewerkstelligt oder ob es bewegt wird.

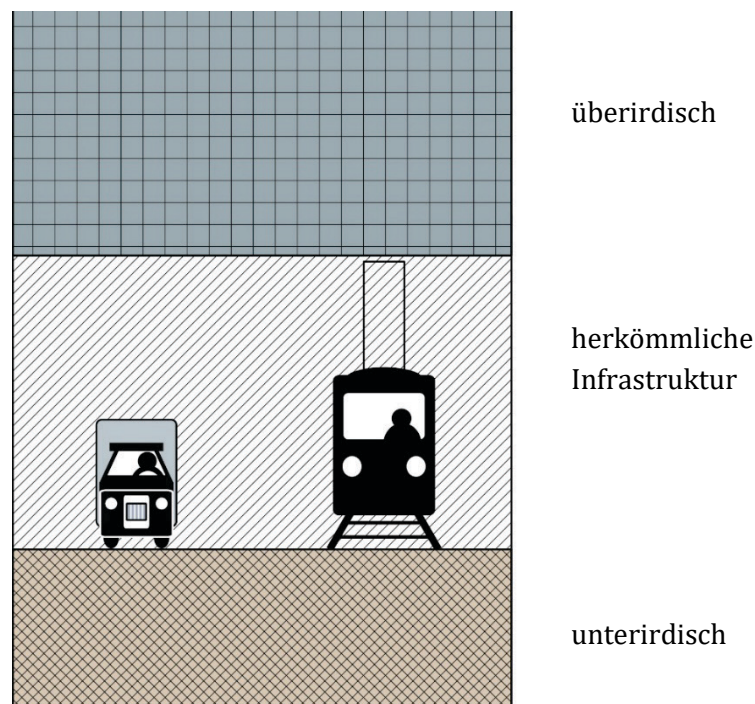


Abbildung 31: Transportebenen

Die Klassifikationsmerkmale und die zugehörigen Ausprägungen werden folgend mit einander kombiniert, um so verschiedene Ausgestaltungsvarianten zu identifizieren. Entsprechend ergibt sich der morphologische Kasten und die hieraus abgeleiteten Variationsmöglichkeiten gemäß Tabelle 5.

<i>Transportebene</i>	über-irdisch	über-irdisch	über-irdisch	über-irdisch	unter-irdisch	unter-irdisch	unter-irdisch	unter-irdisch
<i>Fahrwegausgestaltung</i>	fest	fest	flexibel	flexibel	fest	fest	flexibel	flexibel
<i>Antriebsort</i>	global	lokal	global	lokal	global	lokal	global	lokal
<i>Variationsmöglichkeit</i>	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabelle 5: Variationsmöglichkeiten der systematischen Kombination der Merkmale 1-3

3.1.2 Analyseergebnis

Die nachfolgende Tabelle enthält für die Variationsmöglichkeiten, die sich aus der systematischen Technologiesuche ergeben, und jeweils konzeptionelle Beispiele, die diesen folgen. Diese stellen das Rechercheergebnis zu passenden Technologien dar und werden im Anschluss in den Teilkapiteln 3.2.1 bis 3.2.20 entsprechend der zur Verfügung stehenden Informationen beschrieben und anschließend weiterführenden Analysen unterzogen. Die Technologien wurden mittels einer Internetrecherche, einer Recherche wissenschaftlicher Artikel sowie einer Patentrecherche ermittelt. Auf Grund der großen Anzahl derartiger Systeme und den teilweise geringen Unterschieden zwischen den Ansätzen wird eine repräsentative Auswahl der Systeme beschrieben, die die Vielfalt entsprechender Innovationen widerspiegelt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Alle recherchierten Technologien konnten eindeutig in das Untersuchungsschema einsortiert werden.

<i>Variations- möglichkeit</i>	<i>Transport- ebene</i>	<i>Fahrweg- ausgestaltung</i>	<i>Antriebsort</i>	<i>Technologien / technologische Konzepte</i>	<i>Abschnitt</i>
1	überirdisch	fest	global	Containerseilbahn	3.2.1
2	überirdisch	fest	lokal	RailCab, Container-Magnetschwebbahn, Containerbahn, SkyTech, Concar, EagleRail, GRail, Freight Shuttle System, ACT AutoCon, automatisierte konventionelle Containertransportsysteme	3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 3.2.6 3.2.7 3.2.8 3.2.9 3.2.10 3.2.11 3.2.12
3	überirdisch	flexibel	global	Wurfmaschine	3.2.13
4	überirdisch	flexibel	lokal	Cargo Lifter, Drohne	3.2.14 3.2.15
5	unterirdisch	fest	global	Tube Cargo Express	3.2.16
6	unterirdisch	fest	lokal	Underground Container Mover, Cargo Cap, Underground Automated Trucks, Pipelines	3.2.17 3.2.18 3.2.19 3.2.20
7	unterirdisch	flexibel	global	<i>Flexibler Fahrweg unterirdisch nicht möglich</i>	
8	unterirdisch	flexibel	lokal	<i>Flexibler Fahrweg unterirdisch nicht möglich</i>	

Tabelle 6: Systematische Technologiesuche

3.2 Technologiebeschreibungen

Nachfolgend werden die ermittelten Technologien zum flurfreien Containertransport beschrieben. Die Beschreibung ist jeweils eine Zusammenfassung der recherchierten Informationen.

3.2.1 Containerseilbahn

Die meisten Seilbahnen werden für den Transport von Personen in Bergregionen eingesetzt. Der Einsatz von Materialeiseilbahnen erfolgt insbesondere dann, wenn wiederkehrend große Lasten auf einer definierten Strecke (bspw. Mienenabraum) oder u.a. auch sehr große Lasten an schwer erreichbare Orte (Bergbaustelle) transportiert werden sollen (Sedivy, 2012). Eine Seilbahn definiert sich grundsätzlich als ein Transportsystem, bei dem der Antrieb mittels Seil gewährleistet wird. Im Allgemeinen unterscheidet man (a) Stand- und (b) Luftseilbahnen (Sedivy, 2012); wobei insbesondere die Nutzlastbereiche sowie die Installationsmöglichkeiten und Installationskosten stark von dem gewählten Seilbahnsystem abhängig sind. Standseilbahnen (a) verfügen über eine Substruktur, auf der Gleise montiert sind und über die die Wagen vorangezogen werden. Sie können grundsätzlich größere Lasten aufnehmen, die Gegebenheiten des zu überwiegenden Geländes sind auf die Substruktur der Standseilbahn stark einflussgebend. Demgegenüber erfolgt die Lastaufnahme bei Luftseilbahnen (b) mittels eines zwischen Pylonen aufgespannten Seils – hierdurch erfolgt eine große Entkopplung von den Gegebenheiten des zu überwiegenden Geländes. Eine Seilbahn, die für den Containertransport ausgelegt ist, wurde konzeptionell umgesetzt, modellhaft umgesetzt und die Funktionalität nachgewiesen (Fahrbach, et al., 2010); eine Lösung am Markt ist derzeit nicht bekannt.

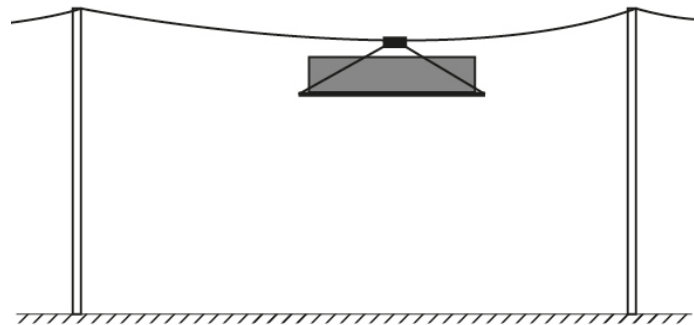


Abbildung 32: Containerseilbahn, schematische Darstellung

3.2.2 RailCab

Das RailCab System wurde an der Universität Paderborn ursprünglich für den Personentransport mit Geschwindigkeiten bis 160 km/h entwickelt. Die autonom fahrenden Einzelfahrzeuge (RailCabs) transportieren entsprechend des anstehenden Bedarfs und nicht nach einem definierten Zeitplan. Der Antrieb des Systems erfolgt mittels Linearantrieb; hierdurch kann eine hohe Schubkraft für die Beschleunigung und Steigfähigkeit erzeugt werden. Übertragen werden soll diese Leistung per Stromschienen. Des Weiteren zeichnet sich das System besonders durch die Nutzung von passiven Weichen aus. Die Wahl der Strecke wird durch sich bewegende Achsen

erreicht. Durch die zwei zuvor genannten Elemente (Linearantrieb und passive Weichen) tritt nur ein sehr kleiner Verschleiß an den antreibenden Systemen und den Rädern auf (Henke, et al., 2007). Das System wurde in einem Modell an der Uni Paderborn aufgebaut und getestet.

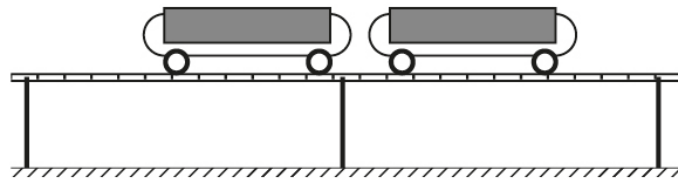


Abbildung 33: RailCab, schematisch Darstellung

3.2.3 Container-Magnetschwebbahn

Am CSULB - College of Engineering, USA (James, 2008), wurde die Entwicklung eines Gütertransportsystems mittels Magnetschwebbahntechnik vorangetrieben, welches insbesondere auch für den Transport von 20 und 40ft. Containern ausgelegt ist (siehe Abbildung 34). Die Magnetschwebbahntechnik wurde ursprünglich von Siemens und Krupp im Rahmen des Joint Ventures „Transrapid“ entwickelt. Die Wagen „schweben“ über der Substruktur; der Vortrieb wird über die Abstoßung von an den Seiten der Substruktur installierten Leitmagneten gewährleistet; dabei können technisch sowohl die Wagen, als auch die Substruktur das aktive Element des Systems bilden.

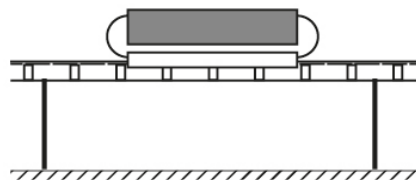


Abbildung 34: Transrapid Maglev System zum Containertransport, schematische Darstellung

Das Konzept der CSULB zum Containertransport mittel Magnetschwebbahn wurde von der auf den Personentransport ausgelegten Technologie abgeleitet und sieht eine Transportgeschwindigkeit von 5 Meilen pro Stunde (ca. 8 km/h) vor. Im Jahre 2006 wurde das Konzept zu Präsentationszwecken auf einer Teststrecke umgesetzt und konnte erfolgreich den Transport eines 20ft. Containers zeigen. Der Betrieb eines Container-Magnetschwebbahnsystems kann fahrerlos erfolgen. Ein besonderer Vorteil der Magnetschwebbahntechnik liegt nach *James, 2008* in der geringen Druckbelastung der Führungsbahninfrastruktur. Der reibungsfreie Transport ermöglicht zudem große Beschleunigungswerte. Auch weist die Magnetschwebbahntechnik ein sehr gutes Nutzlast-zu-Wagen-Gewichtsverhältnis auf. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für den Hafen von Los Angeles wurde ein Kostenrahmen für die Installation und den Betrieb einer Magnetschwebbahn, mit der täglich bis zu 5.000 Container transportiert werden könnten und die zur Anbindung des Hafens an eine naheliegende Logistikzone dient, ermittelt und herkömmlichen Modalitäten gegenübergestellt.

3.2.4 Containerbahn

Im Patent US3735710 A (Hickman, 1973) wird ein System zum automatisierten Transport beschrieben, welches die Fahrzeuge auf einer speziellen, mit Antriebseinheiten ausgerüsteten Strecke fortbewegt. Das Patent EP1826153 B1 (Grilli, 2008) greift dies auf – hierin wird eine Technologie beschrieben, die insbesondere Container automatisiert transportieren können soll. Dabei soll eine eigene, aufgeständerte Spur installiert werden, die aus einer überdachten und mit Seitenwänden versehenen Strecke (Hallenartig) besteht und mit einer Vielzahl einzelner Antriebsmodulen ausgerüstet ist. Die Container sollen mittels Einschiebeplatten auf die Strecke gebracht und dann automatisiert zum Endpunkt transportiert werden.

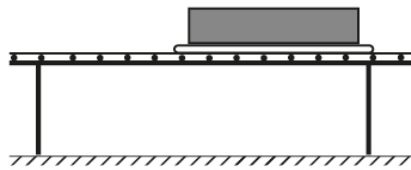


Abbildung 35: Containerbahn, schematische Darstellung

3.2.5 SkyTech

SkyTech beschreibt ein Konzept zum Containertransport, bei dem der Yard Bereich derart überbaut ist, dass Spreadersysteme flexibel über die Fläche manövrieren und von jedem Stapel Container entnehmen können (Skytech Transportation, 2017).

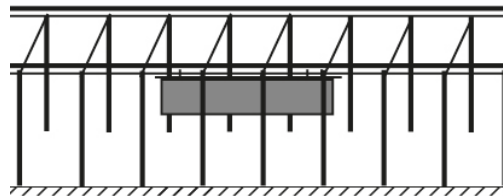


Abbildung 36: Skytech, schematische Darstellung

3.2.6 Concar

Das Concar-System basiert auf einer Schwerlast-Elektrohängebahn (EHB) und wurde auf Basis eines Transportsystems für Beton weiterentwickelt. Mittels zweier Hängekatzen werden die Container hängend vom ConCar-System selbstständig aufgenommen. Die Fahrspur besteht aus einer aufgeständerten Trasse (Arold & Rall, 1996).

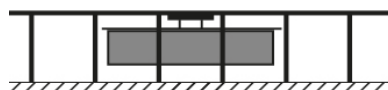


Abbildung 37: Concar, schematische Darstellung

3.2.7 EagleRail

Das EagleRail System basiert auf einer vorinstallierten Infrastruktur, an der an Schienensystemen Transporteinheiten angebracht sind, die Container hängend transportieren können. Eine flexible Streckenführung soll mittels Weichen ermöglicht werden. Derzeit ist eine Umsetzung in Kooperation mit ZPMC für eine 700m lange Transportstrecke im Chittagong-Hafen in Bangladesch in Planung (Margaronis, 2018).

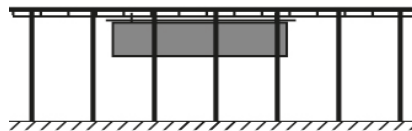


Abbildung 38: EagleRail, schematische Darstellung

3.2.8 GRail

Das „Overhead Grid Rail-System“ (GRail) System basiert auf einer vorinstallierten Infrastruktur, an der an Schienensystemen Transporteinheiten angebracht sind, die Container hängend transportieren können. Zum Transport dient eine sog. „Overhead Container Spreader Bar“. Das System wurde 1988 von Sea-Land und AugustDesign erfunden. Die Shuttles fahren mit bis zu 23 Fuß pro Sekunde. Eine vollständige Installation erfolgte bisher nicht; allerdings wurde ein reduziertes System in Hongkong installiert, das aufgrund der geringen Lohnkosten manuell und nicht automatisiert gesteuert wird (Ioannou & Jula, 2008), (Schönemann & Plattner, 2012).

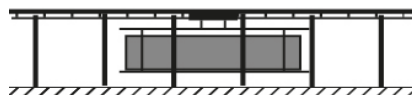


Abbildung 39: GRail, schematische Darstellung

3.2.9 Freight Shuttle System (FSS)

Das Freight Shuttle System besteht aus einem speziellen Schienennetz und autonomen Transporteinheiten, die mittels LIM Technologie angetrieben werden. Je Transporteinheit kann ein Container oder Trailer aufgenommen werden (Texas A&M Transportation Institute, 2018).

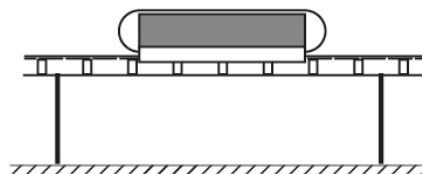


Abbildung 40: Freight Shuttle System, schematische Darstellung

3.2.10 ACT

Das ACT System wurde entwickelt, um zwischen Tanjung Perak Port und Teluk Lamong Port eingesetzt zu werden (11km) und sollte 2013-2015 installiert werden. Der automatische Transport sollte mittels elektrisch betriebener Transporteinheiten erfolgen, die gummibereift, hängend auf einer mehrspurigen Einschienenbahn fahren sollten. Aufgrund von Machbarkeitsproblemen ist das Projekt derzeit ausgesetzt (Jakarta Globe, 2013).

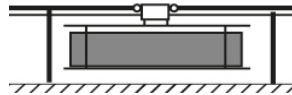


Abbildung 41: ACT, schematische Darstellung

3.2.11 AutoCon

Im Rahmen von Forschungsaktivitäten wurde das Auto-Con-System am Korea Transport Institute entwickelt. Es umfasst Wagen auf Gleisen, die mittels Induktion angetrieben werden. Die Wagen sollen durch eine flexible Speicherstruktur der Strecke, die eine Verdrehung der Container um 90 Grad ermöglicht, während der Fahrt bei 0,8 m/ s entladen werden. Die Verdrehung von einem Längs- auf einen Quertransport soll auch eine bestmögliche Anpassung an das zu überquerende Gelände ermöglichen. Die Maximalgeschwindigkeit des Systems beträgt 56 km/h (Hwan, et al., 2012) (The Korea Transport Institute, 2011).

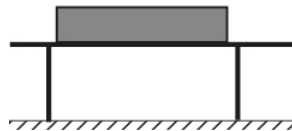


Abbildung 42: AutoCon, schematische Darstellung

3.2.12 Automatisierte, konventionelle Containerfahrzeuge (AKCTS)

Die Automatisierung konventioneller Containertransportsysteme wurde in den vergangenen Jahrzehnten zunächst insbesondere auf ausschließlich für den automatisierten Transport freigegebenen Terminalflächen vorangetrieben (Yang, 2017). Dabei kommen für den horizontalen Containertransport sowohl selbstverständlich AGV, als auch automatisierte Van Carrier und automatisierte Multitrailerzüge (MTT) in Frage. In der wissenschaftlichen Literatur sind vielfältige Untersuchungsansätze zu automatisierten Containerfahrzeugen zu finden. Nach Definition dieser Arbeit sind konventionelle Containerfahrzeuge der untersuchten Gruppe der „flurfreien Containertransportsysteme“ zuzuordnen, wenn sie eine brückenmäßige Infrastruktur nutzen und somit die bestehende Infrastruktur nicht durch sie genutzt wird. Bei der Auf- und Abfahrt auf ein Brückenbauwerk ist für derartige Systeme zu beachten, dass sie nur für die Überwältigung geringer Steigwinkel gebaut sind. Entsprechend ist die Auffahr- bzw. Abfahrrampe derart auszugestalten, dass die Systeme diese sicher überwinden können.

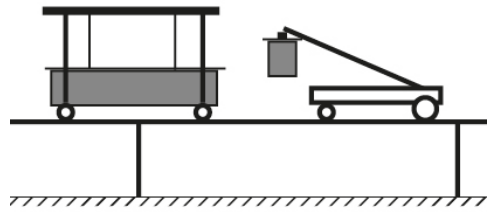


Abbildung 43: Automatisierte, konventionelle Containertransportsysteme (Van Carrier und Reach Stacker), schematische Darstellung

3.2.13 Wurfmaschine

Es liegen keine konkreten Konzepte vor, die den Transport eines Containers mittels globalem oder lokalem Antrieb auf einer flexiblen Bahn durch den Luftraum ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Ideen, die dieser Ausgestaltungsvariante entsprechen, als „Wurfmaschine“ bzw. „Drohne“ bezeichnet. Eine Wurfmaschine kommt für einen sicheren Transport nicht in Frage, wohingegen die Befähigung eines Containers zum Fliegen durchaus eine neue Transportebene nutzbar machen würde.

3.2.14 Cargo Lifter

Die ursprüngliche Idee des „CargoLifters“ ist der Transport schwerer Lasten, wie z.B. Turbinen oder Flugzeugteile, mittels Luftschiff (insb. Projektgeschäft). An der Entwicklung beteiligten sich viele namhafte Unternehmen und ein geringer skaliertes Prototyp wurde 1999 erfolgreich getestet. Nachdem das Unternehmen 2002 Insolvenz anmelden musste, werden heute unter dem Begriff „CargoLifter“ wieder Produkte angeboten, die einen Transport von Lasten mittels Ballonen und Luftschiffen ermöglichen. Die Nutzlastbereiche von Ballonen liegen dabei bei maximal 40 Tonnen; die Transportdistanzen bei maximal ca. 25km, wobei die Systeme windengezogen oder motorisiert sein können. Die Luftschiffe sind für den Transport von Nutzlasten von mehr als 80 Tonnen über bis zu 500 km ausgelegt. Insbesondere der direkte, flexible Transport großer und/oder schwerer Produkte vom Hersteller zum Bestimmungsort ist ein großer Vorteil dieser Transporttechnologie (CargoLifter, 2017).

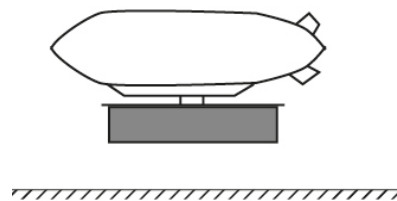


Abbildung 44: Cargolifter, schematische Darstellung

3.2.15 Drohne

Eine Drohne ist im Allgemeinen ein unbemanntes Luft- oder Unterwasserfahrzeug, das teilautonom oder autonom betrieben wird. Im erstgenannten Fall erfolgt eine Fernsteuerung durch einen Menschen, im Letztgenannten übernimmt ein integrierter oder ausgelagerter Computer diese Aufgabe. Insbesondere im militärischen Bereich werden Drohnen vielfältig

eingesetzt, auch der Markt privat genutzter Drohnen wächst stetig (Wirtschaftslexikon Springer Gabler, 2017). Im industriellen Umfeld werden Drohnen heutzutage bereits in der Landwirtschaft zu Schädlingsbekämpfung oder auch zu Inspektionszwecken genutzt (Fläming, 2015); so testet bspw. die Deutsche Bahn den Einsatz von Drohnen zur Überwachung ihrer Infrastruktur und Fahrzeuge. Auch im Bereich „Logistik“ gibt es bereits Anwendungen: DHL führt Pilotstudien zum Einsatz von Drohnen zur Paketauslieferung durch, wobei die maximale Nutzlast bei 2,5 kg und die Reichweite bei rund 15 km liegt (Fläming, 2015). Eine gewerbliche Nutzung von fliegenden Drohnen mit einem Gewicht über 5kg ist in kontrollierten Lufträumen nicht gestattet. Im US Patent US20140217230 A1 (Helou, 2014) wird ein Drohnen-Helikopter beschrieben. Dieser besteht aus einem Gestell mit zwei gegensätzlich rotierenden Rotoren und ist für den Transport von Containern ausgelegt. Die Fracht wird dem System dabei von unten angefügt.

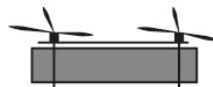


Abbildung 45: Frachtdrohnen Helikopter, schematische Darstellung

Weiterführend wurde an der ETH-Zürich (Eck, et al., 2000) eine Helikopterdrohne für den wissenschaftlichen Einsatz entwickelt und der grundsätzliche automatisierte Flugbetrieb nachgewiesen. Darüber hinaus gibt es derzeit kein marktreifes Konzept oder Produkt, das als Frachtdrohne für den Transport von Seecontainern eingesetzt werden könnte.

3.2.16 Tube Cargo Express

Der *Tube Cargo Express* von Denys ²¹ (Denys, 2017) setzt auf der Idee einer schnellen und effizienten U-Bahn-Fracht auf. Nach diesem Ansatz sollen unterirdische Netze zwischen Logistikzentren geschaffen werden, die „bei einer minimalen Tiefe entlang oder unterhalb der vorhandenen Infrastruktur“ realisiert werden. Die Fahrzeuge sollen im Tunnel auf Schienen fahren und elektronisch gesteuert sowie elektrisch angetriebene sein. In ihnen sollen Euro-Paletten oder Mini-Container verladen werden können. Es ist ein automatisches Be- und Entladesysteme vorgesehen. Der Anbieter schreibt, dass ähnliche Systeme bereits in mehreren Ländern in der konkreten Entwicklung seien. Für das beschriebene System wäre eine Adaption auf den automatischen Containertransport nötig und auch vorstellbar.

²¹ Das Unternehmen Denys ist ein international agierendes, belgisches Unternehmen welches u.a. im Tunnel- und Pipelinebau tätig ist. Auf seiner Webseite sind Zukunftsideen zum unterirdischen Gütertransport dargestellt: der Underground Container Mover und der Tube Cargo Express

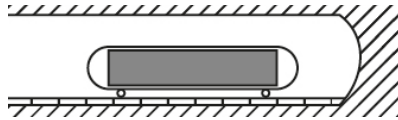


Abbildung 46: Tube Cargo Express, schematische Darstellung

3.2.17 Underground Container Mover

Der Underground Container Mover von *Denys, 2017* wurde im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung für den Hafen Antwerpen entwickelt und untersucht. Das System wurde als ein vollautomatisches Transportsystem für Transporte in Hafennähe ausgelegt um Container zwischen den beiden Uferseiten der Schelde zu transportieren. Im Tunnel sollen Schienen verbaut sein, auf denen Wagen fahren. Die Wagen haben keinen eigenen Antrieb, sondern werden durch ein angetriebenes Förderseil bewegt, an das sie mit kuppelbaren Klemmen angeschlossen werden können. Die Förderstrecke soll ggf. in Segmente unterteilt werden. Die Segmente sollen eine Länge von 2 bis 5 Kilometern haben. In den Knotenpunkten verschiedener Segmente sind Be- und Entladestationen vorgesehen. Die Fördergeschwindigkeit wird mit 5-20 km/h angegeben. Das System ist als eine unterirdische Standseilbahn mit segmentierten Bereichen einzustufen (Denys, 2017).

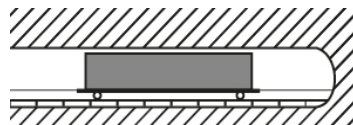


Abbildung 47: Underground Container Mover, schematische Darstellung

3.2.18 Cargo Cap und Swiss Cargo Tube

„*CargoCap* ist für Gütertransporte in Ballungsräumen im Nah- und Regionalverkehrsbereich bis 150 km konzipiert. Die Caps fahren 24 Stunden am Tag in einem unterirdisch weit verzweigten Fahrrohrleitungsnetz viele Stationen an. Am Ziel schleusen sich ein oder mehrere Caps selbständig in die Station zum automatischen Be- und Entladen.“ (CargoCap, 2017) Der Transport erfolgt fahrerlos. Derzeit sind die Caps für einen Transport von je zwei Euro-Paletten ausgelegt und müssten auf den Transport von 20 bzw. 40 ft. Containern entsprechend angepasst werden.

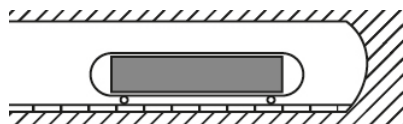


Abbildung 48: CargoCap, schematische Darstellung

Die Vision *Swiss Cargo Tube* (Swiss Cargo Tube, 2017) basiert auf den Entwicklungen des CargoCap und besteht aus „einem unterirdischen, rund zwanzig bis sechzig Meter tief gelegenen Tunnelrohr von zirka vier Metern Durchmesser“. Selbstfahrende Wagen verkehren richtungstrennt. Ein drittes Gleis dient in den Terminals zum Auf- und Abladen der Behälter, welche die Güter aufnehmen. Auch diese Behälter sind auf das Europalettenmaß ausgelegt. Bei diesem System wäre auch für den Transport ganzer Container eine entsprechende Anpassung der Systeme nötig, aber durchaus denkbar.

3.2.19 Underground Automated Trucks

Ein unterirdischer Transport von Gütern wird beispielsweise in London bereits seit den 1920er Jahren für Postsendungen durchgeführt (Pielage, 2001). Grundsätzlich kann auf Erfahrungen im oberirdischen, autonomen Transport zurückgegriffen und dieser auf den unterirdischen Transport übertragen werden. Das Konzept sieht grundsätzlich die Installation einer unterirdischen Infrastruktur vor, in der sich gummibereifte Transportsysteme autonom bewegen und Güter derart transportieren (Pielage, 2001). Die Güter sollen dabei zu Transporteinheiten zusammengefasst werden, wobei zunächst der Transport von einer 10 ft. Flugzeugpalette oder sechs Europaletten vorgesehen ist. Die Definition der Transporteinheit müsste entsprechend für den Transport von Seecontainern angepasst werden. Die Machbarkeit wurde mit einem prototypischen Testaufbau nachgewiesen.

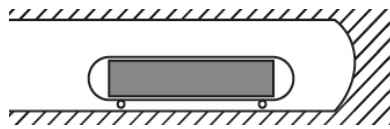


Abbildung 49: Underground Automated Trucks, schematische Darstellung

3.2.20 Pipelines

Pipelines werden im Allgemeinen zum Transport von flüssigen oder gasförmigen Gütern über große Strecken eingesetzt. Für den Einsatz zum Transport von Stückgütern würden diese in Kapseln durch die Pipelines transportiert werden (Mousavipour, 2015). Dabei kommen für den Containertransport folgende Systeme in Frage, die sich auf Grund der Antriebformen unterscheiden: (a) Pneumatisch angetriebene Kapsel-Pipelines, (b) Linearmotorbetriebene Systeme und (c) hydraulische Pipelinesysteme. Beim erstgenannten System (a) wird mittels Ventilatoren ein Luftdruck vor der Kapsel erzeugt, der ab einem bestimmten Schwellwert den Vortrieb gewährleistet (vgl. Abbildung 50). Beim linearmotorbetriebenen System (b) besteht die Kapselwand aus Stahl, auf das eine Schicht Aluminium aufgebracht ist. In der Aluminiumschicht wird ein „Wirbelstrom“ induziert, der eine elektromagnetische Kraft erzeugt, durch die die Kapseln angetrieben werden (Liu, 2000). Das hydraulische Pipelinesystem (c) nutzt Wasser als Trägermedium für den Kapseltransport (Roop, et al., 2000) – vgl. TubeXpress oder SUBTRANS.

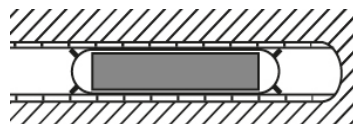


Abbildung 50: Gütertransport per Pipeline: Pneumatischer Antrieb, schematische Darstellung

3.3 Bewertung der Technologiesuche

Die Informationen zu den einzelnen Technologien sind teilweise sehr rudimentär. Die Suche in wissenschaftlichen Artikeln, eine Patentrecherche und eine Marktrecherche konnten teilweise nicht mehr als eine grobe Beschreibung der Funktionalitäten hervorbringen. Auf Grund möglicher Entwicklungen, die u.a. auf Grund von Sprachbarrieren nicht durch die Recherchen detektiert werden konnten, ist die Ergänzung weiterer Systeme vorstellbar, sie würde aber keine grundlegend neuen Klassen belegen, sondern wären der genutzten Systematik folgend

einzugruppieren. Die Vollständigkeit der Recherche ist somit hinreichend gegeben und es konnte die gemäß Kapitel 2.3.5 zu erarbeitende allgemeingültige Klassifikation für Technologien zum flurfreien Containertransport sowie die Identifikation von Technologien, die einen flurfreien Containertransport ermöglichen, erreicht werden.

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 3.1.1 definierten Klassen: Transportebene (1), Fahrwegausgestaltung (2) sowie Antriebsort (3) sind die Ergebnisse wie folgt zu bewerten: es wurden 20 unterschiedliche Technologien ermittelt, die für einen flurfreien Containertransport eingesetzt werden können; 15 der identifizierten Technologien nutzen einen überirdischen Transportweg, fünf einen unterirdischen. Drei der 20 identifizierten Technologien verfügen über eine flexible Fahrwegausgestaltung; drei andere über einen globalen Antriebsort. Die größte Variantenvielfalt bietet die Variationsmöglichkeit eines überirdischen Transports auf einem festen Fahrweg und einem lokalen Antrieb. Es wurde nur ein überirdisches System mit globalem Antrieb identifiziert (Containerseilbahn). Da die Substruktur sich zwischen einer Stand- und einer Luftseilbahn signifikant unterscheidet (Brückenbauwerk / Pylonen, wird diese Technologie im Folgenden getrennt als Containerstandseilbahn und Containerluftseilbahn aufgeführt.

4. Konzeption der komparativen Analysesystematik

Im Anschluss an die Technologierecherche erfolgt im Rahmen dieses Kapitels nun die Entwicklung der komparativen Analysesystematik, anhand derer in einem Analysetool die Einsatzmöglichkeit eines flurfreien Containertransports für konkrete Fälle und Technologien bewertbar gemacht wird. Die Systematik soll auf andere passende Technologien übertragbar sein und die Anforderungen und Gegebenheiten konkreter Anwendungsfälle möglichen technologischen Ausgestaltungen gegenüberstellen. Ziel der Bewertung muss zunächst eine Eignungsprüfung sein, die die Erfüllung genereller und spezifischer Szenarioanforderungen durch Technologiekonzepte zum flurfreien Containertransport für eine konkrete Anwendung und für definierte Technologievarianten bestimmt bzw. eine Ausgestaltung zur Erfüllung vorschlägt. Die derart ermittelten Technologievarianten können nachfolgend miteinander vergleichen und derart ein Bewertungsergebnis herbeigeführt werden. Zur Bewertung soll eine komparative Analysesystematik genutzt werden, die sowohl qualitative, als auch quantitative Bewertungselemente umfasst und eine multikriterielle Bewertung zulässt. Zur Definition der Analysesystematik erfolgt hier folgend eine Festlegung allgemeiner, systemrelevanter Parameter, die einen potentiellen Anwendungsfall beschreiben (Kapitel 4.1); diese werden aus einem konkreten Fallbeispiel mittels QFD-Methode (Methodenbeschreibung in Kapitel 2.3.2) abgeleitet. Im Anschluss werden die definierten Parameter eingehender untersucht und Merkmalsausprägungen festgelegt (Kapitel 4.2). Insofern möglich, werden den in Kapitel 3.2 detektierten Technologien die jeweiligen Merkmalsausprägungen zugeordnet. Zudem erfolgt die Beschreibung der technologiespezifischen Bewertung (Kapitel 4.3) und der unternehmensspezifisch, betriebswirtschaftlichen Bewertung (Kapitel 4.4). Das Kapitel schließt mit der Zusammenfassung der Analysesystematik (Kapitel 4.5) ab.

4.1 Identifikation relevanter Systemparameter

Zur allgemeingültigen Beschreibung der zu untersuchenden Anwendungsfälle muss zunächst eine Definition der festzulegenden Parameter erfolgen. Im vorliegenden Fall, der Entwicklung einer Technologie für den flurfreien Containertransport, wird der wesentliche Impuls der technischen Innovation vom Markt ausgelöst. Damit ist von einer „Market-Pull“-Stoßrichtung zu sprechen und als Hilfsmittel zur Lösungsgenerierung kann nach (Schmeisser & Solte, 2010) der methodische Ansatz des Quality-Function-Deployment (QFD²²) eingesetzt werden. Zentrales Element der Methode ist die Entwicklung und Planung eines Produktes und seines Produktionsprozesses, ausgehend von kundenseitigen Qualitätsanforderungen. Die Methode wird als Planungselement der Produktplanung genutzt, bei dem systematisch Kundenanforderungen ermittelt, gewichtet und mit Produktmerkmalen in Einklang gebracht werden (Tiefere Informationen sind in Kapitel 2.3.2 zu finden). In der vorliegenden Arbeit wird durch die Ableitung der Systemparameter (Produktfunktionen) aus den kundenspezifischen Zielstellungen (Schritt 1)

²² Quality-Function-Deployment (QFD) ist eine Methode zur Qualitätssicherung während des Entwickelns. Ziel: Planung und Sicherstellung der Entwicklung von maßgebenden Funktionen während des Entwicklungsprozesses damit Produkte oder Dienstleistungen entwickelt werden, die den Kundenwünschen entsprechen. Charakteristisches Merkmal: Übertragung von Kundenanforderungen in Qualitätsmerkmale. Vorgehen: Definition von Zielsetzungen und Festlegung der Zielerreichung – Gegenüberstellung im sog. „House of Quality“.

und der Generalisierung der Systemparameter (Schritt 2) wird eine zielorientierte Definition der Systemparameter für das flurfreie Containertransportsystem erreicht. Auf dieser Erkenntnis baut die anschließende Ableitung der bestimmenden Produkteigenschaften auf.

4.1.1 Beschreibung des Fallbeispiels

Das Fallbeispiel bezieht sich auf einen Containerterminal am *Hafen Hamburg*. Dieser ist einer der größten Seehäfen der Nordrange und verfügt über knapp 300 Liegeplätze an insgesamt 43 Kilometern Kaienlänge für Seeschiffe. Am Hafen gibt es vier Containerterminals: Waltershof (1) Burchardkai (2), Altenwerder (3) und Tollerort (4) (vgl. Abbildung 51). Der Hafen ist tideabhängig.

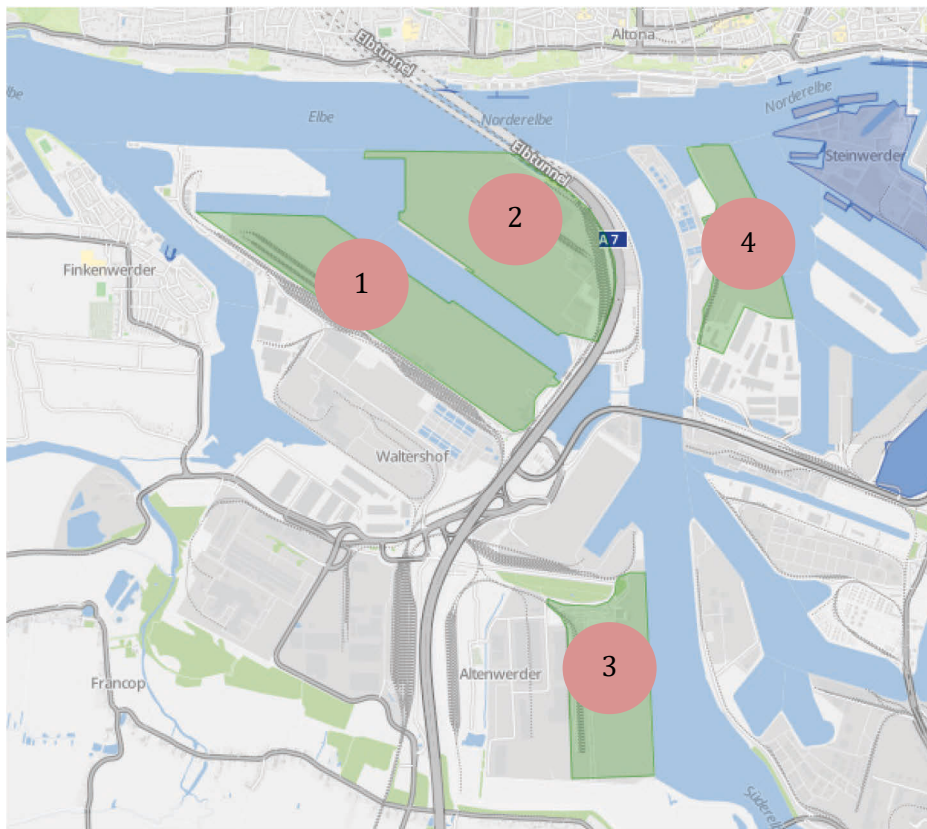


Abbildung 51: Containerterminals am Hafen Hamburg (Hafen Hamburg Marketing, 2016)

Am westlich gelegenen Terminal (1) betreibt das Unternehmen EUROGATE GmbH & Co. KGaA, KG, welches im September 1999 von den Firmen EUROKAI und der Bremer BLG Logistics Group als Gemeinschaftsunternehmen gegründet wurde, einen Containerterminal. EUROGATE ist der führende, reedereiunabhängige Terminalbetreiber in Europa. Der EUROGATE Containerterminal Hamburg (im Folgenden EG-CTH) liegt unmittelbar im Zentrum des Hamburger Hafens. Der Terminal, mit einer Fläche von 1.400.000 m² und einer Kajenlänge von 2080 m (bis 2019 Vergrößerung um 38 ha Terminalfläche und 1.059 m Kajenlänge), verfügt über sechs Großschiffsliegeplätze und 23 Containerbrücken sowie eine Umschlagskapazität von 4,1 Millionen TEUs pro Jahr.

Im Hamburger EUROGATE-Terminal werden die Container bis zu drei hoch gestapelt - die Lagerkapazität des Terminals reicht zu Spitzenzeiten nicht aus. Der unmittelbaren Erweiterung der Terminalflächen stehen verschiedene infrastrukturelle, physikalische Barrieren im Wege. Um die notwendigen Kapazitäten dennoch auszuweiten, wurde von EUROGATE ein Leercontainer-Depot eingerichtet, das sich in unmittelbarer Nähe zum Terminal befindet (vgl. Abbildung 52). Derzeit wird der Güterverkehr zwischen den beiden Flächen mit Multitrailern gewährleistet (vgl. Kapitel 2.1.5). Die Fahrstrecke, die dabei zurückgelegt wird, ist in der nachfolgenden Abbildung gelb gekennzeichnet und beträgt ca. 3 km. Die Fahrten sind nur auf Grund einer Sondergenehmigung möglich, da die Strecke über öffentliche Infrastruktur führt und dies für die Multitrailer nicht im Allgemeinen gestattet ist.

Zusammenfassend geht es im vorliegenden Fallbeispiel um die bidirektionale Anbindung eines seehafennahen Depots, welches 200m Luftlinie vom Mutterterminal entfernt liegt. Zwischen den Flächen liegen eine Zugtrasse und eine öffentliche Straße, die überquert werden müssen. Die einzuhaltende lichte Höhe beträgt 6m. Im Durchschnitt sollen auf Wunsch des Terminalbetreibers 800 Container pro Tag transportiert werden. Das System soll sich im Abschreibungszeitraum (10 Jahre) gegenüber der Aufrechthaltung des Multitrailer-Systems amortisieren. Die vom Betreiber zur Verfügung gestellten Tabellen zu den realen Umfuhrezahlen im Zeitraum 01.06.08 bis 12.11.09 (380 Werktage) zeigen einen Verkehr von im Durchschnitt 96 (SYSTEM 1) bzw. 160 (SYSTEM II) Containern pro Tag.

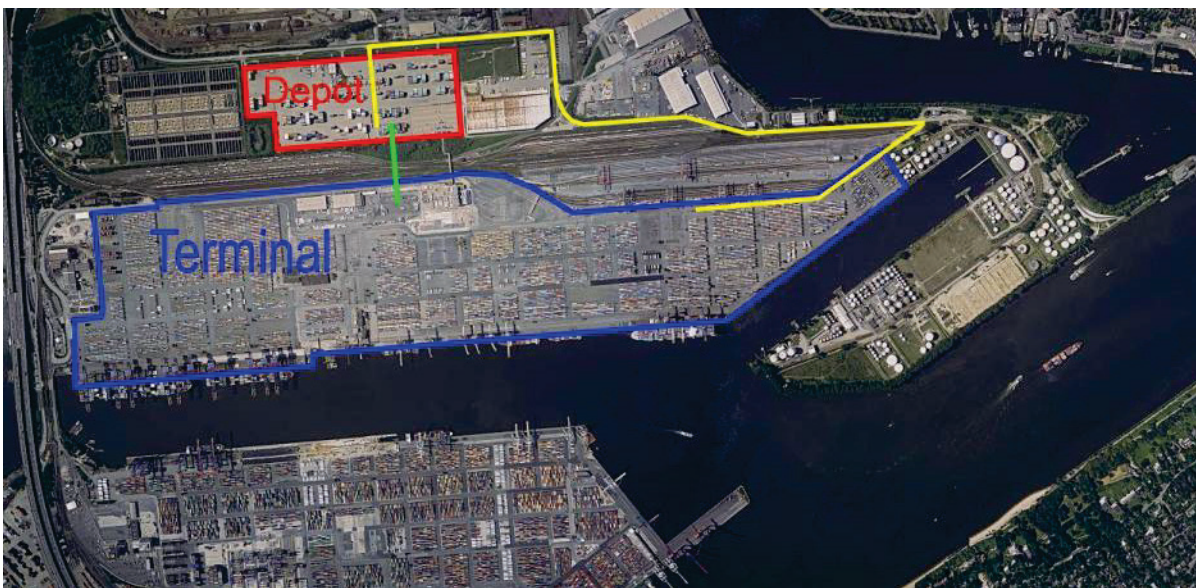


Abbildung 52: Luftaufnahme des EUROGATE Terminals (©Google Maps und (EUROGATE, BIBA, 2010))

4.1.2 Ableitung der Systemparameter aus dem Fallbeispiel

Die Ziel- und Qualitätskriterien ergeben sich für das Fallbeispiel wie folgt:

- Gewährleistung eines vollautomatischen Containertransports
- Überquerung einer Strecke von 200m
- Lichte Höhe unter der Trasse: min. 6m
- Geringe Beeinflussung der bestehenden Strukturen
- Geringe Beeinflussung der Terminalfläche

- Geringe Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten
- Taktzeit: 800 Container / 24h
- Entlastung der hafennahen Infrastruktur

4.1.3 Generalisierung und Beschreibung der Systemparameter

Die „*generellen Zielsetzungen für materielle Produkte*“ können im Einzelfall eine unterschiedliche Gewichtung aufweisen, im Grundsatz fällt ihnen aber eine allgemeine Gültigkeit zu (Czichos, 2013). Sie dienen als Leitlinie für die Festlegung der spezifischen Zielsetzungen und orientieren sich an den Lebensphasen eines Produktes. Generelle Zielsetzungen für materielle Produkte sind nach Czichos, 2013 die Erfüllung der Funktion, die Gewährleistung der Sicherheit, die Beachtung der Ergonomie, die Vereinfachung der Fertigung, die Erleichterung der Montage, die Sicherstellung der Qualität, die Ermöglichung des Transports, die Verbesserung des Gebrauchs, die Unterstützung der Instandhaltung, das Anstreben einer guten Recyclebarkeit und die Minimierung von Kosten (Czichos, 2013).

Im Sinne der Übertragung der obenstehenden, spezifischen Ziel- und Qualitätskriterien auf eine generalisierte Beschreibung eines Anwendungsfalls eines flurfrei transportierenden Container-transportsystems und unter Beachtung der generellen Zielsetzungen für materielle Produkte nach Czichos werden die Hauptzielkriterien wie folgt abgeleitet: Funktion, Qualität, Kosten. Die betriebswirtschaftliche Betrachtung ist für eine konkrete Technologieauswahl relevant, da die vorliegende Arbeit aber eher eine Technologiebewertung verfolgt und die betriebswirtschaftlichen Betrachtungen stark von den konkreten unternehmensspezifischen Zahlen abhängen, werden diese nur im Rahmen von Investitionskosten beachtet. Die Inhalte der abgeleiteten Zielkriterien sind gleichzeitig die Parameter zur Systembeschreibung und Technologiebewertung:

Zielkriterium Funktion:

1. Überquerung einer definierten Streckenlänge
2. Überwindung spezifischer Topologien bei geringer Beeinflussung der bestehenden Strukturen
3. Förderleistung: Anzahl der transportierbaren Container / Tag
4. Arbeitsweise: uni-/bidirektional

Zielkriterium Kosten:

5. Geringe Investitionskosten
6. Geringe Nutzungs- und Instandhaltungskosten

Zielkriterium Qualität:

7. Wenig Unsicherheiten ob der technischen Umsetzbarkeit
8. Geringer Flächenbedarf (Terminal / Strecke)
9. Verkehrsvermeidung

Die folgende Tabelle 7 fasst die Zielkriterien zusammen.

<i>Zielkriterium</i>		<i>Ziel</i>
Funktion	a	Automatischer Transport von Standardseecontainern von A nach B und/oder in umgekehrter Richtung in einer bestimmten Zeit.
Kosten	c	Möglichst geringe Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten
Qualität	b	Die Qualität soll anhand der Umsetzungssicherheit, der Flächenbeeinflussung und der potentiellen Verkehrsvermeidung beschrieben werden.

Tabelle 7: Definition der Zielkriterien

Die Systemparameter können grundsätzlich qualitativ oder quantitativ beschrieben werden; die für die vorliegende Arbeit gültige Beschreibung wird nachfolgend und in Tabelle 8 festgelegt.

<i>Zielkriterium</i>		<i>Bestimmende Systemparameter</i>	<i>Definition der Messbarkeit der Systemparameter</i>
<i>Funktion</i>	a	Systemlänge Arbeitsweise Geo-Objekte ²³ Förderleistung	Quantitativer Faktor [m] Qualitativer Faktor Qualitativer Faktor Quantitativer Faktor [Container / h]
<i>Kosten</i>	b	Investitionskosten Nutzungs- und Instandhaltungskosten	Quantitativer Faktor [€] Quantitativer Faktor [€]
<i>Qualität</i>	c	Technologiereife Flächenbedarf Terminal Flächenbedarf Strecke Verkehrsvermeidung	Normierte Bewertung [TRL] Quantitativer Faktor [m ²] Deskriptiver Faktor Quantitativer Faktor [Container / a zu Peak-Zeiten]

Tabelle 8: Überführung der Zielkriterien in bestimmende Systemparameter

Die parameterbezogene Definition der jeweils geltenden Bewertungsebenen gibt Aufschluss darüber, wie die Beeinflussung untereinander ist und in wie fern im Rahmen der Entwicklung der Systematik eine konkrete Definition erfolgen kann. Die Bewertungsebenen können folgende Ausprägungen aufweisen: Parameter, die

- allgemeingültig beschrieben (A),
- szenariospezifisch definiert (B),
- unternehmensspezifisch festgelegt (C) und/oder
- technologiespezifisch extrahiert (D) werden.

²³ Geo-Objekte in topologischen Karten können in unterschiedlichen Dimensionen dargestellt werden: Knoten (Punkt: 0-dimensional), Kanten (Linie: 1-dimensional), Polygone (Fläche: 2-dimensional) oder Polyeder (Volumen: 3-dimensional). Hierdurch werden neben der Darstellung einzelner Objekte auch Nachbarschaftsbeziehungen in der Fläche und im Raum ersichtlich. Die kartographisch dargestellten Objekte entsprechen realen oder erdachten Objekten eines Betrachtungsraumes (DeMers, 2010). In der Kartographie werden die geometrischen Attribute von Objekten entsprechend zeichnerisch dargestellt (Bollmann, et al., 2002).

4.1.4 Ableitung der Analysesystematik

Zum besseren Verständnis der Systemparameter, werden diese im Folgenden Bewertungsebenen zugeordnet. Die Systemparameter der Bewertungsebene „A“ können umfassend allgemeingültig, für alle Technologien gleichlautend definiert werden. Ebene „B“ werden Systemparameter zugeordnet, die das zu untersuchende Szenario beschreiben, Ebene „C“ werden Systemparameter zugeordnet, die unternehmensspezifische Kennzahlen darstellen und Ebene „D“ werden Systemparameter zugeordnet, die konkrete Technologie Kennzahlen als einflussgebend heranziehen.

Die Systemlänge wird im Allgemeinen durch eine Entfernung angegeben und ist in Metern zu bemessen. Die spezifische Angabe der Systemlänge ergibt sich aus dem Szenario – entsprechend ist der Systemparameter „Systemlänge“ den Bewertungsebenen A und B zuzuordnen. Die Arbeitsweise kann allgemeingültig definiert werden und ergibt sich konkret für einen Anwendungsfall aus dem Szenario. Somit wird auch der Systemparameter „Arbeitsweise“ den Bewertungsebenen A und B zugeordnet. Mögliche zu überquerende Geo-Objekte können ebenfalls allgemeingültig beschrieben werden und ergeben sich konkret aus der Szenariobeschreibung. Somit wird auch der Systemparameter „Geo-Objekte“ den Bewertungsebenen A und B zugeordnet. Die Förderleistung hingegen beruht auf konkreten, technologiespezifischen Kennwerten. Ein konkreter Wert der Förderleistung ergibt sich aus einer Technologiedefinition und dem konkreten Szenario. Somit wird der Systemparameter „Förderleistung“ den Bewertungsebenen B und D zugeordnet. Die Investitionskosten hängen zum einen stark von den Kostenstrukturen des Unternehmens sowie zum anderen von der Technologie ab. Entsprechend ist der Systemparameter „Investitionskosten“ den Bewertungsebenen C und D zuzuordnen. Ebenso hängen die Nutzungs- und Instandhaltungskosten zum einen stark von den Kostenstrukturen des Unternehmens sowie zum anderen von der Technologie ab. Entsprechend ist der Systemparameter „Nutzungs- und Instandhaltungskosten“ den Bewertungsebenen C und D zuzuordnen. Die Technologiereife kann allgemeingültig beschrieben werden und ist im spezifischen Fall an den Status einer spezifischen Technologie gekoppelt. Somit wird der Systemparameter „Technologiereife“ den Bewertungsebenen A und D zugeordnet. Ebenso kann der Flächenbedarf auf dem Terminal allgemeingültig definiert werden. Seine konkrete Größe hängt von den Parametern einer spezifischen Technologie ab. Entsprechend ist der Systemparameter „Flächenbedarf Terminal“ den Bewertungsebenen C und D zuzuordnen. Auch der Flächenbedarf auf der Strecke kann allgemeingültig definiert werden. Seine konkrete Größe hängt ebenfalls von den Parametern einer spezifischen Technologie ab. Entsprechend ist der Systemparameter „Flächenbedarf Strecke“ den Bewertungsebenen C und D zuzuordnen. Der Systemparameter „Verkehrsvermeidung“ kann allgemeingültig beschrieben und sowohl für die Verkehrsvermeidung auf dem Terminal als auch in der Umgebung bewertet werden. Die Verkehrsvermeidung hängt von der genutzten Technologie und entsprechenden Vor- sowie Nachprozessen sowie der Förderleistung ab. Entsprechend ist der Systemparameter „Verkehrsvermeidung“ den Bewertungsebenen A, C und D zuzuordnen. Die Zuordnung der Bewertungsebenen zu den Systemparametern ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst dargestellt.

<i>Zielkriterium</i>		<i>Bestimmende Systemparameter</i>	<i>Bewertungsebene</i>			
			A	B	C	D
<i>Funktion</i>	a	Systemlänge	x	x		
		Arbeitsweise	x	x		
		Geo-Objekte	x	x		
		Förderleistung		x		x
<i>Kosten</i>	b	Investitionskosten			x	x
		Nutzungs- und Instandhaltungskosten			x	x
<i>Qualität</i>	c	Technologiereife	x			x
		Flächenbedarf Terminal	x			x
		Flächenbedarf Strecke	x			x
		Verkehrsvermeidung	x		x	x

Tabelle 9: Zuordnung der Bewertungsebenen zu den Systemparametern

Die in der Entwicklung stehende Analyssystematik folgt der Logik der Kopplung bestimmender Systemparameter mit den Bewertungsebenen A-D. Unter Beachtung der Bewertungsebenen und den in Kapitel 2.2.6 definierten Anforderungen an die Analyssystematik zur Bewertung des Potentials eines flurfreien Containertransportsystems wurde die nachfolgend dargestellte Analyssystematik entwickelt.

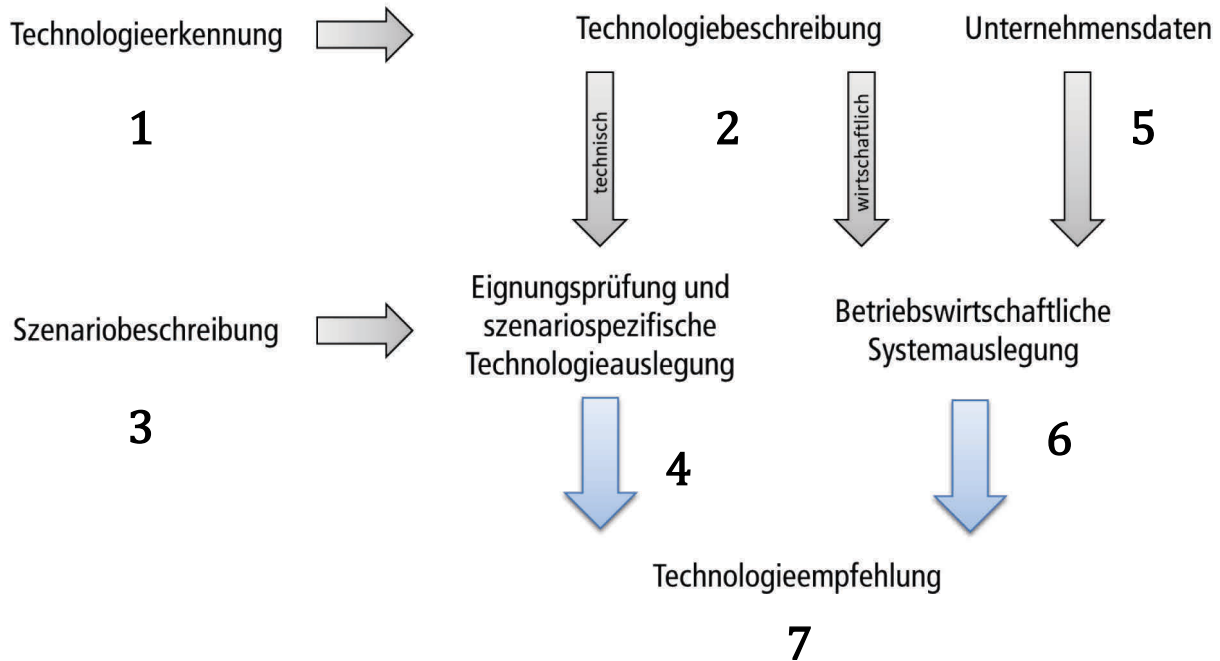


Abbildung 53: Analysesystematik zur szenariospezifischen Bewertung flurfreier Containertransporttechnologien

Die Analysesystematik umfasst sieben Phasen, die jeweils eine systematische Vorgehensweise enthalten und Methoden integrieren, die der Erfüllung des Aufgabenzwecks der jeweiligen Phase dienen. Das Ziel der Phase 1 ist eine vorangestellte, systematische Technologieerkennung zu dem Gegenstand des flurfreien Containertransportes. Hierauf basierend zielt die Phase 2 auf eine Technologiebeschreibung der in Phase 1 detektierten Technologien ab. Die Technologiebeschreibung erfolgt anhand technischer und wirtschaftlicher Parameter. Ziel der Phase 3 ist eine Beschreibung des konkreten Szenarios. Die technischen Technologieparameter sowie die Szenariobeschreibung werden der Analysesystematik folgend zur Eignungsprüfung und szenariospezifischen Technologieauslegung (Ziel der Phase 4) herangezogen. In Phase 5 zielt auf die Definition von Unternehmensdaten, die insbesondere wirtschaftliche Kenndaten umfassen, ab. Die wirtschaftlichen Technologieparameter sowie die Unternehmensdaten und die Ergebnisse der szenariospezifischen Technologieauslegung werden der Analysesystematik folgend zur betriebswirtschaftlichen Systemauslegung (Ziel der Phase 6) herangezogen. In der Phase 7 werden die Lösungsvarianten konkurrierend bewertet und derart eine szenariospezifische, technologie- und unternehmensbasierte Technologieempfehlung ausgegeben. Wahlweise kann das Empfehlungsergebnis auf eine szenariospezifische, ausschließlich technologiebasierte Technologieempfehlung reduziert werden. Hier entfallen Phase 5 und 6 und das Ergebnis der Technologiebewertung ist entsprechend ausschließlich technikbasiert.

Durch die erste und zweite Phase wird die in Kapitel 2.2.6 definierte Anforderung 1 „Technologieerkennung“ bedient. Die dritte Phase bedient die Anforderung 2 „Szenariobezug“. Bei der konkreten Ausgestaltung der Technologieauslegung und Technologiebewertung in der vierten Phase müssen die Elemente der Anforderung 3 „qualitative, quantitative und multikriterielle Analyseelemente“ im Folgenden beachtet werden. Die Implementierung in ein Analysetool bedient die Anforderung 4 „Toolunterstützung“. Die Analysesystematik stellt die

Basis der Erfüllung der Anforderung 4 „strukturiertes Konzept“ dar, die im Folgenden durch die Beschreibung der in den Phasen integrierten Vorgehensweise und Methoden umfangreich bedient wird.

Der Analysesystematik folgend wird nachfolgend die konkrete Ausgestaltung der Phasen beschrieben.

Die *Technologieerkennung* (Phase 1) erfolgt so, wie im Rahmen der Analyse zur Identifikation möglicher Technologien zum flurfreien Containertransport (Kapitel 3) dargestellt, anhand einer morphologischen Analyse unter Beachtung der Klassifikationsmerkmale Transportebene, Fahrwegsausgestaltung und Antriebsort, an die sich eine Patentrecherche und einer Recherche des Standes der Wissenschaft und Technik anschließt. Die ermittelten Technologien werden zunächst allgemeingültig textuell beschrieben.

Zur Überführung der Technologien in das Analysetool erfolgt eine weitergehende *Technologiebeschreibung* anhand konkreter technischer Technologieparameter (vgl. Kapitel 4.3) und wirtschaftlicher Technologieparameter (vgl. Kapitel 4.4) in Phase 2. Die Technologien werden dabei technologisch sowohl anhand technischer Kennzahlen (bspw. Beschleunigung, Verzögerung, Maximalgeschwindigkeit) sowie des spezifischen Flächenbedarfs der Strecke und der Aus- bzw. Abfahrbereiche sowie anhand einer Eingruppierung ihres Technologiereifegrades und ihrer Einsatzbereiche beschrieben. Die betriebswirtschaftliche Beschreibung erfolgt anhand der Investitionskosten, Nutzungs- und Betriebskosten sowie der Verkehrsvermeidung.

Der Analysesystematik weiter folgend wird in Phase 3 das *Szenario* beschrieben (vgl. Kapitel 4.2). Zur Beschreibung des Untersuchungszenarios werden die Parameter Systemlänge, Arbeitsweise, zu überwegende Geo-Objekte und die gewünschte Förderleistung definiert.

In Phase 4 erfolgt die technologiebasierte *Eignungsprüfung und szenariospezifische Systemauslegung*. Hierfür werden die technischen Parameter der Technologiespezifikation und die Parameter der Szenariobeschreibung zusammengeführt und eine möglichst optimale Systemvariante für jede zu untersuchende Technologie ermittelt. Eine optimale Systemvariante ist dadurch gekennzeichnet, dass sie die Szenarioanforderungen möglichst genau erfüllt oder geringfügig übererfüllt. Werden Anforderungen nicht erreicht oder ist eine Technologie für den Anwendungsfall des Szenarios nicht geeignet, so wird sie nicht der weiteren Bewertung zugeführt.

Der Analysesystematik folgend erfolgt in Phase 5 die Eingabe von *unternehmensspezifischen Kennzahlen und Werten*, die in Phase 6 zur *wirtschaftlichen Systemauslegung* herangezogen werden. Hierfür werden die Ergebnisse der technischen Systemauslegung ausgewertet und monetäre Anforderungen (bspw. Installationskosten, Personalkosten usw.) abgeleitet.

In der, die Analysesystematik abschließenden, Phase 7 werden die Analyseergebnisse zusammengeführt und in eine Rangfolge überführt, die das Bewertungsergebnis der szenariospezifisch ausgelegten Technologievarianten unter Beachtung definierbarer Werte und im Sinne einer eindeutigen *Technologieempfehlung* wiedergibt. Hierfür werden unter Einbeziehung der spezifischen Werte die Ergebnisse der technischen Analyse in eine Rangfolge überführt, die die szenario- und unternehmensspezifische Empfehlung zum Einsatz eines flurfreien Containertransportsystems enthält. Für ausschließloch technologiebasierte Analyseergebnis erfolgt ebenfalls eine Rangfolgebildung der Varianten.

4.2 Beschreibung des Untersuchungsszenarios

Im Rahmen der Szenariobeschreibung (1) wird das zu untersuchende Szenario anhand der Parameter „Systemlänge“, „Arbeitsweise“, „Geo-Objekte“ und „gewünschte Förderleistung“ beschrieben. Nachfolgend werden die Parameter eingehender untersucht (qualitative Faktoren) bzw. Formeln für ihre Bemessung aufgestellt (quantitative Faktoren) und mögliche Ausprägungen allgemeingültig definiert.

4.2.1 Systemlänge

Der Parameter „Systemlänge“ ist in Metern zu beschreiben. Bei der Entfernung „x“ ist der Startpunkt als die Position definiert, an der die Container die nötige Transporthöhe (h) erreicht haben, der Endpunkt als die Position, an der sie diese Höhe verlassen. Die Systemlänge beinhaltet den genauen Abstand zwischen dem Start- und Endpunkt der zu überquerenden Strecke; es werden keine Zuschläge für Auf- und Abfahrten oder Puffer beachtet. Diese gehen wiederum in die Beschreibung von x_A ein. Hier sind die Streckenlängen für die systemspezifischen Auf- und Abfahrten (je x_S) in Abhängigkeit von der maximalen Steigfähigkeit s und der zu erreichenden lichten Höhe h inkludiert.

$$x_A = x + 2 \cdot x_S = x + 2 \cdot \frac{h}{s} \quad \text{Gl. (2)}$$

$$x_S = \frac{h}{s} \quad \text{Gl. (3)}$$

wobei :

h beschreibt die lichte Höhe über der zu überquerenden Strecke [m]

s steht für die technologiespezifische maximale Steigfähigkeit [%]

x : Länge der Strecke, die mit lichter Höhe h überquert werden soll [m]

4.2.2 Arbeitsweise

Der Parameter „Arbeitsweise“ beschreibt die Art der Beförderungsrichtung und wird durch die Auswahl der passenden Merkmalsausprägungen gewählt:

1. Unidirektional
 - a. Transport ist ausschließlich in eine Richtung möglich, die Richtung wird bei Installation festgelegt
 - b. Transport ist ausschließlich in eine Richtung möglich, die Richtung kann geändert werden
2. Bidirektional
 - a. Transport ist in beide Richtung möglich, wobei die Transportströme voneinander abhängig sind (gekoppelt)
 - b. Transport ist in beide Richtungen möglich, wobei die Transportströme voneinander unabhängig sind, ein zeitgleiches Transportieren beider Transportströme in nur eine Richtung ist somit möglich (entkoppelt).

4.2.3 Systematische Beschreibung der zu überwiegenden Geo-Objekte

Um eine allgemeingültige Parametrierung der zu überquerenden Topologie zu entwickeln, erfolgt zunächst die Definition von Einsatzklassen (Merkmale). Da die Motivation der Untersuchung des Einsatzes eines technischen Systems zum flurfreien Containertransport in den Herausforderungen des steigenden Erweiterungsdrucks in Seehäfen liegt, wird für die Festlegung der Beschreibung des zu überwiegenden Bereiches zunächst die Einhaltung oder Überschreitung der Systemgrenze „Containerterminal“ überprüft. Hieran schließt sich eine Analyse der Art der möglichen zu überwiegenden Geo-Objekte an. Um die technologiespezifischen Charakteristika in Bezug auf die detektierten Geo-Objektklassen für die Bewertung nutzbar zu machen, wird die Beeinflussung der technologiespezifischen Substruktur im Hinblick auf die einzelnen Einsatzklassen analysiert und in einem Mapping zugeordnet.

Festlegung möglicher Einsatzklassen

In Abbildung 54 ist der schematische Aufbau eines Containerterminals in Anlehnung an Abbildung 3 dargestellt. Die Darstellung ist um einen Längsschnitt erweitert, durch den das Höhenprofil ersichtlich wird. Um die bestmögliche technologische Alternative für den spezifischen Aufstellungsort zu finden, ist die Betrachtung des Höhenprofils und der Topologie des zu überwiegenden Bereiches wichtig, da die Technologien dies vermutlich in unterschiedlicher Weise erfüllen.

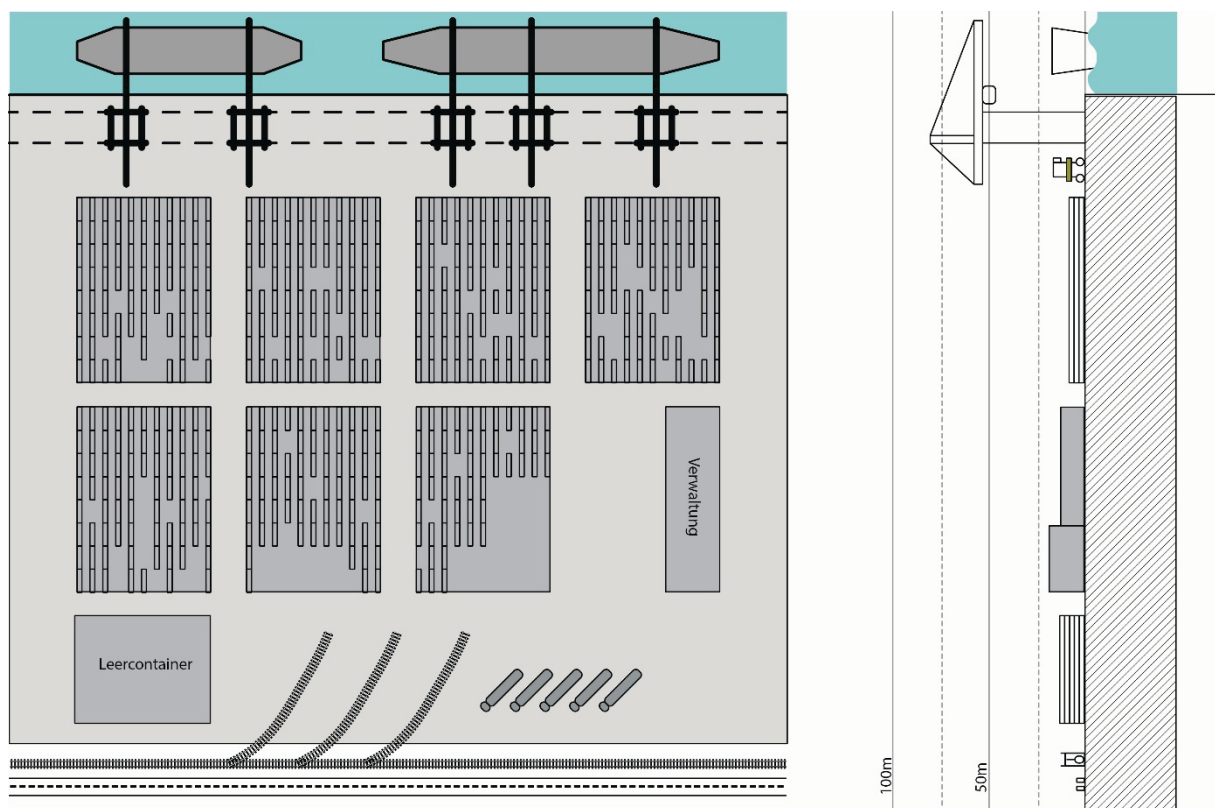


Abbildung 54: Draufsicht Terminal und Höhenprofil

Die Bestimmung der Einsatzklassen für die Installation eines Systems zum flurfreien Transport von Containern erfolgt in Anlehnung an die Bewertung von innovativen Gütertransportsystemen für Häfen und Terminals durch *Schönemann und Plattner* (vgl. Tabelle 10) unter Bewertung des Einsatzzweckes und der Zuordnung dienlicher Substrukturvarianten.

Für das Kriterium „Einsatzzweck“ definieren die o.g. Autoren vier Arten:

- terminalinterne Transporte,
- Verbindung von Terminals, Depots oder Logistikcentern mit einem Hafen,
- Verbindung von Hafen und nahegelegtem Containerverteilzentrum (Hub),
- Hinterlandanbindung.

In Anlehnung an diese Kriterien unterscheidet die vorliegende Arbeit drei Klassen: Ausgehend vom Containertransport von und zu einem Containerterminal kann ein flurfrees Containertransportsystem

- systemintern (*Kategorie A*) oder
- systemüberschreitend, in der Seehafennähe eingesetzt werden. Für den systemüberschreitenden Einsatz werden verschiedene zu überwegende Geo-Objekte definiert, um hieran das jeweils effizienteste System entsprechend der genutzten Substruktur auswählen zu können. Der systemüberschreitende Einsatz kann dabei unterschiedliche Entfernungen haben, wobei hier zwei Fälle unterschieden werden: seehafennah (*Kategorie B*) und
- systemüberschreitend die Anbindung an ein Hinterlandterminal²⁴ (*Kategorie C*).

In der folgenden Tabelle sind die Kategorisierungen von *Schönemann & Plattner* und der vorliegenden Arbeit gegenübergestellt.

²⁴ Roso et al. definieren einen Hafenhinterlandterminal (sog. Dry port) als einen inländischen, intermodalen Terminal mit direkter Bahnanbindung an mindestens einen Seehafen, an dem Kunden ihre Waren ebenso wie am Seehafen abliefern und erhalten können (Roso, 2009). Ein Vorteil der Hafenhinterlandterminals liegt in der freien Nutzung von Landflächen und in der daraus resultierenden optimierten Supply-Chain-Leistung (Bergqvist, 2013), (Schwarz, 2006). Neben der Möglichkeit der Anknüpfung intermodaler Verkehrsträger (Bahn, LKW, Binnenschiff) bieten Hafenhinterlandterminals auch die Möglichkeit der Pufferung von Containern. Dies ist insbesondere zur Reduzierung der Dwell Time in Häfen oder bei geringen Platzkapazitäten, wie es auf der Hamburg - Le Havre Range (Veenstra, 2012) oder in vielen chinesischen Häfen (Beresford, 2012) der Fall ist, signifikant wichtig. Auch Professor Jahn (TU Hamburg-Harburg) führt in einer Übersicht zu „Maßnahmen zum Kapazitätsausbau in Containerterminals“ hierzu aus: „Die zunehmende Inkongruenz zwischen den Seeschiffsgrößen und den Verkehrsmitteln der Hinterlandanbindung, diskutiert auch als „Schnittstellenproblematik“, führt zu Problemen bei der Behandlung des Hinterlandverkehrs. Als Ausweg wird in verschiedenen Häfen die Umgestaltung der Logistik mit der Errichtung von Hinterlandterminals („dry ports“ bzw. Binnenhäfen) gesehen, in die Prozesse ausgelagert werden können, für die im Seehafenterminal keine Kapazitäten verfügbar sind.“ (Jahn, 2016).

	<i>Kategorisierung Schönemann & Plattner</i>	<i>Entfernung</i>	<i>Kategorisierung in der vorliegenden Arbeit</i>	<i>Entfernung</i>
<i>Terminalinterne Transporte</i>	1		A	10 m – 500 m
<i>Seehafennahe Verbindung von Terminals, Anbindung von Depots, etc.</i>	2	Mehrere km bis 20 km	B	10 m – 1 km
<i>Anbindung von seehafennahen Containerverteilzentren</i>	3		B	
<i>Hinterlandanbindung</i>	4	Mehrere Hundert bis Tausend km	C	1 km – 100 km

Tabelle 10: Gegenüberstellung der Kategorisierung

Kategorie A – Terminalinterner Transport

Diese Einsatzklasse beschreibt Fälle, bei denen die bestehenden Containertransportsysteme durch ein neues Konzept ersetzt oder ergänzt werden sollen. Die Systemgrenze des Containerterminals wird dabei nicht überschritten – eine Systemlänge kann zwischen 10 und 500 Metern liegen. Der Einsatz der neuen Transporttechnologie kann beispielsweise unter dem Fokus einer Effizienzsteigerung bestehender Transportsysteme auf zusammenhängenden Bestandsflächen, einer optimierten Raumnutzung auf zusammenhängenden Bestandsflächen oder einer direkten Expansion der Terminalflächen, bei der die zur Vergrößerung genutzten Flächen direkt an die Bestandsflächen anschließen, erfolgen. Eine mögliche Positionierung der Transportstrecke ist in Abbildung 55 gekennzeichnet (Geo-Objekte: Infrastruktur, Gebäude).

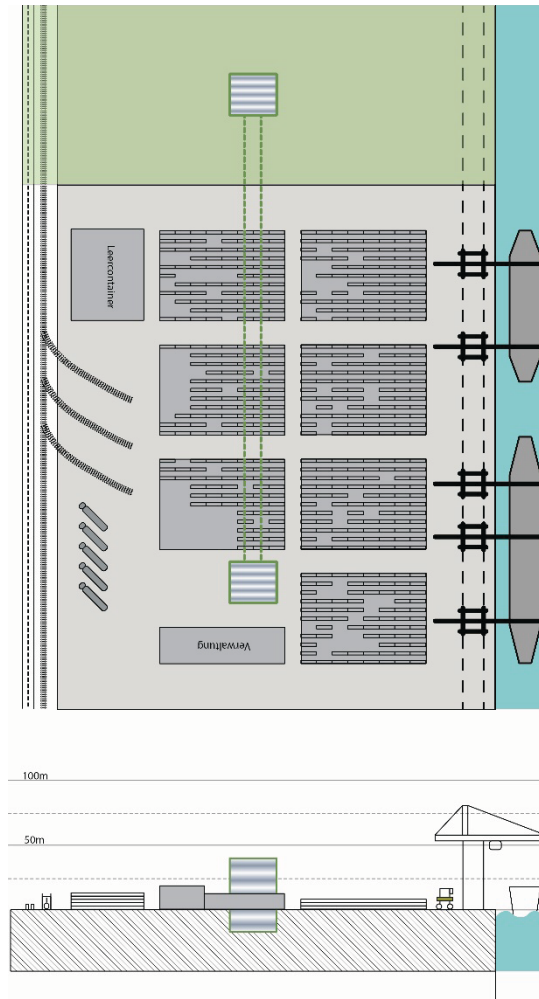


Abbildung 55: Direkt anschließende Terminalvergrößerung

Kategorie B – Anbindung seehafennaher, entkoppelter Flächen

Der Einsatzklasse „B“ sind Fälle zuzuordnen, bei denen die Terminalflächen keinen direkten Anschluss untereinander aufweisen oder bei denen zur Erweiterung von Bestandsflächen nur Expansionsflächen verwendet werden können, die nicht direkt an die Bestandsflächen grenzen. Eine direkt anschließende Ausweitung von bereits bestehenden Terminalflächen ist oft nicht möglich, da Seehäfen zumeist inmitten von seit Jahrzehnten gewachsenen Strukturen liegen und die Expansionen in vielen Fällen auf Grund von baulichen Hindernissen an ihre Grenzen stoßen (*Kategorie B1* - Geo-Objekte: Infrastruktur, Gebäude (vgl. Abbildung 56)). Zudem können auch geographische Hindernisse (*Kategorie B2* - Geo-Objekte: Fluss / Hafenbecken (vgl. Abbildung 57); *Kategorie B3* – Geo-Objekt: Berg (vgl. Abbildung 58)) zwischen Terminalflächen liegen. Die Art der geographischen Hindernisse (Gewässer, Höhenunterschied) hat einen Einfluss auf die Tauglichkeit der unterschiedlichen technologischen Systeme – daher werden hierfür unterschiedliche Klassen definiert: B1: infrastrukturelle Hindernisse, B2: hydrographische Hindernisse und B3: geomorphologische Hindernisse. Die Systemgrenze Containerterminal wird in allen Fällen überschritten. Die Entfernung zwischen den Flächen liegt zwischen ca. 10 Metern und einem Kilometer.

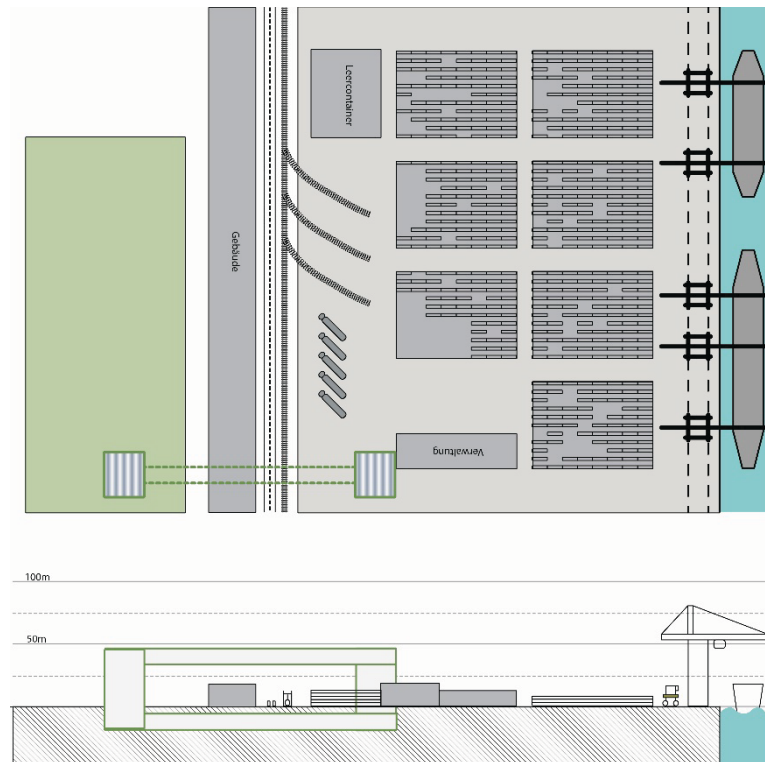


Abbildung 56: Anbindung einer seehafennahen Fläche, Überwindung infrastruktureller Topologie

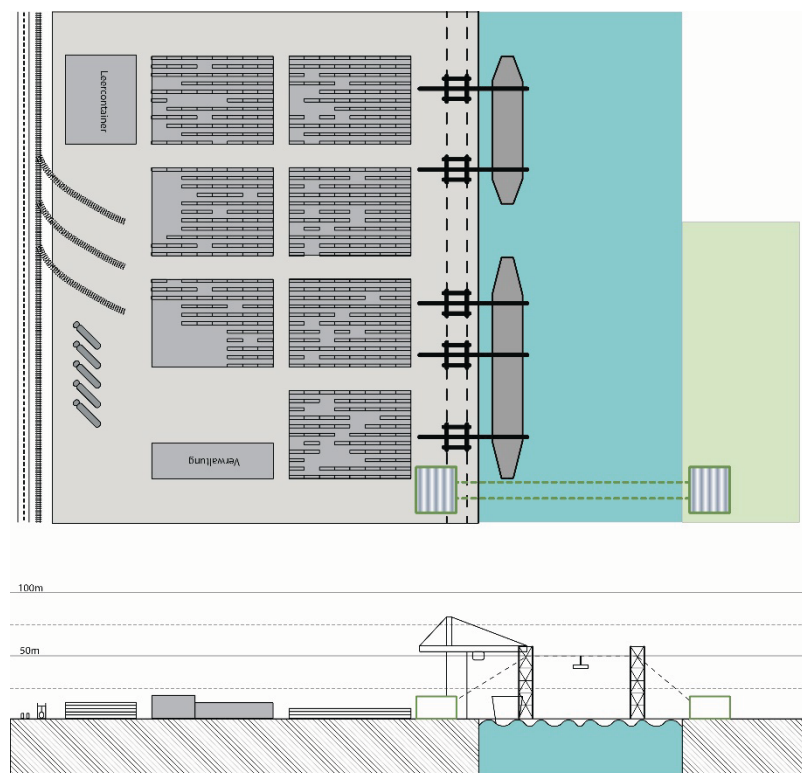


Abbildung 57: Anbindung einer seehafennahen Fläche, Überwindung eines Hafenbeckens

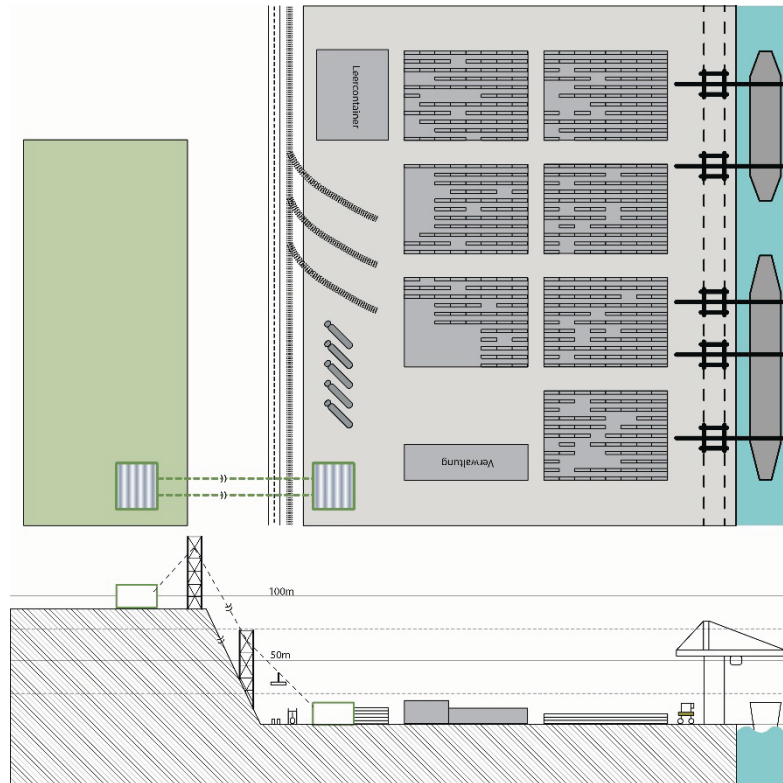


Abbildung 58: Anbindung einer seehafennahen Fläche, Überwindung eines geographischen Höhenunterschieds

Kategorie C – Anbindung Hafenhinterlandterminal

Violetta Roso charakterisiert in ihrer Dissertation drei verschiedene Typen des Dry Ports (Roso, 2009). Sie werden nach ihrer Distanz zum zugehörigen Seehafen unterschieden: Close, Midrange und Distant Dry Port (Eckhardt, et al., 2014). Ein Midrange Dry Port dient als Konsolidierungspunkt und wird i.A. durch eine Zugtrasse mit dem oder den angebundenen Seehäfen verbunden. Das charakteristische Merkmal eines Close Dry Port liegt darin, dass er direkt am Rand einer Hafenstadt liegt. Bei diesen Dry Port Typen liefern Spediteure am Dry Port und keiner am Hafen an – der Transport erfolgt konsolidiert, nach Abruf, per Zug. Für die Überwindung der Strecke zwischen dem Seehafen und dem entfernt liegenden Hafenhinterlandterminal werden demnach derzeit zumeist Zugtrassen eingesetzt.

Durch eine automatische Anbindung eines Hafenhinterlandterminals kann eine weitreichende Entzerrung der Anliefer- und Abholprozesse erfolgen da somit ein konstanter Zu- und Abfluss der Container gewährleistet wäre, ohne die bestehenden Infrastrukturen zu belasten. In den Betrachtungen liegt ein Hafenhinterlandterminal zwischen 10 und über 100 km entfernt zum Seehafen.

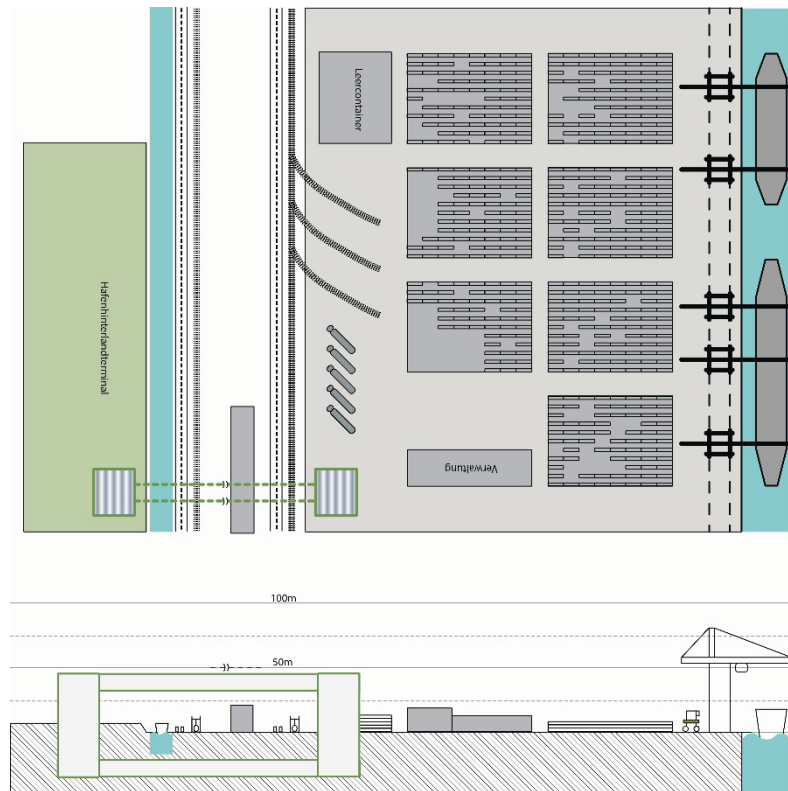


Abbildung 59: Anbindung an einen Hafenhinterlandterminal

Midrange Ports können per Definition im Rahmen dieser Arbeit der Klasse „C“ zugeordnet werden; Close Dry Ports den Klassen „A“ und „B“, je nachdem ob eine direkte Angrenzung vorliegt oder nicht. Distant Dry Ports sind entsprechend der konkreten Spezifikation der Klasse „B“ oder „C“ zuzuordnen.

Zusammenfassend lauten die für diese Arbeit geltenden Einsatzklassen, anhand derer eine Parametrierung der Beschreibung der zu überquerenden Geo-Objekte vorzunehmen ist, wie folgt (siehe Abbildung 60):

- (A) Terminalinterne Anbindung
- (B) Anbindung seehafennaher Flächen
 - (B1) Infrastrukturelle Hindernisse – z.B. Straßen, Schienen, Häuser
 - (B2) Hydrographisches Hindernis – Gewässer, z.B. Hafenbecken
 - (B3) Geomorphologisches Hindernis – Topologie: Höhenunterschied
- (C) Anbindung an Hafenhinterlandterminal

Abbildung 60: Einsatzklassen Geo-Objekte

Anwendungsbereich unterschiedlicher Substrukturen

Für die systematische Zuordnung der Technologien zu den Einsatzklassen erfolgt zunächst die Definition der Ausgestaltungsvarianten der Substruktur. Eine Trassenführung kann im Sinne des Fokus der Arbeit unter- oder überirdisch erfolgen (vgl. Abbildung 31 sowie Abbildung 61 bis Abbildung 65).

Bei einer *unterirdischen Trassierung* (Abbildung 65) erfolgt diese mittels Tunnel; hierin können unterschiedliche Systeme (Straße, Schiene) und Antriebstechnologien Verwendung finden, die sich aber nicht auf die Bewertung der Substruktur auswirken. Für die *überirdische Trassierung* erfolgt in Anlehnung an die Analyseergebnisse in Kapitel 3.2 eine Unterscheidung, die die Art der genutzten Substruktur umfasst und die Ausprägungen „Brückenbauwerk“, „Aufgeständert“, „Trassierung über Pylonen“ sowie „Luft“ haben kann. Eine Trassierung über ein *Brückenbauwerk* (Abbildung 61) erfordert, je nachdem welche Konstruktionsart gewählt wird, eine hinreichende Gründung, auf der die einzelnen Stützelemente basieren, sowie die Installation einer über die Stützelemente führenden Tragebene, die ebenfalls mit den Systemen Schiene oder Straße sowie Versorgungs- und Antriebselementen wie bspw. Stromschiene oder Seil ausgerüstet sein kann. Bei einer *aufgeständerten Trassierung* (Abbildung 62) wird ein Gestell installiert, an welchem die Systeme hängend transportiert werden. Die Ausprägung *Trassierung über Pylonen* (Abbildung 63) beschreibt ausschließlich seilgetragene Systeme, wobei diese zwischen einer Start- und einer Zielstation montiert sind und über Pylonen geführt werden. Zur Trassierung mittels Pylonen muss ebenfalls eine hinreichende Gründung erfolgen, auf denen die Pylonen aufgestellt werden. Pylonentrassierte Systeme kommen mit deutlich weniger Stützen (Berührungspunkte des Bodens) aus und können somit weitere Freifelder überspannen und größere Steigwinkel ermöglichen als brückenbauwerk-basierte Systeme (Schlupfeigenschaften der hierauf basierenden Systeme). Wird keine bodenberührende oder unterirdische Substruktur genutzt, muss die Trassierung in der *Luft* (Abbildung 64) erfolgen.



Abbildung 61: Brückenbauwerk, Seitenansicht



Abbildung 62: Aufgeständerte Trassierung



Abbildung 63: Trassierung über Pylonen, Seitenansicht

Abbildung 64: Flugtransport, Seitenansicht

Abbildung 65: unterirdische Trassierung, Seitenansicht

Die Zuordnung der Einsatzklassen für einen flurfreien Containertransport und der dienlichen Ausgestaltungsvarianten der Substruktur sind in Tabelle 11 dargestellt. Für eine terminalinterne Anbindung (A) ist grundsätzlich die Anwendung aller Substrukturvarianten vorstellbar. Für die Überwindung infrastruktureller Hindernisse (B1) sind alle Varianten außer die mit aufgeständerten Subsysteme möglich, da hiermit nicht die erforderlichen Höhen erreicht werden können und die Infrastruktur sehr umfassend ist. Für eine Trassierung über hydrographische Hindernisse ist insbesondere der Einsatz pylonentrassierter Systeme vorteilig, da hiermit größere Freifelder überspannt werden können. Auch für die Überquerung geomorphologischer Hindernisse (B2) ist insbesondere der Einsatz pylonentrassierter Systeme vorteilig, da hiermit größere Steigwinkel erreicht werden können. Für die Anbindung von Hafenhinterlandterminals kommen wiederum alle Ausgestaltungsvarianten der Substruktur in Frage.

<i>Einsatzklassen</i>	<i>Ausgestaltungsvarianten der Substruktur</i>				
	<i>Unterirdisch</i>	<i>Aufgeständert</i>	<i>Brücke</i>	<i>Pylonen</i>	<i>Luft</i>
<i>(A) Terminalinterne Anbindung</i>	x	x	x	x	x
<i>(B1) Infrastrukturelle Hindernisse</i>	x		x	x	x
<i>(B2) Hydrographische Hindernisse</i>			(x)	x	x
<i>(B3) Geomorphologische Hindernisse</i>				x	x
<i>(B) Anbindung an Hafenhinterlandterminal</i>	x		x	x	x

Tabelle 11: Zuordnung der Ausgestaltungsvarianten der Substruktur zu den Einsatzklassen

Zur weitergehenden Bewertung der Beeinflussung des zu überwegenden Bereiches durch die technologiespezifische Substruktur ist festzustellen, dass ein Tunnelsystem oder die Nutzung fliegender Systeme zu einer geringstmöglichen Beeinflussung des zu überquerten Bereiches führt. Eine Trassierung über Pylonen hat einen mittelgroßen und eine Trassierung mittels Brückenbauwerk einen großen Einfluss hierauf. Analog hierzu ist die Eignung der Systeme unter besonderer Berücksichtigung der Beeinflussung der zu überquerenden Strukturen zu bewerten:

Transporttechnologien, die auf der Integration eines Brückenbauwerks basieren, treffen diese Anforderungen am wenigsten, wohingegen tunnelbasierte Systeme, fliegende Systeme und Seilsysteme, bei der das Trageil typischer Weise über Pylonen über die Strecke geführt wird, als weniger beeinflussend zu bewerten sind.

4.2.4 Gewünschte Förderleistung

Als ausschlaggebendes Kriterium zur Parametrierung und Ausgestaltung der Technologien für den betrachteten Anwendungsfall ist die Leistung heranzuziehen. Im Ergebnis zeigt die Berechnung der Förderleistung auf, wie ein System ausgestaltet sein muss, damit mit der jeweiligen Technologie die gewünschte Anzahl an Containern transportiert werden kann. Dabei gilt es, neben den technologiespezifischen Parametern auch die unterschiedlichen Arbeitsweisen (vgl. Kapitel 4.1.3) zu beachten. Zu den technologiespezifischen Parametern zählen im Allgemeinen die folgenden Werte:

t_B	Beladedauer [s]
t_E	Entladedauer [s]
t_T	Transportzeit [s]

Die Taktzeit (Z), gemessen in Sekunden pro Container, bemisst die Dauer eines Taktspiels, also der Beladung, des Transports und der Entladung und ergibt sich im Allgemeinen nach Gl. (4). Die Leistung (L) wird in Containern pro Stunde gemessen und bezieht sich auf die Taktzeit. Ihre Berechnung muss ausgehend von ihrer allgemeingültigen Berechnungsformel nach Gl. (5) je nach Arbeitsweise (uni-/ bidirektional) und technologischer Spezifika angepasst werden.

$$Z = t_B + t_T + t_E \text{ [s]} \quad \text{Gl. (4)}$$

$$L = \frac{3600 \cdot 1 \text{ Container}}{Z} \text{ in } \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] \quad \text{Gl. (5)}$$

4.3 Technologiespezifische Bewertung

Im Rahmen der Technologiespezifikation (3) werden den in Kapitel 3.2 definierten Technologien konkrete Werte zu ihren technischen Parametern: Technische Kennzahlen (a , b , v_{\max} , ...), Einsatzfelder, Technologiereifegrad, Flächenbedarf Terminal und Flächenbedarf Strecke zugeordnet.

4.3.1 Technologiespezifikation

Technische Kennzahlen

Die die in der Bewertung stehenden Technologien werden im Allgemeinen anhand folgender technischen Kennzahlen beschrieben:

- Beschleunigungsfaktor: a [m/s^2]
- Verzögerungsfaktor: b [m/s^2]
- Maximalgeschwindigkeit: v_{max} [m/s]
- Maximalbeladung [TEU]
- Technologiespezifische Beladedauer: t_B [s]
- Technologiespezifische Entladedauer: t_E [s]

Die Ergänzung weiterer relevanter technischer Kennzahlen ist möglich und muss für jede Technologie im Rahmen ihrer Metrisierung geprüft werden.

Zuordnung der betrachteten technologischen Varianten zu den Anwendungsklassen (Mapping)

Um für verschiedene Einsatzszenarios eine Einschätzung der Dienlichkeit der Technologien zu bewerten, werden die in Kapitel 3.2 definierten Technologien den Ausgestaltungsvarianten der Substruktur zugeordnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 12 dargestellt.

<i>Technologie</i>	<i>Ausgestaltungsvarianten der Substruktur</i>				
	<i>Unterirdisch</i>	<i>Brücke</i>	<i>Auf- geständert</i>	<i>Pylonen</i>	<i>Luft</i>
<i>RailCab</i>		X			
<i>Container-Magnetschwebebahn</i>		X			
<i>Containerbahn</i>		X			
<i>Tube Cargo Express</i>	X				
<i>Pipelines</i>	X				
<i>Underground Container Mover</i>	X				
<i>Cargo Cap</i>	X				
<i>Underground Automated Trucks</i>	X				
<i>Cargo Lifter</i>					X
<i>Wurfmaschine</i>					X
<i>Drohne</i>					X
<i>Containerluftseilbahn</i>				X	
<i>Containerstandseilbahn</i>		X			
<i>Concar</i>			X		
<i>EagleRail</i>			X		
<i>GRail</i>			X		
<i>AKCTS</i>		X			
<i>AutoCon</i>		X			
<i>SkyTech</i>			X		
<i>Freight Shuttle System</i>		X			
<i>ACT</i>		X			

Tabelle 12: Bestimmung der technologiespezifischen Ausgestaltung der Substruktur

Hinsichtlich der technologiespezifischen Zuordnung der Einsatzklassen und der Technologien sind die voranstehenden Informationen in die komparative Bewertung einzubeziehen. Die Bewertung gibt Aufschluss über die Bestimmung der technologiespezifischen Ausgestaltung der Substruktur und der Eignung der möglichen Substrukturen für die definierten Einsatzklassen; somit ergibt sich im Ergebnis eine Aussage dazu, welche Systeme grundsätzlich für einen konkreten Einsatzfall, der anhand der o.g. Systematik beschrieben ist, in Frage kommen.

Technologiereife

Der Entwicklungsstatus gibt Aufschlüsse darüber, wie schnell die entsprechende Technologie einsetzbar wäre und ob die Tauglichkeit der Technologie auf Grund ihres Entwicklungsstatus noch mit vielen Unwägbarkeiten behaftet ist. Es gilt zu beachten, dass Technologien, deren Zweckdienlichkeit prototypisch oder mittels Demonstratoren sowie Technologien, die aus anderen Bereichen auf den untersuchten Anwendungsfall adaptiert werden würden, bereits auf ein größeres Maß an Zuverlässigkeit und Wissen fußen, als rein konzeptionell beschriebene Systeme.

Konzepte zur Bewertung der Technologiereife (K1) wurden ursprünglich aus dem Bereich „Softwareentwicklung“ transferiert; heute gibt es eine Vielzahl an Modellen (Rummel, 2014), wobei für die vorliegende Arbeit ein Objektbezug auf technologiebezogene Reifegradmodelle zu wählen ist. Zur Bewertung des Entwicklungsstatus wird in der vorliegenden Arbeit der Technologiereifegrad (englisch: Technology-Readiness-Level: TRL²⁵) herangezogen; die Kategorisierung erfolgt auf Basis der Zuordnung der Technologien zu ihrem Technologiereifelevel (vgl. Tabelle 13). Dieses sehr verbreitete Verfahren zur Reifegradbewertung wurde in den 1980er Jahren von der NASA entwickelt und findet in verschiedenen Entwicklungsphasen zur Überprüfung der Einsatzreife Anwendung. Die TRL-Bewertung fußt auf einem vordefinierten Kriterienkatalog, der eine neunstufige TRL-Skala enthält, deren Level verschiedene Entwicklungsstufen beschreiben und derart eine Zuordnung der Technologie ermöglichen.

²⁵ Das TRL-Konzept wurde 1995 im „White Paper on Technology Readiness Level“ von John C. Mankins beschrieben und dient der Quantifizierung des Reifegrades von Technologieentwicklungen (Mankins, 1995). Auch (Parasuraman, 2000)

Level	Beschreibung	
9	Technologieprüfung erfolgreich im Feld	Reale Umgebung
8	Technologietests erfolgreich abgeschlossen	
7	Gesamtprototypendemo in Einsatzumgebung	
6	Prototypendemonstration im Simulationsumfeld	Simulationsumgebung
5	Komponentenprüfung im Simulationsumfeld	
4	Komponentenprüfung im Laborumfeld	Forschungsstadium
3	Nachweis Konzepttauglichkeit	
2	Technologiekonzept formuliert	
1	Basisprinzipien ermittelt	

Tabelle 13: TRL-Modell, in Anlehnung an (Schimpf & Rummel, 2015)

Die Bewertung des Technologiereifegrades soll, der Analyssystematik folgend, in Anlehnung an die in Tabelle 13 dargestellten Klassen erfolgen. Da derzeit keine der beschriebenen Technologien konkret am Markt erhältlich ist (entspräche TRL 9), ist für die Bewertung dieses Kriteriums insbesondere auch zu beachten, ob durch einen Technologietransfer aus einer anderen Branche entsprechende Kompetenzen am Markt zur Verfügung stünden bzw. ob die konzeptionelle Umsetzung in einem skalierten Modell / in einer Laborumgebung bereits überprüft wurde. Die Festlegung des TRL ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

<i>Technologie</i>	<i>Entwicklungsstatus</i>	<i>TRL</i>
RailCab	Demonstrator	6
Container-Magnetschwebbahn	Prototypische Umsetzung	7
Containerbahn	Konzeptionelle Beschreibung	2
Tube Cargo Express	Demonstrator	6
Pipelines	Konzeptionelle Beschreibung	2
Underground Container Mover	Konzeptionelle Beschreibung	2
Cargo Cap	Konzeptionelle Beschreibung	2
Underground Automated Trucks	Demonstrator	6
Cargo Lifter	Demonstrator	6
Drohne	Konzeptionelle Beschreibung	2
Containerluftseilbahn	Demonstrator	6
Containerstandseilbahn	Demonstrator	6
Concar	Prototypische Umsetzung	7
EagleRail	Demonstrator	6
GRail	Konzeptionelle Beschreibung	2
AVC	Prototypische Umsetzung	7
ARS	k.A.	1
ACS	k.A.	1
AGV	im operativen Einsatz	9
AMTT	Prototypische Umsetzung	7
AutoCon	Forschung	1
SkyTech	Konzeptionelle Beschreibung	2
Freight Shuttle System	Prototypische Umsetzung	7
ACT	Konzeptionelle Beschreibung	2

Tabelle 14: Zuordnung der technologiespezifischen TRL zu den ermittelten Technologien

Flächenbedarfe

Die Bewertung von konstruktionsbedingten Kriterien ist in einem derart frühen Stadium schwierig, aber insbesondere für das betrachtete Anwendungsfeld signifikant, da im Hafensbereich und bei der Überquerung bestehender Infrastrukturen deren Beeinflussung bzw. Beeinträchtigung sehr relevant ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Bewertung des systemspezifisch benötigten Flächenbedarfs. Die Bewertung des Platzbedarfs der Systeme setzt sich aus der *Fläche, die auf dem Terminal* (Breite der Auf- bzw. Abfahrt in Abhängigkeit von x_s) bereitgestellt werden muss, sowie die *Flächenbedarfe der Trassenführung* (F_T) zusammen.

Die Bewertung der terminalinternen Fläche ergibt sich für die überirdischen Systeme aus der technologiespezifischen maximalen Steigfähigkeit (s). Hieraus leitet sich die Länge der Strecke ab, die als Auf- bzw. Abfahrt bezeichnet werden kann. Für straßenbasierte und schienengebundene²⁶ Technologien mit lokalem Antrieb liegt sie bei ca. 5 Prozent (vgl. Marktrecherche), bei seilgezogenen Systemen bei ca. 10-15% und bei fliegenden Systemen bei ca. 45%. x_s beschreibt die Länge der Auf- und Abfahrt und errechnet sich gemäß Gl. (3).

Die Beeinflussung der überquerten Fläche durch die Substruktur leitet sich aus der Betrachtung der erdbodennahen Konstruktionen ab. Wie in Abbildung 66 gezeigt ist der Einfluss eines Brückenbauwerks und einer aufgeständerten Trassierung (Abbildung 67) als Substruktur zur Trassenführung groß, wohingegen eine Trassierung über Pylonen (vgl. Abbildung 68) weniger beeinflussend ist. Eine bodenfreie Trassierung ist unterirdisch oder fliegend möglich und nimmt den geringsten Einfluss (vgl. Abbildung 69 und Abbildung 70). Die Zuordnung der Technologien ist Tabelle 12 zu entnehmen.

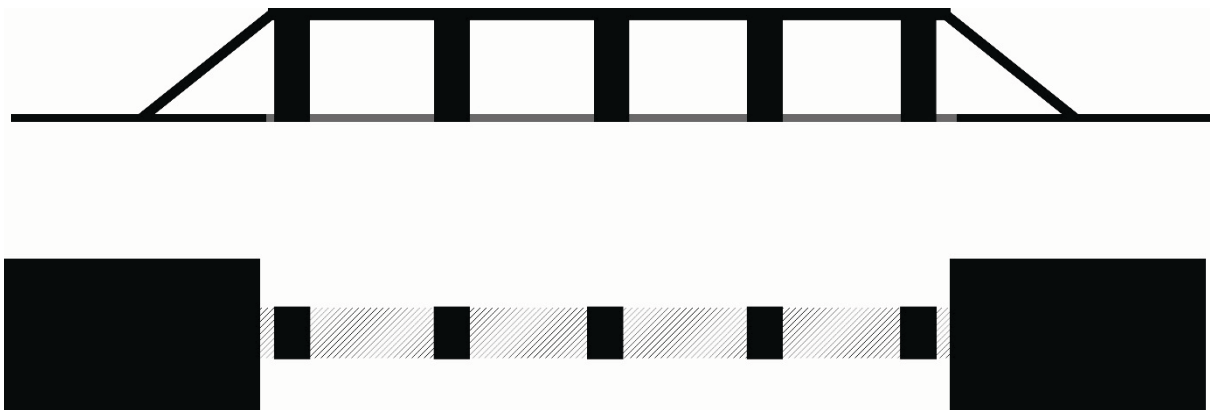


Abbildung 66: Ableitung des Systemflächenbedarfs, Brückenbauwerk (Seiten- und Draufsicht)

²⁶ Geislinger Steige (Stuttgart - Ulm): 22,5 Promille, Bad Reichenhall - Berchtesgaden: 40 Promille, Höllentalbahn im Schwarzwald bei Freiburg: 55 Promille Steigung.

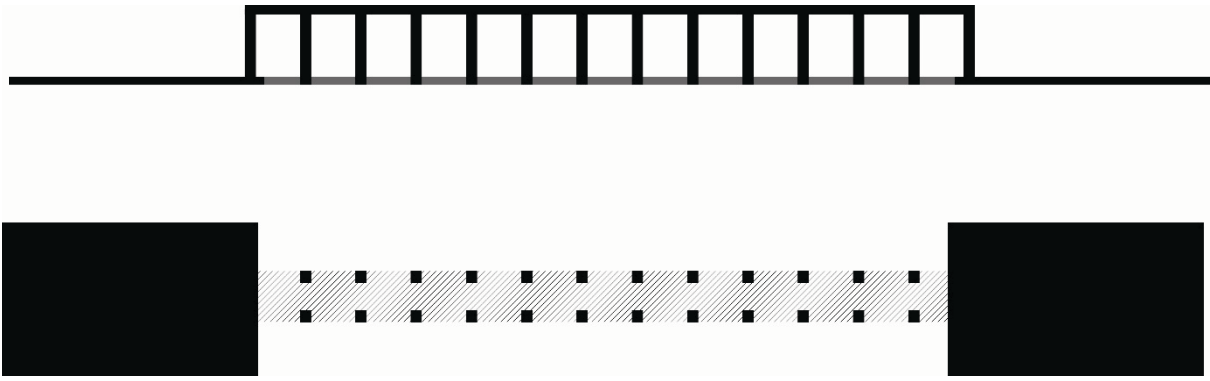


Abbildung 67: Ableitung des Systemflächenbedarfs, Aufgeständerte Trassierung (Seiten- und Draufsicht)

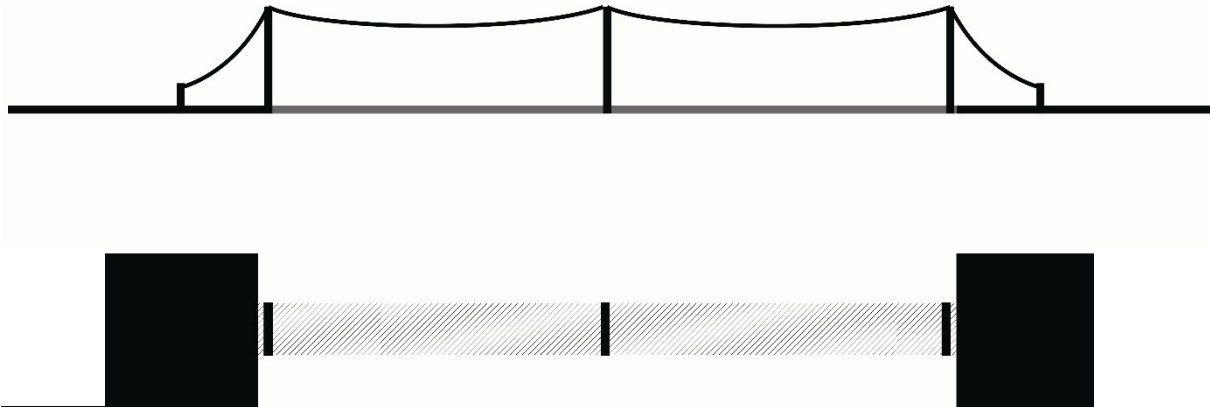


Abbildung 68: Ableitung des Systemflächenbedarfs, Trassierung über Pylonen (Seiten- und Draufsicht)

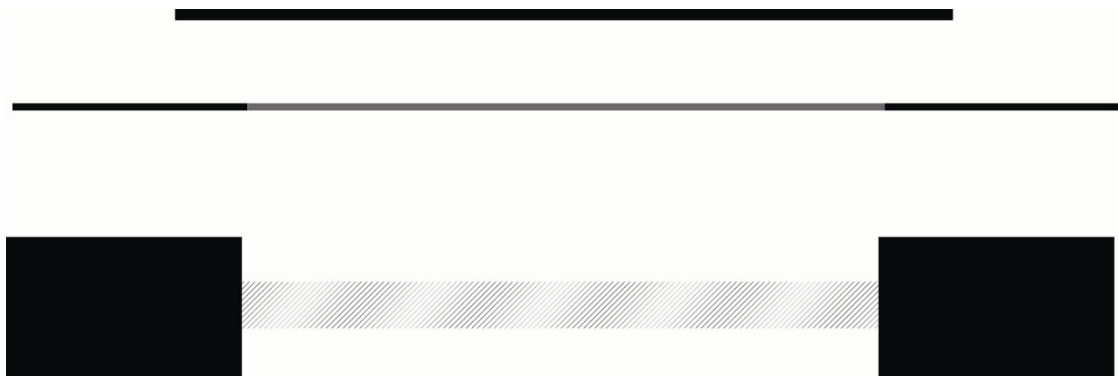


Abbildung 69: Ableitung des Systemflächenbedarfs, Flugtransport (Seiten- und Draufsicht)



Abbildung 70: Ableitung des Systemflächenbedarfs, unterirdische Trassierung (Seiten- und Draufsicht)

4.3.2 Technische Systemauslegung

Im Rahmen der technischen Systemauslegung (3) werden die in der Szenariobeschreibung (1) definierten Eingangsparameter und die Technologiespezifikationen (2) genutzt, um im Rahmen einer leistungsbezogenen Systemauslegung die spezifische Systemgestaltung für passende Technologien zu definieren und damit einhergehend die technologiespezifischen Kennwerte zu ermitteln. Hierfür müssen für alle zu untersuchenden Technologien Formeln entwickelt werden, anhand derer die technologiespezifische und kennzahlenbezogene Leistung zu ermitteln ist. Für eine detaillierte Metrisierung der konkreten Leistungsdaten der einzelnen Technologien ist eine tiefgehende, technologiespezifische Betrachtung der Ausgestaltung und damit der Berechnungsgrundlagen nötig, da diese u.a. auf Grund der geringen Entwicklungsstadien der Technologien nicht allgemeingültig vorliegen. Eine Metrisierung für ausgewählte Technologien erfolgt im folgenden Kapitel (vgl. Kapitel 5) exemplarisch. Im Ergebnis werden durch die technische Systemauslegung für die untersuchten Technologien folgende Parameter festgelegt:

- Eignung
- Systemausgestaltung
- Leistung
- Flächenbedarfe
- Verkehrsvermeidung

4.3.3 Bewertung der technischen Systemauslegung

Zur unternehmensspezifischen Bewertung der Ergebnisse der technischen Systemauslegung wird eine Nutzwertanalyse angewendet (vgl. Kapitel 2.3.2), die auf Gewichtungsfaktoren basiert, die mittels „paarweisem Vergleich“ ermittelt werden. Der paarweise Vergleich wird in Bezug auf die Parameter „Technologiereife“, „Flächenbedarf auf dem Terminal“ und „Flächenbedarf auf der Strecke“ vorgenommen. Durch den paarweisen Vergleich werden die technologiespezifischen Untersuchungskriterien zueinander in ein Verhältnis gesetzt und somit anhand der Unternehmenswerte die Rangfolge ihrer Wichtigkeit (vgl. Kapitel 2.3.2). Zeilenbezogen wird dabei in das rechte Dreieck jeweils eine 1 eingetragen, wenn das linksstehende Kriterium als wichtiger bewertet werden soll.

Die konkreten technologiespezifischen Systemparameter werden nach untenstehender Logik normiert. Die Normierungsklassen sind jeweils gleichgroß, außer für den TRL und die Flächenbewertung (Trasse). Zur Bewertung des Erfüllungsgrades wird eine Bewertungsskala von

eins bis fünf (ganzzahlig) angewendet, wobei „1“ einen geringen und „5“ einen hohen Erfüllungsgrad beschreibt.

	<i>Normierungsklasse</i>	<i>Wertbereich</i>
<i>Technologiereife</i>	NT1 = 1 Punkt	= TRL1 – TRL3
	NT2 = 2 Punkte	= TRL4
	NT3 = 3 Punkte	= TRL5
	NT4 = 4 Punkte	= TRL6
	NT5 = 5 Punkte	= TRL7 – TRL9
<i>Flächenbedarf, Terminal</i>	NB1 = 1 Punkt	= NB2, ..., $x_S \max$
	NB2 = 2 Punkte	= NB3, ..., $NB3 + \frac{x_S \max}{5}$
	NB3 = 3 Punkte	= NB4, ..., $NB4 + \frac{x_S \max}{5}$
	NB4 = 4 Punkte	$x_S = NB5, \dots, NB5 + \frac{x_S \max}{5}$
	NB5 = 5 Punkte	$x_S = 0, \dots, \frac{x_S \max}{5}$
<i>Flächenbedarf, Trasse</i>	NBT1 = 1 Punkt	Trassierung über Brückenbauwerk
	NBT 3 = 3 Punkte	Trassierung über Pylonen
	NBT = 5 Punkte	Unterirdische Trassierung oder Luft

Tabelle 15: Normierung der Untersuchungsergebnisse für die Nutzwertanalyse

Durch die Multiplikation der Gewichtungsfaktoren mit den normierten Erfüllungsfaktoren wird eine Rangfolge gebildet, der die am besten geeignete Technologie voransteht. Zur Darstellung der unternehmensspezifischen, technischen Bewertungsergebnisse im Sinne fallspezifisch konvenierender Technologien, ist der Einsatz eines mehrdimensionalen Diagramms dienlich. Hierin werden zum Zwecke einer guten Übersicht die Eingabeparameter (Systemlänge, Arbeitsweise, Kategorisierung des Einsatzszenarios) aufgegriffen; es werden nur die Systemparameter der Technologien angezeigt, die für die jeweilige Einsatzklasse nutzbar sind. Zur besseren Übersicht werden die normierten Systemparameter größter Relevanz (Technologiereife, Flächenbedarf und Förderleistung) visualisiert.

4.4 Unternehmensspezifische, betriebswirtschaftliche Bewertung

4.4.1 Unternehmenskennzahlen

Für die Untersuchungen ist eine unternehmensspezifische Festlegung der betriebswirtschaftlichen Parameter erforderlich. Hierin sind auf Investitionskostenseite die standortspezifischen Faktoren des Systems zu benennen: Transportsystem, Substruktur, Fundamentierung, Puffer, Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Prozessen, IT,..., zum einen die die Nutzungs- und Instandhaltungskosten beeinflussenden Faktoren: Lohnkosten, Energiekosten,... Des Weiteren gilt es die unternehmensspezifischen Bewertungsgrundsätze für eine Amortisationsrechnung sowie Leistungsdaten zur Entladekapazität des Terminals an der Kaye und der Aufteilung der Hinterlandverkehre (Modal Split) festzulegen.

Investitionskosten

Da die Investitionskosten stark von den konkreten Technologien, der konkreten Ausgestaltung, standortspezifischer Bedarfe und den individuellen Preisindikatoren des Lieferanten und der Subunternehmen abhängen ist eine umfassende detaillierte, metrisierte Bewertung der konkreten Investitionskosten aller im Rahmen Arbeit detektierten Technologien nicht zielführend. Für die Kostenindikatoren der Gesamtanlage wären neben den System- und Gründungskosten auch Kosten für die Anschlussstellen an die vor- und nachgelagerten Prozesse (Aufgabe- und Abnahmestationen, Puffer) sowie weitere Kosten für z.B. Schulungen einzubeziehen.

Nutzungs- und Instandhaltungskosten

Als Nutzungskosten werden alle Kosten zusammengefasst, die beim Regelbetrieb der Technologie entstehen. Dies sind bspw. Kosten für Strom oder Benzin sowie Mitarbeiterkosten und Versicherungskosten. Neben den Nutzungskosten sind die Instandhaltungskosten zu beachten, die einen Aufschluss darüber geben, wie hoch der personelle und materielle Wartungsaufwand ist.

Verkehrsvermeidung

Der Indikator V2 wird in Prozent bemessen und beschreibt die Entlastungsfähigkeit während einer Peak-Belastung. In die Berechnung geht über den Faktor p das konkrete Verhältnis der Hinterlandverkehre (Modal Split) eines Hafens ein, da dieser für den Anteil der per LKW abtransportierten Container steht. Zudem geht die maximale Umschlagsleistung an der Kaje (C_{PEAK}) in Containern pro Stunde ein. Die Entlastung zu Stoßzeiten wird nach Gl. (6) berechnet und betrachtet zunächst die Entlastung bei einer unidirektionalen Nutzung. Für eine weiterführende Berechnung der Gesamtheit der Entlastungseffekte wären Simulationsstudien auf Basis realer Umfuhrezahlen dienlich.

$$V2 = (C_{PEAK} \cdot p) - L \quad \text{Gl. (6)}$$

Wobei:

C_{PEAK} : maximale Umschlagsleistung an der Kaje [C/h]

p: Anteil LKW-Verkehre am Modal Split des Hafens [%]

4.4.2 Unternehmensspezifische und betriebswirtschaftliche Systemauslegung

Eine allgemeingültige Beschreibung der betriebswirtschaftlichen Bewertung ist nur insofern möglich, als das die unternehmensspezifischen Indikatoren und die auf Basis der Technologiespezifikation ermittelten konkreten Investitionskosten herangezogen werden müssen, um zunächst die unternehmensspezifischen betriebswirtschaftlichen Faktoren zu ermitteln. Zudem werden auch unternehmensspezifische Kennwerte (Modal Split und maximale Umschlagsleistung an der Kaye) herangezogen, um die tatsächliche Verkehrsvermeidung zu berechnen. Abschließend werden alle Ergebnisse durch die unternehmensspezifische Gewichtung der Bewertungsfaktoren zueinander in ein Verhältnis gesetzt um derart eine szenario- und unternehmensspezifische, technologiebezogene Empfehlung für ein System zum flurfreien Containertransport abzugeben.

4.4.3 Bewertung der unternehmensspezifischen und betriebswirtschaftlichen Parameter

Die in die Bewertung eingehenden Systeme sind jeweils so zu parametrieren, dass die gewünschte Förderleistung erreicht wird; die Ableitung der Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten und der Verkehrsvermeidung basieren hierauf. Zur unternehmensspezifischen Bewertung der Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Systemauslegung wird eine Nutzwertanalyse angewendet (vgl. Kapitel 2.3.2), die auf Gewichtungsfaktoren basiert, die mittels „paarweisem Vergleich“ ermittelt werden. Im paarweisen Vergleich werden die Parameter Investitionskosten, Nutzungs- und Instandhaltungskosten sowie Verkehrsvermeidung bewertet. Durch den paarweisen Vergleich werden die Untersuchungskriterien zueinander in ein Verhältnis gesetzt und somit anhand der Unternehmenswerte die Rangfolge ihrer Wichtigkeit festgelegt (vgl. Kapitel 2.3.2). Zeilenbezogen wird dabei in das rechte Dreieck jeweils eine 1 eingetragen, wenn das linksstehende Kriterium als wichtiger bewertet werden soll. Das Ergebnis des paarweisen Vergleichs wird auf die Bewertungsergebnisse im Rahmen einer Nutzwertanalyse angewendet (vgl. Kapitel 2.3.2). Hierfür werden die konkreten unternehmensspezifischen, betriebswirtschaftlichen Systemparameter normiert und in ein Berechnungstool eingetragen. Zur Bewertung des Erfüllungsgrades wird eine Bewertungsskala von eins bis fünf (ganzzahlig) angewendet, wobei „1“ einen geringen und „5“ einen hohen Erfüllungsgrad beschreibt. Im Rahmen der Nutzwertanalyse werden die normierten Erfüllungsgrade mit den Bewertungsfaktoren der Technologievarianten multipliziert und eine Rangfolge gebildet, um so die am besten geeignete Technologie zu definieren. Die Normierungsklassen sind jeweils gleichgroß; die gewählten Wertebereiche sind nachfolgend dargestellt, wobei die Indizierung mit „max“ bedeutet, dass hier jeweils der unter den Varianten größte ermittelte Wert bzw. bei „min“ der kleinste ermittelte Wert einzutragen ist:

	<i>Normierungsklasse</i>	<i>Wertbereich</i>
<i>Investitionskosten (I)</i>	NI1 = 1 Punkt	$= NI2, \dots, I_{max}$
	NI2 = 2 Punkte	$= NI3_{min}, \dots, NI3_{min} + \frac{I_{max} - I_{min}}{5}$
	NI3 = 3 Punkte	$= NI4_{min}, \dots, NI4_{min} + \frac{I_{max} - I_{min}}{5}$
	NI4 = 4 Punkte	$= NI5_{min}, \dots, NI5_{min} + \frac{I_{max} - I_{min}}{5}$
	NI5 = 5 Punkte	$= I_{min}, \dots, \frac{I_{max} - I_{min}}{5}$
<i>Nutzungs- und Instandhaltungskosten (B)</i>	NB1 = 1 Punkt	$= NB2, \dots, B_{max}$
	NB2 = 2 Punkte	$= NB3_{min}, \dots, NB3_{min} + \frac{B_{max} - B_{min}}{5}$
	NB3 = 3 Punkte	$= NB4_{min}, \dots, NB4_{min} + \frac{B_{max} - B_{min}}{5}$
	NB4 = 4 Punkte	$= NB5_{min}, \dots, NB5_{min} + \frac{B_{max} - B_{min}}{5}$
	NB5 = 5 Punkte	$= B_{min}, \dots, \frac{B_{max} - B_{min}}{5}$
<i>Verkehrsvermeidung (V2)</i>	NV1	$= V2_{min}, \dots, V2_{min} + \frac{V2_{max} - V2_{min}}{5}$
	NV2	$= NV1_{max}, \dots, NV1_{max} + \frac{V2_{max} - V2_{min}}{5}$
	NV3	$= NV2_{max}, \dots, NV2_{max} + \frac{V2_{max} - V2_{min}}{5}$
	NV4	$= NV3_{max}, \dots, NV3_{max} + \frac{V2_{max} - V2_{min}}{5}$
	NV5	$= NV4_{max}, \dots, V2_{max}$

Tabelle 16: Normierung der Untersuchungsergebnisse für die Nutzwertanalyse

4.5 Zusammenfassung der Systematik

In den voranstehenden Unterkapitel wurde zunächst die Systembeschreibung definiert (vgl. 4.1), anhand derer Szenarios allgemeingültig beschrieben werden können, für die die Einsatztauglichkeit eines flurfreien Containertransportsystems mit dem nachstehend entwickelten Analysetool überprüft werden soll. Hierfür erfolgte eine Festlegung der Beschreibung der funktionalen Indikatoren: Systemlänge und Arbeitsweise (vgl. 4.2.1 und 4.2.2) sowie eine Untersuchung und Kategorisierung möglicher Einsatzszenarios (vgl. 4.2.3) und der allgemeingültigen Beschreibung der Förderleistung (vgl. 4.2.4). Im Anschluss wurde die Beschreibung der technologiespezifischen Parameter definiert und, insofern möglich, eine

technologiespezifische Festlegung vorgenommen und die Systematik zur unternehmensspezifischen Bewertung festgelegt (vgl. 4.3). Unternehmensspezifische und betriebswirtschaftliche Faktoren und ebenfalls die Systematik zur unternehmensspezifischen Bewertung wurden im darauffolgenden Kapitel 4.4 beschrieben. Die unternehmensspezifischen Bewertungen der Ergebnisse basieren jeweils auf der Anwendung der Methoden „Paarweiser Vergleich“ und „Nutzwertanalyse“. In der nachfolgenden Tabelle sind die Merkmalsausprägungen aller Systemparameter zusammengefasst.

<i>Parameter</i>	<i>Merkmalsausprägungen</i>					
<i>Systemlänge</i>	Start - Ziel inkl. Auf- und Abfahrten: x_A [m] nach Gl. (2)	x: Streckenlänge mit Höhe > h [m]				<i>Szenariobeschreibung</i>
<i>Arbeitsweise</i>	Unidirektional: Richtung fest	Unidirektional: Richtung flexibel	Bidirektional: gekoppelt	Bidirektional: entkoppelt		
<i>Einsatzklasse</i>	(A) Terminal-interne Anbindung	(B1) Infrastrukturelle Hindernisse	(B2) Hydrographische Hindernisse	(B3) Geomorphologische Hindernisse	(C) Hafen-hinterland-anbindung	
<i>Förderleistung</i>	Taktzeit Z nach Gl. (4)	Leistung L nach Gl. (5)				<i>Technologiespezifisch</i>
<i>Technologie-reifegrad</i>	Bestimmung gem. Tab. 13					
<i>Flächenbedarf</i>	Beeinflussung durch Substruktur (F_T)	Strecke x_s für die Auf- und Abfahrt in Abhängigkeit von s - Gl. (3)				
<i>Verkehrs-vermeidung</i>	Verkehrs-vermeidung V2 [%]					<i>Unternehmensspezifisch</i>
<i>Kosten</i>	Investitions-kosten [€] für Def. System	Nutzungs- und Instandhaltungs-kosten [€] für Def. System				

Tabelle 17: Zusammenfassung der systembeschreibenden, technologiespezifischen und betriebswirtschaftlichen Parameter

Eine Zuordnung der Merkmalsausprägungen und der in Kapitel 3.2 definierten Technologien erfolgte voranstehend für die Kategorisierung der Einsatzszenarien, des Technologiereifegrades und des Flächenbedarfs. Die allgemeingültige metrisierende Leistungsberechnung bedarf einer eingehenden Untersuchung der Technologien; diese kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht umfänglich erfolgen und wird daher im nachfolgenden Kapitel exemplarisch durchgeführt.

Das Kapitel 4 umfasst die Herleitung und Beschreibung der komparativen Analyssystematik zur Technologiebewertung sowie die Festlegung und Definition der hiermit verbundenen

Bewertungsparameter. Die Systematik ist auf andere Technologien zum flurfreien Containertransport übertragbar und stellt die Anforderungen und Gegebenheiten konkreter Anwendungsfälle möglichen technologischen Ausgestaltungen gegenüber. Somit wurde das in Kapitel 2.4 beschriebene Entwicklungsziel einer Systematik zur Technologiebewertung hiermit erreicht. An die Ausgestaltung der Analyse-systematik schließen sich, dem Basisaufbau der Arbeit folgend (vgl. Abbildung 1), die exemplarische Metrisierung (Kapitel 5) sowie die Implementierung der Analyse-systematik in einem datengestützten Tool und ihre Validierung (Kapitel 6) an.

5. Exemplarische Metrisierung ausgewählter Technologien

Nach der Ableitung der dem Analysetool zugrundeliegenden Systematik im Rahmen der vorangestellten Untersuchungen und der Detektion möglicher zu inkludierender Technologien wird dieses Kapitel exemplarisch die Metrisierung für ausgewählte Technologien behandeln. Hierfür ist eine eingehende Untersuchung der ausgewählten Technologien nötig, da nur so die technologiespezifischen Parameter ermittelt werden können. Die Metrisierung bezieht sich insbesondere auf die Parameter Taktzeit bzw. Leistungsberechnung; Kosten können nicht dargestellt werden.

Da für *konventionelle, automatisierte Containertransportmittel* der größte zu erwartende Informationspool vorliegt, wird diese Technologiegruppe ausgewählt. Da insbesondere AGV und MTT für Fahrten über längere Strecken geeignet sind und da insbesondere VC häufig in europäischen Häfen zum Einsatz kommen, werden genau diese drei in die Betrachtungen einbezogen. Des Weiteren wird für die *Containerluftseilbahn* eine Metrisierung durchgeführt, da diese Technologie die meisten der in Kapitel 3.2 beschriebenen Einsatzklassen bedienen kann (vgl. Kapitel 4.2.3) und somit ein hohes Einsatzpotential erwartet wird. Für die Metrisierung der Containerluftseilbahn (im Folgenden auch Containerseilbahn genannt) sind ausführliche Beschreibungen der Grundlagen zur Seilbahntechnik nötig, um hieraus das gewünschte System „Containerluftseilbahn“ abzuleiten. Hierauf aufbauend erfolgt die Konzeption eines entsprechenden Containerseilbahnsystems (Kapitel 5.1) – die Gesamtkonzeption erfolgte in Anlehnung an VDI 2221 (VDI 2221, 1993) und ist der Arbeit angehängt (vgl. Kapitel 9.3). Hier folgend werden die relevanten Konzeptionsergebnisse beschrieben. Auf Basis der Voruntersuchungen zur Containerseilbahn und den Informationen zu den konventionellen Containertransportsystemen in Kapitel 2.1.5 erfolgt die Taktzeit- bzw. Leistungsmetrisierung (vgl. Kapitel 5.2).

5.1 Konzeption eines Containerluftseilbahnsystems

5.1.1 Grundlagen Seilbahnen

An die Auswahl der im weiteren Verlauf exemplarisch untersuchten Technologie schließt sich in diesem Teilkapitel die Einführung in die *Seilbahntechnologie* an. Die Beschreibung des Stands der Wissenschaft zum Einsatz von *Materialseilbahnen* und die grundlegende Auswertung des *Einsatzbereiches der beschriebenen Seilbahnvarianten* zum Transport von Überseecontainern sowie die Metrisierung der Leistungsdaten und der damit verknüpften Kostenindikation folgen nach der einleitenden Grundlagenbeschreibung.

Seilbahnen können in zwei unterschiedliche Nutzungsgruppen unterteilt werden: sie werden zum Personen- und zum Gütertransport eingesetzt (Gross, 2011); dabei schließen sich die Transportzwecke nicht gegenseitig aus. Die Eingliederung hat insbesondere Einfluss auf die Gültigkeit gesetzlicher Bestimmungen und Sicherheitsvorkehrungen (Gross, 2011). Obwohl Seilbahnen ursprünglich für den Materialtransport entwickelt wurden, schenkt die Literatur vornehmlich dem Transport von Personen Beachtung. Auch in der wissenschaftlichen Literatur wird aktuell insbesondere der Einsatz von Seilbahnen zum Personentransport diskutiert. Der Fokus liegt hierbei auf ihrem Einsatz im urbanen Raum, u.a. zur Anbindung von

Innenstadtbereichen unter Nutzung des Vorteils der Erschließung einer freien Infrastrukturebene (vgl. bspw. (Reichenbach & Puhe, 2016), (Rudolph, 2009), (Schnieder, 2014), (Kremer, 2015), (Nikšić & Gašparović, 2010), (Alshalafah, et al., 2013)). Da viele Inhalte der für den Personentransport ausgelegten Anlagen auch auf den Gütertransport übertragbar sind, werden die Grundlagen zur Seilbahntechnik in der vorliegenden Arbeit zunächst für den Personentransport dargestellt. Anschließend erfolgt eine Untersuchung des Standes der Wissenschaft und Technik im Bereich Materialeilbahnen.

Systembeschreibung und -varianten

Nach *Menius und Matthews* (Menius & Matthews, 2017) können Bahnen „hinsichtlich ihrer Bauart, Betriebsform, Eigentumsverhältnisse und ihrer Verkehrsform“ unterschieden werden (vgl. Abbildung 71). Seilbahnen unterscheiden sich von Schienenbahnen, Magnetschwebbahnen und Zahnradbahnen insbesondere in ihrer Antriebsart.

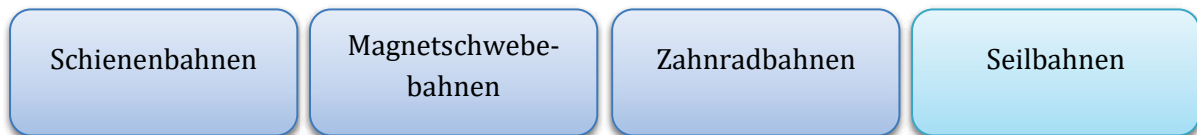


Abbildung 71: Einteilung von Bahnen, e.D. in Anlehnung an (Menius & Matthews, 2017))

Weiterführend werden Seilbahnen nach *Liedl* (Liedl, 1999) in der ersten Ebene nach der Art des Tragmittels (Seil, Schnee, Schiene, Wasser, Luftkissen). Für die nachfolgende Beschreibung und Untersuchung einer Containerluftseilbahn ist entsprechend dem Tragmittel „Seil“ zuzuordnen. In der folgenden Ebene erfolgt eine Unterscheidung nach den Funktionsmerkmalen (Seile mit unterschiedlichen Funktionen), der Betriebsart (kontinuierlich, intermittierend, Umlaufbetrieb, Pendelbetrieb) und der Verbindung zwischen den Transporteinheiten und dem Seil (fest, kuppelbar). Die Variation der Ausgestaltungsmöglichkeiten führt zu verschiedenen technischen Varianten; diese werden im Folgenden näher beschrieben. Die Kategorisierung nach *Liedl* ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.

Die initiale Unterscheidung nach der Definition des Tragmittels erfolgt nach Abbildung 72 auf Grund der Anzahl der Seile, denen eine unterschiedliche Funktion zuzuordnen ist (vgl. Abbildung 73). Bei der *Einseilbahn* werden die Fahrzeuge von einem sog. Förderseil gleichzeitig getragen und bewegt (Liedl, 1999), wohingegen diese Funktionen bei der *Zweiseilbahn* von unterschiedlichen Seilen (Tragseil und Zugseil) erfüllt werden.

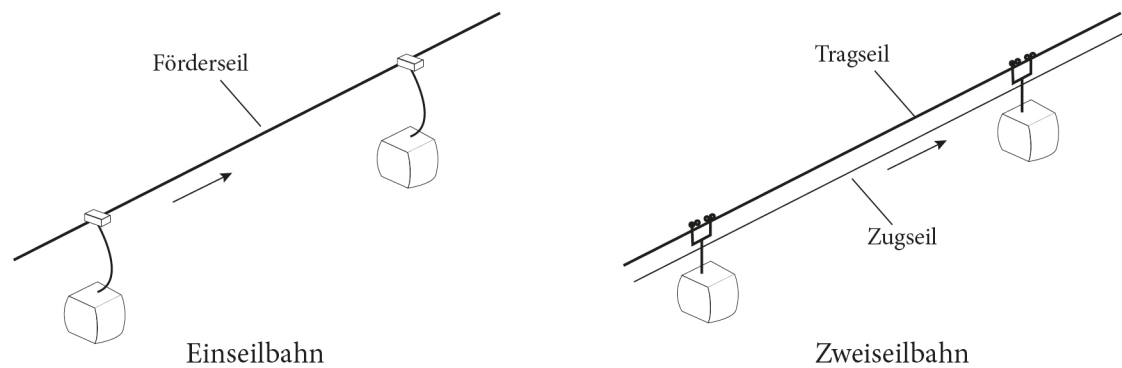


Abbildung 73: Unterscheidung nach der Anzahl der Seile unterschiedlicher Funktion, e.D. nach (Liedl, 1999)

Die Unterscheidung nach der Betriebsweise, also ob pendelnd oder umlaufend, ist in Abbildung 74 dargestellt. Im Pendelbetrieb verkehren die Fahrzeuge in unterschiedlicher Fahrtrichtung pendelnd zwischen den Stationen auf gleichbleibenden Fahrspuren; im Umlaufbetrieb hingegen in gleichbleibender Fahrtrichtung, wobei die Rückfahrt auf der jeweils anderen Fahrspur erfolgt. Bei einem kontinuierlichen Betrieb erfolgt der Be- und Entladevorgang der Gondeln während das Hauptseil gleichbleibend vorantreibt - bei einer intermittierenden Betriebsart wird es hierzu gebremst bzw. angehalten.

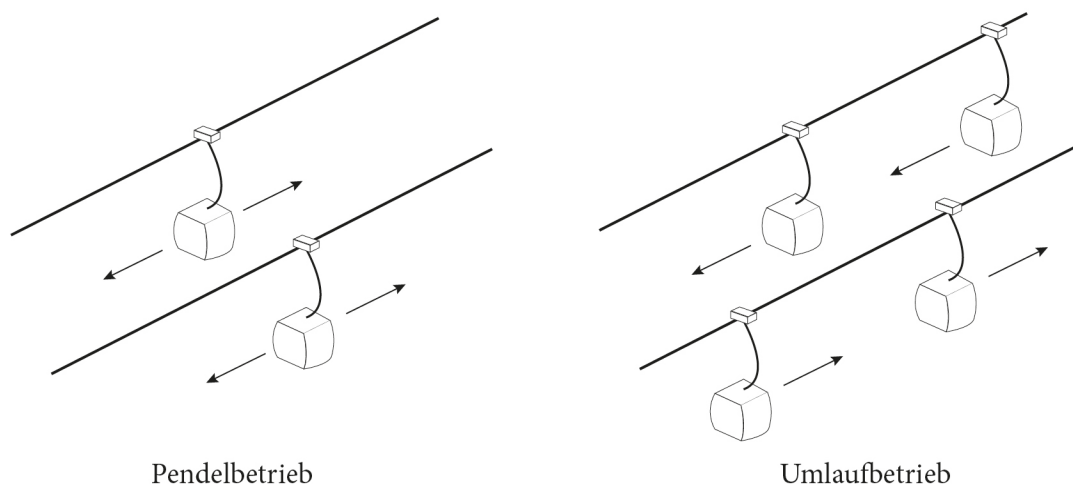


Abbildung 74: Unterscheidung nach der Betriebsweise, e.D. nach (Liedl, 1999)

Entsprechend der Anforderungen kommen für einen Containertransport Seilbahnvarianten in Frage, die ein Kabinenfahrzeug transportieren: Einseil-Umlaufbahn, Zweiseil-Umlaufbahn,

Doppel-Einseil-Umlaufbahn, Einseil-Pendelbahn, Zweiseil-Pendelbahn, 3S-Bahn. Diese werden im Folgekapitel näher beschrieben.

	<i>Einseil-Umlaufbahn</i>	<i>Zweiseil-Umlaufbahn</i>	<i>Doppel-Einseil-Umlaufbahn</i>	<i>Einseil-Pendelbahn</i>	<i>Zweiseil-Pendelbahn</i>	<i>3S-Bahn</i>
<i>Verbindung FZ / Seil</i>	Kuppelbar	Kuppelbar	Kuppelbar	Nicht kuppelbar	Nicht kuppelbar	Kuppelbar
<i>Funktionsmerkmale</i>	Trag- und Zugfunktion gekoppelt	Trag- und Zugfunktion getrennt	Trag- und Zugfunktion gekoppelt	Trag- und Zugfunktion gekoppelt	Trag- und Zugfunktion getrennt	Trag- und Zugfunktion getrennt
<i>Anzahl Tragseile</i>	1	2	2	1	2	2

Tabelle 18: Gegenüberstellung Seilbahnvarianten

Ausgestaltungsvarianten von Luftseilbahnen

Im Rahmen der Metrisierung und folglich auch im Rahmen der hier folgenden Beschreibungen wird nur auf Systeme mit dem Tragmittel „Seil“ eingegangen: Konstruktionsmethode *Luftseilbahn*. Bei der Luftseilbahn wird das Laufwerk/Gehänge auf einem oder mehreren zwischen freistehenden Stützen gespannten Seil geführt. Mit diesem System (Sedivy, 2012) kann i.A. eine hohe Leistung und Flexibilität erreicht werden. Die verschiedenen technischen Ausgestaltungen werden nachfolgend näher beschrieben.

Luftseilbahnen benötigen im Allgemeinen eine geringere technische Infrastruktur als brückenbasierte Systeme und sind nach *Liedl* (Liedl, 1999) relativ einfach aufzubauen. Sie bestehen im Grundsatz aus zwei Stationen, die mit Drahtseilen verbunden sind, ggf. Stützen und einer oder mehreren, freihängenden Gondeln/Lastaufnahmemitteln. Die gespannten Seile stellen den Fahrweg der Seilbahn dar und machen sie annähernd geländeunabhängig. Die Drahtseile werden entsprechend ihrer Aufgabe in Tragseil und Zugseil unterschieden (Czitary, 1962). Tragseile sind sehr dicke Seile, die so konstruiert sind, dass sie das Gewicht der Gondeln tragen können. Die Anzahl der Tragseile hängt stark von den Maximalgewichten der Gondeln ab, die zumeist auf Rollenbatterien an den Tragseilen aufgehängt sind. Die Tragseile sind in den beiden Stationen befestigt; in der einen sind sie fest eingespannt und in der anderen werden sie durch schwere, freihängende Gewichte gespannt. Die Anzahl der Stützen entlang der Route zur zusätzlichen Aufhängung der Tragseile hängt von der Streckenlänge und dem zu überquerenden Gelände ab. Das Zugseil hat im Gegensatz zu den Tragseilen viel kleinere Ausmaße; es dient dem Antrieb der Gondeln durch Zug. Das Seilantriebssystem ist im Bergbetrieb in der höhergelegenen Station der Seilbahn installiert.

Bei der Luftseilbahn im *Umlaufbetrieb* gibt es ein umlaufendes Zugseil. Bei diesem System sind demnach zwei synchronisierte Laufbahnen vorzufinden. Die Gondeln passieren am Ende einer Strecke eine Umlenkscheibe und werden so auf den anderen Strang umgesetzt. Das Zugseil wird pulsierend oder kontinuierlich bewegt. Im kontinuierlichen Fall werden die Gondeln an den Umlenkscheiben ausgekoppelt und für die Be- und Entladung auf ein langsamer laufendes System überführt; nach der Be- bzw. Entladung werden die Gondeln wieder eingeschleust. Beim

pulsierenden Antrieb wird das komplette System zur Be- und Entladung angehalten und darauffolgend wieder beschleunigt. In einer dritten Variante kommen sog. kuppelbare Klemmen zum Einsatz – die Gondeln werden vom Zugseil für den Be- und Entladevorgang entkoppelt (vgl. Abbildung 75 und Abbildung 76). Die *Einseilumlaufbahn* verfügt über ein Seil, welches als Trag- und Zugseil dient. Die Gondeln können zur Be- und Entladung kuppelbar oder fest installiert sein.

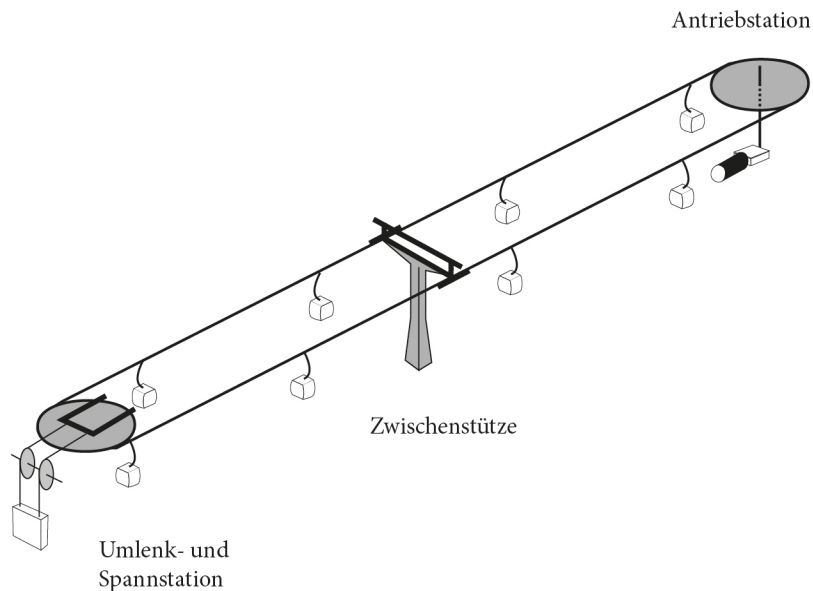


Abbildung 75: Nicht kuppelbare Seilbahnen, e.D. nach (Liedl, 1999)

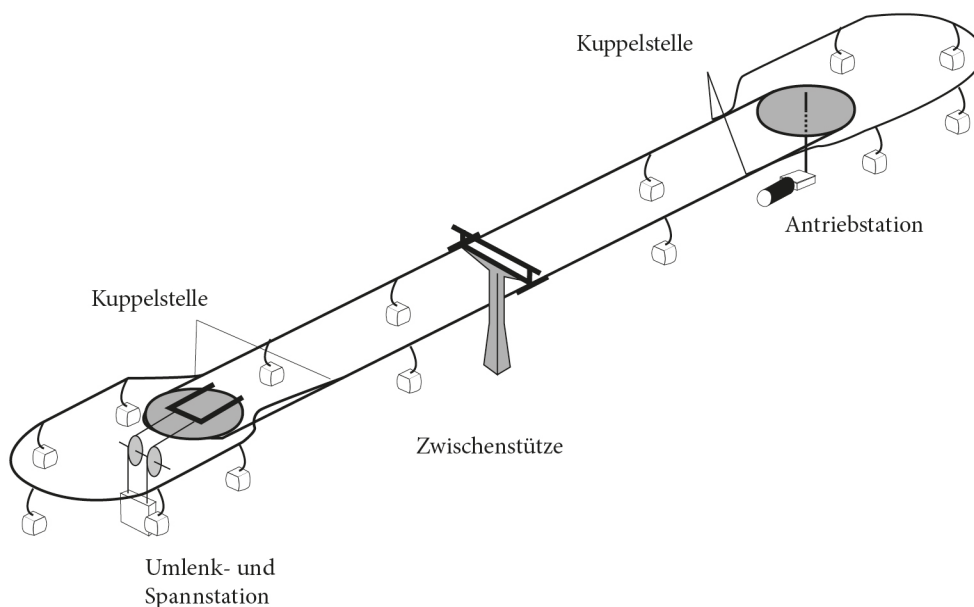


Abbildung 76: Kuppelbare Seilbahnen, e.D. nach (Liedl, 1999)

Ein großer Vorteil der Umlaufbahn ist die Möglichkeit des Transports von mehreren Objekten zur gleichen Zeit. Demzufolge bietet dieses System eine hohe Leistungsfähigkeit und geringe Zykluszeiten. Die maximale Zuladung der Gondeln ist bei diesem Seilbahntyp vergleichsweise

niedrig. Diese kann durch die Ausrüstung mit einem zweiten Seil erhöht werden: bei der *Doppel-Einseilumlaufbahn* (vgl. Abbildung 77) werden beide Seile sowohl zum Tagen als auch zum Bewegen der Last genutzt.

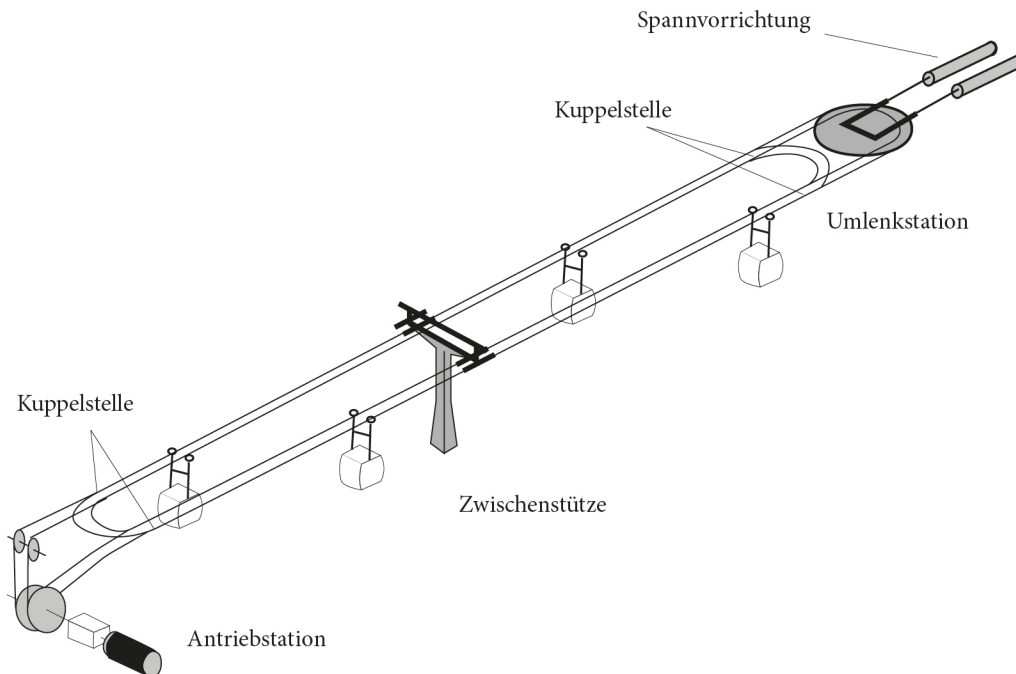


Abbildung 77: Doppel- Einseilumlaufbahn, e.D. nach (Liedl, 1999)

Bei der *Zweiseilumlaufbahn* ist das Tragseil feststehend, das umlaufende Zugseil gewährleistet das Bewegen des Lastaufnahmemittels (vgl. Abbildung 78). Reine Zweiseilumlaufbahnen (Abbildung 78) werden heute nach *Liedl* meist nur als leistungsfähige Materialeilbahnen eingesetzt, da sie im direkten betriebswirtschaftlichen Vergleich mit Einseilbahnen verlieren.

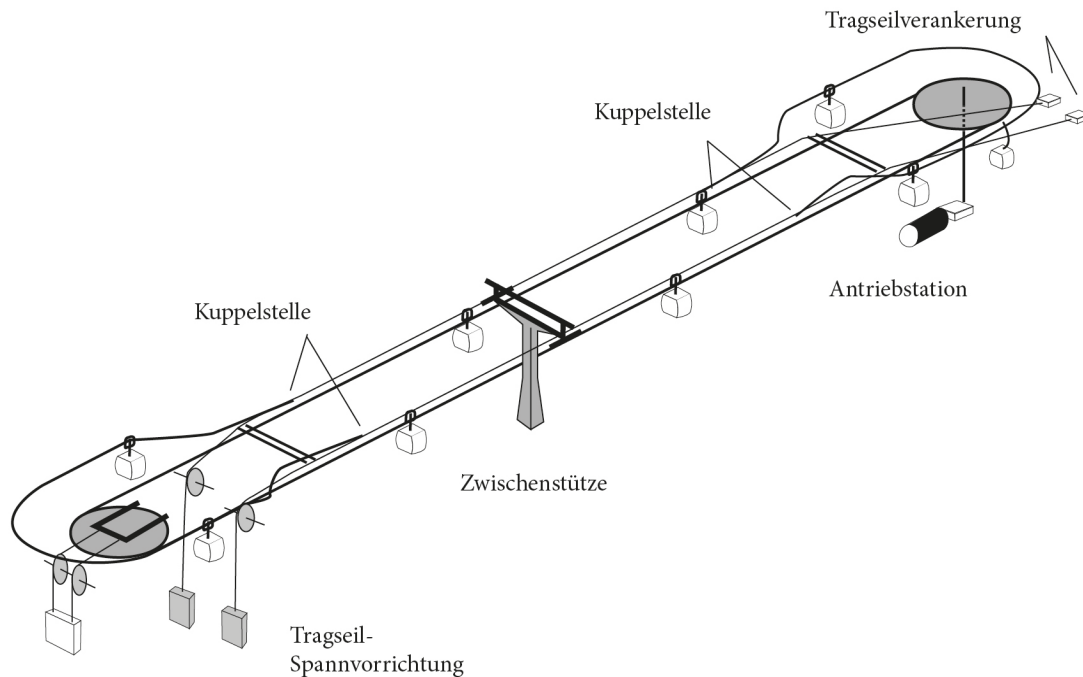


Abbildung 78: Zweiseilumlaufbahn – kuppelbar, e.D. nach (Liedl, 1999)

Bei Luftseilbahnen im *Pendelbetrieb* mit umgelenktem Zugseil (auch Zweiseil- oder Dreiseilpendelbahn genannt, Abbildung 79 und Abbildung 80) sind zwei Gondeln über das Zugseil miteinander gekoppelt. Der Antrieb des Seils befindet sich im Bergbetrieb in der oberen Station an der Umlenkscheibe. Durch die Umlenkscheibe wird das Zugseil von der einen zur anderen Strecke geführt. Fährt ein Wagen in die eine Richtung, so bewegt sich zur gleichen Zeit der andere Wagen in die andere Richtung; somit kann im Bergverkehr die freiwerdende potentielle Energie optimal genutzt werden. Ein Nachteil ist die Kopplung der beiden Stränge, die zu einer geringen Flexibilität im Hinblick auf die Bewältigung verschiedener Transportszenarien führt und auch keine Redundanz der beiden Stränge zulässt. Da bei einer Containerseilbahn die Bewältigung eines Höhenunterschiedes nicht evident ist, kann der Vorteil der Energieeffizienz der gekoppelten Stränge bei einer Containerseilbahn nicht in gleicher Weise genutzt werden, wie im Bergverkehr. Luftseilbahnen im Pendelbetrieb werden als Einseil- oder Zweiseilbahnen ausgeführt.

Eine Luftseilbahn im Pendelbetrieb kann auch mit zwei unabhängigen Strecken betrieben werden. Hierfür hat jede Laufbahn eine eigene Winde über die das Zugseil geführt wird. Die *Dreiseilumlaufbahn* (3S Bahn) weist zwei Tragseile und ein umlaufendes Zugseil auf, auf die die Gondeln klemmend angebracht werden. Durch die Verwendung von einem Zug- und zwei Tragseilen werden die Vorteile der Zweiseilbahn (große zulässige Seilhöhe) mit einer großen Förderleistung gepaart (vgl. Abbildung 80).

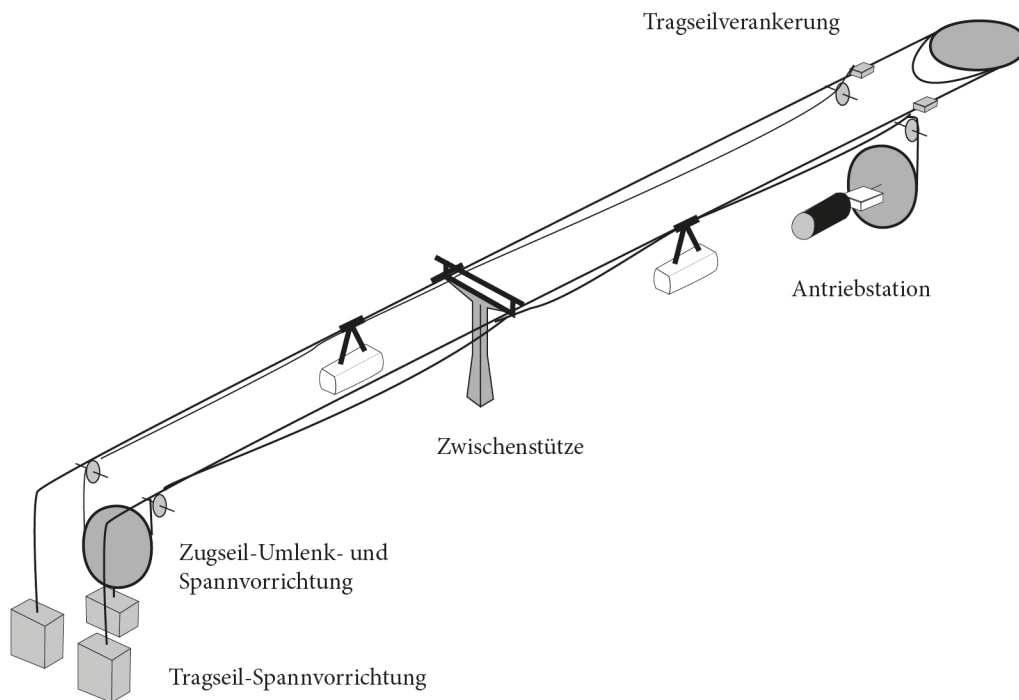


Abbildung 79: Zweiseilpendelbahn, e.D. nach (Liedl, 1999)

Pendelluftseilbahnen können große Barrieren und weite Flächen überspannen. Das längste Seilfeld ist bei der Pendelbahn „Eibsee“ in Deutschland mit über 3200m installiert, die größte Seilbahnstütze einer Pendelbahn in Stahlbauweise befindet sich ebendort mit 127m und der größte Wagenfassungsraum ist bei der Ahornbahn, mit 180 Personen, zu finden (Sedivy, 2012). Derartige Seilbahnen erreichen Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 12,5 m/s.

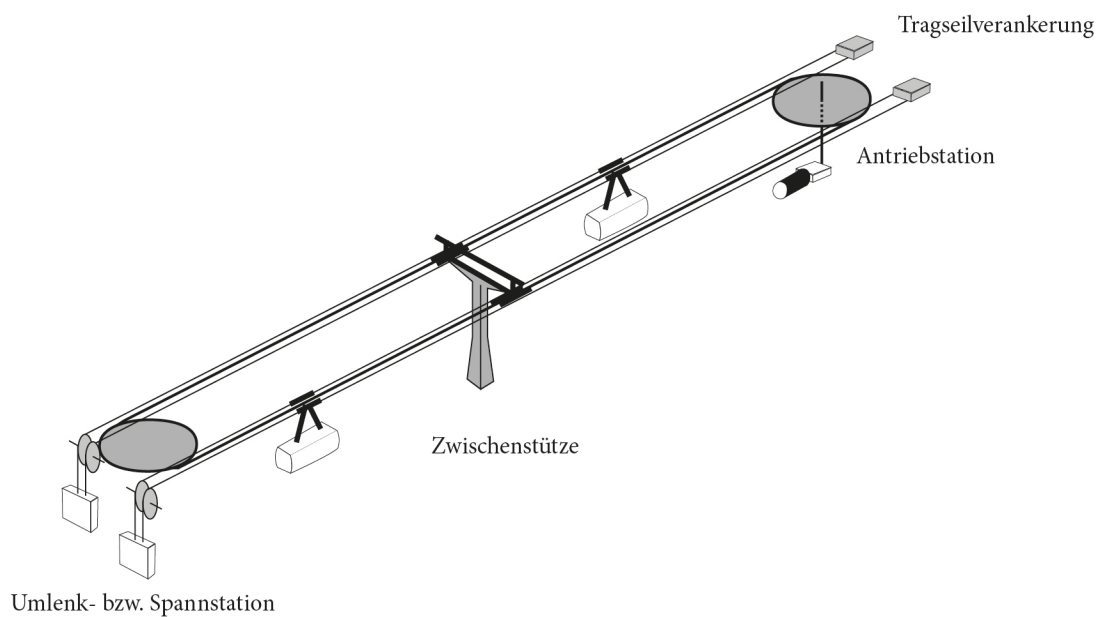


Abbildung 80: Dreiseilbahn im Pendelbetrieb mit umgelenktem Zugseil, e.D. nach (Sedivy, 2012)

Materialseilbahnen

Materialseilbahnen finden in unterschiedlichen Einsatzgebieten Anwendung – neben dem Transport von Baumaterialien (Jeep, 1883) stellte insbesondere seit der industriellen Revolution auch der Einsatz zum Materialtransport beim Rohstoffabbau ein Haupteinsatzfeld dar (Gross, 2011). Die erste Einseil-Materialseilbahn mit Kurbelantrieb wurde in einem Buch zur Bergbaukunde bereits 1405 erwähnt (Sedivy, 2012).

Die Untersuchung des Einsatzes von Materialseilbahnen im Bergbau war insbesondere in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis in die 1980er Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen (vgl. bspw. (Friedrich, 1967), (Hefti, 1975), (Neumann, et al., 1985)). Auch in der aktuellen Literatur finden sich zum Einsatzfeld „Mienen“ weiterführende Beschreibungen und Untersuchungen, die bspw. die Optimierung der Prozesse oder der eingesetzten Transportbehälter zum Rohstoffabbau betreffen (vgl. bspw. (Xinsheng, 1999)) zum Design und zur Anwendung eines Multimaterialtransportbehälters an Drahtseilbahnen im Kohlebergwerk zum Transport von Personen und Material, (Huttelmaier & Carrick, 1992) zur Einsetzbarkeit einer Materialseilbahn für einen Bergbau-Standort auf der Mondoberfläche)). Neben dem Einsatz zum Abtransport von Mienenabraum werden Materialseilbahnen heutzutage insbesondere für Aufgaben in sehr unwegsamem Gelände, für den Transport sehr großer Lasten und/oder mit sehr schwierigen Zugangsmöglichkeiten installiert (vgl. bspw. (Tiansheng, et al., 2011) zum Transport von Zitrusfrüchten aus landwirtschaftlich genutzten Bergregionen, (Qian, 2010)) zum Einsatz einer Materialseilbahn zum Aufbau eines Bergkraftwerks)). Ergänzend finden sich in der Literatur zu Materialseilbahnen Artikel zur technischen oder simulationsgestützten Auslegung und Ausgestaltung von Seilbahnen im Allgemeinen (vgl. bspw. (Qian, 2008) zur Erforschung eines Berechnungsmodells für Seile zur Konstruktion von Materialluftseilbahnen, (Löhr, 2002) zur Simulation der Stationseinfahrt kuppelbarer Einseilumlaufbahnen)) und auch zu Seilbahnsystemen, wie z.B. Seilen oder Rollen (vgl. bspw. (Feyrer, 2000) zur Bemessung, Betrieb und Sicherheit von Drahtseilen, (Briem, 2011) für eine Berechnungsmethode für die Herstellung von gedrillten Drahtseilen)), sowie zu güterspezifischen Optimierungen mittels des Einsatzes von Seilbahntechnik (vgl. bspw. (Mitzschke, et al., 2008) zu einem seilbasierten Fördersystem für Textilien)). Diese Themenkomplexe finden sich auch in der aktuellen Patentlage wieder (vgl. bspw. „Circuit for monitoring trouble-free state and/or detecting incorrect state of an installation“ (WO1999027649) Beschreibung einer Schaltungsanordnung zur Überwachung des fehlerfreien und/oder Erkennung eines fehlerbehafteten Zustands einer Seilbahn- oder Sesselliftanlage), „ROPEWAY SAFETY MONITORING SYSTEM“ (WO9530216 (A1) zu einem sensorbasierten Sicherheits-Monitoring-System für Seilbahnen), „Gehänge für Umlaufseilbahn“ (DE 1580908 A1) und „Aerial ropeway vehicle system“ (US3662691A) beschreiben das auskuppelbare Gehänge für eine Umlaufseilbahn, „Overhead ropeway for conveying loads“ (US3512656A) beschreibt eine seilgebundenen Transporteinheit, mit der kleine Lasten transportiert werden können, „Safety devices or measure against cable fracture“ (US5581180A) beschreibt ein Messinstrument zur Überwachung der Seilgüte, „Return loop for vehicles of a cableway“ (EP0671304B1) beschreibt eine Umlaufseilbahn mit einer Umfahrung der Fahrzeuge an beiden Umlenkstationen, „Transport cableway“ (CN94192511) beschreibt den Einsatz von Seilbahnen zum Transport von schweren Lasten, wie z.B. in der Waldwirtschaft zum Abtransport gefällter Bäume, „Aerial transport ropeway“ (CN201309803Y) beschreibt eine Luftseilbahn zum Transport geernteter Früchte aus Hanglagen, „Aerial cableway transport installation and

methode“ (CN105383500A) zur flexiblen Konsolidierung von Fahrverbänden kuppelbarer Luftseilbahnsystemen)).

Die grundsätzliche Einteilung der *Seilbahnsystemvarianten* für den Materialtransport erfolgt analog zu den für den Personentransport ausgelegten Systemen (Gross, 2011) in Stand- und Luftseilbahn. Für die Einteilung von Materialluftseilbahnen wird, ebenfalls analog zur Unterteilung der Personenseilbahnen, (Neumann, et al., 1985) in der vorliegenden Arbeit eine Einteilung entsprechend der Anzahl und Nutzung der Seile sowie der Bewegungsart der Wagen bzw. Gondeln vorgenommen. Die Ausgestaltung einer Materialseilbahn hängt neben der Streckenführung vom zu befördernden Gut und der zu transportierenden Transportmenge ab. Demzufolge muss bei Materialseilbahnen ein größeres Augenmerk auf die Ausgestaltung des *Lastaufnahmemittels* gelegt werden als bei Personenseilbahnen, da dieses güterspezifisch angepasst werden muss. Güter werden, wie in 2.1.1 beschrieben, in (a) flüssige oder schüttbare Massengüter, (b) Container und (c) Stückgüter unterschieden. Für den Transport von Massengütern können beispielsweise Transportmulden als Lastaufnahmemittel eingesetzt werden; der Transport von schüttbarem Transportgut mittels umlaufender Seilbahn und daran befestigter Transportmulden werden u.a. 1981 in einem Patent beschrieben (US4473011 A, DE3109944A1, DE3109944C2). Für den Transport von Stückgütern ist neben dem Gewicht und den Abmessungen des Transportguts die Wiederholfrequenz des Transports gleichartiger Stückgüter relevant. Derartige Anlagen werden bspw. zur Unterstützung der landwirtschaftlichen Prozesse in Bergregionen zum Transport diverser Stückgüter (vgl. (Gross, 2011)) oder zum Transport von Einzelteilen für Bergbaustellen eingesetzt.

Der Transport von Standard-Seecontainern wird bis dato von keiner Seilbahnanlage automatisiert gewährleistet. In einer Studie der TU Berlin zum Einsatz innovativer Transportsysteme für den Hamburger Hafen wird die Möglichkeit der Installation einer Containerseilbahn angegeben (TU Berlin, 2017). Auch Schönemann und Plattner (Schönemann & Plattner, 2012) beschreiben den Einsatz und die Möglichkeit einer Containerseilbahn, wobei beide auf die Veröffentlichungen der Autorin dieser Arbeit verweisen (vgl. (Pallasch, et al., 2010), (Pallasch, et al., 2010), (Pallasch, et al., 2015)). Auch die Lokalpolitik hat das Thema „Containerseilbahn“ zeitweilig aufgegriffen und verweist zur Entlastung des Elbtunnels in Hamburg auf den möglichen Einsatz einer Containerseilbahn (vgl. <http://www.logistik-heute.de/Logistik-News-Logistik-Nachrichten/Markt-News/8838/Hansestadt-stellt-Ueberlegungen-fuer-Containertransport-an-Hamburg-Tunnel-ode>). Der Bau einer Seilbahn wurde in Hamburg von einem Bürgerentscheid gestoppt und die Machbarkeit dieser Vorschläge wird in der Presse und wissenschaftlichen Literatur nicht mit technischen oder wissenschaftlichen Details hinterlegt; das Interesse belegt dennoch die gesellschaftliche Relevanz dieser Untersuchungen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Themenkomplex „Materialseilbahnen“ insbesondere unter dem Fokus des Transports von Containern wissenschaftlich bisher nur rudimentär beschrieben ist; auch eine Patentrecherche ergab keine Treffer, die den Transport von Containern mittels Seilbahn beschreiben.

5.1.2 Einsatzbereiche verschiedener Seilbahnvarianten

Für die Beurteilung der Nutzbarkeit der unterschiedlichen Seilbahnsysteme werden zunächst die generellen technischen Möglichkeiten überprüft. Für den Transport von leeren Überseecontainern ist die Aufnahme von zumindest 2.500 kg bzw. 3.200 kg (Leergewicht 20 / 40 ft. Container, vgl. Tabelle 1) nötig; das maximal zulässige Gesamtgewicht maximal beladener Container liegt bei 25.400 kg (20 ft.) bzw. 30.480 kg (40 ft.). In der nachfolgenden Tabelle sind Leistungsdaten moderner Personenseilbahnsysteme aufgeführt:

	<i>Max. Fahrzeug- fassungsvmögen [Pers.]</i>	<i>Max. zulässige Fahrgeschwindigkeit [m/s]</i>
Einseil-Pendelbahn	12	7
Einseil-Umlaufbahn	12	6
Doppel-Einseil-Umlaufbahn	60	10
Zweiseil-Umlaufbahn	30	6
Zweiseil-Pendelbahn	230	12
3S-Bahn	35	8,5

Tabelle 19: Leistungen moderner Seilbahnen für den Personentransport, weltweit (eigene Marktrecherche und in Anlehnung an Liedl, 1999)

Aus der Tabelle leiten sich unter der Annahme eines Durchschnittsgewichts von 80kg pro Person (vgl. Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1) des Robert Koch-Instituts von 2008) folgende maximal transportierbare Massen je System ab:

Einseil-Pendelbahn: 12 Personen x 80kg = 960 kg Traglast

Einseil-Umlaufbahn: 12 Personen x 80kg = 960 kg Traglast

Doppel-Einseil-Umlaufbahn: 60 Personen x 80 kg = 4.800 kg Traglast

Zweiseil-Umlaufbahn: 30 Personen x 80 kg = 2.400 kg Traglast

Zweiseil-Pendelbahn: 230 Personen x 80 kg = 18.400 kg Traglast

3S-Bahn: 35 Personen x 80 kg = 2.800 kg Traglast

Es ist festzustellen, dass hinsichtlich des zu transportierenden Gewichts eines Überseecontainers von 20-30 Tonnen aus dem Bereich des Personentransports nur die Zweiseil-Pendelbahnen eine annähernd große Traglast aufweist. Eine Untersuchung der größten weltweit installierten Materialeilbahnen (Datenblätter im Anhang) hat gezeigt, dass auch der Transport größerer als der hier beschriebenen Lasten mit diesem System erfolgen kann; aus diesem Grund wird sie auch zu den potentiell einsetzbaren Systemen gezählt. Um den Transport ausschließlich leerer Container (20 ft. = 2,5 t, 40 ft. = 3,2 t) zu gewährleisten, kämen auch andere Seilbahnvarianten in Frage. Da die vorliegende Arbeit den zumindest kombinierten Transport von Leer- und Vollcontainern betrachtet, wird nachfolgend ausschließlich eine Luftseilbahn in der Ausgestaltungsvariante einer Zweiseil-Pendelbahn untersucht.

5.1.3 Festlegung der Funktionalitäten

Der generelle Prozessablauf einer Containerseilbahn ist in Abbildung 81 dargestellt. Ein zu transportierender Container wird von einem Containerfahrzeug auf die *Aufnahme-/Ablagestation* abgestellt. Ein anschließender *Puffer* entkoppelt die Prozesse der anliefernden Containerfahrzeuge und der Seilbahn mit dem Ziel einer möglichst konstanten Auslastung der Seilbahn. Die Übergabe der Container von der Aufgabestation zum Puffer soll vollautomatisch erfolgen. Der Puffer befördert den Container zeitlich getaktet jeweils zum nächsten freien Pufferplatz, bis der Container an der *Übergabestation* (Schnittstelle zwischen Terminal und Transportsystem) wiederum vollautomatisch an die *Seilbahn* übergeben wird. Nach der Beförderung wird der Container wiederum vollautomatisch an einen *Puffer* übergeben. Der Container wird automatisch zum jeweils nächsten freien Pufferplatz befördert, bis er sich auf der *Aufnahme-/ Ablagestation* befindet. An dieser Stelle wird der Container von einem Containerfahrzeug entnommen und weiteren Prozessen zugeführt. Zur Umsetzung müssen die zugehörigen Subsysteme Beachtung finden.

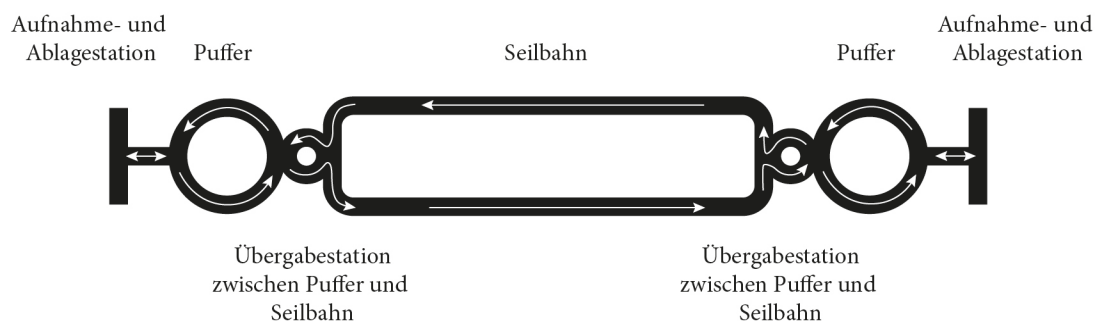


Abbildung 81: Funktions- und Prozessschaubild, e.D. nach (Fahrbach, Ritter, & Pallasch, 2010)

Die genannten technischen Elemente bilden jeweils ein Teilsystem:

- Aufnahme-/Ablagestation
- Puffer
- Übergabestation
- Seilbahn
- Subsysteme (Stützen etc.)

Neben den genannten technischen Elementen sind übergeordnete Elemente zu beachten: Hierzu zählen bauliche und rechtliche Regularien sowie grundsätzliche nicht-funktionale Anforderungen wie z.B. zur Redundanz oder Einsatzzeiten.

5.1.4 Gestaltung der technischen Elemente

Aufnahme-/Ablageposition

Die Aufnahme-/Ablageposition bildet die Schnittstelle zwischen Terminal und Transportsystem. Die Effizienz der Seilbahn hängt im Wesentlichen davon ab, mit welcher Taktung die Container gefördert werden und mit welcher Geschwindigkeit die Transporteinheiten in das Seilbahnsystem ein- bzw. ausgeschleust werden können. Für die Effizienz von Pendelbahnen, bei denen das im Seilbahnsystem verankerte Transportfahrzeug nach dem Entladen an derselben Station eine Transporteinheit aufnimmt, ist die Gestaltung der Übergabestation wesentlich. Um eine reibungslose und schnelle Übergabe zu gewährleisten, muss der Container an der Station in eine definierte Position gebracht werden und automatisch vom Transportsystem bzw. nach dem Transport automatisch vom Puffer übernommen werden. Die Aufgabe und Abholung soll mittels typischer Terminalfahrzeuge erfolgen können, die neben dem Horizontaltransport auch einen Vertikaltransport übernehmen können (bspw. Van Carrier oder Reach Stacker). Die Ablageposition wird sofort freigemacht, wenn im Pufferbereich ein freier Platz zur Verfügung steht, an den der Container verbracht werden kann. Derzeit gibt es für die Lösung dieser Herausforderung kein handelsübliches System am Markt und es wird daher davon ausgegangen, dass ein Pufferelement als Auf- bzw. Abnahmestation genutzt wird.

Puffer

Der Puffer dient der Entkopplung der Geschwindigkeit der Containertransportfahrzeuge und des Transportsystems und zum automatischen Transport der Container vom Ablageplatz zur Seilbahn. Je größer der Puffer gewählt wird, desto größer ist der Entkopplungseffekt, aber auch die Investitions- und Wartungskosten. Der Puffer muss an die Gegebenheiten konkreter Fälle angepasst werden und sollte im Allgemeinen so ausgelegt werden, dass eine grundsätzliche Entkopplung des Transportsystems von den containeranliefernden und -abholenden Fahrzeugen ermöglicht wird. Gleichzeitig sollte er so klein wie möglich ausgestaltet werden, um Platz und Kosten zu sparen. Bei der Auslegung eines Systems für einen konkreten Fall sollten die spezifischen Zahlen zur Validation der Ausgestaltung der technischen Lösung herangezogen werden. Auch die Priorisierung zwischen der Entkopplung der Prozessgeschwindigkeiten und der Schonung von Terminalfläche ist individuell zu bewerten. Grundsätzlich sollte jeder Pufferplatz ein eigenständiges Segment darstellen, um innerhalb des Puffers eine Flexibilität der Steuerung (Förderung der Container bis zum jeweils letzten freien Pufferplatz) zu ermöglichen. Je nach Ausgestaltung kann eine Längs- oder Querförderung der Container erforderlich sein und die Übergabe vom Puffer an das Seilbahnsystem muss sichergestellt werden können.

Übergabestation

Für die Übergabestation gibt es keine Lösung am Markt. Bei der Realisierung einer vollautomatischen Transportlösung muss dieses Element entwickelt werden. Zur Optimierung der Übergabe an das Lastaufnahmemittel der Seilbahn könnten unter den Gondelstationen / am Kopf der Gleise Hubtische mit Förderstrecken installiert werden, die den Vertikaltransport auf Förderhöhe gewährleisten; dies würde die einzubringende Energie des Seilbahnsystems reduzieren. Auch auf einer geringeren Höhe wäre die Installation von Förderelementen dienlich, die nach Verlassen des Lastaufnahmemittels seine Position einnehmen und so die

Durchförderung von Containern über die Stränge hinaus ermöglichen würden (vgl. Abbildung 82). Bei einer Luftseilbahn könnte das gleiche technische Element zur Stabilisierung der Gondel in der Station genutzt werden. Für die Gesamtgestaltung einer zweisträngigen Anlage würde die Durchförderungsmöglichkeit neue Möglichkeiten eröffnen: so könnte bspw. lediglich eine Aufgabe- und eine Abnahmestation je Seite installiert werden, die jeweils beide Stränge bedient. Den Ausführungen ist zu entnehmen, dass der Variantenreichtum zur Ausgestaltung der Übergabestation sehr groß ist.

In Abbildung 82 sind drei Varianten der Übergabestation einer zweisträngigen Seilbahn mit entkoppelten Strängen dargestellt. In Variante 1 haben beide Stränge eine eigene, unabhängige Pufferstrecke. Den dargestellten Elementen können diverse weitere Pufferplätze vorgelagert sein. Die Container werden bei Strang I von links, bei Strang II von rechts angeliefert und verweilen auf der schwarz dargestellten Übergabestation, bis die Gondel in der Station angekommen ist (dunkelgrau) und beladen werden kann. In dieser Ausgestaltung ist ein gekoppelter aber kein bidirektionaler Verkehr möglich, da der ankommende Container auf dem LAM nicht entfernt werden könnte.

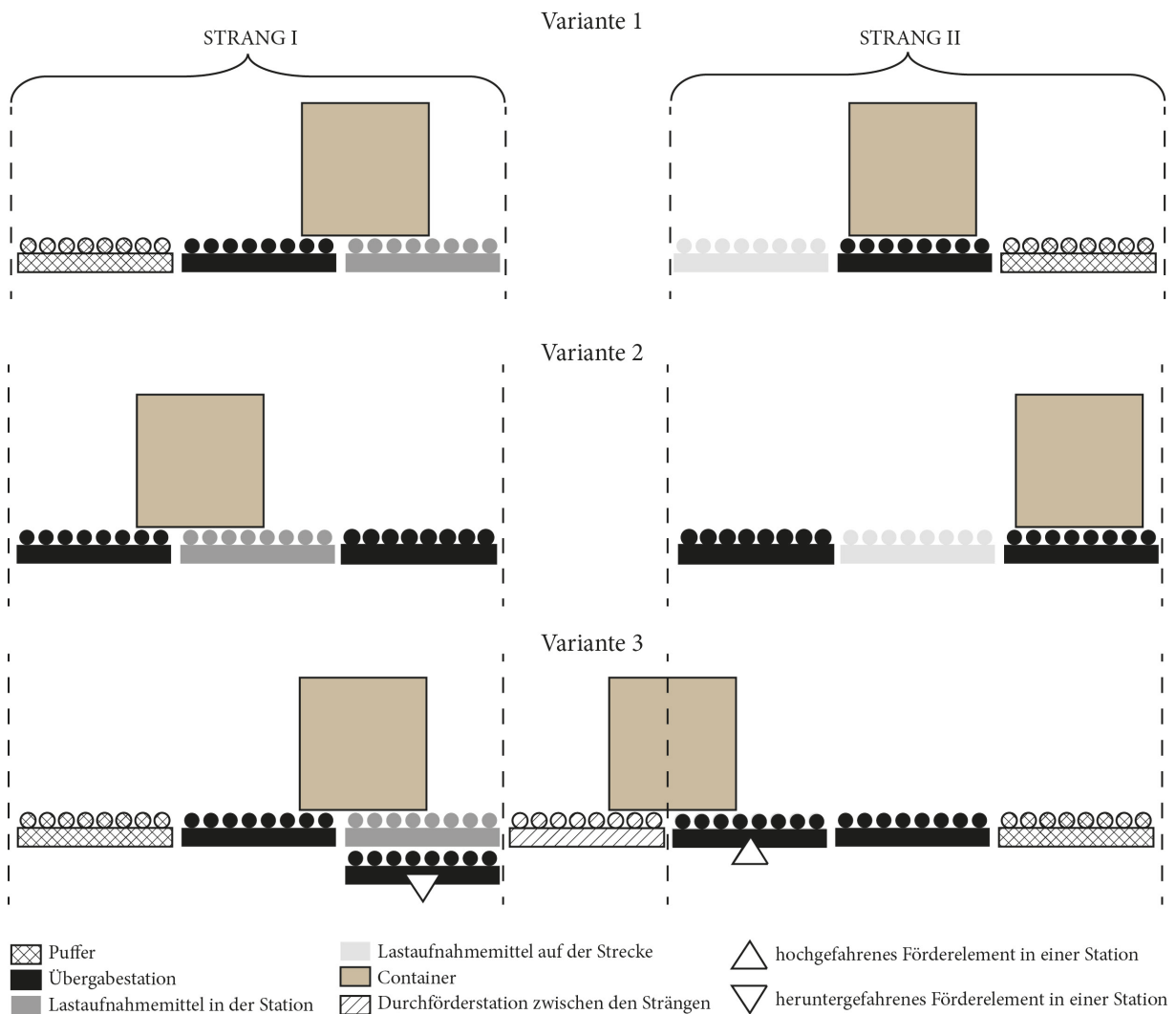


Abbildung 82: Schematische Darstellung möglicher Übergabestationen einer zweisträngigen Seilbahn mit entkoppelten Strängen

In der zweiten Variante befindet sich jeweils links und rechts von der Transportstrecke eine Übergabestation, so dass die Container in eine Richtung abgegeben und aus der anderen Richtung aufgenommen werden können. Derart kann ein bidirektionaler Transport mit gekoppelten und entkoppelten Strängen gewährleistet werden. Der Installationsaufwand ist im Vergleich zu Variante 1 sehr hoch, da für jeden Strang jeweils eine Aufgabe- und eine Abholstation sowie die dazwischen gelagerten Pufferplätze vorgehalten werden müssen. Demgegenüber wird in der dritten Variante eine Aufgabestation und eine Abholstation für beide Stränge genutzt. Dies wird ermöglicht, in dem ein Förderelement den Transport der Container über einen Strang hinaus gewährleistet. Zur Überbrückung der Transportstrecke können absenkbare Förderelemente installiert werden, um die Durchförderung von dem Vorhandensein eines LAM zu entkoppeln.

Unter dem Augenmerk der Transportflexibilität und Anpassungsfähigkeit der Systeme ist die zweite und dritte Variante am geeignetsten, um sich auf sich ändernde Anforderungen zu reagieren. Für diese Anlagen wäre eine Umstellung in einen rein unidirektionalen Betrieb ohne Aufwand möglich, wenn die Förderleistung in Peak-Zeiten einseitig stark vergrößert werden soll.

Seilbahnsystem

Bei der Konzipierung und Konkretisierung der Lösungsideen wurde mit dem Seilbahnhersteller Doppelmayr / Garaventa zusammengearbeitet. Die Doppelmayr / Garaventa Gruppe ist weltweiter Technologieführer im Seilbahnbau. Bei dem Luftseilbahnkonzept handelt es sich um eine Materialluftpendelbahn. Pro Spur sind zwei Tragseile und ein Zugseil vorgesehen; dieses System ist demnach als eine zweisträngige Luftseilbahn mit entkoppelten Strängen definiert. In der nachfolgenden Abbildung und im Anhang im Kapitel 2.3.2 ist dieses System in der Seitenansicht dargestellt.

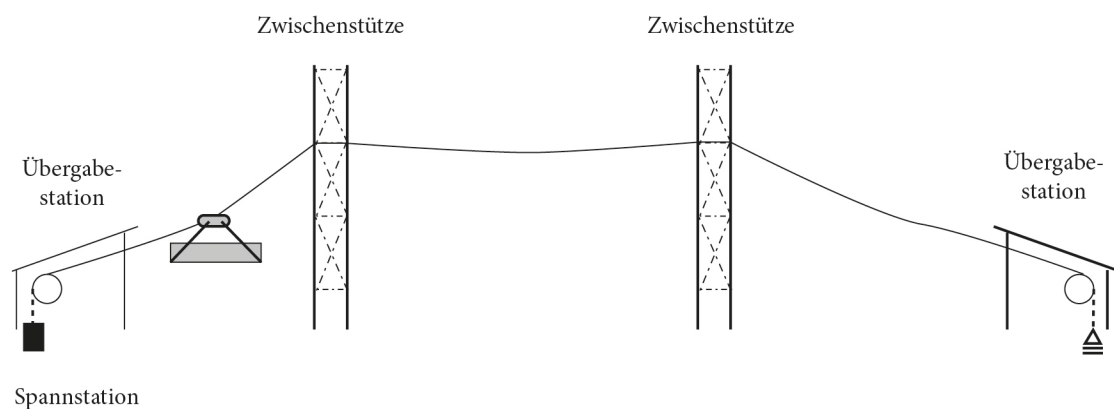


Abbildung 83: Luftseilbahn, schematische Darstellung

Die Ausgestaltung einer Luftseilbahn kann als Systemvariante 1 bis 5 (S1, ... S5) für den uni- bzw. bidirektionalen Betrieb und eine Kopplung bzw. Entkopplung der Stränge nach folgender Tabelle beschrieben werden:

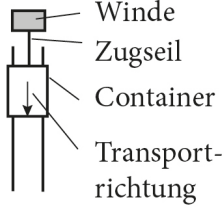
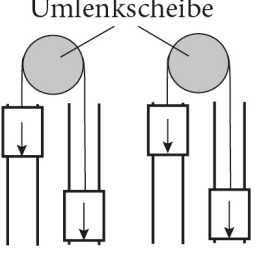
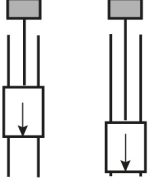

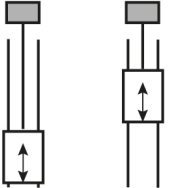
S1	unidirektional fördernde, einsträngige Seilbahn im Pendelbetrieb	
S2	zweisträngige, unidirektional fördernde Seilbahn, deren Stränge gekoppelt sind und die im Pendelbetrieb fährt	
S3	unidirektional fördernde, zweisträngige Seilbahn mit entkoppelten Strängen im Pendelbetrieb	
S4	bidirektional fördernde, einsträngige Seilbahn im Pendelbetrieb	
S5	bidirektional fördernde, zweisträngige Seilbahn im Pendelbetrieb, ge- oder entkoppelte Stränge	

Tabelle 20: Systemvarianten S1 – S5

Nachfolgend wird auf die Subsysteme einer Seilbahn eingegangen:

Fundamente

Für die Fundamentierung des zu betrachtenden Seilbahnsystems sind folgende Elemente zu berücksichtigen:

- Stationen mit Maschinenräumen, Seilumlenkungen und Spanngewichten
- Pylonen

Infrastruktur

Die seilbahnspezifische Infrastruktur besteht aus den Stationen und den Tragelementen. Bei einer Luftseilbahn befindet sich auf einer Seite die Station mit dem (den) Antriebssystem(-en) und den Trageilspanngewichten. Die hohen abzutragenden Kräfte erfordern eine entsprechend ausgelegte Konstruktion der Station. Auf der anderen Seite muss die Station als fester "Poller" ausgelegt sein, um den auch hier angreifenden Kräften gewachsen zu sein. Der Abtrag der anfallenden Kräfte kann bspw. mittels Schrägpfählen erfolgen. Als Tragelement sind für die Luftseilbahn mindestens zwei Stützen/Pylonen erforderlich, an denen die Seile aufgehängt werden.

Lastaufnahmemittel der Seilbahn

Bei der Luftseilbahn ist die Gondel so auszugestalten, dass sie als Lastaufnahmemittel dient. Dabei ist zu beachten, dass der Schwerpunkt eines Containers nicht in der Mitte des Containers liegen muss. Des Weiteren ist zu beachten, dass das Gehänge beim Einfahren in die Station schwanken kann. Ferner ist das Lastaufnahmemittel derart zu gestalten, dass der Container, dem Spreader-Prinzip ähnlich, mittels Twist Locks sicher in den Corner Castings (vgl. Kapitel 2.1.4) verriegelt ist und das lose Teile (Eis, Schmutz, Anhaftungen, etc.) nicht unkontrolliert vom Container fallen können.

5.2 Berechnungsmodelle für die leistungsbezogene Parametrierung

Für die Parametrierung wird ausschließlich das Transportsystem, nicht aber das Puffersystem beachtet. Dieses muss in einem nachrangigen Planungsprozess definiert werden. Hierfür sind die system- und unternehmensspezifischen Bedarfe heranzuziehen.

5.2.1 Containerluftseilbahn

Fahrtzeitdiagramm und Berechnung der Förderleistung für Personenseilbahnen

Die Leistung eines Seilbahnsystems hängt grundsätzlich von ihrer Länge, den möglichen Fördergeschwindigkeiten, den zu transportierenden Gütermengen sowie den Zeiträumen der Be- und Entladeprozesse ab. In der Literatur ist insbesondere die Leistungsberechnung für Personenseilbahnen beschrieben. Diese wird hier folgend beschrieben und im Nachgang auf die Leistungsberechnung einer Containerseilbahn transferiert. Die nachfolgende Abbildung stellt die Geschwindigkeit einer Seilbahn über der Zeitachse dar und wird als Fahrtdiagramm bezeichnet.

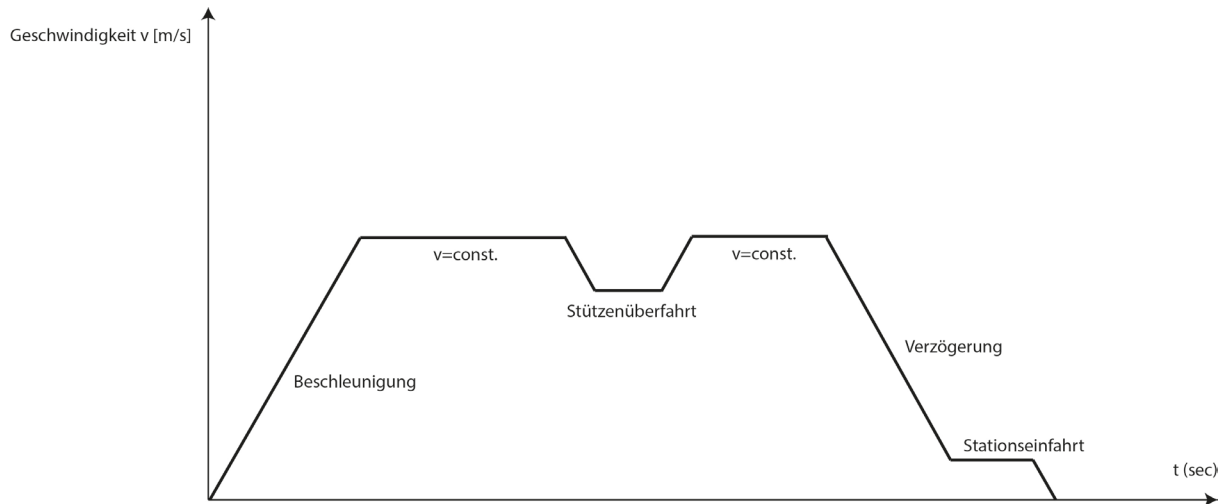


Abbildung 84: Fahrtdiagramm am Beispiel einer Pendelbahn,e.D. nach Sedivy, 2012

Im Personentransport wird die theoretische Förderleistung in Personen pro Stunde gemessen und hängt von der Anzahl n der Wagen (Standseilbahn) oder Kabinen (Zweiseilpendelbahn) ab, die in einer Stunde die Zielstation erreichen. Zur Berechnung muss weiterhin die Dauer eines Fahrspiels t sowie die Anzahl der Personen pro Wagen bekannt sein. Zur Ermittlung der Fahrspielsdauer werden, wie in Gl. (7) dargestellt, die Dauer der Fahrtzeit (t_1) und die Dauer des Stationsaufenthalt (t_2) zusammengefasst.

$$t = t_1 + t_2 \quad \text{Gl. (7)}$$

Für die Bestimmung der Fahrtzeit t_1 werden die Dauer der einzelnen Fahrtabschnitte (Beschleunigung, Fahrt bei v_{\max} , Stützenüberfahrt, Verzögerung, Stationseinfahrt, etc.) ermittelt und aufsummiert und die theoretische Förderleistung M [Personen / h] gemäß Gl. (8) berechnet (Sedivy, 2012).

$$M = \frac{3600 \cdot P}{t} \quad \text{Gl. (8)}$$

wobei:

P : Wagenfassungsraum [Anz. Personen]– Beschreibt die maximale Anzahl der Personen je Wagen

t : Fahrspielsdauer [s]

Abgeleitetes Fahrzeitdiagramm für eine Containeluftseilbahn

Für die vorliegende Arbeit wird für eine Containerluftseilbahn ein allgemeingültiges Fahrtdiagramm für eine Luftseilbahn im Pendelbetrieb angenommen (vgl. Abbildung 85); dieses orientiert sich am Fahrtdiagramm für Personenseilbahnen von *Sedivy, 2012*. Im Gegensatz zum Bezug der Geschwindigkeit über die Zeit, zeigt das Fahrtdiagramm der vorliegenden Arbeit den Bezug der Geschwindigkeit gegenüber der zurückgelegten Strecke auf.

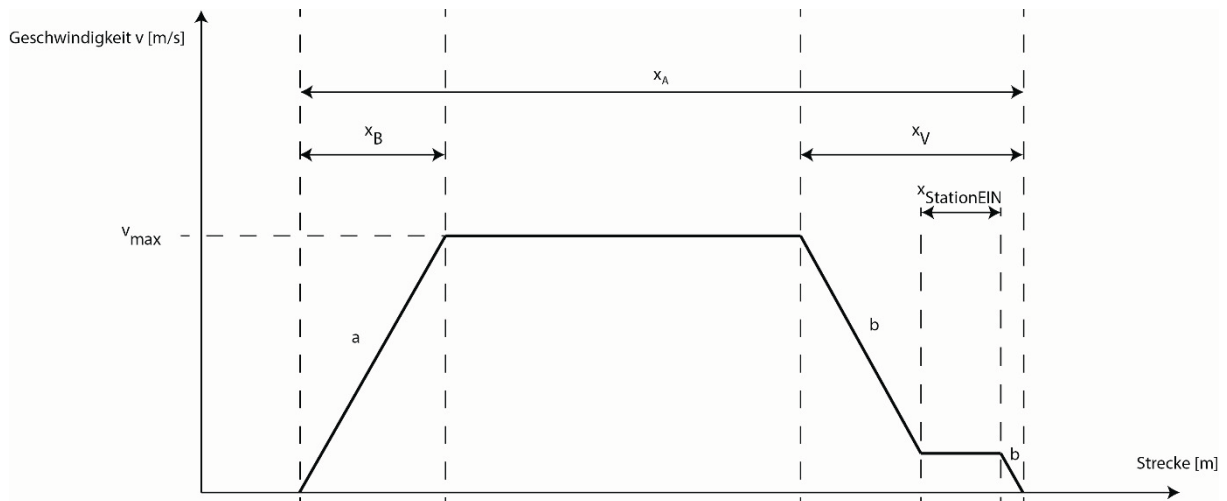


Abbildung 85: Fahrtdiagramm, e.D. in Anlehnung an Sedivy, 2012

Zur weiteren Verdeutlichung der Berechnungsgrundlage wurde das Fahrtdiagramm um die Variablen Höhe und Zeit ergänzt (vgl. Abbildung 86).

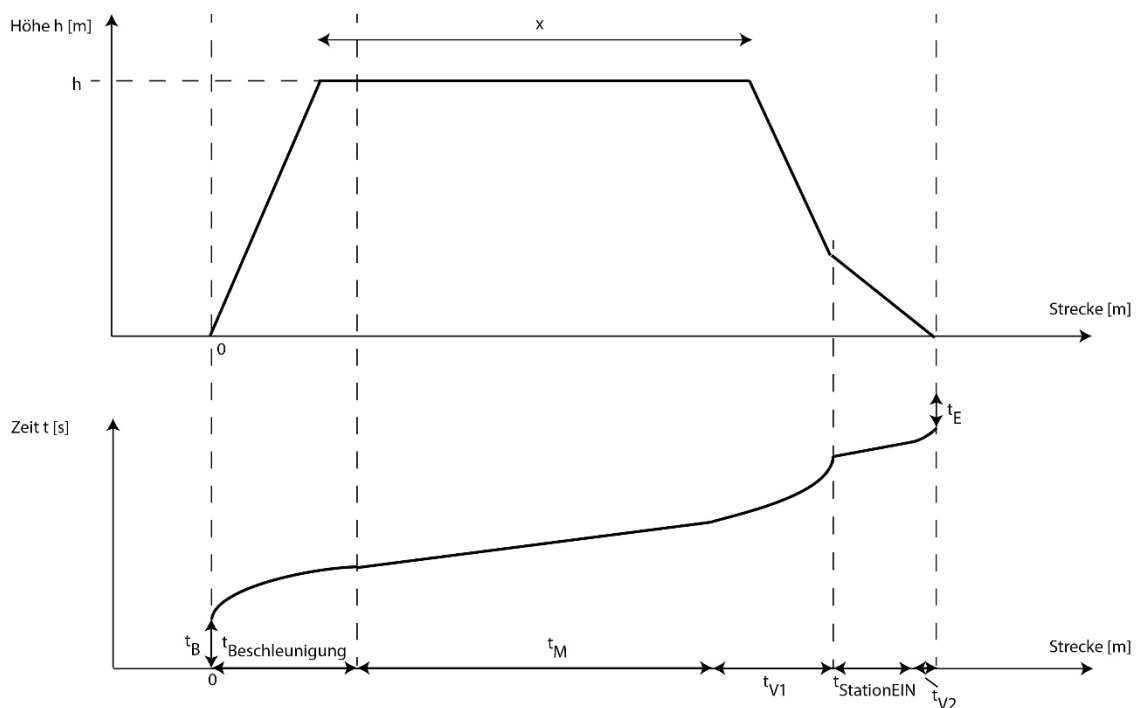


Abbildung 86: Erweitertes Fahrtdiagramm

Berechnung der Zykluszeit einer Containerseilbahn

Die Dauer eines Fahrtspiels wird als „Zykluszeit“ bezeichnet. Für die Berechnung dieser Variable wurde die nachstehende Formel aufgestellt. Diese leitet sich aus dem Fahrtdiagramm ab und summiert die Belatedauer (t_B), die Dauer der Beschleunigung auf v_{\max} (t_{Beschl}), die Dauer der Fahrt mit Maximalgeschwindigkeit sowie die Dauer der Verzögerung auf die reduzierte

Geschwindigkeit zur Stationseinfahrt (t_{V1}), die Dauer der Stationseinfahrt ($t_{StationEIN}$), die Dauer der Geschwindigkeitsreduktion bis zum Stillstand (t_{V2}) und die Entladedauer (t_E).

$$Z = t_B + t_{Beschl} + \frac{x_A - x_B - x_V}{v_{max}} + t_{V1} + t_{StationEIN} + t_{V2} + t_E \quad \text{Gl. (9)}$$

wobei:

Z = Zykluszeit: *Transportdauer zwischen zwei Stationen [s], in Abhängigkeit von x*

t_B = *Beladezeit [s]*

$$t_{Beschl} = \frac{v_{max}}{a} \text{ Dauer der Beschleunigung bis auf } v_{max} \text{ [s]}$$

v_{max} = *maximale Fahrgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]; bei geringen Streckenlängen liegt die maximale Fahrgeschwindigkeit auf Grund der Beschleunigungsparameter unter der systemspezifischen Maximalgeschwindigkeit*

x = *Streckenlänge mit lichter Höhe $> h$ [m]*

x_A = *Gesamtstreckenlänge inkl. Auf- und Abfahrt [m] = $x + 2 \cdot x_s = x + 2 \cdot \frac{h}{s}$, mit h = lichte Höhe [m] und s = Steigwinkel [%]*

$$x_B = \frac{a}{2} \cdot t_{Beschl}^2 = \text{Streckenlänge der Beschleunigung [m]}$$

$$x_V = \frac{v_{max}^2}{2 \cdot b} + x_{StationEIN} \text{ [m]}$$

= *Streckenlänge, die während der Verzögerung und Stationseinfahrt zurückgelegt wird*

$x_{StationEIN}$ [m] = *Streckenlänge, die während der Stationseinfahrt zurückgelegt wird*

a = *Beschleunigungsfaktor [$\frac{m}{s^2}$]*

b = *Verzögerungsfaktor [$\frac{m}{s^2}$]*

$$t_{V1} = \frac{v_{max} - v_{Stationseinfahrt}}{b} = \text{Dauer der Verzögerung von } v_{max} \text{ auf } v_{Stationseinfahrt} \text{ [s]}$$

$$t_{V2} = \frac{v_{Stationseinfahrt} - v_0}{b} \text{ Dauer der Verzögerung von } v_{Stationseinfahrt} \text{ bis Stillstand [s]}$$

$t_{StationEIN}$ = *Dauer der Stationseinfahrt [s]*

$v_{Stationseinfahrt}$ = *Geschwindigkeit der Stationseinfahrt [m/s]*

t_E = *Entladezeit [s]*

Beispielhafte Anwendung der Zykluszeitberechnung für Seilbahnanlagen mit unterschiedlichen Streckenlängen

Zur Verdeutlichung wird die Zykluszeit nachfolgend beispielhaft errechnet. Das Erreichen einer möglichen maximalen Fahrgeschwindigkeit hängt von der Beschleunigung und der Streckenlänge

ab. Unter der Annahme²⁷ eines Beschleunigung- sowie Verzögerungsfaktors von $0,3 \text{ m/s}^2$, einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 12 m/s , einer Dauer von 50 Sekunden für die Stationseinfahrt ($x_{\text{StationEIN}} = 15\text{m}$) sowie einer Beladezeit von 40 Sekunden und einer Entladezeit von 30 Sekunden führt eine Variation der Streckenlänge bei $h = 6\text{m}$ und $s = 12 \%$ zu den nachstehenden Zykluszeiten. Die Fahrgeschwindigkeit von 12 m/s wird unter den o.g. Annahmen nur bei einer Minimalstreckenlänge von mehr als 495m erreicht.

$$Z_i = 40s + 40s + \frac{x_{Ai} - x_{Bi} - x_{Vi}}{12\text{m/s}} + 19s + 50s + 1s + 30s = 180s + \frac{x_{Ai} - x_{Bi} - x_{Vi}}{12\text{m/s}}$$

$$x_1 = 500\text{m}; Z_1 = 184\text{s}$$

$$x_2 = 600\text{m}; Z_2 = 193\text{s}$$

$$x_3 = 700\text{m}; Z_2 = 201\text{s}$$

$$x_4 = 1.000\text{m}; Z_3 = 226\text{s}$$

$$x_5 = 1.500\text{m}; Z_4 = 268\text{s}$$

$$x_6 = 1.750\text{m}; Z_6 = 289\text{s}$$

$$x_7 = 2.000\text{m}; Z_7 = 309\text{s}$$

$$x_8 = 2.500\text{m}; Z_8 = 351\text{s}$$

$$x_9 = 3.500\text{m}; Z_9 = 435\text{s}$$

Die Abhängigkeit der Zykluszeit des Transports eines Containers von der Streckenlänge ist linear. Über den Betrachtungsbereich hinausgehende Informationen auf Grund der Systemkonfiguration nicht darstellbar (Anteil der Zeiten für Nebenprozesse, wie z.B. Be- und Entladen, sowie der Beschleunigung, Verzögerung und Stationseinfahrt an der Zykluszeit: 180s ; Minimallänge zur Erreichung von v_{max} : 495m).

Berechnungsgrundlage für die theoretisch erreichbare Leistung unterschiedlicher Seilbahnsysteme

Im Folgenden werden Formeln aufgestellt, nach denen die theoretisch erreichbare Leistung für die verschiedenen, in Tabelle 20 aufgeführten, Seilbahnvarianten zu berechnen ist.

²⁷ Die Beschleunigung, mit der die Seilbahn aus der Station bis zum Erreichen der maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit ausfährt, beträgt nach Sedivy üblicherweise $0,20$ bis $0,30 \text{ m/sec}^2$. Die Verzögerung beträgt üblicherweise $0,20$ bis $0,40 \text{ m/sec}^2$. Die Fahrzeit, mit der die Seilbahn mit konstanter Fahrgeschwindigkeit fährt, ist von der Trassenlänge (x_i) abhängig. Bei einer hohen Nennfahrgeschwindigkeit (bis $12,0 \text{ m/sec}$) einer Luftseilbahn wird meist beim Überfahren einer Stütze auf eine geringere Fahrgeschwindigkeit abgebremst. Die Einfahrt in die Station erfolgt mit einer sehr geringen Fahrgeschwindigkeit (etwa $0,3 \text{ m/sec}$), da am Ende der Fahrt der Wagen an den Stationspuffer auffährt. Der Fahrtablauf erfolgt zumeist durch die Seilbahnsteuerung; er kann aber auch manuell erfolgen (Sedivy, 2012).

Die stündliche Leistung L_1 einer unidirektional fördernden, einsträngigen Seilbahn im Pendelbetrieb (S1) errechnet sich nach Gl. (10). Dabei ist der im bidirektionalen Betrieb maximal zu erreichenden Zykluszeit die Dauer des Rücktransportes des leeren Wagens / der Kabine aufzuschlagen.

$$L_1 \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = \frac{3600 \cdot 1 \text{ Container}}{Z + (Z - t_B - t_E)} \quad \text{Gl. (10)}$$

Für die stündliche Leistung L_2 einer zweisträngigen, unidirektional fördernden Seilbahn, deren Stränge gekoppelt sind und die im Pendelbetrieb fährt (S2) ergibt sich die Berechnung wie in Gl. (11) dargestellt. Hierbei muss davon ausgegangen werden, dass zu jeder Zeit Container für die Beladung bereitstehen; eine Verzögerung der Beladung oder Entladung eines Strangs wirkt sich wegen der Kopplung der Stränge bei diesem System direkt auf die Gesamtleistung aus.

$$L_2 \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = 2 \cdot \left(\frac{3600 \cdot 1 \text{ Container}}{Z + Z} \right) \quad \text{Gl. (11)}$$

Bei einer im Pendelbetrieb fahrenden, unidirektional fördernden, zweisträngigen Seilbahn mit entkoppelten Strängen (S3) ergibt sich die maximale Förderleistung L_3 gemäß Gl. (12). Die Gesamtleistung eines solchen Systems ist nicht von den Leistungen der einzelnen Stränge abhängig und kann auch derart technisch ausgestaltet werden, dass beim Ausfall eines Strangs zumindest der verbleibende weiterbetrieben werden kann.

$$L_3 \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = 2 \cdot L_1 \quad \text{Gl. (12)}$$

Die maximal erreichbare stündliche Leistung L_4 einer bidirektional fördernden, einsträngigen Seilbahn im Pendelbetrieb (S4) errechnet sich nach Gl. (13).

$$L_4 \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = \frac{3600 \cdot 1 \text{ Container}}{Z} \quad \text{Gl. (13)}$$

Die Leistung einer bidirektional fördernden, zweisträngigen Seilbahn, die im Pendelbetrieb verfährt (S5), erreicht theoretisch sowohl bei ge- als auch bei entkoppelten Strängen die nach Gl. (14) zu ermittelnde Förderleistung L_5 . Bei der Systemunterscheidung dieser Bahnen sind Fragstellungen der Redundanz oder Verfügbarkeit von Containern und der damit verbundenen Gesamtleistung des Systems relevant. Die größtmögliche erzielbare Leistung ist unter den ausgewählten Systemvarianten mit dem dieser Gleichung zugrundeliegenden System zu erreichen.

$$L_5 \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = 2 \cdot \frac{3600 \cdot 1 \text{ Container}}{Z} \quad \text{Gl. (14)}$$

Beispielhafte Anwendung der Leistungsberechnung für Seilbahnsysteme

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Systemvariante auf die Größe der theoretisch erreichbaren Leistung werden in der folgenden Tabelle die stundenbezogenen Leistungsdaten unterschiedlich langer Bahnen angegeben.

i	$x_i [m]$	$Z_i [s]$	$L_{1i} [C/h]$	$L_{2i} [C/h]$	$L_{3i} [C/h]$	$L_{4i} [C/h]$	$L_{5i} [C/h]$
1	500	184	12,1	19,6	24,2	19,6	39,1
2	600	193	11,4	18,7	22,8	18,7	37,3
3	700	201	10,8	17,9	21,7	17,9	35,8
4	1000	226	9,4	15,9	18,8	15,9	31,9
5	1500	268	7,7	13,4	15,5	13,4	26,9
6	1750	289	7,1	12,5	14,2	12,5	24,9
7	2000	309	6,6	11,7	13,1	11,7	23,3
8	2500	351	5,7	10,3	11,4	10,3	20,5
9	3500	435	4,5	8,3	9,0	8,3	16,6

Tabelle 21: Exemplarische Berechnung der Transportkapazität unterschiedlich langer Bahnen

Die voranstehende Tabelle enthält zu den Varianten $i = 1, \dots, 9$ und den dazugehörigen Streckenlängen $x = x_1, \dots, x_9$ die Ergebnisse der Berechnung der Leistung $L = L_1, \dots, L_5$ der unterschiedlichen Systemvarianten $S = S_1, \dots, S_5$. Das Ergebnis zeigt die Tendenz der Abnahme der Leistung mit zunehmender Streckenlänge und das unterschiedliche Verhältnis der Leistungen unterschiedlicher Streckenlängen.

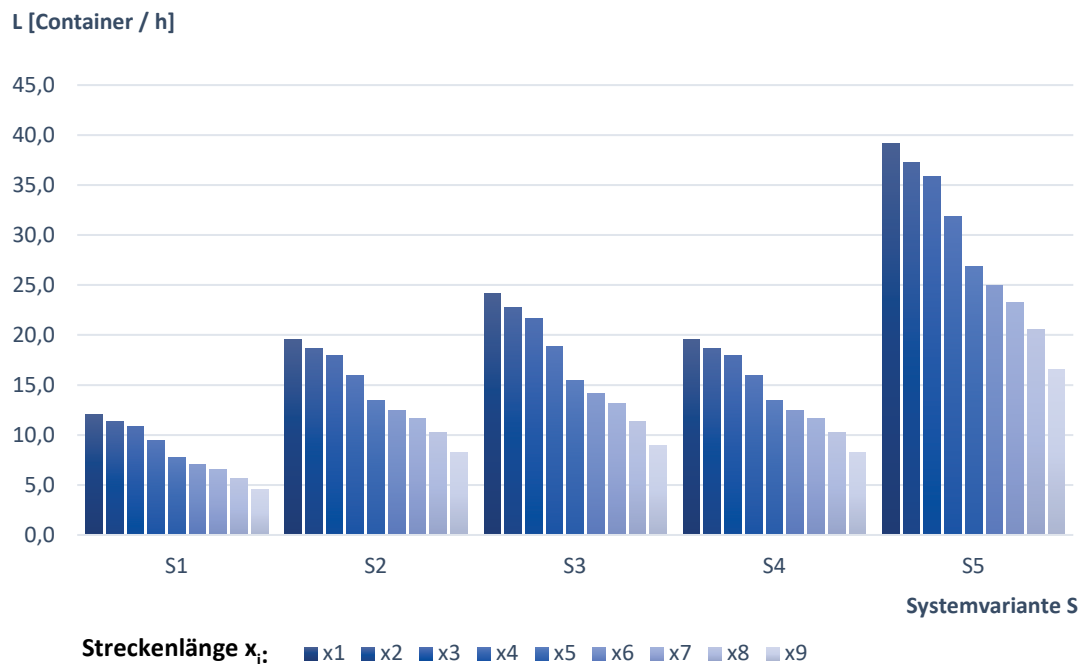


Abbildung 87: Maximal erreichbare Leistung der Systemvarianten S1, ..., S5 in Abhängigkeit von der Streckenlänge x_i

In Abbildung 87 ist die Nichtlinearität der Leistungen der verschiedenen Systemvarianten bei einer Variation der Streckenlängen zu sehen. Dieser Effekt lässt sich damit erklären, dass die Be- und Entladezeiten bei einer kürzeren Strecke mehr Einfluss auf die stündliche Gesamtdauer haben, als bei längeren.

Ermittlung der Leistungsmöglichkeiten verketteter Seilbahnen

Um ein System zu konzipieren, welches auf dem Prinzip des Pendelbetriebs beruht und für eine lange Strecke sinnvoll eingesetzt werden kann, bedarf es der Aneinanderreihung mehrerer Systeme, die jeweils einen Container transportieren. Unter der Verwendung der Seilantriebstechnik und unter Ausschluss der Verwendung kuppelbarer Klemmen ist es nicht möglich, mehrere Transporteinheiten auf ein System zu geben, die unabhängig voneinander transportiert werden. Für Leercontainer wäre der gleichzeitige Transport mehrerer Container denkbar. Beide Varianten (Segmentierung und Bildung von Transportgemeinschaften) führen zu einer Steigerung der Gesamtleistung der Anlage bei gleichbleibender Streckenlänge. Nachfolgend wird die Segmentierung einer Bahn näher beleuchtet.

Die Segmente (SEG), in die die Gesamtstrecke unterteilt wird, können gleich- oder unterschiedlich groß sein (vgl. Abbildung 88 und Abbildung 89).

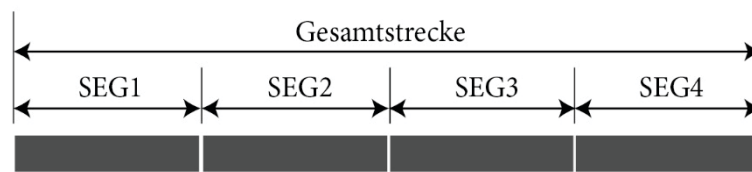


Abbildung 88: Segmentierte Fahrstrecke mit gleichgroßen Segmenten



Abbildung 89: Segmentierte Fahrstrecke mit unterschiedlich großen Segmenten

Je Sequenz erfolgt in den Zwischenstationen jeder Station jeweils ein Aus- und Einladen der Container; zwischen den Zwischenstationen folgt die Fahrtgestaltung dem in Abbildung 85 beschriebenen Prinzip. Die Zykluszeit eines Segmentes kann demnach ebenso nach Gl. (9) berechnet werden. Die Gesamtleistung einer in gleichgroße Sequenzen unterteilten Bahn ist genauso groß wie die Leistung eines seiner Elemente.

Die Leistung einer Anlage mit unterschiedlich langen Segmenten bemisst sich auf Basis der Leistung des längsten Streckenabschnitts, da dieses den Nachschub aller nachfolgenden Segmente gewährleistet bzw. die Übernahme der durch voranstehende Segmente transportierte Container gewährleistet. Wenn das nachfolgende Segment länger ist, ist auch die Zyklusdauer des Segmentes Z_{s_i} größer und es entstehen in den Stationen Wartezeiten. Eine unterschiedlich große Segmentierung macht nur bei eindringlichen infrastrukturellen oder geographischen Hindernissen Sinn und könnte ggf. die Pufferung von Containern in den Zwischenstationen erforderlich machen.

Die Zykluszeit eines Containers zur Bewältigung der gesamten Strecke errechnet sich gemäß Gl. (15).

$$Z_{Kette} = \sum_{i=0}^i Z_{SEG\ i} \quad \text{Gl. (15)}$$

wobei:

$Z_{SEG\ i}$ = Zykluszeit eines Segments [s], in Abhängigkeit von x_{Ai}

Beispielhafte Anwendung der Leistungsberechnung verketteter Seilbahnen

Durch die Segmentierung kann eine Erhöhung der Gesamttransportleistungen L erreicht werden, da so in Bezug auf die Gesamtstrecke x_A eine Erhöhung der Anzahl, der im Transport befindlichen Container erreicht werden kann. Die Gesamtzykluszeit eines Containers Z_{Kette} ist nicht relevant, da

sich die Leistung am Output des längsten Streckenabschnitts bemisst. Zur Verdeutlichung folgt ein Beispiel für die Segmentierung einer 1.500 Meter langen Strecke:

<i>Fall</i>	x_{Ai}	x_1	x_2	x_3	ΣZ_{Si}	L_{1i}	L_{2i}	L_{3i}	L_{4i}	L_{5i}
1	1.500	1.500			268	7,7	13,4	15,4	13,4	26,8
2	1.500	750	750		410	10,6	17,5	21,1	17,5	35,1
3	1.500	500	500	500	552	12,0	19,5	24,1	19,5	39,0
4	1.500	500	1.000		410	9,4	15,9	18,8	15,9	31,8

Tabelle 22: Exemplarische Berechnung der Transportkapazität segmentierter Bahnen

Im Fall 1 sind die Kenndaten einer unsegmentierten Bahn, die die betrachtete Streckenlänge von 1.500 m aufweist, abzulesen. Demnach wird eine Gesamtzykluszeit von 268 s erreicht und es können mit den unterschiedlichen Betriebsarten für L1 (einsträngig, unidirektional) = 7 Container / h, L2 (zweisträndig, unidirektional, gekoppelte Stränge) = 13 Container / h, L3 (zweisträndig, unidirektional, entkoppelte Stränge) = 15 Container / h, L4 (einsträngig, bidirektional) = 13 Container / h und L5 (zweisträngig, bidirektional, entkoppelt) = 26 Container / h transportiert werden. Im Fall 2 wurde die Streckenlänge auf zwei gleichgroße Segmente mit je 750 m aufgeteilt – für Fall 3 in drei gleichgroße Segmente zu je 500 m und im vierten Fall ist eine ungleiche Segmentierung in ein Segment mit 1.000 m und eins mit 500 m dargestellt. Die Entwicklung der Gesamtzyklusdauern und erreichbaren Leistungen L1, ..., L5 für die verschiedenen Systemvarianten S1, ... , S5 sind den jeweiligen Fallzeilen zu entnehmen und entwickeln sich wie in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

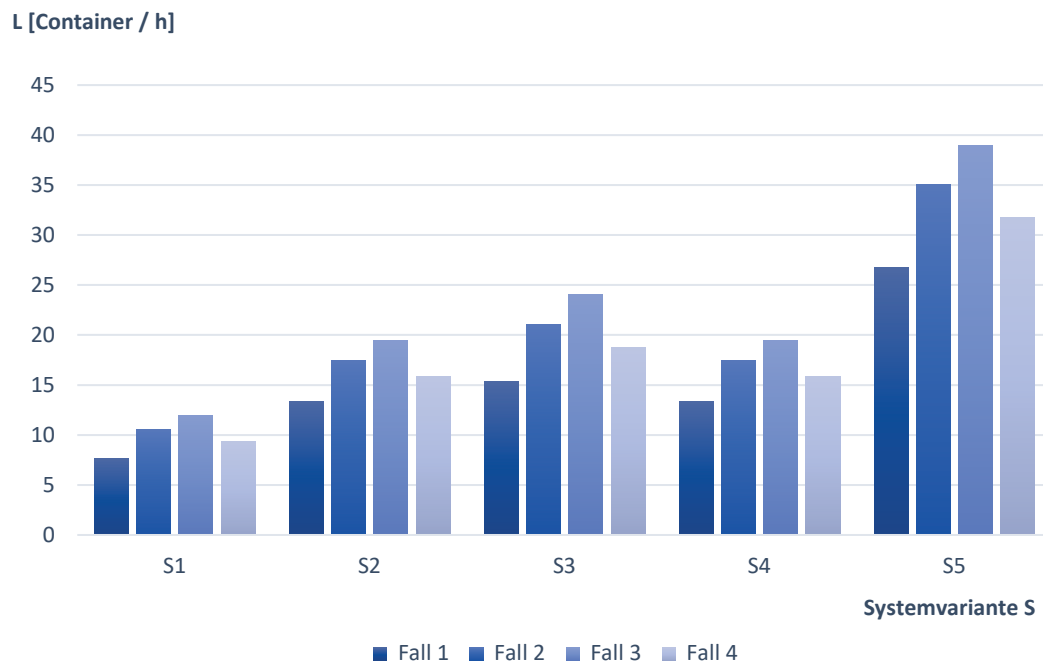


Abbildung 90: Visualisierung der erzielbaren Leistungsdaten gemäß Tabelle 22

Die beispielhafte Anwendung der Leistungsberechnung verdeutlicht die Unterschiede der erzielbaren Leistungen der verschiedenen Systemvarianten in Bezug auf die Art der Segmentierung. Wie in Abbildung 90 zu sehen ist, variiert bspw. die Systemvariante S2 (Leistung L2) für eine segmentierte Seilbahn, die auf der Systemvariante zweisträngige, unidirektional fördernde Seilbahn, deren Stränge gekoppelt sind und die im Pendelbetrieb fährt für die unterschiedlichen Segmentierungsfälle 1, ..., 4 zwischen 13 bis 19,5 transportierten Containern pro Stunde. Die größte Leistung kann mit der dreiteiligen Segmentierung erreicht werden; hierfür kämen allerdings auch die größten Kosten zum Tragen, da 2 Umwechselstationen (zwischen den Segmenten 1 und 2 sowie zwischen den Segmenten 2 und 3) beachtet werden müssten. Die Segmentierung ist demnach immer unter Beachtung der Kosten und Nutzen individuell zu bewerten.

5.2.2 Automatisierte konventionelle Containertransportsysteme

Für die metrisierende Betrachtung werden nachfolgend allgemeingültige Berechnungsansätze definiert.

Fahrzeitdiagramm für konventionelle Containertransportsysteme

Im Gegensatz zum standardisierbaren Fahrzeitdiagramm der Containerseilbahn sind die Fahrzeitdiagramme konventioneller Containertransportsysteme, die in den Terminalbetrieb eingebunden sind, nicht generalisierbar, da sie stark von den Verkehrsbedingungen und der Streckenführung abhängen (vgl. Abbildung 91). Im Falle einer unabhängigen Transportstrecke ist die Definition eines generellen Fahrzeitdiagramms möglich und wird in Abbildung 92 exemplarisch dargestellt. Nachfolgend wird für die automatisierten Varianten der in Kapitel 2.1.5

beschriebenen Technologien, die dem Containertransport dienen, eine mathematische Gleichung aufgestellt, die die Fahrtzeit eines idealen Transports allgemeingültig beschreibt.

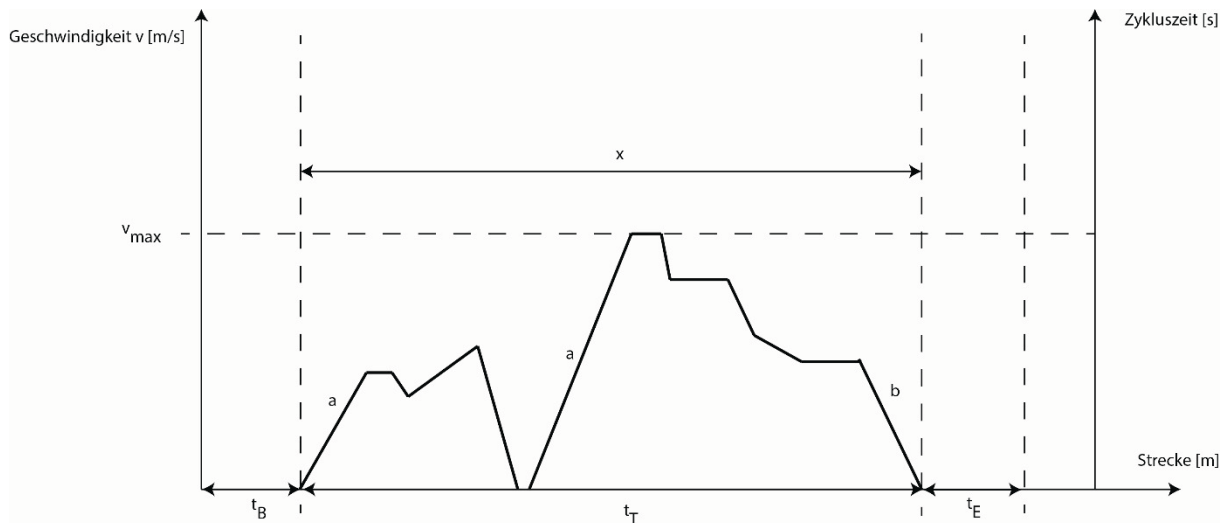


Abbildung 91: Exemplarisches Fahrtdiagramm konventioneller Containerfahrzeuge, terminalverkehrabhängig

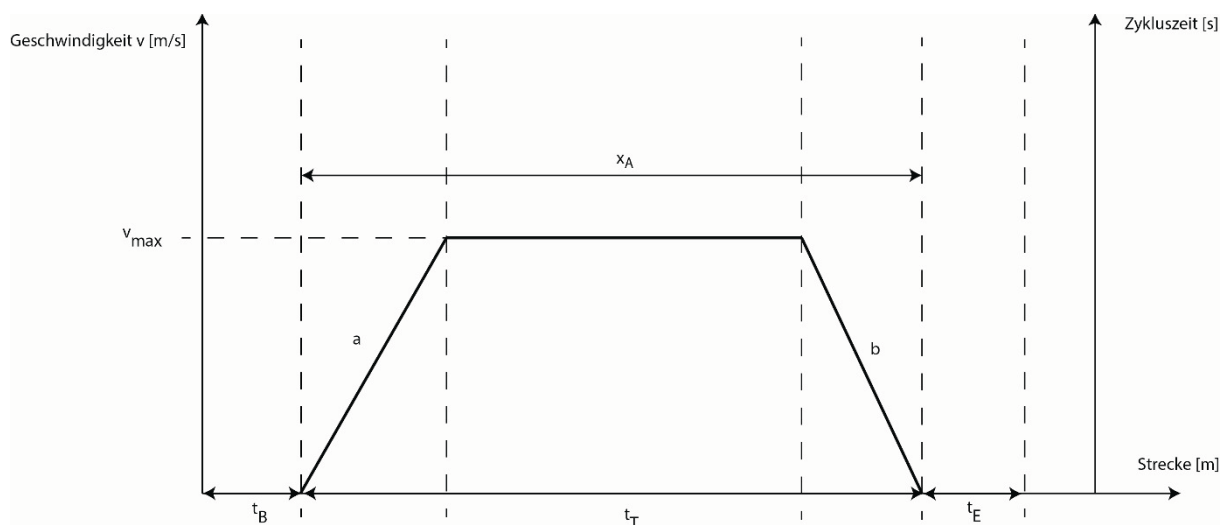


Abbildung 92: Fahrtdiagramm konventioneller Containerfahrzeuge, unabhängige Gradeausfahrt

Berechnungsgrundlage für die Förderleistung von automatischen konventionellen Containertransportsystemen

Die Dauer eines Fahrtspiels wird als „Zykluszeit“ bezeichnet. Die Berechnung der Zykluszeit leitet sich aus dem Fahrtdiagramm ab. Für eine Berechnung der Zykluszeit des Transportes durch AKTCS ist zu beachten dass diese zur Überquerung der Topologien eines Brückenbauwerks bedürfen und die Fahrstrecke somit eine Auf- und eine Abfahrt enthält (vgl. Abbildung 93).

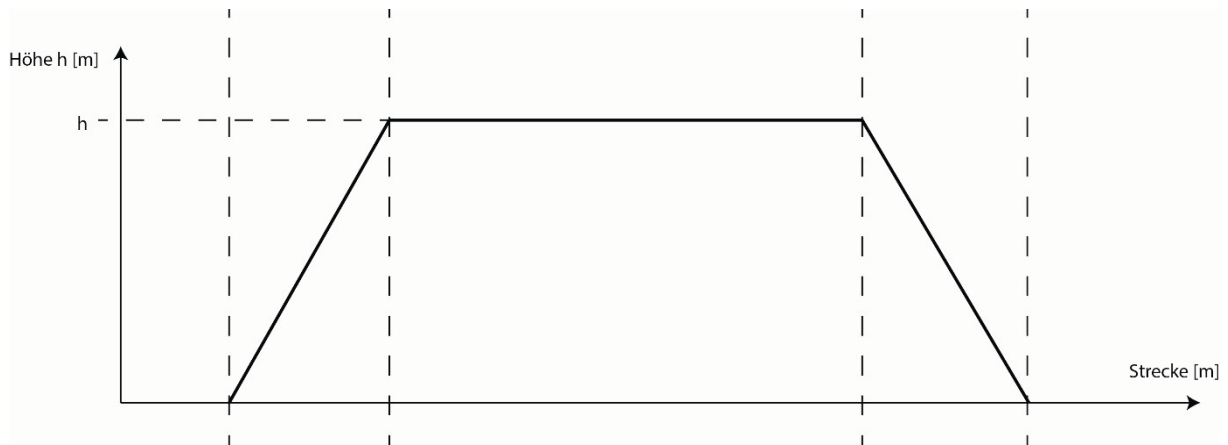


Abbildung 93: Fahrstrecke konventioneller Containertransportfahrzeuge in Abhängigkeit von der Höhe

Zur Ermittlung der Zykluszeit ist weiterführend zu beachten, dass die Fahrzeuge auf der Anstiegstrecke eine geringere Höchstgeschwindigkeit erreichen können, als beim ebenen Transport; sie wird für die vorliegende Arbeit mit 40% der Maximalgeschwindigkeit v_{\max} definiert ($v_{1\max} = 0,4 * v_{\max}$). Zudem muss der maximale Steigwinkel der Strecke definiert werden; er wird in der vorliegenden Arbeit mit 5% definiert. Die Bestimmung der Zykluszeit folgt entsprechend des nachstehenden Fahrdiagramms. Dieses ist zur Verdeutlichung der Zusammensetzung der Transportdauer um die Zykluszeit über der Strecke ergänzt (siehe Abbildung 94).

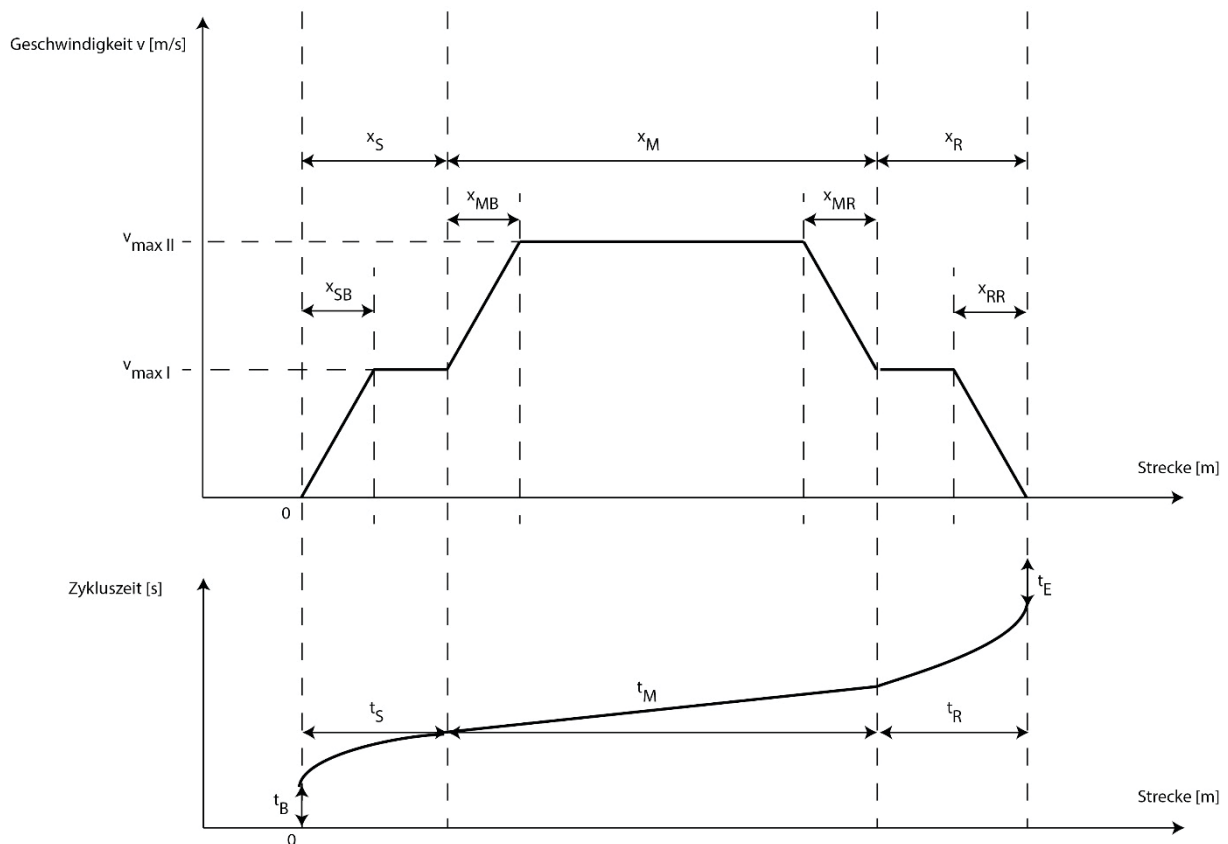


Abbildung 94: Fahrdiagramm für automatische konventionelle Containertransportsysteme über eine Brücke

Im Allgemeinen lässt sich die Zykluszeit für konventionelle Containerfahrzeuge bei der Überwindung eines brückenähnlichen Bauwerks nach folgender Formel beschreiben. Diese summiert die Beladedauer (t_B), die Dauer der Fahrt auf der Auffahrt (t_S), in die die Beschleunigung auf v_{1max} und Fahrt mit v_{1max} inkludiert ist, die Dauer der Fahrt auf lichter Höhe h (t_M), in die die Beschleunigung auf v_{max} , die Fahrt mit Maximalgeschwindigkeit und die Verzögerung auf die reduzierte Geschwindigkeit v_{1max} inkludiert ist, die Dauer der Abfahrt (t_R), die mit der Verzögerung bis zum Stillstand abschließt, sowie die Entladedauer (t_E).

$$Z = t_B + t_T + t_E = t_B + t_S + t_M + t_R + t_E \quad \text{Gl. (16)}$$

wobei:

$t_B = \text{Beladezeit [s]} =$
 = Anfahrt des Containers und Aufnehmen des Containers und Verriegeln der Twist Locks in den Corner Castings + Hub des Containers auf Transporthöhe oder Fremdbeladung

$t_T = \text{Transportzeit [s]; abhängig von der Streckenlänge } x, \text{ dem Verkehr}$
 sowie dem Geschwindigkeitsprofil $= t_S + t_M + t_R$

$t_E = \text{Entladezeit [s]}$
 = Absenken des Containers
 + Entriegeln der Twist Locks in den Corner Castings oder Fremdentladung

$x = \text{Streckenlänge [m]} = x_S + x_M + x_R$

$v_{max} = \text{Maximalgeschwindigkeit [km/h]}$

$v_{1max} = \text{Maximalgeschwindigkeit bei maximaler Steigung [m/s]} = 0,4 \cdot v_{max}$

$a/b = \text{Beschleunigungs- / Verzögerungsfaktor } \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$x_S = \text{Strecke der Streckensteigung [m]} = \frac{h}{5\%} = \frac{h}{0,05}$

wobei hierbei eine Steigung von 5% angenommen wird. Die Variable h muss szenario – spezifisch definiert werden und beschreibt die Lichtehöhe unter dem System [m]

$x_{SB} = \text{Beschleunigungsweg bis zur Geschwindigkeit } v_{1max} \text{ auf der Auffahrt [m]} = \frac{a}{2} \cdot t_{SB}^2$

$t_{SB} = \frac{v_{1max}}{a} \text{ Dauer der Beschleunigung bis auf } v_{1max} \text{ [s]}$

$t_S = t_{SB} + \frac{x_S - x_{SB}}{v_{1max}} \text{ Dauer der Fahrt auf der Auffahrt [s]}$

$x = \text{Länge der Transportstrecke mit lichter Höhe } > h \text{ [m]}$

$x_A = \text{Gesamtstreckenlänge inkl. Auf – und Abfahrt} = x + 2 \frac{h}{0,05} \text{ [m]}$

$x_{MB} = \text{Beschleunigungsweg bis zur Geschwindigkeit } v_{max} \text{ [m]} = \frac{a}{2} \cdot t_{MB}^2$

$$x_{MR} = \text{Weg der Verzögerung von der Geschwindigkeit } v_{max} \text{ auf } v_{1max} [m] = \frac{a}{2} \cdot t_{MR}^2$$

$$t_{MB} = \frac{v_{max} - v_{1max}}{a} \text{ Dauer der Beschleunigung von } v_{1max} \text{ auf } v_{max} [s]$$

$$t_{MR} = \frac{v_{1max}}{a} \text{ Dauer der negativen Beschleunigung von } v_{max} \text{ auf } v_{1max} [s]$$

$$t_M = t_{MB} + \frac{x_M - x_{MB} - x_{MR}}{v_{max}} + t_{MR} \text{ Dauer der Fahrt über die Strecke } x [s]$$

$$x_R = \text{Strecke der negativen Streckensteigung } [m] = \frac{h}{5\%} = \frac{h}{0,05}$$

wobei hierbei eine Steigung von 5% angenommen wird. Die Variable h muss szenario – spezifisch definiert werden muss und beschreibt die Lichthöhe unter dem System [m]

$$x_{RR} = \text{negativer Beschleunigungsweg auf der Abfahrt von der Geschwindigkeit } v_{1max} \text{ bis zum Stand } [m] = \frac{a}{2} \cdot t_{RR}^2$$

$$t_{RR} = \frac{v_{1max}}{a} \text{ Dauer der negativen Beschleunigung von } v_{1max} \text{ bis zum Stand } [s]$$

$$t_R = t_{RR} + \frac{x_R - x_{RR}}{v_{1max}} \text{ Dauer der Fahrt auf der Abfahrt } [s]$$

Die allgemeine Formel zur Zykluszeitberechnung für AKCTS bei der Überwindung eines brückenähnlichen Bauwerks ergibt sich nach Einsetzen der beschriebenen Zusammenhänge wie folgt:

$$Z = t_B + t_S + t_M + t_R + t_E = t_B + \left[\frac{0,4 \cdot v_{max}}{a} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot v_{max}}{a}\right)^2}{0,4 \cdot v_{max}} \right] + \left[\frac{v_{max} - 0,4 \cdot v_{max}}{a} + \frac{x - 2 \cdot \frac{h}{0,05} - \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{v_{max} - 0,4 \cdot v_{max}}{a}\right)^2 - \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot v_{max}}{a}\right)^2}{v_{max}} + \frac{0,4 \cdot v_{max}}{a} \right] + \left[\frac{0,4 \cdot v_{max}}{a} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{a}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot v_{max}}{a}\right)^2}{0,4 \cdot v_{max}} \right] + t_E$$

Die Variablen x und h werden bei der Definition des Szenarios festgelegt; die Variablen v_{max} , t_B , t_E und a sind fahrzeugspezifisch. Die Systemleistung kann durch eine Nutzung mehrere Transportfahrzeuge jeweils erhöht werden. Da die automatischen konventionellen Containertransportsysteme nicht schienengebunden sind und damit keines „Bahnhofs“ bedürfen sind zur Anpassung an größere Transportleistungsbedarfe lediglich weitere Systeme bereitzustellen und die maximale Traglast der Substruktur zu beachten.

Fahrzeugspezifische Anwendung der Zyklusberechnung

Für die Leistungsberechnung von automatischen konventionellen Containertransportsystemen wurde für die im Kapitel 2.1.5 beschriebenen Systeme, die für den Horizontaltransport geeignet

sind, eine Literatur- und Marktrecherche vorgenommen und die ermittelten Leistungsdaten übertragen. Untersuchte Systeme: Van Carrier (a), AGV (b) und Multitrailer Zug (c). Die Untersuchungen führen zu nachstehender aufgeführten Parametern.

a) Automatisierte Van Carrier (AVC)²⁸

Für einen Van Carrier werden folgende Parameter angenommen:

- Hubgeschwindigkeit, beladen: 0,3m/s – Lift um 1m nötig
- Maximalgeschwindigkeit, beladen: $v_{max} = \frac{30km}{h} = \frac{8,3m}{s}$
- Maximale Transportkapazität [TEU]: 1 Container, bis zu 2 TEU
- Beschleunigung/Verzögerung: $a_{VC} = 0,3 \frac{m}{s^2}$
- Anfahren und Überfahren des Containers, Platzierung des Spreaders und Verriegeln der Twist Locks sowie Hub: $t_{B,VC} = 60s$
- Absetzen des Containers, Lösen der Twist Locks und Abfahrt: $t_{E,VC} = 40s$

Unter Anwendung der genannten Parameter ergibt sich Gl. (16) wie folgt:

$$\begin{aligned}
 Z_{VC} = t_B + t_S + t_M + t_R + t_E = 60s + & \left[\frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}} \right] + \\
 & \left[\frac{\frac{8,3m}{s} - 0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{x - 2 \cdot \frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{8,3m}{s} - 0,4 \cdot \frac{8,3m}{s} \right)^2 - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{8,3 \frac{m}{s}} + \frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right] + \\
 & \left[\frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{8,3m}{s}} \right] + 40s = 100s + \left[11s + \frac{\frac{h}{0,05} - 18,4m}{3,3 \frac{m}{s}} \right] + \left[16,6s + \right. \\
 & \left. \frac{x - \frac{2h}{0,05} - 41,33m - 18,37m}{8,3 \frac{m}{s}} + 11s \right] + \left[11s + \frac{\frac{h}{0,05} - 18,37m}{3,32 \frac{m}{s}} \right]
 \end{aligned}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{VC500} = 100s + 41,6s + 51,79 + 41,6 = 235,17s = 3,9 \text{ Minuten}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.000m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{VC1000} = 295,4s = 4,9 \text{ Minuten}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

²⁸ Nach (Stahlbock & Voß, 2007) und eigenen Marktrecherchen, u.a. (Liebheer Container Cranes Ltd., 2018) , (Brunns & Piepenburg, 2013)

$$Z_{VC1500} = 355,6s = 5,9 \text{ Minuten}$$

b) AGV²⁹

Für ein AGV werden folgende Parameter angenommen:

- Hubgeschwindigkeit voll/leer: Fahrzeug kann nicht eigenständig be- und entladen
- Maximal Geschwindigkeit, beladen: 21 km/h $\rightarrow v_{max} = \frac{21km}{h} = \frac{6m}{s}$
- Beschleunigung/Verzögerung: $a_{AGV} = 0,5 \frac{m}{s^2}$
- Maximale Transportkapazität [TEU]: 1 Container, maximal 2 TEU
- Beladen eines Trailers durch VC (Anfahren und Überfahren des Containers, Platzierung des Spreaders und Verriegeln der Twist Locks): $t_{B,AGV} = 60s$
- Entladen eines Trailers durch VC (Anfahren, Aufnehmen des Containers, Lösen der Twist Locks und Abfahrt mittels VC): $t_{E,AGV} = 60s$

Unter Anwendung der genannten Parameter ergibt sich Gl. (16) wie folgt:

$$Z_{AGV} = t_B + t_S + t_M + t_R + t_E = 60s + \left[\frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,5 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{6m}{s}} \right] +$$

$$\left[\frac{\frac{6m}{s} - 0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} + \frac{x - 2 \cdot \frac{h}{0,05} - \frac{0,5 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{6m}{s} - 0,4 \cdot \frac{6m}{s} \right)^2 - \frac{0,5 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{\frac{6m}{s}} + \frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} \right] + \left[\frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} + \right.$$

$$\left. \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,5 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{6m}{s}}{0,5 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{6m}{s}} \right] + 60s$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{AGV500} = 277 \text{ Sekunden} = 4,6$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.000m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{AGV500} = 360,3 \text{ Sekunden} = 6 \text{ Minuten}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{AGV500} = 443,7 \text{ Sekunden} = 7,4 \text{ Minuten}$$

c: Automatisierte Multitrailer-Trains (AMTT)³⁰

²⁹ Nach (Stahlbock & Voß, 2007) und (Yang, et al., 2004) sowie eigenen Marktrecherchen, u.a. (KFW, 2018)

³⁰ Nach (Stahlbock & Voß, 2007) und eigenen Marktrecherchen

Für einen MTT werden folgende Parameter angenommen:

- Hubgeschwindigkeit voll/leer: Fahrzeug kann nicht eigenständig be- und entladen
- Maximal Geschwindigkeit, beladen: 30 - 40 km/h $\rightarrow v_{max} = \frac{35km}{h} = \frac{9,7m}{s}$
- Beschleunigung/Verzögerung: $a_{MTT} = 0,3 \frac{m}{s^2}$
- Maximale Transportkapazität [TEU]: 6 TEU bei 1 Chassis und 2 Anhängern
- Beladen eines Trailers durch VC (Anfahren und Überfahren des Containers, Platzierung des Spreaders und Verriegeln der Twist Locks): $t_{B,MTT} = 60s$
- Entladen eines Trailers durch VC (Anfahren, Aufnehmen des Containers, Lösen der Twist Locks und Abfahrt mittels VC): $t_{E,MTT} = 60s$
- Maximale Transportkapazität [TEU]: 6

Unter Anwendung der genannten Parameter ergibt sich Gl. (16) wie folgt:

$$Z_{MTT} = t_B + t_S + t_M + t_R + t_E = 60s + \left[\frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}} \right] +$$

$$\left[\frac{\frac{9,7m}{s} - 0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{x - 2 \cdot \frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{9,7m}{s} - 0,4 \cdot \frac{9,7m}{s} \right)^2}{9,7 \frac{m}{s}} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2 + \frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right] +$$

$$\left[\frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} + \frac{\frac{h}{0,05} - \frac{0,3 \frac{m}{s^2}}{2} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}}{0,3 \frac{m}{s^2}} \right)^2}{0,4 \cdot \frac{9,7m}{s}} \right] + 60s$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{MTT500} = 60s + 12,9s + 24s + 19s + 18s + 12,9s + 129s + 24s + 60s = 245,5 \text{ Sekunden} \\ = 4,1 \text{ Minuten}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.000m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{MTT1000} = 297 \text{ Sekunden} = 4,9 \text{ Minuten}$$

Beispiel für eine Fahrstrecke von $x = 1.500m$ und eine zu überquerende lichte Höhe von $h = 6m$:

$$Z_{MTT1500} = 348,6 \text{ Sekunden} = 5,8 \text{ Minuten}$$

Zur Untersuchung der Performances der unterschiedlichen Fahrzeuge wurde analog zu den exemplarischen Berechnungen der Fahrzeit für Szenarien mit einer Streckenlänge von $x = 500, 1000, 1500$ Metern und einer zu überquerenden lichten Höhe von 6 Metern die Fahrzeiten bei einer zu überquerenden lichten Höhe von $h = 3, 6$ und 12 Metern berechnet. Die Ergebnisse sind Tabelle 23 zusammengefasst und zeigen dass insbesondere bei größeren Fahrstrecken die AMTT auf Grund ihrer hohen Maximalgeschwindigkeit und Beladbarkeit sehr gut geeignet sind. Zudem ist festzustellen, dass bei AGV und AMTT bei längeren Fahrwegen der größere Zeitaufwand für die Be- und Entladung durch externe Fahrzeuge weniger zu Buche schlägt.

Transportsystem	x = h =	500m			1000m			1500m		
		3m	6m	12m	3m	6m	12m	3m	6m	12m
Autom. Van Carrier (AVC)		228	264	336	288	324	397	348	385	457
Automated Guided Vehicle (AGV)		267	317	417	350	400	500	433	483	583
Autom. Multitrailer-Train (AMTT)		219	250	312	271	302	364	322	353	415

Tabelle 23: Bestimmung der Fahrtzeit in Sekunden für verschiedene Szenarien

Berechnungsgrundlage für die theoretisch erreichbare Leistung der Systeme

Im Folgenden werden Fahrzeugspezifische Formeln aufgestellt, nach denen die theoretisch erreichbare Leistung für die verschiedenen Containerfahrzeuge zu berechnen ist. Zur Ableitung der tatsächlichen maximal erreichbaren Leistung der Systeme müssen die entsprechenden Fahrzeiten in Bezug zu der maximal durch die jeweiligen Fahrzeugtypen zu transportierenden Containeranzahl gesetzt werden. Für die meisten untersuchten Containertransportsysteme³¹ gilt, dass genau ein Container, also im Falle eines 40 Fuß-Containers maximal 2 TEU, transportiert werden können. Bei der Berechnung ist zu unterscheiden, ob die Fahrzeuge eine uni- oder bidirektional Transportaufgabe verrichten.

Die Leistungsberechnung für einen unidirektionalen Betrieb automatisierter Containerfahrzeuge (Systemvariante 6: S6) ergibt sich allgemein nach Gl. (17). Dabei ist der im bidirektionalen Betrieb maximal zu erreichenden Leistung die Dauer der Rückfahrt des Fahrzeugs aufzuschlagen.

$$L_{6i} \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = \frac{3600 \cdot \text{fahrzeugspezifische Anzahl Container je Fahrt}}{Z_i + (Z_i - t_{Bi} - t_{Ei})} \quad \text{Gl. (17)}$$

Analog hierzu ergibt sich die Leistungsberechnung für einen bidirektionalen Betrieb automatisierter Containerfahrzeuge (Systemvariante 7: S7) nach Gl. (18).

$$L_{7i} \left[\frac{\text{Container}}{h} \right] = \frac{3600 \cdot \text{fahrzeugspezifische Anzahl Container je Fahrt}}{Z_i} \quad \text{Gl. (18)}$$

Beispielhafte Anwendung der Leistungsberechnung für verschiedene Systeme

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Fahrzeugtyps auf die Größe der theoretisch erreichbaren Leistung werden in der folgenden Tabelle die Leistungsdaten unterschiedlich langer Strecken angegeben.

³¹ Außer für AMTT und Ausführungen mit Spezialsreadern

<i>I</i>	<i>x_i</i>	<i>h</i>	<i>L_{6VC}</i>	<i>L_{6AGV}</i>	<i>L_{6MTT}</i>
10	500	3	10	9	32
11	500	6	9	8	29
12	500	12	8	6	24
13	1.000	3	8	6	25
14	1.000	6	7	6	23
15	1.000	12	6	5	19
16	1.500	3	6	5	20
17	1.500	6	5	4	18
18	1.500	12	5	4	16

Tabelle 24: Exemplarische Berechnung der Transportleistungen in Containern pro Stunde (unidirektional)

<i>I</i>	<i>x_i</i>	<i>h</i>	<i>L_{7VC}</i>	<i>L_{7AGV}</i>	<i>L_{7MTT}</i>
10	500	3	16	14	47
11	500	6	15	13	43
12	500	12	13	10	38
13	1.000	3	13	10	39
14	1.000	6	12	10	36
15	1.000	12	10	8	32
16	1.500	3	10	8	32
17	1.500	6	10	8	31
18	1.500	12	9	7	28

Tabelle 25: Exemplarische Berechnung der Transportleistungen in Containern pro Stunde (bidirektional)

Die voranstehenden Tabellen enthalten zu den Varianten $i = 10, \dots, 18$ und den dazugehörigen Streckenlängen $x = 500, 1000$ sowie 1500 Metern und den Varianten $h = 3, 6, 12$ Meter die Ergebnisse der Berechnung der Leistung L_6 (bidirektional) in Tabelle 24 sowie L_7 (bidirektional) in Tabelle 25 für die untersuchten Containertransportsysteme. Das Ergebnis zeigt die Tendenz der Abnahme der Leistung mit zunehmender Streckenlänge sowie höher zu überquerender lichter Höhe. Beim MTT erhöht sich die Leistungsmöglichkeit signifikant durch die Möglichkeit des zeitgleichen Transports von 3 Containern.

6. Implementierung der Analysesystematik und Evaluation

Die Anwendung der beschriebenen komparativen und metrisierenden Systematik kann mittels IT-gestützter Programme vereinfacht werden. Hierfür wird im ersten Teil des Kapitels eine mögliche Umsetzung in MS Excel beschrieben. Da die Validierung des entwickelten Analysetools auf Grund der fehlenden Umsetzungsbeispiele flurfreier automatisierter Containertransportsysteme nicht direkt anhand konkreter Beispiele erfolgen kann widmet sich der zweite Teil dieses Kapitels der Anwendung des Analysetools auf Referenzbeispiele. Hierfür werden verschiedene Szenarien unter dem Augenmerk der Erweiterung der Terminalflächen um mögliche Expansionsflächen beschrieben und hieraus die szenariospezifischen Parameter abgeleitet. Die Ergebnisse der hierauf basierenden technologie-spezifischen Bewertung werden aufgezeigt und beschrieben. Da die Parameter der Referenzbeispiele somit hinsichtlich der Definition der „Leistung“ und „lichte Höhe“ nicht konkret sind, wird die Auswirkung der Unsicherheit der Parameterfestlegung eingehender betrachtet. Hierfür wird eine Sensitivitätsanalyse (Haag, et al., 2011) durchgeführt.

6.1 Analysetool

Die voranstehenden Überlegungen fließen nachfolgend in den Entwurf des Analysetools ein, dieser erfolgt für die in Kapitel 5 betrachteten Technologien. Die Analysesystematik besteht aus der spezifischen Definition des Szenarios (1), der hierauf aufbauenden technischen Systemauslegung (3) mittels automatisierter leistungsbezogener Metrisierung und betriebswirtschaftlicher Auslegung (5) anhand unternehmensspezifischen Bewertungsfaktoren und Unternehmenskennzahlen (4). Die Umsetzung des Analysetools wird für die Bereiche 1 – 3 in Microsoft Office Excel vorgenommen. Ergänzend erfolgt eine Umsetzung der Ermittlung und Anwendung unternehmensspezifischer Gewichtungsfaktoren.

6.1.1 Umsetzung der Szenariobeschreibung

Die zu definierenden Parameter, die das Szenario beschreiben, sind durch eine grüne Feldfärbung hervorgehoben. Zu diesen zählen die Definition der *Kategorie* gemäß der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Unterscheidungskriterien (A, B1, B2, B3 oder C), die Angabe der gewünschten *Leistung* in Containern pro Stunde [C/h], sowie gemäß Kapitel 4.2.1 die Angabe der *Länge* der Seilbahnstrecke in Metern, *die lichte Höhe* h [m] und die Arbeitsweise nach Kapitel 4.2.2: *uni- oder bidirektional*³² (vgl. Abbildung 95).

Kategorie	A		Eingabe A, B1, B2, B3, C
gewünschte Leistung	28	C/h	reele Zahl
Länge der Bahn	400	m	reele Zahl, Länge x
Uni oder bidirektional	1		Unidirektional = 1, Bidirektional = 2
lichte Höhe [m]	1	m	h

Abbildung 95: Eingabemaske des Analysetools – Szenariobeschreibung

³² Beim unidirektionalen Transport erfolgt dieser ausschließlich in eine Richtung, wohingegen beim bidirektionalen Transport in beide Richtungen transportiert werden kann.

Auswahl vMAX	12											
Transportdauer	184											
xa	500	xs	100	15%	Steigung							

Berechnung Seilbahn																	
vmax	5	m/s	tBESCH	10,0	s	xBESCH	25,0	m	tVERZ	10,0	s	xVERZ	40,0	m	xVMAX	420	m
vmax1	6	m/s	tBESCH	12,0	s	xBESCH	36,0	m	tVERZ	12,0	s	xVERZ	51,0	m	xVMAX	398	m
vmax2	7	m/s	tBESCH	14,0	s	xBESCH	49,0	m	tVERZ	14,0	s	xVERZ	64,0	m	xVMAX	372	m
vmax3	8	m/s	tBESCH	16,0	s	xBESCH	64,0	m	tVERZ	16,0	s	xVERZ	79,0	m	xVMAX	342	m
vmax4	9	m/s	tBESCH	18,0	s	xBESCH	81,0	m	tVERZ	18,0	s	xVERZ	96,0	m	xVMAX	308	m
vmax5	10	m/s	tBESCH	20,0	s	xBESCH	100,0	m	tVERZ	20,0	s	xVERZ	115,0	m	xVMAX	270	m
vmax6	11	m/s	tBESCH	22,0	s	xBESCH	121,0	m	tVERZ	22,0	s	xVERZ	136,0	m	xVMAX	228	m
vmax7	12	m/s	tBESCH	24,0	s	xBESCH	144,0	m	tVERZ	24,0	s	xVERZ	159,0	m	xVMAX	182	m

tBEL	40	s	tBESCH	24	s	xBESCH	144	m	a	0,5	m/s ²	xEIN	15	m	tEIN	50	s
tENT	30	s	tVERZ	24	s	xVERZ	159	m	b	0,5	m/s ²	vEIN	0,3	m/s	h	15	m

Minimale Länge 100 m

vMAX	12	m/s	R aus Berechnung 1
Transportdauer	184	s	

L1	12,047	C/h	unidirektional, 1 Strang
L2	19,521	C/h	unidirektional, 2 Stränge, gekoppelt
L3	24,094	C/h	unidirektional, 2 Stränge, entkoppelt
L4	19,521	C/h	bidirektional, 1 Strang
L5	39,042	C/h	bidirektional, 2 Stränge

Abbildung 97: Berechnungsmatrix Seilbahn – Beispiel

Wenn die gewünschte Leistung nicht erreicht werden kann, wird dies vom System angezeigt (vgl. Abbildung 98) und für die Seilbahn die Überprüfung einer Segmentierung der Bahn angeregt. Für die automatischen konventionellen Containertransportsysteme erfolgt eine automatisierte Ergänzung um weitere Fahrzeuge bis zur Erfüllung der gewünschten Leistung.

Seilbahn	vMAX		m/s	Berechnungen zur Seilbahn
	theor. mgl. Leistung		C/h	Berechnungen zur Seilbahn
	Empfohlenes Seilbahnsystem:	gewünschte Leistung kann nicht erreicht werden, Segmentierung prüfen		

Abbildung 98: Übersichtsmaske - Beispiel: gewünschte Leistung nicht erreichbar

Im Ergebnisfeld werden die Maximalgeschwindigkeiten, Leistungen und die zu empfehlende Systemausgestaltung zur Erreichung der gewünschten Transportmenge angezeigt (vgl. Abbildung 99).

AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC
	theor. mgl. Leistung	34,0	C/h	Berechnungen zu VC
	Empfohlenes VC-System: Bidirektional befahrene Strecke 5 Fahrzeuge			
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV
	theor. mgl. Leistung	31,6	C/h	Berechnungen zu AGV
	Empfohlenes ARV-System: Bidirektional befahrene Strecke 6 Fahrzeuge			
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT
	theor. mgl. Leistung	45,3	C/h	Berechnungen zu MTT
	Empfohlenes MTT-System: Bidirektional befahrene Strecke 2 Fahrzeuge			

Abbildung 99: Ergebnisfeld zur Leistungsberechnung und Ausgestaltung der Systeme - Beispiel

6.1.3 Umsetzung der unternehmensspezifischen Bewertung der Ergebnisse

Zur Umsetzung der Nutzwertanalyse und des paarweisen Vergleichs wurde jeweils ein Excel Tool umgesetzt, in dem die ermittelten Erkenntnisse zu dem spezifischen Untersuchungsfall automatisiert und normiert eingetragen werden. Die Analysesystematik kann ausschließlich für die technologiespezifische Untersuchung oder ausschließlich für die unternehmensspezifisch, betriebswirtschaftliche Untersuchung oder für beide angewendet werden.

Zur besseren Anschauung der unternehmensspezifischen Bewertung wird diese für ein fiktives Unternehmen „Seehafenbetreiber X“ umgesetzt und in Tabelle 26 dargestellt. Seehafenbetreiber X betreibe einen Containerterminal und habe den Bedarf, Lagerkapazitäten auszuweiten. Eine direkte Expansion sei nicht möglich. Das Terminal verfüge über geringes Eigenkapital. Zur Anbindung einer Expansionsfläche solle ein flurfrees Containertransportsystem integriert werden.

	<i>Investitionskosten</i>	<i>Nutzungs- und Instandhaltungskosten</i>	<i>Technologiereife</i>	<i>Flächenbedarf, Terminal</i>	<i>Flächenbedarf, Trasse</i>	<i>Verkehrsvermeidung</i>	<i>Summe</i>	<i>%</i>
<i>Investitionskosten</i>		0	1	1	1	1	4	26,67
<i>Nutzungs- und Instandhaltungskosten</i>	1		0	1	1	0	3	20,00
<i>Technologiereife</i>	0	1		0	1	0	2	13,33
<i>Flächenbedarf, Terminal</i>	0	0	1		1	0	2	13,33
<i>Flächenbedarf, Trasse</i>	0	0	0	0		1	1	6,7
<i>Verkehrsvermeidung</i>	0	1	1	1	0		3	20,00
								100%

Tabelle 26: Paarweiser Vergleich – Beispiel für „Seehafenbetreiber X“

Analog zum beschriebenen Beispielszenario „Seehafenbetreiber X“ ergibt sich die anknüpfende exemplarische Umsetzung der Nutzwertanalyse wie folgt (Abbildung 100).

	<i>Gewichtung</i>	<i>Containerluftseilbahn</i>		<i>AVC</i>		<i>AGV</i>		<i>AMTT</i>	
		<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>
<i>Investitionskosten</i>	26,67%	1	0,27	4	1,07	5	1,33	5	1,33
<i>Nutzungs- und Instandhaltungskosten</i>	20,00%	1	0,20	2	0,40	4	0,80	4	0,80
<i>Technologiereife</i>	13,33%	4	0,53	5	0,67	5	0,67	5	0,67
<i>Flächenbedarf, Terminal</i>	13,33%	4	0,53	1	0,13	1	0,13	1	0,13
<i>Flächenbedarf, Trasse</i>	6,67%	3	0,20	1	0,07	1	0,07	1	0,07
<i>Verkehrsvermeidung</i>	20,00%	3	0,60	1	0,20	3	0,60	3	0,60
	Summe	4	2,33	3	2,53	1	3,60	1	3,60

Abbildung 100: Nutzwertanalyse - Beispiel

6.2 Fallbeispieluntersuchung

In diesem Kapitel erfolgt im Rahmen der Anwendung des Analysetools für die exemplarisch metrisierten Technologien auf Fallbeispiele und einer anknüpfenden Sensitivitätsanalyse die Evaluation des entwickelten Analysetools und der damit verbundenen Systematik. Es werden dabei fiktive Fallbeispiele untersucht, denen keine unternehmensspezifischen Parameter zugeordnet sind; somit wird ausschließlich auf die technologiespezifische Auslegung eingegangen.

6.2.1 Untersuchungsszenarios

Szenario 1: Jade Weser Port, Wilhelmshaven

Der Tiefseehafen (*Jade Weser Port*) in *Wilhelmshaven* ging 2012 in Betrieb. Die Hafenanlage umfasst einen 130 Hektar großen Containerterminal und verfügt über mehr als 1.700 Meter Kaje. Der Containerterminal ist tideunabhängig und wird als Tiefwasserseehafen betitelt; die mögliche

Umschlagskapazität wird auf 2,7 Mio. TEU beziffert. Terminalbetreiber ist die Eurogate Container Terminal Wilhelmshaven (ECTW).

In einer Machbarkeitsuntersuchung wurde die Erweiterung des Jade Weser Ports untersucht. In einem Anfang April 2016 veröffentlichten Ergebnis (Nds. Ministerium für Wirtschaft, 2016) heißt es, dass der Hafen 2027 aus heutiger Sicht an seine Grenzen stoßen werde und eine Erweiterung sowohl technisch realisierbar als auch wirtschaftlich sinnvoll sei. Dabei wurde ein Terminaldesign für den Jade Weser Port II (JWP II) konzipiert, welches den Bau eines zweiten, in nördlicher Richtung gelegenen, Containerterminals mit einer Kajenlänge von 1,8 Kilometer empfiehlt.

In der Variantenuntersuchung zur Infrastruktur werden der Ausbau der Anbindung an die A29 sowie der Bau von einer weiteren Vorstellgruppe zur Bahnanbindung empfohlen. Aus der Kurzfassung der Ergebnisse gehen keine Informationen zu terminalinternen Verkehren oder der Verbindung mit dem JWP I hervor; der Einsatz einer automatisierten internen Transporttechnologie scheint nicht in Betracht gezogen worden zu sein, wäre für den automatischen Containertransport auf dem Terminalgelände aber durchaus denkbar. Die Länge einer derartigen Anlage würde sich auf ca. 300 m belaufen und die internen Transportwege verkürzen (siehe Abbildung 107 und Abbildung 108 im Anhang).

Szenario 2: Valpareiso, Chile

Der in Chile gelegene Hafen *Valpareiso* ist neben dem Hafen in San Antonia der größte im Land. Im Jahr 2014 wurden über 1 Mio. TEU am Hafen umgeschlagen. An der Kaje steht sehr wenig Raum zur Verfügung, so dass der Hafen eine ausgelagerte Logistikzone als Erweiterungsfläche nutzt. Die Strecke, die dabei zurückgelegt werden muss, beträgt 11 km. Alle ankommenden LKW bringen die Container in dieses Areal, in dem alle administrativen Hafenaufgaben (bspw. Zollabwicklung) vollzogen werden. Je nach Bedarf an den Terminals werden die Container abgerufen und auf einer Spezialstraße per LKW an die Kaje verbracht. Die Logistikzone liegt 400 Meter über dem Meeresspiegel, die Länge der direkten Verbindung zwischen den beiden Orten beträgt etwas mehr als 3 km (siehe Abbildung 109, Abbildung 110 und Abbildung 111 im Anhang).

Szenario 3: Antwerpen, Belgien

Der *Hafen in Antwerpen* ist der zweitgrößte europäische Hafen. Das Hafengebiet umfasst 13.057 Hektar am linken und rechten Ufer der Schelde, wobei linksliegend knapp 6.000 Hektar und rechtsliegend mehr als 7.000 Hektar zur Verfügung stehen. Derzeit sind die beiden Flussseiten durch eine Autobahnbrücke, einen gebührenpflichtigen Straßentunnel und einen Eisenbahntunnel miteinander verbunden. In direkter Nähe zum Hafen steht mit der Saeftinghe eine 1.073 Hektar große Entwicklungszone zur Verfügung. Im Jahr 2014 wurden im Hafen 8.977.738 TEU umgeschlagen. Die Verbindung der linken und rechten Scheldeseite durch ein ca. 1,5 km langes Containertransportsystem könnte auch und insbesondere mit Hinblick auf die Entwicklungszone Saeftinghe interessant sein (siehe Abbildung 113, Abbildung 114 und Abbildung 115 im Anhang).

Szenario 4: Rotterdam, Niederlande

Der *Hafen von Rotterdam* ist der größte Seehafen Europas. Der jährliche Umschlag des Hafens von Rotterdam beträgt rund 465 Millionen Tonnen. Das Hafengebiet umfasst 12.500 ha (Land und

Wasser, ca. 6.000 ha davon sind Gewerbeflächen). Die Gesamtlänge des Hafengebiets beträgt gut 40 km. Jährlich laufen ca. 30.000 Seeschiffe und 110.000 Binnenschiffe den Hafen an. Der Containerumschlag im Rotterdamer Hafen findet auf der Maasvlakte und im Waal-/Eemhaven statt. Da die Schifffahrt in Rotterdam weder durch Schleusen noch durch Gezeiten behindert wird, sind die Containerterminals für jedes Containerschiff von der Nordsee aus unmittelbar und rund um die Uhr erreichbar. Der Hafen verfügt über 13 Containerterminals sowie 24 Leercontainerdepots. Insbesondere die Erweiterungsfläche „Maasvlakte II“, die erst kürzlich in Betrieb wurde, ist sehr effizient geplant und optimal an die Bahn angeschlossen. Zumeist sind die Bahnterminals per MTT an die Terminalflächen angeschlossen.

Die Anbindung des Containerterminals (3) erfolgt derzeit über eine Straße und Zugtrasse, die über einen Damm führt. Die direkte Anbindung des Terminals an die zentrale Maasvlakte über den „Yangtzekanaal“ wäre mittels eines 700 m langen, automatisierten Containertransportsystems denkbar (siehe Abbildung 116 und Abbildung 117 im Anhang).

Szenario 5: Cikarang Dry Port, Indonesien

Der Cikarang Dry Port in Indonesien ist ein Close Dry Port (Eckhardt, et al., 2014). Dieser hat eine direkte Schienenverbindung zum Tanjung Priok Seehafen und eine Größe von etwa 200 Hektar. Zwischen den beiden Häfen liegen ca. 50 Straßenkilometer, die direkte Verbindung zwischen den beiden Häfen liegt bei 33 Kilometern (siehe Abbildung 118 im Anhang).

6.2.2 Ableitung der szenariospezifischen Parameter zur Eingabe in das Analysetool

Aus der voranstehenden Beschreibung der Szenarien können die Parameter „Einsatzklasse“ sowie „Länge der Bahn“ für die Szenarien 2-5 hinreichend genau definiert werden. Für die Parameter „Leistung“ sowie „lichte Höhe“ und „Arbeitsweise“ werden Werte angenommen; der Unsicherheit der Wertzuordnung sowie der Unsicherheit der Längendefinition für Szenario 1 wird nachfolgend im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse durch eine Variation der Parameterwerter begegnet.

<i>Szenario 1</i>	<p>Einsatzklasse: A</p> <p>Gewünschte Leistung: <i>unbekannt</i> → <i>Annahme: 30 Container / h</i></p> <p>Länge der Bahn: <i>300 Meter, bidirektionale Funktion</i></p> <p>Gewünschte lichte Höhe: <i>unbekannt</i> → <i>Annahme: h = 15m</i></p> <p>Arbeitsweise: bidirektional</p>
<i>Szenario 2</i>	<p>Einsatzklasse: B3</p> <p>Gewünschte Leistung: <i>unbekannt</i> → <i>Annahme: 15 Container / h</i></p> <p>Länge der Bahn: <i>3100 Meter, bidirektionale Funktion</i></p> <p>Gewünschte lichte Höhe: <i>unbekannt</i> → <i>Annahme: h = 35m</i></p> <p>Arbeitsweise: bidirektional</p>

<i>Szenario 3</i>	Einsatzklasse: <i>B2</i> Gewünschte Leistung: <i>unbekannt → Annahme: 20 Container / h</i> Länge der Bahn: <i>1500 Meter, bidirektionale Funktion</i> Gewünschte lichte Höhe: <i>unbekannt → Annahme: h = 90m</i> Arbeitsweise: <i>bidirektional</i>
<i>Szenario 4</i>	Einsatzklasse: <i>B2</i> Gewünschte Leistung: <i>unbekannt → Annahme: 40 Container / h</i> Länge der Bahn: <i>700 Meter, bidirektionale Funktion</i> Gewünschte lichte Höhe: <i>unbekannt → Annahme: h = 90m</i> Arbeitsweise: <i>bidirektional</i>
<i>Szenario 5</i>	Einsatzklasse: <i>C</i> Gewünschte Leistung: <i>unbekannt → Annahme: 30 Container / h</i> Länge der Bahn: <i>33.000 Meter, bidirektionale Funktion</i> Gewünschte lichte Höhe: <i>unbekannt → Annahme: h = 30m</i> Arbeitsweise: <i>bidirektional</i>

Tabelle 27: Parameter der Fallbeispiele

6.2.3 Ergebnis der technologiespezifischen Analyse

Ergebnisse für Szenario 1

Das Analysetool liefert für die Eingabe der für Szenario 1 definierten Parameter die in Abbildung 101 dargestellten Ergebnisse. Hiernach würde für die Anbindung der Erweiterungsfläche eine Containerseilbahn mit zwei Strängen oder ein brückenbasiertes System mit drei automatisierten VC oder vier AGV oder einem automatisch fahrenden MMT vorgeschlagen werden. Diese Systeme würden die gewünschte Leistung bei einer konstanten Auslastung über 24 Stunden leisten können. Die theoretisch mögliche Leistung liegt bei der Containerseilbahn 30 Prozent höher, als die geforderte Leistung, bei den AKCTS beträgt sie zwischen 3 Prozent (AVC) und 11 Prozent (AMTT) mehr.

				Beschreibung
Seilbahn	vMAX	12	m/s	Berechnungen zur Seilbahn
	theor. mgI. Leistung	39,0	C/h	Berechnungen zur Seilbahn
	Empfohlenes Seilbahnsystem: bidirektional, 2 Stränge			
<i>Bidirektionale Luftseilbahn mit 2 Strängen</i>				
AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC
	theor. mgI. Leistung	31,0	C/h	Berechnungen zu VC
	Empfohlenes VC-System: Bidirektional befahrene Strecke 3 Fahrzeuge			
<i>AVC System mit 3 Fahrzeugen, über eine Brücke fahrend</i>				
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV
	theor. mgI. Leistung	33,2	C/h	Berechnungen zu AGV
	Empfohlenes ARV-System: Bidirektional befahrene Strecke 4 Fahrzeuge			
<i>AGV System mit 4 Fahrzeugen, über eine Brücke fahrend</i>				
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT
	theor. mgI. Leistung	33,5	C/h	Berechnungen zu MTT
	Empfohlenes MTT-System: Bidirektional befahrene Strecke 1 Fahrzeug			
<i>AMTT System mit einem Fahrzeug über eine Brücke fahrend</i>				

Abbildung 101: Analyseergebnis Szenario 1

Ergebnisse für Szenario 2

Das Ergebnis der Eingabe der für Szenario 2 definierten Parameter ist in Abbildung 101 dargestellt. Hiernach würde für die Anbindung der höher gelegenen Erweiterungsfläche eine Containerseilbahn mit zwei Strängen vorgeschlagen werden. AKCTS kommen an dieser Stelle nicht in Frage, da für die Überwindung geomorphologischer Hindernisse insbesondere eine pylonentrassierte Substruktur als dienlich identifiziert wurde, da diese die Überspannung großer Freiflächen ermöglicht. Die theoretisch mögliche Leistung der Containerseilbahn liegt knapp 15 Prozent höher, als die geforderte Leistung.

				Beschreibung
Seilbahn	vMAX	12	m/s	Berechnungen zur Seilbahn
	theor. mgI. Leistung	16,4	C/h	Berechnungen zur Seilbahn
	Empfohlenes Seilbahnsystem: bidirektional, 2 Stränge			
<i>Bidirektionale Luftseilbahn mit 2 Strängen</i>				
AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC
	theor. mgI. Leistung		C/h	Berechnungen zu VC
	Empfohlenes VC-System: ACTS nicht geeignet			
<i>AVC System nicht geeignet</i>				
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV
	theor. mgI. Leistung		C/h	Berechnungen zu AGV
	Empfohlenes ARV-System: ACTS nicht geeignet			
<i>AGV System nicht geeignet</i>				
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT
	theor. mgI. Leistung		C/h	Berechnungen zu MTT
	Empfohlenes MTT-System: ACTS nicht geeignet			
<i>AMTT System nicht geeignet</i>				

Abbildung 102: Analyseergebnis Szenario 2

Ergebnisse für Szenario 3

Das Analysetool liefert für Szenario 3 die in Abbildung 103 dargestellten Ergebnisse. Hiernach würde für die Verbindung der Logistikzonen über die Schelde hinweg eine in zwei gleichgroße Segmente unterteilte Containerseilbahn mit zwei Strängen oder ein brückenbasiertes System mit acht automatisierten VC oder elf AGV oder drei automatisch fahrenden MMT vorgeschlagen

werden. Diese Systeme würden die gewünschte Leistung bei einer konstanten Auslastung über 24 Stunden leisten können. Die theoretisch mögliche Leistung liegt bei der Containerseilbahn mehr als 75 Prozent höher, als die geforderte Leistung; bei den AKCTS beträgt sie zwischen 3 Prozent (AVC) und 33 Prozent (AMTT) mehr.

				Beschreibung
segm. Seilbahn	vMAX	12	m/s	Berechnungen zur Seilbahn
	theor. mgl. Leistung	35,1	C/h	Berechnungen zur Seilbahn
	Segmente	2	Stk.	Berechnungen zur Seilbahn
	Empfohlenes Seilbahnsystem: bidirektional, 2 Stränge			
				<i>Bidirektionale Luftseilbahn mit 2 Strängen, segmentiert in 2 gleichgroße Segmente à 750 Meter</i>
AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC
	theor. mgl. Leistung	20,6	C/h	Berechnungen zu VC
	Empfohlenes VC-System: Bidirektional befahrene Strecke 8 Fahrzeuge			
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV
	theor. mgl. Leistung	21,0	C/h	Berechnungen zu AGV
	Empfohlenes ARV-System: Bidirektional befahrene Strecke 11 Fahrzeuge			
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT
	theor. mgl. Leistung	26,6	C/h	Berechnungen zu MTT
	Empfohlenes MTT-System: Bidirektional befahrene Strecke 3 Fahrzeuge			

Abbildung 103: Analyseergebnis Szenario 3

Ergebnisse für Szenario 4

Für das vierte Szenario liefert das Analysetool die in Abbildung 104 dargestellten Ergebnisse. Hiernach würde für die direkte Anbindung des Terminals an die zentrale Maasvlakte über den „Yangtzekanaal“ eine in zwei gleichgroße Segmente unterteilte Containerseilbahn mit zwei Strängen oder ein brückenbasiertes System mit 15 automatisierten VC oder 20 AGV oder fünf automatisch fahrenden MTT vorgeschlagen werden. Diese Systeme würden die gewünschte Leistung bei einer konstanten Auslastung über 24 Stunden leisten können. Die theoretisch mögliche Leistung liegt bei den MTT mehr als 15 Prozent höher, als die geforderte Leistung; bei den anderen Systemen beträgt sie 2 bis 4 Prozent mehr.

				Beschreibung
segm. Seilbahn	vMAX	12	m/s	Berechnungen zur Seilbahn
	theor. mgl. Leistung	41,9	C/h	Berechnungen zur Seilbahn
	Segmente	2	Stk.	Berechnungen zur Seilbahn
	Empfohlenes Seilbahnsystem: bidirektional, 2 Stränge			
				<i>Bidirektionale Luftseilbahn mit 2 Strängen, segmentiert in 2 gleichgroße Segmente à 350 Meter</i>
AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC
	theor. mgl. Leistung	41,5	C/h	Berechnungen zu VC
	Empfohlenes VC-System: Bidirektional befahrene Strecke 15 Fahrzeuge			
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV
	theor. mgl. Leistung	41,1	C/h	Berechnungen zu AGV
	Empfohlenes ARV-System: Bidirektional befahrene Strecke 20 Fahrzeuge			
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT
	theor. mgl. Leistung	47,5	C/h	Berechnungen zu MTT
	Empfohlenes MTT-System: Bidirektional befahrene Strecke 5 Fahrzeuge			

Abbildung 104: Analyseergebnis Szenario 4

Ergebnisse für Szenario 5

Das Analyseergebnis für Szenario 2 ist in Abbildung 105 dargestellt. Hiernach würde der bidirektionale Transport von 30 Containern pro Stunde zu einem 30km entfernt liegenden Hafenhinterlandterminal mit einer 29fach segmentierten, bidirektionalen Containerseilbahn mit zwei Strängen im Pendelbetrieb oder einem brückenbasierten System mit 38 automatisierten VC oder 52 AGV oder elf automatisiert fahrenden MTT vorgeschlagen werden. Die theoretisch mögliche Leistung der Systeme liegt maximal 3 Prozent höher (AMTT), als die geforderte Leistung.

	Beschreibung				
segm. Seilbahn	vMAX	12	m/s	Berechnungen zur Seilbahn	<i>Bidirektionale Luftseilbahn mit 2 Strängen, segmentiert in 29 gleichgroße Segmente à 1138 Meter</i>
	theor. mgl. Leistung	30,3	C/h	Berechnungen zur Seilbahn	
	Segmente	29	Stk.	Berechnungen zur Seilbahn	
	Empfohlenes Seilbahnsystem: bidirektional, 2 Stränge				
AVC	vMAX	8,3	m/s	Berechnungen zu VC	<i>AVC System mit 38 Fahrzeugen, über eine Brücke fahrend</i>
	theor. mgl. Leistung	30,6	C/h	Berechnungen zu VC	
	Empfohlenes VC-System: Bidirektional befahrene Strecke 38 Fahrzeuge				
AGV	vMAX	6	m/s	Berechnungen zu AGV	<i>AGV System mit 52 Fahrzeugen, über eine Brücke fahrend</i>
	theor. mgl. Leistung	30,5	C/h	Berechnungen zu AGV	
	Empfohlenes ARV-System: Bidirektional befahrene Strecke 52 Fahrzeuge				
AMTT	vMAX	9,7	m/s	Berechnungen zu MTT	<i>AMTT System mit 11 Fahrzeugen, über eine Brücke fahrend</i>
	theor. mgl. Leistung	30,9	C/h	Berechnungen zu MTT	
	Empfohlenes MTT-System: Bidirektional befahrene Strecke 11 Fahrzeuge				

Abbildung 105: Analyseergebnis Szenario 5

6.3 Sensitivitätsanalyse

Durch die Sensitivitätsanalyse erfolgt eine quantitative Analyse der mit Unsicherheiten behafteten Parameter der Falluntersuchungen. Die Analyse testet die Einflussnahme (Sensitivität) der Parameter auf das Endergebnis. Aus diesem Ergebnis kann die Stabilität des Analysetools mit Blick auf die möglichen positiven und negativen Einflüsse der Parametervariation abgeleitet werden. Somit ist die Sensitivitätsanalyse ein geeignetes Verfahren, zur Bewertung der Einflussnahme von Parametervariationen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde jeweils eine Variation der Arbeitsweise (uni-/bidirektional) sowie eine Anpassung des Ausgangswerts der „Leistung“ und „lichten Höhe“ um +/- 20 Prozent und +/- 50 Prozent vorgenommen. Zudem wurde die Überlagerung der Parametervariation untersucht und Rückschlüsse zur Elastizität der Systeme mit Blick auf eine Skalierbarkeit gezogen. Die Ergebnistabellen sind im Anhang zu finden.

6.3.1 Sensitivitätsanalyse für Szenario 1

In der nachfolgenden Tabelle sind die Basisspezifikation gemäß der Analyse in Kapitel 6.2.3 sowie die ermittelten maximalen Leistungen der Systeme im unidirektionalen Betrieb dargestellt. Demnach muss die Systemspezifikation für eine Containerseilbahn 2 bidirektional Stränge aufweisen. Für ein brückenbasiertes System würden unter Beachtung der Basisspezifikation 3 AVC oder 4 AGV oder 1 AMTT eingesetzt werden. Unter Verwendung derselben Systeme wäre eine maximale Leistung in eine Richtung von 24 Containern pro Stunde mit der Containerseilbahn,

18 Containern pro Stunde mit den AVC, 19,2 Containern pro Stunde mit den AGV oder 19,8 Containern pro Stunde mit dem AMTT-System möglich.

<i>Szenario 1</i>	Kategorie: A Gewünschte Leistung: unbekannt → Annahme: 30 Container / h Länge der Bahn: 300 Meter Gewünschte lichte Höhe: unbekannt → Annahme: h = 15m Arbeitsweise: bidirektional		
	<i>Basisspezifikation</i>	<i>Theor. bidirektionale Gesamtleistung [C/h]</i>	<i>Maximale Leistung in eine Richtung [C/h]</i>
CSB	<i>2 Stränge</i>	<i>39</i>	<i>24</i>
AVC	<i>3 Fahrzeuge</i>	<i>31</i>	<i>18</i>
AGV	<i>4 Fahrzeuge</i>	<i>33,2</i>	<i>19,2</i>
AMTT	<i>1 Fahrzeug</i>	<i>33,5</i>	<i>19,8</i>

Tabelle 28: Szenario 1 - Basisspezifikation

Die Effekte ihrer Parametervariation und einer Überlagerung der Parametervariation sind für die *Containerseilbahn* (Szenario 1) in Tabelle 34 zusammengefasst. Demnach ergibt sich insbesondere für die Variation des Leistungsparameters eine Anpassung des Ergebnisses: unabhängig der Variation der lichten Höhe muss bei einer um 50 Prozent höheren Leistung eine segmentierte Containerseilbahn angewendet werden, bei einer Reduktion um 50 Prozent reicht eine einsträngige Seilbahn aus. Die Überlagerung der Erhöhung beider Parameter um 50 Prozent führt in Abweichung zum Basissystem ebenfalls zu einer segmentierten Seilbahn. In 11 der untersuchten 24 Fälle musste eine Systemänderung auf Grund der Parametervariation vorgenommen werden.

Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das *AVC-System* (Szenario 1) sind in Tabelle 35 dargestellt. Demnach ergibt sich für 17 der 24 untersuchten Fälle eine Anpassung der Systemgestaltung zur Erreichung der gewünschten Leistung. Insbesondere eine Erhöhung der Werte ist stark einflussgebend; bei gleichzeitiger Erhöhung um 50 Prozent muss die Anzahl genutzter Fahrzeuge verdoppelt werden. Die maximale Reduktion bei der Überlagerung der Parametervariation liegt bei 33% des Ausgangswertes, die maximale Erhöhung bei 100%. Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das in Szenario 1 definierte *AGV-System* ergibt eine Anpassung von bis zu 75% (+3 Fahrzeuge) und -50% (2 Fahrzeuge) gegenüber der Basisspezifikation (siehe Tabelle 36). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das *AMTT-System* zeigt geringgradige Anpassungen (siehe Tabelle 37); hierbei ist zu beachten, dass das System nicht mit weniger als einem Fahrzeug ausgestaltet werden kann und die Systemgestaltung für alle geringeren Parametervariationen somit gleich ist. Für eine gleichzeitige Erhöhung der Leistungsparameter und der lichten Höhe ergibt sich ein Bedarfsanstieg von einem zusätzlichen Fahrzeug.

6.3.2 Sensitivitätsanalyse für Szenario 2

Die Basisspezifikation für das zweite Szenario entsprechend der Analyse in Kapitel 6.2.3 sowie die maximalen Leistungen der Systeme im unidirektionalen Betrieb sind in Tabelle 29 dargestellt. Demnach muss die Systemspezifikation für eine Containerseilbahn 2 bidirektional Stränge aufweisen. Ein brückenbasiertes System kann auf Grund der Einsatzklasse nicht sinnvoll eingesetzt werden. Unter Verwendung derselben Systeme wäre eine maximale Leistung in eine Richtung von 8,9 Containern pro Stunde mit der Containerseilbahnmöglich.

<i>Szenario 2</i>	Kategorie: B3 Gewünschte Leistung: unbekannt → Annahme: 15 Container / h Länge der Bahn: 3100 Meter Gewünschte lichte Höhe: unbekannt → Annahme: h = 35m Arbeitsweise: bidirektional		
	<i>Basisspezifikation</i>	<i>Theor. bidirektionale Gesamtleistung [C/h]</i>	<i>Maximale Leistung in eine Richtung [C/h]</i>
CSB	<i>2 Stränge</i>	<i>16,4</i>	<i>8,9</i>
AVC	<i>Nicht möglich</i>		
AGV	<i>Nicht möglich</i>		
AMTT	<i>Nicht möglich</i>		

Tabelle 29: Szenario 2 - Basisspezifikation

Die Effekte der Parametervariation und einer Überlagerung der Parametervariation zeigen für die Containerseilbahn insbesondere für die Variation des Leistungsparameters eine Anpassung des Ergebnisses: unabhängig der Variation der lichten Höhe muss bereits bei einer um 25 Prozent höheren Leistung eine segmentierte Containerseilbahn angewendet werden, bei einer Reduktion um 50 Prozent reicht eine einsträngige Seilbahn aus (siehe Tabelle 34).

6.3.3 Sensitivitätsanalyse für Szenario 3

In Tabelle 30 sind die Basisspezifikation gemäß der Analyse in Kapitel 6.2.3 sowie die ermittelten maximalen Leistungen der Systeme im unidirektionalen Betrieb dargestellt. Demnach muss die Systemspezifikation für eine Containerseilbahn eine gleichmäßig segmentierte zweigleisige Strecke aufweisen. Jedes Segment ist dabei 750 Meter lang. Für ein brückenbasiertes System würden unter Beachtung der Basisspezifikation acht AVC oder elf AGV oder drei MTT eingesetzt werden. Unter Verwendung derselben Systeme wäre eine maximale Leistung in eine Richtung von 21 Containern pro Stunde mit der Containerseilbahn, etwas mehr als 10 Containern pro Stunde mit den AVC und AGV oder knapp 14 Containern pro Stunde mit dem AMTT-System möglich.

Szenario 3	Kategorie: B2 Gewünschte Leistung: unbekannt → Annahme: 20 Container / h Länge der Bahn: 1.500 Meter Gewünschte lichte Höhe: unbekannt → Annahme: h = 90m Arbeitsweise: bidirektional			
	<i>Basisspezifikation</i>	<i>Theor. bidirektionale Gesamtleistung [C/h]</i>	<i>Maximale Leistung in eine Richtung [C/h]</i>	
	CSB	2 Segm., 2 Stränge	35,1	21,1
	AVC	8 Fahrzeuge	20,6	10,6
	AGV	11 Fahrzeuge	21	10,9
AMTT	3 Fahrzeug	26,6	13,9	

Tabelle 30: Szenario 3 - Basisspezifikation

Die Effekte ihrer Parametervariation und einer Überlagerung der Parametervariation zeigen für die *Containerseilbahn* (Szenario 3), dass alle Erhöhungen der Parameter mit selben Technologie erreicht werden können. Für geringere Leistungen kann auch eine unsegmentierte oder, für geringere lichte Höhen, eine einsträngige Bahn eingesetzt werden (siehe Tabelle 34). Die Ergebnisse der Parametervariation und Überlagerung der Parametervariation für das *AVC-System* weichen in 22 von 24 untersuchten Fällen von den Basiswerten ab. Es ergibt sich eine Verringerung der nötigen Fahrzeuge um bis zu fünf (63 %) und mehr als eine Verdoppelung des Bedarfs auf 17 Fahrzeuge (113 %) bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsbedarfe und der zu überquerenden lichten Höhe um 50 Prozent (siehe Tabelle 40). Ebenso werden für das für Szenario 3 definierte *AGV-System* in 22 der 24 untersuchten Fälle Anpassungen nötig. Es ergibt sich ein maximaler Anpassungsbedarf von 11 Fahrzeugen (Verdoppelung) und eine maximale Reduktion um 7 Fahrzeuge (64 %) gegenüber der Basisspezifikation (siehe Tabelle 36). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das *AMTT-System* zeigt den Bedarf einer Systemanpassung in 17 Fällen (siehe Tabelle 42). Diese variiert zwischen einer Verringerung um 2 Fahrzeuge auf 1 Fahrzeug und der Erhöhung um 2 Fahrzeuge auf 5 Fahrzeuge (je 67 % vom Basiswert).

6.3.4 Sensitivitätsanalyse für Szenario 4

Tabelle 31 zeigt die Basisspezifikation gemäß der Analyse in Kapitel 6.2.3 sowie die ermittelten maximalen Leistungen der Systeme im unidirektionalen Betrieb. Demnach muss die Systemspezifikation für eine Containerseilbahn eine gleichmäßig segmentierte zweigleisige Strecke aufweisen. Jedes Segment ist dabei 350 Meter lang. Für ein brückenbasiertes System würden unter Beachtung der Basisspezifikation 15 AVC oder 20 AGV oder fünf MTT eingesetzt werden. Unter Verwendung derselben Systeme wäre eine maximale Leistung in eine Richtung von 26,3 Containern pro Stunde mit der Containerseilbahn, etwas mehr als 21 Containern pro Stunde mit den AVC und AGV oder knapp 25 Containern pro Stunde mit dem AMTT-System möglich.

<i>Szenario 4</i>	Kategorie: B2 Gewünschte Leistung: unbekannt → Annahme: 40 Container / h Länge der Bahn: 700 Meter Gewünschte lichte Höhe: unbekannt → Annahme: h = 90m Arbeitsweise: bidirektional		
	<i>Basisspezifikation</i>	<i>Theor. bidirektionale Gesamtleistung [C/h]</i>	<i>Maximale Leistung in eine Richtung [C/h]</i>
CSB	<i>2 Segm., 2 Stränge</i>	<i>41,9</i>	<i>26,3</i>
AVC	<i>15 Fahrzeuge</i>	<i>41,5</i>	<i>21,6</i>
AGV	<i>20 Fahrzeuge</i>	<i>41,1</i>	<i>21,3</i>
AMTT	<i>5 Fahrzeug</i>	<i>47,5</i>	<i>24,8</i>

Tabelle 31: Szenario 4 - Basisspezifikation

Die Effekte ihrer Parametervariation und einer Überlagerung der Parametervariation zeigen für die *Containerseilbahn* einen Anpassungsbedarf in 15 der 24 Fälle. Für eine Vergrößerung der Leistungen gibt es keine sinnvolle technische Lösung, mit der diese Leistungen mit einer Seilbahn im Pendelbetrieb erreicht werden können. Für eine Reduktion der Leistung um 50% kann eine unsegmentierte eingesetzt werden (siehe Tabelle 43). Die Parametervariation und die Überlagerung der Parametervariation für das für Szenario 4 definierte *AVC-System* muss in 23 der 24 untersuchten Fälle angepasst werden. Dabei kommt es zu einer Reduktion um bis zu 10 Fahrzeuge (67 %) und einer Erhöhung des Bedarfs um bis zu 107% (16 Fahrzeuge) bei gleichzeitiger Steigerung der geforderten Leistung und der lichten Höhe um jeweils 50% (siehe Tabelle 44). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das in Szenario 4 definierte *AGV-System* führt zu einem Anpassungsbedarf in 23 von 24 Fällen (siehe Tabelle 45). Die maximale Reduktion beläuft sich auf 14 Fahrzeuge (70 %), die maximale Bedarfserhöhung auf 22 Fahrzeuge (110%). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das *AMTT-System* zeigt eine Anpassung in 22 der 24 Untersuchungsfälle (siehe Tabelle 46). Die Anpassung des Systems variiert zwischen einer Verringerung um 3 Fahrzeuge auf 2 Fahrzeuge (60 %) und einer Erhöhung um 4 Fahrzeuge auf 9 Fahrzeuge (80 %).

6.3.5 Sensitivitätsanalyse für Szenario 5

Die Basisspezifikation für das fünfte Szenario entsprechend der Analyse in Kapitel 6.2.3 sowie die maximalen Leistungen der Systeme im unidirektionalen Betrieb sind in Tabelle 32 dargestellt. Demnach muss die Systemspezifikation für eine Containerseilbahn 2 bidirektional Stränge und 29 Segmente aufweisen um die gewünschte Leistung zu erreichen. Für brückenbasierte Systeme kann ein AVC-System mit 38 Fahrzeugen, ein AGV-System mit 52 Fahrzeugen oder ein AMTT-System mit 11 Fahrzeugen die Leistung erreichen. Unter Verwendung derselben Systeme wäre eine maximale Leistung in eine Richtung von 17,8 Containern pro Stunde mit der Containerseilbahn möglich, das AVC-System würde 12,2 Container erreichen und das AGV- und AMTT-System jeweils ungefähr 15,5 Container pro Stunde.

Szenario 5	Kategorie: C		
	Gewünschte Leistung: unbekannt → Annahme: 30 Container / h		
	Länge der Bahn: 33.000 Meter		
	Gewünschte lichte Höhe: unbekannt → Annahme: h = 30m		
	Arbeitsweise: bidirektional		
	<i>Basisspezifikation</i>	<i>Theor. bidirektionale Gesamtleistung [C/h]</i>	<i>Maximale Leistung in eine Richtung [C/h]</i>
CSB	<i>2 Stränge, 29 Seg.</i>	<i>30,3</i>	<i>17,8</i>
AVC	<i>38 Fahrzeuge</i>	<i>30,6</i>	<i>12,2</i>
AGV	<i>52 Fahrzeuge</i>	<i>30,5</i>	<i>15,4</i>
AMTT	<i>11 Fahrzeuge</i>	<i>30,9</i>	<i>15,6</i>

Tabelle 32: Szenario 5 – Basisspezifikation

Auf Grund der langen Streckenlänge ist für die *Containerseilbahn* bei einer Erhöhung der gewünschten Leistung keine sinnvolle Systemanpassung über eine weitere Segmentierung erreichbar. Eine Reduktion der Leistung hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die notwendige Segmentierung: bei einer Halbierung der gewünschten Leistung kann die Segmentzahl um knapp 70 % auf 9 erforderliche Segmente reduziert werden (siehe Tabelle 47). Die Variation der lichten Höhe hat keinen Einfluss auf die Systemgestaltung. Für das *AVC-System* liefert die Parametervariation und Überlagerung der Parametervariation eine mögliche Reduktion der Fahrzeuge um 53% und eine Erhöhung des Bedarfs um 55% (siehe Tabelle 48). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das in Szenario 5 definierte *AGV-System* führt zu einem Anpassungsbedarf in allen Fällen (siehe Tabelle 49). Die maximale Reduktion beläuft sich um 27 auf 25 Fahrzeuge (52 %), die maximale Bedarfserhöhung um 29 auf 81 Fahrzeuge (56%). Das Ergebnis der Parametervariation und der Überlagerung der Parametervariation für das *AMTT-System* zeigt eine Anpassung in 21 der 24 Untersuchungsfälle (siehe Tabelle 50). Die Anpassung des Systems variiert zwischen einer Verringerung um 5 Fahrzeuge auf 6 Fahrzeuge (45 %) und einer Erhöhung um 6 Fahrzeuge auf 17 Fahrzeuge (55 %).

6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass der Einfluss der Variation der Leistung größer auf das Ergebnis ist, als der Einfluss der Variation der lichten Höhe. Dieser Effekt ist insbesondere bei langer Streckenlänge groß. Für die *Containerseilbahn* ist ein sehr geringer Einfluss der Variation der lichten Höhe auf das Analyseergebnis festzustellen. Die Zahl der Anpassungen bezogen auf die Untersuchungsfälle gibt einen Rückschluss auf die Anpassungsfähigkeit des Systems bei veränderten Rahmenbedingungen (vgl. Anforderungen in Kapitel 2.2). Die *Containerseilbahn* weist die geringste Änderungszahl auf und ist damit sehr träge in ihrer Anpassungsfähigkeit. Dies liegt darin begründet, dass das System über jeweils genau eine Transporteinheit je Strang verfügt und die Transportmenge je Gesamtstrecke nur durch eine Segmentierung erhöht werden kann. Das *Multitrailer-System* ist das zweitträgsteste System, da je Transporteinheit bis zu 6 Container (3 TEU) transportiert werden können. Hierdurch ergeben

sich größere Leistungsbereiche, als bei den Systemen, die jeweils einen Container pro Fahrzeug transportieren.

6.4 Bewertung der Ergebnisse der Fallbeispieluntersuchung

Das Analysetool konnte für alle Fallbeispiele angewendet werden und zeigte für die Variation der Eingangsparameter entsprechend angepasste Ergebnisse. Die *spezifischen Kennzahlen* der Technologien zu ihrer Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeit haben insbesondere bei langen Streckenlängen einen großen Einfluss (vgl. AGV und AVC System). Für die Variation der Arbeitsweise ist festzustellen, dass der Output einer Seite sich durch den Wegfall der Be- und Entladezeiten beim Rücktransport der Transporteinheit gegenüber dem bidirektionalen Transport optimieren lässt. Dieser Effekt kommt insbesondere dem Einsatz bei Transportpeaks zugute. Systeme mit gekoppelten Strängen können von diesem Effekt nicht in gleicher Weise profitieren.

Zur *Anpassung an geringere Transportmengen* gegenüber der Basisleistung kann die Maximalgeschwindigkeit der automatischen konventionellen Containertransportsysteme reduziert werden oder es können entsprechend weniger Fahrzeuge eingesetzt werden. Auch das Containerseilbahnsystem kann über eine Reduktion der Maximalgeschwindigkeit eine Anpassung an geringere Leistungserfordernisse erreichen; dies führt bei der Containerseilbahn zu einer deutlichen geringeren Betriebsmittelanforderung und somit zu einer signifikanten Nutzungskostenminimierung. Demgegenüber kann mit der Containerseilbahn keine einfache *Anpassung an höhere Leistungen* erreicht werden, wenn die Basisleistung bereits an der maximalen Leistungsgrenze des Systems liegt. Für die automatischen konventionellen Containertransportsysteme kann hingegen mittels zusätzlicher Fahrzeuge eine einfache Anpassung erreicht werden. Zusammenfassend ist demnach festzustellen, dass eine Containerseilbahn insbesondere dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn die theoretische Leistung der Anlage deutlich über der Basisleistung liegt, so dass das System zumeist mit reduzierter Geschwindigkeit läuft und im Falle der Abarbeitung von einem erhöhten Transprotaufkommen (Peak) die tatsächliche Leistungsfähigkeit ausgenutzt wird.

Nachfolgend wird das qualitative Analyseergebnis der Nutzwertanalyse in Bezug auf das untersuchte Szenario 1 dargelegt. Zur Bewertung werden die technischen Bewertungsparameter TRL, Flächenbedarf Trasse sowie Flächenbedarf Terminal herangezogen. Unter Berücksichtigung von Tabelle 14 ist der Containerseilbahn der Technologiereifegradlevel TRL = 6 zugeordnet, AVCs und AMTTs der TRL = 7 und AGVs der TRL = 9. Somit werden die Containerseilbahn mit vier Punkten und die automatischen konventionellen Containertransportsysteme mit fünf Punkten bewertet. Unter Berücksichtigung der Ausführungen zu den Flächenbedarfen in Kapitel 4.3.1 und Tabelle 15 wird die Containerseilbahn, die über Pylonen trassiert, mit drei Punkten bewertet und die, unter Verwendung einer Brücke trassierten, automatischen konventionellen Containertransportsysteme mit einem Punkt. Der Flächenbedarf auf dem Terminal ist für die automatischen konventionellen Containertransportsysteme größer, da sie geringe Steigraten überwinden können und die Brückenauffahrt entsprechend lang ist. Diese Systeme werden mit 2 Punkten bewertet, die Containerseilbahn, für die eine größere Steigrate vorgesehen werden kann, mit 4 Punkten. Die betriebswirtschaftliche Bewertung erfolgt auf Grund der geringen Datenbasis zu den Investitions- sowie Nutzungs- und Instandhaltungskosten pauschaliert anhand der Komplexität

des jeweiligen Systems. Das Ergebnis umfasst somit jeweils eine Technologieempfehlung für die, unter Anwendung des entwickelten Analysetools und unter Beachtung des spezifischen Szenarios und der technologischen und unternehmensspezifischen Bewertungsparameter, vorzuziehende Technologie.

Für Szenario 1 stellen sich die Parameter zur Szenariobeschreibung wie folgt dar: Kategorie: A, Gewünschte Leistung: 30 Container / h, Länge der Bahn: 300 Meter, Gewünschte lichte Höhe: $h = 15\text{m}$. Das Ergebnis der Technologieauslegung ist in Tabelle 28 dargestellt und empfiehlt eine Containerseilbahn mit zwei Strängen oder ein AVC-System mit drei Fahrzeugen oder ein AGV-System mit vier Fahrzeugen oder den Einsatz eines AMTT, bestehend aus einer Zugmaschine mit sechs Anhängern. Für die automatischen konventionellen Containertransportfahrzeuge muss jeweils die Installation eines Brückenbauwerks mitberücksichtigt werden, bei der Containerseilbahn die Installation der entsprechenden Übergabestationen und Pylonen. Somit ist den Systemen, unter Berücksichtigung von Tabelle 16 und unter Beachtung der beschriebenen Komplexität des Installationsaufwandes und der Systeme folgende Bewertung zuzuordnen. Die Investitionskosten für die Containerseilbahn sind höher als die der anderen Systeme und werden somit mit 3 Punkten bewertet. Die Investitionskosten für das AVC-System und das AGV-System sind annähernd gleich und werden mit 4 Punkten bewertet und die Investitionskosten für das AMTT-System werden mit 5 Punkten bewertet. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden für das Seilbahnsystem und das AMTT-System mit vier Punkten bewertet und für das AVC-System und das AGV-System mit drei Punkten, da diese Systeme wartungsintensiver sind. Zur Bewertung der Verkehrsvermeidung wird unter Beachtung der Peak-Leistung (vgl. Kapitel 4.4.1) die maximal mögliche Leistung des bidirektionalen Transports bewertet. Somit wird die Containerseilbahn mit vier Punkten bewertet, da sie bis zu 9 Container mehr als gefordert transportieren kann. Das AGV-System und das AMTT-System werden jeweils mit zwei Punkten bewertet und das AVC-System mit einem Punkt.

Unter Verwendung der exemplarischen Gewichtung der Bewertungsfaktoren des Fallbeispiels „Seehafenbetreiber X“ und somit unter Beachtung der Tabelle 26 ergibt sich das Ergebnis der Nutzwertanalyse wie folgt:

	<i>Gewichtung</i>	<i>Container- luftseilbahn</i>		<i>AVC</i>		<i>AGV</i>		<i>AMTT</i>	
		<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>	<i>Bewertung</i>	<i>Wert</i>
<i>Investitionskosten</i>	26,67%	3	0,80	4	1,07	4	1,07	5	1,33
<i>Nutzungs- und Instandhaltungskosten</i>	20,00%	3	0,60	4	0,80	4	0,80	5	1,00
<i>Technologiereife</i>	13,33%	4	0,53	5	0,67	5	0,67	5	0,67
<i>Flächenbedarf, Terminal</i>	13,33%	4	0,53	2	0,27	2	0,27	2	0,27
<i>Flächenbedarf, Trasse</i>	6,67%	3	0,20	1	0,07	1	0,07	1	0,07
<i>Verkehrsvermeidung</i>	20,00%	4	0,80	1	0,20	2	0,40	2	0,40
	Summe	2	3,5	4	3,1	3	3,3	1	3,7

Tabelle 33: Bewertungsergebnis für Szenario 1

Dem zufolge ist das Ergebnis der fiktiven Bewertung, dass für das in Szenario 1 beschriebene Szenario und unter Beachtung der Bewertungsfaktoren des fiktiven Fallbeispiels „Seehafenbetreiber X“ das AMTT-System gegenüber dem Seilbahnsystem vorzuziehen ist. Insbesondere die geringen Investitionskosten des AMTT-Systems sind ausschlaggebend für das Ergebnis. Das AVC-System und das AGV-System können auf Grund der großen Flächenbedarfe für dieses Szenario eher nicht als passend empfohlen werden.

7. Diskussion der Ergebnisse

7.1 Zusammenfassung der Untersuchungen

Die Nutzung eines flurfreien Containertransportsystems zur flurfreien Auslagerung von Lager- und Transportprozessen aus dem Seehafengebiet ist unter den in Kapitel 2.2 beschriebenen Trends und Gegebenheiten zukunftsweisend. Mit den im Kapitel 3.2 beschriebenen Technologien kann ein flurfreier Transport von Containern grundsätzlich gewährleistet werden. Die im Kapitel 4 beschriebene Systematik führt zu einem komparativen Technologievergleich vor dem Hintergrund spezifischer Anwendungsszenarios und unternehmerischer Kennwerte. Anhand einer exemplarischen Metrisierung wurde im 5. Kapitel das Vorgehen zur technologiekonkreten Metrisierung dargelegt und im Kapitel 6 eine exemplarische Implementierung und Anwendung auf Fallbeispiele vorgenommen.

Die initiale Suche nach Technologien für einen flurfreien Containertransport wurde anhand einer Variation der *Merkmalsausprägungen* Transportebene, Fahrwegausgestaltung und Antriebsort vorgenommen. Diese Unterscheidung hat sich als dienlich erwiesen und führte zu einem weit gefächerten Untersuchungsergebnis, welches eine größere Vielfalt aufzeigt, als die bisherigen Zusammenführungen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. In der nachfolgenden *Konzeption der komparativen Untersuchungssystematik* konnten mittels QFD-Methode reale Anforderungen eines potentiellen Anwenders für ein flurfreies Containertransportsystem aufgegriffen werden, so dass für die entwickelte Analysesystematik eine hohe Anwendungsorientiertheit erreicht werden konnte. Die technologiespezifische Festlegung und Definition der geltenden Parameter ist insbesondere vor dem Hintergrund des geringen Entwicklungsstands der meisten Technologien sehr erschwert und wurde daher in Teilen nur exemplarisch vorgenommen. Ebenso konnten keine allgemeingültigen Festlegungen für die Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten der Technologien getroffen werden, da diese sehr stark von den örtlichen Spezifika und Lieferanten abhängen. Die Reduktion der Bewertung der technischen Machbarkeit ist im Themenfeld der „Technischen Logistik“ durchaus gängig aber mit Blick auf die Anwendungsorientiertheit häufig nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde die Systematik für beide Bereiche, technologie- sowie unternehmensspezifisch und betriebswirtschaftlich, beschrieben.

Die *exemplarische Metrisierung* der ausgewählten Technologien enthält mit den festgelegten technischen Kennzahlen vielfältige Anpassungsmöglichkeiten auf die tatsächlich im konkreten Untersuchungsfall zu vergleichenden Technologien. Hierzu zählen folgende Kennwerte: maximale Steigfähigkeit, Maximalgeschwindigkeit bei maximaler Steigung, Beschleunigungs- und Verzögerungsfaktoren, Maximalgeschwindigkeit, Be- und Entladezeiten. Auf Grund der Formelbasiertheit der Metrisierung, kann die Anpassung entsprechend einfach vorgenommen werden. Da die Höhe der Faktoren in die Gesamtperformance der Systeme eingeht, sollte in anschließenden Betrachtungen überprüft werden, wo die maximal möglichen Leistungsparameter der Systeme liegen und Grenzwerte untersucht werden. Hierauf sollte das Analysetool entsprechend angepasst werden.

Zur besseren *Verknüpfung der technischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung* des Einsatzes von flurfreien Containertransportsystemen wären konkrete Festlegungen der

durchschnittlichen Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten für die untersuchten Technologien sinnvoll. Zudem müsste eine konkretere Untersuchung der *Abhängigkeiten der Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten von den Gestaltungsvarianten* erfolgen, deren Ergebnisse zur Optimierung des Analysetools in dieses integriert werden könnten. Nach den bisherigen Erkenntnissen ist anzunehmen, dass der Einsatz einer leicht überdimensionierten Containerseilbahn wirtschaftlich günstiger sein kann, als ein alternatives flurfreies System. Dabei würde das Seilbahnsystem ohne weitere Investitionen gut auf Peaks reagieren könnten und würde damit große Optimierungspotentiale eröffnen.

7.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Der *Übertragbarkeit des entwickelten Analysetools auf andere Untersuchungsfälle* wurde bereits bei seiner Entwicklung Beachtung beigemessen. Die im Rahmen der Arbeit definierten Klassen, denen konkrete Untersuchungsfälle zuzuordnen sein sollen und auf denen die Untersuchungen der Einsetzbarkeit der Systemvarianten einer Containerseilbahn und der AKCTS basieren, umfassen Einsatzszenarien mit einer Streckenlänge von 10 m bis zu 100 km (vgl. Tabelle 10). In diesem Bereich ist im Analysetool zudem die Unterscheidung von Szenarien vorgesehen, die insbesondere die Unterschiedlichkeit der Topologie des zu überwegenden Bereichs betreffend in infrastrukturelle, hydrographische sowie geomorphologische Hindernisse unterscheiden werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Die Übertragbarkeit des Analysetools zur Ersteinschätzung der Einsetzbarkeit eines flurfreien Containertransportsystems an anderen Orten als dem in der QFD-Analyse betrachteten Fallbeispiel ist somit gegeben.

Eine *Ausweitung des Betrachtungsbereiches des Analysetools im selben Technologiebereich* würde für die Bewertung der Containerseilbahn eine Erweiterung des Tools um die für den vorliegenden Fall einer Containerseilbahn ausgeschlossenen Seilbahnvarianten (bspw. mit kuppelbaren Klemmen etc.) erforderlich machen. Hierfür müsste erforscht werden, welche Parameter ergänzend zu den in dieser Arbeit betrachteten bei der Bewertung der Seilbahnvarianten im Hinblick auf konkrete Anwendungsfälle relevant sind (bspw. Traglastbereiche); diese müssten variantenspezifisch definiert und schlussendlich ein Analysetool in Anlehnung an die Logik des in dieser Arbeit entwickelten Tools abgeleitet werden. Insbesondere die Bewertung von Potentialen für den Einsatz von Personenseilbahnen im urbanen Raum würde eine derartige Ausweitung des Analysetools zu Gute kommen. Dann wäre eine unabhängige Bewertung der Möglichkeiten und Potentiale möglich. Für die Integration weiterer automatischer konventioneller Containertransportsysteme wäre eine relativ einfache Anpassung der Metrisierung vorzunehmen.

Die *Ausweitung des Betrachtungsbereiches des Analysetools auf andere Technologien* (gemäß Kapitel 3.2) würde ebenfalls die technologiespezifische Überprüfung und Definition der beschriebenen Parameter erforderlich machen. Die Implementierung weiterer Technologien und die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie die hierauf basierende, unternehmensspezifische Extraktion eines allgemeingültigen, technologieübergreifenden Analysetools, welches eine kontextspezifische, generelle Systemempfehlung für den flurfreien Containertransport ermöglicht, ist ein geeignetes Instrument zur Einschätzung von Möglichkeiten der Expansion von Seehafenflächen. Für jede weitere, in das Bewertungstool zu integrierende Technologie müssen,

insofern nicht in Kapitel 4 bereits erfolgt, folgende Parameter aufgestellt und in das Tool integriert werden:

- Einsetzbarkeit in Bezug auf die im Kapitel beschriebenen Klassen
- Definition systemspezifischer Ausgestaltungsvarianten
- Festlegung technologiespezifischer Kennzahlen
- Festlegung der formelbasierten Leistungsberechnung
- Einfluss unternehmensspezifischer Kennzahlen

7.3 Auswirkungen der Arbeit

Die Installation eines automatischen und flurfreien Containertransportsystems zur Entlastung der Seehäfen ist bis dato noch nicht erfolgt. Nichts desto trotz hält die Installation einer derartigen Anlage durchaus viele Potentiale bereit, die gehoben werden könnten. Aus *unternehmerischer Sicht* kann ein vollautomatischer Transport von Containern und damit die Erfüllung einer konkreten Transportaufgabe durch dieses System, abhängig von den konkreten Betriebs- und Investitionskosten, sinnvoll sein, da so ein kontinuierlicher Materialfluss generiert werden kann und durch eine passende Auslegung des Systems Peaks abgefangen werden könnten. Die Investitionskosten würden sich bei einem verbreiteteren Einsatz von flurfreien Containertransportsystemen reduzieren, da die Entwicklungskosten etc. auf eine breitere Basis verteilt würden. Grundsätzlich ist ein Anstieg des Einsatzes automatisierter Lösungen zu erwarten: Treiber für den Einsatz automatisierter Lösungen im Bereich der technischen Logistik ist unter anderem auch der immer stärker auftretende *Fachkräftemangel*. Neben den genannten Vorteilen wäre auch eine *infrastrukturelle Entlastung* (Verkehrsvermeidung) ein wichtiges Potential von allgemeinem Interesse, welches durch den Einsatz von derartigen Systemen zur Anbindung von seehafennahen Flächen gehoben werden könnte. Durch diese kann eine bisher nicht genutzte Infrastrukturebene eröffnet und nutzbar gemacht werden. Zudem werden die vorhandenen Strukturen entlastet und *Nachhaltigkeitsaspekte*, wie bspw. eine reduzierte Umweltbelastung, getroffen. Das *Fehlen von Referenzanlagen* erschwert die Durchsetzung der Technologien zum Transport von Containern, da nicht auf Erfahrungsberichte, Best Practices etc. zurückgegriffen werden kann. Auch Herstellerseitig fehlt derartig spezialisierte Expertise, obgleich es wahrscheinlich ist, dass am Markt etablierte Unternehmen in den Bereichen Seilbahnen bzw. Containertransportsysteme in der Lage wären derartige Systeme bereitzustellen.

Die vorliegende Arbeit setzt sich erstmalig eingehend mit den Möglichkeiten des Einsatzes eines flurfreien Containertransportsystems sowie passender Konzepte und Technologien auseinander. Durch die vorliegende Arbeit konnten allgemeingültige Szenario- und Systemspezifika definiert sowie deren Ausprägungen beschrieben werden, die für derartige Betrachtungen fortan angewendet werden können. Zudem wurde eine Systematik entwickelt, anhand derer eine szenariospezifische Bewertung von Technologien zum flurfreien Containertransport erfolgen kann. Die exemplarische Metrisierung sowie Implementierung hat zu einem Analysetool geführt, anhand dessen die technologiespezifische Ausgestaltung automatisiert ermittelt werden kann.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand und Ziel dieser Arbeit war es, eine Analysesystematik zu entwerfen und umzusetzen, die der Bewertung des seehafenbezogenen, flurfreien Transports von Containern dient. Die Konzeption erfolgte ausgehend von einer einleitenden Untersuchung der Trends und Treiber für den Untersuchungsgegenstand. Die zunehmende Notwendigkeit der Expansion von Terminallagerflächen wurde in diesem Sinnzusammenhang anhand verschiedener Trends in der maritimen Logistik nachgewiesen: sowohl die generelle Zunahme der Mengen weltweit containerisiert über den Seeweg transportierten Güter als auch die Schiffsgrößenentwicklung und der Bedarf einer Modalitätenentkopplung durch die Lagerung von Containern in Seehafennähe wirken sich hierauf aus. Dem gegenüber ist eine Expansion von Terminalflächen oftmals auf Grund infrastruktureller oder geographischer Hindernisse nicht möglich.

Eine methodische Suche und Analyse grundsätzlich in Frage kommender Systeme (Forschungsfrage 1) zum flurfreien Containertransport machte deutlich, dass die Informationslage und der Entwicklungsstatus teilweise sehr rudimentär ist: es wurden 20 unterschiedliche Technologien ermittelt, die für einen flurfreien Containertransport eingesetzt werden können, wobei 15 der identifizierten Technologien überirdisch und fünf unterirdisch verlaufen. Die meisten der 20 identifizierten Technologien verfügen über eine feste Fahrwegsausgestaltung und einen lokalen Antriebsort. Die größte Variantenvielfalt bietet die Variationsmöglichkeit eines überirdischen Transports auf einem festen Fahrweg und einem lokalen Antrieb.

Zur Bewertung der Einsetzbarkeit wurde auf Basis der Ableitung von Anforderungen aus einem konkreten Fallbeispiel eine komparative und metrisierende Analysesystematik (Forschungsfrage 3) konzipiert. In diesem Sinne wurden zunächst Parameter zur *Szenariobeschreibung* definiert, die eine Festlegung allgemeiner, systemrelevanter Parameter ermöglicht (Kapitel 4.1). Die Parameter (Systemlänge, Arbeitsweise, Eigenschaften des zu überquerenden Gebiets sowie gewünschte Förderleistung) wurden eingehender untersucht und Merkmalsausprägungen festgelegt (Kapitel 4.2). Durch die Untersuchung und Festlegung von Klassen, die die Eigenschaften des zu überquerenden Bereichs beschreiben, wurde auf die detektierten Gegebenheiten und Bedarfe der Terminalflächenexpansion (Forschungsfrage 2) eingegangen. Die Klassen unterscheiden die terminalinterne Anbindung von Expansionsflächen, die seehafennahe Anbindung von Expansionsflächen, mit drei Unterklassen für verschiedene Geo-Objekte und Hinterlandtransporte.

Die hierauf basierende *technische Systemauslegung* (Forschungsfrage 4) unter dem Fokus der Erreichung der geforderten Förderleistung, die auf den Eingangsdaten der Szenariobeschreibung und den Technologiespezifikationen basiert schließt an die Szenariobeschreibung an. Hierfür wurden ebenfalls zunächst die Parameter (technische Kennzahlen, technologiespezifische Substruktur, Technologiereife, Flächenbedarfe) eingehender untersucht und insofern möglich den in Kapitel 3.2 detektierten Technologien spezifische Merkmalsausprägungen zugeordnet (Kapitel 4.3.1). Darauf aufbauend wurde die Systematik der technischen Systemauslegung (Kapitel 4.3.2) sowie die unternehmensspezifische Bewertung mittels Nutzwertanalyse (Kapitel 4.3.3) beschrieben. Analog hierzu erfolgte für die Beschreibung der *unternehmensspezifischen, betriebswirtschaftlichen Bewertung*, in die unternehmensspezifische und betriebswirtschaftlich

technologische Kennzahlen einfließen (Kapitel 4.4.1). Der Beschreibung und Festlegung der Parameter (Investitionskosten, Nutzungs- und Instandhaltungskosten, Verkehrsvermeidung) folgte die Beschreibung der Analyssystematik (Kapitel 4.4.2) und der unternehmensspezifischen Bewertung mittels Nutzwertanalyse (Kapitel 4.4.3).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde die technologiespezifische Auslegung und Bewertung exemplarisch für eine Containerseilbahn und ACTS umgesetzt. Der Metrisierung voranstehend wurde das Konzept zu einer Containerseilbahn verfeinert, in dem technische Möglichkeit der Ableitung einer Containerseilbahn aus den bestehenden Technologievarianten im Bereich Seilbahntechnologie untersucht wurde. Hierzu wurde festgestellt, dass insbesondere auf Grund der hohen zu transportierenden Gewichte für eine Luftseilbahn der Einsatz von Systemen mit kuppelbaren Klemmen oder umlaufender Systeme auszuschließen ist. Es wurden konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten für das Gesamtsystem und Subsysteme beschrieben (Kapitel 5.1), auf Basis derer die Ableitung der Metrisierung im Sinne der Definition von Leistungsberechnungen (Kapitel 5.2.1) erfolgen konnte. Die Formulierung von *Auslegungs- und Berechnungsgrundlagen für eine Containerseilbahn* erfolgte in Anlehnung an die Auslegungsgrundlagen für Personenseilbahnen und wurde um die spezifischen Anforderungen einer Containerseilbahn ergänzt. So wurden zum einen Formeln für die Leistungsberechnung der fünf definierten Betriebsarten (ein-/ zweisträngige Bahn, bi-/ unidirektional fördernd, ge-/ entkoppelte Stränge) aufgestellt, zum anderen wurde die Berechnung der Leistung segmentierter Bahnen betrachtet und formelmäßig umgesetzt. Es wurde festgestellt, dass die Gesamtleistung einer Anlage stark von der Streckenlänge abhängt, da bei einer Containerseilbahn auf Grund der Gewichte nur ein Container je Strang aufgenommen werden kann. Die Formulierung der Berechnungsgrundlagen der AKCTS orientierte sich an den Fahrdiagrammen und üblichen technischen Kennwerten der am Markt erhältlichen Systeme. Es konnten für die AVC keine ordinären Werte für diese Technologie aufgegriffen werden.

Durch die IT-basierte Umsetzung der Szenariodefinition und technischen Auslegung erfolgte die Implementierung der Untersuchungssystematik in ein *Analysetool*. Das entwickelte Analysetool wurde zur Untersuchung von fünf fiktiven, konkrete Fälle eingesetzt. Um eine Übertragbarkeit der Arbeit auf andere Technologien zu ermöglichen, müssen diese entsprechend des hier angewendeten Systematik eingearbeitet werden: eine Einsetzbarkeit für die definierten Klassen müsste jeweils untersucht werden und die systemspezifischen Ausgestaltungsvarianten und Leistungsberechnungen wären anzupassen. Derart kann das entwickelte Analysetool auf eine fallspezifische Überprüfung verschiedenster Technologien zum flurfreien Containertransport erweitert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine allgemeingültige Klassifizierung für Technologien zum flurfreien Containertransport festgelegt. Weiterführend wurde eine Analyssystematik entwickelt, mit deren Hilfe eine szenariospezifische Einschätzung des Einsatzpotentials unterschiedlicher Technologien, die einen flurfreien Containertransport ermöglichen, erfolgen kann und die Ausgestaltung der Parametrierung festgelegt. Basierend auf einer exemplarischen Anwendung der Metrisierung für die Containerseilbahn und automatisierte, konventionelle Container-transportfahrzeuge erfolgt die technologiebasierte Anwendung der Systematik und Evaluation. Die in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Entwicklungsziele wurden erreicht.

Die Systematik kann folgend von Terminalbetreibern oder Infrastrukturplanern genutzt werden, um hiermit entsprechende Vorhaben und Konzepte zu überprüfen. Anschließende Arbeiten sollten die spezifischen Parameter der hier nicht metrisierten Transportsysteme zum flurfreien Containertransport definieren. Zudem sollte die Definition von Anpassungsfaktoren eingehender untersucht werden, durch die eine allgemeingültige Beaufschlagung der zu überwindenden Streckenlänge vorgenommen werden kann. Eine simulationsbasierte Untersuchung der Effekte eines flurfreien Transportsystems unter realen Bedingungen würde die hier statisch vorgenommene Auslegung ergänzen und die Effekte der Verkehrsvermeidung und der quantitativen Entlastung zu Peak-Zeiten konkret angehen.

Zusammenfassend ergeben sich aus dieser Arbeit folgende weiterführende Forschungsbedarfe und Transfermöglichkeiten:

1. Definition des maximalen technologiespezifischen Steigfaktors

Im Rahmen der Arbeit wurde ein allgemeiner Steigfaktor von 15 % für seilgezogene Systeme von von 5% von schienen- und straßengebundenen Systemen definiert. Für fliegende Systeme wurde ein Steigfaktor von 45% definiert. Es gilt, diese Faktoren in weiteren Untersuchungen zu überprüfen und möglichst einen allgemeingültigen Beaufschlagungsfaktor für die Streckenlänge auf lichter Höhe zu identifizieren. Die Anpassung des Steigfaktors würde sich direkt auf die Gesamtstreckenlänge sowie die Flächenbedarfe am Terminal auswirken. Das Ergebnis sollte in die Optimierung des Analysetools einfließen.

2. Untersuchung technischer Varianten zur Verkleinerung der Auf- und Abfahrten

Um die Energie- und Platzbedarfe eines überirdischen, flurfreien Containertransportsystems zu optimieren sollte überprüft werden, in wie fern eine Art „Aufzug“ eingesetzt werden kann, um den Höhenunterschied zur Erreichung der geforderten lichten Höhe zu erreichen.

3. Manifestation des Stands der Technik: technische Kennzahlen

Die der Metrisierung zu Grunde liegenden Kenndaten sind grundsätzlich zu prüfen. Die Anpassung der Parametrierung des Analysetools sollte sich an den Ergebnissen der technischen Untersuchung orientieren. Des Weiteren ist die Erneuerung des in der wissenschaftlichen Literatur abgebildeten Wissens zu den betrachteten Kennwerten, entsprechend der dann vorliegenden Werte, anzustreben.

4. Definition allgemeingültiger Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten für flurfreie Containertransportsysteme

Durch eine allgemeingültige Definition der Investitionshöhen für einzelne Subsysteme und Systemvarianten und die hieran anschließende wissenschaftliche Untersuchung im Rahmen einer Gegenüberstellung der Leistungsmerkmale mit den anfallenden Kosten führen zu einer Erweiterung der allgemeinen Entscheidungskriterien. Zudem wäre die Einführung und Gültigkeit von Faktoren zur standortunabhängigen Definition zu prüfen. Hierdurch wäre die allgemeingültige Umsetzung der betriebswirtschaftlichen Bewertung in Ergänzung zur technologischen Bewertung möglich. Die allgemeingültigen Abhängigkeiten der Investitions-, Nutzungs- und Instandhaltungskosten von den Gestaltungsvarianten sollten nach Vorliegen in das Analysetool eingearbeitet werden.

5. Entwicklung eines allgemeingültigen Analysetools für Technologiebereiche

In Anlehnung an das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Analysetool könnte die Ableitung eines allgemeingültigen Analysetools für Seilbahnen erfolgen. Dieses ließe sich sowohl für die Erstausslegung von Materialseilbahnen zum Transport beliebiger Güter als auch für die Erstausslegung von Personenseilbahnen anwenden. Dafür müssten relevante, seilbahnsystemspezifische Unterscheidungskriterien definiert und ihre Ausprägungen erforscht werden. Im Ergebnis würde das aus den Ergebnissen abgeleitete Tool die Aufdeckung von Potentialen und Bestimmung technischer Möglichkeiten deutlich vereinfachen, vereinheitlichen und vergleichbarer machen. Zudem würde die Bewertung auf einer neutralen, herstellerunabhängigen Basis erfolgen.

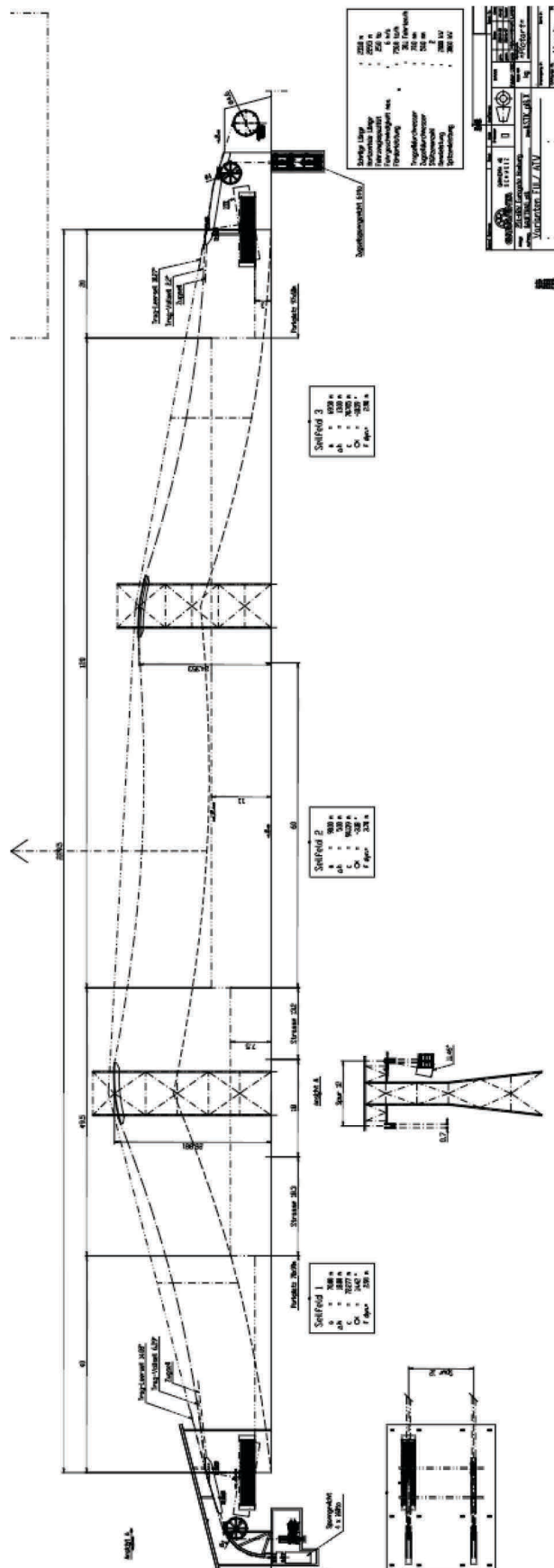
6. Weiterentwicklung der Transporttechnologien

Die vorliegende Arbeit nutzt und betrachtet den derzeitigen Stand der Technik. Für den Einsatz flurfreien Containertransportsysteme müssten die derzeitigen Entwicklungen vorangetrieben werden. Für die Containerseilbahn wäre bspw. die technologische Weiterentwicklung von Seilbahnsystemen dahingehend dienlich, als das Methoden und Technologien gefunden werden, mit denen auch für voll beladene Container die Nutzung einer Seilbahnvariante mit umlaufendem Seil oder bspw. kuppelbaren Klemmen möglich wäre.

7. Extraktion eines allgemeingültigen Analysetools für den Transport von Containern

In Anlehnung an das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Analysetool zur Erstausslegung einer Containerseilbahn würde eine ähnlich tiefgründige Auseinandersetzung mit den anderen identifizierten technologischen Systemen, die zum flurfreien Containertransport eingesetzt werden könnten, sinnvoll. Die Ergebnisse würden in das Analysetool eingearbeitet werden und zu einer umfänglicheren Bewertung von Szenarien zum flurfreien Containertransport führen.

9.2 Containerseilbahn (Quelle: Doppelmayr)



9.3 Methodische Entwicklung eines Containerseilbahnsystems

Da bei der methodischen Entwicklung eines Containerseilbahnsystems im Rahmen der in dieser Arbeit die Adaption einer bestehenden Technologie auf einen neuen Anwendungsfall im Vordergrund steht, wird auf die Vorgehensmodelle auf Ebene von Phasen beziehungsweise Arbeitsabschnitten fokussiert. Hierfür wird das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 herangezogen.

In der VDI-Richtlinie 2221 wird das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren beschrieben: den unterschiedlichen Arbeitsebenen sind die zu erstellenden Arbeitsdokumente zugeordnet. Der Konkretisierungsgrad nimmt zwischen den einzelnen Stufen zu. Innerhalb der ersten Arbeitsebene soll die Aufgaben- beziehungsweise Problemstellung mit dem Ziel einer Anforderungsliste geklärt und präzisiert werden. Nachfolgend steht die Erstellung einer Funktionsstruktur an, in der die ermittelten Funktionen und ihre Strukturen abzulesen sind. Im dritten Schritt des Vorgehensmodells werden Lösungsprinzipien und deren Strukturen gesucht und als prinzipielle Lösung beschrieben, die darauffolgend in realisierbare Module gegliedert werden (Modulare Struktur). Die Gestaltung maßgebender Module führt im darauffolgenden Entwicklungsschritt zu Vorentwürfen, die im sechsten Schritt in die Gestaltung des gesamten Produktes und damit in den Gesamtentwurf münden. Schlussendlich werden Ausführungs- und Nutzungsangaben erarbeitet, in der Produktdokumentation zusammengefasst und der weiteren Realisierung übergeben.

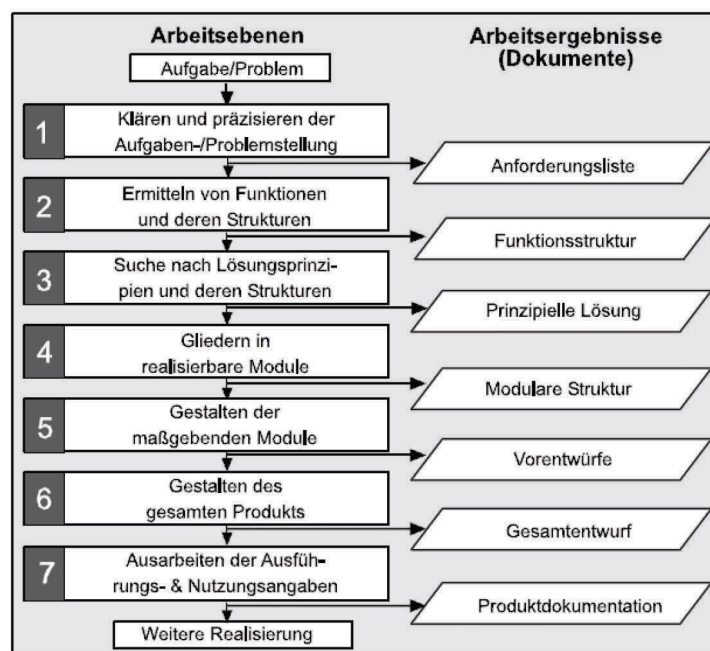


Abbildung 106: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 (Lindemann, 2009)

9.4 Datenblätter der größten Personen- und Materialseilbahnen

(Doppelmayr/Garaventa Gruppe, 2017)



KLL, Kraftwerke Linth-Limmern AG, Baden, Schweiz

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2009/10
Länge	Longueur	Length	1923 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	1051 m
Fahrgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	5 m/s
Nennlast	Charge utile	Payload	25 to
Ausnahmelast	Charge exceptionnelle	Payload exceptional	40 to
Ø Tragseil	Ø du câble porteur	Ø of track rope	90 mm
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	58 mm
Ø Gegenseil	Ø du câble lest	Ø of counter rope	30 mm
Anzahl Stützen	Nombre de pylônes	Number of towers	2
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation	Station amont	Upper station	
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor	1150 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	2080 kW





Ocean Park Corporation Aberdeen, Hong Kong

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2009
Länge	Longueur	Length	1280 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	115 m
Fahrgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	10 m/s
Förderleistung	Débit	Capacity	5000 pph
Plätze / Fahrzeug	Capacité par cabine	Capacity of vehicle	400 Pers.
Anzahl Fahrzeuge	Nombre de véhicules	Number of vehicle	2
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	43 mm
Ø Streckenrollen	Ø de galets	Ø of line sheaves	400 mm
Schienentyp	Type de rail	Rail type	S33
Spurweite	Ecartement de la voie	Rail gauge	1500 mm
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation	Station amont	Upper station	
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor power	550 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	1500 kW





KLL, Kraftwerke Linth-Limmern, Baden, Schweiz

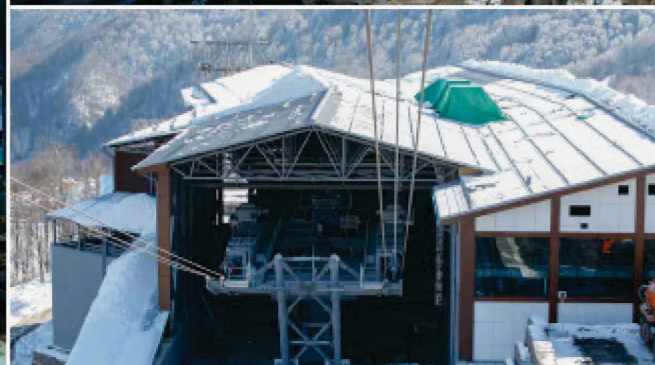
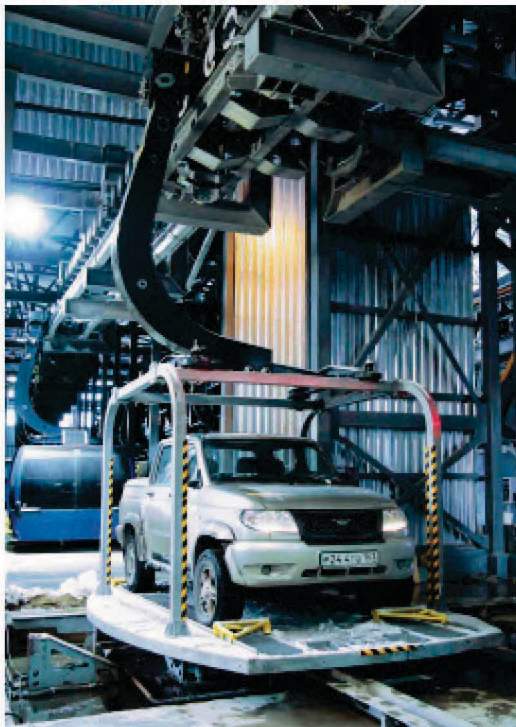
Baujahr	Année de construction	Year of construction	2009/10
Länge	Longueur	Length	1771 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	596 m
Fahrtgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	5 m/s
Nennlast	Charge utile	Payload	25 to
Ausnahmelast	Charge exceptionnelle	Payload exceptional	30 to
Ø Tragsseil	Ø du câble porteur	Ø of track rope	90 mm
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	58 mm
Ø Gegenseil	Ø du câble lest	Ø of counter rope	35 mm
Anzahl Stützen	Nombre de pylônes	Number of towers	5
Antrieb:	Entrainement:	Drive:	
Talstation	Station aval	Lower station	
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor	1160 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	2910 kW





OLYMPSTROY, Krasnaya Polyana, Sochi, Russland

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2013
Länge	Longueur	Length	1736 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	496 m
Fahrgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	7.5 m/s
Förderleistung	Débit	Capacity	4500 pph
Plätze / Fahrzeug	Capacité par cabine	Capacity of vehicle	30 Pers.
Anzahl Fahrzeuge	Nombre de véhicules	Number of vehicle	29
Ø Tragseil	Ø du câble porteur	Ø of track rope	58 mm
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	50 mm
Anzahl Stützen	No. de pylônes	Number of towers	3
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation (Olympic Village) – Unterflurantrieb	Station amont (Olympic Village) – Motrice entérée	Upper station (Olympic Village) – Vault drive	
Besonderheit:	Particularité:	Special feature:	
Autotransport	Transport des voitures	Car transport	





KLL, Kraftwerke Linth-Limmern AG c/o Axpo Power AG, Baden, Schweiz

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2013
Länge	Longueur	Length	3777 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	881 m
Plätze / Fahrzeug	Capacité par cabine	Capacity of vehicle	30 Pers.
Nutzlast:	Charge utile:	Payload:	
„Normal“	„normal“	normal	40 to
„Schwerlast“	„transport lourd“	„heavy lift“	40-120 to
„Sonderlast“	„transport exceptionnel“	„exceptional“	215 to
Max. Fahrgeschwindigkeit	Max. Vitesse	Max. Travel speed	6.0 m/s
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	58 mm
Ø Streckenrollen	Ø de galet	Ø of line sheave	400 mm
Schientyp	Type de rail	Rail type	UIC54
Spurweite	Ecartement de la voie	Rail gauge	1800 mm
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation	Station amont	Upper station	
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor	870 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	1860 kW





Fansipan Sapa Cable-Tourist Services Co.,Ltd./Sun Group Sa Pa Town, Vietnam

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2015
Länge	Longueur	Length	6326 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	1410 m
Fahrgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	8 m/s
Förderleistung	Débit	Capacity	2000 pph
Plätze / Fahrzeug	Capacité par cabine	Capacity of vehicle	30 Pers.
Anzahl Fahrzeuge	Nombre de véhicules	Number of vehicle	33
Ø Tragseil	Ø du câble porteur	Ø of track rope	58 mm
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	54 mm
Anzahl Stützen	No. de pylônes	Number of towers	4
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation	Station amont	Upper station	
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor power	1170 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	2170 kW





Ha Long Sun Company Ltd., Ha Long City, Vietnam

Baujahr	Année de construction	Year of construction	2016
Länge	Longueur	Length	2231 m
Höhendifferenz	Dénivellation	Difference in elevation	92 m
Fahrgeschwindigkeit	Vitesse	Travel speed	10 m/s
Förderleistung	Débit	Capacity	2000 pph
Plätze / Fahrzeug	Capacité par cabine	Capacity of vehicle	230 Pers.
Anzahl Fahrzeug	Nombre de véhicules	Number of vehicle	2
Ø Tragseil	Ø du câble porteur	Ø of track rope	78 mm
Ø Zugseil	Ø du câble tracteur	Ø of haul rope	57 mm
Anzahl Stützen	Nombre de pylônes	Number of towers	2
Stützenhöhe	Hauteurs des pylônes	Tower heights	N°1 123.456 m N°2 188.888 m
Antrieb:	Entraînement:	Drive:	
Bergstation	Station amont	Upper station	815 kW
Nennleistung	Puissance nom.	Rated motor power	1900 kW
Spitzenleistung	Puissance max.	Peak motor power	2400 kW



9.5 Weitere Informationen zu den Evaluationszenarios

9.5.1 Szenario 1: JWP

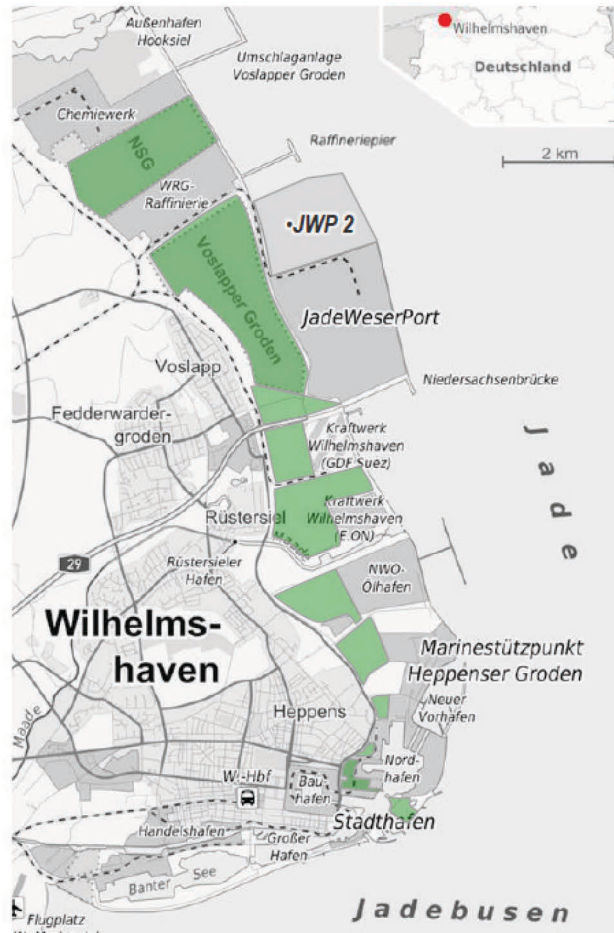


Abbildung 107: Freiflächen im Hafengebiet in Wilhelmshaven (Nds. Ministerium für Wirtschaft, 2016)



Abbildung 108: Mögliche Lage des JWP II, flurfreies Transportsystem als Anbindung (Nds. Ministerium für Wirtschaft, 2016)

9.5.2 Szenario 2: Valparaíso

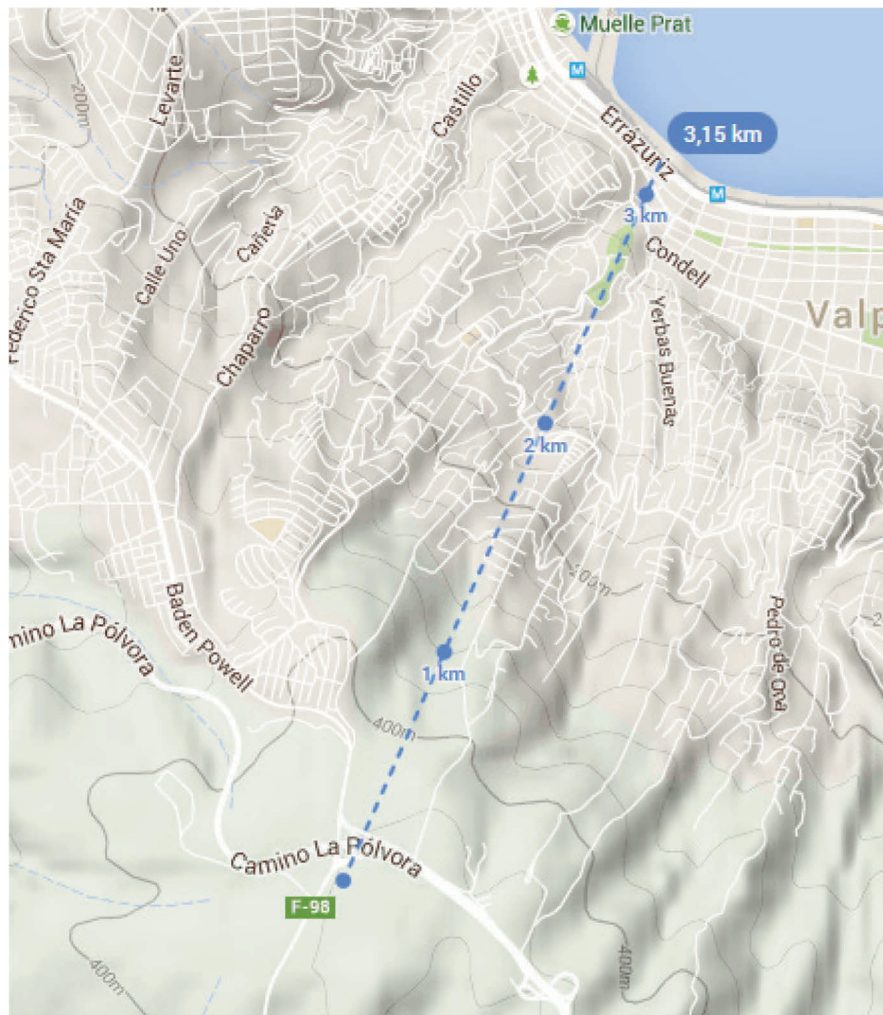


Abbildung 109: Mögliche Position einer flurfreien Transportsystems - Valparaíso (google.maps.com)

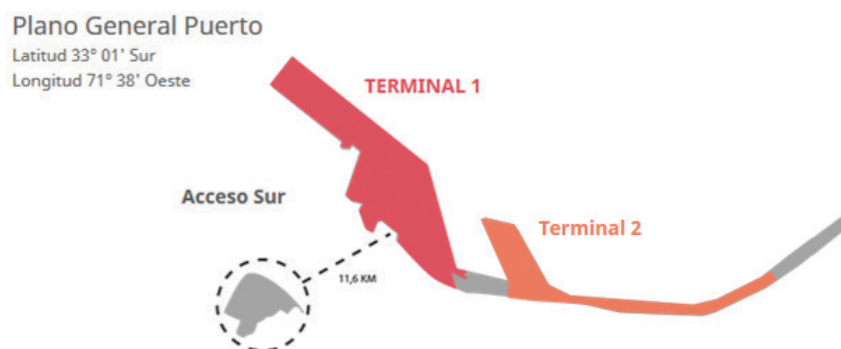


Abbildung 110: Containerterminals und Logistikzone des Hafens Valparaíso
(www.puertovalparaiso.cl/puerto/infraestructura)

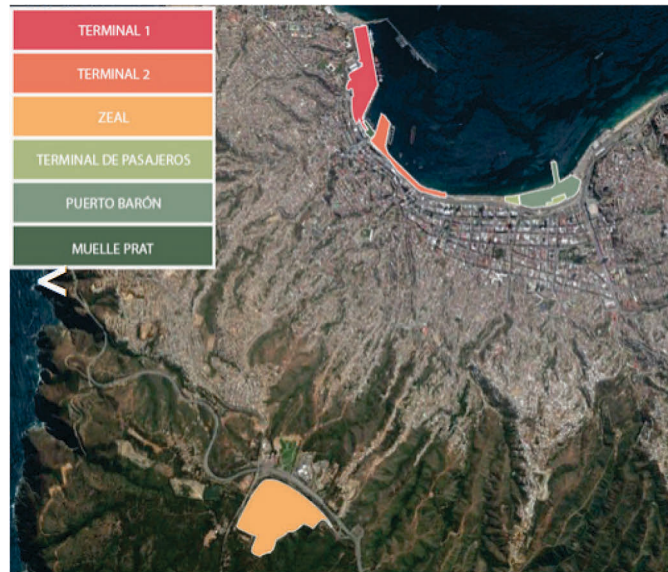


Abbildung 111: Lage der Terminals und der Logistikzone am Hafen Valparaíso
(www.puertovalparaiso.cl/puerto/infraestructura)



Abbildung 112: Höhenunterschied zwischen dem Terminal und der Logistikzone in Valparaíso (Sigma Topo auf www.gpsies.com/map)

9.5.3 Szenario 3: Antwerpen



Abbildung 113: Mögliche Lage eines flurfreien Transportsystems - Antwerpen (google.maps.com)

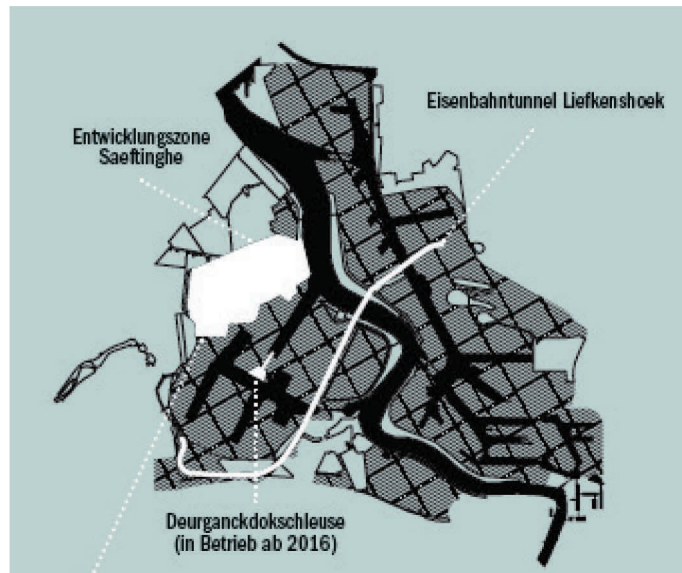


Abbildung 114: Entwicklungszone am Hafen Antwerpen (Ausschnitt aus (Port of Antwerp, 2016))



Abbildung 115: Verbindung der linken und rechten Scheldtseite am Hafen Antwerpen (Port of Antwerp, 2016)

9.5.4 Szenario 4: Rotterdam

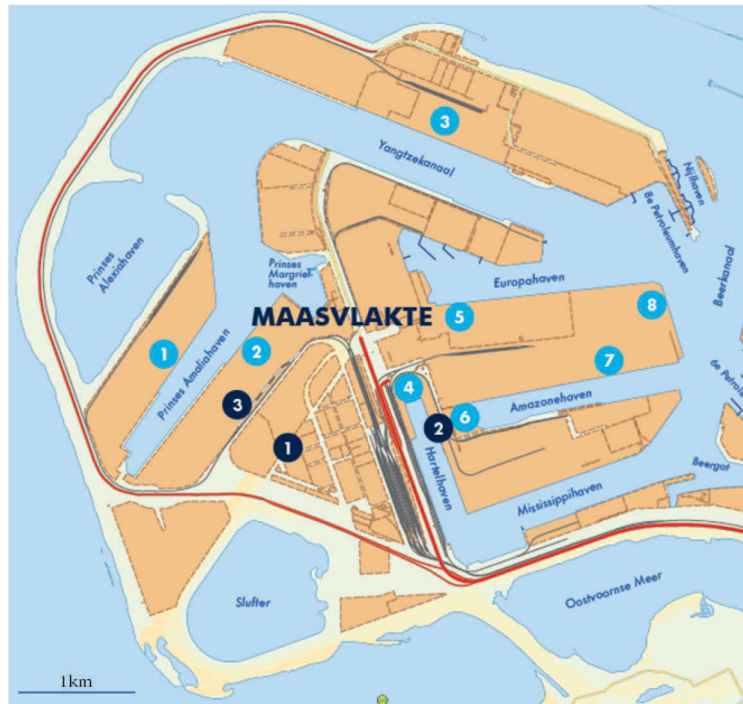


Abbildung 116: Containerterminals im Bereich Maasvlakte am Hafen Rotterdam (Port of Rotterdam, 2016)

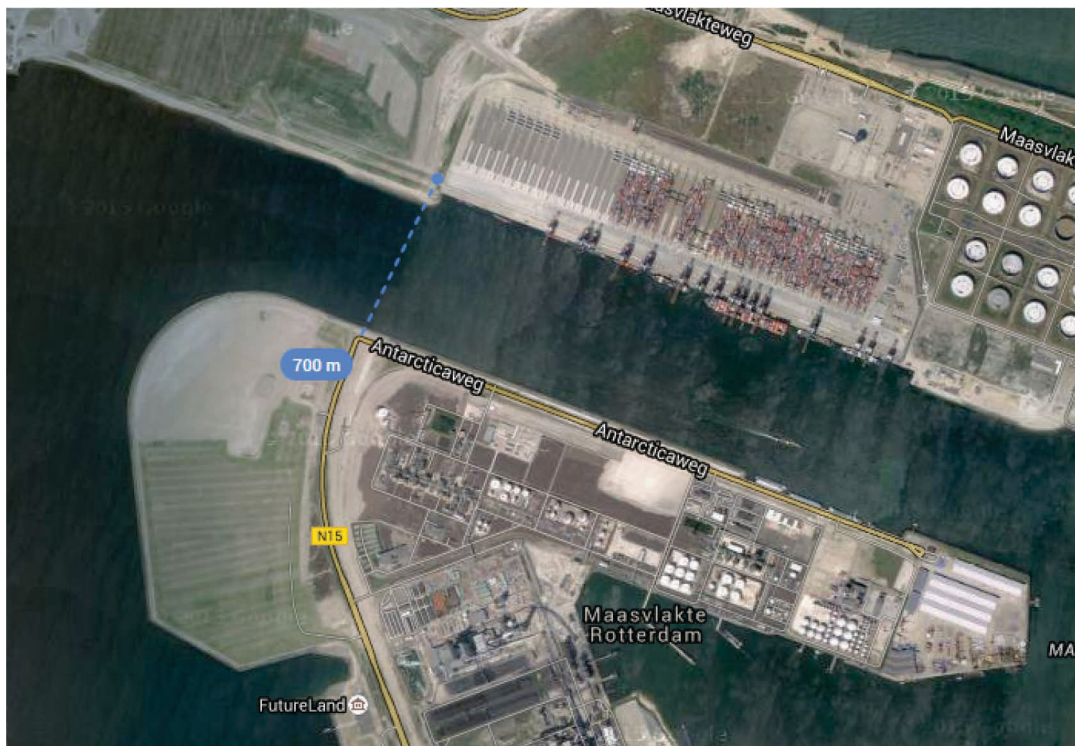


Abbildung 117: Mögliche Lage eines Containertransportsystems – Rotterdam (google.maps.com)

9.5.5 Szenario 5: Cikarang Dry Port

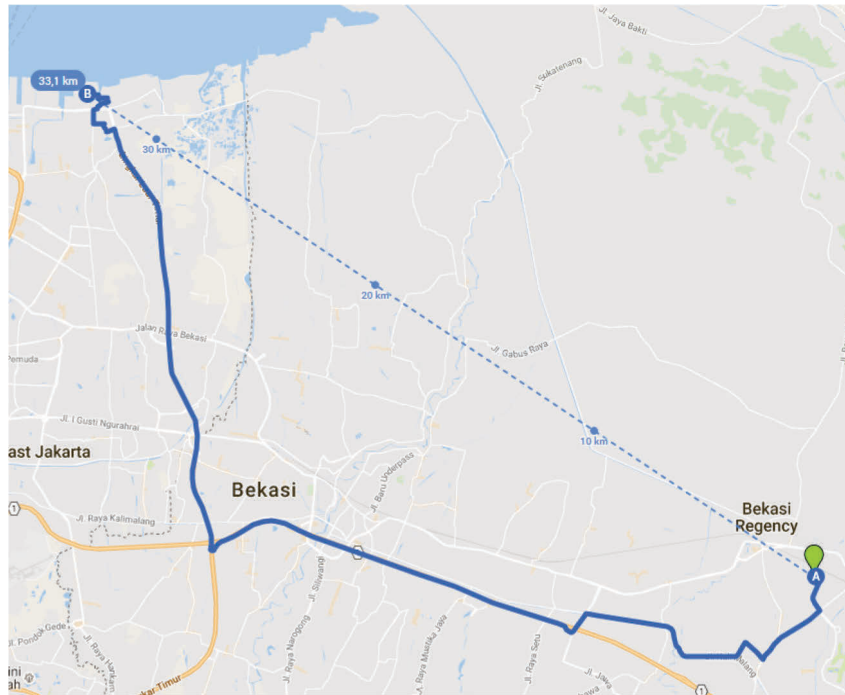


Abbildung 118: Mögliche Lage einer automatisierten Transportstrecke - Cikarang Dry Port (maps.google.com)

9.6 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen

9.6.1 Szenario 1

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		7,5	11,58	15	18,75	22,5
Variation Leistung	- 50 %	15	1 Strang	1 Strang	1 Strang	1 Strang
	- 25 %	22,5	=	=	=	=
	0	30	=	=	2 Stränge	=
	+ 25 %	37,5	=	=	=	2 Segm.2 Stränge
	+ 50 %	45	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge

Tabelle 34: Sensitivitätsanalyse Containerseilbahn Szenario 1

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		7,5	11,58	15	18,75	22,5
Variation Leistung	- 50 %	15	1 Strang	1 Strang	1 Strang	1 Strang
	- 25 %	22,5	=	=	=	=
	0	30	=	=	2 Stränge	=
	+ 25 %	37,5	=	=	=	2 Segm.2 Stränge
	+ 50 %	45	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge

- 50 %	15	-1	-1	-1	-1	-1
- 25 %	22,5	-1	-1	=	=	=
0	30	=	=	3 Fahrzeuge	+1	+1
+ 25 %	37,5	=	+1	+1	+2	+2
+ 50 %	45	=	+1	+2	+2	+3

Tabelle 35: Sensitivitätsanalyse AVC Szenario 1

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		7,5	11,58	15	18,75	22,5
Variation Leistung						
- 50 %	15	-2	-2	-2	-1	-1
- 25 %	22,5	-2	-1	-1	=	=
0	30	-1	=	4 Fahrzeuge	+1	+1
+ 25 %	37,5	=	=	+1	+2	+2
+ 50 %	45	=	+1	+2	+3	+3

Tabelle 36: Sensitivitätsanalyse AGV Szenario 1

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		7,5	11,58	15	18,75	22,5
Variation Leistung						
- 50 %	15	=	=	=	=	=
- 25 %	22,5	=	=	=	=	=
0	30	=	=	1 Fahrzeuge	+1	+1
+ 25 %	37,5	=	=	+1	+1	+1
+ 50 %	45	=	+1	+1	+1	+1

Tabelle 37: Sensitivitätsanalyse AMTT Szenario 1

9.6.2 Szenario 2

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		17,5	26,25	35	43,75	52,5
Variation Leistung						
- 50 %	7,5	1 Strang	1 Strang	1 Strang	1 Strang	1 Strang

- 25 %	11,25	=	=	=	=	=
0	15	=	=	2 Stränge	=	=
+ 25 %	18,75	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge
+ 50 %	22,5	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge	2 Segm.2 Stränge

Tabelle 38: Sensitivitätsanalyse Containerseilbahn Szenario 2

9.6.3 Szenario 3

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %	
		45	67,5	90	112,5	135	
Variation Leistung	- 50 %	10	1 Strang	1 Strang	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge
	- 25 %	15	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge
0	20	2 Stränge	2 Stränge	2 Segm. 2 Stränge	=	=	
+ 25 %	25	=	=	=	=	=	
+ 50 %	30	=	=	=	=	=	

Tabelle 39: Sensitivitätsanalyse Containerseilbahn Szenario 3

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %	
		45	67,5	90	112,5	135	
Variation Leistung	- 50 %	10	- 5	-4	-4	-3	-2
	- 25 %	15	-4	-3	-2	-1	-1
0	20	-3	-1	8 Fahrzeuge	+2	+3	
+ 25 %	25	-2	=	+2	+4	+6	
+ 50 %	30	=	+2	+4	+6	+9	

Tabelle 40: Sensitivitätsanalyse AVC Szenario 3

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %	
		45	67,5	90	112,5	135	
Variation Leistung	- 50 %	10	-7	-6	-5	-4	-3
	- 25 %	15	-6	-4	-3	-1	=

0	20	-4	-3	11 Fahrzeuge	+2	+4
+ 25 %	25	-3	=	+3	+5	+8
+ 50 %	30	-1	+2	+5	+8	+11

Tabelle 41: Sensitivitätsanalyse AGV Szenario 3

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		45	67,5	90	112,5	135
Variation Leistung						
- 50 %	10	-2	-2	-1	-1	-1
- 25 %	15	-1	-1	-1	=	=
0	20	-1	-1	3 Fahrzeuge	=	+1
+ 25 %	25	-1	=	=	+1	+1
+ 50 %	30	=	=	+1	+2	+2

Tabelle 42: Sensitivitätsanalyse AMTT Szenario 3

9.6.4 Szenario 4

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		45	67,5	90	112,5	135
Variation Leistung						
- 50 %	20	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge	2 Stränge
- 25 %	30	=	=	=	=	=
0	40	=	=	2 Segm. 2 Stränge	=	=
+ 25 %	50	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet
+ 50 %	60	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet	Nicht geeignet

Tabelle 43: Sensitivitätsanalyse Containerseilbahn Szenario 4

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		45	67,5	90	112,5	135
Variation Leistung						
- 50 %	20	-10	-9	-7	-6	-4

- 25 %	30	-8	-6	-4	-1	+1
0	40	-6	-3	15 Fahrzeuge	+3	+6
+ 25 %	50	-4	=	+4	+7	+11
+ 50 %	60	-2	+3	+7	+12	+16

Tabelle 44: Sensitivitätsanalyse AVC Szenario 4

Variation lichte Höhe		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %	
		45	67,5	90	112,5	135	
Variation Leistung	- 50 %	20	-14	-12	-10	-8	-6
	- 25 %	30	-11	-8	-5	-2	+1
	0	40	-8	-4	20 Fahrzeuge	+4	+8
	+ 25 %	50	-6	=	+5	+10	+15
	+ 50 %	60	-3	+3	+10	+16	+22

Tabelle 45: Sensitivitätsanalyse AGV Szenario 4

Variation lichte Höhe \ Variation Leistung		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		45	67,5	90	112,5	135
- 50 %	20	-3	-3	-2	-2	-2
- 25 %	30	-3	-2	-1	-1	=
0	40	-2	-1	5 Fahrzeuge	+1	+1
+ 25 %	50	-1	=	+1	+2	+3
+ 50 %	60	-1	+1	+2	+3	+4

Tabelle 46: Sensitivitätsanalyse AMTT Szenario 4

9.6.5 Szenario 5

Variation lichte Höhe \ Variation Leistung		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		15	22,5	30	37,5	45
- 50 %	15	9 Segmente	9 Segmente	9 Segmente	9 Segmente	9 Segmente
- 25 %	22,5	16 Segmente	16 Segmente	16 Segmente	16 Segmente	16 Segmente
0	30	=	=	29 Segmente	=	=
+ 25 %	37,5	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich
+ 50 %	45	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich

Tabelle 47: Sensitivitätsanalyse Containerseilbahn Szenario 5

Variation lichte Höhe \ Variation Leistung		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		15	22,5	30	37,5	45
- 50 %	15	-20	-19	-19	-19	-18
- 25 %	22,5	-11	-11	-10	-9	-9
0	30	-2	-1	38 Fahrzeuge	=	+1
+ 25 %	37,5	+7	+8	+9	+10	+11
+ 50 %	45	+16	+17	+18	+19	+21

Tabelle 48: Sensitivitätsanalyse AVC Szenario 5

Variation lichte Höhe \ Variation Leistung		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		15	22,5	30	37,5	45
- 50 %	15	-27	-26	-26	-25	-25
- 25 %	22,5	-15	-14	-13	-12	-12
0	30	-2	-1	52 Fahrzeuge	+1	+2
+ 25 %	37,5	+10	+11	+12	+14	+15
+ 50 %	45	+22	+24	+25	+27	+29

Tabelle 49: Sensitivitätsanalyse AGV Szenario 5

Variation lichte Höhe \ Variation Leistung		-50 %	- 25 %	0	+ 25 %	+ 50 %
		15	22,5	30	37,5	45
- 50 %	15	-5	-5	-5	-5	-5
- 25 %	22,5	-3	-3	-2	-2	-2
0	30	=	=	11 Fahrzeuge	=	+1
+ 25 %	37,5	+2	+3	+3	+3	+3
+ 50 %	45	+5	+5	+6	+6	+6

Tabelle 50: Sensitivitätsanalyse AMTT Szenario 5

10. Abkürzungsverzeichnis

a	Beschleunigungsfaktor [m/s^2]
ACS	automatisierte Containerstapler
AGSC	Automated Guided Straddle Carrier
AGV	Automated Guided Vehicle
AKCTS	automatisiertes, konventionelles Containertransportsystem
AMTT	automatisierte MTT
ARS	automatisierte Reach Stacker
ASC	Automated Stacking Crane
AVC	automatisierte Van Carrier
b	Verzögerungsfaktor [m/s^2]
bspw.	beispielsweise
C_{PEAK}	maximale Umschlagsleistung an der Kaye [C/h]
CSULB	College of Engineering
CTA	HHLA Container Terminal Altenwerder
CTB	HHLA Container Terminal Burchardkai
DIN	Deutsches Institut für Normung
e.D.	Eigene Darstellung
etc.	et cetera
FCL	Full-Container-Load
F_T	Beeinflussung der überquerten Trasse durch die Substruktur
ggf.	gegebenenfalls
h	Lichtehöhe unter dem Transportsystem [m]
HoQ	House of Quality
ISO	International Organisation for Standardisation
ITF	International Transport Forum
ITF	International Transport Forum
Kaje	durch Mauern befestigtes Ufer zum Löschen und Laden von Schiffsladungen
L	Leistung [Container/h]
LCL	Less-than-Container-load
LKW	Lastkraftwagen
M	theoretische Förderleistung Personenseilbahn [Pers./h]
MTT	Multitrailer Train
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NB	Normierungsklasse Flächenbedarf
NF	Normierungsklasse Förderleistung
NI	Normierungsklasse Investitionskosten
NT	Normierungsklasse TRL
p	Anteil LKW-Verkehre am Modal Split des Hafens [%]
P	Wagenfassungsraum [Anz. Personen]
PKW	Personenkraftwagen
QFD	Quality Funktion Deployment
RMG	Rail Mounted Gantrycrane

RoRo	Roll-on-Roll-off
RS	Reach Stacker
RTG	Rubber Tyred Gantrycrane
s	Steigfähigkeit [%]
S	Seilbahnsystemvariante
SC	Straddle Carrier
SEG	Segment
sog.	sogenannten
t	Dauer eines Fahrtspiels [s]
t ₁	Dauer der Fahrtzeit [s]
t ₂	Dauer des Stationsaufenthalts [s]
t _B	Beladezeit [s]
t _{Beschl}	Dauer der Beschleunigung vom Stillstand bis v _{max} [s]
t _E	Entladezeit[s]
TEU	Twenty-foot-equivalent unit
t _M	Dauer der Fahrt über x [m]
t _{MB}	Dauer der Beschleunigung auf x bis v _{max} [m]
t _{MR}	Dauer der Verzögerungsfahrt auf x bis v _{1 max} [m]
TRL	Technologiereifelevel
t _{RR}	Dauer der Verzögerungsfahrt auf x _R bis zum Stillstand [m]
t _s	Dauer der Fahrt auf der Auffahrt [s]
t _{SB}	Dauer der Beschleunigung vom Stillstand bis auf v _{1max} [s]
t _{StationEIN}	Dauer der Stationseinfahrt [s]
t _T	Transportzeit über x [s]
t _{v1}	Dauer der Verzögerung von v _{max} auf v _{Stationseinfahrt} [s]
t _{v2}	Dauer der Verzögerung bis zum Stillstand [s]
u.a.	unter anderem
UIC	Union International des Chemins de fer (Normung der europ. Eisenbahnen)
UNCTAD	United Nation Comitee for Trade and Development
UNCTAD	United Nation Committee for Trade and Development
v. Chr.	vor Christus
V1	absolute Verkehrsvermeidung [C/a]
v _{1 max}	Reduzierte Maximalgeschwindigkeit bei maximaler Steigung [m/s]
V2	Entlastungsfähigkeit bei Peak-Belastung [%]
VC	Van Carrier
v _{max}	Maximalgeschwindigkeit
v _{Stationseinfahrt}	Gescheindigkeit der Stationseinfahrt [s]
x	Streckenlänge, mit lichter Höhe > h [m]
x _A	Gesamtstreckenlänge inkl. Auf- und Abfahrt [m]
x _B	Steckenlänge der Beschleunigung [m]
x _{MB}	Beschleunigungsweg auf x bis v _{max} [m]
x _{MR}	Weg der Verzögerungsfahrt auf x bis v _{1 max} [m]
x _R	Streckenlänge der Abfahrt von der Trasse x [m]
x _{RR}	Weg der Verzögerungsfahrt auf x _R bis zum Stillstand [m]

x_S	Streckenlänge der Auffahrt auf die Trasse x [m]
x_{SB}	Beschleunigungsweg auf der Auffahrt bis $v_{1 \max}$ [m]
$x_{\text{StationEIN}}$	Streckenlänge der Stationseinfahrt [m]
x_V	Streckenlänge der Verzögerung [m]
Yard	Containerlager
Z	Zykluszeit oder Taktzeit [s], in Abhängigkeit von x
z.B.	zum Beispiel
ZM	Zugmaschine

11. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ZUGRUNDELIEGENDES VORGEHENSMODELL IN ANLEHNUNG AN (KRALLMANN, ET AL., 2007)	17
ABBILDUNG 2: INTERMODALE TRANSPORTKETTEN FÜR DIE MARITIME CONTAINERLOGISTIK, E.D. IN ANLEHNUNG AN (SCHÖNKNECHT, 2009))	22
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHER AUFBAU CONTAINERTERMINAL, (IN ANLEHNUNG AN (BRINKMANN, 2005))	24
ABBILDUNG 4: CONTAINERLAGER: BLOCKLAGER, FLÄCHENLAGER, REGALLAGER (BRINKMANN, 2005)	25
ABBILDUNG 5: AUFBAU EINES ISO-CONTAINERS (E.D. IN ANLEHNUNG AN (ARNOLD, ET AL., 2008))	28
ABBILDUNG 6: PRINZIPIKIZZE DER VERRIEGELUNG EINES TWIST LOCKS IN EINEM CORNER CASTING.....	29
ABBILDUNG 7: PRINZIPIKIZZE EINES TOPSPREADERS.....	30
ABBILDUNG 8: SPREADER FÜR DIE AUFNAHME VON MEHREREN CONTAINERN ZEITGLEICH	30
ABBILDUNG 9: CONTAINERTRAVERSE	31
ABBILDUNG 10: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES VAN CARRIER	33
ABBILDUNG 11: CONTAINERLAGER UNTER VERWENDUNG EINES VAN CARRIER-SYSTEM (DRAUF- UND SEITENANSICHT)	33
ABBILDUNG 12: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES AUTOMATED SHUTTLE CARRIERS.....	34
ABBILDUNG 13: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES CONTAINERSTAPLERS	34
ABBILDUNG 14: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES REACH STACKERS (RS)	35
ABBILDUNG 15: CONTAINERLAGER UNTER VERWENDUNG EINES REACH STACKER-SYSTEMS (DRAUF- UND SEITENANSICHT).....	35
ABBILDUNG 16: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES MTT : ZUGMASCHINE MIT CHASSIS UND ZUGMASCHINE MIT AUFLIEGER UND ZWEI CHASSIS	36
ABBILDUNG 17: CONTAINERLAGER UNTER VERWENDUNG EINES CHASSIS-SYSTEM (DRAUF- UND SEITENANSICHT).....	36
ABBILDUNG 18: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES AUTOMATED GUIDED VEHICLES	37
ABBILDUNG 19: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES RUBBER TIERED GANTRYCRANES.....	38
ABBILDUNG 20: CONTAINERLAGER UNTER VERWENDUNG EINES RUBBER TIERED GANTRYCRANE -SYSTEM (DRAUF- UND SEITENANSICHT)	38
ABBILDUNG 21: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES RAIL MOUNTED GANTRYCRANES.....	39
ABBILDUNG 22: CONTAINERLAGER UNTER VERWENDUNG EINES RAIL MOUNTED GANTRYCRANE-SYSTEM (DRAUF- UND SEITENANSICHT)	39
ABBILDUNG 23: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES AUTOMATISIERTEN STAPELKRANS	40
ABBILDUNG 24: TECHNOLOGIESPEZIFISCHE MAXIMALE LAGERKAPAZITÄTEN IN TEU PRO HEKTAR, E.D. IN ANLEHNUNG AN (KALMAR INDUSTRIES OY AB, 2008).....	41
ABBILDUNG 25: VORL. HANDELSVOLUMEN IN DER SEEFRACHT, WELTWEIT 2017 (VERBAND FÜR SCHIFFBAU UND MEERESTECHNIK (VSM), 2018)	43

ABBILDUNG 26: ENTWICKLUNG DES JÄHRLICHEN WELTWEITEN CONTAINERUMSCHLAGS (IHS GLOBAL INSIGHT, 2018)	44
ABBILDUNG 27: ENTWICKLUNG DES UMSCHLAGS AN AUSGEWÄHLTEN HÄFEN (ALPHALINER, 2016) UND (STATISTA, 2018)	45
ABBILDUNG 28: SCHIFFSKLASSEN, E.D. IN ANLEHNUNG AN (RODRIQUE, ET AL., 2009))	46
ABBILDUNG 29: VERGLEICH VON SEE- UND LANDSEITIGER UMSCHLAGSLEISTUNG EINES TERMINALS (SCHÖNKNECHT, 2009)	48
ABBILDUNG 30: SCHIFFSLIEGEZEIT PRO UMGESCHLAGENEM TEU IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SCHIFFSGRÖÙE; AM BEISPIEL HAMBURGER HAFEN 2007 E.D. IN ANLEHNUNG AN (SCHÖNKNECHT, 2009)	49
ABBILDUNG 31: TRANSPORTEBENEN	66
ABBILDUNG 32: CONTAINERSEILBAHN, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	68
ABBILDUNG 33: RAILCAB, SCHEMATISCH DARSTELLUNG	69
ABBILDUNG 34: TRANSPRAPID MAGLEV SYSTEM ZUM CONTAINERTRANSPORT, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	69
ABBILDUNG 35: CONTAINERBAHN, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	70
ABBILDUNG 36: SKYTECH, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	70
ABBILDUNG 37: CONCAR, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	70
ABBILDUNG 38: EAGLERAIL, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	71
ABBILDUNG 39: GRAIL, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	71
ABBILDUNG 40: FREIGHT SHUTTLE SYSTEM, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	71
ABBILDUNG 41: ACT, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	72
ABBILDUNG 42: AUTOCON, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	72
ABBILDUNG 43: AUTOMATISIERTE, KONVENTIONELLE CONTAINERTRANSPORTSYSTEME (VAN CARRIER UND REACH STACKER), SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	73
ABBILDUNG 44: CARGOLIFTER, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	73
ABBILDUNG 45: FRACHTDROHNEN HELIKOPTER, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	74
ABBILDUNG 46: TUBE CARGO EXPRESS, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	75
ABBILDUNG 47: UNDERGROUND CONTAINER MOVER, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	75
ABBILDUNG 48: CARGOCAP, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	75
ABBILDUNG 49: UNDERGROUND AUTOMATED TRUCKS, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	76
ABBILDUNG 50: GÜTERTRANSPORT PER PIPELINE: PNEUMATISCHER ANTRIEB, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG	76
ABBILDUNG 51: CONTAINERTERMINALS AM HAFEN HAMBURG (HAFEN HAMBURG MARKETING, 2016)	80
ABBILDUNG 52: LUFTAUFNAHME DES EUROGATE TERMINALS (©GOOGLE MAPS UND (EUROGATE, BIBA, 2010))	81
ABBILDUNG 53: ANALYSESYSTEMATIK ZUR SZENARIOSPEZIFISCHEN BEWERTUNG FLURFREIER CONTAINERTRANSPORTTECHNOLOGIEN	86
ABBILDUNG 54: DRAUFSICHT TERMINAL UND HÖHENPROFIL	89

ABBILDUNG 55: DIREKT ANSCHLIEßENDE TERMINALVERGRÖßERUNG	92
ABBILDUNG 56: ANBINDUNG EINER SEEHAFENNAHEN FLÄCHE, ÜBERWINDUNG INFRASTRUKTURELLER TOPOLOGIE	93
ABBILDUNG 57: ANBINDUNG EINER SEEHAFENNAHEN FLÄCHE, ÜBERWINDUNG EINES HAFENBECKENS	93
ABBILDUNG 58: ANBINDUNG EINER SEEHAFENNAHEN FLÄCHE, ÜBERWINDUNG EINES GEOGRAPHISCHEN HÖHENUNTERSCHIEDS	94
ABBILDUNG 59: ANBINDUNG AN EINEN HAFENHINTERLANDTERMINAL	95
ABBILDUNG 60: EINSATZKLASSEN GEO-OBJEKTE	95
ABBILDUNG 61: BRÜCKENBAUWERK, SEITENANSICHT	96
ABBILDUNG 62: AUFGESTÄNDERTE TRASSIERUNG	96
ABBILDUNG 63: TRASSIERUNG ÜBER PYLONEN, SEITENANSICHT	96
ABBILDUNG 64: FLUGTRANSPORT, SEITENANSICHT	97
ABBILDUNG 65: UNTERIRDISCHE TRASSIERUNG, SEITENANSICHT	97
ABBILDUNG 66: ABLEITUNG DES SYSTEMFLÄCHENBEDARFS, BRÜCKENBAUWERK (SEITEN- UND DRAUFSICHT)	103
ABBILDUNG 67: ABLEITUNG DES SYSTEMFLÄCHENBEDARFS, AUFGESTÄNDERTE TRASSIERUNG (SEITEN- UND DRAUFSICHT)	104
ABBILDUNG 68: ABLEITUNG DES SYSTEMFLÄCHENBEDARFS, TRASSIERUNG ÜBER PYLONEN (SEITEN- UND DRAUFSICHT)	104
ABBILDUNG 69: ABLEITUNG DES SYSTEMFLÄCHENBEDARFS, FLUGTRANSPORT (SEITEN- UND DRAUFSICHT)	104
ABBILDUNG 70: ABLEITUNG DES SYSTEMFLÄCHENBEDARFS, UNTERIRDISCHE TRASSIERUNG (SEITEN- UND DRAUFSICHT)	105
ABBILDUNG 71: EINTEILUNG VON BAHNEN, E.D. IN ANLEHNUNG AN (MENIUS & MATTHEWS, 2017))	114
ABBILDUNG 72: KATEGORISIERUNG VON SEILBAHNEN (LIEDL, 1999)	115
ABBILDUNG 73: UNTERSCHIEDUNG NACH DER ANZAHL DER SEILE UNTERSCHIEDLICHER FUNKTION, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	116
ABBILDUNG 74: UNTERSCHIEDUNG NACH DER BETRIEBSWEISE, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	116
ABBILDUNG 75: NICHT KUPPELBARE SEILBAHNEN, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	118
ABBILDUNG 76: KUPPELBARE SEILBAHNEN, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	118
ABBILDUNG 77: DOPPEL- EINSEILUMLAUFBAHN, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	119
ABBILDUNG 78: ZWEISEILUMLAUFBAHN – KUPPELBAR, E.D. NACH (LIEDL, 1999)	120
ABBILDUNG 79: ZWEISEILPENDELBAHN, E,D, NACH (LIEDL, 1999)	121
ABBILDUNG 80: DREISEILBAHN IM PENDELBETRIEB MIT UMGELENKTEM ZUGSEIL, E.D. NACH (SEDIVY, 2012)	121
ABBILDUNG 81: FUNKTIONS- UND PROZESSCHAUBILD, E.D. NACH (FAHRBACH, RITTER, & PALLASCH, 2010)	125
ABBILDUNG 82: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG MÖGLICHER ÜBERGABESTATIONEN EINER ZWEISTRÄNGIGEN SEILBAHN MIT ENTKOPPELTEN STRÄNGEN	127
ABBILDUNG 83: LUFTSEILBAHN, SCHEMATISCHE DARSTELLUNG.....	128
ABBILDUNG 84: FAHRDIAGRAMM AM BEISPIEL EINER PENDELBAHN,E.D. NACH SEDIVY, 2012	131

ABBILDUNG 85: FAHRDIAGRAMM, E.D. IN ANLEHNUNG AN SEDIVY, 2012	132
ABBILDUNG 86: ERWEITERTES FAHRDIAGRAMM	132
ABBILDUNG 87: MAXIMAL ERREICHBARE LEISTUNG DER SYSTEMVARIANTEN S1, ..., S5 IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STRECKENLÄNGE X _i	137
ABBILDUNG 88: SEGMENTIERTE FAHRSTRECKE MIT GLEICHGROßEN SEGMENTEN	138
ABBILDUNG 89: SEGMENTIERTE FAHRSTRECKE MIT UNTERSCHIEDLICH GROßEN SEGMENTEN	138
ABBILDUNG 90: VISUALISIERUNG DER ERZIELBAREN LEISTUNGSDATEN GEMÄß TABELLE 22	140
ABBILDUNG 91: EXEMPLARISCHE FAHRDIAGRAMM KONVENTIONELLER CONTAINERFAHRZEUGE, TERMINALVERKEHRABHÄNGIG	141
ABBILDUNG 92: FAHRDIAGRAMM KONVENTIONELLER CONTAINERFAHRZEUGE, UNABHÄNGIGE GRADEAUSFAHRT	141
ABBILDUNG 93: FAHRSTRECKE KONVENTIONELLER CONTAINERTRANSPORTFAHRZEUGE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE	142
ABBILDUNG 94: FAHRDIAGRAMM FÜR AUTOMATISCHE KONVENTIONELLE CONTAINERTRANSPORTSYSTEME ÜBER EINE BRÜCKE	142
ABBILDUNG 95: EINGABEMASKE DES ANALYSETOOLS – SZENARIOBESCHREIBUNG	151
ABBILDUNG 96: BERECHNUNGSMATRIX VC – BEISPIEL	152
ABBILDUNG 97: BERECHNUNGSMATRIX SEILBAHN – BEISPIEL	153
ABBILDUNG 98: ÜBERSICHTSMASKE - BEISPIEL: GEWÜNSCHTE LEISTUNG NICHT ERREICHBAR	153
ABBILDUNG 99: ERGEBNISFELD ZUR LEISTUNGSBERECHNUNG UND AUSGESTALTUNG DER SYSTEME - BEISPIEL	154
ABBILDUNG 100: NUTZWERTANALYSE - BEISPIEL	155
ABBILDUNG 101: ANALYSEERGEBNIS SZENARIO 1	159
ABBILDUNG 102: ANALYSEERGEBNIS SZENARIO 2	159
ABBILDUNG 103: ANALYSEERGEBNIS SZENARIO 3	160
ABBILDUNG 104: ANALYSEERGEBNIS SZENARIO 4	160
ABBILDUNG 105: ANALYSEERGEBNIS SZENARIO 5	161
ABBILDUNG 106: VORGEHEN BEIM ENTWICKELN UND KONSTRUIEREN NACH VDI 2221 (LINDEMANN, 2009)	181
ABBILDUNG 107: FREIFLÄCHEN IM HAFENGEBIET IN WILHELMSHAVEN (NDS. MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, 2016)	189
ABBILDUNG 108: MÖGLICHE LAGE DES JWP II, FLURFREIES TRANSPORTSYSTEM ALS ANBINDUNG (NDS. MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, 2016)	189
ABBILDUNG 109: MÖGLICHE POSITION EINER FLURFREIEN TRANSPORTSYSTEMS - VALPARAISO (GOOGLE.MAPS.COM)	190
ABBILDUNG 110: CONTAINERTERMINALS UND LOGISTIKZONE DES HAFENS VALPARAISO (WWW.PUERTOVALPARAISO.CL/PUERTO/INFRASTRUCTURA)	190
ABBILDUNG 111: LAGE DER TERMINALS UND DER LOGISTIKZONE AM HAFEN VALPARAISO (WWW.PUERTOVALPARAISO.CL/PUERTO/INFRASTRUCTURA)	191

ABBILDUNG 112: HÖHENUNTERSCHIED ZWISCHEN DEM TERMINAL UND DER LOGISTIKZONE IN VALPARAISO (SIGMA TOPO AUF WWW.GPSIES.COM/MAP)	191
ABBILDUNG 113: MÖGLICHE LAGE EINES FLURFREIEN TRANSPORTSYSTEMS - ANTWERPEN (GOOGLE.MAPS.COM)	192
ABBILDUNG 114: ENTWICKLUNGSZONE AM HAFEN ANTWERPEN (AUSSCHNITT AUS (PORT OF ANTWERP, 2016))	192
ABBILDUNG 115: VERBINDUNG DER LINKEN UND RECHTEN SCHELDESEITE AM HAFEN ANTWERPEN (PORT OF ANTWERP, 2016) ..	193
ABBILDUNG 116: CONTAINERTERMINALS IM BEREICH MAASVLAKTE AM HAFEN ROTTERDAM (PORT OF ROTTERDAM, 2016)	194
ABBILDUNG 117: MÖGLICHE LAGE EINES CONTAINERTRANSPORTSYSTEMS – ROTTERDAM (GOOGLE.MAPS.COM)	194
ABBILDUNG 118: MÖGLICHE LAGE EINER AUTOMATISIERTEN TRANSPORTSTRECKE - CIKARANG DRY PORT (MAPS.GOOGLE.COM)..	195

Alle Abbildungen, die nicht mit einer Quellenangabe versehen sind, sind eigene Darstellungen.

12. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: HAUPTDATEN FÜR GROßCONTAINER (E.D. IN ANLEHNUNG AN (BAUMGARTEN & IHDE, 1994))	27
TABELLE 2: VERGLEICH CONTAINERTRANSPORTSYSTEME, E.D. IN ANLEHNUNG AN (KALMAR INDUSTRIES OY AB, 2008))	41
TABELLE 3: BEWERTUNG DER EINZELMETHODEN ZUR TECHNOLOGIEBEWERTUNG	60
TABELLE 4: BEWERTUNG DER INTEGRATIVEN ANSÄTZE ZUR TECHNOLOGIEBEWERTUNG.....	61
TABELLE 5: VARIATIONSMÖGLICHKEITEN DER SYSTEMATISCHEN KOMBINATION DER MERKMALE 1-3	66
TABELLE 6: SYSTEMATISCHE TECHNOLOGIESUCHE.....	67
TABELLE 7: DEFINITION DER ZIELKRITERIEN	83
TABELLE 8: ÜBERFÜHRUNG DER ZIELKRITERIEN IN BESTIMMENE SYSTEMPARAMETER.....	83
TABELLE 9: ZUORDNUNG DER BEWERTUNGSEBENEN ZU DEN SYSTEMPARAMETERN	85
TABELLE 10: GEGENÜBERSTELLUNG DER KATEGORISIERUNG.....	91
TABELLE 11: ZUORDNUNG DER AUSGESTALTUNGSVARIANTEN DER SUBSTRUKTUR ZU DEN EINSATZKLASSEN.....	97
TABELLE 12: BESTIMMUNG DER TECHNOLOGIESPEZIFISCHEN AUSGESTALTUNG DER SUBSTRUKTUR	99
TABELLE 13: TRL-MODELL, IN ANLEHNUNG AN (SCHIMPF & RUMMEL, 2015)	101
TABELLE 14: ZUORDNUNG DER TECHNOLOGIESPEZIFISCHEN TRL ZU DEN ERMITTELTEN TECHNOLOGIEN	102
TABELLE 15: NORMIERUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE FÜR DIE NUTZWERTANALYSE	106
TABELLE 16: NORMIERUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE FÜR DIE NUTZWERTANALYSE	109
TABELLE 17: ZUSAMMENFASSUNG DER SYSTEMBESCHREIBENDEN, TECHNOLOGIESPEZIFISCHEN UND BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHEN PARAMETER	110
TABELLE 18: GEGENÜBERSTELLUNG SEILBAHNVARIANTEN.....	117
TABELLE 19: LEISTUNGEN MODERNER SEILBAHNEN FÜR DEN PERSONENTRANSPORT, WELTWEIT (EIGENE MARKTRECHERCH UND IN ANLEHNUNG AN LIEDL, 1999)	124
TABELLE 20: SYSTEMVARIANTEN S1 – S5	129
TABELLE 21: EXEMPLARISCHE BERECHNUNG DER TRANSPORTKAPAZITÄT UNTERSCHIEDLICH LANGER BAHNEN	136
TABELLE 22: EXEMPLARISCHE BERECHNUNG DER TRANSPORTKAPAZITÄT SEGMENTIERTER BAHNEN.....	139
TABELLE 23: BESTIMMUNG DER FAHRTZEIT IN SEKUNDEN FÜR VERSCHIEDENE SZENARIEN.....	148
TABELLE 24: EXEMPLARISCHE BERECHNUNG DER TRANSPORTLEISTUNGEN IN CONTAINERN PRO STUNDE (UNIDIREKTIONAL).....	149
TABELLE 25: EXEMPLARISCHE BERECHNUNG DER TRANSPORTLEISTUNGEN IN CONTAINERN PRO STUNDE (BIDIREKTIONAL)	149
TABELLE 26: PAARWEISER VERGLEICH – BEISPIEL FÜR „SEEHAFENBETREIBER X“.....	154
TABELLE 27: PARAMETER DER FALLBEISPIELE.....	158
TABELLE 28: SZENARIO 1 - BASISPEZIFIKATION	162

TABELLE 29: SZENARIO 2 - BASISPEZIFIKATION	163
TABELLE 30: SZENARIO 3 - BASISPEZIFIKATION	164
TABELLE 31: SZENARIO 4 - BASISPEZIFIKATION	165
TABELLE 32: SZENARIO 5 – BASISPEZIFIKATION	166
TABELLE 33: BEWERTUNGSERGEBNIS FÜR SZENARIO 1	169
TABELLE 34: SENSITIVITÄTSANALYSE CONTAINERSEILBAHN SZENARIO 1	195
TABELLE 35: SENSITIVITÄTSANALYSE AVC SZENARIO 1	196
TABELLE 36: SENSITIVITÄTSANALYSE AGV SZENARIO 1	196
TABELLE 37: SENSITIVITÄTSANALYSE AMTT SZENARIO 1	196
TABELLE 38: SENSITIVITÄTSANALYSE CONTAINERSEILBAHN SZENARIO 2	197
TABELLE 39: SENSITIVITÄTSANALYSE CONTAINERSEILBAHN SZENARIO 3	197
TABELLE 40: SENSITIVITÄTSANALYSE AVC SZENARIO 3	197
TABELLE 41: SENSITIVITÄTSANALYSE AGV SZENARIO 3	198
TABELLE 42: SENSITIVITÄTSANALYSE AMTT SZENARIO 3	198
TABELLE 43: SENSITIVITÄTSANALYSE CONTAINERSEILBAHN SZENARIO 4	198
TABELLE 44: SENSITIVITÄTSANALYSE AVC SZENARIO 4	199
TABELLE 45: SENSITIVITÄTSANALYSE AGV SZENARIO 4	199
TABELLE 46: SENSITIVITÄTSANALYSE AMTT SZENARIO 4	200
TABELLE 47: SENSITIVITÄTSANALYSE CONTAINERSEILBAHN SZENARIO 5	200
TABELLE 48: SENSITIVITÄTSANALYSE AVC SZENARIO 5	200
TABELLE 49: SENSITIVITÄTSANALYSE AGV SZENARIO 5	201
TABELLE 50: SENSITIVITÄTSANALYSE AMTT SZENARIO 5	201

Alle Tabellen, die nicht mit einer Quellenangabe versehen sind, sind eigene Darstellungen.

13. Formelverzeichnis

GL. (1)	48
GL. (2)	88
GL. (3)	88
GL. (4)	98
GL. (5)	98
GL. (6)	107
GL. (7)	131
GL. (8)	131
GL. (9)	133
GL. (10)	135
GL. (11)	135
GL. (12)	135
GL. (13)	135
GL. (14)	135
GL. (15)	138
GL. (16)	143
GL. (17)	148
GL. (18)	148

14. Literaturverzeichnis

- Alphaliner, 2016. *Alphaliner, Newsletter Nr 08/2016, 17. Februar 2016*. [Online] Available at: <https://de.statista.com>
- Alphaliner, 2018. *Top 100*. [Online] Available at: <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/index.php> [Zugriff am 30.08.2018].
- Alshalafah, B., Shalaby, A., Dale, S. & Othman, F., 2013. Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations. *Journal of Transportation Engineering, Vol. 139, Issue 8*.
- Arnold, D. et al., 2008. *Handbuch Logistik; Außerbetriebliche Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Arold, D. & Rall, B., 1996. Ein neues Umschlagsystem für Güterverkehrszentren im Vergleich mit aktuellen Konzepten. In: V. 1274, Hrsg. *Inovative Umschlagsysteme an der Schiene*. Düsseldorf: s.n., pp. 197-208.
- Auffermann, C. & Lange, V., 2016. *Technologie-Screening Handelslogistik*. München: Huss.
- Baumgarten, H. & Ihde, G. B., 1994. *Wirtschaftliche Transportketten mit modularen Containern*. München: Huss-Verlag.
- Beresford, A. P. S. X. Q. a. W. S., 2012. A study of dry port development in China. *Maritime Economics and Logistics, vol. 14, no. 1*, pp. 73-98.
- Bergqvist, R. W. G. a. C. K., 2013. Introduction—A Global Perspective on Dryports. In: *Dry Ports - A Global Perspective, Challenges and Developments in Serving Hinterlands*. Farnham: Ashgate Publishing Ltd., pp. 1-10.
- Binsbergen, A. v., Konings, R., Tavasszy, L. & Duin, R. v., 2014. Innovations in intermodal freight transport: lessons from Europe. *Papers of the 93th annual meeting of the Transportation Research Board (USA)*.
- Bollmann, J., Lipinski, A. & Koch, W.-G., 2002. *Lexikon der Kartographie und Geomatik*. s.l.:Spektrum akademischer Verlag.
- Böse, J., 2011. *Handbook of Terminal Planning*. 49 Hrsg. Haburg: Springer.
- Brandenburg, F., 2002. *Methodik zur Planung technologischer Produktinnovationen. Dissertation Technische Hochschule Aachen*. Aachen: Shaker-Verlag.
- Brandkamp, M., 2000. Verfahren der Technologiebewertung. In: *Technologen für innovative Unternehmensgründungen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, pp. 7-15.
- Briem, U., 2011. New calculation method for clip and cut procedure. *OIPEEC conference proceedings: safe use of ropes*, pp. 103-112.
- Brinkmann, B., 2005. *Seehäfen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bruns, P. D.-I. R. & Piepenburg, D.-I. B., 2013. Dynamische Standsicherheit von Portalstaplern. *Logistics Journal*.

- Bullinger, H.-J., 1994. *Einführung in das Technologiemanagement*. Stuttgart: Teubner-Verlag.
- Bundeszentrale für politische Bildung, 2017. *Seefracht*. [Online] Available at: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52531/seefracht> [Zugriff am 30 08 2018].
- CargoCap, 2017. [Online] Available at: www.cargocap.de [Zugriff am 20 06 2017].
- CargoLifter, 2017. *CargoLifter*. [Online] Available at: www.cargolifter.de [Zugriff am 10 06 2017].
- Cleemann, L. & Pfeiffer, S., 1992. Identifikation und Bewertung von Ansätzen zukünftiger Technologien. In: *Technologiefrühaufklärung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Czichos, H., 2013. *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. s.l.:Springer-Verlag.
- Czitary, E., 1962. *Seilschwebbahnen*. Wien: Springer-Verlag.
- DeMers, M., 2010. *Fundamentals of Geographical Information Systems, 4th Edition*. s.l.:Wiley & Sons Ltd.
- Denys, 2017. *projecten*. [Online] Available at: <http://www.denys.be/nl/projecten> [Zugriff am 05 06 2017].
- Deutsche Transportversicherer, 2016. *Containerhandbuch*. [Online] Available at: https://www.containerhandbuch.de/chb/stra/index.html?/chb/stra/stra_03_02_00.html
- DIN ISO 15190, 1994. *DIN ISO 15190-101:1994-04*. s.l.:s.n.
- DIN ISO 6346, 1996. *DIN ISO 6346:1996-01*. s.l.:s.n.
- DIN ISO 668, 2013. *DIN ISO 668:2013-08*. s.l.:s.n.
- DIN ISO 830, 1999. *DIN ISO 830:1999-09*. s.l.:s.n.
- Doppelmayr/Garaventa Gruppe, 2017. *Produkte*. [Online] Available at: <https://www.doppelmayr.com/produkte/standseilbahnen/>
- Eck, C., Chapuis, J. & Geering, H., 2000. *Entwicklung einer Helikopterdrohne für den wissenschaftlichen Einsatz*. Berlin Heidelberg, Springer, pp. 231-238.
- Eckhardt, L., Dasrking, A. & Boberg, D., 2014. Gegenüberstellung des Dry Ports Konzepts mit dem Modell der Inland Depots. In: *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Logistikmanagements Nr. 12, Universität Bremen, FB 7*. Bremen: Lehrstuhl für ABWL und Logistikmanagement, pp. 1-38.
- Ehrlenspiel, K. K. A. L. U., 2007. *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Berlin: Springer-Verlag.
- EUROGATE, BIBA, 2010. *Projektabschlussbericht zum ISETEC II-Projekt "Seilbahn"*, s.l.: s.n.
- Fahrbach, J., Ritter, K. & Pallasch, A.-K., 2010. *ISETEC II: Abschlussbericht Projekt "Seilbahn"; Berichtszeitraum: 01.12.2008 - 30.06.2010*, Bremerhaven: s.n.

- Feyrer, K., 2000. *Drahtseile unter Zugbelastung*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Fläming, H., 2015. Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: *Autonomes Fahren, Teil III*. Berlin Heidelberg: Springer, pp. 377-398.
- Freeman, C. & Louca, F., 2001. *As Time Goes By: From the Industrial Revolution to the Information Revolution*. Oxford: OUP Oxford.
- Freeman, C. S. L., 1997. The Economics of Industrial Innovation. *MIT Press, Cambridge, Mass*, p. 17.
- Friedrich, O., 1967. *Monographie der Erzlagerstätten bei Schladmig*. s.l.:Archiv für Lagerstättenforschung in den Ostalpen.
- Grilli, S., 2008. Europa, Patentnr. EP1826153 B1.
- Gross, F., 2011. *Seilbahnlexikon*. Berlin: Epuli.
- Gudehus, T., 2010. *Logistik*. Heidelberg: Springer.
- Haag, C., Schuh, G., Kreysa, J. & Schmelter, K., 2011. Handbuch Produktion und Management 2 - Technologiebewertung. In: *Technologiemanagement*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 309-366.
- Hafen Hamburg Marketing, 2016. *Hafenplan*. [Online]
Available at: <https://www.hafen-hamburg.de/de/hafenplan>
- Hafen Hamburg Marketing, 2020. *Port of Hamburg*. [Online]
Available at: <https://www.hafen-hamburg.de/de/schiff-des-monats-containerschiff-hmm-algeciras>
[Zugriff am 16 09 2020].
- Hall, K., 2002. *Ganzheitliche Technologiebewertung*. Wiesbaden: Universitäts-Verlag.
- Hall, K., 2002. *Ganzheitliche Technologiebewertung. Ein Modell zur Bewertung unterschiedlicher Produktionstechnologien*. 1 Hrsg. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Hall, P., 2007. Seaports, Urban Sustainability, and Paradigm Shift. *Journal of Urban Technology*, V. 14, I. 2, pp. 87-101.
- Hall, P. & Robbins, G., 2007. Which Link, In Which Chain? . In: *Ports, Cities and Global Supply Chains*. Wildshire: Ashgate, pp. 221-232.
- Hautau, U., 2000. *Perspektiven der Schiffsgrößenentwicklung in der Containerschiffahrt - Herausforderungen für die deutsche Nordseehäfen?*. Wilhelmshaven, DVMG.
- Heaver, T., 2006. The Evolution and Challenges pf Port Economics. *Port Economics: Research in Transportation Economics*, pp. 11-41.
- Hefti, W., 1975. *Schienenseilbahnen in aller Welt*. Basel: Birkhäuser Basel.
- Helou, E. J., 2014. USA, Patentnr. US20140217230 A1.

- Henke, C. et al., 2007. RailCab - Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen. *Proceedings: Internationaler ETG-Kongress 2007*.
- Hickman, J., 1973. USA, Patentnr. US3735710 A.
- Hieronymus, S., Tintelnot, C. & v. Wickert-Nick, D., 1996. Technologiebewertung für Unternehmen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 45(4), pp. 26-31.
- Huttelmaier, H. & Carrick, J., 1992. *Ropeway material handling systems for lunar mining sites*. Denver, CO, s.n., pp. 1116-1126.
- Hwan, K. K., Phan, M.-H. & Woo, J., 2012. New Conceptual Handling Systems in Container Terminals. *Industrial Engineering and Management Systems* 11, pp. 299-309.
- HYSTER Europe, 2018. *H28-52XM-16CH EU-DE*. [Online] Available at: <https://www.norgatec.de>
- HYSTER Europe, 2018. *Reachstacker - Hyster*. [Online] Available at: <http://www.hyster.com/emea/de-de/produktreihe/produkt%C3%BCbersicht/containerhandler/reachstacker/>
- igus, 2018. *igus (r) Anwendungen*. [Online] Available at: <https://www.igus.de/wpck/1655/reachstackerscranes>
- IHS Global Insight, 2018. Containertransportmenge in der weltweiten Seeschifffahrt. In: Hapag-Lloyd, Hrsg. *Geschäftsbericht 2017*. s.l.:s.n., p. 89.
- Ioannou, P. & Jula, H., 2008. Automated Container Terminal Concepts. In: *Intelligent Freight Transportation*. s.l.:CRC Press, pp. 7-31.
- ISL, 2000. *Endbericht zum Projekt Entwicklungstendenzen der deutschen Nordseehäfen bis zum Jahre 2015*, Bremen: ISL.
- Jahn, P. D.-I. C., 2016. *Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Maritime Logistik*. [Online] Available at: <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/41349/>
- Jakarta Globe, 2013. *Monorail for Surabaya Port: Pelindo III*. [Online] Available at: <http://jakartaglobe.id/business/monorail-for-surabaya-port-pelindo-iii/> [Zugriff am 18 08 2018].
- James, K. A., 2008. Maglev Freight Conveyor Systems. In: *Intelligent Freight Transportation*. Boca Raton, FL: CRS Press, pp. 135-152.
- Jeep, W. v., 1883. *Beförderung der Baumaterialien auf horizontalen und geneigten Wegen*. Leipzig: Scholtze.
- Jiang, X., Chew, E. P. & Lee, L. H., 2015. Innovative Containerterminals to Improve Global Container Transport Chains. In: *Handbook of Ocean Container Transport Logistics*. Schweiz: Springer-Verlag, pp. 3-41.
- Kalmar Head Office Cargotec Finland Oy, 2017. [Online] Available at: <https://www.kalmarglobal.com/newsroom/images/>

- Kalmar Industries Oy Ab, 2008. *Kalmar Container Handling Systems*, s.l.: Kalmar.
- KFW, 2018. *Umweltfreundlich: Automated Guided Vehicles am Hafen von Long Beach in Kalifornien / KFW Stories*. [Online]
Available at: <https://www.kfw.de/stories/wirtschaft/mobilitaet/automatisierter-containertransport-kalifornien/>
- Kotzab, H., Reiner, G. & Teller, C., 2006. Beschreibung, Analyse und Bewertung von Instore-Logistikprozessen. In: *Journal of Business Economics*. Wien: Gabler, pp. 1135-1158.
- Krallmann, H., Schönherr, M. & Trier, M., 2007. *Systemanalyse in Unternehmen: Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*. 5. Auflage Hrsg. s.l.:Oldenbourg.
- Kremer, F., 2015. *Innovativ Seilbahn - Potentiale für den urbanen Personennahverkehr und Positionen beteiligter Akteure*. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.
- Kröll, M., 2007. *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung, Dissertation*, Leverkusen: Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement.
- Liebheer Container Cranes Ltd., 2018. *liebheer-straddle-carrier*. [Online]
Available at: <https://www.liebherr.com>
- Liedl, S., 1999. *Unterlagen zur Vorlesung Seilbahntechnik*. München: Technische Universität München.
- Lindemann, U., 2009. *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Little, A., 1986. *Management im Zeitalter der strategischen Führung*. Wiesbaden: s.n.
- Liu, H., 2000. *Pneumatic Capsule Pipeline—Basic Concept, Practical Considerations*, USA, Iowa State University.
- Löhr, M.-O., 2002. *Simulation der Stationseinfahrt kuppelbarer Einseilumlaufbahnen*. München: Löhr & Partner .
- Mankins, J., 1995. *Technology Readiness Levels. A White Paper*. [Online]
Available at: <http://fellowships.teiimt.gr/wp-content/uploads/2016/01/trl.pdf>
- Margaronis, S., 2018. *EagleRail Proposes Automated and Electric Power Container Conveyance for Ports*. [Online]
Available at: <https://www.ajot.com/blogs/full/blog-eag-lerail-proposes-automated-and-electric-power-container-conveyance-for-ports> [Zugriff am 18 08 2018].
- Menius, R. & Matthews, V., 2017. *Bahnbau und Bahninfrastruktur*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Mitschke, F., Nendel, K., Helbig, R. & Arnold, R., 2008. *Neues Trageilfördersystem für den Stückguttransport*, Chemnitz: Tu Chemnitz.
- Mousavipour, S., 2015. *Feasibility of underground freight transportation (UFT) in Texas*. s.l.:University of Texas at Arlington.

Müller & Krauß, 1980. *Handbuch für die Schiffsführung*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.

Nds. Ministerium für Wirtschaft, A. u. V., 2016. *Machbarkeitsstudie neuer Tiefwasserseehafen in Wilhelmshaven*. [Online]

Available at: <http://www.mw.niedersachsen.de/aktuelles/presseinformationen/ergebnis-machbarkeitsstudie-jadeweserport-ii-liegt-vor-140963.html>

Neumann, E., Banasso, S. & Abel, D., 1985. Modern material ropeway capabilities and characteristics. *Journal of Transportation Engineering*, pp. 651-663.

Neumann, E. S., Bonasso, S. & Dede, A., 1985. Modern Material Ropewas Capabilities and Characteristics. *Journal of Transportation and Engineering, Vol. 111, Issue 6*.

Nikšić, M. & Gašparović, S., 2010. Geographic and Traffic Aspects of Possibilities for Implementing Ropeway Systems in Passanger Transport. *Traffic&Transportation - Scientific Journal on Traffic and Transportation Research*, pp. 389-398.

Nuhn, H., 2010. Containersisierung und Globalisierung - Restrukturierung der maritimen Logistikkette. *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie, Jg. 54 Heft 3-4*, pp. 150-165.

Oberschmidt, J., 2010. *Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme*. Dissertation: Universität Göttingen.

OECD, 2015. *International Transport Forum*. [Online]

Available at: <http://www.itf-oecd.org/impact-mega-ships>

Pallasch, A.-K., Heitkötter, J. & Echelmeyer, W., 2010. *Ropeway for marine containers. Innovative transport system for seaport terminals*. Lisbon, Portugal, IAME.

Pallasch, A.-K., Heitkötter, J. & Scholz-Reiter, B., 2010. *Innovative Transport System for Seaport Terminals - Ropeway for Marine Containers*. Busan, Korea, s.n., pp. 313-322.

Pallasch, A.-K., Piworus, S. & Rickert, L., 2015. Innovatives Transportsystem im Eurogate-Terminal. Eine Seilbahn für Container. *Hebezeuge Fördermittel, 50*, pp. 254-255.

Parasuraman, A., 2000. Techology Readiness Index (Tri). *Journal of Service Research*, 1 5, pp. 307-320.

Pfeiffer, W. & Dögl, R., 1986. Das Technologie-Portfolio-Konzept zur Beherrschung der Schnittstelle Technik und Unternehmensstrategie. In: *Strategische Unternehmensplanung — Strategische Unternehmensführung. Stand und Entwicklungstendenzen*. Heidelberg/Wien: s.n., pp. 149-177.

Pfeiffer, W. & Weiß, E., 1995. Methoden zur Analyse und Bewertung technologischer Alternativen. In: E. Zahn, Hrsg. *Handbuch Technologiemanagement*. Stuttgart: s.n.

Pielage, B.-J., 2001. *Underground Freight Transportation. A new development for automated freight transportation systems in the Netherlands*. Oakland (CA) USA, IEEE, pp. 762-767.

Poehls, C., 2000. Technische Perspektiven der Größenentwicklung in der Containerschifffahrt. *Schiff & Hafen 10*, pp. 11-24.

- Poehls, C., 2002. Grenzen des Wachstums bei Containerschiffen. *Internationales Verkehrswesen* 10, pp. 501-502.
- Polonia, A., 2016. Portos. In: *Dicionario Da Expansao Portuguesa, Vol II*. Lisboa: Circulo de Leitores, pp. 873-879.
- Port of Antwerp, 2016. *Public map of the port*. [Online]
Available at: <http://www.portofantwerp.com/en/my-poa/services/port-map>
- Port of Rotterdam, 2016. *Container Terminals and Depots in the Rotterdam Port Area*. [Online]
Available at: <https://www.portofrotterdam.com/de/transport-und-industrie/container/container-terminals>
- Qian, M., 2010. Research of Transportation Way by Cargo Cableway in Construction of Power Grid. *North China Electric Power*.
- Qian, M. X.-S. B., 2008. Research and Calculation Model based on suspension cable theories in Construction Cargo Cableway. *Power System Technology*.
- Raschen, D. M., 2015. Welthandel mit interessanten, aber auch bedenklichen Trends. In: *KFW Economic Research*. s.l.:KFW Economic Research.
- Reichenbach, M. & Puhe, M., 2016. *Praxis urbaner Luftseilbahnen. Projekt "Hoch hinaus in Baden-Württemberg: Machbarkeit, Chancen und Hemmnisse urbaner Luftseilbahnen in Baden-Württemberg", Arbeitsbericht Nr. 1*, Karlsruhe: Institut für Technikfolgeabschätzung und Systemanalyse.
- Rijsenbrij, J., Pielage, B. & Visser, J., 2006. *State of the art on automated (underground) freight transport systems for the EU-TRND project*, s.l.: s.n.
- Rodrique, J.-P., Comtois, C. & Slack, B., 2009. *The geography of transport systems*. London: Routledge.
- Rodrique, J.-P. & Notteboom, T., 2009. The terminalization of supply chains: reassessing the role of terminals in port/hinterland logistical relationships. In: *Maritime Policy & Management, Vol. 36, Iss. 2*. s.l.:Rouledge, pp. 165-183.
- Roop, S. et al., 2000. *The Technical and Economic Feasibility of a Freight Pipeline System in Texas - Year 1 Report*, USA: Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation, 1519-1.
- Ropohl, G., 1996. *Ethik und Technikbewertung*. Frankfurt: Suhrkamp.
- Roso, V. W. J. a. L. K., 2009. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. *Journal of Transport Geography, vol. 17, no. 5*, pp. 338-345.
- Rudolph, K., 2009. Anwendungsfälle und Lösungsansätze zur Realisierung urbaner Luftseilbahnprojekte im ÖPNV. In: *Schriftenreihe des Instituts für Transportwirtschaft und Logistik - Verkehr*. Vienna: Institut für Transportwirtschaft und Logistik, WU Vienna University of Economics and Business.

- Rummel, S., 2014. *Eine bewertungsbasierte Vorgehensweise zur Tauglichkeitsprüfung von Technologiekonzepten in der Technologieentwicklung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Scaccianoce, N., 2016. *Innovation in infrastructures: An analysis of seaport innovation with an application in Goetheburg (Dissertation)*. s.l.:School of Economics & Management, Universidade de Lisboa.
- Schimpf, S. & Rummel, S., 2015. Bewertung von technischen Entwicklungen . In: *Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotentiale systematisch bewerten*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Schmeisser, W. & Solte, M., 2010. Technologiecontrolling und Innovationserfolgsrechnung im Rahmen des Technologie-Life-Cycle. Technologiecontrolling. In: *Technologiemanagement und Innovationserfolgsrechnung*. München: Oldenbourg, p. 31.
- Schnieder, L., 2014. Öffentlicher Personennahverkehr im Jahr 2050 - Was könnte wirklich anders sein?. In: *Technikfolgeabschätzung - Theorie und Praxis, Band 23*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), pp. 38-45.
- Schönemann, R. & Plattner, T., 2012. Innovative Freight Transport Systems for Port and Terminals. In: H. Golinska, Hrsg. *Sustainable Transport*. Berlin Heidelberg: Springer, pp. 295-315.
- Schönknecht, D. A., 2009. *Maritime Containerlogistik*. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schwarz, F., 2006. FOKUS Haentechnik: Hinterland-Terminals - Typen und Umsetzung. *Hebezeuge Fördermittel, 46*, p. Berlin.
- Sedivy, P., 2012. *Vorlesungsunterlagen - Seilbahnbau*. Innsbruck: Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich intelligente Verkehrssysteme. Universität Innsbruck.
- Shin, S., Roh, H.-S. & Hur, S.-H., 2018. Technical Trends Related to Intermodal Automated Freight Transportation Systems (AFTS). *The Asian Journal of Shipping Logistics*, Band 2, pp. 161-169.
- Skytech Transportation, 2017. *Skytech Transportation, Inc.* [Online]
Available at: <http://skytech.wacinternational.com/>
[Zugriff am 18 08 2018].
- Springer Gabler Verlag, 2017. *Stichwort: Twenty Foot Equivalent Unit (TEU)*. [Online]
Available at: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/82246/twenty-foot-equivalent-unit-teu-v7.html>
- Stahlbock, R. & Voß, S., 2007. Operations research at container terminals: a literature update. *OR Specturum (2008) 30*, pp. 1-52.
- Statista, 2016. *Größte Betreiber von Containerterminals in weltweiten Häfen nach Containerumschlag im Jahr 2014 (in Millionen TEU)*. [Online]
Available at: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171837/umfrage/top-10-betreiber-von-containerterminals-in-weltweiten-haefen/>
- Statista, 2018. Die größten Häfen der Welt nach Container-Umschlagsvolumen. In: M. D. (. Kong), Hrsg. s.l.:s.n.

- Statista, 2018. *Dossier: Containerschifffahrt*, s.l.: s.n.
- Stopford, M., 2009. *Maritime Economics, 3rd Edition*. London: ed. Routledge.
- Swiss Cargo Tube, 2017. *CST*. [Online] Available at: www.cst.ch [Zugriff am 15.06.2017].
- Terex Germany GmbH & Co KG, 2016. *Automatisierte Containerstapelkrane ASC*. [Online] Available at: <http://www.terex.com/port-solutions/de/products/stacking-cranes/automated-stacking-cranes/index.htm>
- Texas A&M Transportation Institute, 2018. Freight Shuttle System. *Teas Transportation Researcher*, 52(3), pp. 6-9.
- The Korea Transport Institute, 2011. *KOTI World Brief*. Vol. 3 Hrsg. Korea: s.n.
- Tiansheng, H. et al., 2011. Circular Chain Ropeway for Cargo Transportation in Mountain Citrus Orchard. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*.
- TU Berlin, 2017. *Forschung, Projektübersicht*. [Online] Available at: https://www.railways.tu-berlin.de/menue/forschung/projektuebersicht/innovative_und_alternative_transportsysteme_in_der_seehafen_logistik/
- U+S Ausschuss der See-BG, 2003. *Richtlinien für die Überwachung der Schiffsstabilität*, s.l.: s.n.
- United Nations Conference on Trade and Development, 2016. *UNCTADSTAT*. [Online] Available at: <http://unctadstat.unctad.org/wds/TableView/tableView.aspx?ReportId=13321>
- VDI 2206, 2004. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- VDI 2221, 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI.
- VDI 3780, 1991. *Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Veenstra, A. Z. R. a. v. A. E., 2012. The extended gate concept for container terminals: Expanding the notion of dry ports. *Maritime Economics and Logistics*, vol. 14, no. 1, pp. 14-32.
- Verband für Schiffbau und Meerestechnik (VSM), 2018. *Jahresbericht 2017/2018*, s.l.: s.n.
- Wan, Y., Zhang, A. & Yuen, A., 2013. Urban road congestion, capacity expansion and port competition: empirical analysis of US container ports. *Maritime Policy & Management*, pp. 417-438.
- Wirtschaftslexikon Springer Gabler, 2017. *Stichwort: Drohne*. [Online] Available at: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2046774188/drohne-v2.html>
- Xinsheng, L., 1999. Research and Design of lined oscillating saddle. *Mining and Metallurgy*.
- Yang, C., Choi, Y. & Ha, T., 2004. Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals. *OR Spectrum*, Issue 26, pp. 149-170.
- Yang, R. L. Q., 2017. Research on the system technology for automated container terminal. *29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Band Chongqing, pp. 3463-3466.