

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

CO2-Bilanz – Multimodale Logistikknoten:

Erweiterung des Methodenbaukastens CO2-Bilanz zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknoten

der Forschungsstelle(n)

Institut für Transportlogistik

Das IGF-Vorhaben N17961 N/1 der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL) wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dortmund, 18.04.2016

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | 2 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 4 |
| Tabellenverzeichnis..... | 5 |
| Kurzfassung..... | 6 |
| 1 Forschungsthema..... | 7 |
| 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung | 9 |
| 2.1 Anlass für das Forschungsvorhaben | 9 |
| 2.2 Ausgangssituation | 12 |
| 2.2.1 Methoden zur Ermittlung von Treibhausgasen in der Logistik | 14 |
| 2.2.2 Simulation | 17 |
| 3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg..... | 19 |
| 3.1 Forschungsziel..... | 19 |
| 3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse und innovativer Beitrag..... | 19 |
| 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse..... | 20 |
| 4.1 Arbeitspaket 1: Analyse der MML..... | 20 |
| 1.1.1. Systembeschreibung und potentiell abzubildende Ressourcen und Layoutobjekte | 20 |
| 1.1.2. Prozessanalyse und Katalog mit allen logistikrelevanten Prozessen | 31 |
| 4.2 Arbeitspaket 2: Validierung von Literatur- und Herstellerangaben mittels Verbrauchsmessungen | 45 |
| 4.3 Arbeitspaket 3: Ermittlung und Bewertung der Einflussfaktoren auf die Verbräuche | 50 |
| 4.4 Arbeitspaket 4: Simulative Verknüpfung der Einflussfaktoren und Messwerten zu allokierten Emissionswerten auf Behälterebene | 55 |
| 4.5 Arbeitspaket 5: Erweiterung des Methodenbaukastens um das Multimodale Logistikknoten Modul | 59 |
| 4.6 Arbeitspaket 6: Validierung und Implementierung des erweiterten Methodenbaukastens mit den Partnern | 69 |
| 4.7 Arbeitspaket 7: Dokumentation und Transfer in die Praxis | 70 |
| 5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse..... | 71 |
| 6 Verwendung der Zuwendung..... | 73 |
| 7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 74 |
| 8 Dissemination der Forschungsergebnisse | 75 |
| 8.1 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts | 77 |
| 9 Durchführende Forschungsstelle | 79 |

| | | |
|-----|-----------------------------------|----|
| 9.1 | Leiter der Forschungsstelle | 79 |
| 9.2 | Projektleitung | 79 |
| 10 | Hinweis zur Förderung | 80 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 81 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Entwicklung der Fahrleistung und des Modal Splits (aktualisierte Darstellung von Clausen 2008b) | 10 |
| Abbildung 2: Transportprozesskette für einen multimodalen Transport (Luft und Muschiet 2012, S. 21)..... | 12 |
| Abbildung 3: Funktionsbereiche eines Containerterminals in Anlehnung an [Ste04, S. 6]..... | 21 |
| Abbildung 4 - Funktionsbereiche und Ressourcen | 31 |
| Abbildung 5 - Prozesskette: LKW-Durchlauf | 32 |
| Abbildung 6 - Umschlagabwicklung des LKW im Versand | 33 |
| Abbildung 7 - Umschlagabwicklung des LKW im Empfang | 33 |
| Abbildung 8 - Umschlagsabwicklung in Abhängigkeit der Anzahl versendeter oder empfangener Ladeeinheiten..... | 34 |
| Abbildung 9 - Prozesskette: Eingehende Züge | 35 |
| Abbildung 10 - Prozesskette ausgehender Züge | 36 |
| Abbildung 11 - Prozesskette eingehender Schiffe | 37 |
| Abbildung 12 - Prozesskette ausgehender Schiffe | 37 |
| Abbildung 13 - Prozessabfolge Kran..... | 38 |
| Abbildung 14 – Kranspiel..... | 38 |
| Abbildung 15 - Prozessabfolge für Flurfördermittel..... | 39 |
| Abbildung 16 - Prozesskette für Flurfördermittel im Transport und Umschlag | 39 |
| Abbildung 17 - Prozesskette für Flurfördermittel des Transports..... | 40 |
| Abbildung 18 - Umschlag pro Jahr in TEU | 41 |
| Abbildung 19 – Containermix | 42 |
| Abbildung 20 - Verteilung der vollen und leeren Container..... | 42 |
| Abbildung 21 - Verweilzeit leerer und voller Container im Terminal | 43 |
| Abbildung 22 - Ladeschluss | 44 |
| Abbildung 23 - Tagesganglinie der trimodalen Terminals..... | 45 |
| Abbildung 24: Tagesganglinie der LKW Ankünfte in bimodalen Terminals | 45 |
| Abbildung 25 - Auszug aus dem Katalog für Mobilkrane | 46 |
| Abbildung 26 - Auszug aus dem Katalog für RMGs..... | 46 |
| Abbildung 27 - Auszug aus dem Katalog der RTGs | 46 |
| Abbildung 28 - Auszug aus dem Katalog der Portalhubwagen..... | 47 |
| Abbildung 29 - Auszug aus dem Katalog für Reach-Stacker | 47 |
| Abbildung 30 - Auszug aus dem Katalog für Containerzugmaschinen..... | 47 |
| Abbildung 31 - Auszug aus dem Katalog für Portalhubwagen..... | 47 |
| Abbildung 32 - Auswertung der Messgeräte | 49 |
| Abbildung 33 - Tagesganglinie der aufgenommenen Wirkleistung..... | 50 |
| Abbildung 34 - Ergebnis der Expertenbefragung | 51 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 35 - Verbrauch pro Containerklasse..... | 52 |
| Abbildung 36 - Verbrauch in Abhängigkeit der Wegstrecke pro Spiel | 53 |
| Abbildung 37 - Wirkleistung pro Entfernungsklasse..... | 53 |
| Abbildung 38 – Einfluss der Rekuperation | 54 |
| Abbildung 39 - Energieverbrauch pro Entfernungsklasse..... | 54 |
| Abbildung 40 - Verbrauch pro Entfernungsklasse für 40 (links)- und 20 Fuß-Container (rechts)..... | 56 |
| Abbildung 41 - TerminalSim 1 | 57 |
| Abbildung 42 - TerminalSim 2 | 57 |
| Abbildung 43 - TerminalSim 3 | 58 |
| Abbildung 44 - TerminalSim 4 | 58 |
| Abbildung 45 - TerminalSim 5 | 58 |
| Abbildung 46 - Registerkarten im MS- Excel Demonstrator..... | 59 |
| Abbildung 47 - Registerkarten im MS- Excel Demonstrator..... | 59 |
| Abbildung 48 - Tabellenblatt "Simulationswerte" | 60 |
| Abbildung 49 - Tabellenblatt "Terminaldaten" | 61 |
| Abbildung 50 - Terminalskeizze | 62 |
| Abbildung 51 - Tabellenblatt "Kran" | 62 |
| Abbildung 52 - Tabellenblatt Reach Stacker | 63 |
| Abbildung 53 - Tabellenblatt "Strategie"..... | 64 |
| Abbildung 54 - Tabellenblatt "Stationäre Verbraucher"..... | 64 |
| Abbildung 55 - Tabellenblatt "EG_Kran" | 65 |
| Abbildung 56 - Tabellenblatt "Auswertung Kran" | 66 |
| Abbildung 57 - Tabellenblatt Auswertung "Reach Stacker" | 66 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1 - Kombinationen in der Umschlagabwicklung | 34 |
| Tabelle 2 - Beispiel eines Prozesserfassungsbogens..... | 48 |
| Tabelle 3 - Containerklassen..... | 52 |
| Tabelle 4- Entfernungsklassen..... | 53 |
| Tabelle 5 - Allokierete Verbrauchsdaten auf Containererebene | 56 |
| Tabelle 8-1: Dissemination der Ergebnisse..... | 75 |

Kurzfassung

Gemäß dem britischen Vorbild streben auch hierzulande Verlader aus Industrie und Handel danach, ihre Umweltwirkung produktbezogen auszuweisen. Da die Meisten Verlader innerhalb Ihrer Lieferketten auf Logistikdienstleister zurückgreifen, sind auch diese zur Ausweisung sämtlicher Treibhausgasemissionen aufgefordert. Obwohl eine Vielzahl an Normen und Richtlinien (u.a. ISO 14064-1, ISO 14065, DIN EN 14040, DIN EN 14044, PAS 2050) zur Allokation von Treibhausgasemissionen existieren, ist es für Logistikdienstleister eine große Herausforderung die Zuweisung der CO₂-Emissionen für einzelnen Kunden darzustellen. Trotz zahlreicher Hilfestellungen durch die genannten Richtlinien existieren keine standardisierten Ansätze für die Emissionsbemessung logistischer Prozesse. Durch die lückenhaften oder fehlenden Ansätze sind eine genaue Bilanzierung der Umweltbelastung der Prozesse und deren regelmäßige Aktualisierung sehr aufwendig.

Zur Berechnung der THG-Emissionen im Verkehrssektor ist im vorangegangenen Forschungsprojekt „Methodenbaukasten CO₂-Bilanz“ (MBK) je ein Demonstrator für die Verkehrsträger Straße, Schiene, See- und Binnenwasserstraße, Strecken der Luftfahrt sowie für die stationären Prozesse innerhalb einer logistischen Anlage entwickelt worden. Hierbei stellte sich heraus, dass Prozesse insbesondere in Multimodalen Logistikknoten (MML), wie (Binnen-) Häfen, Güterverkehrszentren (GVZ) und Terminals mit den dazugehörigen Kranen und Terminalfahrzeugen, bisher ausschließlich über den Gesamtenergieverbrauch abzubilden sind. Eine exakte Zuordnung der THG-Emissionen auf einzelne Umschlagvorgänge und damit auf bestimmte Ladeeinheiten ist so nur beschränkt möglich. Die Methodenlandschaft zur ganzheitlichen ökologischen Bewertung logistischer Prozesse ist somit weiterhin unvollständig.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es KMU ein Instrument zu liefern, welches diese Lücke schließt und ihnen die genauere Berechnung von THG-Emissionen bei Umschlägen in MML ermöglicht. Hierzu werden die vorhandenen MBK-Demonstratoren um das Demonstratormodul „CO₂-Methodenbaukasten - Modul - Multimodale Logistikknoten“ erweitert. Das MML-Modul wird mit aus Literatur- und Herstellerangaben sowie gemessenen Verbrauchsdaten von Kranen und Terminalfahrzeugen arbeiten. Mit diesen Daten können diverse Einflussfaktoren wie beispielsweise das Terminlayout oder das Kranalter berücksichtigt werden. Durch den Einsatz der Simulation ist eine exaktere Schließung der vorhandenen Datenlücke möglich.

Im Ergebnis entsteht ein anwendungsorientierter und transparenter Excel-Bilanzierungs-Demonstrator mit exakten Mess- und simulativ allokierten Emissionswerten auf Behälterebene für verschiedene Anwendungsfälle, der in den existierenden MBK integriert wird. KMU werden dadurch in die Lage versetzt Produkte des kombinierten Verkehrs inklusive einer CO₂-Bilanz auf Behälterebene anzubieten. Damit soll eine Sicherung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU erreicht werden.

1 Forschungsthema

Der Verkehrssektor hat die geringsten Kohlendioxid(CO₂)-Emissionsrückgänge seit 1990 erbracht. Darüber hinaus ist der prozentuale Anteil des Verkehrs am gesamten Energieverbrauch seit 1990 gestiegen und liegt inzwischen zusammen mit dem Industriesektor an erster Stelle. (UBA 2013, BMWI 2013) Dadurch ist eine Vielzahl von gesellschaftlichen und politischen Diskussionen, Entwicklungen und Prozessen entstanden, welche einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrssektor haben. Grundsätzlich wird in der EU-Kommission ein CO₂-Einsparziel von 40 % bis 2030 angestrebt (DPA 2013).

Als erster Verkehrsträger wurde die Straße mit entsprechenden Maßnahmen zur Zielerreichung belegt. So orientieren sich die Mautgebühren von Lkw am Schadstoffausstoß, um den Einsatz verbrauchsarmer Motoren zu fördern und dadurch den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Im Straßenverkehr existiert außerdem ein Anreizsystem, welches die Produktion verbrauchsarmer Fahrzeuge fördern soll: Hierzu wurden Grenzwerte für den durchschnittlichen Flottenverbrauch der Fahrzeughersteller festgelegt (Verordnung (EG) Nr. 443/2009). Bei Überschreitung dieser sind Strafzahlungen zu entrichten. Als weiterer betroffener Verkehrsträger wurde der Luftverkehr im Jahr 2009 in das europäische Emissionshandelssystem aufgenommen, wovon bisher ausschließlich Industrie- und Energieunternehmen betroffen waren.

Länderspezifische Maßnahmen sind ebenfalls zu beobachten: Ab Oktober 2013 tritt die französische Verordnung 2011/1336 „Information über die Menge der CO₂-Emissionen“ in Kraft. Sie legt fest, dass Logistikdienstleister (LDL), die einen kommerziellen Transport mit Start- und/oder Zielpunkt in Frankreich durchführen, die anfallenden CO₂-Emissionen zu bilanzieren und auszuweisen haben. Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) dürfen dabei mit von den französischen Behörden veröffentlichten Vorgabewerten rechnen. (Kranke 2013, S. 28-29) Eine ähnliche Entwicklung, die jedoch nicht auf den Verkehrssektor beschränkt ist, ist in Großbritannien festzustellen, wo die ca. 1.600 an der Londoner Börse notierten Unternehmen ab April 2013 ihre THG-Bilanz offenlegen müssen. (adelphi 2012)

Des Weiteren entstehen auch für Industrieunternehmen Anforderungen im Bereich „Grüne Logistik“: Mit der im März 2013 in ihrer Endfassung veröffentlichten Norm DIN EN 16258 besteht ein einheitlicher europäischer Standard zur Ermittlung und Ausweisung von THG-Emissionen von Transportdienstleistungen.

Zur Berechnung der THG-Emissionen im Verkehrssektor ist im vorangegangenen Forschungsprojekt „Methodenbaukasten CO₂-Bilanz“ (MBK) je ein Demonstrator für die Verkehrsträger Straße, Schiene, See- und Binnenwasserstraße, Strecken der Luftfahrt sowie für die stationären Prozesse innerhalb einer logistischen Anlage entwickelt worden. Hierbei stellte sich heraus, dass Prozesse insbesondere in Multimodalen Logistikknoten (MML), wie (Binnen-) Häfen, Güterverkehrszentren (GVZ) und Terminals mit den dazugehörigen Kranen und Terminalfahrzeugen, bisher ausschließlich über den Gesamtenergieverbrauch abzubilden sind. Eine exakte Zuordnung der THG-Emissionen auf einzelne

Umschlagvorgänge und damit auf bestimmte Ladeeinheiten ist so nur beschränkt möglich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass ca. 25 % der Gesamtemissionen eines Transportes auf stationäre Prozesse, wie dem Umschlag entfallen. (Clausen 2008a, Jahn 2010, Kranke et al. 2011) Zur Berechnung der THG-Emissionen im Kombinierten Verkehr (KV) sowie im multimodalen Hafenhinterlandverkehr dürfen demnach die Prozesse in MML nicht vernachlässigt werden. Das steigende Verkehrsaufkommen, welches nicht alleine über die Straße bewältigt werden kann, wird zudem in Zukunft die Bedeutung von MML erhöhen.

Ziel ist es KMU ein Instrument zu liefern, welches die erkannte Datenlücke schließt und ihnen die genauere Berechnung von THG-Emissionen bei Umschlägen in MML ermöglicht. Hierzu werden die vorhandenen MBK-Demonstratoren um das Demonstratormodul „CO₂-Methodenbaukasten - Modul - Multimodale Logistikknoten“ erweitert.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Der Klimawandel und die damit einhergehenden negativen Entwicklungen, wie steigende Temperaturen, Extremwetterereignisse und weitere witterungsbedingte Einflüsse, sind auf den Ausstoß von Treibhausgasen (THG) und darunter insbesondere Kohlenstoffdioxid (CO₂) Gase zurückzuführen, welche als klimaschädlich gelten. Um diesen Auswirkungen entgegenzuwirken und die THG-Emissionen zu reduzieren, werden verstärkt sowohl nationale als auch internationale Maßnahmen getroffen.

Während der weltweite Ausstoß an Treibhausgasen kontinuierlich zunimmt (CSC 2012), konnte Deutschland im Jahr 2011 einen Rückgang des CO₂-Ausstoßes von 3,4 % im Vergleich zum Vorjahr erreichen. 2012 stieg der CO₂-Ausstoß jedoch auch hier wieder um 2 % an. Somit wird angenommen, dass die Phasen der relativen wirtschaftlichen Schwäche in 2009 und 2011 zu diesen Rückgängen beigetragen haben. (UBA 2013, BMWI 2013)

Mit den getroffenen Maßnahmen ist es Deutschland insgesamt zwar gelungen, die Vorgaben des Kyoto-Protokolls schon seit dem Jahr 2008 zu erfüllen (UBA 2013). Der Verkehr, als einer der vom Umweltbundesamt betrachteten Sektoren, zeigte sich bisher jedoch nicht in der Lage, Maßnahmen umzusetzen, die eine ähnliche Emissions-Reduzierung erwirken konnten, wie beispielsweise das verarbeitende Gewerbe, private Haushalte oder die Energiewirtschaft. Der Verkehr insgesamt konnte seit 1990 die CO₂-Emissionen um 5,1 % senken, jedoch liegt der Rückgang der CO₂-Emissionen in Deutschland insgesamt bei 21 %. So hat das verarbeitende Gewerbe im selben Zeitraum 34,9 %, die privaten Haushalte 33,1 % und die Energiewirtschaft 14,8 % CO₂-Emissionen eingespart. Damit hat der Verkehr den geringsten Rückgang aller vom Umweltbundesamt betrachteten Wirtschaftssektoren erreicht. (UBA 2013) Wird ausschließlich der Güterverkehr betrachtet, sind dessen CO₂-Emissionsmengen im Zeitraum von 1995 bis 2010 sogar um 13 % gestiegen (Thomas 2012, S. 506).

Da der Verkehr mit einem Anteil von 20 % an den emittierten THG ein gewichtiger Sektor ist, ist die Umsetzung erfolgreicher Maßnahmen in diesem Bereich erforderlich. Lediglich der Sektor „Energiewirtschaft“ ist mit einem Anteil von 47 % der THG-Emissionen von größerer Bedeutung. (UBA 2013) Der Trend der Zunahme der verkehrsbedingten THG-Emissionen ist nicht nur für Deutschland sondern auch international erkennbar. Während die gesamten THG-Emissionen der UNFCCC-Länder¹ von 1990 bis 2005 um 2 % sanken, nahmen diese im Verkehrssektor im selben Zeitraum um 43 % zu. In Europa (EU-15) stiegen die Verkehrsemissionen um 22 %. (Organisation for Economic Co-operation and Development 2010)

Ein Grund für die im Verkehr schwer zu reduzierenden absoluten THG-Emissionen ist der anhaltende Trend der steigenden Transportleistung sowie des steigenden Transportaufkommens (siehe

¹ United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen), 194 Länder, Stand 06.03.2013

Abbildung 1). Die ergriffenen Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen wurden so vom steigenden Verkehr überkompensiert.

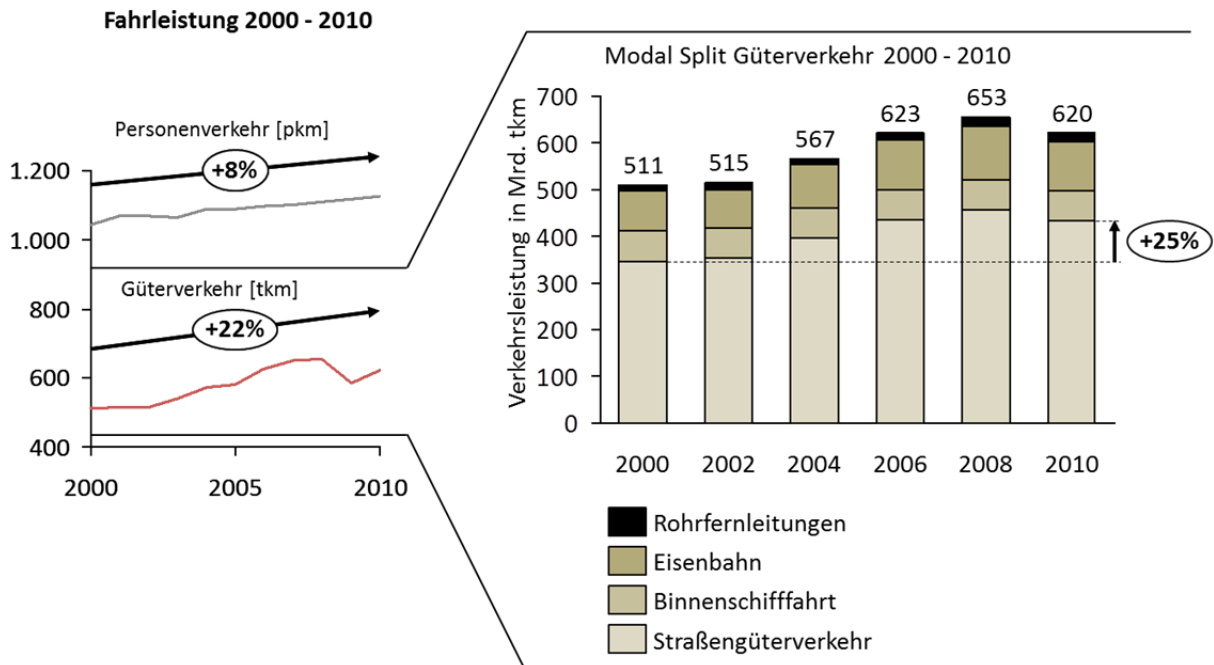


Abbildung 1: Entwicklung der Fahrleistung und des Modal Splits (aktualisierte Darstellung von Clausen 2008b)

Nach aktuellen Verkehrsprognosen des Bundesverkehrsministeriums auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wird bis zum Jahr 2025 beim Transportaufkommen mit einer Zunahme von 48 % und bei der Transportleistung mit einer Zunahme von 74 % gerechnet, so dass weitere Anstiege der CO₂-Emissionsmengen in diesem Bereich zu erwarten sind. (BMVBS 2007) Mit der kurzfristigen Entwicklung von wirkungsvollen Maßnahmen, die die jetzigen Emissionen und zusätzlich das zukünftig zu erwartende Wachstum kompensieren können, ist derzeit nicht zu rechnen.

Eine Möglichkeit mit Potentialen zur Reduktion der THG im Güterverkehr ist die Verkehrsverlagerung von der Straße auf andere Verkehrsträger (IPCC 2007, S. 20). Da jedoch kein anderer Verkehrsträger auch nur eine annähernd gleich große Netzabdeckung bietet wie die Straße², ist eine Verknüpfung der verschiedenen Verkehrsträger hierfür in der Regel erforderlich. Eine solche Verknüpfung innerhalb eines Transportes, ist der Kombinierte Verkehr (KV). „Der Kombinierte Verkehr ist eine Form der Transportabwicklung, bei der das Frachtgut beim Transport von der Quelle [...] zur Senke [...] in einer Ladeinheit des Kombinierten Verkehrs durchgehend [...] mit mehreren Verkehrsträgern, die als Transportkette hintereinander geschaltet sind, befördert wird“ (Arnold et al. 2008, S. 736). Im Rahmen der Transportkette wird der Hauptlauf mit einem Schienen- oder Wassertransportmittel durchgeführt. Diese sind klima- und umweltfreundlicher als der Lkw, der durchschnittlich 164 Gramm CO₂ pro tkm

² Das deutsche Verkehrsnetz gliederte sich 2011 in über 680.000 km Straßen, welche sich in 230.800 km überörtliches und ca. 450.000 km kommunales Straßennetz unterteilen, sowie in 37.700 km Schienennetz (2010) und 7.700 km Bundeswasserstraßen. (Statistisches Bundesamt 2012, S. 593; DStGB 2012)

emittiert. Bei der Bahn sind es durchschnittlich 48,1 und dem Binnenschiff 33,4 Gramm CO₂ pro tkm. (WSV 2013) Der Lkw wird in den meisten Fällen für den Vor- und Nachlauf innerhalb der Transportkette eingesetzt. Es erfolgt somit im Rahmen der Transportkette des KV mindestens ein Umschlag. (Pfohl 2010, S. 160) Des Weiteren enthält der KV zusätzlich mindestens einen Modalitätswechsel. Ähnlich verhält es sich mit multimodalen Hafenhinterland- und anderen multimodalen Transporten, welche in der Literatur vom KV unterschieden werden. Eine Differenzierung dieser Transportvarianten ist nicht erforderlich, da sich die Unterschiede häufig lediglich auf die Organisationsformen des Transportes, nicht aber auf die operative Durchführung des Umschlags beziehen.

Im Jahr 2010 erholte sich der KV besonders stark von der Krise und wuchs im Vergleich zum Vorjahr um 10,6 %. Der KV stieg dabei bei allen Verkehrsträgern stärker an als der jeweilige Gesamtverkehr. (Reim 2011, S. 762) Auch laut der Verkehrsprognose 2025 wird der Anteil des KV im Schienenverkehr von 16,3 % im Jahr 2004 auf 26,3 % im Jahr 2025 zunehmen. (BMVBS 2007)

Wirtschaftlich möglich ist ein solcher, klimafreundlicherer Transport bisher nur auf Relationen mit einer Entfernung von mindestens 300-500 km (Arnold et al. 2008, S. 745). Während die entstehenden Umschlagkosten bei kurzen Entfernungen den Vorteil geringerer Hauptlaufkosten pro km überdecken, fallen sie bei weiten Entfernungen weniger ins Gewicht, so dass die geringeren Hauptlaufkosten pro km den Umschlag rentabel machen. Das bedeutet, dass ein multimodaler Transport abgesehen von ökologischen Vorteilen auch ökonomisch umso attraktiver wird, je größer die im Hauptlauf zu überbrückende Entfernung ist. Da aus dem stärkeren Wachstum der Transportleistung gegenüber dem Transportaufkommen, eine eindeutige Tendenz zu längeren Transportentfernungen ableiten lässt, kann also angenommen werden, dass multimodale Transporte in Zukunft stärker nachgefragt werden. Im Rahmen der Verkehrsprognose wird erwartet, dass bis 2025 die mittleren Transportweiten auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland um 18 % zunehmen. (BMVBS 2007)

Um Maßnahmen entwickeln zu können, die an den Emissionsintensivsten Stellen angreifen können, ist zunächst die Möglichkeit zur möglichst exakten Bilanzierung und Allokation von THG-Emissionen zu schaffen. Diese Möglichkeit besteht zum einen für Transporte, die mit einem einzelnen Verkehrsträger durchgeführt werden. Zum anderen können die THG-Emissionen für eine Transportkette ermittelt werden, indem diese für jeden Transportabschnitt allokiert werden. Die Emissionen der dazugehörigen Umschlagprozesse können bisher anhand des Gesamtenergieverbrauchs der logistischen Anlage bestimmt werden. Für beide Anwendungsfälle wurden bereits im Vorgängerprojekt Demonstratoren erstellt. Die Bestimmung der THG-Emissionen anhand des Gesamtenergieverbrauchs für den Umschlag entspricht jedoch einer sehr ungenauen Methode und ist somit für die Ausweisung der THG-Emissionen auf Behälterebene, in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren, nicht ausreichend. Dies gilt im Besonderen vor dem Hintergrund, dass nach Kranke et al. (2011) ca. 25 % der CO₂-Emissionen eines Transportes auf stationäre Prozesse, wie sie im Fall des multimodalen Transportes in einem Multimodalen Logistikknoten (MML)

vorliegen, entfallen. Dabei kann es sich um (Binnen-)Häfen, GVZ und andere Terminals handeln. Die Methodenlandschaft zur ökologischen Bewertung logistischer Prozesse ist somit für multimodale Transporte unvollständig.

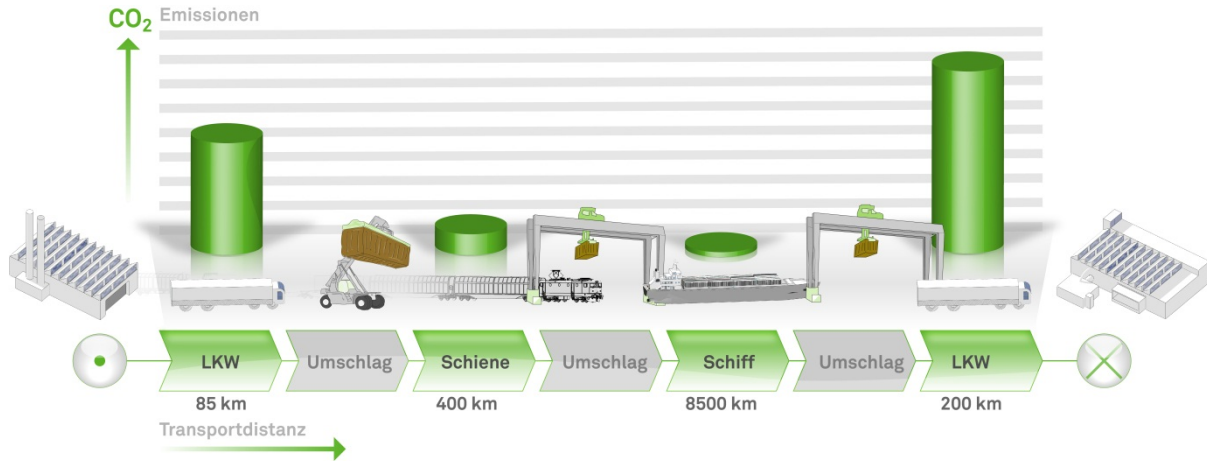


Abbildung 2: Transportprozesskette für einen multimodalen Transport (Luft und Muschkiert 2012, S. 21)

Die einzelnen bisher ausreichend präzise darstellbaren THG-Emissionen für Transporte sind in der beispielhaften Transportprozesskette der Abbildung 2 grün dargestellt, während die Umschlagprozesse, deren THG-Emissionen nur als Durchschnittswerte bestimmt werden können, grau hinterlegt sind. Das neu zu erstellende Demonstratormodul des MBK für MML soll die beschriebene Lücke schließen. Die vorhandenen MBK-Demonstratoren sollen in Kombination mit dem zu erstellenden Modul für MML eine möglichst exakte Ausweisung und Bilanzierung von THG-Emissionen auf Behälterebene für multimodale Transporte ermöglichen.

2.2 Ausgangssituation

Wie zuvor geschildert, spielt die Logistik, insbesondere mit dem Sektor Güterverkehr, beim Thema THG-Emissionen eine bedeutende Rolle. Aufgrund des hohen, stetigen Verkehrswachstums, insbesondere im Güterverkehr, wurden die bisherigen Bemühungen, die Emissionen auf technischem und organisatorischem Wege zu reduzieren, überkompensiert. Den durch die THG-Emissionen entstehenden negativen Auswirkungen konnte im Verkehrssektor somit noch nicht ausreichend entgegengewirkt werden. Dementsprechend entstehen zum einen Forderungen nach einer möglichst exakten Ausweisung und Bilanzierung von THG-Emissionen, um eine verursachergerechte Allokation vornehmen zu können und gegebenenfalls an wirkungsvollen Stellen entgegenwirken zu können. Zum anderen werden umweltfreundliche Transportlösungen gefordert. Diese beiden Punkte werden im Folgenden näher beschrieben.

Ausgangspunkt der Forderungen nach möglichst umweltfreundlichen Transportlösungen sind gesellschaftliche Entwicklungen, die mit einem verstärkten Umweltbewusstsein, auch ausgelöst von Extremwetterereignissen, einhergehen. Die Anzahl dieser Extremwetterereignisse, wie zum Beispiel Trockenperioden, Stürme sowie Überschwemmungen, ist nicht nur in Deutschland gestiegen (Berz

2009). Führende Forschungsinstitute gehen aufgrund der Ergebnisse der Klimamodellierung mit unterschiedlichen Modellen und den IPCC-Szenarien von einer globalen Erwärmung von 1,4 °C bis 5,8 °C in den nächsten 100 Jahren aus. Gründe hierfür sind vor allem, dass die Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre in den letzten 150 Jahren stark angestiegen ist. (IPCC 2007) Neben der gesellschaftlichen Entwicklung spielen auch gestiegene Rohstoffpreise und damit einhergehend auch gestiegene Energiepreise eine bedeutende Rolle für Unternehmen. Durch einen geringeren Einsatz von Rohstoffen für die Erstellung und Erbringung von Produkten und Dienstleistungen, hat ein nachhaltiges Verhalten der Unternehmen einen direkten, positiven Einfluss auf das Geschäftsergebnis.

Zu den umweltfreundlichen Transportlösungen zählen insbesondere multimodale Transporte. Eine flächendeckende Versorgung durch die im Vergleich zur Straße umweltfreundlichen Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße ist aus vielfältigen Gründen nicht möglich. Sie scheitert zum einen an der nicht ausreichenden Netzabdeckung. Zum anderen sind diese Verkehrsträger mit den dahinterstehenden Logistiksystemen bisher ausschließlich für große Mengen oder Massen von Gütern und einen Transport über lange Strecken wirtschaftlich. Wie zuvor beschrieben, nimmt der Anteil multimodaler Transporte jedoch zu und aufgrund der erwarteten Steigerung der Transportentfernungen, wird auch weiterhin mit einer Zunahme gerechnet.

Des Weiteren steht die Ausweisung und Bilanzierung von THG-Emissionen im allgemeinen Interesse. Diese Entwicklung liegt darin begründet, dass eine nachhaltige Verbesserung des Status quo ohne eine exakte Allokation der bei spezifischen (Umschlag-) Vorgängen anfallenden THG-Emissionsmengen nicht möglich ist. Im März 2013 ist beispielsweise die Endfassung der europaweiten DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen“ veröffentlicht worden. In Großbritannien wurde ein Gesetz zur Offenlegung der Treibhausgas-Bilanz der ca. 1.600 an der Londoner Börse notierten Unternehmen ab April 2013 verabschiedet. Als weiteres Beispiel dient die französische Verordnung 2011/1336 mit dem Titel „Information über die Menge der CO₂-Emissionen“ (Verordnung 2011/1336). Sie legt fest, dass Logistikdienstleister, die einen kommerziellen Transport mit Start- und/oder Zielpunkt in Frankreich durchführen, die anfallenden CO₂-Emissionen zu bilanzieren und auszuweisen haben. (Kranke 2013, S. 28-29)

Zusätzliche politische Maßnahmen, die durch die gesellschaftlichen Entwicklungen vorangetrieben wurden, beeinflussen die Unternehmen in ihren Bemühungen um eine verstärkte Durchführung umweltfreundlicher Maßnahmen. Dies beginnt auf europäischer Ebene z. B. mit den Abgasnormen für Fahrzeuge (Bsp. „EURO-6“) und dem Handel von CO₂-Zertifikaten. So wurde der Luftverkehr in den europäischen Emissionshandel integriert, dem bisher beispielsweise Unternehmen in der Stromerzeugung sowie einige Sektoren der Industrie wie Zementfabriken unterlagen. Auf nationaler Ebene wird dieser Prozess fortgesetzt, wie am Beispiel der Kopplung der Mautgebühren in Deutschland an den Schadstoffausstoß gemäß der Abgasnorm nach „Euro-Klassen“. Auf lokaler

Ebene kommen die Einrichtung von Umweltzonen, Fahrverboten und anderer Maßnahmen hinzu. (adelphi 2012; Kranke 2013, S. 28-29) Unter Berücksichtigung des Güterverkehrswachstums und den damit einhergehenden Umweltbelastungen ist mit weiteren Maßnahmen der Politik auf den Verkehrssektor zu rechnen. Dadurch nimmt die Bedeutung des Themas Nachhaltigkeit für die Unternehmen weiter zu.

2.2.1 Methoden zur Ermittlung von Treibhausgasen in der Logistik

Die Bilanzierung der THG-Emissionen (d.h. CO₂, CH₄, N₂O, HFC's, PFC's, SF₆) wird CARBON FOOTPRINT genannt und stellt einen Ausschnitt aus einer Ökobilanz dar. Die ÖKOBILANZ wiederum ist ein Instrument, das Umweltbelastungen unterschiedlicher Produkte (Waren und Dienstleistungen) berechnet und miteinander vergleichbar macht. Die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beinhalten die Prinzipien und den Untersuchungsrahmen für Ökobilanzen sowie die methodischen Anforderungen zur Durchführung einer Ökobilanzierungsstudie. Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen, die im Verlauf des Lebensweges eines Produktes ausgehend von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „cradle-to-grave“) auftreten. Bei einer Ökobilanz werden je nach angewendeter Methode zur Wirkungsabschätzung bis zu 14 Wirkungskategorien betrachtet, zu denen auch das THG-Potential gehört. Nachteilig bei der Erstellung einer Ökobilanz ist, dass selbst einfache Systeme einen erheblichen Datenbedarf und damit einen hohen Erfassungsaufwand aufweisen. Um diesen Erfassungsaufwand möglichst gering zu halten, müssen die Systeme sehr stark vereinfacht werden, wodurch wiederum eine realitätsgetreue Abbildung und Bewertung nicht möglich ist.

Ein Carbon Footprint in der Logistik kann sowohl für ein Produkt (Ware und Dienstleistung), ein Unternehmen, einen Standort, eine Organisation oder eine Transportdienstleistung ermittelt werden. Derzeit existieren zahlreiche Methoden, Normen, Leitfäden und Studien (Verkehrsrundschau 2011, Fläming et. al. 2009, Kranke 2011, Schmied, Knörr 2011, VCI 2010, Mc Kinnon, Piecyk 2010) die einen branchenspezifischen Rahmen für die Bewertung von Logistikprozessen und -systemen ermöglichen. Die Besonderheiten der wichtigsten Ansätze für das geplante Vorhaben werden im Folgenden skizziert.

Produkt Carbon Footprint

Der PAS 2050:2008 Leitfaden repräsentierte für Großbritannien einheitliche Grundlagen für die Erfassung der entlang des Lebenszyklus von Produkten anfallenden THG-Emissionen. Das BSI (The British Standards Institution) hat die PAS 2050:2008 überarbeitet und aktualisiert. Die aktualisierte Version PAS 2050:2011 enthält nun entsprechende Anpassungen hinsichtlich der ISO 14067 und der aktuellen GHG Protocol Product Standards. Der Normentwurf der Internationalen Norm ISO 14067 vom November 2012 zur Berechnung und Kommunikation der THG-Emissionen von Produkten enthält basierend auf den Normen der Ökobilanz weitergehende Vorgaben, wie eine THG-Bilanz über die komplette Lebensdauer eines Produktes angefertigt wird – ausgehend von der Beschaffung und

Produktion über die Nutzung bis hin zur Entsorgung. Die in der Norm definierten Anforderungen und Leitlinien können für jedes Produkt genutzt werden. Darüber hinaus wird mit dem Normentwurf Missbrauch durch falsche Kommunikation, beispielsweise mit Verbrauchern, vorgebeugt. Letztendlich geben PAS 2050 und ISO 14067 jedoch nur Hilfestellung bei der Bilanzierung von Produkten ohne dezidiert auf den Transport einzugehen, der Bestandteil des Produktlebenszyklus ist.

Unternehmens Carbon Footprint

Erste Bestrebungen einen Standard für die Erstellung und Veröffentlichung von THG-Emissionen von Unternehmen zu entwickeln hatte die Greenhouse Gas Protocol Initiative im Jahr 1998. (Klöpffer und Grahl 2009) Im Jahr 2001 wurde dieser Standard unter dem Titel „Corporate Accounting and Reporting Standard“ (Greenhouse Gas Protocol) publiziert. (WRI, WBCSD 2005) Hinsichtlich der Erfassung der THG-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Corporate Value Chain Scope³ Standard (WRI, WBCSD 2011a)) und der Erstellung einer produktspezifischen THG-Bilanz entlang des Produktlebensweges (Product Life Cycle Standard, WRI, WBCSD 2011b) wurde das Greenhouse Gas Protocol ergänzt und im Jahr 2011 erneut veröffentlicht. Dieser Stand erhält Vorgaben zur Festlegung des zu bilanzierenden Systems (z. B. des Kernunternehmens), zur Datenbeschaffung und Sicherung der Datenqualität, zur Allokation der Emissionen und Unsicherheiten sowie zur Veröffentlichung der Ergebnisse. In den GHG Protocol Standards wird explizit gefordert, konkrete branchenspezifische Bilanzierungsstandards (z. B. für die Logistikbranche) zu entwickeln. Für die Erfassung und Ausweisung der THG-Emissionen, wird das Unternehmen in verschiedene Scopes unterteilt:

- Scope 1 Emissionen, die vom Unternehmen direkt verantwortet werden, z. B. eigene Verbrennungskessel, Fahrzeuge, Prozesstechnik für chemische Produktionsprozesse
- Scope 2 indirekte Emissionen, d. h. vom Unternehmen genutzte, aber extern bezogene Energie (d. h. i. w. S. Strom, Wärme, Kälte und Prozessdampf)
- Scope 3 alle weiteren indirekten Emissionen des Unternehmens durch den Bezug von Rohstoffen, Produkten und Dienstleistungen sowie Distribution und Weiterverarbeitung von Produkten

Von der Internationalen Standardisierungsorganisation ISO wurde das GHG Protocol in den internationalen Standards ISO 14064-1:2006, ISO 14064-2:2006, ISO 14064-3:2006 und ISO 14065:2007 umgesetzt. Diese Norm-Entwürfe legen die Grundsätze für und die Anforderungen an die quantitative Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von THG-Emissionen sowie den „Entzug“ von THG auf Organisationsebene fest. Sie enthalten Anforderungen an Planung, Erstellung, Management, Berichterstattung und Verifizierung der THG-Bilanz. Darüber hinaus werden Anforderungen für die Verifizierung von THG-Bilanzen und die Validierung von THG-Projekten festgelegt. Eine konkrete Vorgehensweise ist in diesen Normen jedoch nicht enthalten. Im Juni 2009 wurde eine neu gegründete internationale Arbeitsgruppe ISO/TC 207/SC 7/WG 3 „Carbon footprint for organizations“ mit der Erarbeitung des Technischen Berichts ISO/TR 14069 „Greenhouse Gases -

Quantification and Reporting of GHG emissions of Organizations - Guidance for the application of ISO 14064-1 (Carbon Footprint of Organizations)" betraut.

Das hier beschriebene GHG Protocol sowie die 14064er enthalten zwar, welche THG für ein Unternehmen im Bereich der Transportdienstleistungen erfasst und ausgewiesen werden sollen (u.a. Emissionen von Fahrzeugen, Dienstreisen etc.).

Transport Carbon Footprint

Eine Norm über die Berechnung und die Berichterstattung von Energieverbrauch und THG-Emissionen von Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr) wurde Ende 2008 vom europäischen Normenausschuss CEN TC 320/WG 10 initiiert. Die 2013 publizierte Norm DIN EN 16258 enthält eine standardisierte Vorgehensweise zur Ermittlung der THG-Emissionen von Transportdienstleistungen aller gängigen Verkehrsträger (Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr) in der gesamten Versorgungskette (vom Verlader über Spediteure und Frachtführer bis hin zum Subdienstleister) und entsprechenden Vorgaben für die Ergebnisdokumentation. Darüber hinaus werden zur Ermittlung der Datengrundlagen Empfehlungen gegeben. Letztendlich kann aber der Anwender frei entscheiden, welche Auswahl (d. h. individuelle Messwerte, fahrzeug-/routenspezifische Durchschnitts- oder Flottenwerte des Transportdienstleisters, Vorgabewerte aus Datenbanken) getroffen wird, auch wenn die Ergebnisse auf unterschiedlichem Detaillierungsniveau basieren.

Nicht in der Norm enthalten sind jedoch administrative bzw. unterstützende Tätigkeiten (z. B. Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme, Wartung, Entsorgung) und stationäre Prozesse (z. B. innerbetrieblicher Umschlag), so dass wesentliche Bestandteile in den Bilanzergebnissen nicht enthalten sind.

In der Regel entstehen CO₂-Emissionen stationärer Logistikprozesse in multimodalen Logistikknoten z.B. durch

- Stromverbrauch der Umschlageinrichtungen, Terminals, Lager und Büros
- Wärmeenergieverbrauch für Terminals, Lager und Büros
- Weitere verwendete Energieträger (z.B. Gas, Diesel, etc.) für zusätzliches Equipment, wie beispielsweise Reachstacker, andere Terminalfahrzeuge und Gabelstapler.

Da stationäre Prozesse bei der aktuell vorliegenden Norm DIN EN 16258 explizit ausgeschlossen wurden, werden nach dem Greenhouse Gas Protocol die direkten THG-Emissionen, die beispielsweise bei der Verbrennung von Energieträgern entstehen sowie die durch den Bezug von Strom und Wärme entstehen, ermittelt.

Aufgrund fehlender valider Energieverbrauchsdaten wesentlicher Elemente *eines multimodalen Logistikknotens* muss auf anerkannte Quellen und Abschätzungen von Energieverbrauchsdaten zurückgegriffen werden. Hierzu können Normen, Richtlinien, Literatur-, Hersteller- sowie

Unternehmensangaben herangezogen werden. Allerdings sind nicht für alle Elemente *eines multimodalen Logistikknoten* Energieverbrauchsdaten vorhanden und für vorhandene Daten werden relevante Einflussfaktoren, wie beispielsweise Geländebeschaffenheit, Terminlayout, etc. nicht berücksichtigt.

2.2.2 Simulation

Nach der VDI-Richtlinie 3633-1 ist Simulation definiert als „ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Im Fokus der Simulation von Logistiksystemen stehen dabei dynamische Simulationsmodelle, welche die Veränderungen der Systemzustände bei fortschreitender Zeit berücksichtigen. Diese Veränderungen der Zustände werden durch Ereignisse verursacht, wie z.B. die Ankunft eines Fahrzeugs oder die Verladung einer Sendung. Da dies die wesentliche Eigenschaft logistischer Systeme ist, sind die angewendeten Simulationsmethoden entsprechend diskret und ereignisorientiert, d.h. sie betrachten die Systemzustände zu diskreten Zeitpunkten wobei diese Zeitpunkte keinen festen Intervallen folgen, sondern sich aus den auftretenden Ereignissen ergeben. Darüber hinaus finden stochastische Einflüsse Berücksichtigung in der Modellierung. (vgl. Kuhn und Wenzel 2008, Law 2007)

Neben der (dynamischen) Simulation sind prinzipiell auch statische und analytische Berechnungsverfahren, wie z. B. die Warteschlangentheorie, dazu geeignet, generelle Aussagen zu den zu untersuchten logistischen Systemen zu liefern. Diese Berechnungsverfahren bilden die dynamischen Effekte im Zeitverlauf jedoch häufig nur unzureichend ab, so dass Fragestellungen zu Dimensionierung und Betrieb der komplexen Systeme nur mit Einschränkungen beantwortet werden können (Turek und Marquardt 2007). Zudem ist eine genaue Analyse der ineinandergreifenden Einzelprozesse innerhalb einer logistischen Anlage mit analytischen Berechnungsverfahren nur bedingt möglich, während eine ereignisgesteuerte Simulation sehr gut geeignet ist, genau diese Charakteristik zu berücksichtigen (VDI3633-1 2010, van Belle et al. 2012). Die Methode ermöglicht es darüber hinaus, stochastische Einflüsse auf das reale System, wie z.B. schwankende Prozesszeiten für manuelle Tätigkeiten, technische Ausfallzeiten und Verteilungen der verschiedenen Sendungstypen, genau abzubilden.

Der Einsatz von bereits existierenden Modellierungsansätzen in der Logistik ist vielfältig und reicht von einer mikroskopischen Sichtweise, bspw. der innerbetrieblichen Prozesse in einem Lager, bis hin zur makroskopischen Modellierung einer gesamten Supply Chain oder eines logistischen Netzwerkes wie Transport- oder Distributionsnetzen (Lee et al. 2002, Kleijnen 2005, van der Zee und van der Vorst 2005). Die Simulation ist dabei sowohl zur Planung, z. B. in Bereichen der Strukturplanung, in der Realisierungsphase, bspw. zur Entwicklung von Steuerungssoftware, als auch während des Betriebs dieser Systeme zur Optimierung der Prozessablaufplanung oder zur Allokation von Ressourcen einsetzbar (VDI3633-1 2010).

Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen der Entscheidungen in den Subsystemen und Einzelprozessen sowie der großen Bedeutung stochastischer Einflüsse innerhalb des Anlagenbetriebs, sind die Möglichkeiten mathematisch-analytischer Methoden zur Untersuchung begrenzt (Lampe 2006). Die Simulation ist daher ein sehr geeigneter und häufig genutzter bzw. empfohlener Ansatz zur Analyse der verschiedenen Problemstellungen in logistischen Anlagen (Rohrer 1995, Yun und Choi 1999, van Belle et al. 2012). Zur Untersuchung und Bewertung des Verhaltens im Zeitablauf komplexer multimodaler Umschlagknoten und im Containerhandling wird aus diesen Gründen vielfach auf das Hilfsmittel der Simulation zurückgegriffen (z. B. Parola und Sciomachen 2005, Lampe 2006, Lee et al. 2006, Duinkerken et al. 2006, Ottjes et al. 2006). Eine Simulationsumgebung zur ganzheitlichen Abbildung von Anlagen im kombinierten Verkehr wurde im durch das Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie NRW geförderten Forschungsprojekt „Planung intermodaler Umschlagterminals mittels Simulation und Methoden der Mathematik“, welches ein Teilprojekt des Forschungskonsortiums „Hafenband am Mittellandkanal“ ist, entwickelt. Diese Simulationsumgebung basiert auf dem Materialflusssimulator Enterprise Dynamics und beinhaltet neben Bausteinen zur Abbildung von Containerterminals mathematische Heuristiken zur optimierten Steuerung der Umschlagmittel, Ladestellenzuordnung und Yardmanagement. (Kaffka et al. 2010, Kaffka und Mest 2010, Clausen et al. 2012a, Clausen und Kaffka 2012).

3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Das Ziel war die Erweiterung des im Vorgängerprojekt entwickelten Methodenbaukastens zur Ermittlung und Zuordnung von THG-Emissionen um ein Zusatzmodul für multimodale Logistikknoten. Multimodale Logistikknoten sind Umschlaganlagen innerhalb einer Transportkette, in denen ein Wechsel des Verkehrsträgers stattfindet. Mit dem MML-Demonstratormodul wird die detaillierte Berechnung von THG-Emissionen auf Behälterebene im multimodalen Verkehr ermöglicht.

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse und innovativer Beitrag

Im Gesamtergebnis entsteht ein anwendungsorientierter und transparenter Excel-Bilanzierungs-Demonstrator mit erhobenen und über Messungen validierten Daten sowie simulierten Werten für verschiedene Anwendungsfälle, der in den existierenden Methodenbaukasten integriert wird. Mit der Erweiterung des Methodenbaukastens um den MML Demonstrator werden KMU in die Lage versetzt, die von ihnen angebotenen multimodalen Produkte nun inklusive einer THG-Bilanz auf Behälterebene anbieten zu können. Die Ergebnisse können sowohl zur transparenten Außendarstellung als auch für innerbetriebliche Optimierungen genutzt werden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund stetig steigender Energiepreise und ermöglicht es den KMU langfristig ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Die Innovation besteht in der Betrachtung von Multimodalen Logistikknoten bezüglich ihrer THG-Emission und der damit verbundenen Erweiterung und Verbesserung des MBK um ein entsprechendes Berechnungsmodul. Die bisherige Praxis zur Ermittlung von Emissionen in multimodalen Transportketten erfolgt weitestgehend nur für den Transport. Im Falle der Berücksichtigung der in solchen Transportketten unumgänglichen Umschlaganlagen erfolgt eine Berechnung lediglich unter der Berücksichtigung von groben Durchschnittswerten.

Angestrebt wird diese Lücke dauerhaft zu schließen und somit eine über die gesamte Transportkette konsistente Berechnung zu ermöglichen. Des Weiteren wird hierzu erstmalig die Methode der Simulation genutzt, um eine exaktere Allokation der Verbrauchswerte auf die Ladeinheit je nach Einflussfaktor durchzuführen. Die bisherigen Ansätze und Methoden der Emissionsermittlung, wie der MBK für Transporte mit unterschiedlichen Verkehrsträgern, liefern auf Basis von Durchschnittswerten valide Ergebnisse. Hierbei kommt bisher jedoch im Vergleich zu Multimodalen Umschlaganlagen nur eine geringe Anzahl an Einflussfaktoren zum Tragen, wie beim Transport beispielsweise die Unterscheidung zwischen Berg- und Talfahrt. In Multimodalen Umschlaganlagen existieren hingegen eine große Anzahl von Einflussfaktoren auf den Umschlag (Lagerfüllgrad, Anzahl Umlagervorgänge je Auftrag), die es unabdingbar machen, eine feinere Unterscheidung und somit eine exaktere Allokation zu ermöglichen. Da die Methode der Simulation unterschiedliche Szenarien in einem experimentierbaren Modell abbilden kann und somit eine kosten- und aufwandsminimale Bewertung ermöglicht, wird zur Allokation der THG-Emissionen erstmalig eine Simulationsumgebung so erweitert, dass THG-Emissionen in MML ermittelt werden können

4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

4.1 Arbeitspaket 1: Analyse der MML

Das Forschungsprojekt beginnt zunächst mit einer Systembeschreibung Multimodaler Logistikknoten. Dabei wurden die unterschiedlichen Funktionsbereiche eines MML betrachtet. Hierzu zählen auch die Umschlagbereiche, welche sich in eine Straßen- und Wasserseitige Zone aufteilen. Die Straßenseitige Zone stellt somit durch den Straßen- und Schienenumschlag die Verbindung zu den landseitigen Verkehrsträgern her. Als Verbindungselement verfügt jedes MML über ein Lager für die Ladeeinheiten des multimodalen Verkehrs. Diese können Container, Sattelaufleger, oder Wechselbehälter sein.

1.1.1. Systembeschreibung und potentiell abzubildende Ressourcen und Layoutobjekte

Funktionsbereiche

Die Unterteilung eines Containerterminals in seine einzelnen Funktionsbereiche ist in erster Linie von den angebundenen Verkehrsträgern abhängig. Je nach Layout kann dieser einen Straßen-, Schiffs-, sowie einen Schienenumschlagsbereich haben. Somit verfügen bimodale Terminals über zwei angeschlossene Verkehrsträger und trimodale über drei. Ein schematisches Layout hierzu ist in Abbildung 3 dargestellt. In dem zwischengeschalteten Lagerbereich werden sämtliche Arten an Ladungsträgern bis zum Weitertransport eingelagert. Dabei kann es sich um Import- oder Exportcontainer, Leercontainer, Sattelaufleger und Wechselbrücken handeln. In diesem Bereich können auch Hallen im Layout berücksichtigt sein, in welchen Ladungsträger ein- und ausgepackt werden. Im Dienstleistungs- und Abfertigungsbereich werden zusätzlich zu der Dokumentenabwicklung noch Zusatzdienstleistungen für Lastwagen angeboten. Das Verbindungselement in jedem Layout ist der Transportbereich. Hier werden mittels verschiedener Transporteinheiten die Ladungsträger zwischen den einzelnen Funktionsbereichen transportiert. Dieser Transport findet mit Flurförderzeugen statt. Die Größe des Bereichs ist variabel zu gestalten, da an dieser Stelle Entscheidungen hinsichtlich der Größe des verwendeten Flurförderzeuges sind. Des Weiteren beeinflusst eine Lastaufnahme quer oder längs zur Fahrtrichtung die Größe des Transportbereiches. In diesem Kontext ist auch weiterhin anzumerken, dass Anzahl der umzuschlagenden Ladeeinheiten sowie die verfügbare Fläche grundlegende Einflussfaktoren für die Gestaltung des Terminals sind (Meisel, 2009) (Brinkmann, 2005) (Lampe, 2006) und (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004).

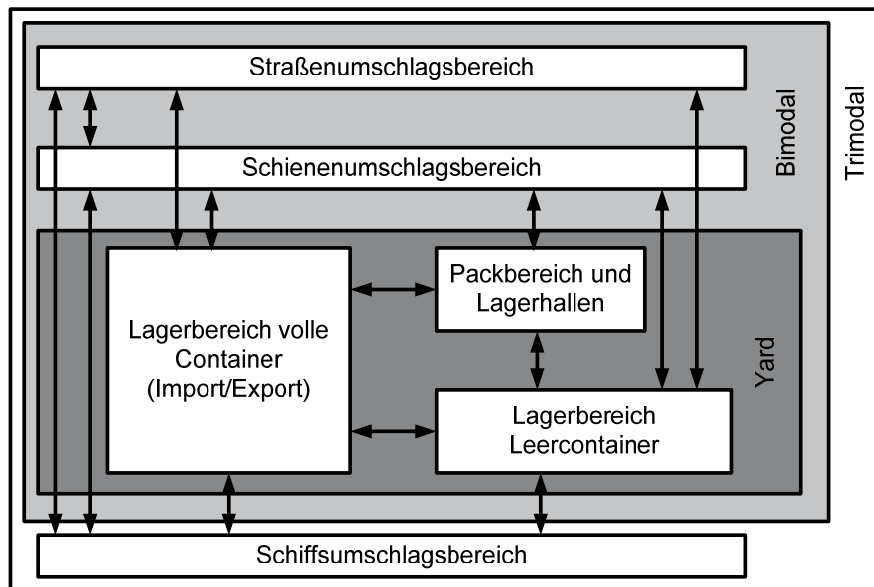


Abbildung 3: Funktionsbereiche eines Containerterminals in Anlehnung an [Ste04, S. 6]

Im folgenden Abschnitt des Berichts werden die einzelnen Funktionsbereiche näher erläutert.

Ladeeinheiten werden im *Schiffsumschlagbereich* zwischen Schiff und Terminal umgeschlagen. Dieser Bereich befindet sich direkt am Wasser und hält Anlegeplätze für Schiffe an der Kaimauer bereit. Auf der Kaimauer selbst stehen geeignete Ressourcen um das Schiff abzufertigen. Darüber hinaus gibt es einige Schiffe, welche über bordeigene Umschlaggeräte verfügen. Diese besitzen jedoch gegenüber den Geräten an der Kaimauer eine geringere Leistungsfähigkeit, so dass in den meisten Fällen auch hier auf die Umschlagsmittel an der Kaimauer zurückgegriffen wird. Dies ist lediglich in kleinen Häfen mit einer geringen Umschlagszahl eine lohnenswerte Alternative. Hier kann der Umschlag zwischen Terminal und Schiff auch mittels Reach-Stackern, Mobilkränen oder Kaikranen stattfinden. In mittleren und großen Häfen werden in den meisten Fällen Containerbrücken zum Löschen und Laden der Schiffe verwendet. Diese verfügen über eine Laufkatze, auch Katze genannt, welche für die Bewegung der Hubeinrichtung sorgt. Nachdem ein Container vom Schiff zur Landseite verladen wurde, nimmt die Katze einen weiteren Container auf der Landseite auf, um diesen zum Schiff zu transportieren. Dieser Vorgang setzt eine genaue Planung der Abtransporte der Container durch Flurförderzeuge voraus. Die Abstellplätze an der Kaimauer sind somit als Puffer zu betrachten, und werden während der Be- und Entladung nur kurzzeitig belegt (Brinkmann, 2005) und (Meisel, 2009).

Die Anbindung an die Verkehrsträger Schiene und Straße erfolgt durch den *Landtransportmittelbereich*. Hier finden die Umschläge für Züge und LKW statt. Der Bereich zur Anbindung der Schiene besteht aus mehreren parallel verlaufenden Gleisen. Um die Sicherheit innerhalb des Terminals zu steigern werden Querungen mit diesen Gleiswegen vermieden. Dies erhöht gleichzeitig die Effizienz eines Terminals. Die ankommenden Züge könne auf zwei

unterschiedlichen Weisen Be- und Entladen werden. Eine Möglichkeit ist, Züge direkt mit geeigneten Flurfördermitteln zu bedienen. Eine andere Möglichkeit ist ein, die Gleise überspannender Portalkran. Der Umschlagsbereich für den Verkehrsträger Straße ist in den Lagerbereich integriert. Der Be- oder Entladevorgang findet hier auf gesonderten Stellplätzen am Rande des Lagers oder mittendrin statt [Bri05, S. 240f].

Im *Lagerbereich* werden Ladeeinheiten zwischengelagert. Dieser nimmt entladene Ladeeinheiten auf und stellt andere zur Verladung bereit. Im Falle eines trimodalen Terminalbetriebs werden Exportcontainer vom Verkehrsträger Straße oder Schiene empfangen und bis zum Weitertransport eingelagert. Importcontainer werden an den Hinterlandverkehr abgegeben. Ein Lagerbereich ist essentiell für den Terminalbetrieb, da die Vorgänge zur Ent- und Beladung meist zeitlich nicht zusammenfallen. Der Zeitraum der von der Ladeeinheit im Lagerbereich verbracht wird ist unbestimmt und kann zwischen wenigen Stunden und mehreren Wochen betragen. In diesem Zusammenhang wird von der Containerverweilzeit gesprochen (Brinkmann, 2005).

Der Lagerbereich kann unterschiedlich strukturiert sein. Es können unterschiedliche Lagerarten verwendet werden. Ein *Blocklager* ist eine kompakte Lagerart, welche wenig Platz beansprucht, jedoch keine Zwischenräume für Flurförderzeuge lässt. Dies bedeutet, dass Flurförderzeuge die Ladeeinheiten zum Blocklager liefern und diese von einem, am Blocklager angesiedelten, Kran gestapelt werden. Der große Vorteil der Blocklagerung ergibt sich durch seinen hohen Flächennutzungsgrad. Das *Flächenlager* hingegen erstreckt sich über eine weite Fläche. Auf dieser Fläche können die Ladeeinheiten in vier Lagen übereinander gelagert werden. Des Weiteren werden Sie in einem solchen Lager nach Im- und Export sortiert sowie ebenfalls für die verschiedenen Transportmittel vorsortiert. Der Hauptunterschied gegenüber dem Blocklager besteht darin, dass ein Flächenlager genügend Platz für Verkehrsflächen bereithält. Somit kann die Bedienung des Lagers mittels Flurförderzeugen erfolgen. Das Flächenlager zeichnet sich durch weniger Umstauvorgänge aus. Im Regallager werden Container mit entsprechenden Fördermitteln ein- bzw. ausgelagert. Dieser Lagertyp kann besonders in Terminals mit einer hohen Umschlagszahl aber wenig verfügbarer Fläche vorteilhaft sein. Im Regallager werden Container mittels vertikaler oder horizontaler Fördereinheiten ein- oder ausgelagert. Vorteilhaft ist diese Lagerart meist in Terminals, welche eine hohe Umschlagszahl aufweisen. Hier ist diese Lagerart mit einem hohen Flächennutzungsgrad bei hoher Flexibilität von großem Vorteil, wenn im betreffenden Terminal lediglich wenig Grundfläche verfügbar ist. Gemäß der jeweiligen Containereigenschaften, werden die Ladeeinheiten im Depot unterschiedlich positioniert. Als Einflussgrößen gelten dabei die Größe, das Gewicht sowie der Ursprungs- und Zielort. Des Weiteren existiert in den meisten Depots eine Zonierung, so dass gesonderte Zonen für spezielle Container vorgehalten werden. Somit wird deutlich, dass die Positionierung auch von dem transportierten Inhalt abhängig ist. Hervorzuheben sind in diesem Falle Kühlcontainer, welche an Ihrem Lagerplatz einen Stromanschluss benötigen. Weitere Container, welche in gesonderten Zonen gelagert werden, sind solche mit Übergrößen oder gegebenenfalls auch

Gefahrgut-Container. (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004). Des Weiteren werden Leercontainer bei der Lagerung von beladenen Ladeeinheiten getrennt. (Brinkmann, 2005)

Der *Dienstleistungs- und LKW-Abfertigungsbereich* übernimmt mehrere Funktionen eines Terminals. Zum einen stellt er für wartende Fahrzeuge Wartepplätze auf einer Vorstauffläche zur Verfügung. Da die Ankunft der einzelnen LKW am Terminal nicht vorhersagbar ist wird dieser Wartebereich als Puffer am Eingang des Terminals benötigt. Um eine selbstständige Aufnahme bzw. Abgabe der Ladeeinheiten für LKW's zu ermöglichen ist hier auch eine zusätzliche Abstellfläche für Sattelaufleger und Wechselbrücken vorhanden. Der Dienstleistungsbereich für LKW's kann abhängig vom Terminal stark variieren. Denn hier bieten Terminalbetreiber Zusatzleistungen, wie beispielsweise Reparaturservices oder Lagerservices für Ladeeinheiten an. Physisch besteht der LKW-Abfertigungsbereich aus der Ein- und der Ausfahrtszone. Bei Einfahrt der Fahrzeuge erfolgt an der Pforte die Dokumentenabwicklung. Diese beinhaltet die Registrierung und die Disposition der mitgeführten Ladeeinheiten. Bei der Ausfahrt der Fahrzeuge hingegen ist keine zusätzliche Dokumentenabwicklung notwendig, da diese bereits am Terminal-Eingang erfolgte. Lediglich im Falle einer Abholung einer Ladeeinheit wird seitens des Terminals geprüft, ob die korrekte Ladeeinheit abtransportiert wird. Vor der Ausfahrt des Terminals sind weitere Parkflächen verfügbar, so dass die Fahrzeugführer nach erfolgreicher Abarbeitung Ihrer Aufträge die Sozialräume, Waschräume, oder die Kantine des Terminals besuchen können. Des Weiteren wird hier der Reparaturservice für Ladeeinheiten angeboten. Ebenfalls stehen hier Hallen zur Verfügung, in welchen Güter gelagert oder in Ladeeinheiten verpackt werden können (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004) und (Lampe, 2006).

Ressourcen

Die Ressourcen für den Umschlag werden in Betriebsmittel für Vertikal- und Horizontalumschlag unterteilt. Ressourcen welche Ladeeinheiten in vertikaler Richtung transportieren sind meist als Krankonstruktionen ausgelegt, welche entweder fest installiert oder fahrbar sein können. Der horizontale Transport der Ladeeinheiten wird meist per Flurfördermittel realisiert.

Vertikalumschlag

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben handelt es sich bei den Ressourcen für den Vertikalumschlag meist um Krankonstruktionen. Jede dieser, auch in Abbildung 4 aufgeführten, Konstruktionen sind mit einem Lastaufnahmemittel ausgestattet. Um beispielsweise Container aufnehmen zu können werden Spreader eingesetzt. Dieser Spreader besteht aus vier Drehbolzen, welche bei der Aufnahme eines Containers die Ladeeinheit an den jeweiligen Eckbeschlägen greifen. Um die Ladeeinheit nach dem greifen zu sichern werden die Drehbolzen manuell oder automatisch um 90 Grad gedreht. Der Spreader ist in seinen Abmaßen flexibel. Das bedeutet, dass er durch eine Teleskopfunktion ein- und ausfahrbar hinsichtlich der Breite ist. Diese Teleskopfunktion gestattet dem Spreader auch, in Ihrer Länge unterschiedliche, Ladeeinheiten aufzunehmen. Des Weiteren ist es möglich in einem so genannten Twin-Lift-Betrieb zwei 20-Fuß-Container auf einmal zu bewegen. Dies

macht die Quick-Tie-Verriegelung möglich. Durch diese Verriegelung, werden die beiden Container zu einer großen 40-Fuß-Containereinheit zusammengeschoben und können somit wie ein 40-Fuß Container transportiert werden. (Brinkmann, 2005). Um Wechselbehälter und Sattelaufleger transportieren zu können werden Greifzangen am Spreader befestigt. Diese Greifzangen nehmen die Ladeeinheiten dann an Ihren Beschlägen auf, welche meist an der Unterseite zu finden sind. (Lampe, 2006).

Im Folgenden werden die einzelnen Ressourcen für den Vertikalumschlag näher spezifiziert.

Die Containerbrücke bedient mit seinen beiden Auslegern jeweils die Wasser- oder Landseite. Der Wasserseitige Ausleger kann bis zu 22 Containerreihen überspannen und ist ein- und ausklappbar, um ankommende oder abfahrende Schiffe nicht zu beeinträchtigen. Der Spreader dieser Containerbrücken kann meist bis zu 50 Tonnen heben. Der landseitige Ausleger wird beim Löschen eines Schiffes in den meisten Fällen für die Zwischenlagerung der Ladeeinheiten genutzt. Im Falle der Beladung erfüllt dieser Ausleger mehr die Aufgabe einer Vorstauffläche bevor die Ladeeinheiten auf das Schiff gehoben werden. Eine wesentliche Voraussetzung des betrachteten Terminals ist eine hohe Fördermittelauslastung sowie ein stetiger Umschlagbedarf. Bei einem schnellen und gut koordinierten Umschlagprozess kann die Containerbrücke eine Umschlagleistung zwischen 35 und 45 Umschlägen in der Stunde erreichen.

Die meistgenutzte Bauweise von Containerbrücken ist die 1-Katz-Brücke, welche eine durchschnittliche Leistung zwischen 25 bis 35 Containerbewegungen erzielen kann. Dabei übernimmt die Laufkatze die Schiffsentladung, das Verfahren der Container, und das Absetzen der Container auf der Landseite. Die Steuerung übernimmt in diesem Fall ein Kranführer.

Eine neuere Entwicklung der Containerbrücken ist die 2-Katz-Brücke mit Laschplattform. Dieser Typ kann eine Leistung von circa 45 Containerbewegungen pro Stunde erreichen. Die Neuerung gegenüber der bereits vorgestellten Containerbrücken ist die hier, an der Brücke, angebrachte Laschplattform. Die Container werden bei dieser Bauweise nicht mehr, wie üblich, auf dem Boden abgestellt, sondern auf der Laschplattform. Dort wird die Ladeinheit wieder von einer zweiten Katze aufgenommen und landseitig auf einem Transportfahrzeug abgestellt. Die Fläche unterhalb des Kranes kann somit für Sonderfrachten vorgehalten werden.

Der Personalbedarf für die Lösch- und Ladeprozesse einer manuellen Brücke liegt bei 5 Personen. Dieser Bedarf kann bis auf 2 Personen reduziert werden. Dies ist allerdings abhängig vom Grad der Automatisierung der Containerbrücke. Die vollständige Automatisierung ist derzeit Gegenstand der Forschung, so dass derzeit im Betrieb eingesetzte Containerbrücken manuell geführt werden oder bereits teilautomatisiert sind. Die größte Herausforderung hierbei ist die wasserseitige Bedienung der Schiffe. Ein automatisierter Betrieb der Containerbrücken an der Landseite ist bereits möglich. Jedoch stellt die Wasserseite eine spezielle Herausforderung an das Automatisierungsvorhaben. Die Schiffe, welche an der Kaimauer liegen, sind ständig in Bewegung, da sie immer noch der Strömung ausgesetzt sind. Somit befindet sich das Schiff auch während der Lade- und Löschvorgänge ständig

in Bewegung. Dieser Umstand stellt für einen ausgebildeten Kranführer zwar keinerlei Problem dar, jedoch ist dies eine große Hürde für den Automatisierungsprozess.

Viele verschiedene Bauweisen existieren von dem Kaikran. Im Falle des Stückgutumschlags sind generell Einfach- und Doppellenker-Wippdrehkrane zu unterscheiden. Diese sind meist auf einem Schienenfahrwerk montiert. Feststehende Bauweisen werden mittlerweile nur noch selten in den Terminals genutzt. Dies liegt zumeist an den flexiblen Anforderungen, welche der Kran erfüllen muss. Ein Kaikran kann auch für den Containerumschlag verwendet werden, sollte er mit einem Spreader ausgerüstet sein. Für die Be- und Entladeprozesse ist durch die Bauweise des Krans somit stets eine Drehbewegung nötig. Da zusätzlich noch das Schiff aus dem Kran heraus nur schwer zu überblicken ist dauert der Umschlag deutlich länger als bei dem Einsatz einer Containerbrücke. Daher ist dieser Kran auch nur in Terminals zu finden, welche einen geringen Containerumschlag aufweisen. Meist wird dieser Kran auch nur dann eingesetzt, wenn keine Containerbrücke oder bordeigene Umschlaggeräte vorhanden sind (Brinkmann, 2005).

Kleinere oder mittlere Terminals greifen öfter auf die Nutzung eines *Mobilkrans* zurück. Dieser kann beim Containerumschlag flexibel verfahren werden. Aufgrund seiner enormen Flexibilität weist dieser Kran somit auch einen hohen Auslastungsgrad auf. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Containerbrücke sind hier die geringen Investitionskosten. Jedoch ist in diesem Kontext auch nachteilig die geringe Umschlagsleistung von 20 bis 25 Ladeeinheiten pro Stunde zu berücksichtigen. (Brinkmann, 2005).

Eine weitere Bauweise von Krankonstruktionen sind die Transtainer. Transtainer sind Portalkrane, welche zum Be- und Entladen von LKW's oder Zugwagons eingesetzt werden können. Des Weiteren sind Transtainer auch einsetzbar für Lager- und Umstauprozesse. Bevorzugt werden sie in Terminals mit beschränkter Lager- und Transportfläche eingesetzt, da sie nur wenig Platz beanspruchen und somit eine Reihen- oder Blocklagerung möglich ist. Somit wird der Flächennutzungsgrad erhöht. Zu der Gruppe der Transtainer gehören die *Rubber-Tyred-Gantry-Cranes (RTG)* und die *Rail-Mounted-Gantry-Cranes (RMG)*.

Der *RTG* ist ein mobiler Portalkran, welcher längs und quer fahrbar ist. Er ist gummibereift und schafft durchschnittlich 15 Containerbewegungen in einer Stunde. Die hohe Flexibilität des *RTG* wirkt sich allerdings negativ auf dessen Energiebedarf aus. Dieser ist vergleichsweise hoch. Die Tragfähigkeit des *RTG* liegt bei bis zu 20 Tonnen. Er ist in der Lage bis zu 8 Containerreihen zu überspannen und stapelt maximal 6 Container übereinander. In der Anwendung wird jedoch die sechste Containerlage meist freigelassen, damit der *RTG* ohne Probleme die Containerreihen passieren kann. Werden Fahrzeuge be- und entladen dient eine der Containerreihen meist als Fahrspur und wird somit auch freigelassen. Eine andere Möglichkeit ist, dass die Ladevorgänge an der Vorderseite der jeweiligen Containerblöcke stattfinden. Auf diese Weise würde Lagerplatz wieder hinzugewonnen, jedoch sind zeitintensivere Kranbewegungen die Folge.

Im Gegensatz zum RTG ist der RMG ein schienengebundener Stapelkran und somit auch weniger flexibel. Das bedeutet, dass das Umschlaggerät nur in einem begrenzten Bereich eingesetzt werden kann, welcher durch Spannweite und Schienenlänge vorgegeben ist. Jedoch verfügt er über eine größere Spannweite die bis zu 23 Containerreihen und eine zusätzliche Fahrspur überspannt. Des Weiteren ist es möglich bis zu 8 Container übereinander zu stapeln. Die Leistungsfähigkeit des RMG liegt bei durchschnittlich 20 Containerbewegungen pro Stunde. In vielen Terminals ist es üblich zwei RMG's an einem Stapel einzusetzen. Dies erhöht die Produktivität und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Eine Weiterentwicklung dieser Bauweise ist das Double-RMG-System. Dieses System besteht aus zwei fest miteinander verbunden RMG's, welche aber in unterschiedlichen Höhen angebracht sind, sodass ein gegenseitiges passieren ermöglicht ist. Als Vorteil gegenüber dem RTG sei zu nennen, dass der RMG geringere Betriebs- und Wartungskosten aufweist. Des Weiteren kann hier auch ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden. (Brinkmann, 2005) und (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004).

Horizontalumschlag

Die vorhandenen Ressourcen für den Horizontalumschlag übernehmen in einem Terminal einige Aufgaben. Es gibt Ressourcen welche lediglich zum Transport der Ladeeinheiten verwendet werden können. Weitere Flurfördermittel sind des Weiteren in der Lage die Ladeeinheiten auch zu stapeln und übernehmen somit auch eine Lagerungs- oder Umschlagsfunktion. Auch im Falle des Horizontalumschlags sind die Ressourcen, wie beim Vertikalumschlag, mit dem Spreader als Lastaufnahmemittel ausgestattet.

Die Bewegung des Flurförderzeuges im Terminal folgt in der Regel einer generalisierten Prozesskette. Sämtliche Fahraufträge werden von einem Leitstand per Funkverbindung direkt in die Fahrerkabine der Ressource weitergeleitet. Hier kann der der Flurförderzeugführer relevante Informationen direkt einem Display entnehmen. Die Standorte der Ladeeinheiten werden mittels einer Einzelplatzverwaltung, kombiniert mit Satellitennavigationstechnik durchgeführt, so dass der Bediener der Ressourcen für den Horizontalumschlag sämtliche Informationen bezüglich der Positionen der umzuschlagenden Ladeeinheit erhält. Sobald der Fahrer die Position des Containers erreicht, wird der Container identifiziert. Die Containernummer wird optisch ausgelesen. Dabei wird der genaue Standort bei der Aufnahme durch das integrierte Ortungssystem bestimmt. Das Erreichen der genauen Aufnahmeposition wird dem Fahrer durch eine Kontrollleuchte in der Fahrerkabine angezeigt. Auch für das sichere Schließen der Twist-Locks an der Ladeeinheit gibt es für den Fahrer eine Kontrollleuchte. Um darüber hinaus die Aufnahme des korrekten Containers sicherzustellen prüft das System gleichzeitig auch das Gewicht der Ladeeinheit. Zusätzlich kann über die Spreader-Einstellungen die Größe des Containers überprüft werden. Nachdem anschließend die Ladeeinheit zum Zielort transportiert wurde, wird an dem zugewiesenen Ziel-Standort die Ladeeinheit abgesetzt. Hier wird über die installierten Systeme auch die genaue Positionierung überprüft (Brinkmann, 2005).

Im Folgenden werden einige Ressourcen für den Horizontalumschlag näher erläutert. Hierzu gehören Varianten der Straddle-Carrier, Reach-Stacker, Zugmaschinen mit Chassis, Trailerezüge, Containerstapler, Automatic Guided Vehicles (AGV) und Automated Guided Straddle-Carrier (AGSC).

Straddle-Carrier werden hauptsächlich zur Stapelung von Containern eingesetzt. Des Weiteren sind sie auch im Gleisumschlagsbereich zu finden, wo sie die Aufgaben der Be- und Entladung der Züge und Lastkraftwagen übernehmen können. Auch für den Flächentransport kann der Straddle-Carrier eingesetzt werden. Weitere Bezeichnungen für den Straddle-Carrier sind Van-Carrier, Portalhubwagen oder Portalstapelwagen. Der Straddle-Carrier zeichnet sich gegenüber anderen Flurförderzeugen durch seine Agilität aus. Er ist nicht nur in der Lage Ladeeinheiten im ebenen Transport mit einer Geschwindigkeit bis zu 30 km/h zu transportieren, sondern ist ebenso in der Lage Ladeeinheiten selbstständig aufzunehmen oder wieder abzustellen. Darüber hinaus befähigt ihn ein hydraulisch gesteuerter Spreader zum Handling beliebiger Containergrößen. Die Produktivität des Straddle-Carriers kann des Weiteren auch durch einen Twin-Lift-Spreader erhöht werden. Ist das Gerät mit dieser Art Spreader ausgestattet, so ist es möglich zwei Container gleichzeitig zu bewegen. In dieser Version ist somit das Handling von bis zu 60 Tonnen möglich. Für den Einsatz in den engen Liefer- und Fahrgassen ist der Straddle-Carrier mit einer Allrad-Steuerung ausgestattet. Dies macht ihn auch in räumlich beengten Einsatzgebieten wendig um den Umschlagsaufgaben nachgehen zu können. Nachteilig fallen dem Straddle-Carrier seine hohen Anschaffungs- und Betriebskosten zur Last. Außerdem ist eine Bedienung eines Blocklagers mittels des Straddle-Carriers nicht möglich. Die Räder sind hier seitlich angebracht und nehmen somit mehr Platz ein, als andere Flurförderzeuge. Abschließend sei auch festzuhalten, dass bei Einsatz eines Straddle-Carriers lange Transportwege innerhalb der Terminals unrentabel werden. (Brinkmann, 2005) und (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004).

Reach-Stacker werden in Terminals vorrangig im Lager- oder Umschlagsbereich eingesetzt. Häufige Anwendungsgebiete sind daher die Be- und Entladung von Transportmitteln, das Stapeln der Ladeeinheiten in den Depots oder das Bereitstellen von Containern für Ein- und Auspackprozesse. Ausgestattet ist der Reach-Stacker mit einem Teleskoparm, welcher zu einer Reichweite von drei Containerreihen befähigt. Diese können mittels Reach-Stacker bis zu sechs Lagen übereinander gestapelt werden. Dies ist besonders im Gleisumschlag nützlich, da Ladeeinheiten direkt von einem Zug zu einem benachbarten Zug umgeladen werden können, ohne dass der Reach-Stacker seine Position am Gleis ändern muss. Auch der Huckepackverkehr, vereinzelt auch „Piggy-Back“ genannt ist mit dem Reach-Stacker möglich. Ebenso können Ladeeinheiten, welche auf einem Chassis geladen sind, gemeinsam aufzunehmen und diese als Einheit direkt auf einem Bahnwagon abzustellen. Durch diese Flexibilität ist es möglich den Reach-Stacker als alleiniges Umschlagsmittel im Terminal zu verwenden, denn gerade für kleinere Terminals ist es eine große Herausforderung für die Umschlagsaktivitäten Spezialgeräte nur für den Containertransport anzuschaffen. Der teleskopierbare Arm des Reach-Stackers ist heb- und senkbar und ermöglicht somit auch die große Stapelreichweite. Ein Topspreader steht als Lastaufnahmemittel zur Verfügung. In vielen Fällen kann

dieser auch drehbar sein, damit der Reach-Stacker nicht senkrecht vor der aufzunehmenden Ladeinheit stehen muss. Die Hubleistung ist entsprechend mit 10 bis 45 Tonnen ausgelegt, so dass das Gerät in der Lage ist auch beladene Einheiten im Terminal zu bewegen.

Durch seine Wendigkeit und große Flexibilität grenzt sich der Reach-Stacker deutlich von anderen Flurfördermitteln ab. Der vergleichsweise schnelle Transport, die Fähigkeit selbstständig Ladeinheiten aufzunehmen und die große Reichweite des Teleskoparms sind große Vorteile des Reach-Stackers. Dies bedeutet für Terminalbetreiber eine Zeit- und Kosteneinsparung bei kurzen Transportwegen im Terminal. Der Umstand, dass mit diesem Gerät die Ladeinheiten quer zur Fahrtrichtung transportiert werden müssen erfordert jedoch breitere Fahrwege innerhalb des Terminals vorgehalten werden. Für das Flurfördergerät selber treten recht hohe Achslasten auf (Brinkmann, 2005).

Die Zugmaschine mit Chassis ist eine spezielle Sattelzugmaschine. Das Haupteinsatzfeld dieses Gerätes ist das Verfahren der einzelnen Ladeinheiten im Terminal. Allerdings ist die Zugmaschine mit Chassis nicht in der Lage die Ladeinheiten selbstständig aufzunehmen oder diese wieder abzugeben. Für diesen Prozess muss ein zweites Umschlaggerät verwendet werden. Die Transportfähigkeit umfasst eine Leistung von bis zu 120 Tonnen. Dies bedeutet, dass vier 20-Fuß, oder zwei 40-Fuß- Ladeinheiten gleichzeitig transportiert werden können.

Der Fahrer dieser Zugmaschine ist in der Lage seinen Fahrersitz um 180 Grad zu drehen. Die hydraulisch höhenverstellbare Sattelkupplung verfügt über einen „Schwanenhals“. Dieser befähigt zur Aufnahme von ungebremsten Chassis oder Rolltrailern. Die Aufnahme wird dabei vom Fahrer gesteuert und kann innerhalb von Sekunden erfolgen. Hierbei ist eine optimale Abstimmung zwischen dem Kranspiel und dem Horizontalverkehr essentiell. Ein optimierter Betrieb garantiert minimierte Wartezeiten. In der Praxis hat sich eine Kombination aus der Nutzung von Straddle-Carriern und Zugmaschinen mit Chassis durchgesetzt. Die Straddle-Carrier sind in diesem Anwendungsfall ausschließlich für die Auf- und Absetzprozesse zuständig, so dass die benötigte Anzahl dieser minimiert werden kann.

Ein großer Vorteil der Zugmaschinen mit Chassis sind die geringen Beschaffungs- und Wartungskosten. Weitere Argumente für eine Nutzung dieser Ressource sind die vergleichsweise hohen Transportgeschwindigkeiten sowie die schnelle Aufnahme sowie Abgabe der Ladeinheiten. Außerdem können die Zugmaschinen durch ihre flache Radkonstruktion eine hohe Last aufnehmen. Allerdings fordert diese flache Konstruktion auch eine ebene Terminalfläche. Negativ hingegen fällt die Notwendigkeit auf, dass für den Umschlag stets ein weiteres Gerät verwendet werden muss. (Brinkmann, 2005).

Eine Modifikation der Zugmaschine mit Chassis stellt der *Trailerzug* dar. Dieser wird auch *Multi-Trailer-Train (MTT)* genannt. Modifiziert bedeutet gegenüber der Zugmaschine mit Chassis, dass beim Multi-Trailer-Train die Zugkraft wesentlich erhöht wurde. Der MTT ist in der Lage mittels Anhängern bis zu sieben 40-Fuß Containereinheiten gleichzeitig zu transportieren. Um dabei die Sicherheit des

Transportes gewährleisten zu können, ist jeder der Anhänger mit einem Bremssystem ausgestattet. Diese Version erweist sich als sehr nützlich in Anwendungsfällen in welchen viele Ladeeinheiten mit hohem Gewicht an die gleiche Stelle im Terminal transportiert werden müssen. Nachteilig ist jedoch der resultierende Wendekreis des Zuges. In Terminals sind Fahrwege üblicherweise räumlich limitiert, so dass der Raum für den benötigten Wendekreis des MTT nicht ausreicht. Weiterhin besteht die Gefahr, dass der Aufenthalt des MTT in der Nähe von Containerbrücken Sicherheitsbestimmungen im Terminal verletzt und so Produktivitätseinbußen verursacht. Außerdem gilt hier ebenso wie im Falle der Zugmaschine mit Chassis, dass für Be- und Entlade Prozesse des MTT stets weitere Geräte zur Verfügung stehen müssen. (Brinkmann, 2005).

Der *Containerstapler* ist eine Art großer Gabelstapler. Ausgerüstet mit hydraulisch gesteuerten Top- und Seitenspreader verfügt der Containerstapler über eine Hublast von bis zu 40 Tonnen. Jedoch ist proportional zu dem Containergewicht auch ein dementsprechend dimensionierter Containerstapler von Nöten. Dies kann im Falle von schweren zu transportierenden Ladeeinheiten hohe Anschaffungskosten bedeuten. Daher wird der Containerstapler auch öfters in Terminals für den Leercontainertransport eingesetzt. In diesem Fall ist ein geringeres Eigengewicht des Gerätes nötig. In einer solchen Ausführung ist der Containerstapler in der Lage die Ladeeinheiten in 9 Lagen übereinander zu stapeln. Diese Version des Containerstaplers findet in der Regel nur in Terminals mit einer geringen Anzahl von Containerumschlägen Anwendung.

Ein großer Vorteil des Containerstaplers entsteht aus seiner schnellen Lastaufnahme und seiner Flexibilität. Denn dieses Gerät ist durch einen Wechsel der Vorsatzgeräte in der Lage auch andere Güter bewegen zu können. Während des Transportes erweist sich der Containerstapler als außerordentlich wendig. Jedoch benötigt dieser Stapler sehr breite Fahrwege innerhalb des Terminals, da die Ladeeinheiten lediglich quer zur Fahrtrichtung transportiert werden können. Somit wird ein Einsatz von Containerstaplern umso unrentabler je länger die Transportwege innerhalb des Terminals sind. Abschließend sei auch hier festgestellt, dass während dem Transport von beladenen Ladeeinheiten hohe Achslasten am Gerät verursacht werden. (Brinkmann, 2005).

Shuttle-Carrier sind im Wesentlichen eine Variante des Straddle-Carrier. Diese können die Ladeeinheiten allerdings nur zwei Lagen hoch stapeln. In Terminals wird ein Shuttle-Carrier für den Transport, das Stapeln und das Be- und Entladen von Ladeeinheiten eingesetzt. In Terminals in denen RMG's und RTG's eingesetzt werden, sind Shuttle-Carrier vorrangig für den Horizontaltransport der Ladeeinheiten zuständig. Vorteilhaft gegenüber den Straddle-Carriern sind die niedrigen Anschaffungs- und Wartungskosten der Shuttle-Carrier. Besonders aufgrund der höheren Transportgeschwindigkeit erweist sich dieses Gerät als lohnenswerte Alternative für Terminals. (Brinkmann, 2005).

Als weitere Möglichkeit für den Horizontalumschlag stehen Terminals auch Ausführungen der fahrerlosen Transportsysteme zur Verfügung. Zum einen sei hier das *Automated Guided Vehicle (AGV)* zu nennen, welches mit einem dieselhydraulischen Antrieb und einer automatischen Steuerung

ausgestattet ist. Diese Steuerung ist so präzise, dass Ziele innerhalb des Terminals auf 3cm genau angesteuert werden können. Die Aufnahmekapazität des AGV reicht für zwei 20-Fuß Ladeeinheiten gleichzeitig oder einer Ladeeinheit mit Abmaßen bis zu 45 Fuß. Die gesamt zulässige Beladung beträgt 60 Tonnen. Ein AGV verfügt über Bordeigene Rechner, in welchen alle Transportwege des Terminals gespeichert sind. Passive, im Boden des Terminals eingebrachte, Markierungselemente kommunizieren mit diesen Bordrechnern. So kann geprüft werden ob die korrekten Transportwege genutzt werden. Die Fahrwege der AGV's werden von einer zentralen Steuereinheit überwacht. Mittels dieser Steuereinheit können die genutzten Fahrtwege auch gegebenenfalls geändert werden. Allgemein betrachtet, ist der Einsatz der gummiereiften AGV's in Terminals mit einer hohen Umschlagsleistung sinnvoll.

Der Einsatz der AGV's resultiert aus dem Ansatz Personal- und Betriebskosten reduzieren zu können. Die zentrale Steuereinheit des Terminals gewährleistet eine optimierte Gestaltung der Prozessabläufe. Dies bedeutet, dass Informations- und Warenfluss ideal aufeinander abgestimmt sind. Das Resultat ist ein konfliktfreier Horizontaltransport. Die genaue Positionsfähigkeit des AGV ermöglicht dem Gerät eine hohe Produktivität, da sämtliche Ziele im Terminal sehr genau angefahren werden und so die Zeiten der Be- und Entladung verkürzt werden können. Nachteilig am Einsatz der AGV's ist der Umstand, dass diese im Terminal sehr viel Fläche beanspruchen. Denn die Terminalfläche für den Einsatz der AGV muss gleichzeitig für den Individualverkehr gesperrt bleiben um Konflikte zu vermeiden. Des Weiteren erreicht ein AGV während des Betriebs keine hohen Transportgeschwindigkeiten. Auf ebenen Flächen ist das AGV auf 20 km/h gedrosselt. Beim Fahren um eine Kurve sind es sogar nur 11 km/h. Daher müssen Terminals eine große Anzahl dieser AGVs betreiben um den Betrieb der Containerbrücke im Terminal Wartezeiten optimiert gestalten zu können. Da die Anschaffung eines AGV sehr kostenintensiv ist, lohnt sich daher der Einsatz dieser Ressource in Terminals welche gleichzeitig eine hohe Umschlagszahl und hohe Personalkosten aufweisen. (Brinkmann, 2005), (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004) und (Meisel, 2009).

Der *Automatic Guided Straddle-Carrier (AGSC)* kann, zusätzlich zum reinen Transport, Ladeeinheiten automatisch aufnehmen und diese wieder absetzen. Ein AGSC kann obendrein auch Ladeeinheiten selbstständig anheben und werden aus diesem Grund auch öfters *Automated Lifting Vehicle (ALV)* genannt. Dieses System verfügt somit, im Vergleich zum AGV, über eine höhere Produktivität. Der Einsatz eines AGSC hat sich in den Terminals bislang noch nicht verbreitet, da diese Technik recht neu ist und zunächst nur zu Testzwecken derzeit angewendet wird. Gesteuert wird das Fahrzeug mittels Radar, Trägheitsnavigation sowie dem Global Positioning System (GPS). Dadurch ist das Gerät auf dem Gelände des Terminals frei fahrbar. Dies bedeutet, dass das AGSC keine speziell angelegten Fahrstraßen im Terminal benötigt, sondern anhand von Signalen des Terminalmanagement Systems gesteuert wird. Diese Signale empfängt es per Funkübertragung. Auch Hindernisse kann das Fahrzeug mittels eines Anti-Kollisions-Laser erkennen und als Reaktion auf diese stoppen. Das Hauptanliegen bei der Installation dieses Systems für Terminals ist die Sicherheit. Daher ist das automatisierte Terminal ein abgesperrter Bereich und der Zutritt ist stets

untersagt. Mit einem AGSC können nahezu alle Containerbewegungen in Terminals abgedeckt werden. Lediglich Ladeeinheiten mit Sondermaßen oder Überlängen müssen gesondert bewegt werden. (Brinkmann, 2005) und (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004).

Zusammenfassung

Aus dieser Systembeschreibung wird deutlich, dass es eine breite Anzahl an möglichen Ressourcen gibt, welche in Terminals einsetzbar sind. Aus den verschiedenen Vor- und Nachteilen der jeweiligen Förder- und Hubgeräten ergibt sich für Terminalbetreiber die Herausforderung das geeignetste auszuwählen. Zusammenfassend sind in Abbildung 4 die Ressourcen für den Containerumschlag aufgeführt. Hier sind diese auch mit den beschriebenen Funktionsbereichen verknüpft und entweder dem Horizontal- oder Vertikalumschlag zugeordnet.

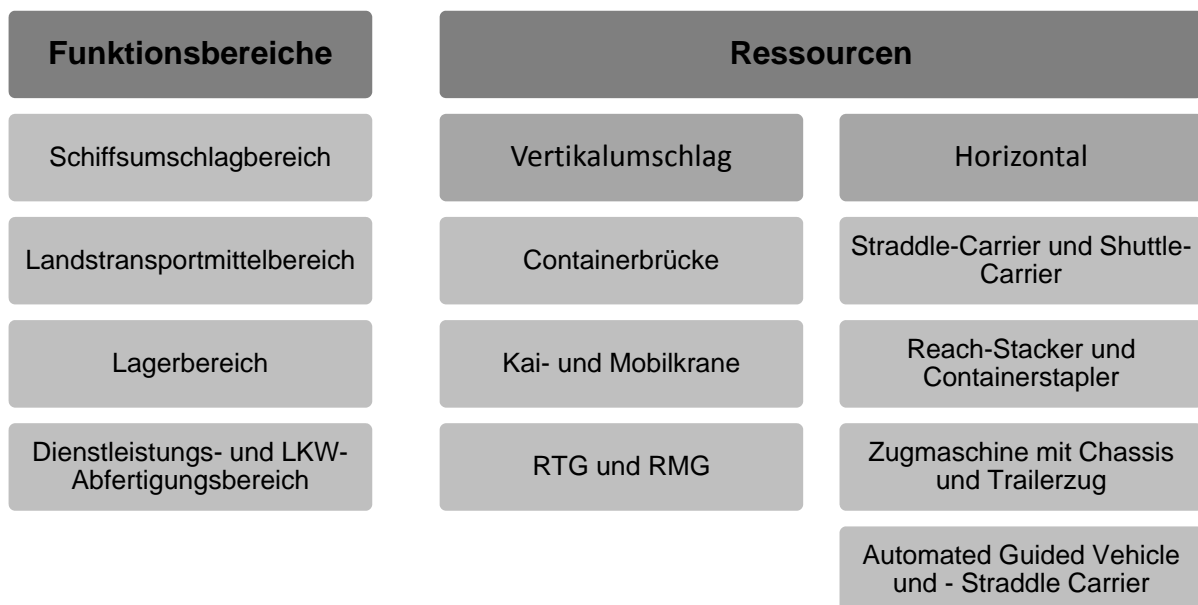


Abbildung 4 - Funktionsbereiche und Ressourcen

1.1.2. Prozessanalyse und Katalog mit allen logistikrelevanten Prozessen

Dieser Abschnitt beinhaltet die Analyse der Prozesse in multimodalen Containerterminals. Für die Abbildung der einzelnen Prozesse sowie der Analyse der einzelnen Prozessschritte wurde neben der Studie ausgewählter Fachliteratur eine Expertenbefragung durchgeführt. In der folgenden Prozessbeschreibung werden als Ergebnis der Analyse die einzelnen Prozessketten der verschiedenen Transportmittel detailliert beschrieben. Zunächst wird der Durchlaufprozess des LKW näher erläutert. Hier wird differenziert betrachtet, ob der LKW Ladeeinheiten versendet oder empfängt. Anschließend an die Prozesse des LKW wird der Umschlagprozess im Terminal näher betrachtet. Es folgt eine detaillierte Beschreibung der Prozessabfolge für Schiffe beginnend bei der Ankunft im Terminal. Danach werden die Kran-Prozesse erläutert. Hier wird zunächst die iterative Prozesskette eines Krans beispielhaft dargestellt und fortführend ein detailliertes Bild eines Kranspiels wiedergegeben. Im Falle der Flurförderprozesse wird ein differenziertes Ergebnis dargestellt. Denn die

Darstellung der Prozessketten ist hier unterteilt für Fördermittel welche die Ladeeinheiten lediglich transportieren und für Fördermittel welche die Ladeeinheiten transportieren, abgeben und stapeln können. Das Ergebnis dieser Prozessbeschreibung ist der folgende Katalog.

LKW-Prozesse

Der Prozess des LKW am Terminal beginnt mit seiner Ankunft und der anschließenden Dokumentenabwicklung. Viele Terminals verfügen über einen Autoschaltet, so dass hier der LKW einfach den Schalter anfahren kann und die Abwicklung aus dem Führerhaus des LKW heraus erfolgen kann. Sollte dies nicht gegeben sein, so ist der Fahrer des LKW gezwungen den LKW auf der Vorstaufläche des Terminals abzustellen und selbstständig das Verwaltungsgebäude aufsuchen. Die Autoschalter sind daher nicht nur für die Fahrer sondern auch für die Terminals vorteilhaft, da auf diese Weise die Durchlaufzeit der LKW's durch das Terminal verkürzt werden kann. Jedoch kann in diesem Fall der Zufluss der Fahrzeuge am Terminaleingang nicht gesteuert werden. Nachteilig ist der Schalter auch dann, wenn es zu Problemen bei der Dokumentenabwicklung kommt. Die LKW's können nicht am Schalter verweilen, da dies sonst eine erhebliche Stauung der Fahrzeuge nach sich ziehen würde. Nachdem die Administration abgeschlossen ist fährt der LKW zu seiner zugewiesenen Ladeposition. Hier erfolgt die Umschlagsabwicklung, welche später noch detailliert beschrieben wird. Sobald der LKW alle Ladeeinheiten abgegeben beziehungsweise alle Ladeeinheiten aufgenommen hat fährt dieser zurück zum Gate. Bevor der LKW das Terminal verlässt wird wieder eine Dokumentenabwicklung nötig. Dort wird der Empfang der Ladeeinheiten administrativ überprüft oder im Falle der Aufnahme einer Ladeeinheit die Richtigkeit der geladenen Ladeeinheit festgestellt. In der Regel bereiten die Terminals die Dokumentenabwicklung bereits bei der Einfahrt des LKW in das Terminal vor, so dass beim Verlassen des LKW nur noch per Sichtprüfung die Richtigkeit der aufgenommenen Ladeeinheit festgestellt werden muss. Dieser Prozess des LKW im Terminal ist in Abbildung 5 zusammengefasst.

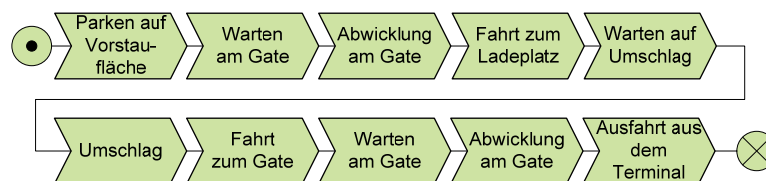


Abbildung 5 - Prozesskette: LKW-Durchlauf

Wie bereits erwähnt muss der LKW-Prozess im Terminal unterschieden werden, je nachdem ob Ladeeinheiten empfangen werden oder der LKW eine Ladeeinheit aufnehmen soll. Die Variationen dieser beiden Prozessketten unterscheiden sich jedoch nur in der Reihenfolge der Prozessbausteine. Die Prozesskette für den Versand einer Ladeeinheit ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Übersicht für den Empfangsprozess folgt in Abbildung 7. Im Fall, dass Ladeeinheiten für den Versand abgegeben werden, fährt der LKW zu seiner zugewiesenen Ladeposition. Ist er dort angekommen wird die Ladeeinheit entsichert und ist bereit für den Umschlag. Nachdem die Ladeeinheit durch eines der Umschlaggeräte aufgenommen wurde, kann der LKW die Fahrt durch das Terminal fortsetzen. Der LKW kann entweder das Terminal direkt wieder verlassen oder gegebenenfalls eine weitere

Ladeeinheit abgeben oder eine neue Ladeeinheit aufnehmen. In diesem Fall kann jedoch die Anfahrt einer weiteren Ladeposition von Nöten sein.

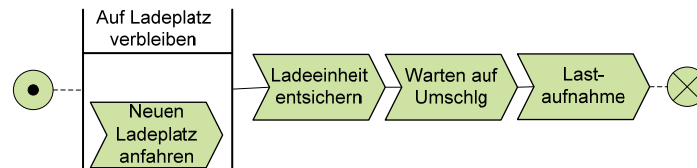


Abbildung 6 - Umschlagabwicklung des LKW im Versand

Die Prozesskette für den Fall des Empfangs ist der für den Versand sehr ähnlich. Diese beiden Prozessvarianten unterscheiden sich lediglich in der Reihenfolge der Schritte. Hier wartet der LKW zuerst auf den Umschlag der aufzunehmenden Ladeeinheit. Nachdem das Umschlagsgerät die Ladeeinheit auf dem LKW abgesetzt hat wird diese für den Transport gesichert. Auch in diesem Fall ergeben sich dem LKW drei mögliche Optionen für die Fortsetzung des Durchlaufs durch das Terminal. Entweder der LKW verlässt direkt das Terminal oder setzt seine Fahrt durchs Terminal fort um an anderen Ladepositionen Ladeeinheiten entweder aufzunehmen oder abzugeben.

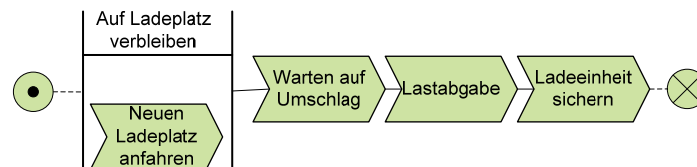


Abbildung 7 - Umschlagabwicklung des LKW im Empfang

Wirtschaftlich betrachtet ist der Empfang oder der Versand von nur einer Ladeeinheit unrentabel. Daher ist es in der Praxis üblich, dass die dargestellten Prozessketten für den Empfang oder Versand von Ladeeinheiten mehrfach auftreten. Hierbei ist die Kombination beliebig. Die vielen Kombinationsmöglichkeiten machen die Beschaffenheit der einzelnen Ladeeinheiten möglich. Im Fall der Sattelaufleger ist es selbsterklärend, dass hier nur eine Ladeeinheit abgegeben und eine neue wieder aufgenommen werden kann. Dieser Umstand gilt ebenso für 40-Fuß Container und Wechselbrücken mit einer Länge bis zu 13,60 Metern. Jedoch existieren Fahrzeuge, welche in der Lage sind zwei Ladeeinheiten aufzunehmen. Dies kann dann geschehen, wenn 20-Fuß Container oder kürzere Wechselbrücken verwendet werden. In diesem Fall ist es möglich zwei Ladeeinheiten abzugeben und auch wieder zwei aufzunehmen. Es ergeben sich also abhängig von den eingesetzten Fahrzeugen und Ladeeinheiten acht verschiedene Möglichkeiten für den Empfang und den Versand. Unterscheiden tun sich diese Möglichkeiten ausschließlich in der Länge der Prozesse, da für den Versand und den Empfang von Ladeeinheiten stets Umschlagvorgänge nötig sind. In Tabelle 1 sind alle identifizierten Kombinationsmöglichkeiten beim Lademittelumschlag aufgelistet, welche sich im Falle des Versands und des Empfangs von Ladeeinheiten ergeben. Die Dauer der Umschlagabwicklung steigt somit proportional zu den benötigten Umschlägen der einzelnen

Kombinationen. Des Weiteren ist zu beachten, dass für die einzelnen Umschläge mehrere Ladeplätze im Terminal angefahren werden müssen.

Tabelle 1 - Kombinationen in der Umschlagabwicklung

| Kombination | Versand [Ladeeinheiten] | Empfang [Ladeeinheiten] | Anzahl Umschläge |
|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 0 | |
| 3 | 1 | 1 | 2 |
| 4 | 0 | 2 | |
| 5 | 2 | 0 | |
| 6 | 2 | 1 | 3 |
| 7 | 1 | 2 | |
| 8 | 2 | 2 | 4 |

In Abbildung 8 wird die Umschlagsabwicklung in Abhängigkeit der Anzahl versendeter oder empfangener Ladeeinheiten visualisiert. Es kann in einem Terminal auch vorkommen, dass nur Sattelaufleger oder Wechselbrücken nur umgeschlagen werden sollen. In diesem Fall besteht für den Fahrer die Möglichkeit die Ladeeinheit selbst im Terminal abzustellen. So werden Wartezeiten eingespart, da der Fahrer nicht auf das Umschlagsgerät warten muss.

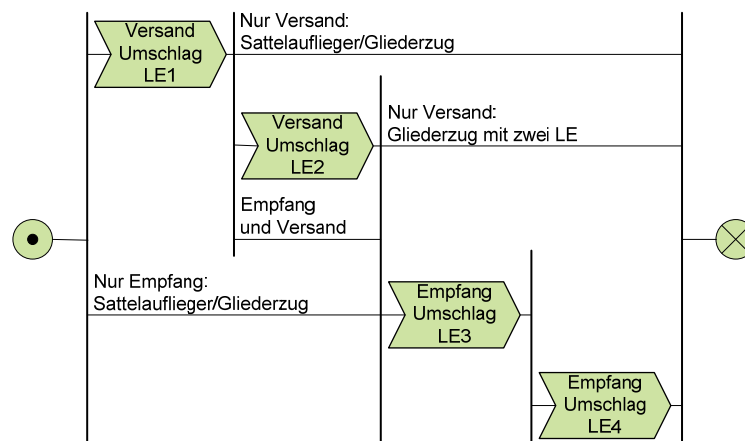


Abbildung 8 - Umschlagsabwicklung in Abhängigkeit der Anzahl versendeter oder empfangener Ladeeinheiten

Die Ladeeinheiten können seitens des Fahrers sowohl im Umschlagsbereich als auch auf anderen befestigten Flächen abgestellt werden. Nimmt der Fahrer diese Möglichkeit in Anspruch so muss er sicherstellen, dass die Ladeeinheit nach dem Abstellen vollständig gesichert ist. Allerdings entsteht bei dieser Möglichkeit zusätzliche Arbeit für das Terminal, da Ladeeinheiten welche nicht im Umschlagsbereich abgestellt werden, mit entsprechendem Fördergerät dorthin verbracht werden müssen. Allerdings eröffnet diese Variante auch die Möglichkeit die Prozesse im Umschlagsbereich zu entzerren, sowie eine Pufferfläche für den Umschlag vorzuhalten.

Zug-Prozesse

Bei der Betrachtung der Zug-Prozesse im Terminal wird zwischen eingehenden und ausgehenden Zügen unterschieden. Als eingehender Zug wird eine beladene Wagengruppe verstanden, welche von einer Streckenlok gezogen wird. In Abbildung 9 ist die Prozesskette für eingehende Züge abgebildet.

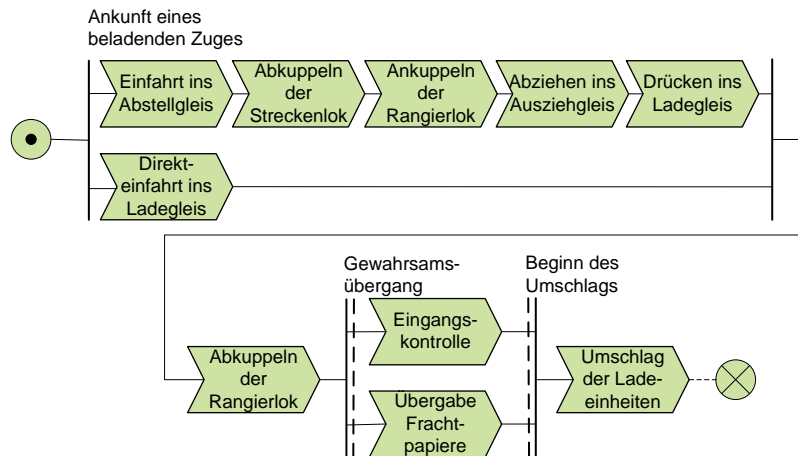


Abbildung 9 - Prozesskette: Eingehende Züge

Nach Ankunft im Terminal erreicht der Zug den Rangierbereich und fährt in das Abstellgleis des Terminals ein. Um die beladenen Wagen in das Gleis zur Ent- und Beladung zu befördern werden zumeist einige Rangiervorgänge notwendig. Zu Beginn wird die Streckenlok des Zuges abgekuppelt und eine Rangierlok zieht die Wagen in das Ladegleis. Für den Fall, dass das Ladegleis als Durchgangsgleis ausgelegt ist, kann hierfür das Schwungsverfahren angewendet werden. Sollte eine Verbrennungsllok bei dem Rangiervorgang zur Verfügung stehen, können die Wagen auch direkt in das Gleis eingefahren werden. Dies würde die zeitintensiven Rangiermanöver einsparen. Direkt nach Ankunft der Wagen im Gleis wird dieses zur Eingangskontrolle abgeschritten. Dabei werden die Wagenreihung und eventuelle Beschädigungen aufgenommen. Ebenso kann hier festgestellt werden, ob sich die vorab angemeldeten Ladeeinheiten auf den korrekten Wagen befinden. Nachdem die Frachtpapiere übergeben wurden und die Ladeeinheiten entsichert sind, kann mit der Entladung des Zuges begonnen werden.

Im Gegensatz zu den eingehenden Zügen handelt es sich bei den ausgehenden Zügen um eine Wagengruppe, welche die Ladeeinheiten für den Versand transportiert. Die Prozesskette dieser ausgehenden Züge ist detailliert in Abbildung 10 abgebildet. Nachdem auch die letzte Ladeeinheit auf den Zug umgeschlagen und für den Transport gesichert ist, folgt die Vorbereitung des Transports. Ähnlich den eingehenden Zügen, werden auch die ausgehenden Züge zur Kontrolle abgeschritten. Während dieser Ausgangskontrolle werden die Ladeeinheiten wieder auf eventuelle Beschädigungen während der Umschlagprozesse überprüft und es wird auch hier festgestellt ob sich die Ladeeinheiten auf ihren zugehörigen Wagennummern befinden. Aus Gründen der Zeitersparnis wird mit der Ausgangskontrolle schon während der Umschlagprozesse begonnen. Auch die Frachtpapiere werden

zeitgleich zum Umschlag fertiggestellt. Somit bleiben zum Ende des Umschlags nur einige wenige Ladeeinheiten übrig, welche der Ausgangskontrolle unterzogen und in den Frachtdokumenten manifestiert werden müssen. Zum Abschluss der Ausgangskontrolle muss die Wagengruppe im Sinne der Transportsicherheit noch einen Bremstest absolvieren bevor sie in das Abstellgleis rangiert werden kann. Hier wird die Reaktion des Bremskreises des gesamten Zuges getestet. Erst nach bestandener Bremsprobe darf die Wagengruppe das Ladegleis verlassen und wird von einer Rangierlok im Abstellgleis zur Abholung bereitgestellt. Verfügt das als Durchgangsgleis gestaltete Ladegleis jedoch über einen Stromanschluss, so kann die Streckenlok direkt im Ladegleis angekuppelt werden. Vor dem Verlassen des Terminals ist eine weitere Bremsprobe nötig. Anschließend ziehen Streckenlok oder Verbrennungsllok die Wagengruppe in das Streckengleis.

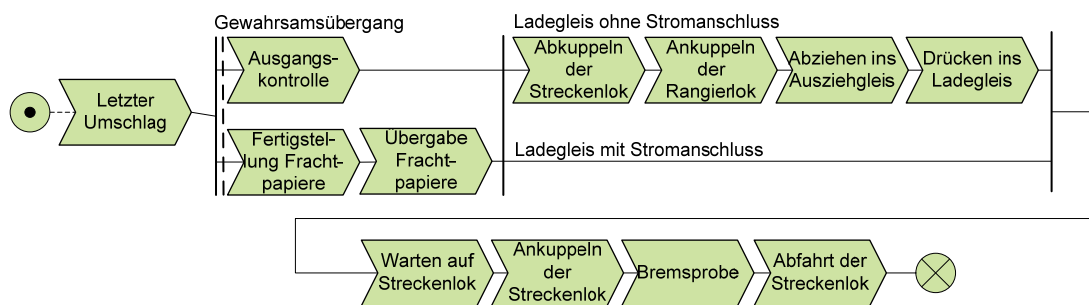


Abbildung 10 - Prozesskette ausgehender Züge

Schiff-Prozesse

Auch für den Schiff-Prozess werden Prozessketten für den Eingang und Ausgang dargestellt. Im Falle des Schiffeingangs meldet sich das Schiff zuerst im Terminal an. Seitens des Terminals wird diesem dann die entsprechende Liegeposition an der Kaimauer zugewiesen. Abhängig von der Dimensionierung des Hafenbeckens ist es dem Schiff möglich selbstständig an der Kaimauer anzudocken. Ist dies nicht gegeben, so wird das Schiff mittels eines Hafenschleppers an diese Position rangiert. Anschließend wird das Schiff vertäut und es erfolgt eine Eingangskontrolle der Beladung und das Terminal bekommt den Stauplan des Schiffes ausgehändigt. Diesem Stauplan sind für den Umschlag relevante Informationen, wie Reihenfolge der Ladeeinheiten und deren Gewichte zu entnehmen. Der Stauplan ist daher von äußerster Wichtigkeit, da meist nicht die gesamte Beladung des Schiffes für das Terminal bestimmt ist. Anhand des Stauplans ist zu erkennen welche Ladeeinheit im Terminal umgeschlagen werden soll. An diesen Ladeeinheiten werden die Twist-Locks gelöst um den bevorstehenden Umschlag vorzubereiten. Im Gegensatz zu anderen Verkehrsmitteln ist im Falle des Schiffumschlages das Stellplatzniveau von hoher Bedeutung. Umzuschlagende Einheiten können von nicht-umzuschlagenden überdeckt sein, so dass für das Umschlagsgerät weitere Umschlagprozesse notwendig sind, um die gewünschte Ladeeinheit für die Entladung frei zu räumen. Um sowohl Liegezeiten der Schiffe als auch die Umschlagprozesse der Terminals optimieren zu

können, wird neben der Lastverteilung auch die Zielorte der Ladeeinheiten bei der Erstellung des Stauplans berücksichtigt. Die Übersicht der Prozesskette ist in Abbildung 11 dargestellt

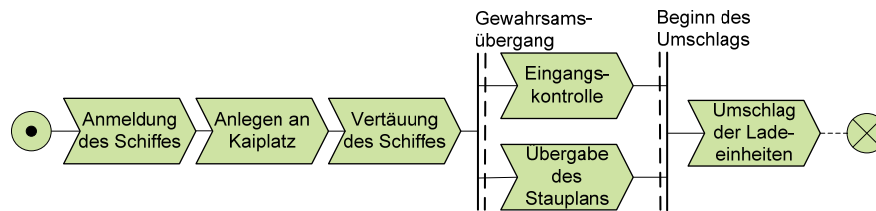


Abbildung 11 - Prozesskette eingehender Schiffe

Wie bereits erwähnt ist es möglich ebenso eine Prozesskette für ausgehende Schiffe zu erstellen. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 zusammengefasst.

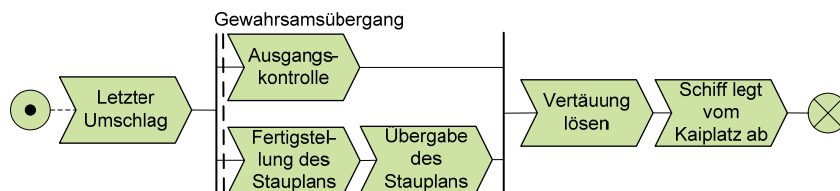


Abbildung 12 - Prozesskette ausgehender Schiffe

Nachdem die letzte Ladeeinheit auf das Schiff umgeschlagen wurde, kann es für das Ablegen vorbereitet werden. Im Zuge dessen erfolgt die Ausgangskontrolle, welche die Kontrolle auf Beschädigungen der Ladeeinheiten sowie die Erstellung des Stauplans beinhaltet. Dieser wird abschließend an das Schiff übergeben. Für das Ablegen des Schiffes wird anschließend die Vertäuung gelöst. Auch für die Ausfahrt aus dem Hafenbecken besteht die Möglichkeit der Unterstützung eines Hafenschleppers.

Kran-Prozesse

Die Kran-Prozesse bilden, wie in Abbildung 13 dargestellt, eine sich iterativ wiederholende Abfolge. Der Kran beginnt seine Arbeit im Terminal mit der Schichtaufnahme des Kranführers. Ebenso endet seine Arbeit mit dessen Schichtende. Maßgebend für die Arbeitsaufnahme des Krans ist die Verfügbarkeit von mindestens einer Ladeeinheit im Umschlagsbereich. Ist dies gegeben kann eine verfügbare Ladeeinheit ausgewählt und umgeschlagen werden. Sollte sich keine Ladeeinheit im Umschlagsbereich befinden, so muss der Kran auf ankommende Verkehrsmittel mit entsprechenden Ladeeinheiten warten. Somit ergeben sich zwei Optionen. Zum einen werden seitens des Krans, im Terminal befindliche Ladeeinheiten auf Verkehrsmittel umgeschlagen. Des Weiteren werden mit Hilfe des Krans ankommende Verkehrsmittel entladen. Die freien Zeiten zwischen den einzelnen Umschlagprozessen des Krans können für eine strategische Re-positionierung verwendet werden. Dies bedeutet, dass der Kran zu einer Position verfahren kann an der der nächste Umschlag vermutet wird. In Terminals mit zwei Kränen kann auch eine strategisch günstige Position am Rande des Umschlagbereiches liegen, um den Aktionsradius des zweiten Krans vergrößern zu können.

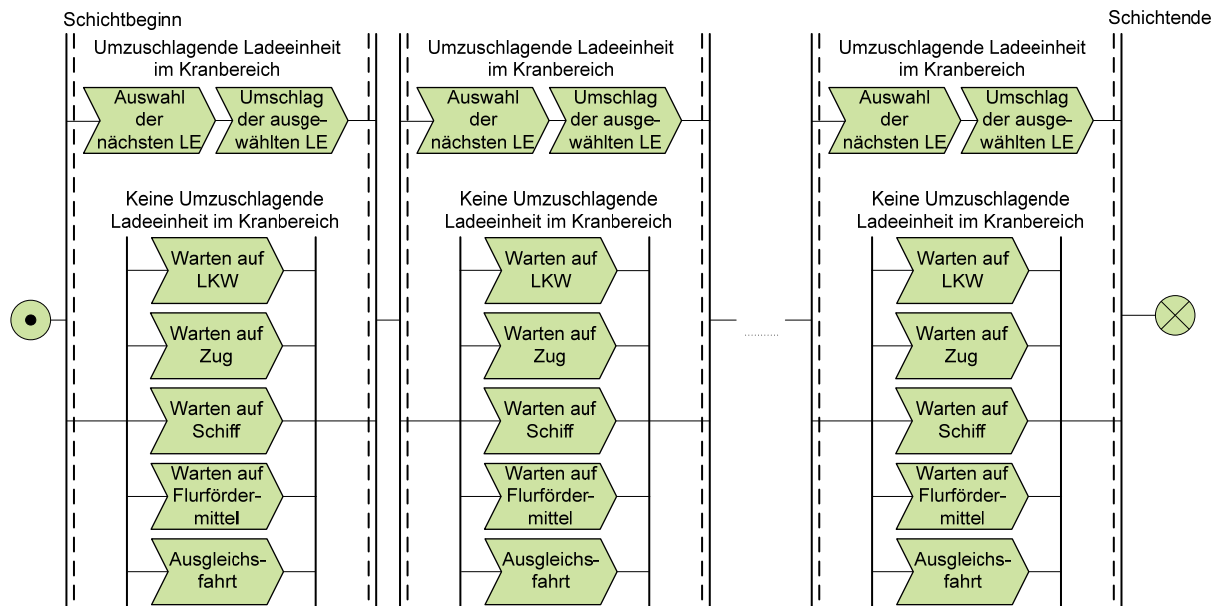


Abbildung 13 - Prozessabfolge Kran

Der Umschlagprozess im Einzelnen lässt sich zusätzlich noch detaillierter darstellen. Wie in Abbildung 14 dargestellt beginnt die Prozessabfolge des Umschlags stets mit einer Leerfahrt. Dies ist auch als Re-Positionierung zu verstehen, da so immer die nächste umzuschlagende Ladeeinheit angefahren wird. Nachdem die Position erreicht ist und sich der Spreader über der Ladeeinheit befindet, wird dieser gesenkt. Die Ladeeinheit selbst wird durch das Schließen der Twist-Locks oder der Greifarme aufgenommen. So kann die Ladeeinheit nun angehoben und verfahren werden. Sobald der Kran mit der Ladeeinheit die korrekte Zielposition erreicht hat wird dieser gesenkt und die transportierte Ladeeinheit abgesetzt. Anschließend wird der Spreader wieder gehoben und steht somit für einen weiteren Umschlagprozess zur Verfügung. Auch dieser beginnt zunächst wieder mit einer Leerfahrt.



Abbildung 14 – Kranspiel

Flurfördermittel-Prozesse

Wie bereits mit der Beschreibung der Ressourcen für den vertikalen und horizontalen Umschlag deutlich wird, können Flurfördermittel verschiedene Aufgaben im Terminal übernehmen. Daher sind die Abfolgen der Prozessketten hier abhängig von dem Einsatzbereich der Flurfördermittel. Geräte, wie AGVs, Zugmaschinen mit Chassis und Trailerzüge können Ladeeinheiten im Terminal lediglich verfahren. Darüber hinaus gibt es allerdings auch Geräte welche Ladeeinheiten auch auf- und abnehmen, sowie stapeln können. Ähnlich den Kran-Prozessen wiederholen sich die Abläufe für Flurfördermittel iterativ. Zu den Geräten, welche in der Lage sind auch Container umzuschlagen zählen Straddle-Carrier, Reach-Stacker, Containerstapler, Shuttle-Carrier und AGSCs. Beispielhafte Iterationen sind folgend in Abbildung 15 erläutert.

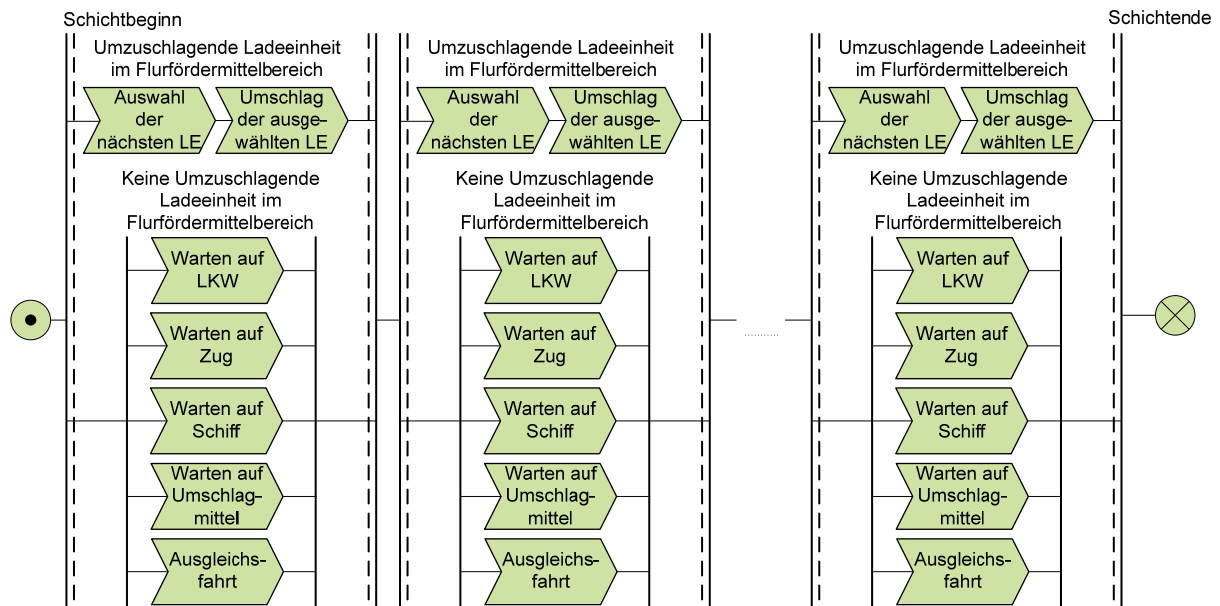


Abbildung 15 - Prozessabfolge für Flurfördermittel

Auch für den Umschlag mit Flurförderzeugen gilt, dass für den Beginn des Umschlagprozesses eine Ladeeinheit im Umschlagbereich des Terminals verfügbar sein muss. Ist dies der Fall so kann die Ladeeinheit direkt umgeschlagen werden. Sollte keine Ladeeinheit verfügbar sein so ist das Flurfördermittel gezwungen auf ein Verkehrsmittel zu warten und von diesem Ladeeinheiten für den Umschlag aufzunehmen. Ebenso wie der Kran kann das Flurfördermittel auch eine Fahrt zu einer strategisch besseren Position im Terminal vornehmen.

Auch im Falle des Flurfördermittels können die Prozesse für den Umschlag sowie für den Transport von Ladeeinheiten im Terminal detaillierter betrachtet werden. So stellt Abbildung 16 die Prozesskette eines Geräts mit Umschlagsfunktion dar.

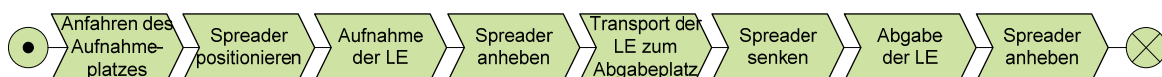


Abbildung 16 - Prozesskette für Flurfördermittel im Transport und Umschlag

Der Prozess beginnt mit dem Anfahren des Lagerplatzes der Ladeeinheit. Hier muss der Spreader positioniert und für die Lastaufnahme genau ausgerichtet werden. Im Anschluss daran kann der Spreader die Ladeeinheit aufnehmen und selbiger angehoben werden. Das Flurfördermittel transportiert daraufhin die Ladeeinheit zu seiner Zielposition im Terminal. Das kann eine weitere Vorstauffläche oder eine Verkehrsmittel sein, welches die Ladeeinheit für den Weitertransport aufnimmt. Ist die Zielposition erreicht kann der Spreader wieder gesenkt werden und die Ladeeinheit anschließend abgegeben werden. Zum Schluß der Prozesskette hebt das Gerät den Spreader erneut an um für einen weiteren Umschlag zur Verfügung zu stehen.

Die Prozesskette für ausschließlich für den Ladeeinheiten-Transport eingesetzten Geräte ist deutlich kürzer und in Abbildung 17 dargestellt. Wie schon erstere Prozesskette beginnt auch diese mit der Anfahrt der Position der aufzunehmenden Ladeeinheit. Die knappe Prozesskette resultiert aus dem Umstand, dass diese Flurfördermittel nicht in der Lage sind die Ladeeinheiten selbstständig aufzunehmen. An dieser Stelle sind sie auf ein geeignetes Umschlaggerät angewiesen, welches bis hierher diese Aufgabe für sie übernimmt. Nach der Aufnahme der Ladeeinheit wird diese zu dem Abgabeplatz transportiert. Dort wird erneut ein weiteres Gerät benötigt um die Abgabe der Ladeeinheit realisieren zu können. Erst nach der Abgabe der Ladeeinheit steht das Flurfördermittel für einen weiteren Transport bereit.

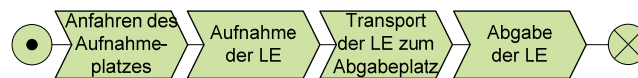


Abbildung 17 - Prozesskette für Flurfördermittel des Transports

1.1.3. Datengenerierung

Damit eine Simulationsstudie durchgeführt werden kann, wird zunächst eine Systemlast benötigt. Diese soll es dem Anwender der Simulation ermöglichen Verteilungen zu verwenden, welche die Ankünfte der Verkehrsmittel in den Terminals realistisch nachbilden. Eine weitere Möglichkeit der Nachbildung der täglichen Ankunfts Muster ist die Verwendung von historischen Daten. Eine Analyse in den Terminals des projektbegleitenden Ausschusses ergab, dass der Datenstand nicht ausreichend für eine erfolgsversprechende Simulation war. Das Ergebnis der Datenstände ließ lediglich Rückschlüsse auf die gesamten Umschlagszahlen pro Verkehrsträger zu. Diese Aggregation erweist sich jedoch für dieses Simulationsvorhaben als ungenügend. Um die notwendigen Grunddaten zu erhalten wurde eine Umfrage durchgeführt, aus welcher sich anschließend entsprechende statistische Verteilungen ableiten ließen. Diese Grunddaten, wurden einem Datengenerator zugeführt, welcher Systemdaten auf Container- und Fahrzeugebene lieferte.

Grunddaten

Wie bereits beschrieben wurde eine Umfrage erstellt und durchgeführt um stochastische Verteilungen im Containerverkehr zur Datenerzeugung ableiten zu können. Hieraus ergeben sich entsprechende Eingangsverteilungen bezüglich der Art und Größe der Ladeeinheit. Weiterhin maßgebend sind die Verweildauer sowie die Verkehrsmittel und deren Ankunftsverhalten. Sowohl bimodale als auch trimodale Terminals sind in dieser Umfrage berücksichtigt worden. Das Ergebnis der Umfrage bezieht sich auf eine Mehrheit aus trimodalen Terminalbetreibern.

Abbildung 18 stellt die Verteilung des Jahresumschlags in TEU dar. Die Mehrheit verweist auf einen Jahresumschlag von weniger als 75.000 TEU. Mehr als 275.000 TEU weisen 17 % der Befragten auf. Somit wurde das Ergebnis der Umfrage erfüllt, Grunddaten aus kleinen, mittleren und großen Containerterminals zu evaluieren.

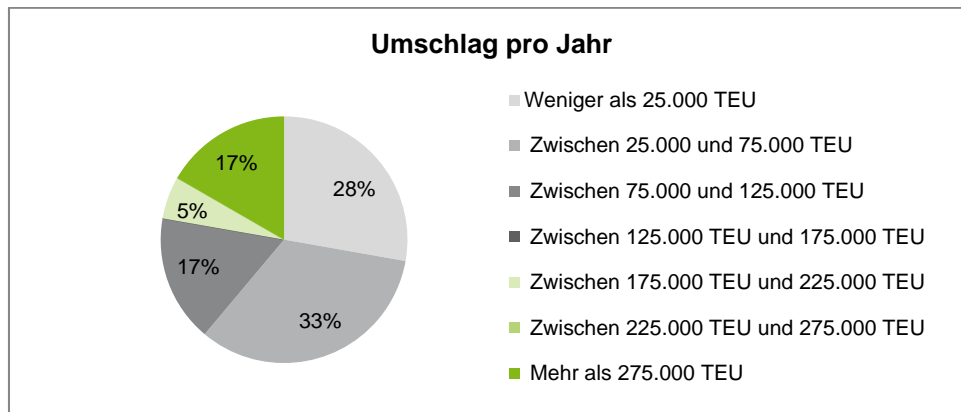


Abbildung 18 - Umschlag pro Jahr in TEU

Container

Ein Teil der Umfrage befasst sich mit Informationen der Containerdaten. Eine Auswertung der Hauptläufe ergibt dass im Durchschnitt 52 % der Container die Terminals per Schiff erreichen. Den zweithäufigsten Verkehrsträger bildet die Straße mit durchschnittlichen 30 %. Erst danach folgt die Schiene mit 18%. Im Falle der bimodalen Terminals bleibt festzuhalten, dass diese nicht den Verkehrsträger Wasser bedienen, und sich daher in dieser Layout-Variante 73% aller Containerströme auf die Straße verteilen und 27% der Container per Schienenverkehr transportiert werden

Weiter zu erfassende Containerdaten betreffen die Größe und den Ladestatus. In Abbildung 19 ist die Verteilung von 40-Fuß Containern zu 20-Fuß Containern zusammengefasst dargestellt. Dieser ist zu entnehmen, dass in 25% aller Fälle die Gesamtzahl der Container aus 70% 40-Fuß Containern und 30% 20-Fuß Containern besteht. Im Durchschnitt besteht der Containermix aus 56% 20-Fuß Containern und 44 Prozent 40-Fuß Containern.

Als Ladestatus wird in dieser Umfrage erfragt, ob die Container beladen oder leer das Terminal erreichen. Die Auswertung ergab, dass durchschnittlich 54 Prozent aller Container voll und die restlichen 46 Prozent leer am Terminal angeliefert werden. Das Ergebnis ist im Detail in Abbildung 20 dargestellt.

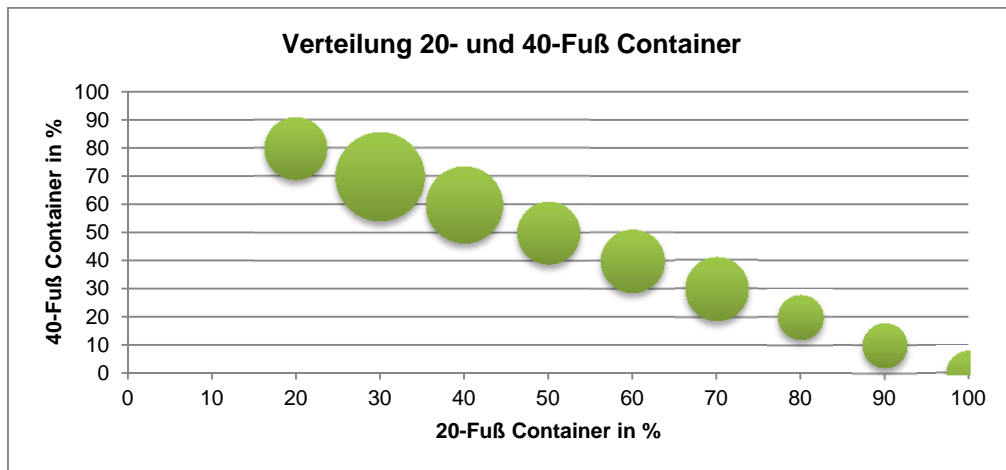


Abbildung 19 – Containermix

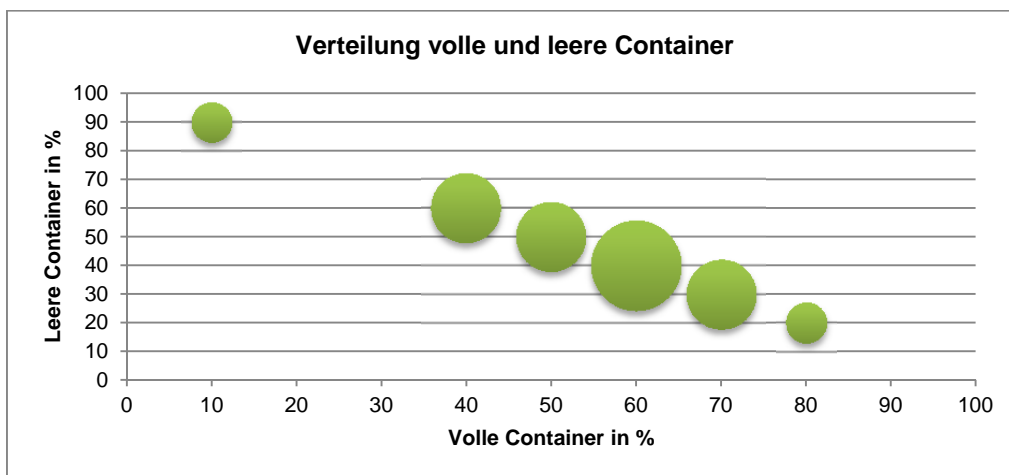


Abbildung 20 - Verteilung der vollen und leeren Container

Weitere, für die Simulation relevante, Containerdaten sind die Verweilzeiten der Ladeeinheiten im Terminal. Diese sind sowohl für volle als auch für leere Container relevant. In Abbildung 21 wird anhand zweier Säulen dargestellt, dass leere Container wesentlich längere Verweilzeiten als volle Container aufweisen. Leere Container haben eine hohe Varianz ihrer Verweildauer, welche von weniger als 3 Tagen bis zu mehr als 15 Tagen betragen kann. Diese Varianz ist im Falle der beladenen Container deutlich kleiner und erstreckt sich von einer Verweildauer von weniger als einem Tag bis zu mehr als 4,5 Tagen.

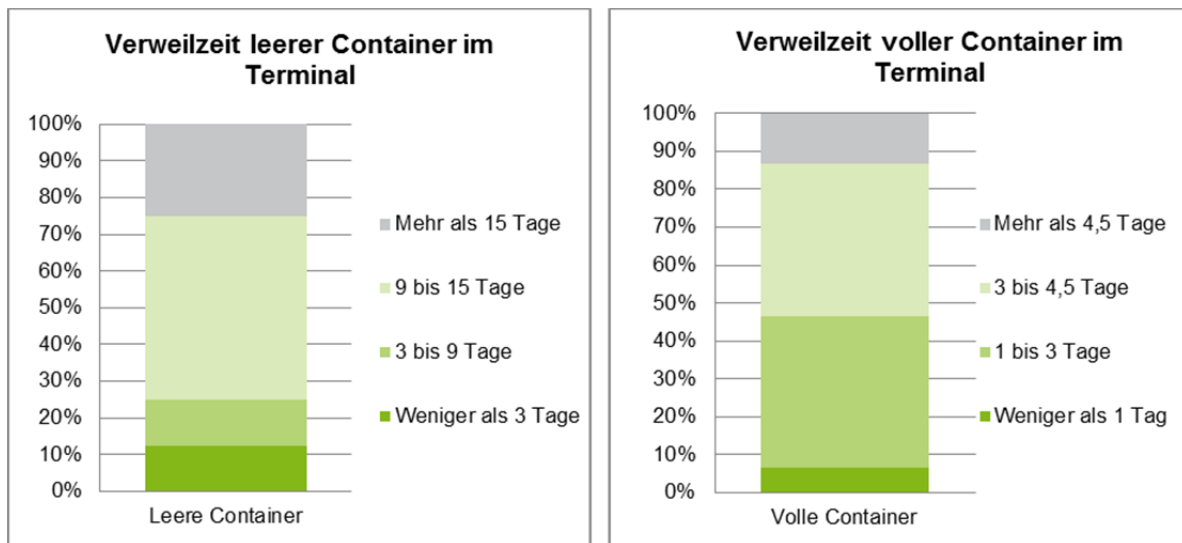


Abbildung 21 - Verweilzeit leerer und voller Container im Terminal

Schiene

Des Weiteren wurde in der Umfrage die Anzahl der im Terminal ankommenden Ganzzüge erfasst. In 69% der befragten trimodalen Terminals verkehren demnach weniger als zwei Züge pro Tag. Die übrigen trimodalen Terminals bedienen zwei bis vier Züge täglich. In bimodalen Terminals hingegen werden im Durchschnitt mehr Züge als in trimodalen Layouts abgefertigt. Hier fertigen 67 % der Terminals zwei bis 4 Züge täglich ab und sogar 33 % der Befragten können mehr als 10 Züge pro Tag vermelden.

Noch deutlichere Unterschiede zwischen bimodalen und trimodalen Terminals sind an den Standzeiten der Züge zu erkennen. Mehr als die Hälfte der befragten trimodalen Terminals gab die Standzeit der Züge mit bis zu 4 Stunden an. Weitere 27% verweisen auf eine Standzeit zwischen 5 und 6 Stunden. 18% gaben an, Stehzeiten von über 6 Stunden bei den bedienten Zügen zu messen. Im Gegensatz dazu sei erwähnt, dass Züge in bimodale Terminals in allen Fällen länger als 4 Stunden stehen und somit im Durchschnitt den Zügen eine längere Standzeit abverlangen wie die trimodalen Terminals.

Hingegen können den Ladeschluss betreffend keine deutlichen Unterschiede zwischen bimodalen und trimodalen Terminals erkannt werden. Das Ergebnis, dargestellt in Abbildung 22, zeigt welcher Zeitraum für den Ladeschluss eingeräumt wird, bevor der Zug das Terminal planmäßig verlassen soll. Von circa der Hälfte der befragten Terminals wird der Ladeschluss strikt eingehalten. Durchschnittlich zweimal pro Woche wird dieser allerdings auch um circa 50 Minuten überzogen.

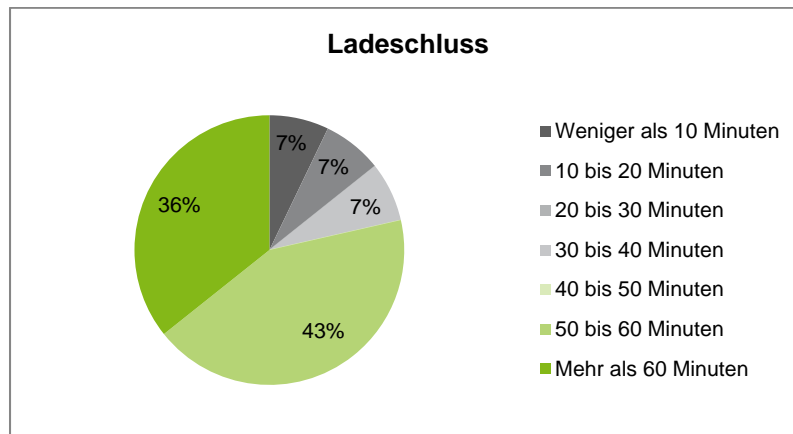


Abbildung 22 - Ladeschluss

Wasser

Die Befragung bezüglich des Verkehrsträgers Wasser in der erstellten Umfrage richtet sich dem Verständnis nach nur an die trimodalen Terminals, da die bimodalen Terminals den Schiffsverkehr nicht bedienen können. Als Ergebnis hieraus kann das Aufkommen ankommender Schiffe an den trimodalen Terminals gewonnen werden. In 26% der befragten Terminals kommen pro Tag weniger als zwei Schiffe an. Jeweils 20 Prozent verweisen auf durchschnittliche Ankünfte von einem, zwei und drei Schiffen pro Tag. Die restlichen 14 % der Terminals teilen sich zur Hälfte in vier und mehr als fünf ankommende Schiffe. Außerdem besagt die Auswertung, dass die durchschnittliche Liegezeit eines Schiffes im Terminal circa 9 Stunden beträgt.

Straße

Aus den Ergebnissen der Befragung zum Verkehrsträger Straße kann eine Tagesganglinie abgebildet werden. Diese werden jeweils getrennt nach bimodalen und trimodalen Terminals erstellt. Im Vergleich der beiden Tagesganglinien ist festzustellen, dass trimodale Terminals eine recht gleichmäßige, wenn gleich auf die Tagesstunden konzentrierte, Verteilung der LKW-Ankünfte nachweisen. Zu Tagesbeginn steigt die Linie stark an und fällt ebenso rasant in den Abendstunden. Der Hochpunkt der LKW-Ankünfte ist zwischen 13 und 15 Uhr erreicht. Detailliert ist diese Tagesganglinie in Abbildung 23 verdeutlicht. Anhand beider Tagesganglinien wird deutlich, dass Terminals nur tagsüber geöffnet sind, sodass in den Nachtstunden nur wenige LKWs die Terminals erreichen.

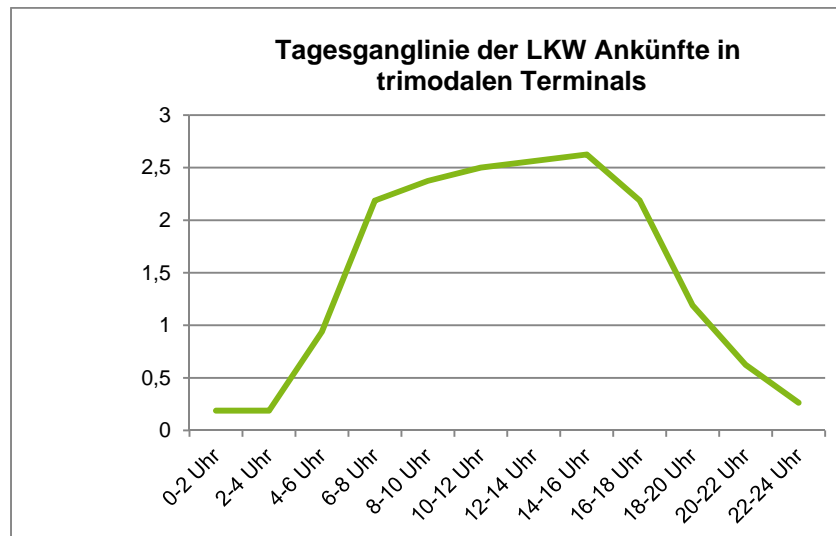


Abbildung 23 - Tagesganglinie der trimodalen Terminals

Bimodale Terminals hingegen zeigen im Falle der LKW-Ankünfte ein ambivalenteres Verhalten. Hier sind in den Morgenstunden und in den Abendstunden zwei Hochpunkte zu finden. Es kann festgestellt werden, dass der Betrieb am straßenseitigen Terminaleingang in den Mittagsstunden zurückgeht und zum Nachmittag wieder stärker zu steigen beginnt.

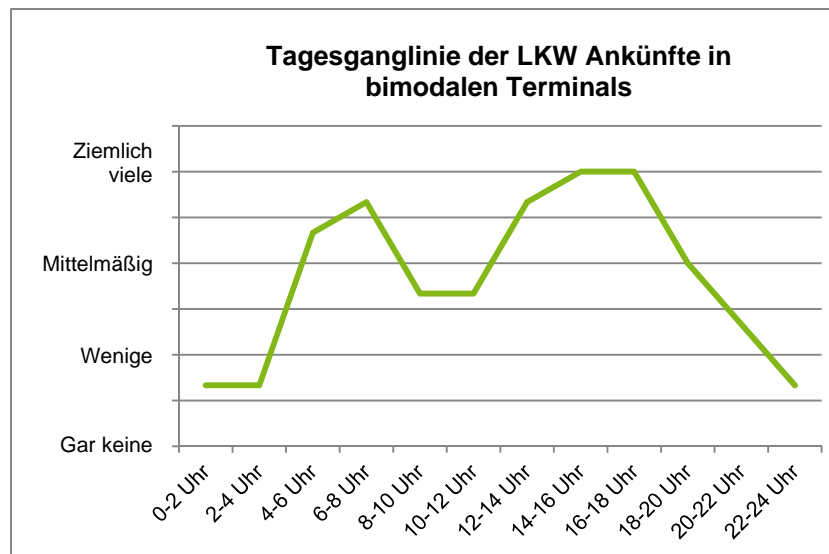


Abbildung 24: Tagesganglinie der LKW Ankünfte in bimodalen Terminals

4.2 Arbeitspaket 2: Validierung von Literatur- und Herstellerangaben mittels Verbrauchsmessungen

Die bereits beschriebene Systembeschreibung und die abschließende Ermittlung der Systemlasten für den Simulationsansatz wurden mit dem Projektausschuss diskutiert. Da eine Wissenslücke betreffen der genauen Verbrauchswerte einzelner Ressourcen besteht wurde für die Validierung dieser Daten Literatur und entsprechende Herstellerangaben studiert um Verbrauchsdaten zu katalogisieren. Das Ergebnis dieser Studie sind einzelne Datenbanken, welche den Katalog zu jeder einzelnen

Ressourcen-Einheit darstellen. Hier werden die Ergebnisse strukturiert nach der Reihenfolge in der Systembeschreibung dargestellt. In den Katalogen sind Daten für folgende Ressourcen hinterlegt:

- Rail-Mounted-Gantry-Crane (RMG)
- Rubber-Tyred-Gantry-Crane (RTG)
- Reach-Stacker
- (Container-) Stapler
- Portalhubwagen (auch Straddle Carrier oder Van-Carrier)
- Hafenzugmaschinen (auch Tugmaster, MAFI oder RoRo-Traktor)

Beginnend mit dem Vertikalumschlag ist in Abbildung 25 ein Auszug aus dem Katalog für Mobilkrane dargestellt. Hierin aufgelistet sind charakteristische Merkmale wie die Bezeichnung und Dimensionen. Ebenso sind technische Daten wie Hubhöhe, Senktiefe, Geschwindigkeiten, Wippzeiten und andere verzeichnet.

| Hersteller | Modell | Variante | Antrieb | Tragfähigkeit [t] | Ausleger [m] | Hubhöhe [m] | Senktiefe [m] | max. Hubgeschwindigkeit [m/min] | Kranfahrgeschwindigkeit [m/min] | Wippzeit [min] | Drehgeschwindigkeit [r.p.m.] | TEU/h | Kraftstoffverbrauch [l/h] | Motorleistung [kW] | Quelle |
|------------|---------|----------|---------------|-------------------|--------------|-------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------------------|-------|---------------------------|--------------------|---------|
| Liebherr | LHM 120 | | hydrostatisch | 42 | 30 | 34 | 13 | 31/70 | 90 | n. v. | 1,6 | 20/25 | 20/35 | 450 | [Gon13] |
| Liebherr | LHM 180 | | hydrostatisch | 64 | 35 | 42 | 12 | 20/70 | 90 | n. v. | 1,6 | 20/25 | 20/35 | 450 | [Gon13] |
| Liebherr | LHM 280 | | hydrostatisch | 84 | 40 | 48 | 12 | 24/57 | 90 | n. v. | 1,6 | 20/25 | 20/35 | 450/670 | [Gon13] |
| Liebherr | LHM 420 | | hydrostatisch | 124 | 51 | 44 | 14 | 18/50 | 90 | n. v. | 1,6 | 25/30 | 25/40 | 670 | [Gon13] |
| Liebherr | LHM 550 | | hydrostatisch | 144 | 54 | 45 | 15 | 18/100 | 90 | n. v. | 1,6 | 25/30 | 25/40 | 670 | [Gon13] |
| Liebherr | LHM 600 | | hydrostatisch | 208 | 58 | 45 | 15 | 11/100 | 90 | n. v. | 1,6 | 25/30 | 25/40 | 670 | [Gon13] |

Abbildung 25 - Auszug aus dem Katalog für Mobilkrane

Des Weiteren wurden in der Systembeschreibung im Abschnitt des Vertikalumschlages die RMGs und RTGs näher spezifiziert. Der Katalog der RMGs, in Abbildung 26 dargestellt, führt in der logischen Konsequenz gegenüber dem Katalog der RTGs den Energieverbrauch auf. Im Falle der RTGs ist somit wieder der Kraftstoffverbrauch maßgebend (vergleiche Abbildung 27).

| Hersteller | Modell | Typ | max. Tragfähigkeit [t] | Max. Spurweite [m] | max. Hubhöhe [m] | Hubgeschwindigkeit [m/min] | Katzfahrgeschwindigkeit [m/min] | Drehgeschwindigkeit [r.p.m.] | Krangeschwindigkeit [m/min] | Hubwerk [kW] | Katzfahrwerk [kW] |
|------------|--------------------------|-------------|------------------------|--------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|
| Kone | Greenville ICTL RMG 1200 | | 40 | 43,9 | 12,19 | 30/60 | 100 | 1,6 | 100 | n. v. | n. v. |
| Kone | Greenville ICTL RMG 866 | | 40 | 42,67 | 15,85 | 30/60 | 120 | 1,6 | 140 | n. v. | n. v. |
| KOC | Terminal Server 50 | Standard* | 50 | 35 | n. v. | 40/80 | 180 | n. v. | 120 | n. v. | n. v. |
| KOC | Terminal Server 50 | Einseitig** | 50 | 30/45 | n. v. | 40/80 | 180 | n. v. | 120 | n. v. | n. v. |
| KOC | Terminal Server 50 | Fachwerk*** | 50 | 40/70 | n. v. | 40/80 | 180 | n. v. | 120 | n. v. | n. v. |

Abbildung 26 - Auszug aus dem Katalog für RMGs

| Hersteller | Modell | Antrieb | Fahrwerk | Max. Tragfähigkeit [t] | Stapelhöhe | Stapelweite | Max. Spurweite [m] | Max. Hubhöhe [m] | Hubgeschwindigkeit (voll) [m/min] | Hubgeschwindigkeit (leer) [m/min] | Katzfahrgeschwindigkeit [m/min] | Krangeschwindigkeit [m/min] | Leistungsbezug [Container/h] | Kraftstoffverbrauch [l/h] |
|------------|------------|-------------------|----------|------------------------|------------|-------------|--------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Liebherr | Standard | Diesel-Elektrisch | 8 Räder | 41/50 | 1 over 6 | 7+1 | 26,5 | 21 | 28 | 56 | 70 | 130 | 20 | 15/18 |
| Liebherr | Optional | Diesel-Elektrisch | 8 Räder | 51/65 | 1 over 6 | 7+1 | 26,5 | 21 | 28 | 56 | 70 | 130 | 20 | 15/18 |
| Kone | Fuel Saver | Diesel | 8 Räder | 50 | 1 over 6 | 8+1 | 29,5 | 21,5 | 31 | 62 | 70/74 | 90/135 | 20 | 16 |
| Kone | Hybnd | Diesel-Elektrisch | 8 Räder | 50 | 1 over 6 | 8+1 | 29,5 | 21,5 | 31 | 62 | 70/74 | 90/135 | 20 | 10 |
| Kone | Cable Reel | Diesel-Elektrisch | 8 Räder | 50 | 1 over 6 | 8+1 | 29,5 | 21,5 | 31 | 62 | 70/74 | 90/135 | 20 | |

Abbildung 27 - Auszug aus dem Katalog der RTGs

Auch für die Geräte des Horizontalumschlages wurde eine Katalogisierung der Literatur- und Herstellerangaben vorgenommen. Hier sind auch wieder die in der Systembeschreibung berücksichtigten Geräte aufgenommen. Im Falle der Horizontalförderer ist allgemein zu erkennen, dass der Katalog komprimierter ausfällt. Dies liegt an den vereinfachten Bewegungsrichtungen. Im Gegensatz zu den Vertikalförderern kann das Hubgerät des Förderers keine Fläche bedienen. Somit bleiben nur Angaben der Stapelhöhe für die Kataloge um die Hubhöhe der einzelnen Stapler zu manifestieren. In Abbildung 28 ist ein Auszug aus dem Katalog für Portalhubwagen dargestellt.

| Hersteller | Modell | Einsatzbereich | Antriebsart | Tragfähigkeit [t] | Stapelfähigkeit [9'6""] | Leergewicht [kg] | Kraftstoffverbrauch [l/h] | Motor | Motorleistung [kW] | Quelle |
|-------------------|-----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------|---------------------------|-----------|--------------------|---------|
| Cargotec (Kalmar) | SHC 240 | Shuttle Carrier | hydrostatisch | 40 | 2 | 43000 | 21 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | SHC 250 | Shuttle Carrier | hydrostatisch | 50 | 2 | 45000 | 21 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | ESH 240 W | Shuttle Carrier | diesel-elektrisch | 40 | 2 | 45000 | 19 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | ESH 250 W | Shuttle Carrier | diesel-elektrisch | 50 | 2 | 47000 | 19 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | CSC 340 | Straddle Carrier | hydrostatisch | 40 | 3 | 60000 | 23 | AGCO SISU | 2x270 | [Häs13] |

Abbildung 28 - Auszug aus dem Katalog der Portalhubwagen

Da es sich auch hier um frei fahrbare Geräte handelt, welche mit Kraftstoff angetrieben sind, wird in diesem Katalog ebenso zu der Antriebsart auch der jeweilige Kraftstoffverbrauch und die Motorleistung festgehalten. In Abbildung 29 ist weiterführend ein Auszug aus dem Katalog der Reach-Stacker abgebildet. Aus diesem Katalog wird deutlich, dass Verbrauchsdaten auch von dem Einsatzgebiet der Förderer abhängig sind. Der hier dargestellte Katalog trifft dabei eine Unterscheidung der Verbrauchsdaten zwischen dem Einsatz für den Leercontainer, Container, Binnenschiff- oder Intermodalbereich.

| Hersteller | Modell | Einsatzbereich | Tragfähigkeit 1./2./3. Reihe [t] | Stapelhöhe 1./2./3. Reihe [9'6""] | Leergewicht [kg] | Kraftstoffverbrauch [l/h] | Motor | Motorleistung [kW] | Quelle | optionaler Motor | Motorleistung opt. Motor [kW] |
|-------------------|--------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|-------------------------------|
| Cargotec (Kalmar) | DRF 100-45S6 | Leercontainer | 10/9/5,5 | 5/5/4 | 39000 | 15 | Volvo TAD760 VE | 180 | [Mö113] | Cummins QSB 6.7 | 164 |
| Cargotec (Kalmar) | DRF 100-45S8 | Leercontainer | 4,5*/4,5*/4,5* | 7/6/6 | 40300 | 15 | Volvo TAD760 VE | 180 | [Mö113] | Cummins QSB 6.7 | 164 |
| Cargotec (Kalmar) | DRF420-60S5 | Container | 40/25/11 | 5/4/3 | 65500 | 18-20 | Volvo TAD1250 VE | 247 | [Mö113] | Cummins QSM11 | 261 |
| Cargotec (Kalmar) | DRF450-60S5 | Container | 42/27/13 | 5/4/3 | 67400 | 18-20 | Volvo TAD1250 VE | 247 | [Mö113] | Cummins QSM11 | 261 |
| Cargotec (Kalmar) | DRF450-60SSM | Container | 42/30/15 | 5/4/3 | 69400 | 18-20 | Volvo TAD1250 VE | 247 | [Mö113] | Cummins QSM11 | 261 |

Abbildung 29 - Auszug aus dem Katalog für Reach-Stacker

Abbildung 30 zeigt den Auszug des Kataloges für Containerzugmaschinen. Die Verbrauchsdaten dieser aufgelisteten Förderer orientieren sich ebenso an den jeweiligen Einsatzgebieten hier wird zwischen dem Einsatz in RoRo-, Sattelaufleger-, Schwerlast-, oder Terminalbereichen unterschieden. Da auch dieser Förderer frei fahrbar im Terminal ist, gilt hier der Kraftstoffverbrauch als maßgebend für die CO₂-Allokation.

| Hersteller | Modell | Einsatzbereich | Sattellast [t] | Systemlast [t] | Leergewicht (kg) | Kraftstoffverbrauch [l/h] | Motor | Motorleistung [kW] | optionaler Motor | Quelle |
|-------------------|----------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------|
| Cargotec (Kalmar) | TR 618i | RoRo | 32 | 115 | 10300 | 8-10 | Volvo TAD750 VE | 181 | x | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | TRL 618i | RoRo | 25 | 75 | 10500 | 8-10 | Volvo TAD750 VE | 181 | x | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | TT 612d | Sattelaufleger | 25 | 65 | 8400 | 5-6 | Cummins QSB 6.7 | 129 | x | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | TRX 242 | Schwerlast | 32 | 150 | 13050 | 12-15 | Cummins | 250 | x | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | TRX 252 | Schwerlast | 38 | 150 | 15000 | 12-15 | Cummins | 250 | x | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | TT 616i | Terminal | 36 | 95 | 8750 | 6-7 | Cummins QSB 6.7 | 129 | x | [Häs13] |

Abbildung 30 - Auszug aus dem Katalog für Containerzugmaschinen

Die Portalhubwagen werden im Allgemeinen in Shuttle- und Staddle-Carrier unterschieden. Ähnlich wie bei allen anderen Ressourcen für den Vertikalumschlag werden hier Angaben zum Kraftstoffverbrauch gemacht.

| Hersteller | Modell | Einsatzbereich | Antriebsart | Tragfähigkeit [t] | Stapelfähigkeit [9'6""] | Leergewicht [kg] | Kraftstoffverbrauch [l/h] | Motor | Motorleistung [kW] | Quelle |
|-------------------|-----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------|---------------------------|-----------|--------------------|---------|
| Cargotec (Kalmar) | SHC 240 | Shuttle Carrier | hydrostatisch | 40 | 2 | 43000 | 21 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | SHC 250 | Shuttle Carrier | hydrostatisch | 50 | 2 | 45000 | 21 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | ESH 240 W | Shuttle Carrier | diesel-elektrisch | 40 | 2 | 45000 | 19 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | ESH 250 W | Shuttle Carrier | diesel-elektrisch | 50 | 2 | 47000 | 19 | AGCO SISU | 272 | [Häs13] |
| Cargotec (Kalmar) | CSC 340 | Straddle Carrier | hydrostatisch | 40 | 3 | 60000 | 23 | AGCO SISU | 2x270 | [Häs13] |

Abbildung 31 - Auszug aus dem Katalog für Portalhubwagen

All diese Kataloge dienen als Grundlage für die Systemlast, damit im Simulationsansatz die Verbräuche realistisch allokiert werden können und für einzelne Umschläge den Verbrauchern, in

diesem Fall den Ressourcen für Horizontal- und Vertikalumschlag, zugeordnet werden können. Wesentliche Elemente eines MML (insbesondere für Rail-Mounted-Gantry-Cranes) lassen jedoch valide Energieverbrauchsdaten vermissen. So musste einerseits auf anerkannte Quellen und Abschätzungen von Energieverbrauchsdaten zurückgegriffen werden. Der bereits erläuterte Katalog ist ein Ergebnis hieraus.

Nachdem Literatur studiert wurde und die Recherchen noch Lücken in den Verbrauchsdaten ergaben wurde für weitere Datenerhebungen eine Messreihe an Ressourcen in Terminals bei Projektpartnern initiiert. Für die Messzwecke standen Universalmeßgeräte (UMG 604) der Marke Janitza electronics sowie Janitza electronics zur Verfügung. Diese verfügten über Nennströme von 60 – 1.000 A in 14 Abstufungen und unterschiedlichen Baugrößen, mittels derer der Stromverbrauch inklusive relevanter Parameter gemessen und über einen definierten Messzeitraum (z. B. 24 Stunden) aufgezeichnet werden kann. Die erforderlichen Installationen für die Messungen wurden dabei von Fachkräften durchgeführt. In der Regel wurden die Messgeräte einen Tag vor der eigentlichen Messung installiert und eine Frühschicht aufgenommen.

Der Einsatz der eingangs erwähnten Universalmeßgeräte ist die Grundlage für die Validierung von Verbrauchsdaten. Diese Validierung sind punktuell durchgeführt worden. Als punktuelle Messungen sind beispielhafte Zeiträume gemeint, welche an den Schichtmodellen der Terminalbetreiber orientiert sind, und somit den Umfang der Validierung definieren.

Die Messungen beinhalteten zudem die Aufzeichnung der Stromverbrauchswerte sowie die Aufnahme der Prozessschritte und Rahmenbedingungen. Als Rahmenbedingungen werden Daten wie Längen der Kranbahnen, Baujahr oder KW-Angaben der Motoren verstanden. Um im dritten Arbeitspaket Verbrauchsbeeinflussende Faktoren identifizieren zu können werden prozessbezogene Daten wie die Dauer des Kranspiels, Gewicht der Ladung und Art der umgeschlagenen Ladeinheit manuell während einer exemplarischen Frühschicht aufgezeichnet. Auch die dabei zurückgelegte Entfernung wird in einem Prozesserfassungsbogen berücksichtigt. Dies ermöglicht ein klares Ergebnis bei der Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren. Ein Beispiel des Prozesserfassungsbogens ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 - Beispiel eines Prozesserfassungsbogens

| Nr. | Start- position | Starthöhe <i>Lage -3 - +5</i> | Typ <i>20,40,45, HC, TR, WB</i> | Voll/ Leercontainer <i>1=Leer,2=Voll,3= Refa</i> | Gewicht | Prozess- Startzeit | Start Lastfahrt | Endposition | Endhöhe <i>Lage -3 - +5</i> | Ende Lastfahrt | Start Leerfahrt | Endposition | Endhöhe <i>Lage -3 - +5</i> | Ende Leerfahrt |
|-----|--------------------|----------------------------------|--|--|---------|-----------------------|--------------------|-------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|-------------|--------------------------------|-------------------|
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Eine Begleitung der Validierung ist essentiell, da die Messgeräte sämtliche Leistungsdaten speichern können, dabei jedoch nicht charakteristische Daten zu Gewichtsgrößen und Ladeträger aufzeichnen können. Somit mussten diese Daten weiterhin manuell über den Prozesserfassungsbogen

festgehalten werden, um im Anschluss eine Berechnung der Verbrauchsdaten auf Ladeträger-Ebene garantieren zu können. Betrachtet man das Kranspiel so bleibt festzuhalten, dass nicht für jeden Stellmotor der Bewegungsrichtungen der Verbrauch exakt gemessen werden konnte. Dies liegt vornehmlich daran, dass Kräne ihre Bewegungen mehrdimensional durchführen. Beispielsweise wird der Spreader noch angehoben, während bereits die nächste Umschlagsposition angefahren wird. Dies würde die Auswertung für einzelne Stellmotoren verfälschen. Somit wurde der Gesamtverbrauch der einzelnen Prozessschritte des Kranspiels gemessen. Auf diese Weise entstand ein genaues Bild über die CO₂-Allokation hinsichtlich der einzelnen Kranbewegungen.

Das Ergebnis jeder dieser Messungen wird über die Universalmeßgeräte als Datei im CVS-Format gespeichert. Dieses Format konnte mit dem Datenverarbeitungsprogramm Microsoft EXCEL ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind hier tabellarisch und auf sekundlicher Basis aufgelistet. Abbildung 32 zeigt beispielhaft die Ausgabe der aufbereiteten Messergebnisse eines Messgerätes.

| | A | B | C | D | E |
|----|------------|----------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 1 | Datum | Uhrzeit | Wirkleistung P gemessen [W] | Leistungsfaktor | Wirkleistung P Auswertung [W] |
| 38 | 23.07.2014 | 06:00:36 | 4341,65 | 0,111 | 4341,65 |
| 39 | 23.07.2014 | 06:00:37 | 3771,44 | 0,88 | 3771,44 |
| 40 | 23.07.2014 | 06:00:38 | 3699,73 | 0,879 | 3699,73 |
| 41 | 23.07.2014 | 06:00:39 | 3670,12 | 0,874 | 3670,12 |
| 42 | 23.07.2014 | 06:00:40 | 3658,29 | 0,879 | 3658,29 |
| 43 | 23.07.2014 | 06:00:41 | 3644,11 | 0,88 | 3644,11 |
| 44 | 23.07.2014 | 06:00:42 | 3631,82 | 0,877 | 3631,82 |

Abbildung 32 - Auswertung der Messgeräte

An diesem Punkt sind die manuell erfassten Charakteristiken jedes Spiels essentiell, da mit Hilfe dieser die aufgenommenen Wirkleistungen den entsprechenden Ladungen während ihres Umschlags im Terminal zugeordnet werden können. Somit sind die Wirkleistungen einzelner Handlings-Operationen der Ressourcen identifizierbar. Des Weiteren ist die Wirkleistung auch grafisch, wie in Abbildung 33 verdeutlicht, über eine Tagesganglinie auswertbar. Hier sind Leistungsintensive Bewegungen deutlich an den Spitzen des Graphen zu erkennen. Dies macht deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt leistungsintensive Bewegungen stattgefunden haben.

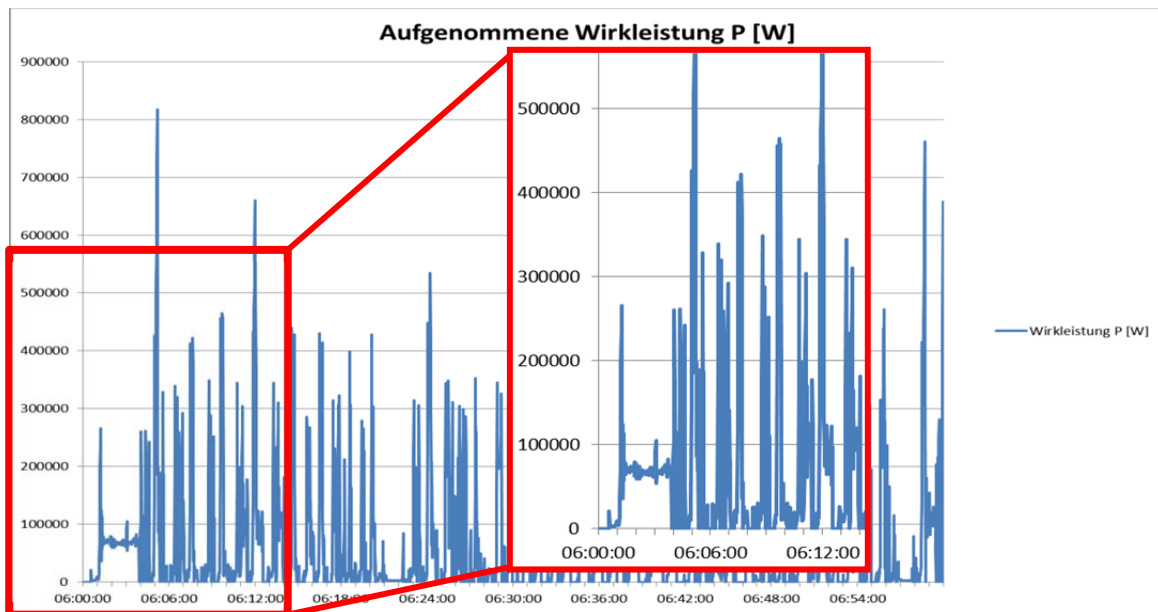


Abbildung 33 - Tagesganglinie der aufgenommenen Wirkleistung

Die nun vorhandenen Messdaten bildeten die Grundlage für die Identifizierung von CO₂-relevanten Einflussfaktoren.

4.3 Arbeitspaket 3: Ermittlung und Bewertung der Einflussfaktoren auf die Verbräuche

Im Arbeitspaket drei wurden die Einflussfaktoren auf die Verbräuche ermittelt und bewertet. Hierzu dienten ebenfalls die in den vorangegangenen Arbeitspaketen erhobenen Grundlagen und Ergebnisse als Ausgangslage. Es wurde untersucht, welche Einflussfaktoren zu erhöhten oder zu geringeren Verbräuchen führen können. Die Daten können zunächst einzelnen Ladeträgern zugewiesen und gruppiert.

Um die Messungen hinsichtlich potentieller Einflussfaktoren des Verbrauchs zu analysieren, wurden zunächst mehrere Faktoren identifiziert, welche es im Detail zu untersuchen galt. Dabei wurden den Verbrauch beeinflussende Faktoren bereits während der Messungen in den Terminalbetrieben identifiziert. Hierbei war die Erfahrung der Betreiber sowie der Kranführer aus der operative hilfreich zur Identifikation relevanter Einflussfaktoren.

Die ersten Ergebnisse der Messungen wurden in einer projektbegleitenden Ausschusssitzung den anwesenden Experten präsentiert und diskutiert. So konnten unabhängig von einer anschließenden Befragung erste Ergebnisse validiert werden. Inhalt dieser Sitzung war die Präsentation der Messergebnisse sowie erste Rückschlüsse auf mögliche Einflussfaktoren. Das Resultat der Analysen wurde mit Zustimmung aufgenommen. Somit konnte validiert werden, dass die Gewichte der Ladeeinheiten einen geringen Einfluss auf den Stromverbrauch der Kranumschläge haben. Ebenso wurde dem Ergebnis zugestimmt, dass der zurückgelegten Wegstrecke der Kranspiele eine wesentliche Rolle bei der Einsparung von Energie und THG zukommt. In diesem Zusammenhang sind die Terminals bestrebt mittels geeigneter Softwarelösungen Ihre Betriebe Wegeoptimiert auszuliegen.

Eine Umfrage im Anschluss an die Präsentation hat weiteren Aufschluss darüber gegeben, welche der potentiellen Einflussfaktoren maßgeblich für weitere Untersuchungen sind. Dies waren zudem relevante Informationen für den Simulationseinsatz in Arbeitspaket 4. Im Rahmen der Umfrage konnten nach einem Notensystem die Relevanz einzelner Faktoren bewertet werden. Die Relevanz der Einflussfaktoren wurde aufsteigend von 1 bis 5 bewertet.

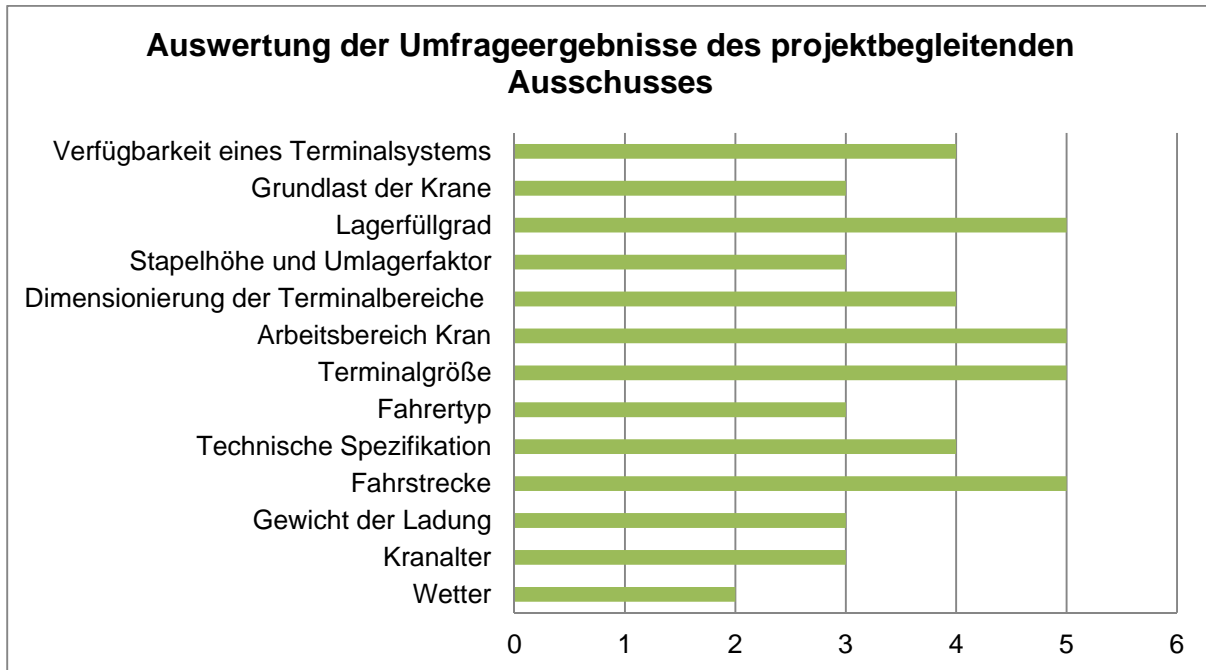


Abbildung 34 - Ergebnis der Expertenbefragung

Während der Messvorgänge in den Terminals der Projektpartner stellte sich heraus, dass einige Faktoren schwer messbar waren. Eine Verbrauchsmessung an einzelnen Stellmotoren war nicht möglich. Daher wurde die Messung an den Hauptstrommessern des Kranes angebracht. Dies macht den oben bereits beschriebenen Umstand nötig, dass die einzelnen Kranbewegungen manuell aufgenommen werden mussten, um die Verbräuche der einzelnen Bewegungen identifizieren zu können. Auf diese Weise war es dennoch möglich die Verbrauchswerte einzelnen Kranbewegungen zuzuordnen. Des Weiteren waren weitere Faktoren durch das Messverfahren nicht festzuhalten und mussten händisch im Zuge der Messungen dokumentiert werden. Hierzu gehören beispielsweise das Wetter oder der Fahrertyp.

Gewicht der Ladungsträger

Eine erste Datenanalyse hatte zum Ziel eine vermutete Abhängigkeit zwischen Gewicht und Verbrauch herzuleiten. Hierzu wurden folgende Gruppen definiert (Tabelle 3) und dort die einzelnen Verbräuche pro Gewichtsguppe eingruppiert. Folgend wird beispielhaft die Zuweisung einer Ladeinheit zu einer Gewichtsklasse erklärt

Beispiel:

- Ein 20 Zoll-Container mit 21 Tonnen Gewicht entspricht der Klasse **204**

Tabelle 3 - Containerklassen

| Containertyp | Bezeichnung | | Gewicht | Bezeichnung |
|--------------|-------------|---|------------------|-------------|
| 20 Fuß | 20' | ➔ | Leere | CT + 1 |
| 40 Fuß | 40' | | $0 < t \leq 10$ | CT + 2 |
| 45 Fuß | 45' | | $10 < t \leq 20$ | CT + 3 |
| High-Cube | HC' | | $20 < t$ | CT + 4 |

Eine Analyse der mittleren Verbräuche zeigte, dass die Gewichte der Container keinen signifikanten Einfluss auf den Verbrauch haben.

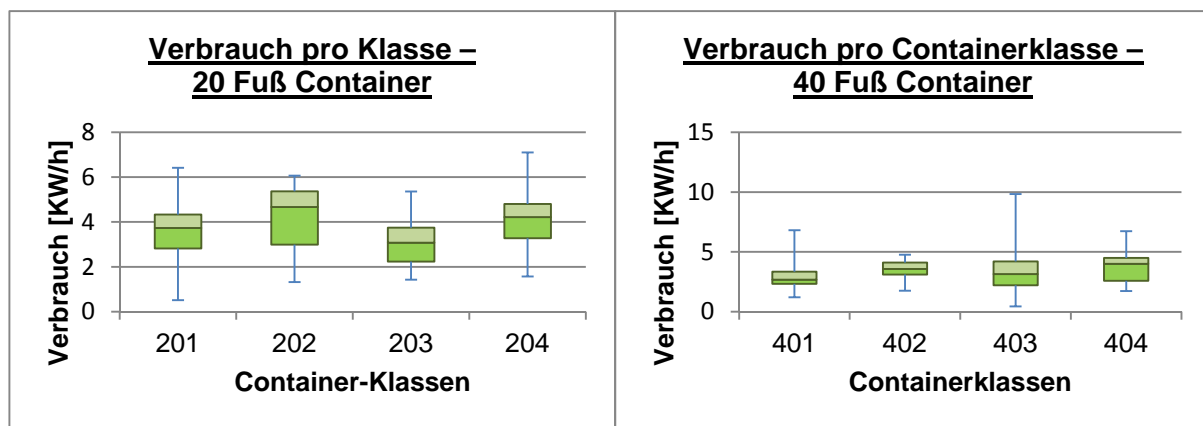


Abbildung 35 - Verbrauch pro Containerklasse

Die Grafiken veranschaulichen, dass ein höheres Gewicht der Ladungsträger keinen signifikanten Mehrverbrauch verursacht. Die Werte der Verbräuche der einzelnen Gewichtsklassen folgen keinem klaren Trend. Somit war auszuschließen, dass das Gewicht der einzelnen Ladungsträger ein relevanter Faktor für THG-Emissionen, bzw. den Stromverbrauch darstellt. Außer der Art und Gewicht der einzelnen Ladungseinheiten sind also weitere potentielle Einflussfaktoren zu identifizieren.

Zurückgelegte Entfernung

Abbildung 33 zeigt die Verbrauchswerte der einzelnen Messungen im Zuge des Kranspiels. Besonders bei Anfahren sind deutliche Lastspitzen zu beobachten. Im weiteren Verlauf sinkt dieser Wert wieder deutlich ab. Daher war es interessant eine detaillierte Auswertung der einzelnen Spiele hinsichtlich der Abhängigkeit von Verbrauch zur zurückgelegten Entfernung der Ressourcen anzufertigen. Hierzu wurden die ebenfalls dokumentierten Positionsdaten der Ressourcen, welche jedem Spiel eine Start- sowie Zielposition zuordnen lassen, verwendet. Auf diese Weise war es möglich jeden Weg der einzelnen Spiele auszuwerten. Auch diese wurden, ähnlich dem Fall der Gewichtsklassen, in einzelne Entfernungsklassen unterteilt.

Beispiel:

- Ein Gesamtspiel einer Entfernung von 80 Metern entfällt auf Klasse **E3**

Tabelle 4 - Entfernungsklassen

| Relation | Entfernungstyp (ET) | Entfernung | Klasse |
|----------------------|---------------------|------------------|--------|
| Entfernung Lastfahrt | EL | < 20 m | ET +1 |
| Entfernung Leerfahrt | EI | 20 m < x < 60 m | ET +2 |
| Entfernung Spiel | ES | 60 m < x < 100 m | ET +3 |
| | | > 100 m | ET +4 |

Im Falle der Gewichtsklassen werden die Messwerte nun hinsichtlich ihrer Durchschnittswerte untersucht. Eine Visualisierung dieser Messergebnisse zeigte einen deutlichen Trend und lässt die Implikation zu, dass der Energieverbrauch abhängig von der Wegstrecke der Ressource ist.

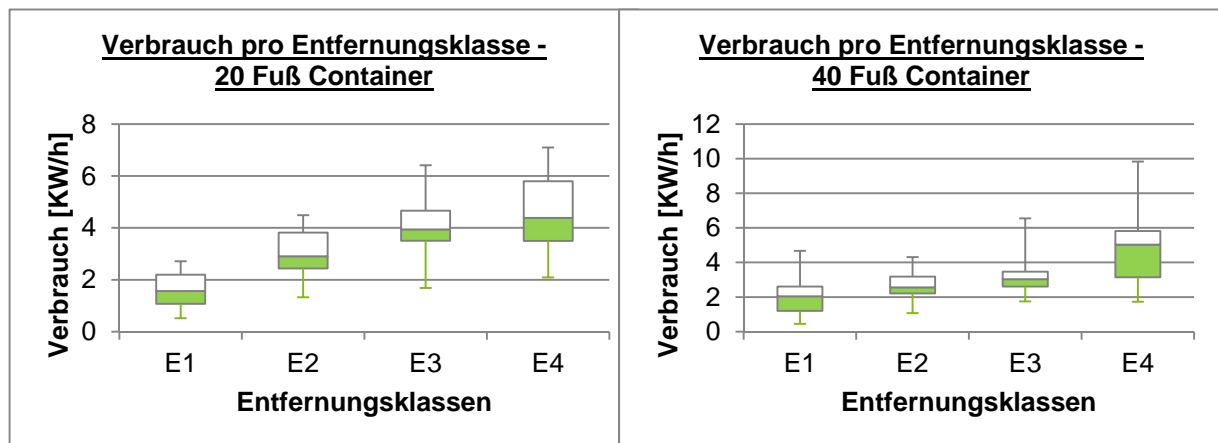


Abbildung 36 - Verbrauch in Abhängigkeit der Wegstrecke pro Spiel

Ein weiteres Ergebnis aus der begleitenden Projektausschusssitzung, im Nachgang der Messungen, war die Erkenntnis, dass die Verbrauchswerte der einzelnen Terminals stark variieren können, obwohl ein vergleichbares Terminallayout vorzufinden war. Hier spielt die technische Ausstattung der Kräne einen großen Einfluss. Insbesondere die Möglichkeit der Rekuperation. In der Analyse zur Identifikation potentieller Einflussfaktoren wurden zudem Ressourcen unterschiedlichen Alters gegenüber gestellt. Während den Verbrauchsmessungen konnten eine Vielzahl unterschiedlicher Umschlagsgeräte erfasst werden. Diese wurden im Ergebnis miteinander verglichen und Verbrauchseinsparungen mittels Rekuperation aufgezeigt. Diese Vergleiche wurden gemäß der bisherigen Analyse auch nach Containerklassen und Entfernungsklassen ausgewertet. Das Ergebnis im Vergleich der Gewichtsklassen der beladenen Ladeeinheiten zeigte, dass der Einsatz der Energierückgewinnung während der Umschlagprozesse pro Ladeeinheit circa 3 KW/h einsparen kann.

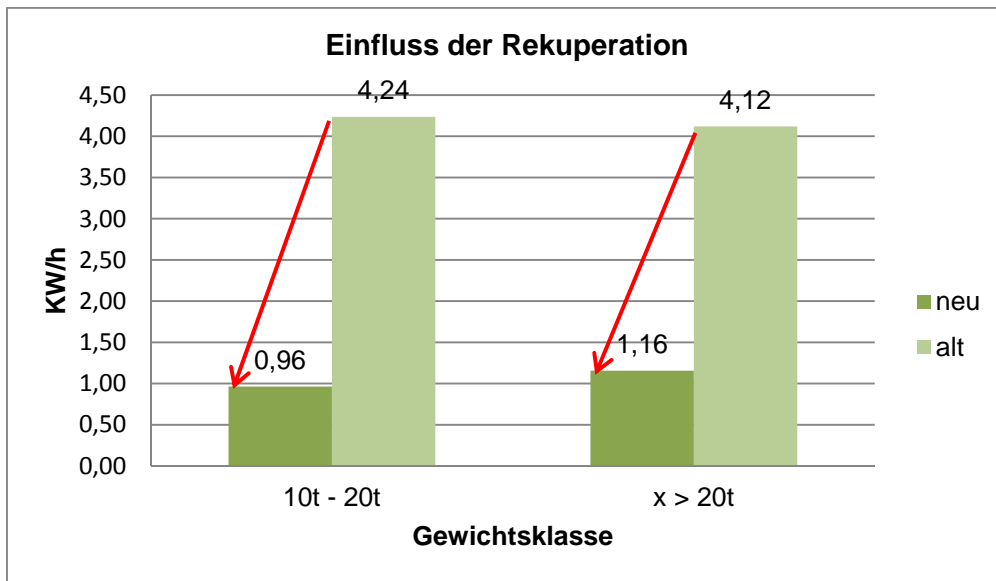


Abbildung 38 – Einfluss der Rekuperation

Genau wie die Gewichtsklassen lassen sich im Kontext der Energierückgewinnung auch die einzelnen Streckenklassen für Kranspiele im Umschlagprozess darstellen. Hier ist sehr deutlich die Abhängigkeit des Verbrauchs von der Wegstrecke des Kranspiels zu erkennen. Des Weiteren ist der Abbildung 39 auch zu entnehmen, dass Kräne, welche mit einer Energierückgewinnung ausgestattet sind, deutliche Einsparungen des CO₂-Ausstoßes aufweisen können. Bei Strecken über 100 Metern betragen diese Einsparung in der Messung gegenüber handelsüblicher Krananlagen fast 5 KW/h.

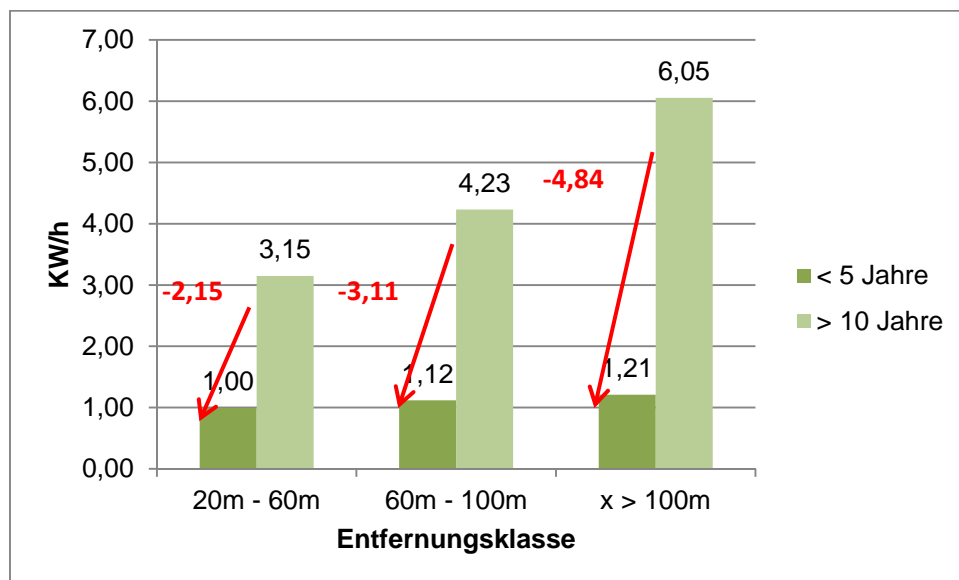


Abbildung 39 - Energieverbrauch pro Entfernungsklasse

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Gewichte der Ladeeinheiten fast keinen Einfluss auf den Energieverbrauch im Umschlag und damit auch auf den CO₂-Ausstoß haben. Vielmehr fallen hier die zurückgelegten Wegstrecken und Spielzeiten deutlich stärker ins Gewicht. Dieses Ergebnis wurde durch die Messergebnisse und die Validierung dieser im projektbegleitenden Ausschuss bestätigt. Sowohl in den Analysen der Containerverbräuche sowie an den Vergleichswerten für neue und ältere Kranmodelle war der Einfluss der zurückgelegten Wegstrecke zu erkennen.

4.4 Arbeitspaket 4: Simulative Verknüpfung der Einflussfaktoren und Messwerten zu allokierten Emissionswerten auf Behälterebene

In diesem Arbeitspaket wurde, basierend auf den in AP 1 und AP 2 aufgenommenen Daten, Kategorien und aufgestellten Katalogen, eine Simulationsumgebung um die Bausteine zur Ermittlung von THG-Emissionen erweitert. Als strukturelle Grundlage für die Simulation dienten existierende Prozess-, Ressourcen- und Layoutobjekte. Zusätzlich werden diese bedarfsgerecht Emissionsermittlung nach Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-, und Verzögerungswerten ergänzt. Diese Information umfasste beispielweise die Angabe des Verbrauchs auf Basis der ermittelten Einflussfaktoren aus AP3.

Beschreibung der Simulationsumgebung

Als Simulationsumgebung stand die Plattform TerminalSim zur Verfügung. Diese wurde nach Kaffka et. Al. (2014) entwickelt. Basierend auf der Software Enterprise Dynamics 8 der Firma INCONTROL Simulation Solutions besteht eine Low-Level of Detail Simulationslösung für Containerterminals. Abgebildet werden die verschiedenen Funktionsbereiche des Terminals über parametrisierbare Bausteine. Um eine schnelle Auswertung der einzelnen Simulationsszenarien garantieren zu können ist in der Simulationsumgebung eine standardisierte Datenbankanbindung integriert. Die Bausteine für die Kranumschlagsumgebung wurden um die Werte aus der Energieverbrauchsmessung erweitert. Diese Ergebnisse aus den jeweiligen Messungen haben ergeben, dass sich die Energieverbräuche der einzelnen Kräne aufgrund ihrer technischen Spezifikationen unterscheiden. Dies korreliert im Allgemeinen auch mit dem Baujahr der Kräne, da die technische Ausstattung in vielen Fällen bei älteren Baujahren nicht mit dem technischen Standard jüngerer Umschlagsgeräte mithalten kann. Dieser Zusammenhang lässt sich dementsprechend auch in den Simulationsbausteinen des Kranumschlags parametrisieren.

Verbrauchsallokation mittels Simulation

Ziel der Simulation ist es, Gesamtverbräuche einer multimodalen Umschlagsanlage berechnen zu können und auf Behälterebene darstellen zu können. Hierzu werden einzelne Simulationsmodelle gebildet, welche von den identifizierten Parametern beeinflusst werden. Des Weiteren wurden Verbrauchswerte für einzelne Umschlagsituationen aus den bisherigen Analysen abgeleitet. Dies war notwendig, da die punktuellen Verbrauchsmessungen lediglich eine Momentaufnahme liefern und keine allgemeinen Rückschlüsse bezüglich des Containeraufkommen und des Behältermix zulassen.

Zwar wurden die real gemessenen Energieverbräuche für die Simulation übernommen, jedoch wurde für die jahresbasierte Allokation auf Behälterebene eine Simulationsstudie mit der Laufzeit von einem Jahr durchgeführt. Der weitere Aufbau des Simulationsmodells wird im Folgenden an den Umschlagprozessen eines Krans verdeutlicht. Aus den Vergangenheitswerten der Terminals wurde ein Eingangsdatensatz erzeugt. Dieser wurde für das gesamte Jahr 2014 erstellt um auch saisonale Einflüsse, beispielsweise aus der Weihnachtszeit, berücksichtigen zu können. Basierend auf diesen Daten wurden anschließend 50 Simulationsläufe für das Betrachtungsjahr 2014 durchgeführt. Die gewonnenen Daten wurden im Expertengespräch mit den Projektpartnern validiert.

Die Mess- und Simulationsergebnisse machen deutlich, dass die Gewichte der Container keinen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch eines Krans haben. Die meiste Energie wird im Betrieb darauf aufgewendet den 300 Tonnen schweren Kran in Bewegung zu versetzen oder dessen Bewegungsrichtung zu ändern. Hierbei steigert eine Gewichtsveränderung durch die Container von maximal 20 Tonnen nicht den Energieverbrauch. Somit ist die Wegstrecke der einzelnen Umschläge des Krans von viel weitreichender Bedeutung als das Gewicht der Container. Um diesen Umstand abbilden zu können wurden aufgrund einer ABC-Analyse Entfernungsklassen gebildet. Diese Klassen sind Tabelle 4 zu entnehmen.

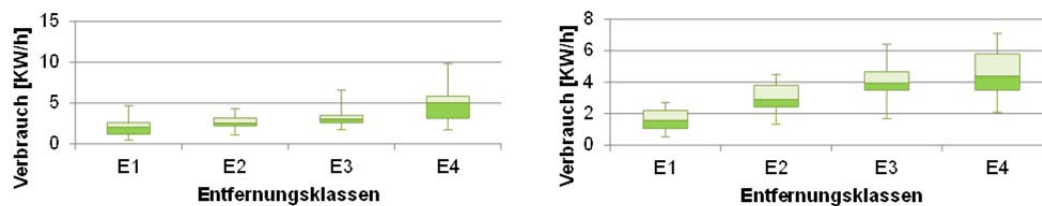


Abbildung 40 - Verbrauch pro Entfernungsklasse für 40 (links)- und 20 Fuß-Container (rechts)

Die Ergebnisse der Simulationsstudie, unter Einbeziehung der Umwelteinflüsse sowie der Umlagerprozesse für Behälter, liefert die in Tabelle 5 dargestellten Verbrauchswerte für die einzelnen Containergrößen.

Tabelle 5 - Allokierete Verbrauchsdaten auf Containererebene

| Container | Ø-Zeit | Ø-KWh | Ø-€/KWh | Ø-KG CO ₂ /KWh | Ø-Wegstrecke[m] |
|---------------|---------|-------|---------|------------------------------|-----------------|
| 20 Fuß Leer | 0:02:58 | 3,65 | 0,40 | 1,56 | 88,84 |
| 40 Fuß Leer | 0:02:47 | 3,09 | 0,34 | 1,32 | 66,68 |
| 20 Fuß Leicht | 0:03:00 | 4,02 | 0,44 | 1,72 | 124,14 |
| 40 Fuß Leicht | 0:03:30 | 3,48 | 0,38 | 1,49 | 84,60 |
| 20 Fuß Mittel | 0:02:50 | 3,14 | 0,35 | 1,34 | 180,35 |
| 40 Fuß Mittel | 0:05:51 | 3,63 | 0,40 | 1,55 | 72,06 |
| 20 Fuß Schwer | 0:03:00 | 4,19 | 0,46 | 1,79 | 95,23 |
| 40 Fuß Schwer | 0:02:42 | 3,82 | 0,42 | 1,63 | 123,99 |

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass im ersten Fall der Umschlag eines leeren 20 Fuß Container 0,40 € kostet und durchschnittlich 1,55 KG CO₂ emittiert. Dies entspricht dem Wert der Ökobilanz und bestätigt die Validität des Simulationsmodells. Somit ist auch aus betrieblicher Sicht eine differenziertere Abrechnung der Umschläge möglich.

Die gewonnen Daten aus diesem Simulationsansatz können von Terminalbetreibern sowohl für Marketingzwecke als auch für die Optimierung der eigenen Prozesse genutzt werden. Mit Hilfe dieser Methode ist es nun möglich den einzelnen Containern genauere Verbrauchsdaten zuzuordnen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Simulationsumgebungen, welchen ein trimodales Terminal zugrunde lag um die Umschläge zu simulieren.

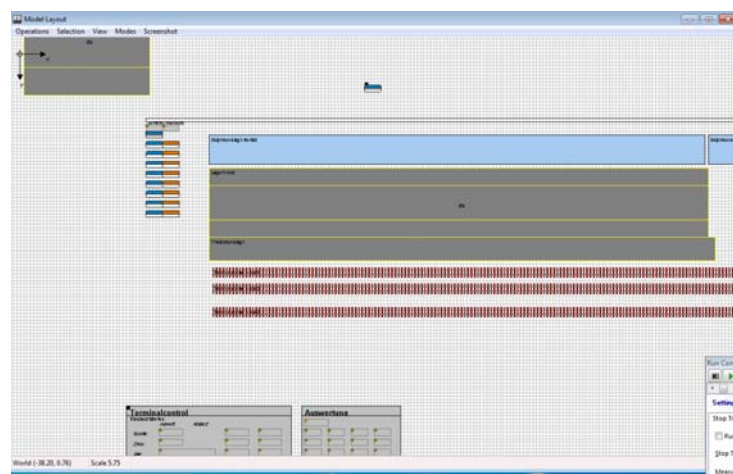


Abbildung 41 - TerminalSim 1

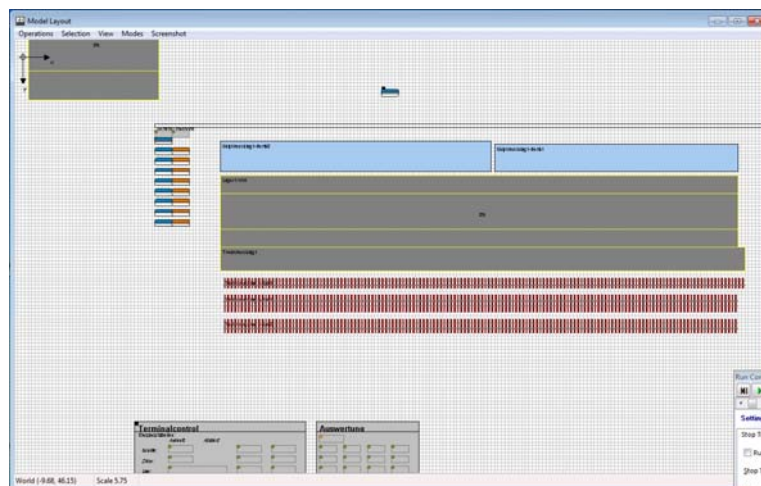


Abbildung 42 - TerminalSim 2

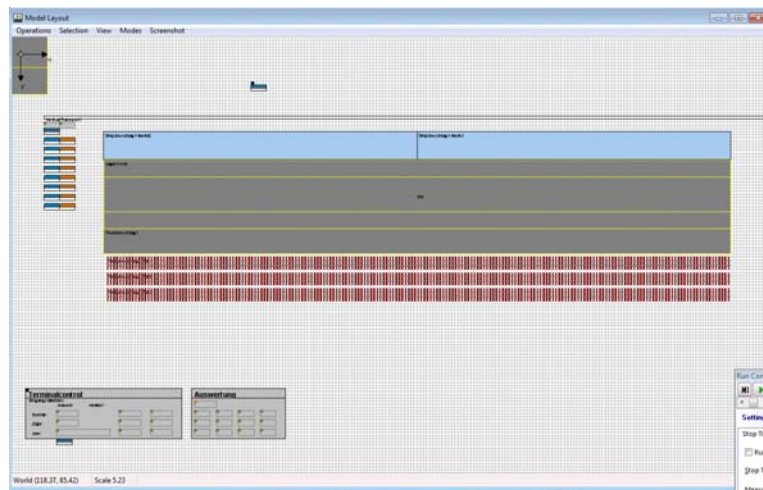


Abbildung 43 - TerminalSim 3

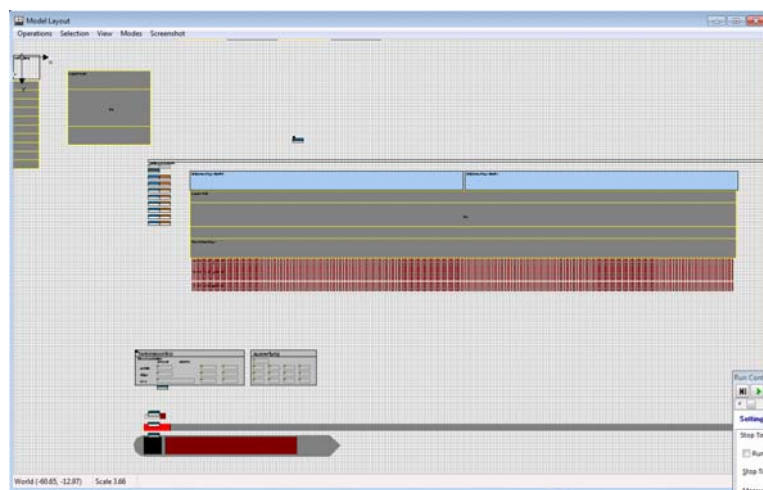


Abbildung 44 - TerminalSim 4

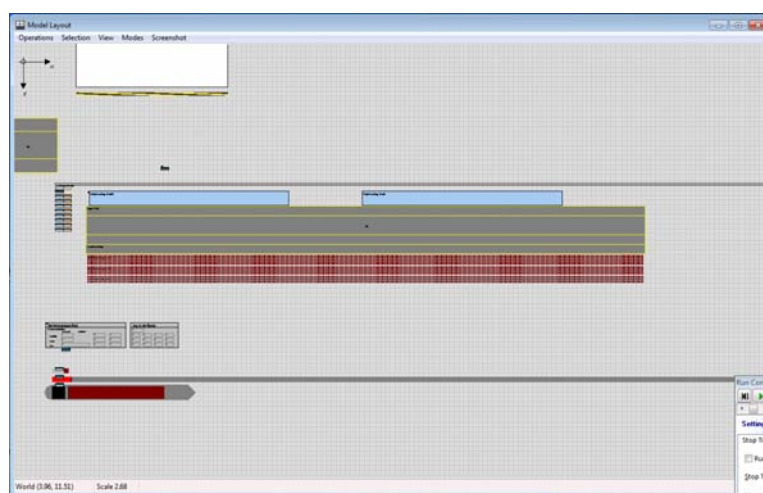


Abbildung 45 - TerminalSim 5

Die aus dem Simulationsansatz gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse stellen die Systemlast für die Erweiterung des Methodenbaukastens da. Die gewonnen Daten wurden zur Erweiterung des Methodenbaukastens in Arbeitspaket 5 genutzt.

4.5 Arbeitspaket 5: Erweiterung des Methodenbaukastens um das Multimodale Logistiknoten Modul

In diesem Arbeitspaket wurde das MML-Demonstratormodul programmiert. Als Softwareumgebung wurde, wie im Vorgängerprojekt, MS-Excel gewählt. Als Modellierungs- und Layoutvorlage dienten die vorhandenen Demonstratoren des ersten MBK. Diese sind von den beteiligten Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses ausdrücklich als übersichtlich und bedienerfreundlich gelobt worden. Die Überführung der vorliegenden Berechnungsmethoden und vom Nutzer einzugebenden Parameter erforderten jedoch zum Teil eine andere Herangehensweise zur Erfassung und Berechnung der THG-Emissionen.

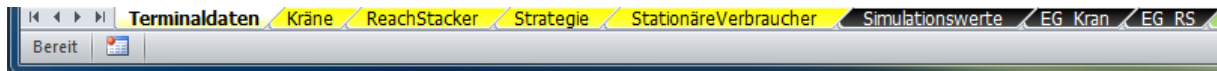


Abbildung 46 - Registerkarten im MS- Excel Demonstrator

Der Aufbau des Moduls unterteilt sich inklusive der Legende in drei Bereiche. Diese sind unterschiedlich farblich (grün, gelb und schwarz) gekennzeichnet. In der Berechnungstabelle (grün) werden die Energieverbräuche, Kohlendioxid- und Treibhausgasemissionen berechnet. Für die Berechnung werden zusätzliche reale und kundenindividuelle Daten benötigt, welche in den gelbfarbenen und schwarzen Tabellen hinterlegt werden. Die in den schwarzen Tabellen hinterlegten Datensätze können ggfs. durch den Nutzer angepasst und aktualisiert werden. Die in den gelben Tabellen erfassten Datensätze werden durch das Tool erfasst und durch den Anwender in die jeweiligen Berechnungsverfahren integriert.

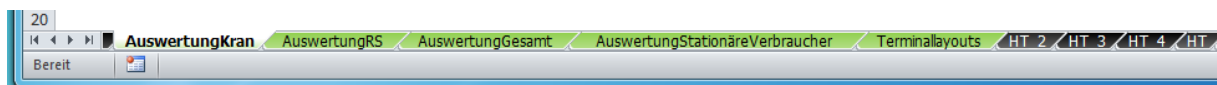


Abbildung 47 - Registerkarten im MS- Excel Demonstrator

Die Ergebnisse der vorangegangenen Simulation, in der die Einflussfaktoren und Messwerte zu anwendbaren mikroskopischen Werten verdichtet wurden, bilden die Datengrundlage für die hinterlegten Datensätze des Demonstrators (Tabellenblatt „Simulationswerte“)

| Trimodales Terminal | | | | | Bimodales Terminal | | | | | | |
|---|-------------|------------|------------|------------|---|----|------------|------------|------------|------------|------------|
| Verteilung Umschlagaufträge | | | | | Verteilung Umschlagaufträge | | | | | | |
| | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 | | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 |
| E1 | 0,0056 | 0,0036 | 0,0026 | 0,0018 | 0,0020 | E1 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| E2 | 0,1979 | 0,1319 | 0,0996 | 0,0777 | 0,0695 | E2 | 0,4000 | 0,4000 | 0,4000 | 0,4000 | 0,4000 |
| E3 | 0,2842 | 0,1907 | 0,1474 | 0,1167 | 0,0990 | E3 | 0,2000 | 0,2000 | 0,2000 | 0,2000 | 0,2000 |
| E4 | 0,5123 | 0,6738 | 0,7504 | 0,8038 | 0,8294 | E4 | 0,3950 | 0,3950 | 0,3950 | 0,3950 | 0,3950 |
| Verteilung Verbrauchsverhältnis ohne Rekuperation | | | | | Verteilung Verbrauchsverhältnis ohne Rekuperation | | | | | | |
| | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 | | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 |
| E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E2 | 2,881083247 | 2,40695754 | 2,39085182 | 2,49889146 | 2,40533413 | E2 | 3,36984243 | 3,36984243 | 3,36984243 | 3,36984243 | 3,36984243 |
| E3 | 3,771273105 | 4,7016511 | 4,7704911 | 4,87268651 | 4,5725552 | E3 | 4,24533557 | 4,24533557 | 4,24533557 | 4,24533557 | 4,24533557 |
| E4 | 4,361995166 | 8,90838659 | 10,2852249 | 12,263348 | 12,9278617 | E4 | 7,08121997 | 7,08121997 | 7,08121997 | 7,08121997 | 7,08121997 |
| Verteilung Verbrauchsverhältnis mit Rekuperation | | | | | Verteilung Verbrauchsverhältnis mit Rekuperation | | | | | | |
| | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 | | bis 150 | bis 200 | bis 250 | bis 300 | bis 350 |
| E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | E1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E2 | 1,118853151 | 1,11885315 | 1,11885315 | 1,11885315 | 1,11885315 | E2 | 1,11885315 | 1,11885315 | 1,11885315 | 1,11885315 | 1,11885315 |
| E3 | 1,219429796 | 1,2194298 | 1,2194298 | 1,2194298 | 1,2194298 | E3 | 1,2194298 | 1,2194298 | 1,2194298 | 1,2194298 | 1,2194298 |
| E4 | 1,527140128 | 1,82714013 | 2,12714013 | 2,42714013 | 2,72714013 | E4 | 1,52714013 | 1,82714013 | 2,12714013 | 2,42714013 | 2,72714013 |

Abbildung 48 - Tabellenblatt "Simulationswerte"

Anleitung zur Nutzung des MS- Excel basierten Demonstrators

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist ein MS-Excel basierter Demonstrator, der auf Behälterebene die Ausweisung und Bilanzierung von THG-Emissionen ermöglicht und die vorhandenen MBK-Demonstratoren ergänzt. Dieser Demonstrator dient zur vergleichsweise exakteren Berechnung von Emissionen beim Umschlag einzelner Ladeeinheiten in multimodalen Logistikknoten. Die Implementierung der Forschungsergebnisse in eine Softwareumgebung war Teil der Aufgabenstellung. Das entwickelte Tool arbeitet zum einen mit individuellen Parametern, die jeder Hafenbetreiber selbst kennt bzw., erfassen kann und zum anderen mit Ergebnissen einer umfangreichen Simulationsstudie. Hieraus lassen sich Verbrauchswerte für einzelne Kräne, Reach Stacker und infrastrukturelle Betriebsverbräuche eines Terminals berechnen. Auf dieser Grundlage ist der Ausweis von Emissionen möglich. Die schrittweise Beschreibung zeigt die Verwendung der Ergebnisse der Forschungsstudie und nutzenindividueller Parameter sowie das Vorgehen zur korrekten Nutzung.

Das Tool arbeitet in den unterschiedlichen Tabellenblättern, in denen der Nutzer seine Terminaldaten und Rahmenbedingungen erfasst. Durch jeweils individuelle Button- Lösungen erfolgt die sukzessive Erfassung der Daten.

| Ladeeinheiten | | | |
|---------------|---------------|----------|--|
| Anzahl | Ladeeinheiten | Zeitraum | |
| 2940 | LE | Jahr | |

| Terminaltyp | |
|-----------------------------|---------------------|
| Information Terminallayouts | Trimodales Terminal |

| Bediente Verkehrsträger | | Terminalöffnungstage | |
|-------------------------|-----------|----------------------|----------|
| Verkehrsträger | Verladung | Anzahl | in Tagen |
| Schiene | JA | | 365 |
| Schiff | JA | | |
| Straße | JA | | |

| Überblick Ladeeinheiten | | | |
|-------------------------|--------|-----------------|----------|
| Behälter | Anzahl | Handlingsfaktor | Zeitraum |
| Wechselbehälter | 1440 | 1,18 | Jahr |
| Container | 1500 | 1,25 | Jahr |
| | | | |

Abbildung 49 - Tabellenblatt "Terminaldaten"

Die Startmaske des MML- Moduls (siehe Abbildung 49) zeigt eine Übersicht (Dropdownauswahl) mit Angaben zu Ladeeinheiten, Zeiträumen, Terminaltypen und Verkehrsträgern die am Umschlag in multimodalen Logistikknoten beteiligt sind. Die Angaben zur Anzahl der jeweiligen Typen an Ladungsträgern sowie die Handlingsfaktor sind vom Nutzer individuell als Zahlenwerte einzutragen (z.B. Ladeeinheit „Container“: 2000). Die Parameter Terminaltyp, Verkehrsträger und Behälter sowie Zeitraum stehen als Dropdownmenüs zur Auswahl. Bei fehlenden Informationen oder Unsicherheiten erläutern die Beschreibungen, die durch einen Klick auf den Button „Bedienungsanleitung“. Zur besseren Veranschaulichung der Terminaltypen kann man beim Klick auf den Button „Information Terminaltypen“ (siehe Abbildung 50) die genauen Layouts MML erkennen.

Bei der Betrachtung des Tabellenblatts „Terminaldaten“ werden die zu tätigen Nutzereingaben ersichtlich. Im ersten Schritt wird eine Auswahl zum Terminaltyp getroffen. Diese Auswahlmöglichkeit unterscheidet zwischen bi- und trimodalen Terminals und umfasst die Eingrenzung, ob im multimodalen Umschlagknoten von einem auf einen oder mehrere Verkehrsträger umgeschlagen wird. Die darauf folgende Auswahl der Verkehrsträger spezifiziert diese Information näher. Im weiteren Verlauf werden Anzahl, Typ und Handlings- Faktor der Ladeeinheiten kategorisiert, d.h. die umgeschlagenen Behälter je Ladeeinheit angegeben. Dies ermöglicht eine differenzierte Verbrauchsbetrachtung. Die wählbaren Ladungseinheiten sind Container, Wechselbehälter, Kühlcontainer und Sattelaufleger. Der Handlings- Faktor wird beeinflusst durch die infrastrukturelle und organisatorische Form des Hafens und kann zwischen unterschiedlichen Behältern differenzieren. Im beschriebenen Tabellenblatt können sowohl monatliche, als auch jährliche Angaben erfasst werden.

Abschließend wird die Anzahl der Terminalöffnungstage abgefragt. Die Eingabezelle erfordert die Angabe der geöffneten Tage des Terminals. Dieser Wert dient zur Differenzierung des indirekten Energieverbrauchs pro Ladungseinheit.

Nach Erfassung dieser Einzeldaten kennt das Tool die grundlegenden Parameter des Multimodalen Logistikknotens. Durch einen Klick auf den Button „Kran / Kräne erfassen“ erfolgt der Wechsel zum Tabellenblatt „Kräne“.

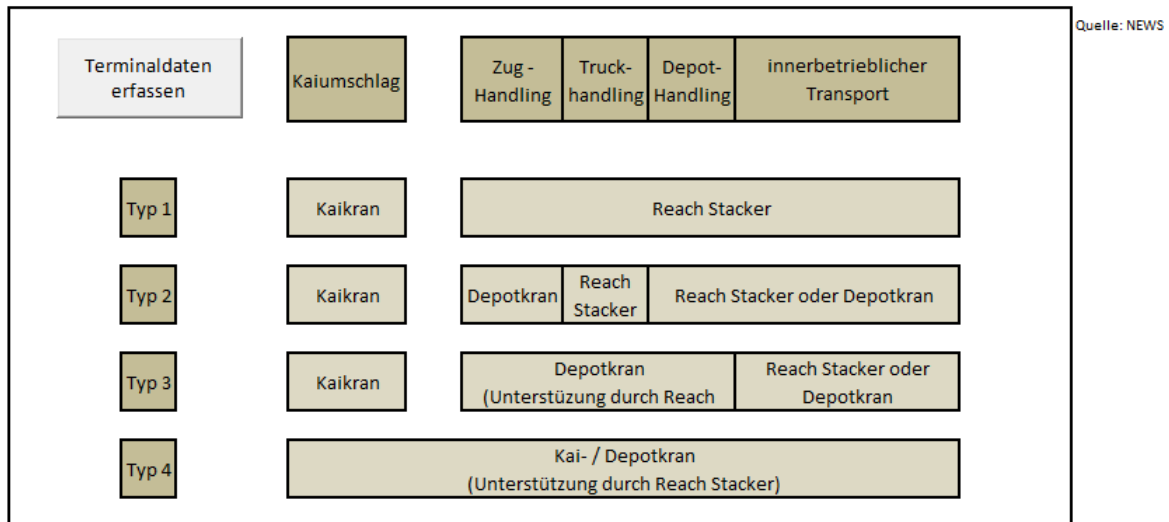


Abbildung 50 - Terminalskizze

4.5.1.1 Erfassung einzelner Kräne

| Kräne im Umschlagterminal | | | | | | | Bedienungsanleitung |
|---------------------------|------------|---------------------|---|--------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Name | Krantyp | Alter in [Jahren] | Energieverbrauch im Betrachtungszeitraum in [kWh] | Rekuperation | maximale Wirklänge | Anteil am Kranumschlag | Reach Stacker erfassen |
| Kran 1 | Portalkran | > 1 Jahr < 10 Jahre | 2600 | NEIN | 150 | 1 | |

Abbildung 51 - Tabellenblatt "Kran"

Im Tabellenblatt „Kräne“ werden die operativ eingesetzten Kräne erfasst. Die Namensvergabe / Nummerierung für jeden Kran erfolgt automatisch. Die Kräne werden anhand der Kriterien Typ, Alter, Nutzung von Rekuperation, Anteil am Gesamtumschlag und Wirklänge unterschieden. Der erste Parameter umschreibt den eingesetzten Krantyp. Hierbei ist der genutzte Kran dem Typen Portalkran, Rubber- Tyred- Gantry Cran oder Rail- Mounted- Gantry Cran zuzuordnen. Im nächsten Schritt wird das Alter der Kräne kategorisiert (Auswahloptionen: „< 1 Jahr“, „ > 1 Jahr < 10 Jahre“, „> 10 Jahre“). Neben der Alterseinstufung sind die Nutzung eines Krans mit Rekuperation (ja / nein- Angabe) und seine jeweilige Wirklänge in Metern anzugeben. Die Wirklänge entspricht der Reichweite eines Krans

beim Umschlag. Abschließend erfasst das MS- Excel Tool durch Angabe, welchen Anteil der Kran an der Gesamtumschlagleistung durch alle Kräne im Terminal hat.

Ziel dieses Tabellenblatts ist die Auflistung aller Kräne, die durch den operativen Betrieb im Terminal zum Einsatz kommen. (Abbildung 51)

4.5.1.2 Erfassung der Reach Stacker und Leercontainerstapler

| Reach Stacker / Leercontainerstapler im Umschlagterminal | | | | | | |
|--|---------------|--|------------------------------|--------------|---|------------------|
| Name | Typ | Durchschnittliche Spieldauer [in s] (Leerspiel + Lastspiel) | Durchschnittlicher Verbrauch | Standheizung | Containerstapelhöhe [Anzahl Container] | Treibstoff |
| Reachstacker 1 | Reach Stacker | 90 | 1000 | NEIN | 5 | Flüssiggas (LPG) |

Bedienungsanleitung

Bestimmung von Container- und Reach Stacker Anteilen

Abbildung 52 - Tabellenblatt Reach Stacker

Im Tabellenblatt „Reach Stacker“ können einzelne Reach Stacker aufgelistet werden. Die Namensvergabe erfolgt automatisch. Das Vorgehen zur Datenerfassung ist analog dem Tabellenblatt „Kräne“ in unterschiedliche Kriterien zu operativen Umschlagmitteln eingeteilt. Diese Kriterien werden durch Dropdownlisten (Typ, Standheizung, Treibstoff) oder durch Kennzahlen (durchschnittliche Spieldauer, durchschnittlicher Verbrauch, Containerstapelhöhe) erfasst.

In der zweiten Spalte der Tabelle besteht eine Auswahl zwischen Reach Stacker und Leercontainerstapler. Zusätzlich zu dieser Angabe erfasst man die durchschnittliche Spieldauer, die sich aus einem Leer- und Lastspiel in Sekunden zusammensetzt. Neben dem Verbrauch in Litern pro Stunde sind die Parameter für den Einsatz einer Standheizung (Ja / Nein Angabe), die mögliche Containerstapelhöhe und der Treibstoff für das Umschlagmittel relevant. Damit schließen Sie die Erfassung der eingesetzten Kräne und Reach Stacker ab.

4.5.1.3 Terminalparameter zur differenzierten Emissionsberechnung

| Verteilung Kran / Reach Stacker | | |
|---------------------------------|------|---------------|
| | Kran | Reach Stacker |
| Wechselbehälter | 30% | 70% |
| Container | 90% | 10% |
| | | |
| | | |

| Lagerzeiten pro Ladeinheit | | |
|-----------------------------|-------------|---------------|
| Durchschnittliche Lagertage | Beladene LE | unbeladene LE |
| Wechselbehälter | 2,00 | 15,00 |
| Container | 2,00 | 15,00 |
| | | |
| | | |

| |
|---------------------------------|
| Indirekte Ressourcen hinzufügen |
|---------------------------------|


| |
|---------------------|
| Bedienungsanleitung |
|---------------------|

Abbildung 53 - Tabellenblatt "Strategie"

Im Tabellenblatt „Strategie“ werden prozentuale Einsatzverteilungen, die Öffnungstage des Terminals und Lagerzeiten verschiedener Ladeinheiten abgefragt. Diese Parameter werden für eine genauere Berechnung von Umweltbelastungen im multimodalen Logistikknoten benötigt und beeinflussen die Verteilung nicht direkt zurechenbarer Verbraucher, welche in einem weiteren Schritt erfasst werden.

Die prozentualen Angaben in der obersten Tabelle (s. Bild) beschreiben die Aufteilung der Ladeinheiten beim Umschlag zwischen Kran / Reachstacker (Umschlagbeteiligung) Hier wird jede Ladeinheit in Bezug auf ihren Umschlag zwischen Kran und Reach Stacker unterschieden, d.h. wird ein Container direkt umgeschlagen, erfolgt der Transport zu 100 % per Kran und zu 0 % per Reach Stacker. Die durchschnittliche Lagerzeit einer Ladeinheit entspricht den Tagen, an denen volle / leere Container am Terminal umgeschlagen oder gelagert werden. In der Regel ist die Anzahl der Lagertage für beladene Ladungseinheiten kleiner als für unbeladene Ladungseinheiten.

4.5.1.4 Erfassung stationärer Energieverbraucher



**Institut für
Transportlogistik**
 Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

CO₂ - Methodenbaukosten:

Zusatzmodul zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknoten

| Fixe Energieverbraucher | | | | | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------------|---------|----------------------|
| Bereich | Element | Energieart (Kürzel) | Verbrauch pro Betrachtungszeitraum | Einheit | Verbrauchsermittlung |
| Gebäude | Packhalle Beleuchtung | Fernwärme (FW) | 9651 | kWh | Schätzung |
| Kühlcontaineranlage | Packhalle Dunkelstrahler | Erdgas-Heizwert (EGHW) | 274428 | kWh | Schätzung |
| Gebäude | Bürogebäude Strom | Strom (S) | 70840 | kWh | Schätzung |
| Gebäude | Bürogebäude Heizung | Erdgas-Heizwert (EGHW) | 32560 | kWh | Schätzung |
| Sonstiges | Flächenbeleuchtung Flutlicht | Strom (S) | 85800 | kWh | Schätzung |
| Sonstiges | Kranleuchten | Erdgas-Heizwert (EGHW) | 20800 | kWh | Schätzung |

| |
|----------------------------|
| Energieverbrauch berechnen |
|----------------------------|

| |
|---------------------|
| Bedienungsanleitung |
|---------------------|

Abbildung 54 - Tabellenblatt "Stationäre Verbraucher"

Das Tabellenblatt „Stationäre Energieverbraucher“ beinhaltet Geräte und Verbraucher, die einem Umschlagmittel oder einer Ladungseinheit nicht direkt zuordnungsbar sind. Beispiele für diese Verbraucher sind Beleuchtungsanlagen oder Strom für die Heizung im Bürogebäude. Um eine Kategorisierung und Klassifizierung zu erreichen, können diese Verbraucher vier Klassen zugeordnet werden. Weitere Angaben sind die Bezeichnung des jeweiligen Verbrauchers, die Energieart des Verbrauchers und der Verbrauch im Betrachtungszeitraum. Optional kann noch die Verbrauchsermittlung (Schätzung oder Messung) erfasst werden. Die Angabe der Einheit erfolgt automatisch aufgrund der gewählten Energieart.

4.5.1.5 Berechnung von Ergebnissen und Auswertung

Die Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Ergebnisse und Auswertungen sind separat im Abschnitt (vgl. Abschnitt 4.5.1.6) zu finden

| | Umschlag | Handlingsfaktor | Umlagerung | Handling Kran | Handling Reach Stacker | Kranhandling | Umlagerung | Energieverbrauchsrechnung | Bedienungsanleitung |
|-----------------|----------|-----------------|------------|---------------|------------------------|--------------|------------|---------------------------|---------------------|
| Container | 1500,00 | 1,20 | 300,00 | 0,90 | 0,10 | 1350,00 | 270,00 | Energieverbrauchsrechnung | Bedienungsanleitung |
| Wechselbehälter | 1500,00 | 1,30 | 450,00 | 0,30 | 0,70 | 450,00 | 135,00 | | |
| Sattelaufleger | 1500,00 | 1,40 | 600,00 | 0,60 | 0,40 | 900,00 | 360,00 | | |
| Kühlcontainer | 28000,00 | 1,50 | 14000,00 | 0,70 | 0,30 | 19600,00 | 9800,00 | | |
| | | | 15350,00 | | | 22300,00 | 10565,00 | Auswertung Kran / Kräne | |

| Kran | Verbrauch in kWh | Kranumschlag | Einordnung Wirkbereich | | | | Energieverbrauch pro Umschlag | Rekuperation | Wirklänge |
|--------|------------------|------------------------|------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------------|-----------|
| | | Anteil am Kranumschlag | E 1 | E 2 | E 3 | E 4 | X | | |
| Kran 1 | 2600 | 1 | 0,0056 | 0,1979 | 0,2842 | 0,5123 | 0,0300 | NEIN | 150,000 |

Abbildung 55 - Tabellenblatt "EG_Kran"

Nach der sukzessiven Eingabe der Kräne, Reach Stacker und anderer Rahmenparameter, die für den Energieverbrauch eines multimodalen Logistikknotens notwendig sind, ist die Erfassung abgeschlossen. Der Button „Energieverbrauchsberechnung“ berechnet per Mausklick die Umlagerungen im Terminal und die anteiligen Handlings für alle Kräne. Im Tabellenblatt „EG_RS“ findet diese Berechnung ebenfalls statt, mit den entsprechenden Realdaten für alles Reach Stacker.

Nach diesem Klick wird für jeden Kran der Energieverbrauch pro Umschlag berechnet. Für diese Auswertung werden die Ergebnisse der Simulationsstudie sowie Parameter aus dem Tabellenblatt „Kräne“ verwendet. Aufgrund dieser Ergebnisse lässt sich im Tabellenblatt „AuswertungKran“ ein Energieverbrauch pro Umschlag pro Entfernungskategorie angeben. Die Entfernungskategorien umfassen hierbei folgende Längen:

| Entfernungskategorie | Länge in Meter |
|----------------------|----------------|
| E1 | 0 < s < 20 |
| E2 | 20 < s < 60 |
| E3 | 60 < s < 100 |
| E4 | s > 100 |

Diese Berechnungsschritte werden analog für den Reach Stacker vollzogen, wobei für Reach Stacker / Leercontainerstapler diesem Fall keine Kategorisierung des Verbrauchs nach Entfernungen stattfindet.

CO₂ - Methodenbaukosten:
 Zusatzmodul zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von
 Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknotten

Auswertung
Reach Stacker

| Kran | Typ Ladeeinheit | Energieverbrauch pro Umschlag in KWh | | | | Energie (TTW/direkt) in MJ | | | | |
|--------|-----------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|------|
| | | E1 | E2 | E3 | E4 | E1 | E2 | E3 | E4 | E1 |
| Kran 1 | Container | 0,0300 | 0,0865 | 0,1132 | 0,1309 | 0,1080 | 0,3113 | 0,4074 | 0,4713 | 0,30 |
| Kran 1 | Wechselbehälter | 0,0300 | 0,0865 | 0,1132 | 0,1309 | 0,1080 | 0,3113 | 0,4074 | 0,4713 | 0,30 |
| Kran 1 | Sattelaufleger | 0,0300 | 0,0865 | 0,1132 | 0,1309 | 0,1080 | 0,3113 | 0,4074 | 0,4713 | 0,30 |
| Kran 1 | Kühlcontainer | 0,0300 | 0,0865 | 0,1132 | 0,1309 | 0,1080 | 0,3113 | 0,4074 | 0,4713 | 0,30 |

Abbildung 56 - Tabellenblatt "Auswertung Kran"

In den Tabellen „Auswertung Kran“ und „Auswertung RS“ lassen sich jeweils auf Behälterebene die Verbrauchswerte identifizieren. Die entsprechenden THG- Emissionen werden normgerecht ausgegeben. Ein Klick auf den jeweiligen Button wechselt die Ansicht zur nächsten Tabelle. Die Bezeichnung des Buttons entspricht der nächsten Tabellenansicht.

CO₂ - Methodenbaukosten:
 Zusatzmodul zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von
 Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknotten

Auswertung Reach Stacker

Indirekte Ressourcen ergänzen

| Spezifizierte Auswertung Reach Stacker | | | | | | | | | |
|--|-----------------|------------------|--|--|----------------------------|--|--|--|--|
| Reach Stacker | Ladeeinheit | Diesel | Energieverbrauch RS pro Umschlag pro Ladeeinheit | Emission pro Ladeeinheitenumschlag (Reach Stacker) | | | | | |
| | | | | Energie (TTW/direkt) in MJ | Energie (WTW/gesamt) in MJ | CO ₂ (TTW/direkt) in kg CO ₂ | CO ₂ (WTW/gesamt) in kg CO ₂ | CO _{2e} (TTW/direkt) in kg CO _{2e} | CO _{2e} (WTW/gesamt) in kg CO _{2e} |
| Reachstacker 1 | Container | Flüssiggas (LPG) | 25,0000 | 627,5000 | 722,5000 | 40,0000 | 47,0000 | 40,2500 | 47,5000 |
| Reachstacker 1 | Wechselbehälter | Flüssiggas (LPG) | 25,0000 | 627,5000 | 722,5000 | 40,0000 | 47,0000 | 40,2500 | 47,5000 |
| Reachstacker 1 | Sattelaufleger | Flüssiggas (LPG) | 25,0000 | 627,5000 | 722,5000 | 40,0000 | 47,0000 | 40,2500 | 47,5000 |
| Reachstacker 1 | Kühlcontainer | Flüssiggas (LPG) | 25,0000 | 627,5000 | 722,5000 | 40,0000 | 47,0000 | 40,2500 | 47,5000 |

Abbildung 57 - Tabellenblatt Auswertung "Reach Stacker"

Abschließend werden die nicht direkt zuordnungsbaaren Energieverbraucher im multimodalen Logistikknotten ergänzt.

Die Ansicht im Tabellenblatt „AuswertungGesamt“ zeigt damit für jeden Kran, Reach Stacker und aggregierten nicht direkt zuordnungsbaaren Verbraucher den Verbrauch pro Umschlag pro

Ladungseinheit an. Somit ist der Anwender des Tools in der Lage, aufgrund seiner individuellen Anzahl an Prozessen eine exakte Bilanz der Emissionen aufzustellen.

4.5.1.6 Modell zur Energieverbrauchsberechnung eines Krans im multimodalen Logistikknoten

Für die Berechnung des Verbrauchs eines Krans in den Entfernungsklassen E1, E2, E3 und E4 wird folgendes Modell verwendet. Die Variable „x“, die in der Ansicht (xy) berechnet wird, entspricht dem Verbrauch pro Ladungseinheit im Bereich E1.

Variablen und Formeln zur Berechnung des Verbrauchs pro LE pro Entfernungsklasse

| | |
|-------------|---|
| V_{Kran} | Gesamtverbrauch des Umschlagmittels |
| U_{Kran} | Umschlagmenge des Umschlagmittels |
| x | Energieverbrauch pro LE im Bereich E1 |
| y_{ii} | Umschlagmengenanteil im Bereich E_i $i = \{1,2,3,4\}$ |
| \bar{x}_i | Verbrauchsverhältnis des Bereichs E_i im Vergleich zum Bereich E_1 $i = \{1,2,3,4\}$ |
| z_i | Anzahl umgelagerter LE im Bereich E_i $i = \{1,2,3,4\}$ Für den Fall $i=2, i=3, i=4$ gilt $z_i=0$ Für den Fall $i=1$ gilt $z_i =$ Anzahl umgelagerter LE |

Formel 1: Berechnung des Energieverbrauchs eines Krans pro LE in der Entfernungsklasse E1

$$x = \frac{V_{Kran}}{\sum_{i=1}^4 \bar{x}_i * (U_{Kran} * y_i + z_i)}$$

Die Berechnung des Energieverbrauchs x für die Entfernungsklasse setzt sich aus dem Quotienten des Energieverbrauchs eines Krans und einer Summe. Diese Summe für die vier Entfernungsklassen bildet das Produkt aus dem Verbrauchsverhältnis für die Entfernungsklasse und der realen Umschlagmenge eines Krans. Für die Umschlagmenge wird im Fall der Entfernungsklasse E1 zusätzlich die Anzahl umgelagerter Ladeeinheiten berücksichtigt.

Das Ergebnis (Verweis Kran) ist in der Spalte „x“ erkennbar. Anhand der Tabelle (Verweis Simulationenwerte) kann in der Tabelle „ErgebnisKran“ für die weiteren Entfernungsklassen E2, E3, E4 ein Verbrauchswert ausgegeben werden.

4.5.1.7 Modell zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Reach Stackers / Leercontainerstapler im multimodalen Logistikknoten

| | |
|-------|--|
| V_h | Durchschnittliche Verbrauch des Umschlagmittels pro Stunde |
| T_s | Benötigte Zeit pro Spiel (Last- und Leerfahrt) |
| x | Verbrauch pro Umschlag |

Der Verbrauch pro Umschlag mit einem Reach Stacker / Leercontainerstapler berechnet sich aus dem Produkt der benötigten Zeit pro Spiel und dem Verbrauch des Umschlagmittels pro Sekunde.

Formel 2: Berechnung des Energieverbrauchs eines Reach Stackers pro Umschlag

$$x = \frac{V_h}{3600} * T_s$$

4.5.1.8 Modell zur Berechnung des Energieverbrauchs indirekter Verbraucher im multimodalen Logistikknoten

| | |
|-----------|---|
| VB | kumulierter Verbrauch pro Energieart |
| U_{ges} | Gesamtanzahl umgeschlagener Ladungseinheiten pro Jahr |
| D | Anzahl der Öffnungstage des multimodalen Logistikknoten |
| d_v | Durchschnittliche Verweildauer beladener Ladungseinheiten |
| d_l | Durchschnittliche Verweildauer unbeladener Ladungseinheiten |
| T | Terminal- Energieverbrauch pro LE pro Tag |
| EV_v | Energieverbrauch pro LE pro Kategorie (Beladungszustand = voll) |
| EV_l | Energieverbrauch pro LE pro Kategorie (Beladungszustand = leer) |

Formel 3: Vorgehen zur Berechnung des Terminal- Energieverbrauchs pro LE pro Tag

$$T = \frac{\left(\frac{VB}{D}\right)}{U_{ges}}$$

Formel 4: Vorgehen zur Berechnung des Energieverbrauchs pro beladene LE pro Kategorie pro Energieart

$$EV_v = T * d_v$$

Formel 5: Vorgehen zur Berechnung des Energieverbrauchs pro unbeladene LE pro Kategorie pro Energieart

$$EV_l = T * d_l$$

Bei der Ausgabe des Energieverbrauchs eines indirekten Verbraucher wird der Beladungszustand einer LE berücksichtigt.

Zur Berechnung wird im ersten Schritt der Terminal- Energieverbrauch pro Ladungseinheit pro Tag berechnet. Hierzu werden die Größen Energieverbrauch, geöffnete Tage und Umschlagmenge ins Verhältnis gesetzt. Das Produkt aus diesem „Tagesverbrauch“ und der durchschnittlichen Verweildauer ergeben den beschriebenen Energieverbrauch einer LE für die Energieart einer Kategorie.

Dieses Berechnungsverfahren wurde mit Unterstützung der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses entwickelt und validiert. Für die Berechnung des Energieverbrauchs einer beladenen Ladungseinheit wurden die Ergebnisse bestätigt. Bei der Berechnung des Energieverbrauchs einer unbeladenen Ladungseinheit wurde auf Ungenauigkeiten bei der Stellung von Leercontainern im Stackerbereich hingewiesen. In Rücksprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses wurde das Berechnungsverfahren als vertretbarer deklariert.

4.6 Arbeitspaket 6: Validierung und Implementierung des erweiterten Methodenbaukastens mit den Partnern

Nach der Fertigstellung des MS-Excel basierten Demonstrators wurde dieser mit den Projektpartnern validiert und in interessierten Unternehmen implementiert. Hierzu wurden zur Überprüfung der Funktionalität Fallstudien mit Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Das Vorgehen diente zur Kontrolle und Validierung der Berechnungsverfahren in Bezug auf die Praxiseignung, um die praktische Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse nachzuweisen. Im Rahmen der Validierung und Implementierung des erweiterten Methodenbaukastens wurden bei Projektpartnern individuelle Workshops durchgeführt. Die Realdaten der Projektpartner konnten bei diesen Workshops erarbeitet und vor Ort diskutiert werden. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses bestätigten in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der Auswertung durch den MS-Excel Demonstrator. Unabhängig von einzelnen Ausgangssituationen und Lastfällen führten die Berechnungen des MS-Excel basierten Demonstrators zu einem übergreifend positiven Fazit. Die Abweichungen einzelner Berechnungen betragen im Vergleich zu realen Verbräuchen max. 10 %. In Diskussionen mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses kam man zu dem Ergebnis, dass diese geringen, vereinzelt Abweichungen akzeptabel sind.

Die Erkenntnisse aus den Fallstudien waren Grundlage für die Erstellung des Anwendungsleitfadens, welcher eine Art Benutzerhandbuch darstellt. Der Leitfaden versetzt die Unternehmen des

projektbegleitenden Ausschusses und auch weitere Unternehmen, die nicht am Forschungsvorhaben beteiligt waren, in die Lage, den Demonstrator selbständig zu nutzen. Neben dem öffentlichen Download des MS- Excel Demonstrators unterstützt dieses Dokument bei der Handhabung des Zusatzmoduls.

4.7 Arbeitspaket 7: Dokumentation und Transfer in die Praxis

Im Fokus des Arbeitspakets 7 stand die Kommunikation mit den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie die Bekanntmachung des Projekts und seiner Ergebnisse über die Projektbeteiligten hinaus. Dieser Wissenstransfer in die Praxis wurde nicht ausschließlich nach Projektabschluss, sondern parallel zur Forschungsarbeit durchgeführt. Dazu trug zum einen die fortwährende Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss bei, die im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitspakete erforderlich war. Zum anderen erfolgte die Verbreitung der Untersuchungsergebnisse über die beteiligten Multiplikatoren in Richtung der Logistikunternehmen sowie durch eine gezielte Pressearbeit in Form von Beiträgen in Fachzeitschriften sowie durch Veröffentlichungen auf Konferenzen und im Internet.

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens steht den interessierten Unternehmen dieser Schlussbericht vor, in dem das Vorgehen und die Ergebnisse ausführlich dargestellt und erläutert werden. Des Weiteren sind das erstellte Modul Multimodaler Logistikknoten sowie der dazugehörige Anwendungsleitfaden frei verfügbar auf der Homepage des Instituts für Transportlogistik zum Download bereitgestellt.

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse ermöglichen es KMU der Logistikbranche eine gesteigerte Aussagefähigkeit zur Ausweisung und Bilanzierung von THG-Emissionen ihrer Logistikaktivitäten. Ermittelte THG-Emissionen können sowohl zur transparenten Außendarstellung als auch für innerbetriebliche Optimierungen genutzt werden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund stetig steigender Rohstoff- und Energiepreise, sowie den aktuellen und zukünftigen politischen Herausforderungen des Verkehrssektors. Darüber hinaus werden KMU befähigt innovative multimodale Produkte inklusive einer THG-Bilanz anbieten zu können, wodurch sie ihr Produktportfolio erweitern können. Eine Teilnahme an Ausschreibungen, die einen verkehrsverlagernden und/oder ökologischen Ansatz vorschreiben, wird dadurch ebenfalls ermöglicht.

Es gibt zwei wesentliche Zielgruppen, welche aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens einen Nutzen ziehen können. Dies sind auf der einen Seite die Transporteure innerhalb der Transportkette und auf der anderen Seite die Betreiber der multimodalen Umschlaganlagen. Beide Gruppen sind von Unternehmen geprägt, die den KMU zuzuordnen sind.

Transporteure erhalten die Möglichkeit, den im Vorgängerprojekt entwickelten anwendungsorientierten Bilanzierungs-Demonstrator zur Erstellung der CO₂-Bilanz wesentlich zu verbessern, da nun auch detaillierte Angaben zu den THG-Emissionen in den Umschlaganlagen gemacht werden können. Dies führt zu einer wesentlich aussagekräftigeren, standardisierten und transparenten Vorgehensweise zur Vergleichbarkeit verschiedener CO₂-Bilanzen in der Logistik und ermöglicht eine exaktere Ausweisung von THG-Emissionen auf die verursachende Behälterebene im Rahmen von Ausschreibungen der verladenden Wirtschaft. Die Betreiber der Umschlaganlagen erhalten neben diesen Möglichkeiten zusätzlich noch eine Grundlage, auf dessen Basis eine innerbetriebliche Optimierung sowohl der Umschlagprozesse als auch der Umschlagkosten und -emissionen erfolgen kann. Des Weiteren kann die öffentlichkeitswirksame Darstellung der KMU durch die Nutzung gesteigert werden. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschuss haben auch in weiterführenden Gesprächen einen eindeutigen Bedarf am MBK II signalisiert.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ermöglichte die Fortentwicklung der Logistikmethoden im Kontext der Öko-Effizienz. Die Forschungsergebnisse in Form des um das Modul MML erweiterten CO₂-Methodenbaukastens werden den KMU zur kostenfreien Verwendung zur Verfügung stehen, was die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von KMU in besonderem Maße positiv beeinflussen kann. Zudem ist es für KMU möglich, durch die Identifikation kritischer Prozesse aus der CO₂-Bilanz weiteres Verbesserungs- und Innovationspotenzial zu erschließen. Neben Emissionstreibern können zusätzlich Energieverbraucher identifiziert werden und entweder ersetzt oder diesbezügliche Prozesse optimiert werden.

Durch Ausweisen und Optimieren der eigenen THG-Emissionen werden die angebotenen Dienstleistungen bezüglich eines multimodalen Transportes transparenter gegenüber dem Kunden

und bei einer positiven ökologischen Wirkung, kann die Anerkennung der Unternehmen in der öffentlichen Wahrnehmung gesteigert werden. Auch dies trägt maßgeblich zum Erhalt der eigenen Wettbewerbsfähigkeit der KMU bei.

Die Unternehmen erhalten somit die Gelegenheit, sich aus eigenem Antrieb und eigener Motivation mit der Minderung ihrer THG-Emissionen kritisch auseinander zu setzen, wodurch ein zielgerichteter umweltkonformer Ressourceneinsatz gefördert wird. Aufgrund der volkswirtschaftlichen Bedeutung des Mittelstandes sind mit der Durchführung dieses Projektes durchaus positive Auswirkungen zu erwarten.

6 Verwendung der Zuwendung

- Wissenschaftlich-technisches Personal

Entsprechend dem Finanzierungsplan wurden die Forschungsarbeiten durch qualifiziertes *wissenschaftliches Personal* durchgeführt. Die im Projekt eingesetzten Mitarbeiter waren diplomiert in den Studienfächern Logistik bzw. Betriebswirtschaft. Zudem verfügten sie über die zur Projektbearbeitung erforderlichen Kenntnisse im Bereich des Prozessmanagements, grüne Logistik und der Simulation. Für die Durchführung der Forschungsarbeiten wurden seitens der Forschungsstelle insgesamt 23,16 PM aufgebracht.

Ferner wurden im Projekt *studentische Hilfskräfte* zur Unterstützung der wissenschaftlichen Mitarbeiter im Umfang von 49,7 PM eingesetzt. Diese leisteten in den Bereichen Ergebnisdokumentationen, Datenaufbereitung und Öffentlichkeitsarbeit wertvolle Unterstützungsleistungen.

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|--------------------------------|------|------|-------|------|
| wissenschaftliche Beschäftigte | - | 9,52 | 12,64 | 1,00 |
| Studentische Hilfskräfte | - | 6,3 | 40,4 | 3 |

- Geräte

Gemäß dem Finanzierungsplan wurden innerhalb der beschriebenen Arbeiten keine Geräte angeschafft.

- Leistungen Dritter

Gemäß dem Finanzierungsplan wurden innerhalb der beschriebenen Arbeiten keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Forschungstätigkeiten sind notwendige Voraussetzung zur Erreichung des Forschungsziels, die Erweiterung des im Vorgängerprojekt entwickelten Methodenbaukastens zur Ermittlung und Zuordnung von THG-Emissionen um ein Zusatzmodul für multimodale Logistikknoten (MML). So konnten durch die durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspaket 1 MML umfassend analysiert und kategorisiert werden. Zusammen mit den durchgeführten und verbleibenden Arbeiten aus den Arbeitspaketen 2 und 3 (die Validierung der Verbrauchsangaben und die Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Verbräuche) konnte die Simulationsstudie durchgeführt werden. Nach Abschluss dieser konnten die hier erzielten Ergebnisse in den MML-Bilanzierungsdemonstrator überführt und in der Anwendung zusammen mit den Unternehmen des begleitenden Beirats getestet werden (Arbeitspakete 5 und 6). Alle Arbeiten, die in Arbeitspaket 7 durchgeführt wurden, waren notwendige Arbeiten zur Dissemination der bisherigen Projektergebnisse. Die Einladung zu den Sitzungen sowie die darin erarbeiteten Ergebnisse wurden an den projektbegleitenden Ausschuss verteilt. Zwischenergebnisse wurden auf Konferenzen in Fachbeiträgen oder gemäß der Veröffentlichungsliste in Fach- und Unternehmenszeitschriften veröffentlicht.

8 Dissemination der Forschungsergebnisse

Die Dissemination der im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse wurde und wird seitens der Forschungsstelle auf unterschiedlichen Wegen vorangetrieben. So wurden bereits während der Projektlaufzeit mehrere Artikel und Anzeigen in Konferenzbeiträgen und Fachveranstaltungen platziert, um so einerseits grundsätzlich auf das Forschungsvorhaben und die darin angestrebten Ziele aufmerksam zu machen und andererseits um weitere Mitglieder für den projektbegleitenden Ausschuss zu gewinnen.

Ein weiterer Schritt zur Verbreitung der erzielten Forschungsergebnisse ist der vorliegende Endbericht, welcher allen interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt wird. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens fließen zudem in die akademische Ausbildung der Masterstudenten an der TU Dortmund ein. Hierzu wurden die Ergebnisse aufbereitet und in die Veranstaltungen Umschlag- und Entsorgungstechnik oder Verkehrslogistische Systeme überführt. Eine Übersicht der durchgeführten Maßnahmen bietet die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 8: Dissemination der Ergebnisse

| Maßnahme | Ziel | Ggf. Rahmen | Datum |
|---|---|------------------------------|--|
| Veröffentlichung des Projektes und Information über den Projektstart | Gewinnung weiterer Unternehmen und Multiplikatoren für den PA | Homepage und Newsletter | Seit Januar 2014 |
| Abstimmung des Vorgehens innerhalb des Forschungsvorhabens mit PA | Gemeinsames Verständnis zum Gang der Forschung; Detaillierung der Einbindung des PA | 1. Sitzung des PA (Kick-Off) | 18.03.2014 |
| Ist-Analyse bei den beteiligten Unternehmen | Erhebung des notwendigen und verfügbaren Datenbestandes | Arbeitspaket 1 | |
| Punktuelle Verbrauchsmessungen bei Unternehmen des PA, Ermittlung von Einflussfaktoren | Validierung von Literatur- und Herstellerangaben | Arbeitspaket 2 und 3 | Laufend, Abschluss im kommenden Berichtszeitraum |
| Vortrag „Methodenbaukasten – CO ₂ -Bilanzierung für kleine und mittelständische Unternehmen der Transportlogistik“ auf der Fachtagung “Sustainable Supply Chain Management” des VDWI + der UDE in Duisburg am 11. April 2014 | Publikation | Projektbegleitende Tätigkeit | 11.04.2014 |

| | | | |
|---|---|----------------------------------|--------------------|
| Vortrag „CO2-method kit – Determination of GHG-emissions in logistics companies with a specific method kit“ auf dem Workshop “Smart Urban Transport Policy Futures II” der University of Greenwich in London am 10. und 11. Juli 2014 | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | 10.- 11.07.2014 |
| Vortrag und Paper „Determination of GHG-Emissions in Logistics Companies“ auf der Konferenz “LOGMS – International Conference on Logistics and Maritime Systems” in Rotterdam vom 27. bis zum 29. August 2014 | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | 27.- 29.08.2014 |
| Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse der Ist-Analyse | Gemeinsames Verständnis und Akzeptanz der Ergebnisse; Festlegung der zu verwendenden Datenbasis | 2. Sitzung des PA | 11.11.2014 |
| Vortrag und Diskussion „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ auf dem ASIM-Fachgruppentreffen „Energie“ in Kassel | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | 24.11.2014 |
| Vortrag und Diskussion auf dem ASIM-Fachgruppentreffen „Simulation in Produktion und Logistik“ in Kassel | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | Januar 2015 |
| Vortrag und Diskussion auf dem ASIM-Fachgruppentreffen „Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in SPL“ in Kassel | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | Februar 2015 |
| Vortrag und Paper „Determination of GHG-Emissions of Handling Operations in Multimodal Container Terminals“ für die ICPLT 2015 in Dortmund vom 21. bis zum 22. Juli 2015 | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | 21.- 22.07.2015 |
| Vortrag und Paper „Energiebasierte Simulation in multimodalen Umschlagsanlagen“ für die ASIM 2015 in Dortmund vom 23. bis zum 25. September 2015 | Publikation | Projektbegleit ende Tätigkeit | 23.- 25.09.2015 |

| | | | |
|---|---|--|--------------------------|
| Poster und Paper „ <i>Assessment of emissions caused by logistics handling operations in multimodal-terminals</i> “ für die TRA 2016 in Warschau vom 18. bis zum 21. April 2016 | Publikation | Projektbegleitende Tätigkeit | 18.– 21.04.2016 |
| Vorstellung und Diskussion der Simulationsergebnisse | Verständnis bezüglich der in der Simulation erzielten Allokationsergebnisse | Bilaterale PA Treffen | 2015 |
| Praxisversuche bei Unternehmen des PA | Überprüfung der Funktionalität | Bilaterale PA Treffen | 2015 |
| Bereitstellung eines Funktionsmusters zur Berechnung der CO ₂ -Emissionen und | Nachweis der Funktionalität der Methodik | Bilaterale PA Treffen | 2015/2016 |
| Bereitstellung von Demonstrator und Leitfaden | Öffentlicher Zugang zu den Forschungsergebnissen für interessierte Anwender | Arbeitspaket 7; zum freien Zugang auf der HP des ITL | April 2016 |
| Veröffentlichung eines Ergebnisberichtes | Publikation | Zum freien Download | 2 Hj. 2016 |
| Einbindung der Ergebnisse in die Lehre | Vermittlung der Berechnungs- und Erhebungsmethodik | in Vorlesungen und Abschlussarbeiten | Mit Beginn des SoSe 2016 |
| Artikel „Treibhausgasbilanzierung auf Containerbasis“ im duisport-Mgazin | Publikation | Projektbegleitende Tätigkeit | ½ H.jahr 2016 |

8.1 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Das entwickelte Modul MML, welches den bestehenden Methodenbaukasten ergänzt, ist für Unternehmen anwendbar und wurde zum Download auf der Homepage des Instituts für Transportlogistik bereitgestellt. Die direkte Nutzung des zentralen Forschungsergebnisses ist somit gewährleistet. Diejenigen Anwender, die bereits auf den bestehenden Methodenbaukasten zurückgreifen, werden durch die analoge Umsetzung des Moduls MML schnell mit der Anwendung vertraut sein und die Integration des neuen Moduls schnell umsetzen können. Zur Unterstützung dieses Prozesses, sowie zur Erleichterung der Nutzung des Moduls für Neuanwender, wurde zeitgleich ein Leitfaden bereitgestellt, welcher die Vorgehensweise bei der Anwendung erläutert. Auch dieser ist mit dem Modul frei verfügbar.

Somit sind die Forschungsergebnisse unmittelbar nach Abschluss des Forschungsvorhabens nutzbar. Wie analog zu den bereits bestehenden Modulen des Methodenbaukastens CO₂-Bilanz (inkl. der im Rahmen der Forschungsarbeiten erzielten Simulationsstudienresultate), können mit dem in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Modul MML, Unternehmen, die Transporte in Form von Transportketten mit einem oder mehreren Umschlagvorgängen anbieten, mit der erstellten Treibhausgasbilanz ihre eigenen treibhausgasintensiven Prozesse identifizieren und daran anschließend zielgerichtete ökoeffiziente Maßnahmen zur Minderung ableiten und umsetzen. Die Ausweisung der prozess- oder kundenbezogenen Treibhausgasemissionen ermöglicht den Unternehmen darüber hinaus die Teilnahme an einer zunehmenden Anzahl an Ausschreibungen, die umweltbezogene Angaben einfordern.

Über die Nutzung des im Forschungsvorhaben entwickelten Moduls ist zu erwarten, dass sich nach einer Phase der erfolgreichen Anwendung Anforderungen an eine Weiterentwicklung ergeben. Denkbar wäre beispielsweise eine direkte Schnittstelle zur verwendeten Speditionsoftware oder ein höherer Funktionsumfang. Dies wiederum ermöglicht Softwareanbietern die Methodik des Funktionsmodells professionell umzusetzen und die neuen Anforderungen in ihre heutigen Produkte aufzunehmen. Für die ebenfalls klein- und mittelständisch geprägte Softwarebranche bedeutet dies die potentielle Erweiterung ihrer heutigen Produktpalette und damit neue Umsatzmöglichkeiten. Hier steht das ausführende Institut gerne als Ansprechpartner hinsichtlich der Weiterentwicklung einzelner Module zur Verfügung.

9 Durchführende Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund
Institut für Transportlogistik
Leonhard-Euler-Straße 2
44227 Dortmund

9.1 Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Technische Universität Dortmund
Institut für Transportlogistik
Leonhard-Euler-Straße 2
44227 Dortmund

9.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Technische Universität Dortmund
Institut für Transportlogistik
Leonhard-Euler-Straße 2
44227 Dortmund

Telefon 0231 / 755 6335
Fax 0231 / 755 6338

10 Hinweis zur Förderung

Das Forschungsvorhaben „CO₂-Bilanz – Multimodale Logistikknoten: Erweiterung des Methodenbaukastens CO₂-Bilanz zur exakteren Ermittlung und Zuordnung von Umwelteffekten in Multimodalen Logistikknoten“ wurde mit Mitteln aus dem Haushalt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die AiF im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL), Projektnummer N17961 N/1, gefördert.

11 Literaturverzeichnis

- adelphi research gemeinnützige GmbH (2012) *Britische Unternehmen müssen Treibhausgas-Bilanz offenlegen*. 04.07.2012. <http://www.adelphi.de/de/news/dok/43482.php?nid=254>, besucht am 06.03.2013.
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (2008) *Handbuch Logistik*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a.
- Berz, G. (2009) *Naturkatastrophen und Klimaänderung: Was erwartet uns in Mitteleuropa? Was können wir tun?* http://www.biukat.de/fileadmin/user_upload/tagungsbaende/UTF3/Berz_TG.pdf besucht am 08.03.2013.
- Brinkmann, B. (2005). *Seehäfen. Planung und Entwurf*. 1.Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2007) *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025*. Erstellt durch: Intraplan Consult GmbH (ITP) und BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, München/Freiburg, 14.11.2007.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2013) *Zahlen und Fakten Energiedaten*. Stand 06.02.2013. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html>, besucht am 14.03.2013.
- Clausen, U.; Deymann, S.; Friedrichs, J.; Schmied, M. (2008a) *Measures to abate greenhouse gas emissions of stationary and mobile processes in logistics companies*. In: *Proceedings Transport Research Arena 2008, Lubljana, Biografika Bori*, S. 181, ISBN: 978-961-6527-11-8.
- Clausen, U. (2008b) *Aktualisierte Darstellung mit Daten aus BMVBS: Verkehr in Zahlen 2011/2012. Originalabbildung in: Clausen, U.: Maßnahmen im mobilen Bereich – Ergebnisse von StaMoLo und deren Umsetzung in der Praxis. Klimaschutz in der Logistik: Treibhausgase mindern – Kosten senken*. Bonn.
- Clausen, U.; Goedicke, I.; Mest, L.; Kaffka, J. (2011) *Layout Planning of Less Than Truckload Terminals*. In: Balsamo, S; Marin, A.(Hrsg.): *Proceedings of the 9th Industrial Simulation Conference 2011*, S. 204-208, ISBN: 978-90-77381-63-2.
- Clausen, U.; Kaffka, J.; Meier, F. (2012a) *CONTSIM - Container Terminal Management with Simulation*. In: *Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, September 2012, Paris; Procedia - Social and Behavioral Sciences 54 (2012)*; S. 332-340.
- Clausen, U.; Dabidian, P.; Diekmann, D.; Goedicke, I.; Kaffka, J. (2012b) *Optimizing LTL terminal performance by simulation*. In: *Proceedings of the European Simulation and Modelling Conference (2012)*, S. 386-393, ISBN: 97890-77381-731.
- Clausen, U. und Kaffka, J. (2012) *Modeling of Handling Task Sequencing to Improve Crane Control Strategies in Container Terminals*. In: Laroque, C. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*; Omnipress 2012; ISBN: 978-1-4673-4781-5.
- Climate Service Center (CSC) (2012) *Globale CO2-Emissionen auf neuem Höchststand*. Climate Service Center – Helmholtz-Zentrums Geesthacht, http://www.climate-service-center.de/035210/index_0035210.html, zuletzt besucht am 14.03.13.
- Deutsche Presse-Agentur GmbH (DPA) (2013) *EU: 40 Prozent CO2-Einsparung bis 2030*. <http://www.verkehrsrundschau.de/eu-40-prozent-co2-einsparung-bis-2030-1230603.html> besucht am 14.03.2013.

- Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB) (2012) Schwerpunkte – Verkehrspolitik. <http://www.dstgb.de/dstgb/Schwerpunkte/Verkehrspolitik/>, zuletzt besucht 26.02.2013.*
- DIN EN ISO 14040 – Norm DIN EN ISO 14040, 10/2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.*
- DIN EN ISO 14044 – Norm DIN EN ISO 14044, 10/2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.*
- DIN EN 16258 – Norm DIN EN 16258, 03/2013: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr).*
- DIN 30789-2:2008 – Norm DIN 30789-2, 12/2008: Transportbelastungen - Messen und Auswerten von klimatischen und sonstigen Belastungen - Teil 2: Datenerfassung und allgemeine Anforderungen an Messeinrichtungen.*
- Duinkerken, M. B., Dekker, R., Kurstjens, S. T., Ottjes, J. A., Dellaert, N. P. (2006) Comparing transportation systems for inter-terminal transport at the Maasvlakte container terminals. In: OR Spectrum 28, 469-493, 2006.*
- Fläming, H.; Seipold, P.; Drewes, P.; Wolff, J. (2009) Leitfaden für Unternehmen zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsprojekten. Reduzierung von gütertransportbedingten CO₂-Emissionen. gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2.0th ed. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik. Hamburg.*
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2007) Klimaänderung 2007 – Synthesebericht. Berlin, 2007.*
- ISO 14064-1:2006 – Norm ISO 14064-1, 1/03/2006: Greenhouse gases - Part 1 - Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.*
- ISO 14064-2:2006 – Norm ISO 14064-2, 1/03/2006: Greenhouse gases - Part 2 - Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements.*
- ISO 14064-3:2006 – Norm ISO 14064-3, 1/03/2006: Greenhouse gases - Part 3 - Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions.*
- ISO 14065:2007 – Norm ISO 14065, 15/04/2007: Greenhouse gases - Requirements for greenhouse gas validation and verification bodies for use in accreditation or other forms of recognition.*
- ISO 14067:2013 - Greenhouse gases -- Carbon footprint of products -- Requirements and guidelines for quantification and communication*
- ISO 14069 – ISO 14069 GHG (Entwurf in Arbeit) Quantifizierung und Reporting von Treibhausgasemissionen für Organisationen (Carbon footprint of organizations) Leitfaden für die Anwendung von ISO 14064-1.*
- Jahn, D. (2010) Energieeffizienz in der Intralogistik. Präsentation auf dem LogiMAT Forum „Green Logistics“ am 4.3.2010 in Stuttgart.*
- Kaffka, J.; Clausen, U.; Chmielewski, A.; Schütte, T. (2010) Optimization and simulation of operating strategies for container terminals. In: General Proceedings of the 12th WCTR, Lissabon, ISBN 978-989-96986-0-4.*
- Kaffka, J.; Mest, L. (2010) Optimierung von Binnenhafencontainerterminals mittels Simulation. In: Schifffahrt und Technik, S. 85, Band: 29. Jahrgang; Ausgabe 1/2010.*

- Kaffka, J.; Clausen, U; Stein, S.: *Revealing Gaps in the Material Flow of Inland Port Container Terminals alongside the Danube with Simulation*
In: Tolk, A. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*; Omnipress 2014, ohne Seitenzahlen,
- Kleijnen, J.P.C. (2005) *Supply chain simulation tools and techniques: a survey*. In: *International Journal of Simulation & Process Modelling* Volume 1, Nos 1/2, 2005.
- Klöpffer, W.; Grahl, B. (2009) *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfadens für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, A.D. (2011) *CO2-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards*. 1st ed. München: Vogel.
- Kranke, A. (2013) *Zwei Fußabdruck-Regeln*. in *VerkehrRundschau* 03/2013, 67. Jahrgang, S. 28-29.
- Kuhn, A., Wenzel, S.(2008) *Simulation logistischer Systeme*. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3. Auflage. 73-92, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- Lampe, H. (2006) *Untersuchung von Dispositionsentscheidungen in Umschlagterminals des Kombinierten Verkehrs Schiene/Straße*. In: Clausen (Hrsg.) *Reihe Logistik, Verkehr und Umwelt*, Verlag Praxiswissen, 2006.
- Law, A. (2007) *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw Hill, Tucson AZ, 2009.
- Lee, Y. H.; Cho, M. K.; Kim, S. J.; Kim Y. B. (2002) *Supply chain simulation with discrete-continuous combined modeling*. In: *Computers & Industrial Engineering* 43, 375-392.
- Lee, B.K.; Jung, B.J.; Kim, K.H.; Park, S.O.; Seo, J.H. (2006) *A Simulation Study for Designing a Rail Terminal in a Container Port*. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 1388-1397, 2006.
- Luft, N. und Muschkiet, M. (2012) *Emissionsberechnung leichtgemacht*. In: *Logistik für Unternehmen*. 26(10), S. 20-21.
- McKinnon, A.; Piecyk, M. (2010) *Measuring and Managing CO2-Emissions of European Chemical Transport*. Edited by Cefic -The European Chemical Industry Council. Heriot-Watt University, Logistics Research Centre. Edinburgh. Available online at www.cefic.org.
- Meisel, F. (2009). *Seaside Operations Planning in Container Terminals*. 1.Auflage. Berlin, Heidelberg: Physica-Verlag .
- Ottjes, J. A.; Veeke, H. P. M.; Duinkerken, M. B.; Rijsenbrij, J. C.; Lodewijks, G. (2006) *Simulation of a multiterminal system for container handling*. In: *OR Spectrum* 28, 447-468, 2006.
- Parola, F.; Sciomachen, A. (2005) *Intermodal container flows in a port system network: analysis of possible growths via simulation models*. In: *International Journal of Production Economics* 97(1), 75-88.
- PAS 2050:2008 – *Publicly available specification. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*.
- PAS 2050:2011 – *Publicly available specification. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*.
- Pfohl H-C (2010) *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- prEN DIN EN 16210:2010 – prEN DIN EN 16210, 12/2010: Transportbelastungen - Messen und Auswerten von klimatischen und sonstigen Belastungen - Datenerfassung und allgemeine Anforderungen an Messeinrichtungen.*
- prEN ISO 16258:2011 – Europäische Norm prEN ISO 16258:2011 (D), 28/03/2011: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr).*
- Reim, U. (2011) Kombiniertes Verkehr 2010 – Krise gut überstanden. In: Statistisches Bundesamt (ed.) Wirtschaft und Statistik – August 2011, Wiesbaden, S. 762-774*
- Schmied, M.; Knörr, W. (April/2011) Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik. Begriffe, Methoden, Beispiele. Edited by Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. Öko-Institut e.V.; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Köln.*
- Statistisches Bundesamt (ed.) (2012) Statistisches Jahrbuch 2012 – Deutschland und Internationales, Wiesbaden.*
- Steenken, D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. OR Spectrum, Heft Nr. 26, S. 3-49*
- Thomas, J. (2012) Umweltökonomische Analyse des Güterverkehrs 1995 bis 2010. In: Statistisches Bundesamt (ed.) Wirtschaft und Statistik – Juni 2012, Wiesbaden, S. 503-514.*
- Turek, K., Marquardt H.-G. (2007) Verfahren zur Dimensionierung von automatischen Sortiersystemen (Sorter). AiF-Schlussbericht 14505 BR, 2007.*
- Umweltbundesamt (UBA) (2013) Treibhausgasausstoß in Deutschland 2012 - vorläufige Zahlen aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes. Stand Februar 2013.*
- Van der Zee, D. J., van der Vorst, J. G. A. J. (2005) A Modeling Framework for Supply Chain Simulation. In: Decision Sciences 36, 2005.*
- VCI – Verband der chemischen Industrie e.V. (Ed.) (2010) VCI-Leitfaden zur Ermittlung der CO₂-Emissionen in der Logistik der chemischen Industrie. Frankfurt.*
- VDI 2198:2012 – VDI Richtlinie 2198: Typenblätter für Flurförderzeuge, Beuth Verlag, 2012.*
- VDI3633-1 2010 – VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Beuth Verlag, 2010.*
- VerkehrsRundschau (2011) CO₂-Berechnung. Das Sonderheft zur Ermittlung von Treibhausgas-Emissionen in der Logistik. SPEZIAL (2011). VerkehrsRundschau. Heinrich Vogel Verlag, München.*
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (2013) Binnenschiff und Umwelt. http://www.wsv.de/Schifffahrt/Binnenschiff_und_Umwelt/index.html, besucht am 14.03.2013.*
- WRI, WBCSD – World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development (Eds.) (2005) The Greenhouse Gas Protocol. The GHG Protocol for Project Accounting. USA.*
- WRI, WBCSD – World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development (Eds.) (2011a) Greenhouse gas protocol. Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard: supplement to the GHG protocol corporate accounting and reporting standard. Washington, DC; Geneva, Switzerland.*
- WRI, WBCSD – World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development (Eds.) (2011b) Greenhouse gas protocol. Product life cycle accounting and reporting standard.*

*Washington, DC; Geneva, Switzerland. <http://www.ghgprotocol.org/standards/product-standard>,
besucht am 07.02.2012.*

*Yun, W.Y.; Choi, Y.S. (1999) A simulation model for container-terminal operation analysis using an
object-oriented approach. In: International Journal of Production Economics, 59, 221-230, 1999.*