

FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · S. Kessler ·

M. Mirlach · T. Frenz

Optimierung von Entladestrategien
bei der Schüttgut-Schiffsentladung

Forschungsbericht

der Forschungsstelle

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17444**

Optimierung von Entladestrategien bei der Schüttgut-Schiffsentladung

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2014

ISBN: 978-3-941702-42-4

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49 89 289 15921

Telefax: + 49 89 289 15922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung von Vorgehensweisen bei der Entladung von Schüttgutfrachtern. Dadurch können die angedachten Strategien bereits im Vorfeld analysiert und zum Auffinden der für den individuellen Anwendungsfall am besten geeigneten Methode mit Alternativlösungen verglichen werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden real praktizierte Verfahren dokumentiert und in Zusammenarbeit mit Experten analysiert und strukturiert. Die gewonnenen Ergebnisse ermöglichten das Herausarbeiten von Korrelationen der bei den durchzuführenden Simulationen zu berücksichtigenden Einflussfaktoren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die neuen Simulationsverfahren konsequent in einen Demonstrator zur Nachbildung und Untersuchung von Schüttgut-Schiffsentladeprozessen umgesetzt. Besagter Demonstrator ermöglicht die Simulation mehrerer Planungsszenarien mit unterschiedlichen Ansätzen, sodass auch während der eigentlichen Ausführungsphase auf unerwartete Änderungen schnell reagiert werden kann. Im Rahmen der eigentlichen Simulation wird der Entladevorgang visualisiert und das Verständnis für die ablaufenden Prozesse zusätzlich gefördert. Anhand der aus dem Simulationslauf gewonnenen Leistungsgrößen sind die einzelnen nachgebildeten Entladevarianten bewertbar, wodurch die Planungsumgebung Unterstützung bei der Ermittlung der optimalen Entladestrategie für eine individuelle Entladekonstellation bietet.

Um den Projektpartnern einen möglichst nutzerfreundlichen Umgang mit der Simulationsumgebung im Rahmen der Testreihen zu gewährleisten, wurde ferner darauf geachtet, die Bedienung des Demonstrators möglichst einfach zu gestalten. Entsprechende Schnittstellen bieten die Option zum Export von Simulationsergebnissen und generierten Werten, sodass diese ggf. im Zuge weiterer Arbeiten mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen etc. weiterverwendet werden können.

Abschließend konnte mittels verschiedener Tests die realitätsnahe Arbeitsweise des Demonstrators nachgewiesen werden. Die ersten Simulationsergebnisse deckten sich mit den tatsächlichen Abläufen, so dass von Seiten der Projektpartner Interesse

an einer Weiterentwicklung des entstandenen Simulationsverfahrens besteht, um dieses auch in der operativen Planung einsetzen zu können.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse	8
1.2.1	Forschungsziel	8
1.2.2	Angestrebte Forschungsergebnisse	9
1.2.3	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	11
2	Stand der Technik und Forschung	13
2.1	Vorgehen bei der Schiffsentladung	13
2.2	Simulation von Schüttgutwendungen	14
2.3	Ablaufplanung	15
2.4	Eigene Vorarbeiten	15
3	Anforderungsprofil	17
3.1	Simulationsumfang	17
3.1.1	Entladevorgang	17
3.1.2	Entladeanlage	19
3.1.3	Entlader	20
3.1.4	Zuführgeräte	23
3.1.5	Schienen	23
3.1.6	Schiff	24
3.1.7	Laderaum	24
3.1.8	Ladung	25
3.2	Programmstruktur und Bedienung	25
3.2.1	Modellierung	25
3.2.2	Mehrfachverwendbarkeit	25
3.2.3	Simulationsdurchführung	25
3.2.4	Ablaufsteuerung	26
3.2.5	Fehlerbehandlung	27
3.2.6	Visualisierung	27
3.2.7	Zustandsspeicherung	28
3.2.8	Auswertung	28
4	Entwurf des Simulationsmodells	29
4.1	Allgemein	29

4.1.1	Globales Koordinatensystem	29
4.1.2	Objekt-Modell	29
4.1.3	Komponenten	30
4.2	Schiff	30
4.2.1	Positionierung	31
4.2.2	Tiefgang	31
4.3	Laderäume	32
4.3.1	Ladung	33
4.3.2	Schüttgutmodellierung	35
4.3.3	Numerische Umsetzung	37
4.3.4	Massenzugabe und -entnahme	49
4.4	Ballasttanks	52
4.5	Entladeanlage	53
4.5.1	Abmessungen	53
4.5.2	Tide	54
4.6	Entlader	54
4.6.1	Positionierung des Entladers	55
4.6.2	Bewegung der Entladerspitze bei kontinuierlichen Entladern	56
4.6.3	Ladungsentnahme	57
4.7	Schiene	58
4.8	Zuführgerät	58
5	Programmarchitektur	59
5.1	Grundstruktur	59
5.1.1	Die Klasse CSimulation	60
5.1.2	Die Klasse CSimObjektBase	62
5.1.3	Die Klasse CSimulationskomponente	62
5.1.4	Die Klasse CSimObjekt	63
5.1.5	Komponentenreferenzen	64
5.2	Simulationstechnik	65
5.2.1	Simulationsmodi	66
5.2.2	Quasiparallele Simulation	67
5.2.3	Nichtblockierende Simulation	68
5.2.4	Synchrone Simulation	68
5.3	Visualisierung	69

5.3.1	Objektbaum	69
5.3.2	Subfenster	70
5.3.3	Aktualisierung der Anzeige	70
5.3.4	3D-Anzeige	70
5.4	Zustandsabbilder	71
5.5	Kollisionskontrolle	73
5.6	Skripting	74
5.6.1	Die Klasse CTaskdefinition	74
5.6.2	Die Klasse CTask	75
5.6.3	Implementierte Taskdefinitionen	75
5.7	Datenaufzeichnung	77
5.7.1	Datenquellen	77
5.7.2	Aufzeichnungsvorgang	77
5.7.3	Darstellung im Zeitverlauf	79
5.8	Objektreferenzen	80
5.9	Lösung linearer Gleichungssysteme	81
5.10	XML-Serialisierung	81
6	Ergebnisse	83
6.1	Bestimmung der Modellparameter	83
6.2	Entladestrategie	83
6.2.1	Soja-Entladung der SW Brasil in Brake	83
6.2.2	Steinkohle-Entladung der AP Jadran in Rostock	85
6.3	Simulationsergebnisse und Interpretation	86
6.3.1	Soja-Entladung der SW Brasil in Brake	86
6.3.2	Steinkohle-Entladung der AP Jadran in Rostock	89
7	Fazit und Ausblick	93
7.1	Zusammenfassung	93
7.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	94
7.3	Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	105
	Formelverzeichnis	107
	Nomenklatur	109

Anhang A	Entladermodell	111
Anhang B	Schüttgutzuführung	121
Anhang C	3D-Modell des kontinuierlichen Entladers	123
Anhang D	3D-Modell des Schiffs	127
Anhang E	Kollisionskontrolle	129
Anhang F	Steuerelement Laderaum anzeigen	137
Anhang G	Modellparameter Simulation Brake	139
Anhang H	Modellparameter Simulation Rostock	145

1 Einleitung

Zum Transport schüttfähiger Massengüter über weite Distanzen werden aufgrund ihrer hohen Transportleistung und der vergleichsweise geringen spezifischen Kosten hauptsächlich Schüttgutfrachtschiffe eingesetzt. Die Leistungsfähigkeit einer hierfür erforderlichen Schiffsentladeanlage wird unter anderem von der Art und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Entlader sowie von der Strategie hinsichtlich ihrer Nutzung beeinflusst. Während die Wahl der Anlagenkonfiguration einer einmaligen Entscheidung mit lange anhaltender Auswirkung gleichkommt, kann die Wahl für eine Entladestrategie von Entladung zu Entladung neu getroffen werden. Beide Entscheidungen sind jedoch unweigerlich miteinander verknüpft (vgl. [Gün-09a]).

Das Vorgehen bei der Entladung eines Schüttgutschiffs wird bis heute wenig geplant, sondern beruht hauptsächlich auf Erfahrungswerten der Anlagenbetreiber. Aufgrund der unterschiedlichen Anlagenzusammenstellungen bei den Entladebetrieben und den verschiedenen Maßen der zu entladenden Schiffe ist die Vorgabe einer allgemeingültigen Entladestrategie auch nicht möglich. Um eine für den jeweiligen Fall möglichst effiziente Entladung zu erreichen, müssen die Zeitanteile, in denen nicht mit voller Leistung gefördert werden kann, gering gehalten werden. Dazu gehören unter anderem Zeiten zum Verfahren der Entlader im Laderaum, für eventuelle Lukenwechsel und für Phasen der Restentleerung (vgl. ebd.).

Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik **fml** der TU München entwickelte im Forschungsprojekt "Optimierung von Entladestrategien bei der Schüttgut-Schiffsentladung" einen Demonstrator zum Aufzeigen möglicher Ansätze zur Optimierung der Entladung von Schüttgutschiffen hinsichtlich Effizienz und Wirtschaftlichkeit (vgl. [Gün-09a], [Gün-14]). Der vorliegende Forschungsbericht beschreibt die Konzeption und Implementierung besagter Simulationsumgebung.

1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Zur Entladung von Schüttgutschiffen sehen diesbezügliche Entladeterminale einen oder – in aller Regel – mehrere Entlader entlang ihrer Kais vor. Je nach vorrangiger Anwendung sind die Entlader stationär, fahrbar oder als Arbeitsschiff (Schwimmkran) ausgeführt. Neben den eigentlichen Entladern erfordern entsprechende Löschprozesse weitere Ressourcen wie Bedienpersonal und Zuführgeräte.

Grundsätzlich unterscheiden sich Entlader hinsichtlich ihres Förderprinzips: diskontinuierliche Entladung mittels Greifer und kontinuierliche Entladung per pneumatischer oder mechanischer Entlader [Spa-00]. Diskontinuierliche Schiffsentlader in Greiferbauweise unterteilen sich in Portal- oder Wippdrehkranausführung. Im Zuge eines Entladezyklus wird ihr Greifer durch den Ausleger über die Ladeluke gebracht, fährt hinab und nimmt Schüttgut auf. Anschließend fährt der Greifer wieder aufwärts und begibt sich zur Abgabestelle. Dort öffnet sich der Greifer und übergibt das Schüttgut in aller Regel einem Abgabetrichter, woraufhin es über Bandförderanlagen abtransportiert wird. Grundsätzlich erreichen Portalkrane höhere Durchsätze als Wippdrehkrane [Tak-07], [FAM-11], [TKF-11a].

Pneumatische Schiffsentlader fördern das zu löschende Produkt per Unterdruck mittels eines kontinuierlichen Luftstroms aus dem zu leerenden Laderaum. Am Ausleger wird das Produkt durch einen Abscheider wieder von der Luft getrennt und über eine Schleuse und einen mechanischen Förderer dem Kaiförderer übergeben oder direkt auf Lastwagen oder Güterzüge verladen. Drehkolben- oder Turbogebälse gewährleisten den erforderlichen Unterdruck (vgl. [Büh-04a], [Cop-06], [Neu-07]).

Grundsätzlich basieren kontinuierliche, mechanische Schiffsentlader auf den wesentlichen aus der Fördertechnik bekannten Förderprinzipien, die eine vertikale Schüttgutförderung erlauben. Hierzu zählen insbesondere Becherwerke sowie Schnecken-, Trogketten- und Gurtförderer (vgl. [Büh-04b], [Car-08], [Har-84], [Kon-87], [Kru-86a], [Kru-86b], [Neu-05], [PHB-86], [PHB-87a], [PHB-87b], [PWH-94], [SUM-01], [TKF-11b]).

Wirtschaftlich betrachtet bemisst sich die Effizienz einer Entladeanlage an ihrer erzielten Förderleistung. Diese wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Abbildung 1-1 visualisiert die grundlegenden Einflüsse und hieraus resultierenden Zusammenhänge bei der Schüttgut-Schiffsentladung.

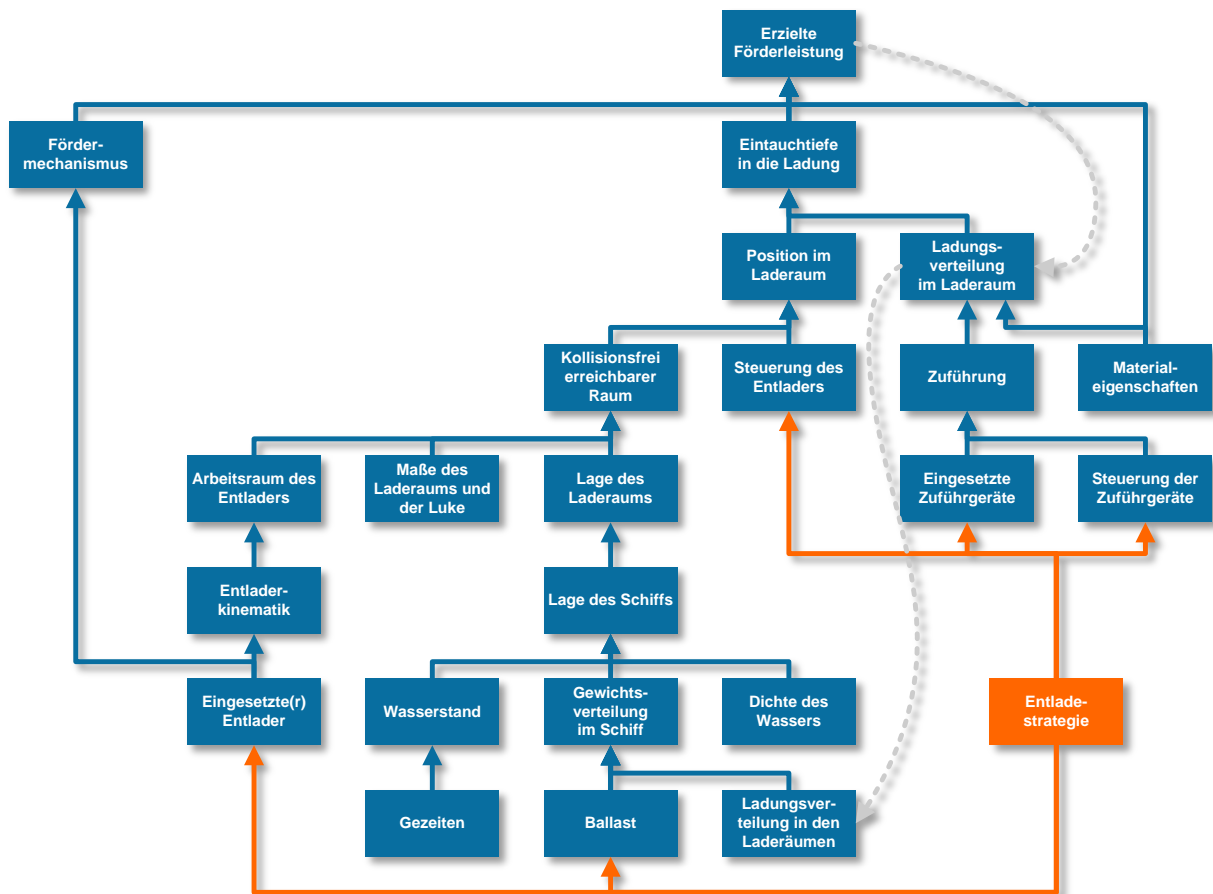


Abbildung 1-1: Schüttgut-Schiffsentladung – technische Zusammenhänge

Unterschiedliche Fördertechnologien bedingen auch ein verschiedenartiges Förderverhalten. Insofern das zu fördernde Gut in ausreichendem Maße nachfließt bzw. dessen entsprechendes Anliegen am Förderkopf garantiert ist, verfügen Ketten- und Schneckenförderer über den erforderlichen Materialdruck an ihrer Einlassöffnung, der den optimalen Betrieb des Förderers gewährleistet. Aufgrund der Tatsache, dass Ketten- oder Schneckenförderer nur fördern, insofern sie auch im Gut eintauchen, ist ihnen eine Restentleerung von Schiffs-Laderäumen nicht möglich. Sobald der kritische Punkt des Mindest-Eintauchens in Material unterschritten wird, muss auf eine alternative Fördervariante ausgewichen werden. Pneumatische Förderer hingegen beanspruchen nicht zwingend ein Anliegen des auszubringenden Schüttgutes, wodurch ihnen ein Entladen bis zum Laderaumboden möglich wird. Sie weisen jedoch einen höheren spezifischen Energieverbrauch als Ketten- oder auch Schneckenförderer auf. Die Möglichkeit vollständiger Laderaumentleerung wird auch vom diskontinuierlich fördernden Greifer unterstützt: In der Endphase des Löschprozesses

ses kratzt er dann am Laderaumboden entlang und nimmt so die noch verbliebenen Ladungsreste auf. Diverse Entladertypen verfügen ggf. auch über zusätzliche mechanische Komponenten, die eine Auflockerung verfestigten Schüttgutes bewirken. Der Einsatz hierfür erforderlicher zusätzlicher Maschinen entfällt dann.

Ferner gilt es hinsichtlich der Eignung eines Entladers für einen bestimmten Entladeprozess auch dessen eigentliche Abmessungen und kinematisches Verhalten zu berücksichtigen. Der tatsächlich mögliche Arbeitsraum wird neben dem theoretischen Bewegungsraum des Entladers – dieser ist durch die Freiheitsgrade und jeweilige Reichweite des Entladers definiert – insbesondere durch die Abmessungen des Schiffs (Lukenöffnung und Laderaumausbildung) und die Stellung des Entladers zum Schiff bestimmt. Zumal die Randbedingungen im Laufe eines Entladeprozesses zwingend einem ständigen Wandel unterworfen sind (Tide, Tiefgang, Ladungsverteilung in den Laderäumen), sind die einzelnen Entlader eines Terminals für die verschiedenen Phasen des Entladeprozesses in unterschiedlichem Maße geeignet. Vorzugsweise sind die verfügbaren Entlader grundsätzlich im optimalen Betriebspunkt zu betreiben, um somit eine weitestgehend zeit- und energieoptimierte Entladung zu gewährleisten. Demzufolge sind die Zeitanteile mit reduzierter Förderleistung auf ihr unabdingbar erforderliches Minimum zu reduzieren. Insbesondere sind hiervon die Zeitintervalle zum Verfahren des Entladers innerhalb des Laderaums sowie zwischen den Laderäumen im Falle von Lukenwechseln sowie die für die eigentliche Restentladung anfallende Zeit betroffen.

Unabhängig von Funktionsweise und Einsatzfall erfordern sämtliche Entladertypen gegen Ende der Löschung eines einzelnen Laderaumes Zuführgeräte, die das noch verbliebene Restgut zum Entladekopf führen – vorausgesetzt, dem Entladertyp ist bedingt durch seine Ausführung und sein Förderprinzip überhaupt eine Restentladung und somit eine Förderung ohne zwingendes Mindesteintauchen in das Schüttgut möglich. Ggf. erfordert das auszubringende Schüttgut aufgrund seiner Eigenschaften (Neigung zum An- und Zusammenbacken, schlecht fließend etc.) bereits zu Beginn des Entladeprozesses eine entsprechende externe Materialzuführung mittels Zuführgeräten wie Rad- oder Kompaktlader bzw. Planierraupen und Bagger (vgl. hierzu auch Abbildung 1-2).



Abbildung 1-2: Planierraupen unterstützen während der Hauptentladung

Diese, den Entlader in Zuge seines Löschens unterstützenden Maschinen, werden in aller Regel über Krane – entweder Teil des Entladers oder eigenständige unabhängige Krane) - oder eine am Entlader befindliche Seilwinde in den jeweiligen Laderaum eingebracht. Vom Bedienpersonal gesteuert, führen sie dann dem Entlader das auszubringende Schüttgut zu. Im Anschluss an die maschinelle Entladung wird der Laderaum oft noch durch Arbeiter besenrein gesäubert (vgl. hierzu auch Abbildung 1-3). Der effiziente und zielorientierte Einsatz aller verfügbaren Ressourcen wie Mitarbeiter, Entlader und Zuführgeräte, erfordert somit eine exakte und vorausschauende Planung des Entladevorgangs in all seinen Einzelheiten.

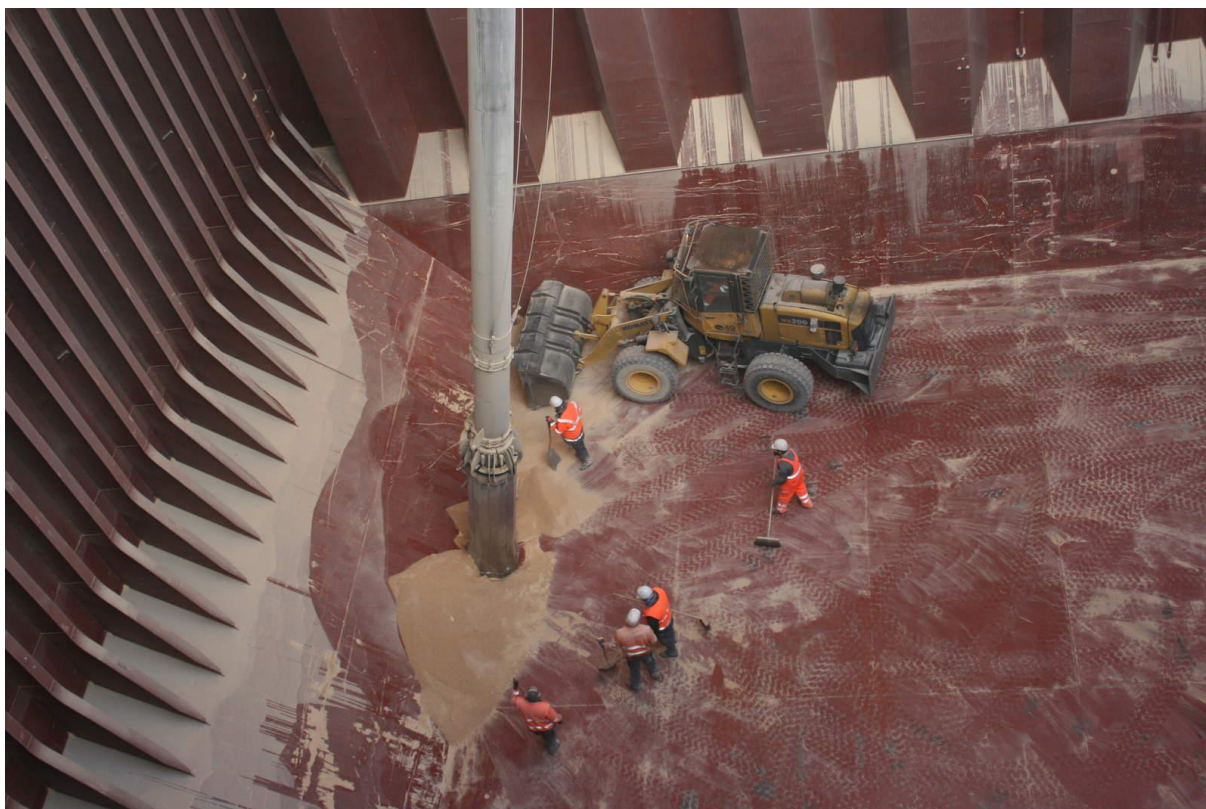


Abbildung 1-3: Besenrein-Säubern eines Laderaums

Grundsätzlich beeinflusst das Verhalten des jeweiligen zu löschenden Schüttgutes die Planung und den Ablauf des Entladevorgangs auf zwei Weisen. Zum einen verteilt sich die Ladung innerhalb des Laderaumes entsprechend ihres jeweiligen Fließverhaltens unterschiedlich. Wird an einer Stelle Schüttgut entnommen, rutscht die verbliebene Ladung in diesem Bereich von anderen Stellen nach, so dass sich im vereinfachten homogenen Idealfall Schüttkegel gemäß des jeweiligen charakteristischen Böschungswinkels des Materials ausbilden. Je nach Material stellt sich demnach eine individuelle Ladungsverteilung im Laderaum ein. Für die Planung des Prozesses gilt es zu berücksichtigen, welche Bereiche der Ladung vom jeweiligen Entlader aufgrund seiner Kinematik unter Berücksichtigung der Schiffsgeometrie und –lage angefahren werden können. Zum anderen wirkt sich das Materialverhalten insbesondere im Hinblick auf das Zusammenspiel Fördergut – Entlader aus. Die verschiedenen Fördertechnologien und Entlader-Ausführungen sind nicht für alle Materialarten im gleichen Maße geeignet. Vielmehr erzielen die einzelnen Entlader je nach auszubringendem Ladegut unterschiedliche Förderleistungen und weisen voneinander abweichende spezifische Energiebedarfe auf. Insbesondere wirken sich

hierauf die Faktoren Schüttdichte, Korngröße und Agglomeration des Schüttgutes aus.

Abgesehen von der optimalen Ausnutzung der Entladeanlage sowie der zur Verfügung stehenden Ressourcen gilt es diverse weitere Randbedingungen zu beachten. Insbesondere berücksichtigt das jeweils gewählte Vorgehen zur Löschung eines Schüttgut-Schiffes neben den bereits genannten Faktoren wie Schiffsgröße und Ladeguteigenschaften insbesondere auch etwaige Umweltbedingungen wie beispielsweise Tidengang oder Witterung sowie die aktuellen relevanten gesetzlichen Vorschriften. Zudem beeinflussen auch Art und Weise des Weitertransports des entladenen Schüttgutes bzw. dessen Lagerung oder Pufferung vor Ort auf dem Entladeterminal bzw. in angrenzenden Hafenanlagen sowie die Weiterverarbeitung der Ladung maßgeblich die Entscheidungsfindung hinsichtlich des jeweiligen Schrittes im Zuge des Entladevorganges.

Ausschlaggebend für die Wahl der Lukenreihenfolge im Zuge der Entladung und der aus dem jeweiligen Laderaum zu entnehmenden Masse ist die jeweilige Schiffsstatik bzw. hierdurch bedingt die Einhaltung der zulässigen Ladungsverteilung zu jedem Zeitpunkt der Entladung. Eine ungleichmäßige Ladungsverteilung würde ggf. zu hohe Spannungen und Biegemomente verursachen, woraus eine Schädigung der Schiffsstruktur resultieren könnte (vgl. hierzu auch [Eic-09]).

Abbildung 1-1 zeigt eindeutig die Komplexität von Schüttgut-Schiffsentladevorgängen bedingt durch die hierbei zu berücksichtigenden zahlreichen Einflussgrößen und ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen. Mit zunehmender Luken- und Entladerzahl sowie Variationsvielfalt hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ressourcen gestaltet sich die Wahl bzw. vielmehr Erarbeitung der jeweils anzuwendenden Entladestrategie als zunehmend komplizierter und vielschichtiger. Zudem machen unvorhersehbare Ereignisse wie ein möglicher Maschinenausfall oder sich entgegen der eigentlichen Erwartung verhaltendes Schüttgut (z. B. verstärkter Anbackungseffekt innerhalb der Schüttgutes sowie im direkten Zusammenspiel mit seiner unmittelbar korrespondierenden Umgebung) die einstmals festgelegte Vorgehensweise hinfällig und erfordern ein schnelles und situationsbezogenes Umplanen.

Somit ist für die Planung effizienter Entladevorgänge von Schüttgut-Frachtern die Kenntnis aller relevanten Zustandsgrößen sowie ihrer zeitbezogenen Variationen

vonnöten. Hierauf basierend sind sowohl die Bestimmung als auch die Koordination nachfolgender Gesichtspunkte einer Entladestrategie beherrschbar und planbar:

- Einsatzplanung von Personal, Zuführgeräten und Entladern
- Bestimmung der zu erwartenden Entladeleistung und Abschätzung der benötigten Zeitdauer für die einzelnen Arbeitsschritte unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands
- Strukturschonendes Entladen des Schüttgut-Schiffes

Eine aufwandsarme Planung mit der raschen Bereitstellung grundsätzlicher Kernaussagen ermöglicht dem Entladepersonal ein sofortiges Reagieren auf mögliche Ablaufänderungen infolge eingetretener unvorhersehbarer Einflüsse bei minimalem Mehraufwand an Zeit und Kosten. Die sofortige Anpassung des angedachten Vorgehens auf die veränderten Randbedingungen ist dann möglich.

1.2 Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse

1.2.1 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens, welches bei der Ermittlung der optimalen Entladestrategie für ein Gesamtschiff Unterstützung bietet. Betreibern und Planern soll auf diese Weise ermöglicht werden, ein angedachtes Vorgehen zu analysieren und unter Berücksichtigung aller relevanten Randbedingungen und Wechselwirkungen hinsichtlich Zeit- und Energieeinsparung zu verbessern. Hierbei ist von Interesse, wie mit den verfügbaren Ressourcen (Personal, Entlader, Zuführgeräte) eine einzelne Luke möglichst effizient entladen werden kann. Zumal verschiedene Entladertypen für die einzelnen Phasen der Entladung eines Laderaums eine unterschiedliche Eignung aufweisen (vgl. [Til-08]), so besteht bei Betrachtung des Entladevorgang eines gesamten Schiffes die Herausforderung darin, die verfügbaren Ressourcen optimal auf die einzelnen Laderäume zu verteilen.

Um unterschiedliche Strategien miteinander vergleichen zu können, müssen deren Leistungswerte ermittelt werden. Dies erfolgt über die entwickelte Simulationsmethode. Zudem soll diese hinsichtlich besseren Prozessverständnisses sowie bei der Suche nach Optimierungspotentialen unterstützen. Ferner soll die Simulationsumgebung eine Überprüfung angedachter Strategien bezüglich ihrer Umsetzbarkeit ermöglichen, um somit das Auftreten etwaiger Kollisionen etc. bereits im Vorfeld aus-

schließen zu können. Anhand des Durchspielens von Varianten ist die angedachte Strategie schrittweise zu optimieren, sodass ein effizienterer Einsatz aller Betriebsmittel im Rahmen von Schüttgut-Schiffsentladungen die Schiffs Liegezeiten verkürzt und Kosten reduziert.

1.2.2 Angestrebte Forschungsergebnisse

Die Simulationsumgebung in Form eines reinen Demonstrators, der mögliche Lösungsansätze und gangbare Wege hinsichtlich zukunftsweisender Verfahren zur Modellierung und Analyse von Schüttgut-Schiffsentladeprozessen aufzeigt, ermittelt bei Vorgabe aller relevanten Randbedingungen unter Berücksichtigung etwaiger Wechselwirkungen die Leistungsdaten eines geplanten Entladeverfahrens. Auf Basis der Formulierung einer Entladeaufgabe (Schiffsgröße, Ladung, etc.) samt Erfassung der zur Verfügung stehenden Ressourcen (Entlader, Zuführgeräte, etc.) und Randbedingungen (Tidengang, geometrische Anordnung, etc.), sind voneinander differierende Strategie-Varianten analysierbar sowie miteinander vergleichbar und somit bewertbar hinsichtlich ihrer individuellen Eignung für die jeweilige Lösaufgabe. Um bei Änderungen rasch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muss die im Demonstrator modellierte Entladestrategie nutzerfreundlich mit nur wenigen Mausklicks hinsichtlich ihrer veränderten Randbedingungen angepasst werden können, so dass die Auswirkungen von Änderungen schnell evaluierbar sind – vgl. hierzu auch die Übersichtsdarstellung der wesentlichen Grundinformationen hinsichtlich eines Entladevorgangs in Abbildung 1-4. Der Entladevorgang ist ausreichend detailliert auf der Benutzeroberfläche zu visualisieren, um beim Bediener das Verständnis für die ablaufenden Prozesse zu fördern. Neben der berechneten Löschdauer umfassen die vom Demonstrator ausgegebenen Ergebnisse auch den systemseitig ermittelten Energiebedarf und die Auslastungsgrade aller Ressourcen.

1 Einleitung

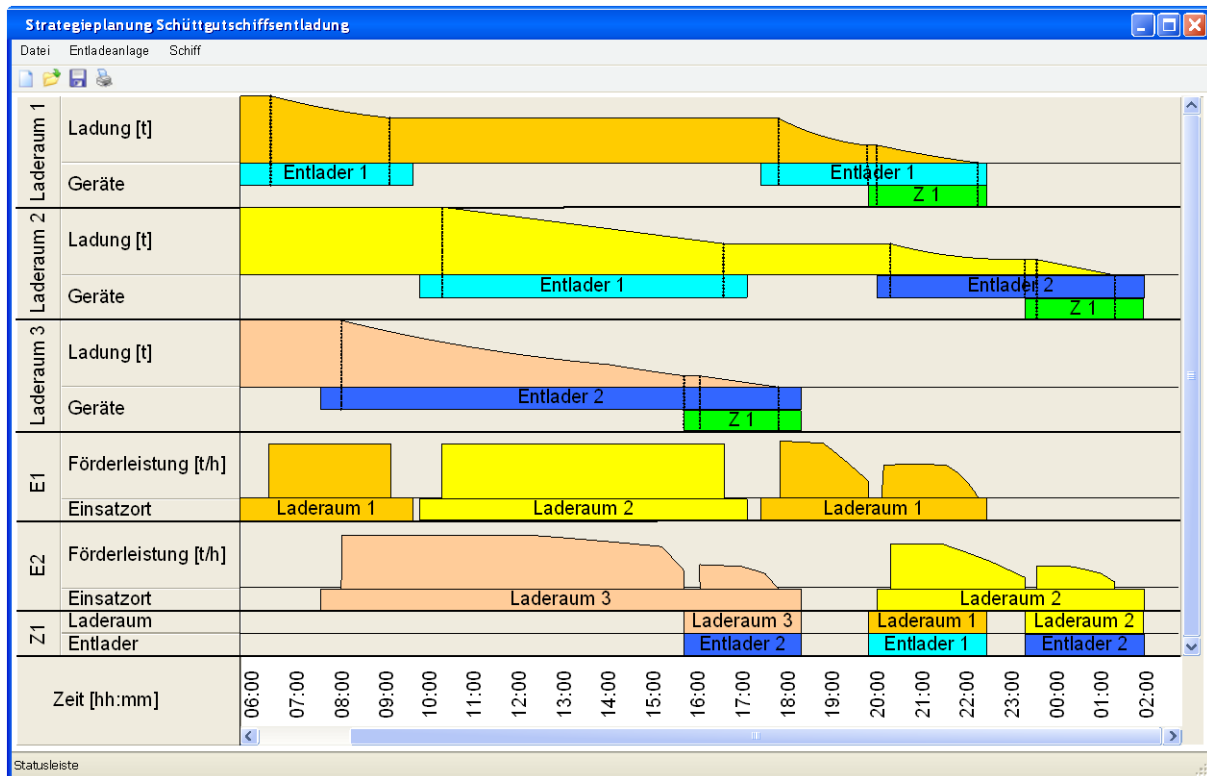


Abbildung 1-4: Wesentliche Übersichtsdarstellung eines Entladeprozesses

Zur Gewährleistung der wirklichkeitstreuen Abbildung von Entladeprozessen im Hinblick auf das Verhalten der hierbei zu löschenden Güter unter Berücksichtigung von Nutzerfreundlichkeit und aufwandsarmer Eingabe des Users, muss das Fließverhalten des jeweiligen Schüttgutes im Laderaum hinreichend realitätsnah bei weitestgehend reduzierter Komplexität abbildbar sein. Die Analyse der Ladungserreichbarkeit für eine bestimmte Entladerkinematik bei vorgegebener Schiffsgeometrie ist wesentliche Grundvoraussetzung hinsichtlich der praktischen Anwendung der Methode. Aufgabenorientierte und effiziente Algorithmen leiten den aus der Entladerkinematik resultierenden max. möglichen Arbeitsraum ab und bestimmen anhand von Kollisionsanalysen die erreichbaren Positionen im Zuge der Ladegutentnahme. Die Recherche bzw. Entwicklung samt Verifizierung entsprechender Modelle, ermöglicht eine Bestimmung des resultierenden Massenstroms und der Leistungsaufnahme der unterschiedlichen Schüttgutfördertechnologien als Funktion der vorherrschenden Einsatzbedingungen. Die Arbeitsweisen der Entlader und Zuführgeräte, die in der Realität durch das Bedienpersonal erfolgen, sind im Demonstrator unter Berücksichtigung variierender Anwendungsmöglichkeit innerhalb eines Laderaumes entsprechend zu modellieren.

Der Forschungsbericht wird auf der Internetseite des Lehrstuhls fml (www.fml.mw.tum.de) diskriminierungsfrei zum freien Download zur Verfügung gestellt. Die unternehmensübergreifende und branchenweite Nutzung der Forschungsergebnisse ist somit gewährleistet und eine Begünstigung einzelner Unternehmen ausgeschlossen. Im Falle von Interesse ist die implementierte Planungsumgebung in der vorliegenden Form frei nutzbar; Vorstellung und nähere Erläuterung des Demonstrators sind an der Forschungsstelle auf Anfrage möglich. Nach Projektabschluss liegen zudem neuartige Beschreibungsformen zur Berechnung des Fließverhaltens von Schüttgütern in Laderäumen sowie konzeptuelle Modelle zur Abbildung ihrer Entladung vor. Gewonnene Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Kosteneinsparungen beim Umschlag spiegeln sich ggf. in entsprechenden Preissenkungen wieder.

1.2.3 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Bislang greifen Betreiber von Schüttgut-Terminals in aller Regel auf eine Reihe gesammelter Erfahrungen zurück, um eine Entladestrategie für einen bevorstehenden Löschprozess zu planen. Anhand iterativer Verbesserungen bilden sich hierbei im Laufe der Zeit für häufig wiederkehrende gleichartige Entladeaufgaben bestimmte Standardvorgehensweisen heraus, die augenscheinlich ein Optimum darstellen. Zahlreiche Randbedingungen und Wechselwirkungen gestalten den Prozess des Auffindens der optimalen Strategie jedoch komplex und vielschichtig, sodass der Planer in aller Regel gar nicht in der Lage ist, alle Einfluss nehmenden Randbedingungen ganzheitlich und im erforderlichen Maße zu berücksichtigen bzw. im Zuge seiner Entscheidungsfindung einfließen zu lassen. Insbesondere bedingen eine plötzliche Änderung der Entladeaufgabe (andere Schiffsgröße, andere Ladungsart), gewandelte Randbedingungen (Ausfall eines Entladers, Anschaffung neuen Equipments) oder das unerwartete Eintreten unvorhersehbarer Ereignisse (Verbackungen des Schüttguts, plötzlicher technischer Ausfall von Entladern oder Zuführgeräten) ein rasches Umplanen entsprechend der veränderten Rahmenkonstellation.

Die wissenschaftliche Untersuchung des Entladeprozesses eines ganzen Schiffes unter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen ermöglicht zum einen die Optimierung der angewandten Entladeprozedere und unterstützt zum anderen bei der Auslegung und Dimensionierung neuer Entladeanlagen. Die Herausforderung bei der Entwicklung des Verfahrens spiegelt sich insbesondere im Auffinden einer optimalen Gesamtstrategie für das Löschen des Gesamtschiffes unter Berücksichtigung der op-

timalen Entladung der einzelnen Luken wider. Hierbei ist auf einen möglichst effizienten Einsatz von Fördergeräten und Personal zu achten. Unnötige Leerlauf- und Wartezeiten sind auf diese Weise vermeidbar und die Liegezeit sowie Kosten für den Energieverbrauch können folglich reduziert werden.

Bereits existierende Entladeterminals sind mit dem zu entwickelnden Verfahren rasch und unkompliziert modellierbar und können somit gezielt untersucht werden. Mögliche Schwachstellen sind eindeutig identifizierbar, klare Lösungsansätze helfen die Defizite schnell zu beheben. Anhand des zu entwickelnden Simulationsverfahrens können Umschlagsbetriebe einzelne Strategien DV-gestützt hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit testen und vergleichen. Es ist somit erstmals möglich, Aussagen über die Effizienz einer Strategie zu treffen, ohne diese in der Realität bei einer Entladung durchzuführen. Zudem bietet das Simulationsverfahren externen Unternehmen wie Beratungsfirmen oder Ingenieurbüros die Option, Analysen samt Optimierung von Entladestrategien sowie der technischen Ausrüstung eines Umschlagbetriebs mit Hilfe der zu entwickelnden Methode als Dienstleistung anzubieten. Insbesondere ist das zu entwickelnde Berechnungsmodell zur Simulation des Fließverhaltens von Schüttgut im Laderaum eines Schüttgut-Schiffes auf dem Gebiet der Simulation von Schüttgütern als wertvoller Beitrag für zukünftige Untersuchungen anzusehen.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Vorgehen bei der Schiffsentladung

Entgegen einer vorausschauenden und ganzheitlichen Planung von Schüttgutschiffs-Entladeprozessen, werden diese bislang nur grundlegend und ohne Vergleich denkbarer Alternativen vorbereitet. Im Wesentlichen beruhen die schlussendlich angewandten Strategien auf den Erfahrungswerten der Anlagenbetreiber. Bedingt durch die individuelle Ausgestaltung eines Entladeterminals – kein Schüttgut-Hafen ist wie der andere – und die unterschiedlichen Schiffe samt Ladung ist die Ausformulierung einer grundsätzlichen und generell anwendbaren Kernstrategie nicht möglich.

Wie bereits ausgeführt, nehmen sowohl die gewählte Reihenfolge der im Zuge der Löschung zu leerenden Laderäume als auch die Verteilung des Schüttgutes innerhalb eines Laderaumes wesentlichen Einfluss auf die Stabilität und Sicherheit des Schiffes. Aus diesem Grunde besitzt der Schiffsführer entscheidendes Mitspracherecht hinsichtlich des durchzuführenden Vorgehens. Ohne seine ausdrückliche Genehmigung ist die angedachte Strategie nicht anwendbar. Zur Vermeidung etwaiger Schädigungen des Schiffes ist dieses grundsätzlich derart zu löschen, dass die jeweils verbleibende Restladung weitestgehend gleichmäßig verteilt ist. In aller Regel erfährt die Schiffs-mittig gelegene Luke den Löschbeginn; daraufhin folgen die bug- sowie heckseitig angeordneten Luken und zuletzt die dazwischen gelegenen Laderäume. Zur Gewährleistung einer möglichst homogenen Spannungsverteilung wird ein Laderaum auch nicht durchgängig in einem Schritt geleert. Ballastierungsvorgänge und mehrfacher Lukenwechsel sind die Regel.

Während ein Umschlagsbetrieb nicht das alleinige Entscheidungsrecht an Wahl und Durchführung des individuellen Luken-übergreifenden Entladevorgehens innehat, obliegen Entscheidungsgewalt und Verantwortung hinsichtlich des Vorgehens innerhalb eines Laderaums ausschließlich der entladenden Firma.

Eine DV-gestützte Planungsumgebung oder vergleichbare Methodik im Sinne besagten Demonstrators zur Bestimmung optimaler Entlade-Strategien existiert aktuell nicht.

2.2 Simulation von Schüttgutwendungen

Die Simulation von Schüttgutwendungen basiert auf unterschiedlichen Ansätzen. Hierzu zählen insbesondere die Simulationen nach der Diskreten Elemente Methode, kontinuumsmechanische Ansätze sowie Ablaufsimulationen.

Die Diskrete Elemente Methode (DEM) erlaubt die numerische Simulation von Schüttgutprozessen auf Partikelebene. Jedes Partikel erfährt eine Kräftebilanz, die resultierenden Bewegungsgleichungen aller Partikel werden für einen kurzen Zeitschritt gelöst. Bei Wiederholung der Berechnungen im Rahmen weiterer Zeitschritte ergibt sich somit der zeitliche Verlauf des Schüttgutprozesses. Die DEM-Simulation setzt die Definition verschiedener Simulationsparameter voraus. Hierauf basierend erfolgt die Charakterisierung des zu simulierenden Schüttgutes. Die festgelegten Eigenschaften sind mit Hilfe von Laborversuchen zu kalibrieren [Grö-05], [Grö-06]. Hinsichtlich der Diskreten Elemente Methode sind mögliche Verbackungen von Schüttgut über ein spezielles Kontaktkraftmodell zu beschreiben [Bre-06]. Das Problem der DEM liegt in der hohen Anzahl der zu berücksichtigenden Teilchen. In aller Regel wirkt die mögliche Rechenleistung aktueller Rechner begrenzend. Die rasante Entwicklung neuer Prozessoren für handelsübliche PCs erlaubt jedoch zunehmend umfangreichere Simulationen bei kürzerer Rechenzeit. Allerdings ist die Simulation des ganzheitlichen Entladeprozesses eines Laderaumes infolge der resultierenden hohen Teilchenzahl bislang nicht durchführbar. Somit beschränkt sich das Einsatzgebiet der Diskreten Elemente Methode vorwiegend auf die Analyse des Verhaltens kontinuierlicher Förderer [Grö-99], [Kat-05a], [Blo-08] oder auf die Untersuchung entsprechender Übergabestellen [Kat-05b].

Der kontinuumsmechanische Ansatz dient zur Betrachtung von Gutströmen als Ganzes. Die wesentliche zu gewinnende Kernaussage formuliert sich in der Identifikation und Vermeidung von Zonen geringer Fördergeschwindigkeit. Somit eignet sich das Verfahren insbesondere zur Betrachtung von Gutübergabestellen [Vor-08].

Simulationswerkzeuge aus dem Bereich der Ablaufsteuerung werden in der Praxis erfolgreich eingesetzt. Bei entsprechender Diskretisierung einzelner Schüttgutmengen wären derartige Verfahren bedingt auch auf Schüttgutprozesse anwendbar. Im Rahmen vorliegender Problemstellung liegt der Fokus aber vielmehr auf der Verteilung des Materials innerhalb eines Laderaumes anstatt auf dem Transport zwischen

einzelnen Lagerstellen. Demzufolge eignet sich besagter Simulationstyp nicht zur Modellierung der im Demonstrator abzubildenden Prozesse.

Weiss et al stellen eine Simulationsumgebung zur ganzheitlichen Abbildung von Schüttgut-Verlade-Terminals vor [Wei-99]. Das Augenmerk liegt hierbei auf der Funktion der modellierten Infrastruktur als Speicher und Umschlagsplatz unterschiedlicher Schüttgüter. Variierende Strategien zur Terminal-internen Lagerung samt Transport zwischen den einzelnen Lagerplätzen sind mit diesem Planungswerkzeug abbildbar. Die eigentliche Schiffsentladung findet hierbei jedoch keine nähere Betrachtung.

2.3 Ablaufplanung

Hinsichtlich der Thematik Ablaufplanung existieren div. Methoden. Je nach Verfahren sind diese universell oder bereichsspezifisch anwendbar. Die Netzplantechnik [DIN 69900] oder das Gantt-Diagramm [Mor-94] stellen die wesentlichen Vertreter allgemein nutzbarer Methoden dar. Div. freie sowie kommerzielle Softwarelösungen ermöglichen eine Ablaufplanung auf Basis dieser Techniken samt automatisierter Berücksichtigung von Ressourcenverfügbarkeit und Generierung von Zeitplänen. Derartige Anwendungen sind insbesondere in den Bereichen Projektmanagement und Produktionsplanung sowie in der Baubranche anzutreffen. Die Technik des Advanced Planning and Scheduling – kurz APS – nutzt mathematische Modelle und geeignete Algorithmen, um optimierte Werte für die festzulegenden Freiheitsgrade unter Berücksichtigung komplexer Wechselwirkungen zu generieren [GüB-03]. Die Anwendung derartiger Methoden setzt geeignete Modelle der zu untersuchenden Prozesse voraus.

2.4 Eigene Vorarbeiten

Am Lehrstuhl des Antragstellers wurden bereits div. Projekte und Studien zu den Themen Schifffahrt, Schiffsentladung, Schüttgutförderung und Simulation von Schüttgut-Förderprozessen durchgeführt.

Ein Projekt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie befasste sich mit dem kombinierten Ladungsverkehr auf der Donau und dem Rhein-Main-Donau-Kanal. Auch die Ausstattung der Binnenhäfen und erforderliche zukünftige Veränderungen fanden hierbei Betrachtung.

Ebenso wurde die maximale Beladung von Binnenschiffen auf diesen Wasserstraßen untersucht [Gün-98a], [Gün-98b], [Gün-98c], [Gün-99c], [Seg-99], [Gün-01].

In Zusammenarbeit mit einem international agierenden Hersteller von Schiffsentladeanlagen wurde im Rahmen div. Industrieforschungsprojekte am Lehrstuhl des Antragsstellers ein Großversuchsstand für Schnecken-Schiffsentlader errichtet. Auf diesem wurden zahlreiche Untersuchungen zur Auslegung und zum Betrieb von Hochleistungs-Schneckenförderern, wie sie bei der Schiffsentladung eingesetzt werden, durchgeführt [Gün-99a], [Gün-99b], [Gün-06b].

Ferner wurden im Rahmen div. weiterer Industrieprojekte Untersuchungen zur Optimierung der Restentleerung bei der Schüttgutschiffsentladung vorgenommen. Bereichsweise fanden hierbei bereits Strategien zur Entladung innerhalb eines einzelnen Laderaumes ansatzweise Betrachtung. Im Rahmen des Projekts wurden erste Versuche zur Simulation variierender Fahrstrategien innerhalb eines Laderaums durchgeführt. Eine weitere Studie betraf die Untersuchung und Bewertung der Fördertechnik in Umschlagsbetrieben. Hieraus resultierten u. a. fundierte Aussagen hinsichtlich der Arbeitsweisen und Abläufe in derartigen Unternehmen [Gün-06a].

Energiebedarfsmessungen an Schüttgutförderanlagen bei 16 Umschlagsbetrieben für Agrargüter [Gün-08] sowie bei Umschlagterminals für Kohle [Gün-10] bildeten die Grundlage div. weiterer Studien aus dem Bereich der Schüttgut-Technik.

3 Anforderungsprofil

Die Simulationsumgebung muss die Abbildung aller, für den Entladevorgang unter regulären Bedingungen relevanten Einflussgrößen, hinreichend detailliert ermöglichen.

Um auch neuartige bzw. verbesserte Entladeverfahren in die Simulation einbeziehen zu können, muss die Programmstruktur Möglichkeiten zu deren Erweiterung aufweisen. Zur Auswertung der Simulationsläufe ist außerdem ein Mechanismus zur Datenerfassung und -darstellung erforderlich.

3.1 Simulationsumfang

Nachfolgende Abschnitte beschreiben alle relevanten auf den Entladevorgang Einfluss nehmenden Faktoren. Zur deren Ermittlung und Strukturierung wurden diverse Entladevorgänge an verschiedenen Schüttgutterminals analysiert und zahlreiche Expertengespräche durchgeführt.

3.1.1 Entladevorgang

Schüttgutfrachter werden an speziell ausgerüsteten Entladeanlagen, die oft auf einen bestimmten Typ von Schüttgütern (z.B. Agrarerzeugnisse, Erz, Kohle) spezialisiert sind, entladen. Teilweise handelt es sich um Warenumsschlagplätze, in denen die gelöschte Ladung zum Weitertransport auf andere Transportmittel (Schiff, LKW, Bahn) verladen wird, oder um Einrichtungen, an denen die Ladung direkt verbraucht oder weiterverarbeitet wird (z.B. Kohlekraftwerke oder Getreidemühlen).

Das zu entladende Schiff (vgl. hierzu auch Kapitel 3.1.6) macht zunächst an einer Anlegestelle fest. Ggf. verfügt ein Entladeterminal auch über mehrere in Reihe oder nebeneinander gelegenen Anlegestellen, so dass mehrere Schiffe gleichzeitig entladen werden können. Ein Schiff verfügt über eine bestimmte Anzahl von Laderäumen, in denen sich die Ladung befindet. Die Laderäume sind durch Öffnungen im Deck (Ladeluken) zugänglich. Die Ladeluken sind in der Regel durch Lukendeckel verschlossen und müssen vor Beginn der Entladung geöffnet werden. In verschiedenen Laderäumen kann sich verschiedenartige Ladung befinden. In Einzelfällen können außerdem in einem Laderaum Schichten unterschiedlicher Ladung enthalten sein; diese Schichten sind dann durch Folien voneinander getrennt. Ein Schiff ist nicht grundsätzlich vollständig zu entladen: Vielmehr besteht auch die Möglichkeit, dass

nur die Ladung in bestimmten Laderäumen oder hiervon lediglich eine definierte Teilmenge zu löschen ist.

Die Entladeanlage verfügt über eine bestimmte Anzahl von Entladern (Kapitel 3.1.3). Die Entlader werden entsprechend der gewählten Entladestrategie über den zu entladenden Schiffsluken positioniert. Die Entladestrategie wird durch den entladenden Betrieb in Abstimmung mit dem Kapitän des Schiffs festgelegt, denn infolge ungleichmäßiger Ladungsverteilung können auf das Schiff Belastungen wirken, aus denen eine strukturelle Schädigung des Schiffskörpers resultiert.

Die Entlader tauchen, vom Bedienpersonal gesteuert, in den Laderaum ein und entnehmen Ladung. Je nach Entladestrategie können auch mehrere Entlader gleichzeitig im selben Laderaum agieren. Entsprechend der gewählten Entladestrategie führen die Entlader Lukenwechsel durch. Diese können unter anderem motiviert sein durch die

- abgeschlossene Entladung eines Laderaums,
- bessere Eignung eines anderen Entladers für die anstehende Entladephase,
- Nichtverfügbarkeit zusätzlicher Ressourcen, die für anstehende Entladephase erforderlich sind (Personal, Zuführgeräte),
- Nichterreichbarkeit der noch verbliebenen zu löschenden Restladung,
- Begrenzung der strukturellen Belastung des Schiffs sowie die
- Relevanz zur Umpositionierung eines aktuell blockierten weiteren Entladers.

Insofern die max. mögliche Reichweite der verfügbaren Entlader nicht ausreicht, um alle Luken zu erreichen, ist das Schiff ggf. neu zu positionieren.

Wird Ladung entnommen, rutscht das verbleibende Material nach und bildet entsprechend der Materialeigenschaften Schüttkegel aus. Durch das Auftreten von Verfestigungen und Anhaftungen kann das Nachfließen der Ladung behindert werden. Der Entladevorgang kann ferner durch etwaige, in der Ladung enthaltene Fremdkörper gestört werden. Insofern diese in den Fördermechanismus gelangen, ist eine Beschädigung und somit der Ausfall des Entladers möglich.

Die durch einen Entlader aus einem Laderaum förderbare Ladungsmenge wird begrenzt durch

- die Abmessungen und kinematischen Freiheitsgrade des Entladers,
- die relative Position des Schiffs (Tiefgang, Wasserpegel) zum Entlader,
- mögliche Kollisionen des Entladers mit dem Lukenrand bzw. den Laderaumwänden oder mit anderen Objekten sowie
- die Charakteristik des Entlader-spezifischen Fördermechanismus.

In der Phase der Restentleerung wird der Entladevorgang oftmals durch den zusätzlichen Einsatz von Zuführgeräten wie beispielsweise Radladern oder Bulldozern unterstützt. Diese werden in den Laderaum eingehoben und zentrieren die verbleibende Ladung derart, dass sie für den Entlader besser erreichbar ist und von ihm aufgenommen werden kann. Die erzielbare Förderleistung hängt dann nicht mehr allein vom verwendeten Entlader ab, sondern auch von der Leistung der Zuführgeräte. Der zuletzt verbleibende Ladungsrest wird in der Regel durch das Bedienpersonal manuell zusammengeführt.

Die entnommene Ladung wird durch ein System von Fördereinrichtungen meist über Wägeeinrichtungen geführt und beispielsweise zu einem Lagerplatz abtransportiert.

In den meisten Fällen sind je nach Liegedauer und Größe des Schiffes Gebühren an den Hafenbetreiber zu entrichten, wodurch die Entladedauer wesentlichen Einfluss auf die anfallenden Löschkosten nimmt.

3.1.2 Entladeanlage

Das Modell der Entladeanlage soll eine beliebige Anzahl von Entladern und deren Anordnung beschreiben können. Häufig sind Schiffsentlader auf Schienen angeordnet und können entlang diesen positioniert werden. Hinsichtlich der Konfiguration der Gleisanlagen muss der Demonstrator über eine hinreichende Flexibilität verfügen. Ferner finden Entlader auch in Form von Schwimmkränen Verwendung. Bedingt durch deren Positionsabhängigkeit vom Wasserstand, muss das Modell der Entladeanlage auch eine Tidsimulation vorsehen.

Anzahl und Art der an einer Entladeanlage verfügbaren Zuführgeräte samt ihrer charakteristischen Eigenschaften nehmen Einfluss auf den Entladeprozess und sind demzufolge innerhalb dem Simulationsmodell entsprechend zu berücksichtigen. Abbildung 3-1 zeigt übersichtlich das Modell der Entladeanlage unter Berücksichtigung zuvor genannter Faktoren.

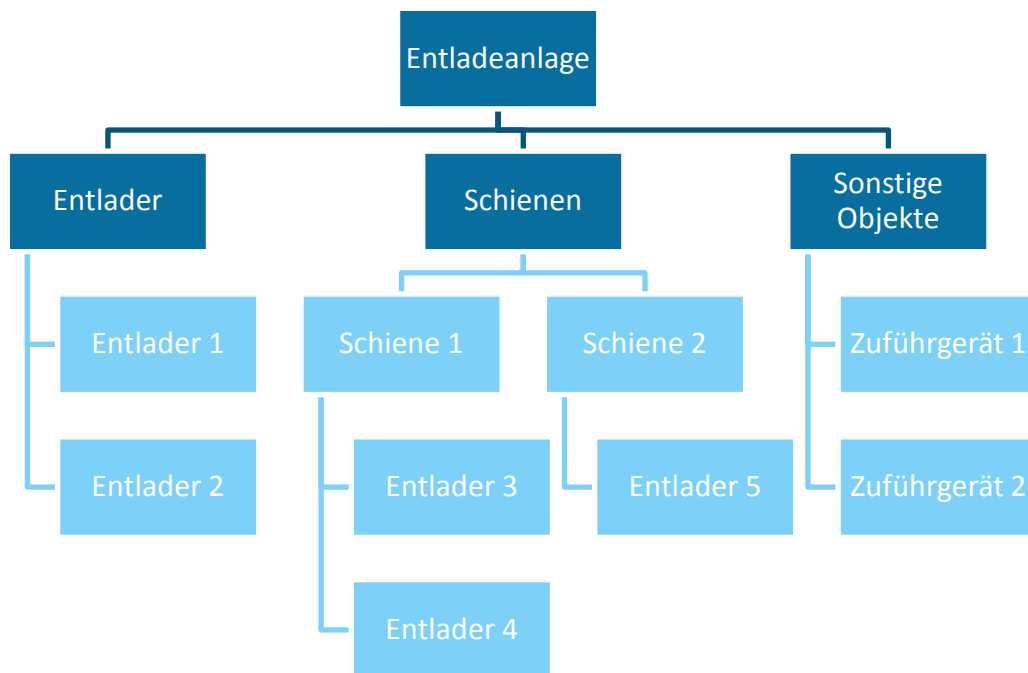


Abbildung 3-1: Struktur des Modells der Entladeanlage

3.1.3 Entlader

Die Entladung von Schüttgutfrachtern erfolgt anhand unterschiedlicher Entladertypen, die sich primär durch den verwendeten Fördermechanismus samt Kinematik sowie ihre Positionierungsfähigkeit relativ zum Schiff unterscheiden. Entsprechend [Gün-09b] kann hierbei wie folgt differenziert werden:

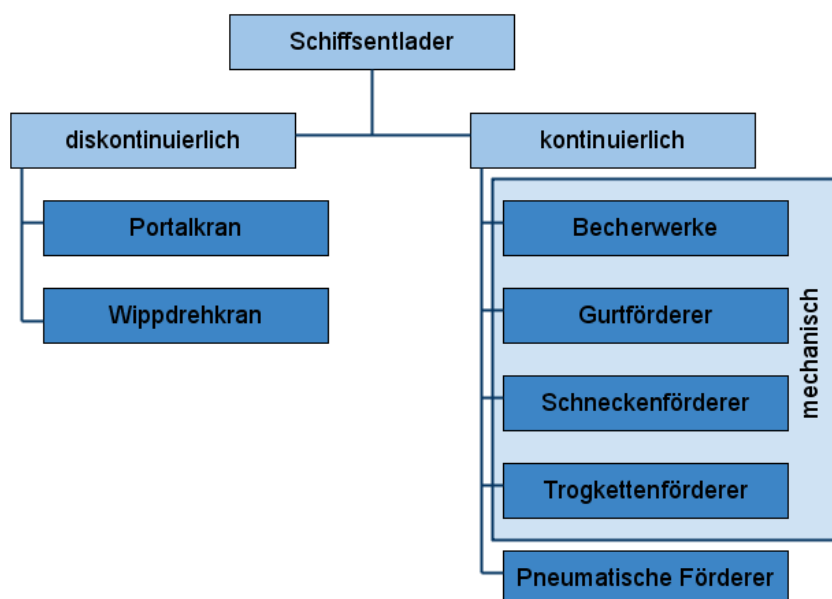


Abbildung 3-2: Entladertypen nach [Gün-09b]

Entsprechend ihres jeweiligen Fördermechanismus weisen die Entladertypen ein unterschiedliches Förderverhalten auf (vgl. [Spa-00]). Entlader in Greiferbauweise liefern einen diskontinuierlichen Massenstrom und erzielen ihre maximale Förderleistung, sobald sich genug Material an einer Stelle befindet und die Greiferschaufel in einem Arbeitsschritt vollständig gefüllt werden kann. Bei niedrigerem Füllstand wird die Greiferschaufel mittels Entlangkratzens am Laderaumboden gefüllt; jedoch resultiert hieraus eine reduzierte Förderleistung. Die restlichen der in Abbildung 3-2 aufgeführten Entladertypen zählen zur Kategorie der kontinuierlichen Entlader – hierbei ist zwischen mechanischer und pneumatischer Förderung zu differenzieren. Bei den mechanischen Entladern ist es erforderlich, dass das Material dem Aufnehmer von selbst zufließt. Die Förderleistung ist abhängig von der Eintauchtiefe ins Schüttgut. Einige Varianten erfordern eine Mindesteintauchtiefe, damit Material gefördert werden kann. Mit zunehmender Eintauchtiefe steigt der Förderstrom bis zu einem Maximalwert an. Bei pneumatischen Entladern ist keine Mindesteintauchtiefe erforderlich und die Entladung bis zum Laderaumboden deshalb möglich. Die verschiedenen Fördermechanismen unterscheiden sich ferner in ihrem Energieverbrauch und ihrer Empfindlichkeit gegenüber etwaigen Fremdkörpern in der zu löschenden Ladung.

Die Verteilung des Schüttguts im Laderaum nimmt grundsätzlichen Einfluss auf dessen Erreichbarkeit sowie ggf. auch auf die erzielbare Förderleistung. Um die Wechselwirkungen zwischen Ladung und Entlader abbilden zu können, ist eine Modellierung des Materialverhaltens erforderlich. Ein implementierter Entlader muss zur Bestimmung seiner Eintauchtiefe die an einer Stelle im Laderaum vorhandene Materialmenge identifizieren können. Zur Abbildung der Ladungsentnahme ist ein Verfahren erforderlich, das die Entnahme definierter Materialmengen an einer bestimmten Stelle im Laderaum ermöglicht.

Ferner besitzen vereinzelte auf dem Markt verfügbare Entladertypen integrierte Zuführeinrichtungen wie beispielsweise formveränderliche Kratzer oder Zuführschnecken. Um diese im Modell abbilden zu können, muss neben der Entnahme auch das Verschieben von Ladung im Laderaum möglich sein.

Der Entlader kann sich innerhalb des Laderaums bewegen, um an unterschiedlichen Stellen Material zu entnehmen. Die untereinander variierenden kinematischen Konzepte der einzelnen Entlader, sollen in der Simulation jedoch einheitlich bedienbar sein um somit eine unkomplizierte und einheitliche Bedienung seitens des Nutzers zu

gewährleisten. Deshalb wird für jedes kinematische Konzept eine Vorwärts- und Rückwärtskinematik als Abstraktionsschicht zwischen den einheitlichen Bewegungsvorgaben und den Freiheitsgraden des speziellen Entladers benötigt. Die reale Bewegungsgeschwindigkeit des Entladers muss im Modell abgebildet werden, um in der Simulation die Entladedauer ermitteln zu können.

Im Rahmen dieses Dokumentes bezeichnet die Positionierung die Fähigkeit eines Entladers, sich im Ganzen relativ zum Schiff zu bewegen. Bezüglich der Positionierung können unterschieden werden:

- Stationäre Entlader
- Schienengebundene Entlader (Positionierung entlang eines linearen Schienenverlaufs)
- Schwimmende Entlader (Positionierung auf der Wasseroberfläche)
- Frei bewegliche Entlader (Beliebige Positionierung auf dem Kai)

Alle genannten Positionierungsarten sollen im Simulationsmodell zur Verfügung stehen. Um die für einen Lukenwechsel benötigte Zeit bestimmen zu können, muss bei der Modellierung die reale Fahrgeschwindigkeit des Entladers berücksichtigt werden.

Aufgrund ihrer Beweglichkeit besteht die Möglichkeit, dass Entlader mit anderen Objekten kollidieren. Etwaige Kollisionen mit den Kanten einer Ladelupe oder ggf. mit weiteren im gleichen Laderaum agierenden Entladern beschränken die Erreichbarkeit der Ladung im Laderaum. Kollisionen mit anderen Entladern können darüber hinaus die Möglichkeit von Lukenwechseln einschränken. So können beispielsweise Entlader auf einer Schiene keine Position jenseits des benachbarten Entladers erreichen – deren Reihenfolge ist somit zwingend vorgegeben. Die Erkennung von Kollisionen muss also in der Simulation möglich sein. Zur Erfassung der in Bezug auf den Entladeprozess relevanten Beschränkungen sind für jeden Entladertyp, d. h. für jedes kinematische Konzept, und die Laderäume sowie Lukenöffnungen Kollisionsmodelle in die Simulation zu integrieren.

Grundsätzlich konzipieren sich kontinuierliche Entlader in Form einer verfahrbaren Basiskonstruktion mit einem um die vertikale Achse drehbaren Aufbau / Turm. An diesem schließt ein heb- und senkbarer Ausleger an, an dessen Ende sich der Vertikalförderer befindet. Der Vertikalförderer kann gegenüber dem Ausleger über ein so-

genanntes Kick-in-/ Kick-out-System bewegt werden. Demzufolge setzt sich ein kontinuierlicher Entlader aus vier Abschnitten bzw. Gliedern zusammen, die über rotatorische Freiheitsgrade miteinander gekoppelt sind. Das Fördergut wird am Ende des Vertikalförderers aufgenommen. Diskontinuierliche Entlader mit Greiferbetrieb besitzen ebenfalls eine verfahrbare Basiskonstruktion analog der zuvor beschriebenen kontinuierlichen Entlader. Wippdrehkrane entsprechen einem um die vertikale Achse drehbaren Aufbau mit einziehbarem Ausleger über den das Hubseil der Greiferschaukel läuft. Portalkrane besitzen einen Träger über den eine Katze den Greifer zwischen Ladeluke und Absetzstelle führt. Entgegen der Wippdrehkrane sind Portalkrane nicht in der Lage, den Greifer seitlich zu führen.

3.1.4 Zuführgeräte

Zuführgeräte werden mit Hilfe von Seilwinden oder Kranen - vereinzelt Entlader verfügen über eigene Krane, anderenfalls müssen externe Krane hinzugezogen werden - durch die Ladeluke in den Laderaum eingehoben. Ein Zuführgerät kann zu jedem Zeitpunkt in höchstens einem Laderaum eingesetzt werden. Im selben Laderaum können mehrere Zuführgeräte gleichzeitig aktiv sein. Dort führen sie die Ladung entweder direkt der Aufnahmeöffnung eines Entladers zu, oder sie häufen sie an einem bestimmten Punkt auf, wo sie durch einen Entlader entnommen werden kann. Um diesen Vorgang abbilden zu können, muss das Verschieben von Ladung innerhalb eines Laderaums unterstützt werden.

3.1.5 Schienen

Schienen befinden sich auf Kais oder Piers. Sie sind eben und gerade und haben eine definierte Länge. Auf einer Schiene soll eine beliebige Anzahl von Objekten positioniert werden können. Eine Überwachung der Reihenfolge der Objekte durch das Schienenmodell erfolgt nicht. Die Beibehaltung der Reihenfolge wird durch die Kollisionserkennung der Objekte sichergestellt.

Durch eine Schiene wird ein zusätzliches eindimensionales Bezugssystem etabliert. Um ein Objekt auf der Schiene positionieren zu können, muss die Bestimmung der zu einer bestimmten Schienenposition gehörenden Koordinaten möglich sein. Um eine zielführende Implementierung des Demonstrators zu gewährleisten, muss die Schienenposition, die zu einem gegebenen Punkt den geringsten Abstand aufweist, systemseitig ermittelbar sein.

3.1.6 Schiff

Ein Schiff verfügt über eine bestimmte Anzahl von Laderäumen, diese besitzen eine feste Position im Schiff. Zur Einstellung des Tiefgangs und des Trimms sind Ballasttanks, die mit Wasser gefüllt werden können, vorhanden. Die vertikale Position des Schiffs wird durch den Wasserpegel und den Tiefgang bestimmt. Bei zu großem Tiefgang kann das Schiff auf Grund laufen. Die Position des Schiffskiels soll deshalb auf einstellbare Grenzwerte überwacht werden. Das Schiff nimmt eine definierte Position gegenüber dem Kai ein.

Da im Laufe des Entladevorgangs eine Umpositionierung des Schiffs erforderlich sein kann, muss dies auch im Modell möglich sein. Die in der Realität zur Umpositionierung erforderliche Zeitdauer soll in Form einer entsprechenden Wartezeit in der Simulation berücksichtigt werden.

Die durch ungleichförmige Gewichtsverteilung wirkenden Kräfte können zu strukturellen Schäden am Schiff führen. Aus diesem Grund soll das durch Ladung und Ballast erzeugte Biegemoment berechnet und auf einstellbare Grenzwerte überwacht werden.

3.1.7 Laderaum

Das Modell eines Laderaums beschreibt dessen geometrische Abmessungen und die der zugehörigen Ladeluke. Die geometrische Ausbildung eines Laderaumes bestimmt dessen Füllhöhe, die sich durch ein bestimmtes Ladungsvolumen ergibt. Kollisionen zwischen einem Entlader und dem Laderaum müssen erkannt werden.

Laderumböden weisen an ihren Längsseiten schiffsbautechnisch bedingt in aller Regel Ansträgungen auf. Diese bestimmen insbesondere in der kritischen Restentleerungsphase die Verteilung der Ladung und müssen deshalb im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Nach oben hin wird der Laderaum durch das Deck des Schiffes abgeschlossen. Analog zum Boden weist die Laderaumdecke ebenfalls Ansträgungen auf. Bedingt durch die Tatsache, dass diese Ansträgungen keinerlei Einfluss auf den Entladevorgang besitzen - die Ladungsverteilung wird bereits unmittelbar nach Beginn der Entladung nicht mehr von der Deckenstruktur des Laderaumes beeinflusst -, ist eine Abbildung der Struktur der Laderaumdecke im Rahmen des Simulationsmodells nicht erforderlich.

Die Ladeluke ermöglicht den Zugriff des Entladers auf die zu löschende Ladung und besitzt eine rechteckige Form und ist von einem sog. Süllrand umgeben.

3.1.8 Ladung

Als Ladung kommen verschiedene Arten von Schüttgut zum Tragen. Ladung kann sich in mehreren Schichten im Laderaum befinden. Entlader und Zuführgeräte können mit der jeweils obersten Ladungsschicht wechselwirken. Bedingt durch die Tatsache, dass bei den meisten Fördermechanismen die Förderrate abhängig von der Eintauchtiefe des Aufnehmers ins Material ist, tritt eine Kopplung zwischen Materialverhalten und Förderleistung auf. Das Materialverhalten der Ladung muss hinreichend genau nachgebildet werden, um diese maßgeblichen Effekte beschreiben zu können. Gleichzeitig ist der numerische Aufwand derart zu begrenzen, dass der Demonstrator mittels aktueller handelsüblicher Rechner effizient ausführbar ist.

3.2 Programmstruktur und Bedienung

3.2.1 Modellierung

Die Definition von Entladern, Schienen, Schiffen und weiteren Objekten sowie die Festlegung ihrer jeweiligen Eigenschaften ist im Simulationsprogramm mittels nutzerfreundlicher Dialogfenster zu ermöglichen.

3.2.2 Mehrfachverwendbarkeit

Mit Hilfe des Simulationsprogramms soll es möglich sein, die Leistung einer Entladeanlage bei der Bewältigung verschiedener Entladeaufgaben (d.h. bei der Entladung verschiedener Schiffe oder variierender Ladungsarten oder -mengen) zu untersuchen. Weiterer Sinn und Zweck ist die Untersuchung der Leistung einer alternativen Anlagenkonfiguration bei Bewältigung der gleichen Entladeaufgabe. Deshalb ist eine separate Vorhaltung der Entladeanlagen- und Schiffsdefinitionen erforderlich. Einmal definierte Entladeanlagen und Schiffe können dann in unterschiedlicher Kombination geladen und simuliert werden.

3.2.3 Simulationsdurchführung

Die zu simulierenden Vorgänge laufen in der Realität in sehr langen Zeiträumen (einige Stunden bis Tage) ab. Die Software soll diese Vorgänge in wesentlich kürzerer Zeit (Minuten) simulieren können. Um eine bessere Beobachtung des Prozesses zu

ermöglichen soll es auch möglich sein, die Simulation in Echtzeit oder in wählbaren Vielfachen ablaufen zu lassen oder die Simulation zu pausieren. Die Umschaltung zwischen verschiedenen Simulationsgeschwindigkeiten soll zu jedem Zeitpunkt während des Simulationsvorgangs möglich sein.

3.2.4 Ablaufsteuerung

Beim realen Entladevorgang werden die eingesetzten Maschinen durch Bedienpersonal gesteuert. Das gewählte Vorgehen hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Entladevorgangs. Die Steuerung der Objekte muss deshalb auch im Simulationsmodell abgebildet werden. Die Objekte sollen in der Simulation sowohl manuell über Dialogfenster als auch durch einen zuvor festgelegten Ablaufplan (Skript) gesteuert werden können. Manuelle Eingriffe sollen während des gesamten Prozesses möglich sein.

Zur manuellen Steuerung ist für jedes Objekt ein Dialogfenster zu erstellen, über das die vom Objekt ausführbaren Steuerbefehle durch Maus- oder Tastatureingaben ausgelöst werden können.

In Form von Skripten kann der Programmanwender eine komplette Entladestrategie oder einzelne Abschnitte hiervon beschreiben. Durch Skriptbefehle sollen alle Steuerungsvorgänge, die in der Realität durch Bedienpersonal vorgenommen werden, nachbildbar sein. Dies umfasst sowohl das Vorgehen innerhalb eines Laderaums als auch über das gesamte Schiff. Sowohl sequentielle als auch parallel ablaufende Prozesse sind zu beschreiben. In einem Skript sollen zusätzlich Haltepunkte und Meldungsausgaben festgelegt werden können, um dem Benutzer das Erreichen bestimmter Positionen im Ablauf zu signalisieren. Um unterschiedliche Entladestrategien miteinander vergleichen zu können, ist die Definition mehrerer, voneinander abweichender Skripte erforderlich.

Für nachfolgende Steuerungsvorgänge sind entsprechende Skriptbefehle im Rahmen des zu entwickelnden Demonstrators zu implementieren:

- Entlader
 - Entlader positionieren
 - Aufnahmeöffnung an eine Stelle im Laderaum bewegen
 - Entladen (kontinuierlich)
 - mit optimaler Eintauchtiefe senkrecht eintauchen
 - in einer Linie bewegen
- Zuführgerät
 - Zuführen mit bestimmter Förderleistung starten / stoppen
- Schiff
 - Sollposition setzen

Die Ergänzung weiterer Skriptbefehle soll möglich sein. Eine entsprechend flexible offene Ausgestaltung des Demonstrators ist erforderlich. Insbesondere wird die automatisierte Steuerung der Bewegungen eines Entladers in einem Laderaum angestrebt.

3.2.5 Fehlerbehandlung

Tritt bei einem der simulierten Objekte ein ungültiger Zustand auf (z. B. Kollision), oder kann ein Steuerungsbefehl nicht ausgeführt werden, wird die Simulation pausiert und eine Fehlermeldung angezeigt.

3.2.6 Visualisierung

Um das Verständnis für die ablaufenden Prozesse zu fördern soll eine dreidimensionale Darstellung des Entladevorgangs aus der Vogelperspektive erfolgen. Der Benutzer kann den Blickwinkel und die Position des Betrachters mit der Maus verändern.

Für jedes einzelne Objekt sind darüber hinaus aktuelle Zustandsdaten in einem Dialogfenster anzuzeigen. Jedes Objekt muss deshalb ein eigenes Dialogfenster besitzen, in dem alle zur Beurteilung des Entladevorgangs relevanten Zustandsgrößen angezeigt werden.

3.2.7 Zustandsspeicherung

Der jeweils vorliegende Zustand der simulierten Objekte muss sich speichern und wiederherstellen lassen. Auf diese Weise kann vor jedem Simulationslauf der gewünschte Ausgangszustand exakt wiederhergestellt werden. Durch die Speicherung von Zwischenzuständen ist außerdem ein verändertes Vorgehen für einzelne Phasen des Entladevorgangs simulierbar, ohne dass die von der Veränderung nicht betroffenen Phasen bzw. Simulationsabschnitte stets erneut simuliert werden müssen.

Unabhängig von der Speicherung des gesamten Simulationszustandes, ist auch die Möglichkeit zur Speicherung und individuellen Wiederherstellung einzelner Objekte zu gewährleisten, sodass hierauf individuell zurückgegriffen werden kann.

3.2.8 Auswertung

Eine sinnvolle Auswertung der Simulationsläufe und Prozessanalyse erfordern die Aufzeichnung relevanter Zustandsdaten der Simulationsobjekte in Abhängigkeit vom Zeitverlauf. Die aufzuzeichnenden Werte und das Aufzeichnungsintervall werden vom Benutzer individuell festgelegt. Die Aufzeichnung bzw. vielmehr die Vorhaltung der ermittelten Simulationsdaten erfolgt in Form einer separaten Datei; zur Anzeige der aufgezeichneten Werte in Abhängigkeit vom Zeitverlauf wird ein zusätzliches Modul erstellt. Um vielfältige Analysemöglichkeiten zu bieten, sind die aufgezeichneten Daten derart vorzuhalten bzw. zu verarbeiten, sodass ein Export in diverse gängige Tabellenkalkulationsprogramme ermöglicht wird.

4 Entwurf des Simulationsmodells

4.1 Allgemein

4.1.1 Globales Koordinatensystem

Die simulierte Umgebung besitzt ein globales Koordinatensystem (Abbildung 4-1), dessen z-Achse vertikal nach oben orientiert ist. Die Wasserseite befindet sich im Halbraum $y > 0$, die Landseite im Halbraum $y < 0$. Der Koordinatenursprung befindet sich am Anfang der Kaimauer. Die Angabe von Punktkoordinaten erfolgt SI-konform in Metern.

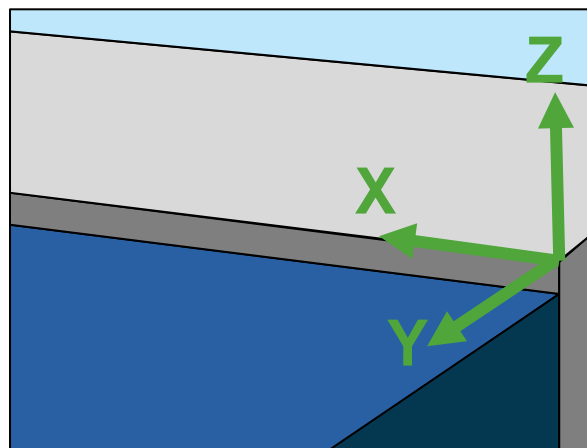


Abbildung 4-1: Globales Koordinatensystem

4.1.2 Objekt-Modell

In der simulierten Umgebung befinden sich Objekte, die über definierte Schnittstellen miteinander interagieren können. Objekte können hierarchisch geordnet sein (z. B. Laderaum im Schiff, Entlader auf Schiene).

Jedes Objekt verfügt über Eigenschaften und Zustandsdaten. Die Objekteigenschaften bleiben während des Simulationsvorgangs unverändert. Die Zustandsdaten können entsprechend Kapitel 3.2.7 in Zustandsabbildern gespeichert und wiederhergestellt werden.

Für jedes Objekt kann ein Bearbeitungs-, Steuerungs- und Anzeigesteuerelement definiert werden. Über das Bearbeitungssteuerelement sind die Objekteigenschaften festlegbar. Die Steuerungs-Control dient zur manuellen Steuerung eines Objekts

entsprechend Kapitel 3.2.4 und kann zusätzlich zur Anzeige von Zustandsgrößen genutzt werden. Das Anzeigesteuerelement dient (ggf. ergänzend zum 3D-Modell) zur Visualisierung des Objekts entsprechend Kapitel 3.2.6.

4.1.3 Komponenten

Die Simulationsobjekte können in verschiedenen Komponenten enthalten sein. Komponenten können in separaten Dateien gespeichert und in unterschiedlichen Simulationen Verwendung finden. Dadurch wird der Anforderung aus Kapitel 3.2.2 Rechnung getragen.

4.2 Schiff

Ein Schiff wird durch seine Objekteigenschaften Länge, Höhe und Breite beschrieben. Die Höhe wird vom Koordinatenursprung bis zum Deck gemessen. Das Koordinatensystem wird entsprechend der Richtlinie des Germanischen Lloyd ([GL-09], Teil 1, Kapitel 1, Abschnitt 5) wie in Abbildung 4-2 dargestellt definiert.

Zur besseren Unterscheidbarkeit bei mehreren Schiffen kann die Darstellungsfarbe gewählt werden. Einem Schiffsmodell ist eine beliebige Anzahl an Laderäumen und Ballasttanks zuweisbar.

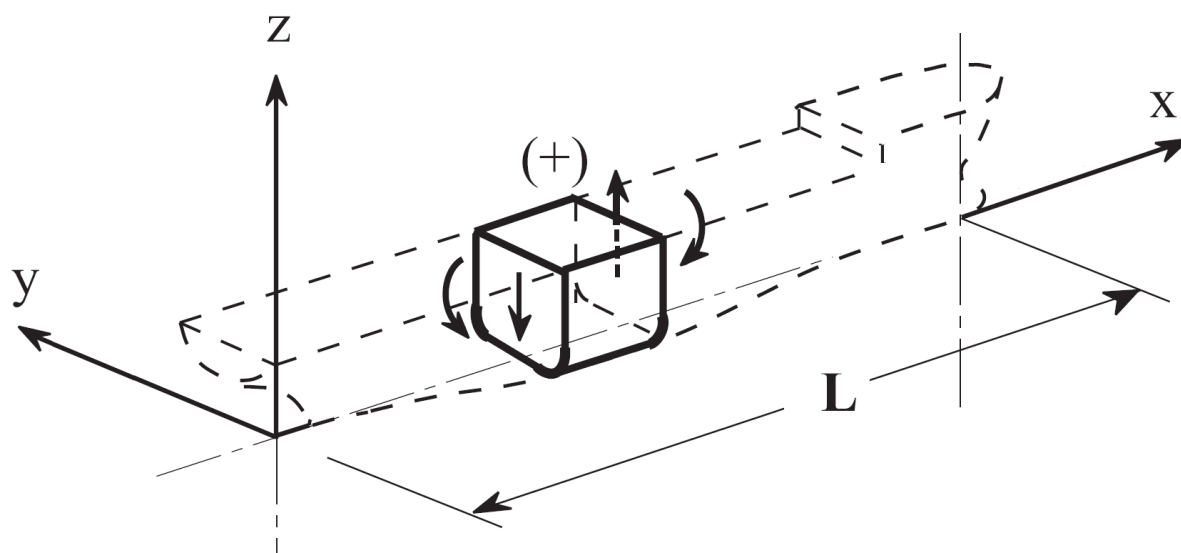


Abbildung 4-2: Koordinatendefinition Schiff nach [GL-09]

Das Schiff kann im globalen Koordinatensystem positioniert werden. Die Position wird durch die Translation und Rotation des Schiffskoordinatensystems relativ zum globalen Koordinatensystem beschrieben. Die Translation in x- und y-Richtung sowie die Rotation φ_z um die z-Achse können frei vorgegeben werden. Die Translation in z-Richtung wird durch den Wasserpegel (Kapitel 4.5.2) und den Tiefgang T (Kapitel 4.2.2) bestimmt:

$$z_{\text{Schiff}} = z_{\text{Wasseroberfläche}} - T$$

Formel 4-1: z-Position eines Schiffs

Zur Minimierung des anfallenden Rechenaufwandes werden Änderungen an der z-Position erst ab einer Abweichung von 0,01m berücksichtigt. Jede Positionsänderung des Schiffes wird an alle darin enthaltenen Laderäume gemeldet, um deren Positionsdaten zu aktualisieren.

4.2.1 Positionierung

Zur Positionierung des Schiffs können über den Steuerungsdialog wahlweise die Istwerte der Position (x, y, φ_z) direkt modifiziert oder entsprechende Sollwerte vorgegeben werden. Bei einer Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position wird das Schiff mit konstanter Geschwindigkeit zur Sollposition bewegt. Ist- und Soll-Position entsprechen Zustandsdaten des Schiffs. Die Soll-Position eines Schiffs kann außerdem durch einen Skript-Befehl individuell angepasst werden.

4.2.2 Tiefgang

Der Tiefgang T des Schiffs wird vom Koordinatenursprung des Schiffs bis zur Wasseroberfläche gemessen. Der Tiefgang wird als linear abhängig von der Beladung angenommen.

$$T = T_0 + a_T \cdot m_L$$

Einheit: [m]

Formel 4-2: Tiefgang

T_0 bezeichnet den Tiefgang des unbeladenen Schiffs mit leeren Ballasttanks. m_L bezeichnet die Gesamtmasse der Ladung und des Ballasts. Der Koeffizient a_T beschreibt die Abhängigkeit des Tiefgangs von m_L . Er besitzt die Einheit [kg/m].

4.3 Laderäume

Für Laderäume wird das Koordinatensystem wie in Abbildung 4-3 dargestellt definiert. Die Koordinatenachsen der Laderäume sind zu jeder Zeit parallel zu den Achsen des Schiffs ausgerichtet. Da auch eine eventuelle Neigung des gesamten Schiffs nicht berücksichtigt wird, wirkt die Schwerkraft immer gegenparallel zur z-Achse.

Der Laderaumboden weist an den Längsseiten eine Anschrägung der Breite B_A und der Höhe H_A auf. Nach oben hin ist der Laderaum teilweise abgedeckt (B_{Dx} , B_{Dy}) und nur durch die Ladeluke zugänglich. Die Ladeluke ist von einem Süllrand umgeben.

Kollisionen zwischen einem Entlader und dem Laderaum sollen erkannt werden. Deshalb werden die Seitenwände, der Laderaumboden mit den seitlichen Anschlägen und die Decke als Kollisionsbereiche definiert. Da an Deck eines Schiffs meist weitere Strukturen vorhanden sind (z. B. Lukenabdeckungen, Winden etc.), mit denen ein Entlader kollidieren kann, wird ein weiterer Kollisionsbereich definiert, der die Form der Laderaumdecke besitzt, gegenüber dieser aber um die Höhe des Süllrands in z-Richtung verschoben ist.

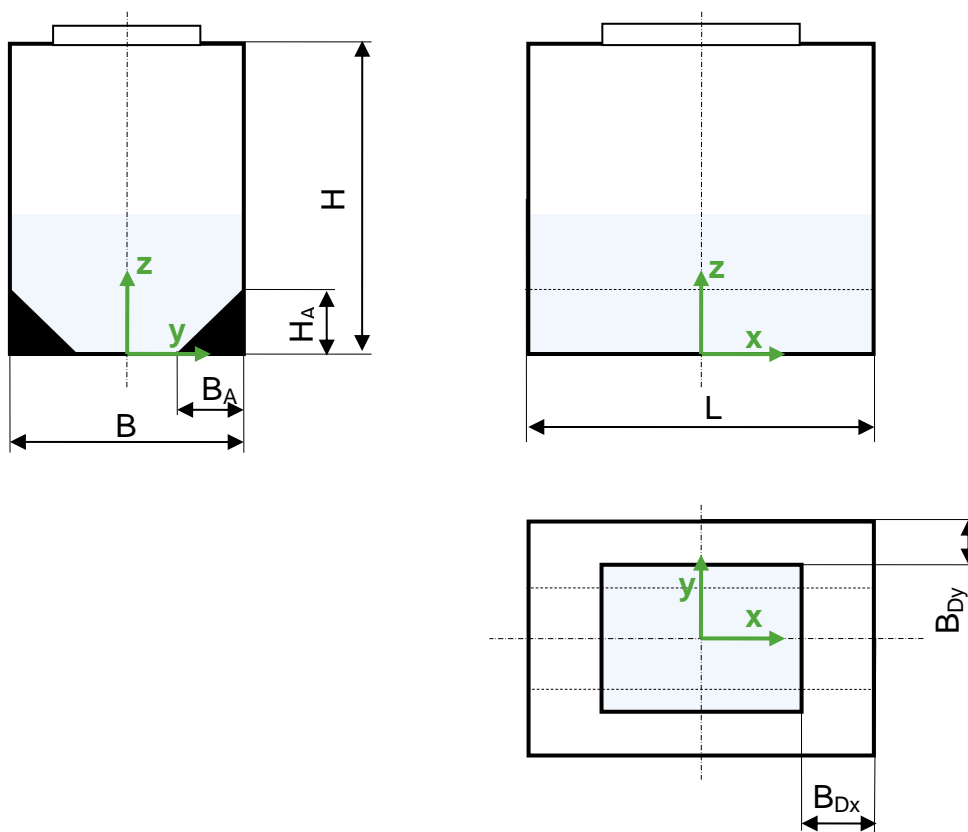


Abbildung 4-3: Geometrie und Abmessungen eines Laderaums

Die Maße des Laderaums und seine Position im Schiff sind Objekteigenschaften. Der Beladungszustand (Kapitel 4.3.1) ist eine Zustandsgröße und kann damit in Zustandsabbildern gespeichert und wiederhergestellt werden. Die Beladung muss deshalb auch über den Steuerungsdialog des Laderaums konfiguriert werden. Das Steuerelement "Laderaum anzeigen" ist in Anhang F beschrieben.

4.3.1 Ladung

Jeder Laderaum kann mehrere Schichten Ladung beinhalten. Die Schichten werden durch die Materialart und die Masse definiert; sie werden von unten beginnend nummeriert. Die unteren Schichten sind immer eben, d. h. die Schichthöhe ist konstant. Die oberste Schicht weist ein Schichtdickenprofil auf. Ladungszugaben und -entnahmen können nur auf die oberste Ladungsschicht angewendet werden.

Abbildung 4-4 zeigt exemplarisch einen Laderaum mit zwei Ladungsschichten. Jede Ladungsschicht besitzt einen absoluten Schichtboden h_{B0} , der den Beginn der Schicht markiert. Der lokale Schichtboden h_B (rote Strichlinie) entspricht entweder dem absoluten Schichtboden h_{B0} oder dem lokalen Laderaumboden, falls dieser

(aufgrund der Strukturierung des Laderaumbodens) höher liegt. Der Betrag der Anhebung von h_B gegenüber h_{B0} wird als Bodenoffset o_B bezeichnet.

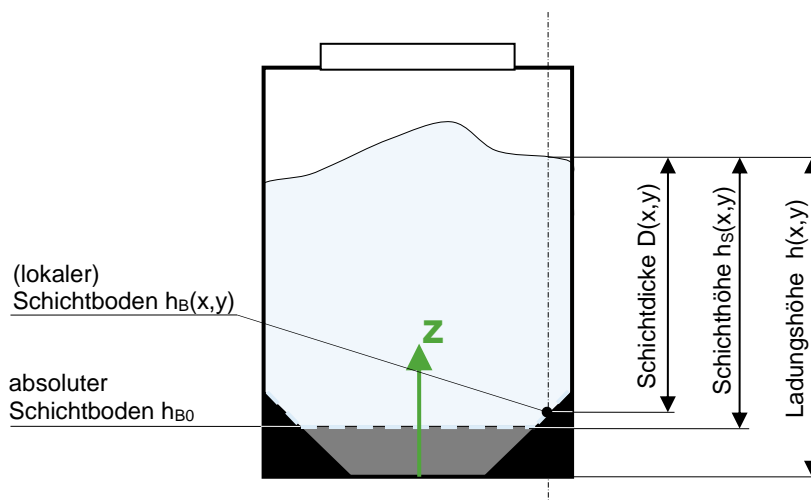


Abbildung 4-4: Maße der Ladungsschichten

$$h_B(x, y) = h_{B0} + o_B(x, y)$$

$$h_S(x, y) = D(x, y) + o_B(x, y)$$

Formel 4-3: Beziehungen der Schichtenmaße

Die Ladungshöhe kann durch Addition der Schichthöhe h_S der obersten Schicht zum absoluten Schichtboden h_{B0} der obersten Schicht berechnet werden:

$$h(x, y) = h_{B0, oberste Schicht} + h_{S, oberste Schicht}(x, y)$$

Formel 4-4: Ladungshöhe

Vom Laderaumboden beginnend wird für alle Schichten der absolute Schichtboden h_{B0} und für alle außer der obersten Schicht die konstante Schichthöhe h_S bestimmt. Das Volumen einer ebenen Ladungsschicht kann als Produkt der Laderaumlänge L und der Querschnittsfläche F der Schicht bestimmt werden. F kann in einen trapezförmigen und einen rechteckigen Bereich unterteilt werden.

$$V_{Schicht} = L \cdot F = L \cdot (F_{Tr} + F_R)$$

$$F_{Tr} = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot [B(h_{B0}) + B(h_{B0} + h_S)] \cdot h_S & \text{falls } h_{B0} < H_A \text{ und } h_{B0} + h_S \leq H_A \\ \frac{1}{2} \cdot [B(h_{B0}) + B(H_A)] \cdot (H_A - h_{B0}) & \text{falls } h_{B0} < H_A \text{ und } h_{B0} + h_S > H_A \\ 0 & \text{falls } h_{B0} \geq H_A \end{cases}$$

$$F_R = \begin{cases} 0 & \text{falls } h_{B0} + h_S \leq H_A \\ B \cdot [h_{B0} + h_S - H_A] & \text{falls } h_{B0} < H_A \text{ und } h_{B0} + h_S > H_A \\ B \cdot h_S & \text{falls } h_{B0} \geq H_A \end{cases}$$

Formel 4-5: Volumen einer ebenen Ladungsschicht

$B(z)$ bezeichnet hierbei die nutzbare Breite des Laderaums auf der Höhe z , d. h. abzüglich der Ansträgung. Durch Umkehrung der Berechnung aus Formel 4-5 ist die Schichthöhe ermittelbar, die für ein bestimmtes Volumen und damit für eine bestimmte Ladungsmasse erforderlich ist.

4.3.2 Schüttgutmodellierung

Es existiert eine Vielzahl von kontinuumsmechanischen Stoffmodellen zur Beschreibung des Schüttgutverhaltens in drei Dimensionen. Eine Aufstellung findet sich z.B. bei Böhrsen ([Böh-02]). Neben der kontinuumsmechanischen Betrachtung besteht auch die Möglichkeit einer Beschreibung des Schüttguts auf Partikelebene (Diskrete-Elemente-Methode DEM). Die genannten Modelle sind jedoch theoretisch wie numerisch sehr aufwendig und zur Beschreibung der im vorliegenden Fall relevanten Effekte nicht erforderlich.

Für die vorliegende Problemstellung ist die Betrachtung der Ladung als Kontinuum mit homogenen Materialeigenschaften ausreichend. Des Weiteren kann angenommen werden, dass die Ladung auf Grund der Gewichtskraft eine geschlossene Schicht bildet, d. h. es entstehen keine Kavitäten. Zur Beschreibung des Materialverhaltens wurde ein einfaches zweidimensionales Modell entwickelt.

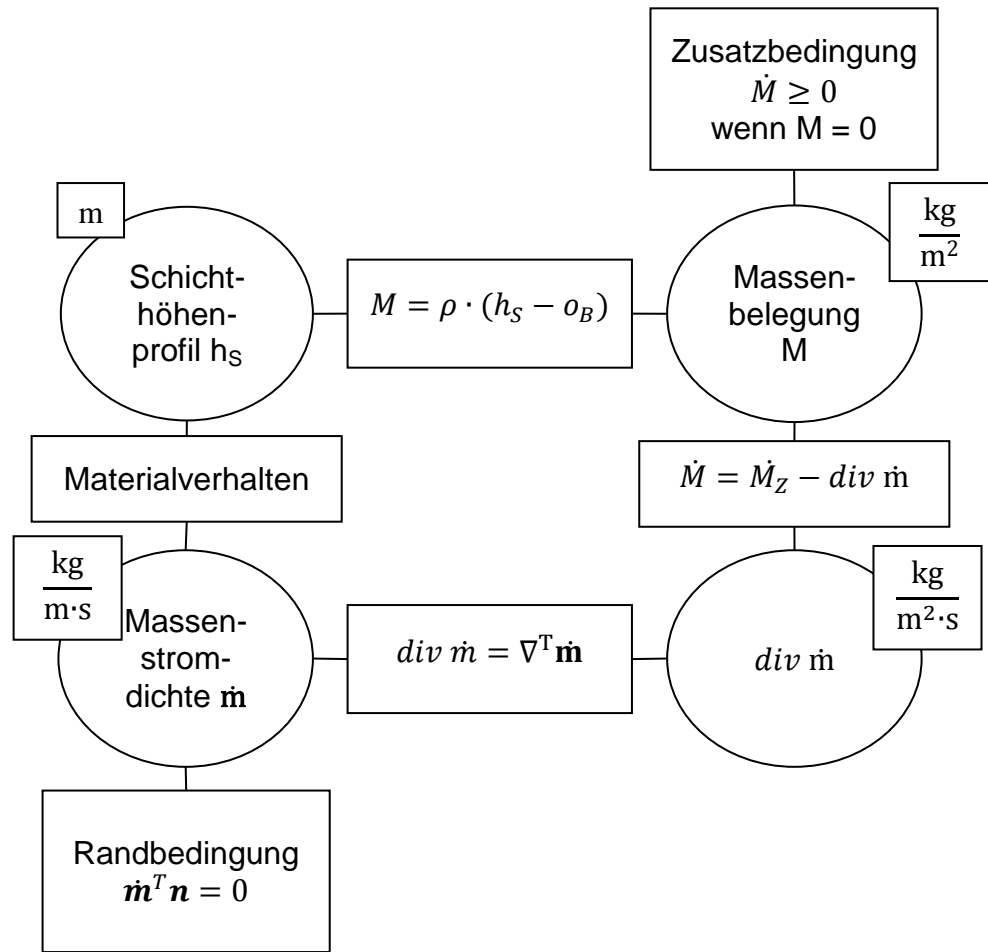


Abbildung 4-5: Tonti-Diagramm des Schüttgutmodells

Für das Schüttgut werden die folgenden idealisierten Annahmen getroffen:

- Das Schüttgut ist als Kontinuum mit homogenen Materialeigenschaften beschreibbar.
- Die Ladung bildet immer geschlossene Schichten.
- Wandreibung ist vernachlässigbar.
- Adhäsion ist vernachlässigbar.
- Dynamische Effekte (Massenträgheit) werden nicht berücksichtigt.
- Das Material beginnt zu fließen, sobald ein kritischer Schüttwinkel φ_c überschritten wird.
- Die Massenstromdichte ist linear abhängig vom Gefälle.

Das Tonti-Diagramm in Abbildung 4-5 stellt das entwickelte Schüttgutmodell dar. $h_S(x, y)$ bezeichnet die lokale Schichthöhe in Metern und hängt direkt mit der Massenbelegung $M(x, y)$ zusammen. Aus dem Schichthöhenprofil ergibt sich durch das Modell des Materialverhaltens (Formel 4-6) die hypothetische Massenstromdichte $\dot{m}(x, y)$. Die Randbedingung stellt sicher, dass kein Massenstrom über die Begrenzungen der Grundfläche fließt. Die Zeitableitung der Massenbelegung M ergibt sich aus der Divergenz der Massenstromdichte und dem externen Massenzufluss \dot{M}_Z . Die nichtlineare Zusatzbedingung besagt, dass an Stellen, an denen keine Ladung vorhanden ist, kein Material abfließen kann. Das Materialverhalten wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\dot{m} = -C_m \cdot \frac{\nabla h}{\|\nabla h\|} \cdot (\|\nabla h\| - \tan \varphi_c) \cdot \Theta(\|\nabla h\| - \tan \varphi_c)$$

$$\text{Einheit: } 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Formel 4-6: Schüttgutmodell Massenstromdichte

φ_c bezeichnet den materialabhängigen kritischen Schüttwinkel, ab dem (bzw. bis zu dem) Fließen auftritt, und Θ die Heaviside'sche Stufenfunktion. Die Konstante C_m wurde eingeführt, um die Fließeigenschaften des Materials zu charakterisieren; sie besitzt die Einheit $[\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s})]$ und ist umso größer, je fließfähiger das Material ist.

4.3.3 Numerische Umsetzung

Um das Schüttgutverhalten simulieren zu können, muss das in Kapitel 4.3.2 entwickelte Modell für die numerische Berechnung angepasst werden. Dazu wird eine räumliche und zeitliche Diskretisierung durchgeführt.

Die Berechnung (Abbildung 4-6) erfolgt in zwei Hauptschritten: Zunächst wird die Volumenstromdichte für alle diskreten Teilbereiche berechnet und gespeichert (Kapitel 4.3.3.3); anschließend werden entsprechend der berechneten Volumenströme Ladungsvolumina zwischen diskreten Knoten ausgetauscht, wobei die oben genannten Rand- und Zusatzbedingungen berücksichtigt werden (Kapitel 4.3.3.4). Sämtliche Berechnungen werden mit volumetrischen Größen durchgeführt, wodurch die Umrechnung in Massengrößen entfällt. Die Berücksichtigung der externen Massenzuga-

be bzw. -entnahme erfolgt in einem separaten Schritt zwischen den Berechnungsläufen des Schüttgutmodells.

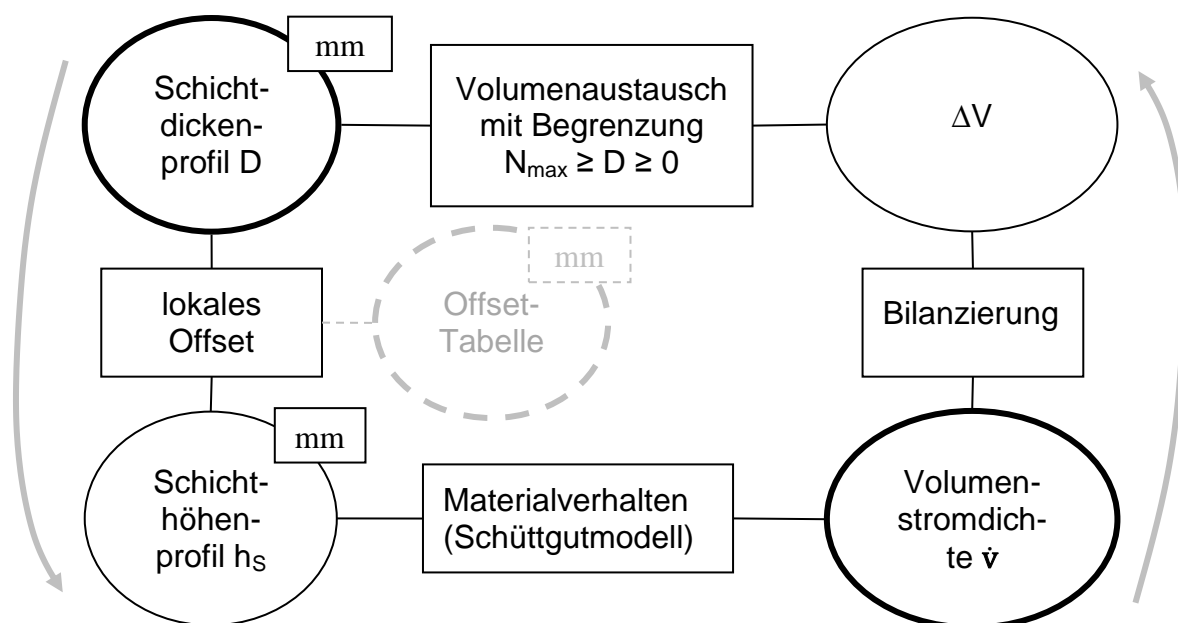


Abbildung 4-6: Numerische Umsetzung des Schüttgutmodells

Als Hauptfeld wird das Schichtdickenprofil D gewählt. Die breite Umrandung in Abbildung 4-6 symbolisiert, dass das gesamte Feld, ebenso wie das Feld der Volumenstromdichte und die Bodenoffset-Tabelle, permanent im Speicher gehalten wird. Für das Feld der Austauschvolumina ΔV und das Feld der Volumenstromdichte \dot{v} werden keine Einheiten angegeben, da diese Felder aufgrund sich dadurch ergebender numerischer Vorteile (Kapitel 4.3.3.5: Optimierung) in normierten Einheiten gespeichert werden.

4.3.3.1 Räumliche Diskretisierung

Die Grundfläche des Laderaums wird in diskrete, rechteckige Flächenelemente (FE) aufgeteilt (Abbildung 4-7). Die Länge und Breite der Flächenelemente wird so angepasst, dass die Grundfläche vollständig ausgekleidet werden kann.

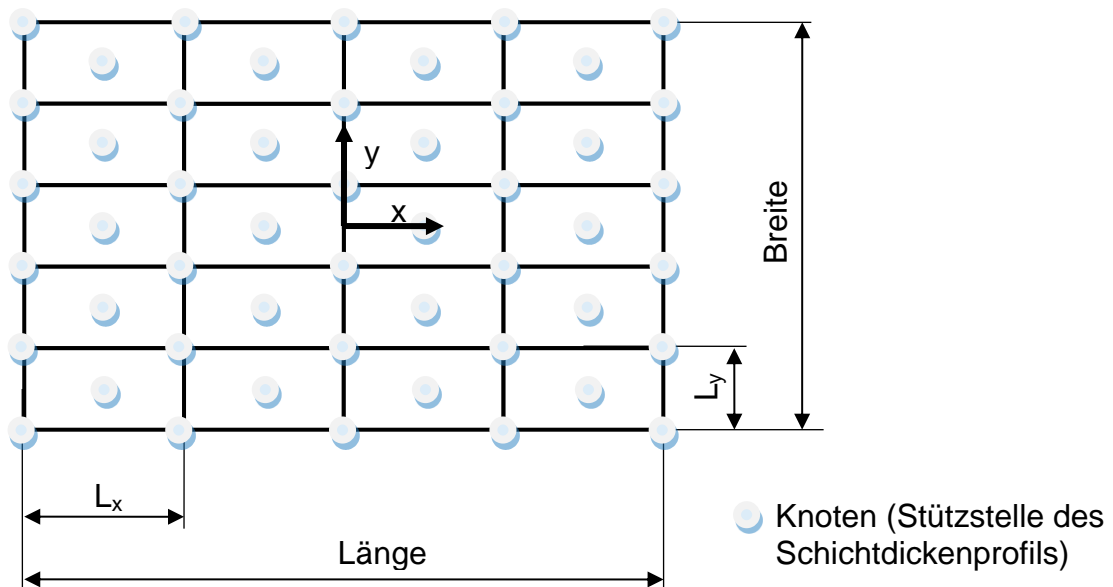


Abbildung 4-7: Räumliche Diskretisierung des Laderaums

Der Flächeninhalt eines Flächenelements wird mit A bezeichnet:

$$A = L_x \cdot L_y$$

Formel 4-7: Flächeninhalt eines Flächenelements

Jedes diskrete Flächenelement besitzt in der Mitte eine Stützstelle für das Schichtdickenprofil. Zusätzlich sind an den Eckpunkten Stützstellen vorhanden, die von allen angrenzenden Flächenelementen geteilt werden (Verbindungsknoten VK). Zur Vermeidung von Rundungsfehlern sind an den Knoten nur diskrete Werte erlaubt (Diskretisierung: 1mm). Zwischen den Stützstellen findet lineare Interpolation statt. In Abbildung 4-8 ist ein einzelnes, freistehendes Flächenelement dargestellt.

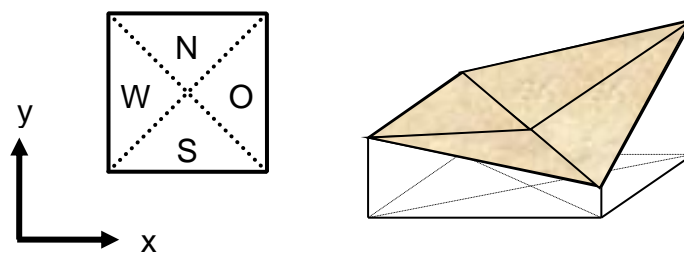


Abbildung 4-8: Diskretes Flächenelement

Jedes Flächenelement ist in vier Dreiecke eingeteilt, die entsprechend den Himmelsrichtungen mit N, O, S und W bezeichnet werden.

4.3.3.2 Ladungsvolumen eines Flächenelements

Das Ladungsvolumen eines Elements wird berechnet als Summe der Volumina fünf einzelner Pyramiden (eine mit rechteckiger Grundfläche und Spitze über dem Zentralknoten und vier mit dreieckiger Grundfläche und Spitze über einem Eckpunkt).

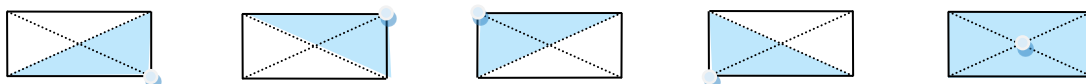


Abbildung 4-9: Knoten-Pyramiden eines Flächenelements

$$V = \frac{1}{3} \cdot A \cdot \left[D + \frac{1}{2} (D_{NO} + D_{SO} + D_{SW} + D_{NW}) \right]$$

Einheit: 1m³

Formel 4-8: Volumen eines Flächenelements

Superposition ist aufgrund der Linearität zulässig. D bezeichnet die Schichtdicke im Zentrum und D_{NO} , D_{SO} , D_{SW} und D_{NW} die Schichtdicken an den Ecken des Flächenelements.

4.3.3.3 Volumenstrom

Für jedes Teildreieck in jedem Flächenelement wird der Volumenstrom separat berechnet. Innerhalb eines Teildreiecks ist der Gradient des Höhenprofils an jedem Punkt gleich. Für das nördliche Teildreieck beträgt der Gradient beispielsweise

$$\nabla h_N = \left(\begin{array}{c} \frac{h_{S,NO} - h_{S,NW}}{L_x} \\ \frac{h_{S,NO} + h_{S,NW} - 2 \cdot h_{S,FE}}{L_y} \end{array} \right)$$

Formel 4-9: Berechnung des Gradienten des Höhenprofils

$h_{S,FE}$ bezeichnet die Schichthöhe im Zentrum, $h_{S,NO}$ und $h_{S,NW}$ die Schichthöhen in den entsprechenden Ecken des Flächenelements. Für die anderen Teildreiecke erfolgt die Berechnung unter Berücksichtigung der Ausrichtung und der zugehörigen Eckpunkte analog. Aus dem Gradienten lässt sich mittels der modifizierten Formel 4-6 die Volumenstromdichte berechnen:

$$\dot{v} = -C_1 \cdot \nabla h \cdot \left(1 - \frac{C_2}{\|\nabla h\|}\right) \cdot \theta(\|\nabla h\| - C_3)$$

$$\text{Einheit: } \left[\frac{m^3}{m \cdot s}\right]$$

$$\text{mit } C_1 = \frac{C_m}{\rho} \text{ und } C_2 = C_3 = \tan \varphi_c$$

Formel 4-10: Schüttgutmodell Volumenstromdichte

C_1 , C_2 , C_3 und ρ sind Materialeigenschaften.

4.3.3.4 Volumenaustausch

Das Fließen des Schüttguts wird durch den Volumenaustausch zwischen einem Verbindungsknoten und den eins bis vier daran anknüpfenden Flächenelementen dargestellt. Flächenelemente können untereinander kein Volumen direkt austauschen, ebenso können Verbindungsknoten kein Volumen mit anderen Verbindungsknoten direkt austauschen.

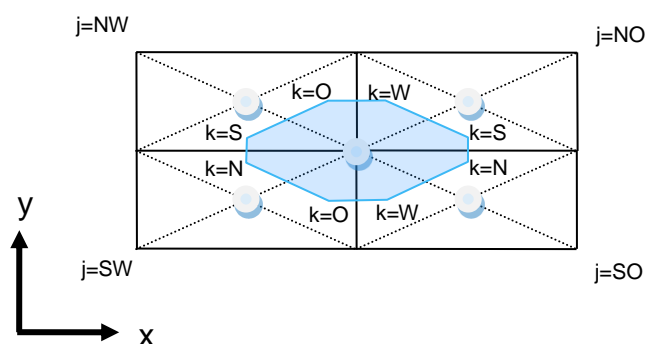


Abbildung 4-10: Verbindungsknoten mit vier angrenzenden Flächenelementen

In Abbildung 4-10 ist ein Verbindungsknoten mit seinem achteckigen Kontrollbereich und vier anknüpfenden Flächenelementen dargestellt. Die Ecken des Kontrollbereichs befinden sich in den Flächenschwerpunkten der Teildreiecke. Die Benennung der Teildreiecke erfolgt nach dem Schema (j,k), wobei j die Lage des Flächenelements bezeichnet und k die Lage des Teildreiecks innerhalb des Flächenelements.

Volumenströme, die in einem Flächenelement über die Grenzen des Kontrollbereichs fließen, werden zwischen dem Verbindungsknoten und dem betreffenden Flächenelement ausgetauscht. Ein Volumenaustausch entspricht einer Dickenänderung an den entsprechenden Knoten. Weil die Grundflächen der zugeordneten Pyramiden (Abbildung 4-11) unterschiedlich sind, ist die Volumenänderung pro Dickenänderung für die Knoten unterschiedlich. Für den zentralen Knoten eines Flächenelements beträgt sie

$$\Delta V_{FE} = \frac{1}{3} \cdot A \cdot \Delta D$$

Formel 4-11: Volumenänderung eines Flächenelements

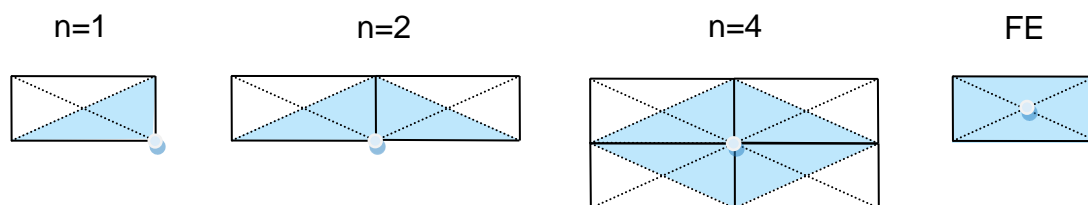


Abbildung 4-11: Grundflächen der Knoten-Pyramiden

Bei einem Verbindungsknoten ist die Volumenänderung abhängig von der Anzahl n der anknüpfenden Flächenelemente.

$$\Delta V_{VK} = \frac{1}{3} \cdot \left(n \cdot \frac{A}{2} \right) \cdot \Delta D$$

Formel 4-12: Volumenänderung eines Verbindungsknotens

Der Volumenaustausch wird nacheinander für jeden Verbindungsknoten berechnet. Die Kontrollbereichsgrenze zwischen einem Verbindungsknoten und dem nordöstlich angrenzenden Flächenelement ($j = NO$) ist beispielhaft in Abbildung 4-12 dargestellt.

Ogleich der Kontrollbereich des Verbindungsknotens auch an die Kontrollbereiche von bis zu vier weiteren Verbindungspunkten (hier nicht dargestellt) angrenzt, werden Ströme über diese Grenzlinien zunächst ebenfalls dem Flächenelement zugeschlagen. Bei der Bilanzierung der Ströme zwischen den anderen Verbindungsknoten und dem Flächenelement werden die Volumina korrekt weiterverteilt.

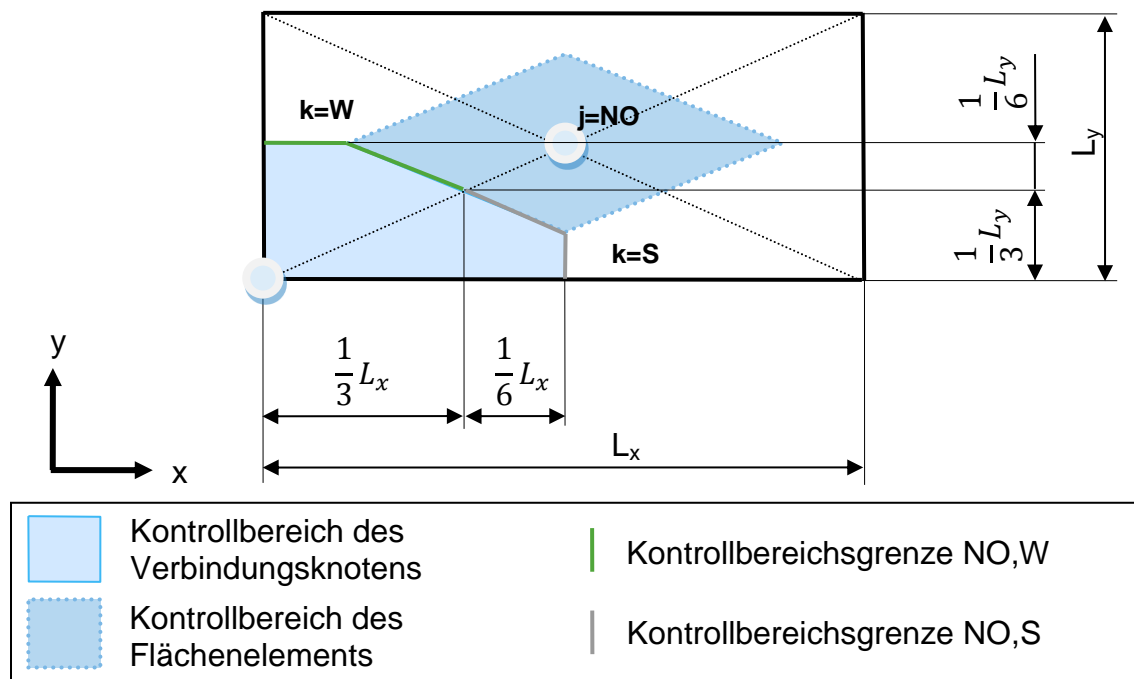


Abbildung 4-12: Kontrollbereiche zur Bilanzierung des Volumenstroms

Für das in einem Zeitschritt Δt vom nordöstlichen Flächenelement in den Kontrollbereich des Verbindungsknotens fließende Volumen ergibt sich:

$$\Delta V_{NO \rightarrow VK} = \left(-\dot{v}_{NO,S,x} \cdot \frac{1}{3} L_y - \dot{v}_{NO,S,y} \cdot \frac{1}{6} L_x - \dot{v}_{NO,W,x} \cdot \frac{1}{6} L_y - \dot{v}_{NO,W,y} \cdot \frac{1}{3} L_x \right) \cdot \Delta t$$

Formel 4-13: Bilanzierung des Volumenstroms

4 Entwurf des Simulationsmodells

Diese Formel lässt sich mit den Koeffizienten f nach Tabelle 4-1 wie folgt verallgemeinert darstellen

$$\Delta V_{j \rightarrow VK} = \frac{1}{6} \cdot \left(\sum_k f_{jkx} \cdot \dot{v}_{jkx} \cdot L_y + \sum_k f_{jky} \cdot \dot{v}_{jky} \cdot L_x \right) \cdot \Delta t$$

$$j \in \{NO; NW; SW; SO\}, k \in \{N; O; S; W\}$$

Formel 4-14: Verallgemeinerte Bilanzierung des Volumenstroms

j	f _{jNx}	f _{jNy}	f _{jOx}	f _{jOy}	f _{jSx}	f _{jSy}	f _{jWx}	f _{jWy}
NO	0	0	0	0	-2	-1	-1	-2
NW	0	0	+1	-2	+2	-1	0	0
SW	+2	+1	+1	+2	0	0	0	0
SO	-2	+1	0	0	0	0	-1	+2

Tabelle 4-1: Koeffizienten zur Bilanzierung des Volumenstroms

Die resultierende Schichtdickenänderung beim Volumenaustausch zwischen einem Verbindungsknoten und dem angrenzenden Flächenelement j beträgt für den Verbindungsknoten (vgl. Formel 4-12)

$$\Delta D_{VK} = + \frac{6 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{n \cdot A}$$

und für den Zentralknoten des Flächenelements j (vgl. Formel 4-11)

$$\Delta D_j = - \frac{3 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{A}$$

Diese Formeln lassen sich zusammenfassen zu:

$$\Delta D = \beta \cdot \frac{6 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{4 \cdot A}$$

$$\text{mit } \beta = \begin{cases} +4/n & \text{für einen Verbindungsknoten} \\ -2 & \text{für ein Flächenelement} \end{cases}$$

Formel 4-15: Verallgemeinerte Schichtdickenänderung

Falls durch den Volumenaustausch die Zusatzbedingung $D \geq 0$ verletzt würde, wird die maximal mögliche Schichtdickenänderung ausgeführt und die Schichtdickenänderung des Austauschpartners entsprechend reduziert.

4.3.3.5 Optimierung

Zur Reduktion des numerischen Aufwands werden zwei Optimierungen vorgenommen: Zum einen wird für jedes Flächenelement vermerkt, ob sich die Knotenwerte seit der letzten Berechnung der Volumenstromdichte verändert haben. Falls keine Änderung stattfand, kann auf eine Neuberechnung der Volumenstromdichten in den Teildreiecken des Flächenelements verzichtet werden.

Zum anderen ist bei Betrachtung aller oben aufgeführten Rechenschritte ersichtlich, dass durch geschickte Normierung einige Rechenoperationen eingespart werden können. Dadurch ergeben sich für die Berechnung neue, normierte Größen, die mit einem Zirkumflex (^) gekennzeichnet werden.

Jedes Teildreieck schließt an zwei Verbindungsknoten an und geht deshalb in zwei Bilanzierungen ein. Deshalb werden so viele Rechenschritte wie möglich in die Berechnung der Volumenströme vorgezogen, welche pro Zeitschritt nur einmal durchgeführt wird. Da die Schichtdicke in der Einheit [mm] diskretisiert ist, wird die gesamte Rechnung in [mm] durchgeführt, um die Umrechnung zwischen [m] und [mm] einzusparen.

Durch Einsetzen von Formel 4-14 in Formel 4-15, Kürzen und Umstellen erhält man

$$\Delta D = \beta \cdot \frac{6 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{4 \cdot A} = \beta \cdot 1000 \frac{mm}{m} \cdot \underbrace{\left(\sum_k f_{jkx} \cdot \frac{\dot{v}_{jkx}}{4 \cdot L_x} + \sum_k f_{jky} \cdot \frac{\dot{v}_{jky}}{4 \cdot L_y} \right)}_{:= \widehat{\Delta V}_{j \rightarrow VK}} \cdot \Delta t$$

$$\Delta D = \beta \cdot \widehat{\Delta V}_{j \rightarrow VK}$$

Formel 4-16: Knotendickenänderung (numerische Umsetzung)

Definiert man nun

$$\widehat{\mathbf{v}} := \begin{pmatrix} \frac{1000 \frac{mm}{m} \cdot \dot{v}_x}{4 \cdot L_x} \\ \frac{1000 \frac{mm}{m} \cdot \dot{v}_y}{4 \cdot L_y} \end{pmatrix} = -C_1 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1000 \frac{mm}{m} \cdot \nabla h_x}{4 \cdot L_x} \\ \frac{1000 \frac{mm}{m} \cdot \nabla h_y}{4 \cdot L_y} \end{pmatrix} \cdot \left(1 - \frac{C_2}{\|\nabla h\|} \right) \cdot \Theta(\|\nabla h\| - C_3)$$

Formel 4-17: Volumenstromdichte (numerische Umsetzung)

so ergibt sich für

$$\widehat{\Delta V}_{j \rightarrow VK} = \left(\sum_k f_{jkx} \cdot \widehat{v}_{jkx} + \sum_k f_{jky} \cdot \widehat{v}_{jky} \right) \cdot \Delta t$$

Formel 4-18: Austauschvolumen (numerische Umsetzung)

Der Gradient des Höhenprofils sowie die Konstanten C2 und C3 werden direkt in der Einheit $\left[\frac{mm}{m}\right]$ berechnet bzw. gespeichert, so dass auch diese Umrechnung nicht explizit durchzuführen ist.

4.3.3.6 Erkennen stationärer Zustände

Nach endlicher Zeit ohne äußere Einwirkung auf das Schüttgut (Massenzugabe oder -entnahme) erreicht dieses einen stationären Zustand, in dem der kritische Schüttwinkel an keiner Stelle überschritten ist. Liegt ein solcher Zustand vor, braucht das Schüttgutmodell nicht mehr simuliert werden, bis eine neue Einwirkung auftritt. Ein stationärer Zustand wird erkannt, wenn in zwei aufeinanderfolgenden Berechnungsschritten an keinem Knoten eine Schichtdickenänderung auftritt.

4.3.3.7 Maximale Zeitschrittweite

Die Volumenstromdichte wird zu Beginn eines Zeitschrittes berechnet und für die weitere Dauer des Zeitschrittes als konstant angenommen. Bei zu groß gewählter Zeitschrittweite, wird zu viel Volumen zwischen zwei Knoten ausgetauscht und es können Schwingungseffekte auftreten.

Zur Abschätzung der maximalen Zeitschrittweite wird ein quadratisches Flächenelement ($L=L_x=L_y$) mit ebenem Boden ($h_B=0$) betrachtet. Die Schichtdicke D am zentralen Knoten ist zu Beginn des Zeitschrittes gleich Null. Die Schichtdicke an allen Eckknoten ist gleich und wird mit D_E bezeichnet. Der Gradient der Schichthöhe im Teildreieck W (für die anderen Teildreiecke analog) beträgt

$$\nabla h_W = \begin{pmatrix} -\frac{D_E}{\frac{1}{2}L_x} \\ 0 \end{pmatrix}$$

und verursacht (der kritische Schüttwinkel sei überschritten) nach Formel 4-10 eine Volumenstromdichte von

$$\dot{v}_W = -C_1 \cdot \nabla h_W \cdot \left(1 - \frac{C_2}{\|\nabla h\|}\right) \cdot \theta(\|\nabla h\| - C_3) = -C_1 \cdot \begin{pmatrix} -\frac{D_E}{\frac{1}{2}L_x} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \left(1 - \frac{C_2 \cdot L_x}{2 \cdot D_E}\right)$$

in Richtung der positiven x-Achse. Der Betrag der Volumenstromdichte ist für alle Teildreiecke gleich und beträgt

$$\dot{v} = \|\dot{v}_W\| = C_1 \cdot \left(\frac{2D_E}{L} - C_2 \right)$$

Der Volumenaustausch vom Flächenelement zu jedem angrenzenden Verbindungsknoten beträgt

$$\Delta V_{FE \rightarrow VK} = \left(-\dot{v} \cdot \frac{1}{6}L - \dot{v} \cdot \frac{1}{6}L \right) \cdot \Delta t = -\frac{1}{3}L \cdot \dot{v} \cdot \Delta t$$

Für den Verbindungsknoten beträgt die Höhenänderung unter der Grenzwert-Annahme, dass ausschließlich das betrachtete Flächenelement anschließt ($\beta = \frac{4}{1}$), nach Formel 4-15

$$\Delta D_{VK} = \beta \cdot \frac{6 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{4 \cdot A} = \frac{4}{1} \cdot \frac{6 \cdot \left(-\frac{1}{3}L \dot{v} \Delta t \right)}{4 \cdot L \cdot L} = -\frac{2\dot{v}\Delta t}{L} = -\frac{2C_1}{L} \left(\frac{2D_E}{L} - C_2 \right) \cdot \Delta t$$

und für den zentralen Knoten des Flächenelements ($\beta = -2$)

$$\Delta D_{FE1} = \beta \cdot \frac{6 \cdot \Delta V_{j \rightarrow VK}}{4 \cdot A} = \dots = -\frac{1}{2} \cdot \Delta D_{VK}$$

Zumal der Zentralknoten aber mit vier Verbindungsknoten im Austausch steht, beträgt die tatsächliche Höhenänderung

$$\Delta D_{FE} = 4 \cdot \Delta D_{FE1} = -2 \cdot \Delta D_{VK}$$

Die maximale Zeitschrittweite wird so gewählt, dass nach dem Zeitschritt exakt der kritische Schüttwinkel ϕ_c vorliegt:

$$\frac{(D_E + \Delta D_{VK}) - (0 + \Delta D_{FE})}{\frac{1}{2}L} = \tan \phi_c = C_2$$

Durch Einsetzen von ΔD_{VK} , ΔD_{FE} und Auflösen nach Δt ergibt sich

$$\Delta t = \frac{L^2}{12 \cdot C_1}$$

Formel 4-19: Maximale Zeitschrittweite des Schüttgutmodells

Die maximale Zeitschrittweite wird bestimmt durch die Wahl der räumlichen Diskretisierung und die Fließfähigkeit des Materials. Je feiner die Ortsdiskretisierung und je fließfähiger das Material ist, desto kleiner muss die maximale Zeitschrittweite für die Berechnung des Schüttgutmodells zu wählen.

4.3.4 Massenzugabe und -entnahme

Der Zugriff auf die Ladung muss für die anderen Simulationsobjekte ohne Kenntnis des internen Aufbaus des Schüttgutmodells möglich sein. Deshalb wurde eine Zugriffsfunktion entwickelt, die die Massenzugabe (Entnahme wird als Zugabe einer negativen Masse behandelt) über eine einfache Schnittstelle ermöglicht. Eine Materialverschiebung ist durch eine Entnahme von Material und anschließende Zugabe an einer anderen Stelle realisierbar.

Es kann immer nur auf die oberste Ladungsschicht eines Laderaums zugegriffen werden. Nur gleichartiges Material ist zuführbar (Gemische werden nicht unterstützt). Ladung kann nicht an einem Punkt, sondern nur über eine Fläche verteilt, und (aufgrund des diskreten Aufbaus des Schüttgutmodells) nur in diskreten Mengen hinzugefügt werden.

Für eine Massenzugabe müssen nachfolgende Parameter angegeben werden:

- Zugriffsfläche, auf die das Material verteilt wird
- Menge (Masse) des zugegebenen Materials

Als Zugriffsfläche wird nur eine quadratische Fläche Q unterstützt, die parallel zu den Laderaumachsen ausgerichtet ist. Sie wird durch den Mittelpunkt P des Quadrats und die halbe Kantenlänge r definiert. Soll die Masse auf eine anders geformte Fläche verteilt werden, muss diese vom aufrufenden Objekt durch mehrere Quadrate angenähert werden.

Zumal das Schüttgutmodell strikt volumenorientiert implementiert ist, wird die Zugabemasse nach Formel 4-20 in ein entsprechendes Zugabevolumen umgerechnet.

$$\Delta V_{Zugabe} = \frac{\Delta M_{Zugabe}}{\rho}$$

Formel 4-20: Zugabevolumen

Im nächsten Schritt wird die Schichtdickenänderung bestimmt, die durch die Massenzugabe verursacht wird. Dazu werden alle Knoten, die innerhalb der Zugriffsfläche Q liegen, als Spitzen freistehender Pyramiden betrachtet und die Grundflächen dieser Pyramiden (vgl. Abbildung 4-11) zur gemeinsamen Grundfläche G aufsummiert. Jeder Flächenelement-Zentralknoten geht mit dem Wert A in G ein. Der Beitrag eines Verbindungsknotens hängt von der Anzahl n der daran angrenzenden Flächenelemente ab.

$$G = \sum_{FE \in Q} A + \sum_{VP \in Q} n \cdot \frac{A}{2} = \left(\sum_{FE \in Q} 2 + \sum_{VP \in Q} n \right) \cdot \frac{A}{2}$$

Die Änderung der Schichtdicke an jedem Knoten innerhalb der Zugriffsfläche beträgt

$$\Delta D = \frac{3 \cdot \Delta V_{Zugabe}}{G}$$

Formel 4-21: Schichtdickenänderung durch Massenzugabe

Aufgrund der Diskretisierung sind nur diskrete Schichtdickenänderungen möglich. Außerdem muss die Zugabe bzw. Entnahme begrenzt werden, insofern die entsprechende Materialmenge nicht vorhanden ist ($D+\Delta D < 0$) oder der Umfang der zur diskreten Darstellung der Schichtdicke verwendeten Maschinenzahlen nicht ausreicht ($D+\Delta D > N_{\max}$). Deshalb wird aus der an jedem Knoten tatsächlich vorgenommenen Schichtdickenänderung die tatsächlich durchgeführte Volumenänderung berechnet. Die im Allgemeinen auftretende Abweichung von der gewünschten Volumenänderung wird durch eine weitere Schichtdickenänderung an einem einzelnen Flächenelement im Zentrum der Zugriffsfläche Q so gut wie möglich ausgeglichen, wobei wiederum nur diskrete Volumenänderungen möglich sind.

Dem Simulationsobjekt, welches die Materialzugabe veranlasst hat, wird abschließend die tatsächliche Zugabemasse zurückgemeldet. Im Allgemeinen weicht diese von der gewünschten Zugabe ab. Soll im Mittel ein bestimmter Massenstrom erreicht werden, müssen die gewünschte und die tatsächlich erfolgte Massenzugabe über mehrere Zeitschritte bilanziert und ausgeglichen werden.

4.3.4.1 Numerische Umsetzung

Zur Einsparung von Rechenoperationen werden die verwendeten Größen in geeignetem Maße normiert. Die normierten Größen werden mit einem Zirkumflex ($\hat{}$) gekennzeichnet. Das Zugabevolumen wird auf das Volumen einer Pyramide mit der Grundfläche $A/2$ und der Höhe 1mm normiert. Die gemeinsame Grundfläche G wird auf die Fläche $A/2$ normiert.

$$\hat{\Delta V}_{Zugabe} = \frac{\Delta V_{Zugabe}}{\frac{1}{3} \cdot \frac{A}{2} \cdot 1mm} = 6000 \cdot \frac{\Delta M_{Zugabe}}{\rho \cdot A \cdot 1m}$$

$$\hat{G} = \left(\sum_{FE \in Q} 2 + \sum_{VP \in Q} n \right)$$

$$\Delta D = \text{round} \left(\frac{\hat{\Delta V}_{Zugabe}}{\hat{G}} \right) [mm]$$

Formel 4-22: Massenzugabe (numerische Umsetzung)

round symbolisiert in Formel 4-22 die Rundung durch Abschneiden aller Nachkommastellen.

4.3.4.2 Kleinste Massenzugabe

Durch die Diskretisierung des Modells ist eine Massenzugabe nur in diskreten Einheiten möglich. Die kleinste Volumenänderung entspricht einer Schichtdickenänderung von 1mm an einem Flächenelement-Zentralknoten:

$$\Delta V_{min} = \frac{1}{3} \cdot A \cdot 1mm$$

$$\Delta m_{min} = \Delta V_{min} \cdot \rho$$

Formel 4-23: Kleinste Massenzugabe

Für $A = 1m^2$ und $\rho = 1000 kg/m^3$ ergibt sich beispielsweise $\Delta m_{min} = 3, \bar{3} \cdot 10^{-1} kg$.

4.3.4.3 Massenbilanzierung

Die Ladungsmasse einer Schicht ist zu jedem Zeitpunkt berechenbar (vgl. Kapitel 4.3.3.2); dafür ist aber ein erheblicher numerischer Aufwand erforderlich. Zur Steigerung der Simulationsgeschwindigkeit wird die berechnete Ladungsmasse deshalb durch fortlaufende Bilanzierung der Massenzugaben bzw. -entnahmen aktualisiert. Bei diesem Verfahren können sich Rundungsfehler akkumulieren. Um diesem Effekt entgegen zu wirken wird die Ladungsmasse in regelmäßigen Zeitabständen (nach jeweils zehn simulierten Minuten) neu berechnet.

4.4 Ballasttanks

Ballasttanks werden als punktförmige Massen modelliert, die eine feste Position im Schiff besitzen. Die aktuelle Ballastmasse kann frei zwischen Null und einem konfigurierbaren Maximalwert festgelegt werden. Falls Treibstofftanks in der Simulation berücksichtigt werden sollen, sind diese auf die gleiche Weise beschreibbar.

Die Position im Schiff und die maximale Ballastmasse sind Objekteigenschaften des Ballasttanks. Die aktuelle Ballastmasse ist eine Zustandsgröße. Sie ist über den Steuerungsdialog definierbar.

4.5 Entladeanlage

Die Entladeanlage beschreibt das gesamte Umfeld, in dem die Schiffsentladung stattfindet. Dies umfasst die Ausmaße der simulierten Umgebung (Kapitel 4.5.1), den Wasserpegel (Kapitel 4.5.2) und die zur Schiffsentladung zur Verfügung stehenden Maschinen und Hilfseinrichtungen und ihre Anordnung (Kapitel 4.7 und 4.8).

4.5.1 Abmessungen

Die Simulationsumgebung ist in einen Land- und einen Seebereich unterteilt (Abbildung 4-13).

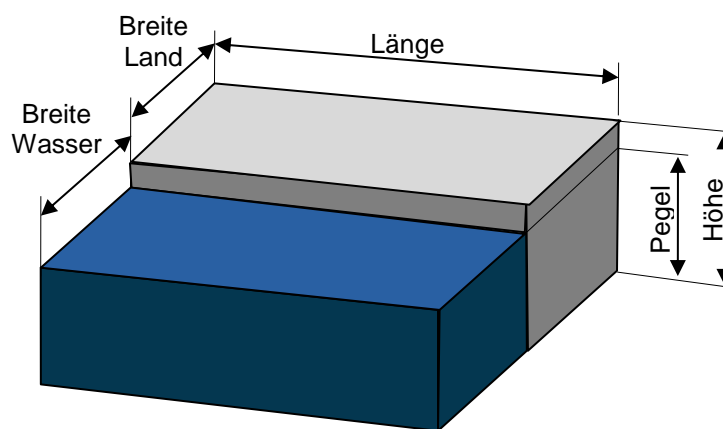


Abbildung 4-13: Abmessungen der Entladeanlage

Die Abmessungen sind Objekteigenschaften der Entladeanlage. Sie wirken sich nur auf die Darstellung im 3D-Modell aus und haben keine weiteren Implikationen. Objekte (Entlader, Schiffe, etc.) können beliebig – auch außerhalb der festgelegten Abmessungen – positioniert werden.

4.5.2 Tide

Die Gezeiten werden durch einen zeitveränderlichen Wasserpegel modelliert.

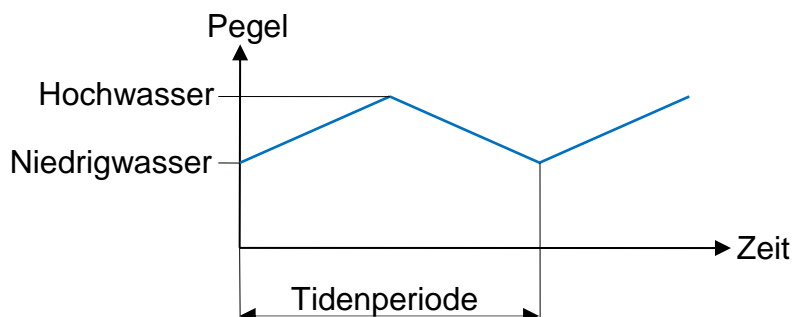


Abbildung 4-14: Gezeitenmodellierung

Die Tidenperiode sowie der Pegel bei Hoch- und Niedrigwasser (Bezugsniveau siehe Abbildung 4-13) sind konfigurierbar und müssen an die aktuellen örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Der Tidengang wird durch lineare Interpolation zwischen Hoch- und Niedrigwasser angenähert.

Die Kennwerte des Tidengangs (Pegel bei Hoch- und Niedrigwasser sowie die Tidenperiode) sind Eigenschaften der Entladeanlage. Der aktuelle Pegel ist eine Zustandsgröße und kann über den Steuerungsdialog festgelegt werden.

Zur Positionierung weiterer Simulationsobjekte entsprechend des Wasserstandes, bietet das Modell der Entladeanlage eine einfache Schnittstelle zur Abfrage der z-Koordinate der Wasseroberfläche.

4.6 Entlader

Alle Entladertypen werden von einer gemeinsamen Basisklasse abgeleitet, die die Positionierung des Entladers steuert und eine einheitliche Schnittstelle zur Ansteuerung der Entladefunktion zur Verfügung stellt. Die tatsächliche Umsetzung der Steuerbefehle in Bewegungen ist abhängig vom kinematischen Konzept des Entladers und wird in abgeleiteten Klassen implementiert. Dort können auch das 3D-Modell und die Kollisionsbereiche für den Entlader, abhängig von der Bauart und Gelenkstellung, definiert werden. Der Vorgang der Ladungsentnahme ist abhängig vom

Fördermechanismus und der konstruktiven Ausführung des Aufnahmebereichs und muss deshalb ebenfalls in den abgeleiteten Klassen implementiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden entsprechend der Anforderungen aus Kapitel 3.1.3 ein kontinuierlicher Entladertyp mit drei rotatorischen Freiheitsgraden und ein diskontinuierlicher Entladertyp implementiert. Die Modellierung dieser spezifischen Entladertypen werden in Anhang A beschrieben.

4.6.1 Positionierung des Entladers

Entlader besitzen eine feste oder mit bestimmten Einschränkungen veränderliche Position im Raum. Für jeden Entlader wird ein lokales Koordinatensystem definiert. Die Position eines Entladers kann durch die Translation und Rotation seines lokalen Koordinatensystems gegenüber dem globalen beschrieben werden. Als Rotation wird nur eine Drehung um die z-Achse zugelassen. Die Position eines Entladers wird durch die Koordinaten (x, y, z, φ_z) beschrieben.

Für jeden Entlader kann eine Ruheposition (Objekteigenschaft) konfiguriert werden, die als Ausgangsposition für neue Simulationen dient. Die Positionierungsmöglichkeiten, über die ein Entlader verfügt, sowie seine Fahr- und Rotationsgeschwindigkeit können als Objekteigenschaft festgelegt werden. Unterstützt werden die folgenden Positionierungsmodi:

- stationär
- schienengebunden
- schwimmend
- eben
- frei

Für den Entlader kann eine Sollposition vorgegeben werden. Ist- und Sollposition sind Zustandsgrößen des Entladers. Die Sollpositionsvorgabe kann in verschiedenen – auch bewegten – Bezugssystemen erfolgen:

- in globalen Koordinaten
- relativ zur Ruheposition des Entladers
- relativ zum zugeordneten Laderaum

- relativ zum zugeordneten Schiff
- relativ zur Schiene (nur bei schienengebundenen Entladern)

Zur Umrechnung von Koordinatenangaben aus den verschiedenen Bezugssystemen ins globale Koordinatensystem bzw. vom globalen Koordinatensystem in andere Bezugssysteme stehen spezielle Methoden zur Verfügung.

In jedem Simulationsschritt wird die Sollposition ins globale Koordinatensystem transformiert. Der weitere Ablauf ist abhängig vom gewählten Bewegungsmodus. Bei schienengebundenen Entladern wird die Position auf der Schiene berechnet, die zur Sollposition den kürzesten Abstand aufweist. Bei schwimmenden oder in der Ebene positionierbaren Entladern wird die z-Koordinate der Sollposition an die z-Koordinate der Wasseroberfläche bzw. der Ruheposition angepasst. Bei frei beweglichen Entladern wird keine Anpassung vorgenommen. Anschließend wird der Entlader um die in einem Simulationsschritt (mit der festgelegten Fahrgeschwindigkeit) maximal mögliche Strecke in Richtung der Zielposition bewegt.

Bei schienengebundenen Entladern wird die Position auf der Schiene als zusätzliche Zustandsgröße verwendet. Wenn der Entlader über die Schienenlänge hinaus fährt, wird die Bewegung gestoppt und eine Fehlermeldung erzeugt.

4.6.2 Bewegung der Entladerspitze bei kontinuierlichen Entladern

Als Entladerspitze wird das Bauteil bezeichnet, mit dem die Ladung entnommen wird. Die Ist-Position der Entladerspitze kann aus der aktuellen Stellung der Gelenke berechnet werden. Dazu ist für jeden Entladertyp eine spezielle Vorwärtskinematik erforderlich, die aus den Geometriedaten und den Gelenkstellungen die Position der Entladerspitze im lokalen Koordinatensystem des Entladers bestimmt.

Für die Entladerspitze kann die Sollposition in allen Bezugssystemen vorgegeben werden, die auch bei der Positionierung des Entladers möglich sind. Zusätzlich kann die Angabe auch im lokalen Koordinatensystem des Entladers erfolgen. Die Sollposition kann über den Steuerungsdialog des Entladers oder durch Skriptbefehle vorgegeben werden.

Die Anzahl der erreichbaren Positionen ist durch die Kinematik des Entladers begrenzt. Deshalb muss für jedes kinematische Konzept eine Methode zur Verfügung

gestellt werden, mit der die Erreichbarkeit einer bestimmten Position überprüft werden kann.

Zusätzlich kann durch Vorgabe eines Bewegungsmodus bestimmt werden, auf welche Weise die Spitze von der Ist- zur Sollposition bewegt wird:

- Normal: Die Bewegung wird so durchgeführt, dass die Zielposition möglichst schnell erreicht wird, z. B. linear im Konfigurationsraum.
- Kartesisch: Die Entladerspitze wird in einer geraden Linie bewegt.
- Manuell: Die Sollpositionsvorgabe wird ignoriert. Die Bewegung kann stattdessen durch direkte Vorgabe von Sollwerten für die Gelenkstellungen gesteuert werden.

In jedem Simulationsschritt wird die Sollposition in das lokale Koordinatensystem des Entladers transformiert und mit der Ist-Position verglichen. Die tatsächliche Bewegung des Entladers ist Aufgabe der konkreten Implementierung des Entladertyps. Für den implementierten kontinuierlichen Entladertyp mit drei rotatorischen Freiheitsgraden sind die kinematischen Beziehungen im Anhang A beschrieben.

4.6.3 Ladungsentnahme

Ein Entlader kann zu jedem Zeitpunkt höchstens einem Laderaum zugeordnet sein. Aus diesem kann Ladung entnommen werden. Der Vorgang der Ladungsentnahme ist abhängig vom Förderprinzip und den Konstruktionsmerkmalen des Entladers und wird deshalb in den konkreten Implementierungen realisiert. Die Masse der entnommenen Ladung und der Massenstrom werden an die Basisklasse zurückgeliefert, damit diese Informationen über eine einheitliche Schnittstelle zugänglich gemacht werden können. Bei diskontinuierlichen Entladern muss der über eine Taktdauer gemittelte Massenstrom zurückgeliefert werden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit implementierten kontinuierlichen Entladertyp wurde ein Fördermechanismus modelliert, mit dem durch Anpassung von Parametern das Verhalten aller kontinuierlichen Entlader, d. h. sowohl eines mechanischen (z. B. Ketten-, Schneckenförderer) als auch eines pneumatischen Entladers, simuliert werden kann (Anhang A).

4.7 Schiene

In der Simulation wird eine Schiene durch die Koordinaten ihres Anfangspunkts, ihre Ausrichtung und ihre Länge beschrieben. Zusätzlich kann die Farbe und die Breite ihrer Darstellung im 3D-Modell festgelegt werden. Jede Schiene besitzt ein lokales Koordinatensystem, dessen Ursprung im Anfangspunkt liegt. Die x-Achse verläuft entlang der Schiene, die z-Achse weist nach oben. Die Position der Schiene im Raum wird durch die Translation und Rotation dieses Koordinatensystems gegenüber dem globalen Koordinatensystem angegeben.

Die Schiene stellt über eine Schnittstelle eine Methode zur Verfügung, um aus einer Schienenposition die globalen Koordinaten des zugehörigen Punktes zu berechnen. Außerdem kann die Schienenposition berechnet werden, die einem gegebenen Punkt P am nächsten liegt.

Eine Schiene kann eine beliebige Anzahl von untergeordneten Objekten besitzen. Es wird keine Vorgabe über die Reihenfolge und die Position dieser Objekte gemacht. Die Positionierung findet durch die Objekte selbst statt.

4.8 Zuführgerät

Zur Simulation der Restentleerung wurden sowohl ein einfaches, fiktives Zuführgerät implementiert, das die Ladung aufnimmt und in der Mitte des Laderaums wieder ablädt als auch der spezielle Typ Planierraupe. Beide werden im Anhang A beschrieben. Das Modell des fiktiven Zuführgerätes dient der behelfsmäßigen Simulation der Restentleerung im Falle abzubildender Zuführgeräte, die nicht dem Typ Planierraupe entsprechen.

5 Programmarchitektur

Das in Kapitel 3 entworfene Simulationsmodell wurde in ein Computerprogramm umgesetzt, welches in der Programmiersprache C# entwickelt wurde. Das Simulationsmodell wird durch eine Menge von Objekten beschrieben, die miteinander interagieren können. Das Programm ermöglicht dem Benutzer die Erstellung und Verwaltung der Objekte sowie die Steuerung und Visualisierung des Simulationsablaufs.

5.1 Grundstruktur

Die Simulation ist in verschiedene logische Komponenten unterteilt, die eigenständig gespeichert und geladen werden können. Die Klasse `CSimulation` verwaltet diese Komponenten und steuert den Simulationsablauf. Komponenten können in der Simulationsdatei (interne Komponente) oder in einer separaten Datei (externe Komponente) gespeichert werden. Durch Speicherung in separaten Dateien ist es möglich

- speicherintensive optionale Komponenten (i.d.R. Zustandsabbilder) nur bei Bedarf in den Hauptspeicher zu laden sowie
- einmal definierte Komponenten (Schiffe, Entladeanlage) in verschiedenen Simulationen zu verwenden.

Jede Simulationskomponente kann selbst ein Simulationsobjekt darstellen und mehrere untergeordnete Simulationsobjekte beinhalten. Die Grundstruktur ist aus Abbildung 5-1 ersichtlich.

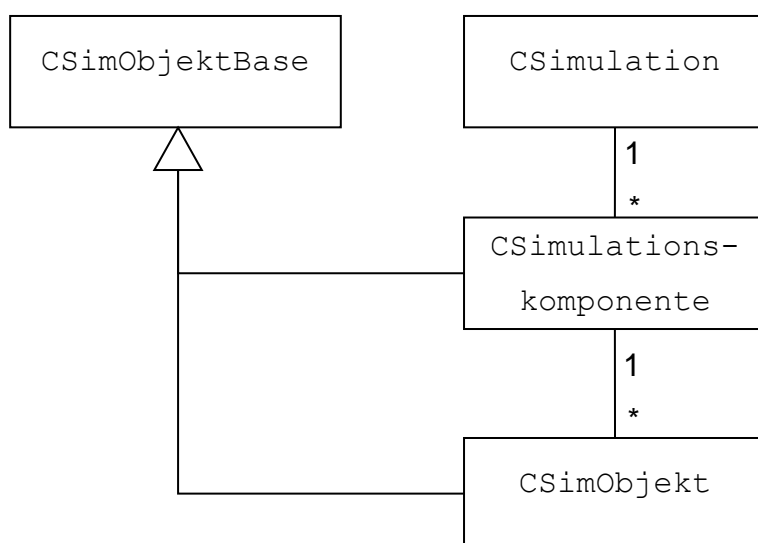


Abbildung 5-1: Grundlegende Programmstruktur

Komponenten werden durch die Klasse `CSimulationskomponente`, Simulationsobjekte durch die Klasse `CSimObjekt` beschrieben. Beide Klassen sind von einer gemeinsamen Basisklasse `CSimObjektBase` abgeleitet.

5.1.1 Die Klasse `CSimulation`

Die Klasse `CSimulation` beschreibt eine aus mehreren Komponenten bestehende Simulation. Die Entladeanlage und alle Schiffe werden durch Simulationskomponenten beschrieben. Andere Komponenten übernehmen spezielle Funktionen: So ist auch jedes Skript, jedes Zustandsabbild, sowie die Objekte zur Steuerung der Datenaufzeichnung, der Kollisionskontrolle und der Skriptabarbeitung (Taskverwaltung) als Simulationskomponente implementiert. Die Klasse `CSimulation` dient als Bindeglied zwischen den verschiedenen Komponenten.

In Abbildung 5-2 sind die einzelnen Komponenten einer Simulation dargestellt. Die Komponenten der oberen Reihe sind vom Benutzer wählbar. Die Entladeanlage und alle definierten Schiffe sind erforderlich, damit die Simulation lauffähig ist. Die benutzerdefinierten Zustandsabbilder und Skripte sind optional, d. h. sie können bei Bedarf geladen oder aus dem Speicher entladen werden.

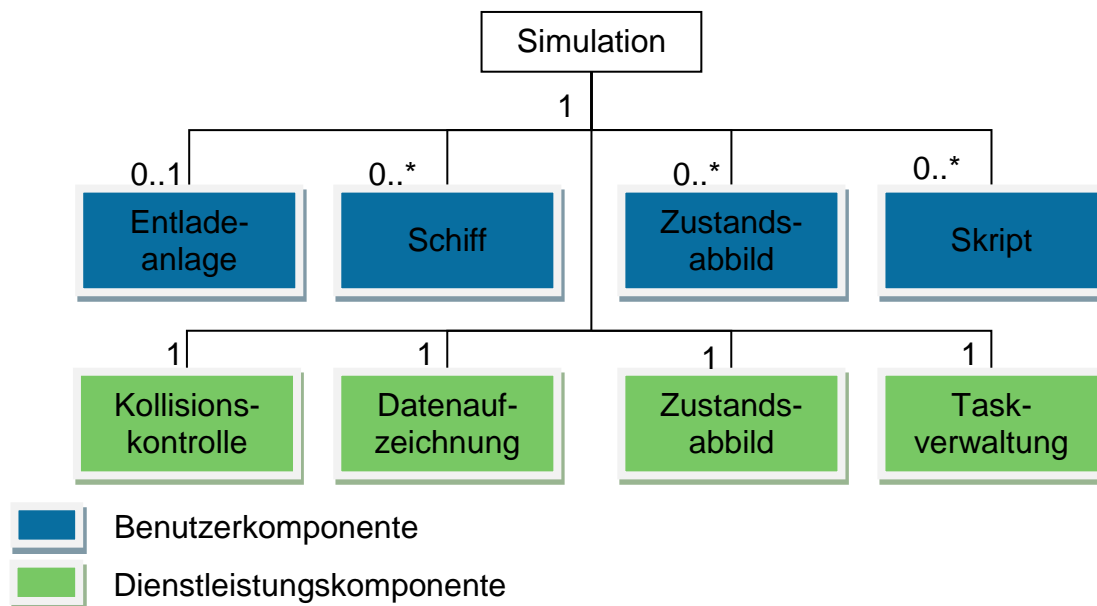


Abbildung 5-2: Liste der Simulationskomponenten

Die Komponenten in der unteren Reihe werden implizit erzeugt und sind für den Benutzer nicht als eigenständige Komponenten erkennbar. Neben den benutzerdefinierten Zustandsabbildern existiert ein weiteres Zustandsabbild, das bei jedem Speichervorgang automatisch aktualisiert wird. Dieser Zustand wird wiederhergestellt, wenn die Simulationsdatei erneut geladen wird.

Jede Komponente besitzt in jeder Simulation, in der sie verwendet wird, eine eindeutige Kennzeichnung, die aus dem Typ der Komponente und einer laufenden Nummer besteht. Auf diese Weise ist jede Komponente einer Simulation eindeutig identifizierbar.

Bevor eine Komponente in einer Simulation verwendet werden kann, muss sie registriert werden. Bei diesem Vorgang wird die Komponente in ein Komponentenverzeichnis aufgenommen, wodurch sie und alle darin enthaltenen Objekte für andere Objekte auffindbar werden. Außerdem wird die Komponente in das 3D-Modell und in die Kollisionskontrolle eingebunden, falls diese Funktionen von der Komponente unterstützt werden.

Die Klasse `CSimulation` stellt darüber hinaus Dienste zum Suchen von Objekten nach bestimmten Kriterien zur Verfügung und steuert den Simulationsablauf.

5.1.2 Die Klasse `CSimObjektBase`

Die abstrakte Basisklasse `CSimObjektBase` definiert Eigenschaften und Methoden, die von allen Simulationsobjekten und Komponenten unterstützt werden.

Jedem Objekt kann ein Name und eine Objektbeschreibung zugewiesen werden. Diese Daten dienen nur der besseren Übersichtlichkeit für den Programmanwender und haben keinen weiteren Einfluss auf die eigentliche Simulation. Um einen eindeutigen Verweis auf ein Objekt zu ermöglichen, stellt jedes Objekt das `Property Referenz` zur Verfügung. Die zurückgelieferte Referenz ist geeignet, das Objekt innerhalb der Simulation auf eindeutige Weise zu identifizieren (Kapitel 5.8).

Die abstrakte Methode `Simulationsschritt(...)` wird zur Durchführung eines Simulationsschritts mit einer angegebenen Dauer aufgerufen. Abgeleitete Klassen überschreiben diese Methode mit modellspezifischem Code.

5.1.3 Die Klasse `CSimulationskomponente`

Jede Komponente kann selbst ein Simulationsobjekt darstellen und zusätzlich mehrere untergeordnete Simulationsobjekte beinhalten. Alle Simulationskomponenten besitzen die gemeinsame Basisklasse `CSimulationskomponente`.

Durch Aufruf der Methode `ErzeugeXml(...)` kann eine Beschreibung der Komponente in Form eines XML¹-Elements erzeugt werden, so dass die Komponente in einer XML-Datei gespeichert werden kann. Durch Überschreibung dieser Methode können die von `CSimulationskomponente` abgeleiteten Klassen dem XML-Element die bei einem speziellen Komponententyp zusätzlich vorhandenen Eigenschaftswerte und untergeordnete Simulationsobjekte hinzuzufügen. Das erzeugte XML-Element enthält keine Zustandsdaten, sondern nur eine Beschreibung der Eigenschaften der Komponente und der darin enthaltenen Objekte.

Zur Speicherung der Simulationskomponenten wurde das XML-Format gewählt, da es die hierarchische Strukturierung und Kapselung von Daten unterstützt. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Format mit einem einfachen Texteditor lesbar ist und somit die Fehlersuche vereinfacht.

¹ Die Extensible Markup Language (XML) ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten, vgl. [Wik-09]

Die Basisklasse `CSimulationskomponente` stellt eine statische Methode zur Verfügung, mit der eine Komponente wieder aus einem XML-Element geladen werden kann. Die Methode verwendet dazu einen für den jeweiligen Komponententyp geeigneten Konstruktor.

Simulationskomponenten können untergeordnete Simulationsobjekte beinhalten. Die in einer Komponente enthaltenen Simulationsobjekte werden mit einer innerhalb der Komponente eindeutigen Identifikationsnummer (Objekt-ID) gekennzeichnet. Sie müssen vor der Verwendung in der Komponente registriert werden. Beim Registrierungsvorgang wird das Objekt in das Objektverzeichnis der Komponente aufgenommen; das 3D-Modell des Objekts - insofern das Objekt über ein 3D-Modell verfügt - wird in das 3D-Modell der Komponente integriert und sein Kollisionsmodell - insofern es die Kollisionsüberwachung unterstützt - in die Kollisionsüberwachung aufgenommen.

Zur Verwaltung einer unbestimmten Anzahl von gleich- oder verschiedenartigen Simulationsobjekten, die in einer Komponente enthalten sind, dient die Klasse `SimObjektListe<T>`. Die Klasse stellt Methoden zum einfachen Verwalten, Speichern und Laden von mehreren Objekten zur Verfügung und sorgt dabei selbsttätig für die korrekte Registrierung der Objekte bei der Komponente.

5.1.4 Die Klasse `CSimObjekt`

Alle Simulationsobjekte, die nicht durch Komponenten beschrieben werden, besitzen die gemeinsame Basisklasse `CSimObjekt`. Ein Simulationsobjekt ist in genau einer Simulationskomponente enthalten.

Die Basisklasse `CSimObjekt` stellt neben der Methode `ErzeugeXml(...)`, mit der eine Beschreibung des Objekts als XML-Element erzeugt werden kann, auch eine statische Methode zur Verfügung, mit der Objekte generisch aus XML-Elementen geladen werden können. D. h. Objekte können geladen werden, ohne dass beim Methodenaufruf bekannt sein muss, welche Art von Objekt durch das zu ladende XML-Element beschrieben wird. Zu diesem Zweck wird beim Speichern eines Objekts dem XML-Element ein Attribut hinzugefügt, das die Art des Objekts kennzeichnet. Beim Laden eines Objekts durch die statische Methode

```
static CSimObjekt Laden(  
    CSimulationskomponente Komponente,  
    XmlNode Xml)
```

wird zunächst dieses Attribut ausgewertet und das Objekt anschließend über den spezifischen Konstruktor des Objekttyps geladen. Auf diese Weise können neue Typen von Simulationsobjekten (z. B. neue Entladertypen oder neue Typen von Zuführgeräten) auf einfache Weise in die bestehenden Instanzen von `SimObjektListe` aufgenommen werden.

5.1.5 Komponentenreferenzen

In der Simulationsdatei wird für jede in der Simulation verwendete Komponente eine Komponentenreferenz gespeichert. Diese enthält entweder direkt eine Beschreibung der Komponente als XML-Element, oder verweist auf eine Datei, welche die Komponente enthält.

Eine Komponentenreferenz wird durch die Klasse `SimKomponentenReferenz_t` beschrieben. Die Beschreibung enthält die folgenden Daten:

- Name der Komponente
- Typ der Komponente
- Identifikationsnummer der Komponente innerhalb der Simulation
- Datum der letzten bekannten Änderung
- Speicherort der Komponente (Pfadangabe oder intern)

sowie (nur für interne Komponenten):

- Komponentendaten als XML-Element

Die Pfadangabe für externe Komponenten kann absolut, relativ zur Simulationsdatei oder relativ zu einem konfigurierbaren Vorlagenverzeichnis erfolgen. Für interne Komponenten wird eine komplette Beschreibung mit allen enthaltenen Objekten als XML-Element direkt in die Komponentenreferenz (und damit in die Simulationsdatei) eingebettet.

Der Name der Komponente und das Datum der letzten Änderung werden ebenfalls in der Komponentenreferenz gespeichert. Mit Hilfe der Informationen über das Datum der letzten Änderung einer Komponente ist erkennbar, ob diese seit der letzten Verwendung verändert wurde und es wird ggf. ein Warnhinweis angezeigt. Der Programmbenutzer muss in diesem Fall prüfen, ob sich die Änderungen an der Komponente auf die Simulation auswirken. Falls ein Objekt aus der Komponente entfernt wurde, sind Skripte, die dieses Objekt verwenden, nicht mehr lauffähig, und insofern Eigenschaften von Objekten verändert wurden, können die vorhandenen Zustandsabbilder für dieses Objekt ungültig sein.

Es stehen Funktionen zum Laden, Entladen und Speichern der Komponente zur Verfügung. Die Komponente wird nach erfolgreichem Laden automatisch in der Simulation registriert und vor dem Entladen deregistriert.

Zusätzlich existiert die generische Klasse `SimKomponentenReferenz_t<T>`, deren Verwendung auf spezielle Komponententypen beschränkt ist.

Die Klasse `SimKomponentenReferenzSammlung_t<T>` dient zur Verwaltung einer unbestimmten Anzahl gleichartiger Simulationskomponenten, z. B. aller in einer Simulation enthaltenen Zustandsabbilder.

Es stehen Funktionen zum Hinzufügen und Entfernen von Komponentenreferenzen zur Verfügung. Jeder neu hinzugefügten Komponentenreferenz wird eine eindeutige Komponenten-ID zugewiesen. Über spezielle Methoden können alle in der Sammlung enthaltenen Komponentenreferenzen geladen oder gespeichert werden.

5.2 Simulationstechnik

Die Simulation kann in verschiedenen Betriebsarten (Kapitel 5.2.1) durchgeführt werden, um einerseits große Zeitabschnitte in kurzer Zeit ablaufen zu lassen oder andererseits einzelne Vorgänge in Echtzeit beobachten zu können.

Die simulierten Objekte sind in der Realität gleichzeitig aktiv und interagieren auf komplexe Weise miteinander. Um dies im Rechner abbilden zu können, wird die simulierte Zeit in diskrete Zeitschritte eingeteilt (Kapitel 5.2.2).

Da die Benutzerinteraktion mit dem Programm während eines Simulationslaufs weiterhin möglich sein soll, wird eine nichtblockierende Verarbeitung verwendet (Kapitel 5.2.3).

5.2.1 Simulationsmodi

Die Simulation ist in verschiedenen Betriebsarten durchführbar. Die Wahl der Betriebsart erfolgt durch Setzen des Property's `SimModus` der Klasse `CSimulation`. Die folgenden Simulationsmodi stehen zur Verfügung:

Pause

Es findet keine automatische Simulation statt. Von externem Code ist jedoch durch Aufruf der Methode `Simuliere(TimeSpan Dauer)` eine vorgegebene Zeitspanne simulierbar. Die Methode blockiert bis zum Abschluss des Vorgangs; während dieser Zeit ist keine Benutzerinteraktion möglich. Deshalb wird dieser Simulationsmodus nicht verwendet.

Einzelstschritt simulieren

Ein zu berechnendes Zeitpensum ist durch das Property `TimeSpan Einzelstschritt_Zeitvorgabe` der Klasse `CSimulation` festlegbar. Die Zeitspanne wird in Einzelschritte unterteilt, welche berechnet werden, wenn freie Rechenkapazität zur Verfügung steht (nicht-blockierend). Wenn das vorgegebene Pensum abgearbeitet wurde, wird die Simulation wieder in den Modus "Pause" versetzt.

Synchrone Simulation

Die Simulation wird in einem wählbaren Verhältnis zur Echtzeit durchgeführt. Das Verhältnis kann über das Property `double Echtzeitfaktor` eingestellt werden. Die Simulation wird nicht-blockierend durchgeführt.

Freilauf

Die Simulation wird durchgeführt, wenn freie Rechenkapazität zur Verfügung steht. Die Geschwindigkeit wird nur durch die verfügbare Rechenkapazität begrenzt.

5.2.2 Quasiparallele Simulation

Um eine quasiparallele Simulation aller Objekte zu erreichen, wird die Simulationszeit in kurze Zeitschritte (Voreinstellung: 1s) unterteilt. Die Länge eines Zeitschritts kann über das Property `TimeSpan` zeitschrittweite festgelegt werden.

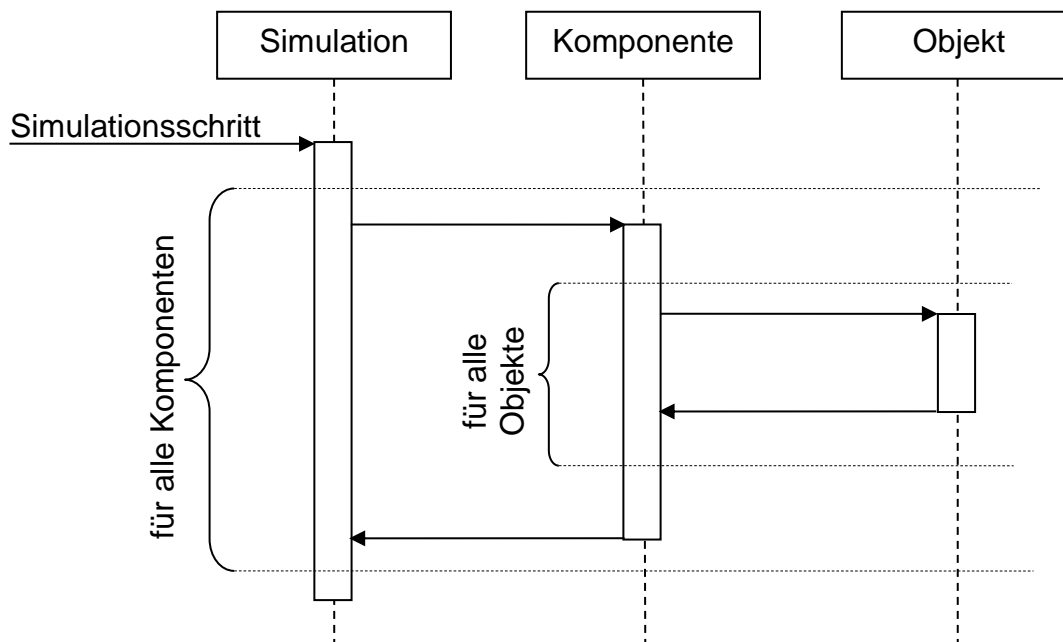


Abbildung 5-3: Quasiparallele Simulation

In einem Simulationsschritt werden nacheinander für jedes zu simulierende Objekt die Zustandsänderungen während des Zeitschritts durch die objektspezifische Implementierung der Methode `Simulationsschritt(...)` berechnet. Für das gerade aktive Objekt erscheinen alle anderen Objekte währenddessen statisch. Da sich die betrachteten Prozesse in sehr viel größeren Zeiträumen abspielen, sind die Zustandsänderungen, die in einer Sekunde ablaufen, jedoch in der Regel vergleichsweise klein, so dass der durch die Zeitdiskretisierung resultierende Fehler vertretbar ist.

Insofern einzelne Objekte für interne Berechnungen eine kürzere Zeitschrittweite erfordern, ist ein Zeitschritt objektintern in kleinere Einheiten unterteilbar.²

² Dieses Vorgehen wird bei der Berechnung des Schüttgutverhaltens angewandt.

5.2.3 Nichtblockierende Simulation

Die Benutzerinteraktion mit dem Programm soll während des Simulationslaufs weiterhin möglich sein, d. h. die Bildschirmanzeige muss aktuelle Werte darstellen und gleichzeitig Steuerungseingriffe auf simulierte Objekte unterstützen. Dazu ist es nötig, dass der Simulationsvorgang nicht blockierend durchgeführt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, könnten Simulation und Visualisierung in unterschiedlichen Threads ausgeführt werden, was jedoch einen erheblichen Mehraufwand bei der Programmierung erfordern und die Komplexität des Programmes steigern würde (vgl. [Mic-07]). Deshalb wurde ein Verfahren implementiert, welches die Anforderungen mit nur einem Thread erfüllen kann.

Das .NET-Framework (ab Version 3) bietet Dispatcher-Objekte, welche die Verwaltung und Abarbeitung von Arbeitsaufträgen in einem Thread ermöglicht (vgl. [Mic-08], Artikel "Dispatcher-Klasse"). Alle Benutzeraktionen (z. B. Tastatur- und Mauseingaben) werden in eine Warteschlange (Queue) eingereiht, deren Abarbeitung über einen Dispatcher gesteuert wird. Der Dispatcher stellt einen Benachrichtigungsmechanismus zur Verfügung, über den die vollständige Abarbeitung aller Arbeitsaufträge signalisiert wird (Dispatcher Inactive Event). Tritt dieses Ereignis ein, die Behandlung aller Benutzerinteraktionen ist demzufolge abgeschlossen, kann ein weiterer Simulationsschritt gestartet werden. Nach Abschluss des Simulationsschritts werden zunächst die in der Zwischenzeit durch Benutzeraktionen neu hinzugekommenen Arbeitsaufträge behandelt, bevor der nächste Simulationsschritt berechnet wird.

5.2.4 Synchrone Simulation

Im synchronen Modus wird die Simulation in einem wählbaren Verhältnis zur Echtzeit durchgeführt. Dazu wird ein Dispatcher-Timer verwendet, der in wählbaren Zeitintervallen ein Tick-Ereignis auslöst (Abbildung 5-4). Bei jedem Tick-Ereignis wird ein neues zu simulierendes Zeitpensum freigegeben. Dieses Pensum wird dann stückweise abgearbeitet, sobald ausreichende Rechenkapazität zur Verfügung steht.

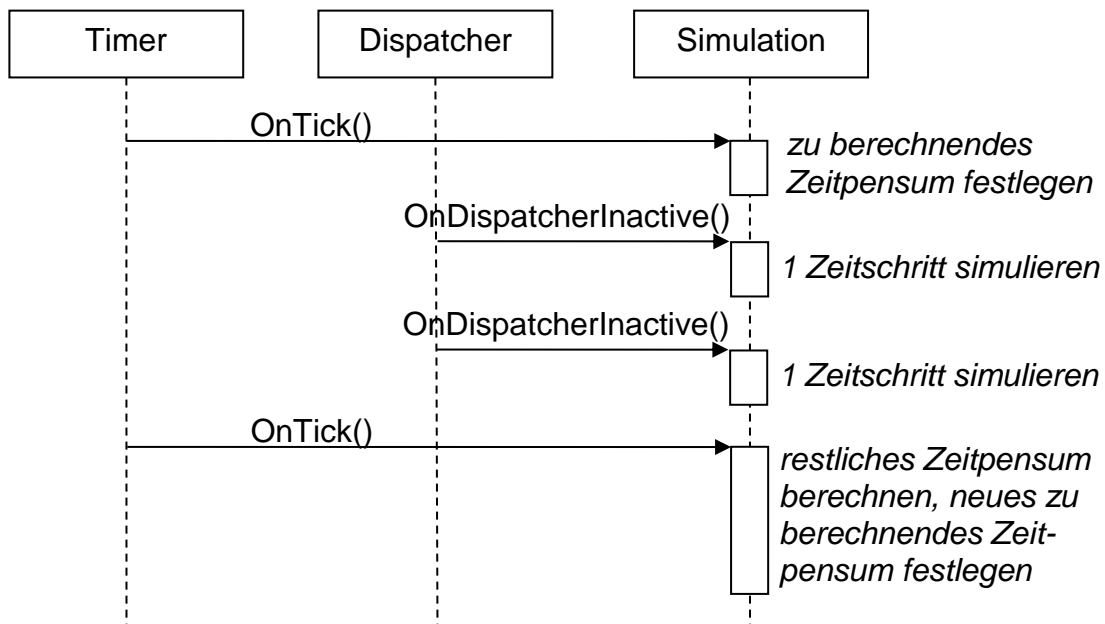


Abbildung 5-4: Synchrone Simulation

Falls beim nächsten Auftreten eines Ticks das vorherige Pensum noch nicht vollständig abgearbeitet wurde, wird die verbleibende Zeit blockierend simuliert. Falls dies mehrmals hintereinander auftritt, deutet dies auf eine Überlastung des Rechners hin, wodurch die Simulation nicht in der gewünschten Geschwindigkeit durchführbar ist.

5.3 Visualisierung

5.3.1 Objektbaum

Im Objektbaum werden alle in der Simulation enthaltenen Objekte hierarchisch gruppiert aufgelistet. Das Steuerelement basiert auf dem TreeView-Steuerelement von Microsoft Windows, das um Optionen zum Erzeugen und Löschen von Objekten erweitert wurde. Der Objektbaum bietet außerdem Zugriff auf die Bearbeitungs-, Steuerungs- und Anzeigesteuerelemente der Objekte.

Zur Darstellung von Objekten, die untergeordnete Objekte enthalten können (Entladeanlage, Schiene, Schiff), werden spezielle TreeNodes verwendet, die die Hierarchie der Objekte abbilden.

5.3.2 Subfenster

Die Bearbeitung, Steuerung und Anzeige von Simulationsobjekten erfolgt über spezielle Dialogfenster. Die Klasse `SubfensterManager` dient zu deren Verwaltung. Durch die Fensterverwaltung wird sichergestellt, dass das Bearbeitungs- und Steuerungsfenster für jedes Objekt nur einmal geöffnet werden kann. Außerdem werden Methoden zur Verfügung gestellt, um alle Dialogfenster der Simulation auszublenden oder zu schließen.

5.3.3 Aktualisierung der Anzeige

Die Aktualisierung der angezeigten Daten ist nicht nach jedem Simulationsschritt erforderlich. Dies würde einerseits die Ablesbarkeit beeinträchtigen und andererseits den Simulationsvorgang unnötig stark verlangsamen. Stattdessen wird die Anzeige nach wählbaren Zeitintervallen aktualisiert. Dazu wird der bereits zur Simulationssteuerung verwendete Timer eingesetzt. Das `OnTick`-Ereignis des Timers wird von der Klasse `CSimulation` veröffentlicht, so dass beliebige Steuerelemente auf das Ereignis reagieren und die Anzeigedaten aktualisieren können.

5.3.4 3D-Anzeige

Zur Erzeugung der dreidimensionalen Darstellung wird die in der Windows Presentation Foundation (WPF)³ enthaltene 3D-Funktionalität verwendet. Die Darstellung erfolgt in einem `Viewport3D`-Steuerelement, welches angepasst wurde um die Navigation in der dargestellten Szene mit der Maus zu unterstützen.

Die 3D-Modelle werden mit dem freien Programm Blender [Ble-09] erstellt. Damit die Modelle dynamisch angepasst werden können (Größe, Position, Bewegung, ggf. Farbe), muss bereits bei der Erstellung auf eine geeignete Gruppierung der Bauteile geachtet werden. Ggf. notwendige Transformationen sind entsprechend zu berücksichtigen. Die 3D-Modelle eines Entladeters und des Schiffs sind in Anhang C bzw. Anhang A beschrieben.

Mit dem Blender-Script "XAML Exporter" ([Leh-09]) sind die Modelle ins XAML-Format exportierbar, welches von WPF verwendet werden kann. Die entstandenen XAML-Dateien müssen derart angepasst werden, sodass sie nur noch das ge-

³ WPF ist ein Bestandteil des .NET-Frameworks ab Version 3.0

wünschte Modell mit allen notwendigen Transformationen enthalten. Diese Dateien können als Ressourcen in das Simulationsmodell eingebettet und geladen werden. Auf die vordefinierten Transformationen kann zugegriffen werden, um das Modell anzupassen und im Raum zu positionieren.

Für alle Komponenten und Simulationsobjekte, die in der 3D-Ansicht angezeigt werden, wurden die speziellen Basisklassen `CSimulationskomponente3D` bzw. `CSimObjekt3D` eingeführt, welche oft benötigte Basisfunktionen implementieren. Wird ein 3D-fähiges Simulationsobjekt in einer 3D-fähigen Komponente registriert, so wird das 3D-Modell des Objekts in das 3D-Modell der Komponente aufgenommen.

Jedes 3D-fähige Objekt bietet die Methode `Update3D()` an, wodurch das 3D-Modell an den aktuellen Zustand des Objekts angepasst wird. Um unnötige Berechnungen zu vermeiden, werden Anpassungen nur vorgenommen, wenn tatsächlich Änderungen an den Objekteigenschaften oder am Objektzustand vorliegen.

5.4 Zustandsabbilder

Der momentane Zustand der gesamten Simulation oder einzelner Objekte kann mit Hilfe der Klasse `CZustandsabbild` gespeichert werden. Ein Zustandsabbild der Simulation wird automatisch beim Speichern der Simulationsdatei erzeugt und beim Laden wiederhergestellt, damit der Benutzer beim Öffnen einer Simulationsdatei den gleichen Zustand vorfindet wie beim Speichern. Darüber hinaus kann der Benutzer eine beliebige Anzahl weiterer Zustandsabbilder erzeugen. Da diese ggf. große Datenmengen enthalten, können sie als externe Komponenten gespeichert und bei Bedarf geladen werden.

Jede Instanz der Klasse `CZustandsabbild` besitzt ein internes XML-Element, das als Zustandsspeicher bezeichnet wird und das die Zustandsbeschreibungen der einzelnen Simulationsobjekte (wiederum als XML-Element) enthält (Abbildung 5-5).

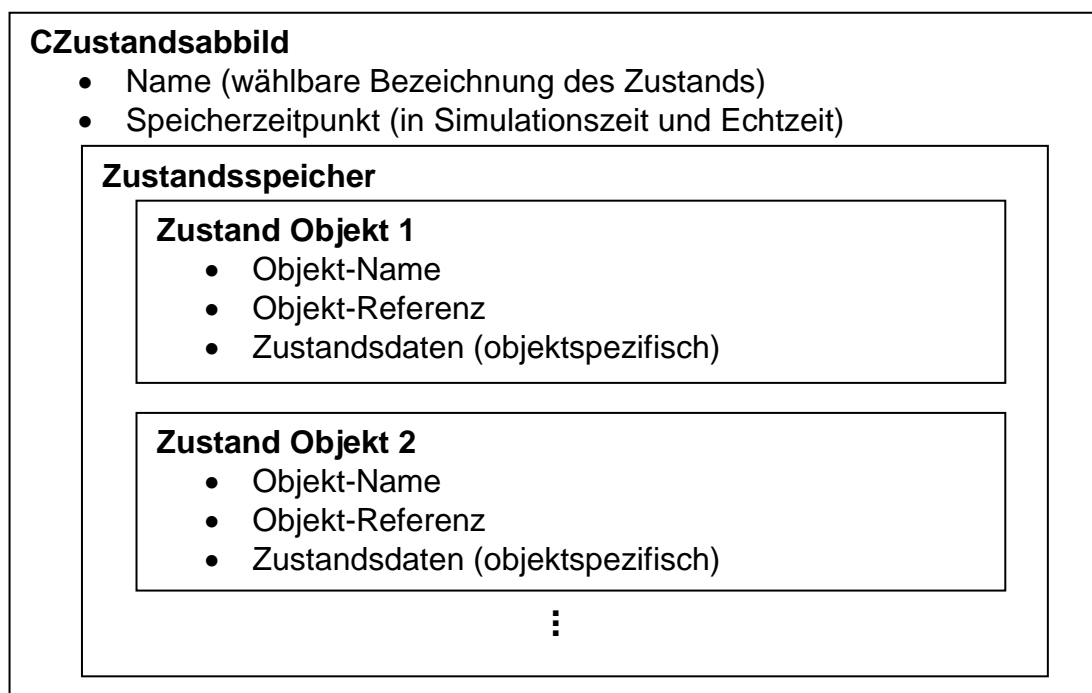


Abbildung 5-5: Struktur eines Zustandsabbilds

Jedes Objekt, das die Speicherung seines Zustands unterstützt, stellt über eine Schnittstelle eine Funktion zur Verfügung, mit der eine Beschreibung des aktuellen Objektzustands in Form eines XML-Elements erzeugt werden kann. Bei der Speicherung des Simulationszustands wird auf diese Weise von allen Simulationsobjekten eine Zustandsbeschreibung bezogen. Diese werden mit einem XML-Attribut gekennzeichnet, das eine Referenz auf das zugehörige Simulationsobjekt enthält, um eine spätere Zuordnung zu ermöglichen.

Soll ein bestimmter Simulationszustand wiederhergestellt werden, so werden aus dem Zustandsspeicher die enthaltenen XML-Elemente einzeln ausgelesen und über den enthaltenen Verweis das zugehörige Objekt bestimmt. Jedem Objekt wird dann über die o. g. Schnittstelle das XML-Element mit seiner Zustandsbeschreibung übergeben.

Über den Steuerungsdialog einer Instanz der Klasse `CZustandsabbild` können die darin enthaltenen Objektzustände aufgelistet werden. Es ist möglich, die Zustandsabbilder einzelner Objekte wiederherzustellen, zu löschen oder durch ein aktuelles Zustandsabbild zu überschreiben.

5.5 Kollisionskontrolle

Für jedes Objekt, das bei der Kollisionsüberwachung berücksichtigt werden soll, kann ein Kollisionsbereich definiert werden, der auf Überschneidungen mit den Kollisionsbereichen anderer Objekte überprüft werden kann. Zur Beschreibung der Kollisionsbereiche könnte das zur Visualisierung verwendete 3D-Modell genutzt werden. Die 3D-Modelle, insbesondere das des implementierten Entladers, sind zwar detailreich, entsprechen aber in einigen Aspekten nicht der realen Form der Maschinen. Der durch den hohen Detaillierungsgrad bedingte Aufwand für eine Kollisionskontrolle würde also nicht durch eine entsprechend hohe Ergebnisqualität gerechtfertigt.

Stattdessen werden die Kollisionsbereiche aus einfachen geometrischen Elementen (Kugel, Ebene, Zylinder) zusammengesetzt. Jedes Simulationsobjekt, das die Kollisionskontrolle unterstützt, macht die Definition seines Kollisionsbereiches über eine Schnittstelle zugänglich. Bei der Registrierung des Objekts wird diese Schnittstelle erkannt und der Kollisionsbereich durch die Komponente `CKollisionswächter` zu einem Gesamtmodell zusammengefasst.

Die Suche nach Kollisionen wird nicht permanent durchgeführt, sondern muss von einem Objekt explizit angefordert werden. Bei der Kollisionskontrolle werden alle Geometrielemente des Kollisionsbereichs des zu untersuchenden Objekts auf Überschneidungen mit den Geometrieelementen aller anderen⁴ in Frage kommenden Kollisionsbereiche überprüft. Ob zwei Kollisionsbereiche überhaupt Überschneidungen aufweisen können, wird durch den Vergleich von Hüllkugeln geprüft, die für jeden Kollisionsbereich zusätzlich anzugeben sind. Falls der Abstand zweier Objekte so groß ist, dass sich die Hüllkugeln nicht überschneiden, kann auf die Überprüfung der einzelnen Geometrielemente verzichtet werden.

Die Algorithmen, die zur Kollisionskontrolle zwischen zwei Geometrielementen eingesetzt werden, sind in Anhang E dargestellt. Das Ergebnis der Kollisionsprüfung wird an das Objekt gemeldet, welches die Prüfung veranlasst hat. Die Reaktion auf eine Kollision liegt in der Zuständigkeit des Objekts.

⁴ Kollisionen zwischen Geometrielementen, die zum selben Kollisionsbereich gehören, werden demnach nicht als solche identifiziert.

5.6 Skripting

Zur automatischen Steuerung des Simulationsablaufs wird ein eigenes Skripting-Konzept verwendet. Skripte (Klasse `CSkript`) enthalten eine Abfolge von Arbeitsanweisungen. Einzelne Arbeitsanweisungen werden durch Taskdefinitionen (Klasse `CTaskdefinition`) beschrieben und können durch Tasks⁵ (Klasse `CTask`) ausgeführt werden. Für jede Art von Taskdefinition ist eine geeignete Klasse zur Ausführung dieser Aufgabenart vorzusehen.

Skripte können als externe oder interne Komponenten in einer Simulation enthalten sein, wobei die Verwendung i. d. R. nur in der Simulation sinnvoll ist, für die das Skript erstellt wurde.

5.6.1 Die Klasse `CTaskdefinition`

Eine Taskdefinition beschreibt eine (einfache oder beliebig komplexe) Arbeitsanweisung. Die Unterteilung komplexer Aufgaben in einfachere Arbeitsschritte kann durch die hierarchische Gruppierung von Taskdefinitionen widerspiegelt werden.

Die abstrakte Basisklasse `CTaskdefinition` definiert eine spezielle Art von Simulationsobjekten, die nur in einer Komponente vom Typ `CSkript` enthalten sein können. Von `CTaskdefinition` abgeleitete Klassen werden zur Beschreibung einer bestimmten Art einer (Steuerungs-)Aufgabe eingesetzt. Die grundsätzliche Art der Aufgabe wird durch den Typ der Taskdefinition festgelegt. Zusätzlich kann eine Taskdefinition als Objekteigenschaften weitere Bestimmungen über die Ausführung der Aufgabe enthalten; diese sind über ein Bearbeitungssteuerelement konfigurierbar. Taskdefinitionen besitzt keine Zustandsgrößen.

Durch die Implementierung der Taskdefinition als Simulationsobjekt ist die vorhandene Infrastruktur zum Speichern und Laden sowie zur eindeutigen Identifizierung einer Taskdefinition verwendbar. Die Ausführung eines Simulationsschritts entsprechend Kapitel 5.2.2 wird nicht unterstützt, zumal die Taskdefinition die auszuführende Aufgabe lediglich beschreibt.

⁵ Task (engl.: Aufgabe, Tätigkeit) hier nicht im Sinn eines parallellaufenden Prozesses in der EDV.

5.6.2 Die Klasse CTask

Objekte der Klasse `CTask` dienen zur Ausführung einer Aufgabe entsprechend den in einer Taskdefinition festgelegten Regeln. Für jede Klasse `CTaskdefinition`, d. h. für jeden Aufgabentyp, muss eine zugehörige Klasse `CTask` implementiert werden.

Die Simulationskomponente Taskmanager bietet durch die Methoden

```
void StartTask(CTaskdefinition TD)
```

die Möglichkeit, eine Taskdefinition auszuführen. Dabei wird eine zur Bearbeitung der Taskdefinition geeignete Instanz der Klasse `CTask` erzeugt. Durch den Taskmanager wird dann in jedem Simulationsschritt die Simulationsroutine jedes laufenden Tasks aufgerufen. Nachdem die Abarbeitung abgeschlossen ist, wird der Task beendet. Die Abarbeitung eines Tasks kann unterbrochen oder abgebrochen werden. Dabei werden auch alle untergeordneten Tasks pausiert bzw. abgebrochen.

Falls die korrekte Ausführung eines Tasks behindert wird (z. B. weil eine anzufahrende Position nicht erreicht werden kann oder eine Kollision auftritt), wird dies durch einen Fehlerzustand angezeigt. Der Programmanwender kann einen Fehlerzustand durch manuelle Steuerungseingriffe oder durch Änderung der Taskdefinition beheben.

5.6.3 Implementierte Taskdefinitionen

5.6.3.1 Tasks zur Ablaufsteuerung

Zur Steuerung des Ablaufs eines Skripts wurden die folgenden Taskdefinitionen und zugehörigen Tasks entwickelt:

- **Sequenz:** Enthält eine Abfolge von Taskdefinitionen, die nacheinander ausgeführt werden. Der nächste Task in der Abfolge wird gestartet, sobald der vorherige Task beendet wurde.
- **Parallele Taskgruppe:** Enthält eine Anzahl von Taskdefinitionen, die gleichzeitig abgearbeitet werden. Alle enthaltenen Taskdefinitionen werden gleichzeitig gestartet. Der gesamte Task wird beendet, wenn alle untergeordneten Tasks beendet sind.

- **Breakpoint:** Dient zum Erzeugen von Meldungen und / oder zum Unterbrechen der Simulation an speziellen Punkten im Skript. Durch einen Breakpoint ist außerdem ein Wartevorgang für eine bestimmte Dauer oder bis zum Erreichen einer bestimmten Uhrzeit (in der Simulation) realisierbar.
- **Skriptaufruf:** In der Taskdefinition kann ein anderes in der Simulation enthaltenes Skript angegeben werden, welches ausgeführt werden soll.

5.6.3.2 Tasks zur Objektsteuerung

Zur Steuerung der Simulationsobjekte wurden die folgenden Taskdefinitionen und zugehörigen Tasks entwickelt:

- **Entlader positionieren:** Einem wählbaren Entlader kann eine neue Zielposition vorgegeben werden. Die Angabe der Zielposition kann in jedem unterstützten Bezugssystem erfolgen. Wahlweise wird der Task sofort beendet, oder erst nachdem der Entlader die Zielposition erreicht hat.
- **Entladepunkt:** Bietet verschiedene Möglichkeiten, die Entladerspitze eines kontinuierlichen Entladers in einem Laderaum zu bewegen:
 - Entladerspitze auf einen angegebenen Punkt bewegen
 - An einer angegebenen Stelle unter Einhaltung der optimalen Eintauchtiefe senkrecht in den Laderaum einfahren und warten, bis die Förderleistung unter einen spezifizierten Wert absinkt
 - Warten, bis die Förderleistung auf einen angegebenen Wert absinkt, daraufhin um eine definierte Strecke in Richtung eines angegebenen Punktes weiter bewegen
- **Entladesequenz:** Eine Entladesequenz enthält eine Abfolge von Entladepunkten für einen Entlader in einem Laderaum.
- **Schiff positionieren:** Einem wählbaren Schiff kann eine neue Zielposition vorgegeben werden. Wahlweise wird der Task sofort beendet, oder erst nachdem das Schiff die Zielposition erreicht hat.

5.7 Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung dient zur Protokollierung der Zustandsgrößen der Simulationsobjekte innerhalb einer Datei zur späteren Analyse. Die Datenaufzeichnung wird durch die Simulationskomponente "Datenlogger" durchgeführt. Der Benutzer kann die aufzuzeichnenden Daten, das Aufzeichnungsintervall und den Speicherort über den Steuerungsdialog der Komponente festlegen.

Die Protokolle können je nach Aufzeichnungsdauer und -intervall eine erhebliche Datenmenge enthalten. Um die Dateigröße und die zur Verarbeitung nötige Zeit gering zu halten wird eine Speicherung im Binärformat verwendet. Neben den eigentlichen Werten werden in der Präambel der Protokolldatei auch Zusatzinformationen über die aufgezeichneten Daten abgespeichert, z. B. der Name und die Einheit der Größe.

5.7.1 Datenquellen

Jedes Simulationsobjekt, das die Datenaufzeichnung unterstützt, stellt über die Schnittstelle `IDatenprovider` eine Liste mit Informationen über alle protokollierbaren Zustandsgrößen bereit. Jede protokollierbare Zustandsgröße wird durch eine Instanz der Klasse `Variableninfo_t` beschrieben. Darin sind die Bezeichnung, die Kategorie (Masse, Massenstrom, Länge, etc.) und das Speicherformat der Größe, sowie die zur Anzeige zu verwendende Einheit mit Skalierungsfaktor enthalten.

Über die Schnittstelle `IDatenprovider` werden Methoden angeboten, um den aktuellen Wert einer bestimmten Größe abzufragen.

5.7.2 Aufzeichnungsvorgang

Im Steuerungsdialog der Datenaufzeichnungskomponente werden alle Simulationsobjekte, die die Schnittstelle `IDatenprovider` implementieren, mit den verfügbaren Zustandsgrößen aufgelistet. Der Benutzer kann die aufzuzeichnenden Daten, das Aufzeichnungsintervall und die Zielfeile wählen. Diese Einstellungen werden in einer Instanz der Klasse `LoggingInfo_t` (Abbildung 5-6) zusammengefasst. Anschließend kann der Aufzeichnungsvorgang gestartet werden.

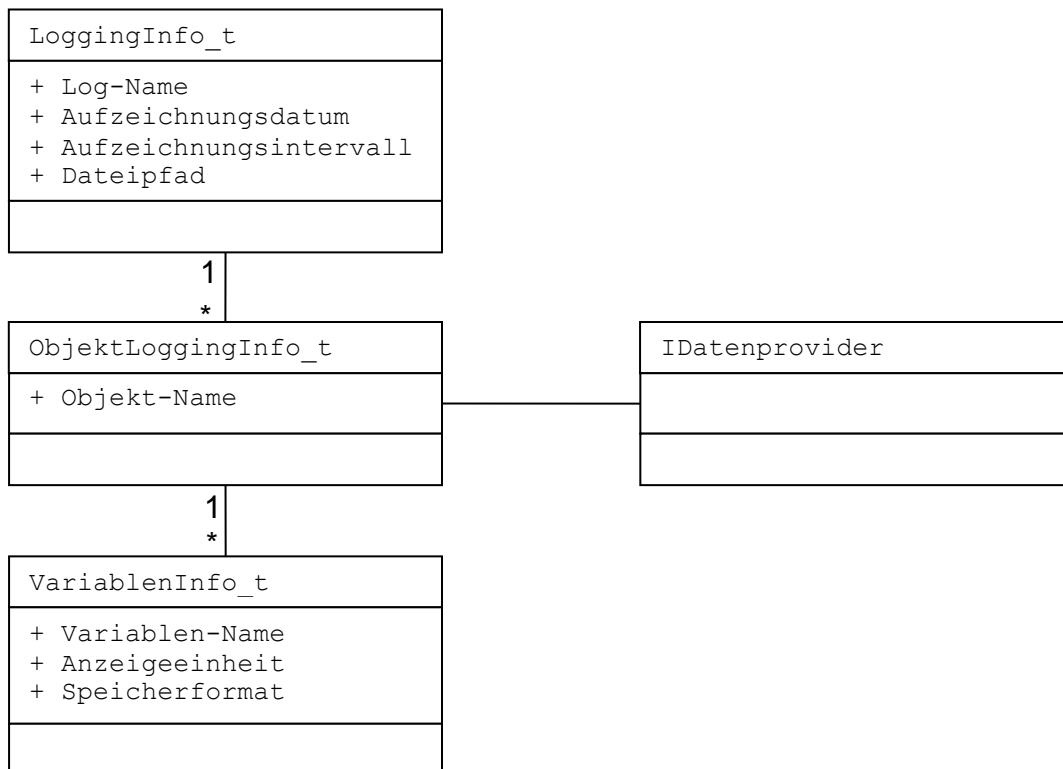


Abbildung 5-6: UML-Diagramm LoggingInfo_t

Beim Start der Aufzeichnung wird zunächst die Aufzeichnungsdatei erzeugt und eine Präambel geschrieben, die unter anderem Informationen über das Aufzeichnungsintervall und die aufzuzeichnenden Größen enthält. Diese werden in der Reihenfolge genannt, in der sie in einem Datensatz aufgezeichnet werden. Nach der Präambel wird ein erster Datensatz in die Aufzeichnungsdatei geschrieben. Dieser enthält die Binärwerte aller aufzuzeichnenden Größen in der festgelegten Reihenfolge. Das Format der Aufzeichnungsdatei ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

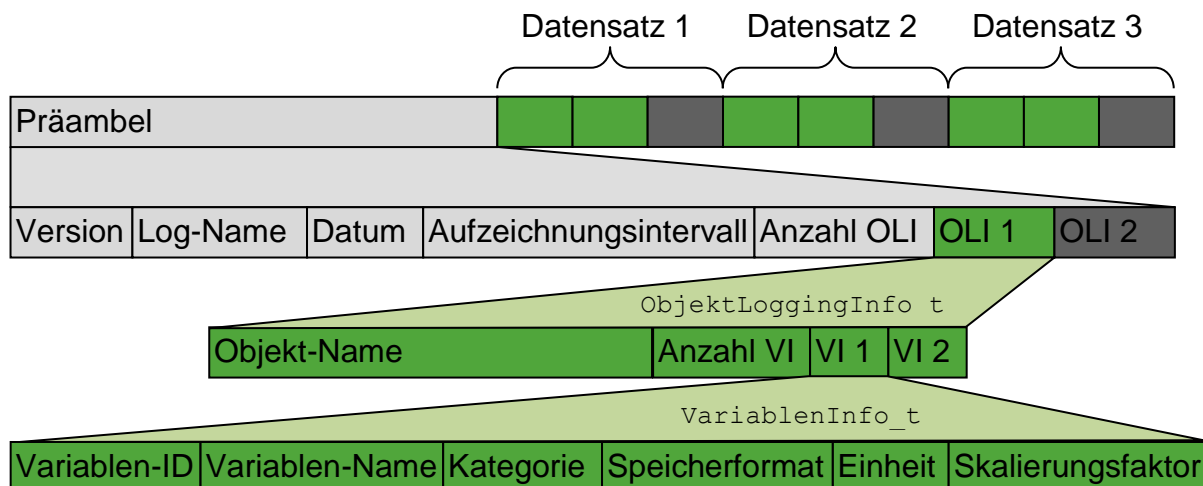


Abbildung 5-7: Aufbau der Aufzeichnungsdatei

In jedem Simulationsschritt wird die abgelaufene Simulationszeit in einer Zählvariablen aufsummiert. Nach Ablauf des Aufzeichnungsintervalls wird ein weiterer Datensatz in die Aufzeichnungsdatei geschrieben und die Zählvariable zurückgesetzt.

5.7.3 Darstellung im Zeitverlauf

Zur Darstellung der protokollierten Daten dient eine separate Anwendung (Abbildung 5-8). Über diese lassen sich die binären Protokolldateien einlesen. Zur Anzeige des Diagramms wird die unter der LGPL⁶ veröffentlichte Programmbibliothek ZedGraph [Cha-08] verwendet.

Zum Einlesen der Daten wird die Klasse `CLog` verwendet. Zunächst wird aus der Präambel der Datei die `LoggingInfo_t` wiederhergestellt und eine Liste der in der Datei enthaltenen Werteverläufe erstellt. Anschließend kann der Verlauf einer gewählten Größe als Array von Double-Werten bezogen werden⁷.

⁶ GNU Lesser General Public License

⁷ Die zurückgelieferten Werte sind bereits mit dem für die Größe angegebenen Skalierungsfaktor multipliziert.

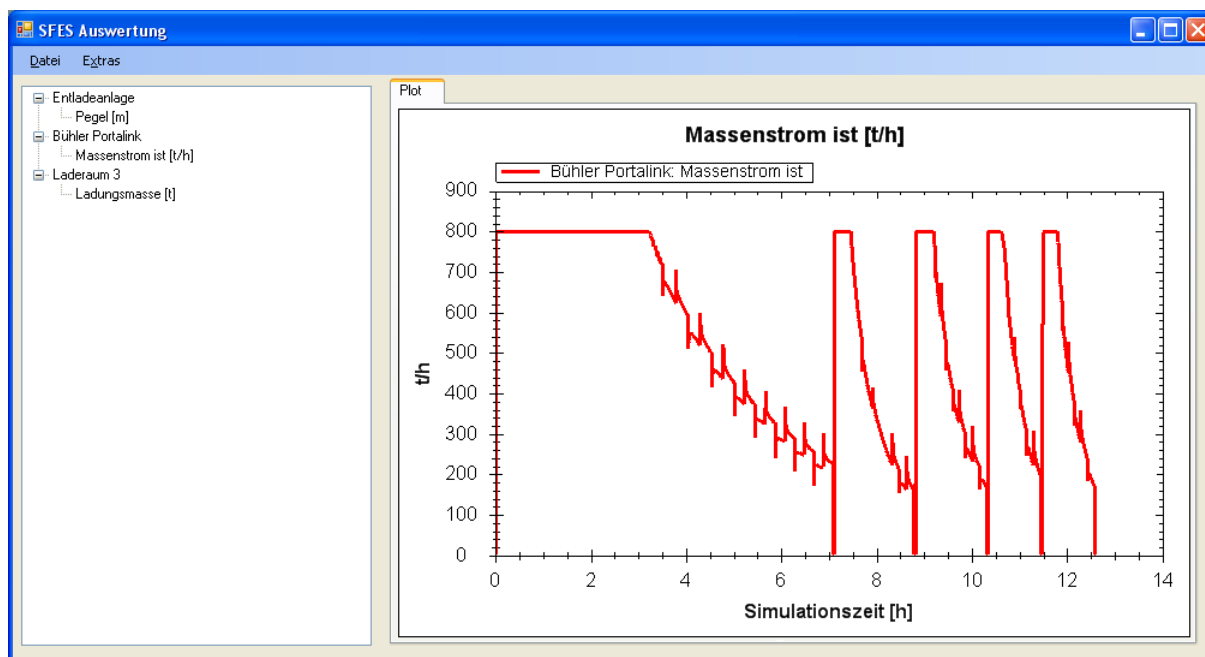


Abbildung 5-8: Auswertungsprogramm

Das Programm bietet außerdem die Möglichkeit, die Daten im csv-Format⁸ zu exportieren. Diese Dateien sind zur weiteren Analyse von allen gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen importierbar.

5.8 Objektreferenzen

Die simulierten Objekte stehen in Beziehung zueinander. Zur Laufzeit des Programms werden diese Beziehungen durch verwaltete Zeiger⁹ beschrieben. Diese bleiben beim Speichern und Laden einer Simulation nicht erhalten.

Durch Verwendung einer eindeutigen Kennzeichnung, wie sie durch das Property `CSimObjektBase.Referenz` für jedes Simulationsobjekt zur Verfügung gestellt wird (Kapitel 5.1.2), kann ein Verweis auf ein beliebiges in der Simulation vorhandenes Objekt abgebildet werden. Diese Referenz beinhaltet den Typ und die Komponenten-ID der Komponente, in der das Objekt enthalten ist, und die eindeutige Identifizierungsnummer des Simulationsobjekts innerhalb der Komponente.

⁸ Comma Separated Values

⁹ Verweis auf den Speicherort des Objekts im Arbeitsspeicher des Rechners

Die Klasse `CSimulation` stellt mit der Methode

```
CSimObjektBase FindeObjekt(  
    SimObjektReferenz_t Referenz)
```

eine Möglichkeit zur Verfügung, das Objekt, auf das eine Referenz verweist, wieder zu finden.

5.9 Lösung linearer Gleichungssysteme

Sowohl für die Kollisionskontrolle als auch für die Rückwärtskinematik der Entlader bei kartesisch-linearer Bewegung ist die Lösung von linearen Gleichungssystemen dritter Ordnung erforderlich. Als Lösungsverfahren kommt das Gauß-Verfahren mit Kolonnenmaximumstrategie [Fai-95] in einer eigenen Implementierung zur Anwendung.

5.10 XML-Serialisierung

Zur Speicherung der Eigenschaften und Zustandsdaten der Simulationsobjekte wird das XML-Format verwendet. Zur einfachen Umwandlung von Datenstrukturen in XML-Elemente und zurück kommt ein Serialisierungsverfahren zum Einsatz. Eine eigene Implementierung ermöglicht im Vergleich zur im .NET-Framework enthaltenen Serialisierungslösung eine einfachere und flexiblere Steuerung des (De-)Serialisierungsvorgangs.

Die Serialisierungs- und Deserialisierungsfunktionen sind in der statischen Klasse `MySerialization` im Namespace `Utils` enthalten. Es stehen Funktionen zur Serialisierung und Deserialisierung einzelner Objekte sowie von Strukturen zur Verfügung. Neben den Standarddatentypen werden auch einige zusätzliche anwendungsspezifische Datentypen unterstützt; die Unterstützung für weiterer Typen kann hinzugefügt werden.

6 Ergebnisse

Anhand der in nachfolgendem Kapitel ausgeführten Validierung wird aufgezeigt, dass das entwickelte Modell zur Simulation und Analyse von Entladevorgängen geeignet ist und die gelieferten Ergebnisse plausibel sind. Dazu werden zwei real durchgeführte und detailliert dokumentierte Löschungen von Schüttgutschiffen in der Simulationsumgebung nachgebildet und daraufhin die theoretisch gewonnenen Ergebnisse mit den realen Werten verglichen.

Als Vorlage dienen die Soja-Entladung der SW Brasil vom 29.11.2013 bis zum 03.12.2013 in Brake mittels zwei kontinuierlicher Entlader sowie die Steinkohle-Entladung der AP Jadran vom 21.12.2013 bis zum 23.12.2013 in Rostock auf Basis eines diskontinuierlichen Entladers. Die Modellierungsparameter beider Entladungen sind im Anhang näher beschrieben.

Für die Validierung des Demonstrators wird jeweils die gesamte Schiffsentladung nachempfunden. Die Entladung der SW Brasil erfolgte mittels zwei parallel eingesetzter Pneumaten, die Löschung der AP Jadran wurde per Greifer durchgeführt. Im Zuge der Restentleerung wurden Planierraupen sowie Rad- und Kompaktlader eingesetzt.

6.1 Bestimmung der Modellparameter

Die Bestimmung der Modellparameter zur Abbildung des Schiffes und der Entlader sowie des zu löschenden Schüttgutes sind Grundlage der durchzuführenden Simulation. Diese wurden im Zuge der Dokumentation der Entladungen erfasst und sind im Anhang G und H näher beschrieben.

6.2 Entladestrategie

6.2.1 Soja-Entladung der SW Brasil in Brake

Entsprechend der Vorgabe des Schiffsführers hinsichtlich Minimierung der strukturellen Belastung des Schiffes und den Anforderungen an das entladene Gut im Rahmen der den Entladern nachgeschalteten Prozesse erfolgte die Löschung der SW Brasil. Bereichsweise wurde entladenes Schüttgut innerhalb des Entladeterminals

6 Ergebnisse

von Brake bereits weiterverarbeitet. Die Leistung der hierbei eingesetzten Maschinen, die kundenseitige Priorisierung zur unmittelbar an die Entladung anschließenden Abholung der einzelnen Gutsorten sowie die begrenzte Lagerkapazität des Entladeterminals bestimmten wesentlich die im Rahmen der Schiffs Löschung angewandten Entladestrategie mit. Unter Berücksichtigung zuvor genannter Aspekte gestaltete sich der Entladeprozess mittels zweier kontinuierlicher pneumatischer Schiffsentlader - Heber I und Heber IV - wie folgt:

	Laderaum	Ladungsart	Masse vor (Teil) löschung [t]	Masse nach (Teil) löschung [t]	gelöschte Masse [t]
Heber I	2	Sojapelllets	9.294,60	6.692,50	2.602,10
	3	Sojaschrot	9.327,60	3.009,80	6.317,80
	1	Sojaschrot	7.984,00	0,00	7.984,00
	2	Sojapelllets	6.692,50	0,00	6.692,50
	3	Sojaschrot	3.009,80	0,00	3.009,80
	4	Sojaschrot	6.332,80	0,00	6.332,80

Abbildung 6-1: Entladestrategie Heber I - Brake

	Laderaum	Ladungsart	Masse vor (Teil) löschung [t]	Masse nach (Teil) löschung [t]	gelöschte Masse [t]
Heber IV	5	Sojaschrot	9.788,10	0,00	9.788,10
	7	Sojaschrot	8.044,80	0,00	8.044,80
	4	Sojaschrot	8.327,40	6.332,80	1.994,60
	6	Sojapelllets	7.897,60	0,00	7.897,60

Abbildung 6-2: Entladestrategie Heber IV - Brake

Wie aus Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 ersichtlich, sah die angewandte Entladestrategie bis auf Laderaum 4 ein nicht Entlader-übergreifendes Löschen der Ladung vor, d. h. ausschließlich Laderaum 4 wurde sowohl von Heber I als auch von Heber IV entleert. Dieser Prozess erfolgte in Reihe, d. h. Heber I entnahm die in Laderaum 4 noch verbliebene Ladung erst nach Ausheben von Heber IV. Ein paralleles Entladen beider Heber im selben Laderaum fand zu keinem Zeitpunkt statt.

Die Entladung erfolgte während des 29.11.2013 und des 03.12.2013 – Sonntage ausgenommen – im durchgehenden Zweischichtbetrieb zu jeweils acht Stunden. Die Löschung eines Laderaumes vollzog sich grundsätzlich gleichmäßig, das Schüttgut wurde hierbei in einzelnen Schichten abgetragen und die Gutoberfläche hierbei wei-

testgehend eben gehalten. Die Zuführung mittels Planierraupen ist als nahezu konstant anzusehen: Eine gleiche Anzahl an Zuführgeräten mit gleicher Leistung, d. h. vergleichsweise konstante Taktung (Anzahl der Zubringungen am Entladerkopf pro Zeiteinheit) mit grundsätzlich max. möglichem Schildfüllungsgrad, gewährleisteten zu jedem Zeitpunkt des Löschvorganges neben der 100%igen Versorgung des Entladerkopfes mit zu entnehmendem Schüttgut gleichzeitig auch ein konstant ebenes Niveau der jeweils obersten Ladungsschicht.

6.2.2 Steinkohle-Entladung der AP Jadran in Rostock

Gemäß den Anweisungen des Schiffsführers hinsichtlich Minimierung der strukturellen Belastung des Schiffes erfolgte die Löschung der AP Jadran in Rostock. Keine der Entladung nachgeschalteten Prozesse beeinflussten in diesem Falle die Löschung: Grundsätzlich werden im dokumentierten Hafen ausschließlich mit Steinkohle sortenrein beladene Schüttgutschiffe entladen. Das entnommene Gut wird mittels eines nachgeschalteten Bandsystems auf einer Halde zwischengelagert. Der Entladeprozess erfolgt grundsätzlich ausschließlich mittels eines diskontinuierlichen Greifer-Entladers in Portalbauweise. Entsprechend der Vorgabe des Schiffsführers gestaltete sich der Entladeprozess wie in nachstehender Abbildung dargestellt:

Laderaum	Ladungsart	Masse vor (Teil) löschung [t]	Masse nach (Teil) löschung [t]	gelöschte Masse [t]
3	Steinkohle	9.671,20	4.125,80	5.545,40
6	Steinkohle	9.987,40	5.112,30	4.875,10
2	Steinkohle	10.098,70	5.073,80	5.024,90
5	Steinkohle	9.117,10	4.985,10	4.132,00
7	Steinkohle	9.104,80	5.011,80	4.093,00
1	Steinkohle	7.499,70	3.985,70	3.514,00
4	Steinkohle	8.802,25	4.052,80	4.749,45
7	Steinkohle	5.011,80	0,00	5.011,80
2	Steinkohle	5.073,80	0,00	5.073,80
6	Steinkohle	5.112,30	0,00	5.112,30
4	Steinkohle	4.052,80	0,00	4.052,80
1	Steinkohle	3.985,70	0,00	3.985,70
3	Steinkohle	4.125,80	0,00	4.125,80
5	Steinkohle	4.985,10	0,00	4.985,10

Abbildung 6-3: Entladestrategie Rostock

Wie aus Abbildung 6-3 erkennbar, wurde bei Entladung der AP Jadran jeder Laderaum zweimal angefahren, d. h. grundsätzlich in zwei Schritten gelöscht. Der Wechsel zwischen zwei Laderäumen erfolgte im Zuge der jeweils ersten Teilentladung nachdem ungefähr die Hälfte der im vorangegangenen Laderaum befindlichen Masse entnommen wurde.

Die Entladung erfolgte während des 21.12.2013 und des 23.12.2013 im durchgehenden Dreischichtbetrieb zu jeweils acht Stunden. Die Löschung eines Laderaumes vollzog sich grundsätzlich gleichmäßig, das Schüttgut wurde hierbei in einzelnen Bahnen abgetragen, sodass der Ladungspegel bzw. das Ladungsniveau im Laderaum konstant sank.

Mit fortschreitendem Löschen innerhalb eines Laderaumes nahmen die Taktzeiten der Greiferentladung zu und somit die Entladeleistung ab. Zu begründen ist dies mit den resultierenden längeren Förderwegen: Je mehr Schüttgut aus einem Laderaum entnommen wird, desto tiefer muss der Greifer im Zuge weiterer Entladungen in den Laderaum herabgelassen bzw. anschließend wieder höher herausgehoben werden. Entsprechend langjähriger Erfahrungen im Bereich der Steinkohleentladung im Hafen Rostock mittels Greiferbetriebs ist hierbei von einer durchschnittlichen Abnahme der Förderleistung bzw. des resultierenden Massenstromes von ca. 10% je 10.000t entnommener Ladung auszugehen.

6.3 Simulationsergebnisse und Interpretation

Die beiden nachstehenden Abschnitte beschreiben die mittels der Simulation erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den real dokumentierten Werten besagter beider Schüttgut-Schiffsentladungen.

6.3.1 Soja-Entladung der SW Brasil in Brake

Aus Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 sind die Simulationsergebnisse bzgl. beider im Rahmen der Soja-Entladung in Brake eingesetzten kontinuierlichen pneumatischen Schiffsentlader ersichtlich.

6.3 Simulationsergebnisse und Interpretation

Heber I	Laderaum		Realität	Simulation	Abweichung [%]
	2	Entladezeit [h:min]	04:32	04:38	2,2
		gelöschte Masse [t]	2.602,10	2.602,00	0,0
		Förderleistung [t/h]	573,99	561,50	-2,2
	3	Entladezeit [h:min]	10:42	11:26	6,4
		gelöschte Masse [t]	6.317,80	6.318,00	0,0
		Förderleistung [t/h]	590,45	552,71	-6,4
	1	Entladezeit [h:min]	13:25	14:26	7,1
		gelöschte Masse [t]	7.984,00	7.984,00	0,0
		Förderleistung [t/h]	595,08	552,72	-7,1
2	Entladezeit [h:min]	12:30	11:55	-4,9	
	gelöschte Masse [t]	6.692,50	6.692,40	0,0	
	Förderleistung [t/h]	535,40	561,50	4,9	
3	Entladezeit [h:min]	05:43	05:26	-5,0	
	gelöschte Masse [t]	3.009,80	3.010,00	0,0	
	Förderleistung [t/h]	526,50	552,73	5,0	
4	Entladezeit [h:min]	11:07	11:27	3,0	
	gelöschte Masse [t]	6.332,80	6.332,70	0,0	
	Förderleistung [t/h]	569,67	552,71	-3,0	

Abbildung 6-4: Simulationsergebnisse Heber I - Brake

Heber IV	Laderaum		Realität	Simulation	Abweichung [%]
	5	Entladezeit [h:min]	20:58	20:43	-1,2
		gelöschte Masse [t]	9.788,10	9.788,00	0,0
		Förderleistung [t/h]	466,84	472,31	1,2
	7	Entladezeit [h:min]	16:40	17:02	2,2
		gelöschte Masse [t]	8.044,80	8.045,00	0,0
		Förderleistung [t/h]	482,69	472,31	-2,2
	4	Entladezeit [h:min]	03:54	04:13	7,6
		gelöschte Masse [t]	1.994,60	1.994,90	0,0
		Förderleistung [t/h]	511,44	472,32	-7,6
6	Entladezeit [h:min]	16:20	16:27	0,7	
	gelöschte Masse [t]	7.897,60	7.897,50	0,0	
	Förderleistung [t/h]	483,53	480,10	-0,7	

Abbildung 6-5: Simulationsergebnisse Heber IV - Brake

Bedingt durch die zwar sortenrein aber untereinander mit verschiedenen Gütern beladenen Laderäume weichen die jeweils in der Simulation erzielten Massenströme geringfügig voneinander ab. Im Vergleich zu Sojaschrot verursacht die Förderung von Sojapellets mit einem leicht niedrigeren Schüttwinkel einen höheren Massen-

strom. Hieraus resultiert die leicht höhere theoretische Entnahmeleistung in den Abschnitten 2 und 6 gegenüber den restlichen Laderäumen der SW Brasil (vgl. hierzu auch Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass infolge der gewählten theoretischen Schüttgutparameter und Kenndaten der Entlader die theoretisch ermittelte Förderleistung geringfügig unter deren realem Wert liegt. Bei diesen Vergleichssimulationen wurde bewusst mit den „Tabellenwerten“ der Kennwerte für die zu entladenden Schüttgüter gerechnet, um Vergleichbarkeit und Normierung zu Grunde zu legen. Mit diesen „trockenen“ Tabellenwerten ergeben sich im Vergleich zur Realität bei Seeluft und Schiffstransporten etwas kleinere Förderleistungen, wie die Simulationsergebnisse zeigen. Würde man die Kennwerte bei „feuchter“ Seeluft ansetzen, in diesem Falle ist die Dichte der Schüttgüter etwas größer, dann würden die Simulationsergebnisse sehr genau mit der Realität übereinstimmen. Eine entsprechende Anpassung der Werte würde besagte Abweichungen demzufolge eliminieren. Gemäß Abbildung 6-4 ist dieser Effekt insbesondere im Zuge der ersten Teillösungen von Laderaum 2 und 3 sowie im Rahmen der Ladegutentnahme aus den Abschnitten 1 und 4, jeweils durchgeführt durch Heber I, erkennbar. Die theoretische Förderleistung liegt in diesen Fällen jeweils unter ihrem korrespondierenden realen Wert. Analoges ist bei Analyse von Heber IV zu beobachten: Die theoretische Förderleistung des Hebers im Zuge seines Einsatzes in den Laderäumen 7, 4 und 6 liegt wiederum unter dem tatsächlich dokumentierten Wert.

Lediglich in den Fällen, in denen während des realen Entladeablaufs unerwartete Störungen bzw. Ausfälle auftraten - diese wurden nicht im Zuge der Simulation abgebildet, zumal sie im Planungsstadium und somit im Vorfeld einer Entladung nicht absehbar wären -, liegt die theoretische Förderleistung über ihrem realen Wert. In diesen Situationen war der tatsächliche Löschprozess zeitweise unterbrochen bzw. abschnittsweise nur mit verminderter Leistung fortsetzbar. Bei Bestimmung durchschnittlicher theoretischer Störungsanteile wäre die Simulation entsprechend erweiterbar durch Ansatz einer Störfall-Pause und somit hinsichtlich weiteren Realitätsbezuges trimmbar. Insbesondere ist besagter Effekt höherer theoretischer Löschleistung im Zuge der zweiten Löschzyklen von Laderaum 2 und 3, jeweils durchgeführt von Heber I, zu beobachten (vgl. Abbildung 6-4). Gemäß der Dokumentation der Löschvorgänge und der jeweiligen Schicht- und Entladerprotokolle kam es beispiels-

weise während des zweiten Entladeabschnittes von Laderaum 2 zum zeitweisen Ausfall eines dem Entlader nachgeschalteten Troges. Dieser Effekt bedingte das zwangsmäßige Aussetzen von Heber I, zumal das von ihm entnommene Gut nicht mehr den Bandanlagen des Entladeterminals übergeben bzw. über diese abgeführt werden konnte, bis besagter Trog wieder funktionsbereit war und sich die Materialflussskette erneut schloss. Analoges gilt für den Einsatz von Heber IV in Laderaum 5 (vgl. Abbildung 6-5): Während dieses Entladeabschnittes kam es zu einer Störung des Silos zur Aufnahme und Lagerung des dem Schiff entnommenen Schüttgutes. Die Abgabe an die Bandanlage war infolge Aufstauens zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, der Materialfluss war unterbrochen und Heber IV zeitweise nicht einsetzbar. Zusätzlich riss einsatzbedingt ein Kabel am Entladerkopf von Heber IV, sodass dessen Düsen nicht mehr vollständig nutzbar waren. Bis zum Abschluss der Reparatur der beschädigten Entladerkomponenten konnte dieser lediglich mit reduzierter Leistung betrieben werden. Demzufolge begründet sich die in Abbildung 6-5 zu beobachtende, gegenüber der theoretischen Förderleistung verlustbehaftete, tatsächliche Entnahmeeistung im Zuge des Löschens von Laderaum 5 durch Heber IV zum einen durch das zeitweise Stillstehen des Entladers aufgrund einer sich auswirkenden Störung der angrenzenden Infrastruktur des Entladeterminals und zum anderen durch die temporäre Beeinträchtigung des Entladers infolge Düsenausfalls.

Bei ganzheitlicher Betrachtung der hinsichtlich des Entladevorgangs der SW Brasil in Brake modellierten und durchgeführten Simulation ist eine betragsmäßige Abweichung der durchschnittlichen Förderleistung bei Heber I von 1,7% und bei Heber IV von 2,4% gegenüber dem jeweils korrespondierenden tatsächlichen Wert zu verzeichnen. Die zeitliche Differenz zwischen realem und simuliertem Wert bzgl. der erforderlichen Gesamtlöschdauer beträgt für Heber I betragsmäßig 1 Stunde und 21 Minuten und für Heber IV betragsmäßig 34 Minuten.

6.3.2 Steinkohle-Entladung der AP Jadran in Rostock

Nachstehende Abbildung 6-6 zeigt die Simulationsergebnisse der untersuchten Steinkohleentladung in Rostock mittels Greifer.

6 Ergebnisse

Laderaum		Realität	Simulation	Abweichung [%]
3	Entladezeit [h:min]	03:50	03:40	-4,8
	gelöschte Masse [t]	5.545,40	5.545,40	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.442,05	1.511,70	4,8
6	Entladezeit [h:min]	03:22	03:14	-4,8
	gelöschte Masse [t]	4.875,10	4.875,15	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.442,05	1.511,70	4,8
2	Entladezeit [h:min]	03:49	03:44	-2,7
	gelöschte Masse [t]	5.024,90	5.024,90	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.312,50	1.347,80	2,7
5	Entladezeit [h:min]	03:09	03:04	-2,7
	gelöschte Masse [t]	4.132,00	4.132,05	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.312,50	1.347,80	2,7
7	Entladezeit [h:min]	03:02	03:21	9,5
	gelöschte Masse [t]	4.093,00	4.093,00	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.350,00	1.222,30	-9,5
1	Entladezeit [h:min]	02:36	02:52	9,5
	gelöschte Masse [t]	3.514,00	3.514,10	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.350,00	1.222,30	-9,5
4	Entladezeit [h:min]	03:31	03:53	9,5
	gelöschte Masse [t]	4.749,45	4.749,50	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.350,00	1.222,30	-9,5
7	Entladezeit [h:min]	04:00	04:35	12,7
	gelöschte Masse [t]	5.011,80	5.011,80	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.250,00	1.091,60	-12,7
2	Entladezeit [h:min]	04:03	04:39	12,7
	gelöschte Masse [t]	5.073,80	5.073,75	0,0
	Förderleistung [t/h]	1.250,00	1.091,60	-12,7
6	Entladezeit [h:min]	05:50	05:11	-12,6
	gelöschte Masse [t]	5.112,30	5.112,30	0,0
	Förderleistung [t/h]	875,00	985,20	12,6
4	Entladezeit [h:min]	04:38	04:07	-12,6
	gelöschte Masse [t]	4.052,80	4.052,80	0,0
	Förderleistung [t/h]	875,00	985,20	12,6
1	Entladezeit [h:min]	04:33	04:30	-1,2
	gelöschte Masse [t]	3.985,70	3.985,70	0,0
	Förderleistung [t/h]	875,00	885,10	1,2
3	Entladezeit [h:min]	04:46	04:40	-2,3
	gelöschte Masse [t]	4.125,80	4.125,80	0,0
	Förderleistung [t/h]	865,00	885,10	2,3
5	Entladezeit [h:min]	05:46	05:38	-2,3
	gelöschte Masse [t]	4.985,10	4.985,15	0,0
	Förderleistung [t/h]	865,00	885,10	2,3

Abbildung 6-6: Simulationsergebnisse - Rostock

Entgegen der Ladungscharakteristik der SW Brasil, war die AP Jadran durchgängig sortenrein mit Steinkohle beladen. Abgesehen von der in Kapitel 6.2.2 ausgeführten Abnahme der Förderleistung hinsichtlich ca. 10% je 10.000t entnommener Ladung, besitzen die einzelnen theoretischen Förderleistungen keine Abweichung voneinander (vgl. hierzu auch Abbildung 6-6).

Wie bereits im Falle der simulierten Entladung der SW Brasil - ausgeführt im vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels – liegen auch bei der Simulation der Löschprozesse der AP Jadran die ermittelten theoretischen Förderleistungen unter den tatsächlichen korrespondierenden Werten (vgl. hierzu beispielsweise beide Löschabschnitte von Laderaum 7 in Abbildung 6-6). Wiederrum ist davon auszugehen, dass infolge der gewählten theoretischen Schüttgutparameter und Kenndaten des Entladeters die theoretisch ermittelte Förderleistung geringfügig unter deren realem Wert liegt. Ein gemäßes Angleichen der Simulationsparameter brächte eine noch genauere Abbildung des realen Verhaltens.

Alle simulierten Entladeabschnitte, während denen ein umgekehrtes Verhalten von realer und theoretischer Förderleistung zu verzeichnen ist, d. h. die theoretische Entnahmeleistung liegt oberhalb ihres tatsächlichen Wertes, weisen laut Dokumentation bzw. Schichtprotokoll Störungen auf. Der dadurch bedingte reduzierte Entladereinsatz im Zuge besagter Abschnitte, führt zu einem Absinken der realen Entladeleistung unter ihr theoretisches Pendant, zumal die Ausfälle nicht in der Simulation abgebildet wurden. Ihr Eintreten war rein situationsgebunden und in keiner Weise vorhersehbar, sodass eine simulationsseitige Erfassung als nicht zweckdienlich erschien. Wie aus Abbildung 6-6 zu erkennen, ist der Effekt vergleichsweise höherer theoretischer Löschkapazität beispielsweise in den Laderäumen 3, 5 und 6 zu beobachten. Gemäß dem Schichtprotokoll kam es im Zuge dieser Löschabschnitte unter anderem zum Ausfall technischer Komponenten wie Frequenzumrichter sowie zum Schiefelauf des Bandschleifenwagens. Letzterer bedingte das Anhalten des Bandsystems zur Abfuhr entnommenen Schüttgutes. Der Entlader musste folglich während dieses Zeitraumes pausieren, zumal ein weiterer Abtransport gelöschten Gutes zeitweise nicht mehr möglich war. Des Weiteren resultierte aus dem Verklemmen geförderter verbackener Steinkohle innerhalb eines Trichters der erneute Ausfall des Entladeters bis zu dem Zeitpunkt, an dem ein durchgängiger Materialfluss wieder gewährleistet werden konnte. Das wiederholte Überschreiten des maximalen Auf-

nahmevermögens eines Haldenabschnittes erforderte das jeweilige Neupositionieren des Absetzers. Währenddessen galt dieser vom restlichen Fördersystem als entbunden, der Materialfluss war unterbrochen, vom Entlader gelöscht Schüttgut konnte vom Bandsystem nicht übernommen und gefördert werden. Im Rahmen derartiger Störfälle war eine weitere Löschung zeitweise nicht möglich.

Bei ganzheitlicher Betrachtung der hinsichtlich des Entladevorgangs der AP Jadran in Rostock vorgenommenen Simulation ist eine betragsmäßige Abweichung der durchschnittlichen Förderleistung von 1,3% gegenüber dem jeweils korrespondierenden tatsächlichen Wert zu verzeichnen. Die zeitliche Differenz zwischen realem und simuliertem Wert bzgl. der erforderlichen Gesamtlöschdauer beträgt betragsmäßig 9 Minuten.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, mit dem der Entladevorgang eines Schüttgutfrachters nachgebildet werden kann. Mögliche Einsatzgebiete des Simulationsprogramms sind unter anderem:

- Analyse eines Entladevorgangs
- Vergleich verschiedener Entladestrategien
- Suche von Ansätzen zur Optimierung des Entladevorgangs

Überprüfung neuer Entladestrategien auf technische Machbarkeit

Das Programm ermöglicht die Simulation der vollständigen oder teilweisen Entladung sowohl eines einzelnen Laderaums als auch eines oder mehrerer Schiffe. Auch der Einsatz mehrerer Entlader gleichzeitig in einer Luke ist möglich. Der Prozessablauf kann dabei beliebig modifiziert und die Auswirkungen der Änderungen untersucht werden. Es stehen Werkzeuge zur Steuerung, Visualisierung und Analyse des Simulationsablaufs zur Verfügung.

Im Simulationsmodell werden die Positionen der Entlader, der Tidengang, das Materialverhalten des Schüttguts sowie mögliche Kollisionen und der Tiefgang des Schiffs berücksichtigt. Zur Simulation der Entlader wurde ein Modell implementiert, durch das kontinuierliche Entlader mit drei rotatorischen Freiheitsgraden sowie diskontinuierliche Entlader im Greiferbetrieb abgebildet werden können. Zuführgeräte zur Unterstützung des Entladevorgangs sind in Form von Planiertrauben abbildbar. Ergänzend bietet der Demonstrator die Möglichkeit zur Modellierung fiktiver Zuführgeräte zur behelfsmäßigen Simulation der Restentleerung im Falle abzubildender Zuführgeräte, die nicht dem Typ Planiertraube entsprechen. Modelle für weitere Entladertypen und Zuführgeräte können nahtlos in das bestehende Programm integriert werden. Durch die Einbindung entsprechender Modelle kann auch der Einsatz von komplizierten Entlademechanismen (z. B. formveränderliche Kratzer, Zuführschnecken oder Anbaugeräte) simuliert werden.

Mit dem Programm wurden zwei real beobachtete Entladevorgänge von Schüttgut-schiffen nachsimuliert, wobei sich bei der zur Entladung benötigten Zeit eine Abwei-chung von max. 2,3% ergab.

7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der implementierte Demonstrator soll im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte weiterverwendet werden. Zum einen ist angedacht, die intralogistischen Prozesse und Zusammenhänge innerhalb eines Schüttgutentladeterminals ganzheitlich näher zu betrachten. Über eine entsprechende Schnittstelle gilt es, den entwickelten De-monstrator an die funktionell zu modellierende Infrastruktur von Schüttguthäfen in Form baukastensystemartiger Abbildungsverfahren, anzubinden. Zum anderen be-stünde die Möglichkeit zur Nutzung der im Rahmen des Forschungsprojektes ge-wonnenen Ergebnisse hinsichtlich des Aufbaus eines Datenpools für die Simulation von Schüttgutschiffsentladeprozessen.

Der im Zuge der Forschungsarbeit entwickelte Demonstrator ist noch nicht für die beteiligten Unternehmen kommerziell nutzbar. Insbesondere besteht noch Optimie-rungspotential hinsichtlich seiner Benutzerführung, Visualisierung und Ergebnisauf-bereitung. Hieraus sollte eine Verringerung der für die Systembedienung erforderli-chen nutzerseitigen Vor- bzw. Eingaben resultieren, sodass schneller und effizienter grundlegende Aussagen bzgl. der angedachten Entladestrategie gewonnen werden können, als dies mit dem aktuell vorliegenden Demonstrator bislang der Fall ist. Auch würde dadurch das Verständnis des Nutzers für das System erhöht und die für die erfolgreiche Anwendung des Demonstrators erforderliche Einarbeitungszeit verrin-gert. Zudem wurde von den Projektpartnern die Integration eines zusätzlichen weni-ger komplexen Simulationsbausteins gewünscht, der mit nur wenigen Vorgaben schneller erste grundlegende näherungsweise Vorabaussagen zuließe.

Weiterhin wäre es zielführend, zusätzliche Zuführgerätetypen wie Rad- oder Kom-paktlader zu implementieren.

Ggf. wäre es ratsam, entsprechende Datenbanken mit den für die Simulation rele-vanten Einflussgrößen gängiger Zuführgeräte und Entladertypen anzulegen und über eine Schnittstelle an den Demonstrator anzubinden, sodass die zu simulierenden Szenarien schneller und effizienter aufgebaut werden könnten.

Ein weiteres Anliegen der am Forschungsprojekt beteiligten Unternehmen formuliert sich im Ausbau des Demonstrators hinsichtlich der hinter der Entladeanlage gelegenen Infrastruktur des Hafens. Bereichsweise begrenzt die Abfuhr des geförderten Schüttgutes die Entladeleistung. Demzufolge wären eine Abbildung und Integration des nachgeschalteten Regelwerks hinsichtlich Puffer- und Lagerkapazitäten sowie Materialströmen hilfreich.

Mit einem Ausbau des geschaffenen Demonstrators hinsichtlich zuvor genannter Erweiterungen bestünde die Möglichkeit zur Schaffung eines essentiellen Planungswerkzeugs zur Optimierung der Entladeprozesse bei Schüttgutschiffen. Hierbei involvierte Unternehmen würden dabei unterstützt, den zunehmenden Anforderungen der globalen Märkte zu begegnen.

7.3 Ausblick

Der wissenschaftlich technische Nutzen des Forschungsprojektes liegt in der Optimierung der Entladeprozesse von Schüttgutschiffen. Diesem wurde durch die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Simulation besagter Löschprozesse Rechnung getragen. Dieses Planungsverfahren erlaubt es, auf Basis der hierdurch gewonnenen fundamentalen Prognosen resultierend aus der vorgesehenen Entladestrategie, sowohl die Dauer und die Kosten als auch etwaige Komplikationen derartiger Entladevorgänge genauer und verbindlicher vorausszusagen, als dies mit den bisherigen Methoden bislang möglich ist. Ferner besteht ein wesentlicher Vorteil besagten Verfahrens darin, auf unerwartete Wandlungen im Entladeablauf schneller reagieren zu können, zumal verschiedene Planungsszenarien ohne großen Aufwand simulierbar sind.

Insbesondere wirkt sich die bessere und sicherere Planbarkeit besagter Löschprozesse wirtschaftlich betrachtet nutzbringend für KMU aus. Zum einen reduzieren sich die Entladekosten an sich infolge eines effizienteren Vorgehens und zum anderen sinkt das Risiko bzgl. etwaiger Konventionalstrafen infolge möglichen Überschreitens der vorgesehenen und verbindlich festgelegten Entladedauer.

Die im Zuge der Projektlaufzeit mittels des entwickelten Demonstrators durchgeführten Simulationen detailliert dokumentierter realer Löschvorgänge zeigten, dass ein

entsprechendes simulationsgestütztes Verfahren dazu geeignet ist, die Löschprozesse von Schüttgutschiffen deutlich zu optimieren.

Somit wurde das Projektziel erreicht!

Literaturverzeichnis

[Ble-09]	Blender Community Blender 2.71 http://www.blender.org/ Download am 29.06.2014
[Blo-08]	Blomeyer, N.: Erweiterung und Verifikation von Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut. Dissertation, Technische Universität München, 2008
[Bre-06]	Brendel, L., Modellierung der Verbackung von Schüttgütern, Chemie Ingenieur Technik No. 8, 2006
[Böh-02]	Böhrnsen, J.-U. Dynamisches Verhalten von Schüttgütern beim Entleeren aus Silos Braunschweiger Schriften zur Mechanik, 2002
[Büh-04a]	Bühler AG, Schweiz: Datenblatt Portanova – Pneumatischer Schiffsentlader, 2004
[Büh-04b]	Bühler AG, Schweiz: Datenblatt Portalink – Mechanischer Schiffsentlader, 2004
[Car-08]	Cargotec AB, Schweden: http://www.siwertell.com/?id=12711 ; Aufruf am 29.06.2014
[Cha-08]	Champion, J. et al. ZedGraph-Bibliothek Version 5.1.5 http://zedgraph.org 2014
[Cop-06]	Coperion Group GmbH, Deutschland: Fahrbarer pneumatischer Schiffsentlader, 2006

[DIN 69900]	DIN 69900: Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe; 2009
[Eic-09]	Eickershoff, S.: Schiff zerbricht beim Laden. Der Westen- Das Portal der WAZ Mediengruppe, http://www.derwesten.de/staedte/duisburg/Schiff-zerbricht-beim-Laden-id226943.html , Aufruf am 29.06.2014
[Fai-95]	Faires, J. D.; Burden, R. L. Numerische Methoden: Näherungsverfahren und ihre praktische Anwendung Spektrum Akademischer Verlag 1995
[FAM-11]	FAM Magdeburger Förderanlagen und Baumaschinen GmbH, Deutschland, http://www.fam.de/deutsch/Produkte/Hafentechnik/Schiffsentlader/index.html ; Aufruf am 29.06.2014
[GL-09]	Germanischer Lloyd AG Bauvorschriften und Richtlinien 2009 http://www.gl-group.com/infoServices/rules/pdfs/deutsch/qlrp-d.pdf ; Aufruf am 29.06.2014
[Grö-99]	Gröger, T.: Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Förderung in steilen und senkrechten Schlauchgurtförderern. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 1999
[Grö-05]	Gröger, T.; Katterfeld, A.: Kalibrierung von DEM Simulationsmodellen für die Schüttgutfördertechnik. In: 10. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005 – Neue Trends in der Anlagenentwicklung Magdeburg
[Grö-06]	Gröger, T.; Katterfeld, A.: On the Numerical Calibration of Discrete Element Models for the Simulation of Bulk Solids. In: Conference Proceeding of The Fifth World Congress on Particle technology. Orlando 2006
[GüB-03]	Günther, H.-O.; Beek, P. van: Advanced Planning and Scheduling Solutions in Process Industry, Springer, 2003

[Gün-98a]	Günthner, W. A.; Segerer, H.: Vergleichsbetrachtungen; Bayern, Österreich und Rheinregion; in Binnenschifffahrt – ZfB, Nr. 21, I. November-Ausgabe, 1998, S. 46-48
[Gün-98b]	Günthner, W. A.; Segerer, H.: Statusaufnahme für Main mit MD-Kanal und bayerische Donau; in Binnenschifffahrt – ZfB, Nr. 15/16, August-Ausgabe, 1998, S. 38-39
[Gün-98c]	Günthner, W. A.; Segerer, H.: Forschungsprojekt an der TU München: Binnenschifffahrt stärker in den KLV einbeziehen; in Binnenschifffahrt – ZfB, Nr. 12, II. Juni-Ausgabe, 1998, S. 22-24
[Gün-99a]	Günthner, W. A.; Fottner, J.: Hochleistungs-Schneckenförderer; Schüttgut I (1999), S. 36-37
[Gün-99b]	Günthner, W. A.; Fottner, J.: High-Capacity Screw Conveyor - Research Project of Krupp Fördertechnik and TU München; in Bulk Solids Handling II (1999), S. 246-247
[Gün-99c]	Günthner, W. A.; Segerer, H.: Lösungsansätze für eine verbesserte Wettbewerbsfähigkeit; in Binnenschifffahrt – ZfB, Nr. 3, Märzausgabe, 1999, S. 65-67
[Gün-01]	Günthner, W. A.; Segerer, H.; Heinecker, M.: Technische und logistische Maßnahmen zur weiteren Entwicklung der Verkehre über die deutschen und österreichischen Donauhäfen; Abschlussbericht, 2001
[Gün-06a]	Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Tilke, C.: Studie über Entwicklungsmöglichkeiten bei mechanischen Fördersystemen zum Getreideumschlag; Abschlussbericht, 2006
[Gün-06b]	Günthner, W. A.; Blomeyer N.; Rong O.: Entwicklung von praxistauglichen Auslegungsverfahren für Schüttgut-Hochleistungs- Schneckenförderer. Forschungsbericht AiF-FV-Nr. 14149N: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2006
[Gün-08]	Günthner, W. A.; Tenerowicz, P.; Tilke, C.: Energieeffizienz in der Schüttgutfördertechnik, In: Tagungsbericht Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2008; Garching b. München

[Gün-09a]	Günthner, W. A. Ausführliche Beschreibung zum Forschungsantrag „Optimierung von Entladestrategien bei der Schüttgut-Schiffsentladung“ 2009
[Gün-09b]	Günthner, W. A.; Kessler, S.; Fischer, G.; Rakitsch, S. Restentleerung bei der Schiffsentladung: Abschlussbericht 2009
[Gün-10]	Günthner, W. A.; Tilke, C.; Rakitsch, S.; Mutschler, R.: Vergleich verschiedener Schiffsentladesysteme bezüglich ihres spezifischen Energiebedarfs, In: Tagungsbericht Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2010; Garching b. München
[Gün-14]	Günthner, W. A.; Kesser, S.; Frenz, T.: Optimierte Entladestrategien für die Schüttgutschiffsentladung In: Schüttgut, Vogel Business Media GmbH & Co. KG ISSN 0946-7939, Ausgabe Nr. 2/2014, Volume 20
[Har-84]	Ostmann, K.; Richard, H.; Hartmann Fördertechnik GmbH, Deutschland: Schiffs- und Bunkerentladevorrichtung bzw. Haldenräumvorrichtung, insbesondere zur Förderung schwer fließender Schüttgüter; Patentschrift DE 3041 062 C2, 1984
[Kat-05a]	Katterfeld, A.: Funktionsanalyse von Rohrkettenförderern. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2005
[Kat-05b]	Katterfeld, A.; Franz, M.: Beitrag zur Simulation von Gutübergabestellen mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode. Begleitband Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2005, Magdeburg 2005
[Kon-87]	Sepling, M.; Antikainen, J.; Jusslin, J.; Kone Oy, Finnland: Schiffsentladeeinrichtung; Offenlegungsschrift DE 3636 833 A1, 1987
[Kru-86a]	Krumrey, A.; Fried. Krupp GmbH, Deutschland: Schiffsentlader; Offenlegungsschrift DE 3432 458 A1, 1986

[Kru-86b]	Kostrewa, L.; Fried. Krupp GmbH, Deutschland: Steilförderer; Offenlegungsschrift DE 3435 479 A1, 1986
[Leh-09]	Lehenbauer, D.; Hogue, R. XAML Exporter v0.48 http://xamlexporter.codeplex.com/ 2014
[Mic-07]	Microsoft Corporation Windows Presentation Foundation: Threading-Modell Microsoft Developer Network Library 2007
[Mic-08]	Microsoft Corporation .NET Framework Klassenbibliothek Microsoft Developer Network Library 2008
[Mor-94]	Morris, P.: The Management of Projects, Thomas Telford House, London, 1994
[Neu-05]	Neuero Industrietechnik für Förderanlagen GmbH, Deutschland: Multibelt by Neuero, 2005
[Neu-07]	Neuero Industrietechnik für Förderanlagen GmbH, Deutschland: Multiport M600, 2007
[PHB-86]	Horst, E.; PHB Weserhütte AG, Deutschland: Bewegliches Becherwerk für Schüttgüter; Offenlegungsschrift DE 3427 170 A1, 1986
[PHB-87a]	Steinkötter, A.; PHB Weserhütte AG, Deutschland: Fahrbarer Schiffsentlader zur kontinuierlichen Entnahme von Schüttgut; Patentschrift DE 3150 562 C2, 1987
[PHB-87b]	Steinkötter, A.; PHB Weserhütte AG, Deutschland: Fahrbarer kontinuierlich arbeitender Schiffsentlader; Patentschrift DE 3334 399 C2, 1987
[PWH-94]	Steckel, H.; Stenger, E.; PWH Anlagen + Systeme GmbH, Deutschland: Becherwerk; Patentschrift DE 4308 133 C1, 1994

Literaturverzeichnis

[Seg-99]	Segerer, H.: Marktfähige Konzepte zur Entwicklung Kombiniertes Ladungsverkehre auf den Wasserstraßen Bayerns; Duisburg: Binnenschiffahrts-Verlag GmbH, 1999
[Spa-00]	Spanke, M.: Comparison of different types of ship unloaders with focus on continuous unloading technology; Bulk solids handling 20 (2000), Nr. 4, S. 494-498
[SUM-01]	Kamiwaki, T.; SUMITOMO HEAVY IND LTD, Japan: Screw Feeder for un-loader and dredging method using the same; Patentschrift 2001253546 A, 2001
[Tak-07]	Takraf GmbH, Deutschland: Anlagen für Massengutumschlag, 2007
[Til-08]	Tilke, Ch.; Rakitsch, S. Energy savings potential at ship discharge Vortrag beim UNISTOCK AGM 2008, Uzwil, Schweiz, 05.09.2008
[TKF-11a]	ThyssenKrupp Fördertechnik GmbH, Deutschland: http://www.tk-materialshandling.com/frm_produkte_detaile.asp?EintragID=561 ; Aufruf am 11.08.2011
[TKF-11b]	ThyssenKrupp Fördertechnik GmbH, Deutschland: http://www.tk-materialshandling.com/frm_produkte_detaile.asp?EintragID=563 ; Aufruf am 11.08.2011
[Vor-08]	Vorwerk, Ch.; Dilefeld, M.: Modellierung und Simulation des Schüttgutstroms in Übergabestellen. Schüttgut 14 (2008), Nr. 3, S. 162-170
[Wei-99]	Weiss, M.; Thomet, M.; Mostfoui, F.: Interactive Simulation Model for Bulk Shipping Terminals, bulk solids handling 19 (1999), Nr. 1, S. 95-98
[Wik-09]	Wikipedia - Die freie Enzyklopädie Artikel "Extensible Markup Language" http://de.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language Aufgerufen am 26.06.2014

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Schüttgut-Schiffsentladung – technische Zusammenhänge	3
Abbildung 1-2: Planierdrauen unterstützen während der Hauptentladung	5
Abbildung 1-3: Besenrein-Säubern eines Laderaums	6
Abbildung 1-4: Wesentliche Übersichtsdarstellung eines Entladeprozesses	10
Abbildung 3-1: Struktur des Modells der Entladeanlage	20
Abbildung 3-2: Entladertypen nach [Gün-09b].....	20
Abbildung 4-1: Globales Koordinatensystem.....	29
Abbildung 4-2: Koordinatendefinition Schiff nach [GL-09]	30
Abbildung 4-3: Geometrie und Abmessungen eines Laderaums.....	33
Abbildung 4-4: Maße der Ladungsschichten	34
Abbildung 4-5: Tonti-Diagramm des Schüttgutmodells.....	36
Abbildung 4-6: Numerische Umsetzung des Schüttgutmodells	38
Abbildung 4-7: Räumliche Diskretisierung des Laderaums	39
Abbildung 4-8: Diskretes Flächenelement	39
Abbildung 4-9: Knoten-Pyramiden eines Flächenelements	40
Abbildung 4-10: Verbindungsknoten mit vier angrenzenden Flächenelementen	41
Abbildung 4-11: Grundflächen der Knoten-Pyramiden	42
Abbildung 4-12: Kontrollbereiche zur Bilanzierung des Volumenstroms	43
Abbildung 4-13: Abmessungen der Entladeanlage.....	53
Abbildung 4-14: Gezeitenmodellierung.....	54
Abbildung 5-1: Grundlegende Programmstruktur	60
Abbildung 5-2: Liste der Simulationskomponenten.....	61
Abbildung 5-3: Quasiparallele Simulation	67
Abbildung 5-4: Synchroner Simulation.....	69
Abbildung 5-5: Struktur eines Zustandsabbilds	72
Abbildung 5-6: UML-Diagramm LoggingInfo_t.....	78
Abbildung 5-7: Aufbau der Aufzeichnungsdatei.....	79
Abbildung 5-8: Auswertungsprogramm	80
Abbildung 6-1: Entladestrategie Heber I - Brake	84
Abbildung 6-2: Entladestrategie Heber IV - Brake	84
Abbildung 6-3: Entladestrategie Rostock.....	85
Abbildung 6-4: Simulationsergebnisse Heber I - Brake	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6-5: Simulationsergebnisse Heber IV - Brake	87
Abbildung 6-6: Simulationsergebnisse - Rostock	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Koeffizienten zur Bilanzierung des Volumenstroms.....	44
--	----

Formelverzeichnis

Formel 4-1: z-Position eines Schiffs	31
Formel 4-2: Tiefgang	31
Formel 4-3: Beziehungen der Schichtenmaße	34
Formel 4-4: Ladungshöhe.....	34
Formel 4-5: Volumen einer ebenen Ladungsschicht	35
Formel 4-6: Schüttgutmodell Massenstromdichte.....	37
Formel 4-7: Flächeninhalt eines Flächenelements	39
Formel 4-8: Volumen eines Flächenelements	40
Formel 4-9: Berechnung des Gradienten des Höhenprofils.....	40
Formel 4-10: Schüttgutmodell Volumenstromdichte	41
Formel 4-11: Volumenänderung eines Flächenelements	42
Formel 4-12: Volumenänderung eines Verbindungsknotens	42
Formel 4-13: Bilanzierung des Volumenstroms	43
Formel 4-14: Verallgemeinerte Bilanzierung des Volumenstroms	44
Formel 4-15: Verallgemeinerte Schichtdickenänderung	45
Formel 4-16: Knotendickenänderung (numerische Umsetzung).....	46
Formel 4-17: Volumenstromdichte (numerische Umsetzung).....	46
Formel 4-18: Austauschvolumen (numerische Umsetzung)	46
Formel 4-19: Maximale Zeitschrittweite des Schüttgutmodells	49
Formel 4-20: Zugabevolumen.....	50
Formel 4-21: Schichtdickenänderung durch Massenzugabe	50
Formel 4-22: Massenzugabe (numerische Umsetzung)	51
Formel 4-23: Kleinste Massenzugabe	52

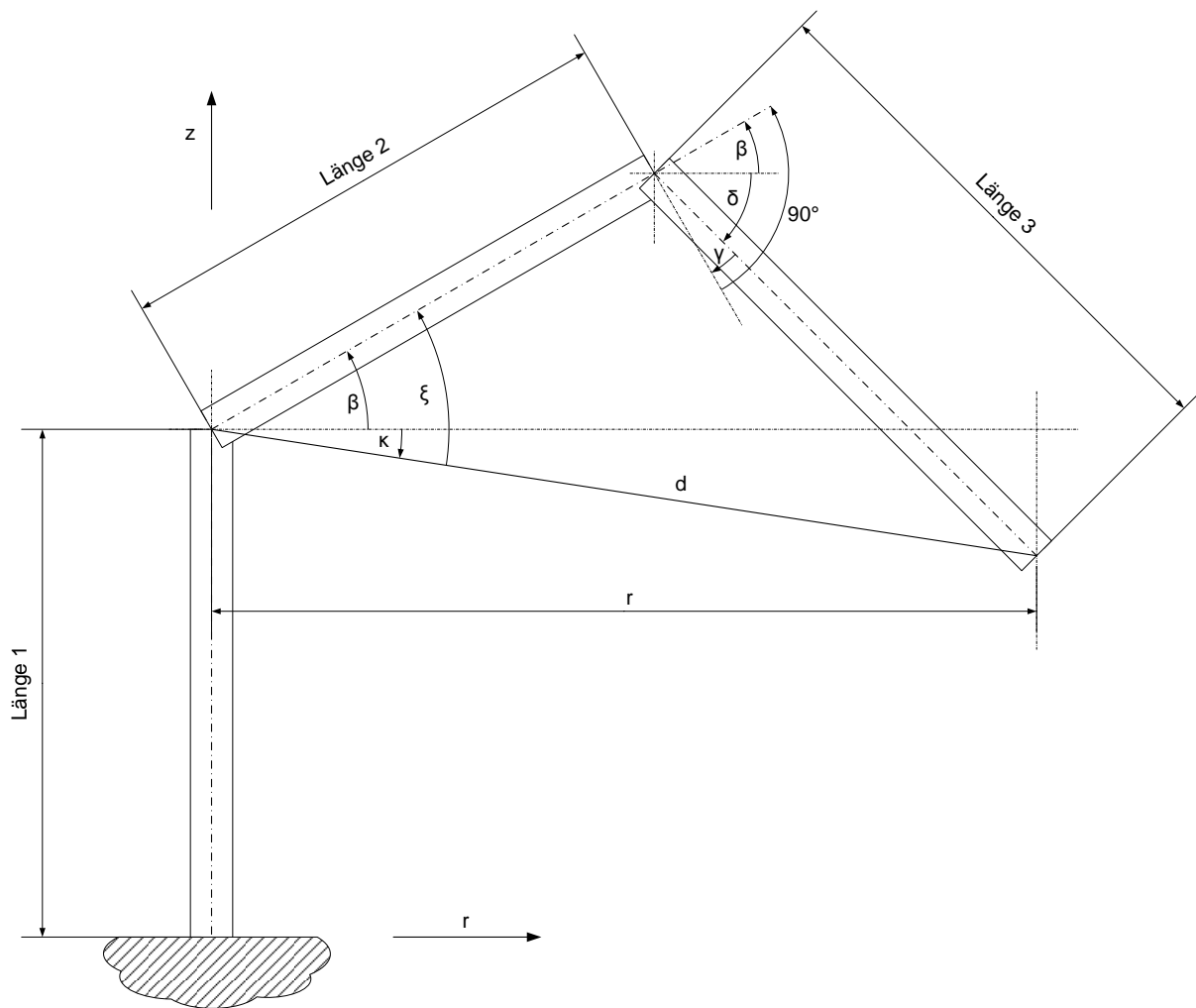
Nomenklatur

A	Grundfläche eines Flächenelements ($A = L_x \cdot L_y$)
β	Kennzahl der Grundfläche einer Knotenpyramide
C_1	Materialparameter zur Charakterisierung des Fließverhaltens
C_2, C_3	Materialparameter zur Beschreibung des krit. Schüttwinkels
C_m	Materialparameter zur Charakterisierung des Fließverhaltens
FE	Flächenelement
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
g	Fallbeschleunigung $g \approx 9,81 \text{ N/kg}$
L_x, L_y	Länge bzw. Breite eines Flächenelements
n	Anzahl der an einen Verbindungsknoten anknüpfenden Flächenelemente ($1 \leq n \leq 4$)
Q	Zugriffsfläche für Ladungszugabe bzw. -entnahme
Θ	Heaviside'sche Stufenfunktion
VK	Verbindungsknoten (Knoten an der Ecke eines FEs)

Anhang A Entladermodell

Der abgebildete kontinuierliche Entlader verfügt über drei rotatorische Freiheitsgrade:

- Rotation des Turms um die z-Achse α
- Heben/Senken des Auslegers β
- Kick-In / Kick-Out des Vertikalförderers γ



$$\xi := \beta - \kappa$$

$$\delta := \beta - 90^\circ - \gamma$$

In der abgebildeten Stellung sind die Werte der Winkel κ , γ und δ negativ.

Der Abstand vom Ursprung zur Achse des Drehgelenks Turm/Ausleger wird als L_1 bezeichnet. Der Ausleger hat die Länge L_2 , der Vertikalförderer die Länge L_3 .

1. Beschreibung

Die Längen L_1 , L_2 und L_3 der einzelnen Glieder und die Breite B der Basiskonstruktion können als Objekteigenschaft vorgegeben werden. Für alle Gelenkwinkel kann die Verstellgeschwindigkeit [$^\circ/s$] sowie der minimale und maximale Wert [$^\circ$] angegeben werden. Die Fördercharakteristik (Abschnitt 5) wird über die Modellparameter Aufnahme­fläche (A_{Aufnahme}), minimale Eintauchtiefe (e_{min}), optimale Eintauchtiefe (e_{opt}) und maximale Eintauchtiefe (e_{max}) sowie die maximale Förderleistung (\dot{m}_{max}) beschrieben.

Der mögliche Arbeitsbereich des Entladers wird durch die Längen der einzelnen Glieder und die Gelenkwinkelbegrenzungen bestimmt. Die Längen der Glieder, die Breite der Basiskonstruktion und die Aufnahme­fläche bestimmen den Kollisionsbereich (Abschnitt 6) und die Darstellung des Entladers im 3D-Modell.

2. Bewegung

Die Bewegung des Entladers erfolgt durch Verstellung der Gelenkwinkel α , β und γ . Für jeden Gelenkwinkel ist der Ist- und Sollwert als Zustandsgröße definiert. Bei einer Abweichung zwischen Ist- und Soll-Wert wird der Ist-Wert (mit der maximalen Verstellgeschwindigkeit des jeweiligen Gelenks) dem Sollwert nachgeführt.

Die Vorgabe der Winkel-Soll-Werte ist abhängig vom gewählten Bewegungsmodus des Entladers. Im manuellen Modus können die Sollwerte direkt vorgegeben werden. Im Standardmodus ("normal") werden sie aus der direkten Umkehrung der Sollposition der Entladerspitze gewonnen. Ist die kartesische Bewegung gewählt, werden die Sollwerte der Gelenkwinkel durch die kartesische Rückwärtskinematik vorgegeben.

3. Vorwärtskinematik

Gesucht ist die Position der Entladerspitze in Entladerkoordinaten bei gegebener Winkelkonfiguration. Durch die Verwendung der Zylinderkoordinaten (r , α , z) kann α von β und γ entkoppelt betrachtet werden. Mit

$$r = L_2 \cdot \cos \beta + L_3 \cdot \cos \delta$$

ergibt sich die Position der Entladerspitze zu

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos \alpha \\ r \cdot \sin \alpha \\ L_1 + L_2 \cdot \sin \beta + L_3 \cdot \sin \delta \end{bmatrix}$$

4. Rückwärtskinematik

Die Rückwärtskinematik dient zur Berechnung der Stellungen der Gelenkwinkel α bei gegebener Position \mathbf{x} der Entladerspitze in lokalen Entladerkoordinaten. Aus der direkten Umkehrung kann die Winkelkonfiguration unmittelbar berechnet werden. Durch Anpassung der einzelnen Gelenkwinkel mit der jeweils maximalen Verstellgeschwindigkeit kann die Soll-Position möglichst schnell erreicht werden. Dabei bewegt sich die Entladerspitze auf einer gekrümmten Bahn. Durch die kartesische Rückwärtskinematik kann eine Bewegung auf einer geraden Bahn erreicht werden.

4.1. Umkehrbarkeit

Die Menge der erreichbaren Positionen ist durch die Kinematik des Entladers auf einen (hohl)kugelförmigen Bereich um die Turmspitze beschränkt. Weitere Einschränkungen kommen durch die Begrenzung der Gelenkwinkel hinzu. Für bestimmte Positionen existieren mehrere mögliche Umkehrungen. Mindestens eine Umkehrung (zunächst ohne Beachtung der Gelenkwinkelbegrenzungen) existiert, wenn gilt

$$L_2 - L_3 < d < L_2 + L_3$$

mit

$$d := \sqrt{r^2 + (L_1 - z)^2}$$

Es werden (vorbehaltlich weiterer konstruktionsbedingter Gelenkwinkelbegrenzungen) nur Lösungen im folgenden Winkelbereich zugelassen:

$$-180^\circ < \alpha \leq +180^\circ$$

$$-90^\circ < \beta < +90^\circ$$

$$-90^\circ < \gamma < +90^\circ$$

4.2. Direkte Umkehrung

Für den Winkel α gilt:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x}$$

Unter Berücksichtigung des zulässigen Wertebereichs kann die Lösung für α bestimmt werden. Aus dem Kosinussatz für das Dreieck L_2 d L_3 kann der Gelenkwinkel γ bestimmt werden

$$d^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2 \cdot L_2 L_3 \cdot \cos(90^\circ - \gamma)$$

$$\cos(90^\circ - \gamma) = \frac{L_2^2 + L_3^2 - d^2}{2 \cdot L_2 L_3}$$

Falls der Term auf der rechten Seite der Gleichung einen Wert außerhalb des Wertebereichs der Kosinusfunktion aufweist, ist die Umkehrung nicht möglich.

Wiederum aus dem Kosinussatz folgt:

$$L_2^2 + d^2 - 2 \cdot L_2 \cdot d \cdot \cos \xi = L_3^2$$

$$\cos \xi = \frac{L_2^2 - L_3^2 + d^2}{2 \cdot L_2 \cdot d}$$

Falls der Term auf der rechten Seite der Gleichung einen Wert außerhalb des Wertebereichs der Kosinusfunktion aufweist, ist die Umkehrung ebenfalls nicht möglich.

β ergibt sich aus

$$\beta = \xi + \kappa$$

mit

$$\tan \kappa = \frac{z - L_1}{r}$$

Falls eine Lösung gefunden wird, genügt diese den Anforderungen aus Abschnitt 4.1. Abschließend ist noch zu prüfen, ob die Werte mit den (engeren) Winkelbeschränkungen des Entladers erreichbar sind.

4.3. Bewegung in kartesischen Koordinaten

4.3.1. Jacobi-Matrix

Die Jacobi-Matrix setzt Änderungen der Gelenkwinkel in Bezug zur daraus resultierenden Positionsänderung der Entladerspitze. Sie ist abhängig von der momentanen Gelenkstellung.

$$\mathfrak{J}_x = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\alpha}} = \begin{bmatrix} -r \cdot \sin \alpha & -\bar{r} \cdot \cos \alpha & L_3 \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha \\ r \cdot \cos \alpha & -\bar{r} \cdot \sin \alpha & L_3 \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha \\ 0 & r & -L_3 \cdot \cos \delta \end{bmatrix}$$

mit

r wie zuvor

und

$$\bar{r} := L_2 \cdot \sin \beta + L_3 \cdot \sin \delta$$

Durch Invertierung der Jacobi-Matrix lassen sich die für eine gewünschte Positionsänderung erforderlichen Winkeländerungen bestimmen:

$$\mathfrak{J}_x = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\alpha}} \Rightarrow \Delta \mathbf{x} \approx \mathfrak{J}_x \Delta \boldsymbol{\alpha} \Rightarrow \Delta \boldsymbol{\alpha} \approx [\mathfrak{J}_x]^{-1} \Delta \mathbf{x}$$

Falls sich der Entlader in einer singulären Stellung befindet, d. h. einen Freiheitsgrad verliert, ist \mathfrak{J}_x nicht invertierbar.

4.3.2. Kartesische Rückwärtskinematik

Die gewünschte Positionsänderung kann berechnet werden durch

$$\Delta \mathbf{x} = \frac{\mathbf{x}_{Soll} - \mathbf{x}_{ist}}{\|\mathbf{x}_{Soll} - \mathbf{x}_{ist}\|} \cdot v \cdot \Delta t$$

Hierbei entspricht v der Sollgeschwindigkeit der Entladerspitze. Durch Lösung des linearen Gleichungssystems

$$\Delta \mathbf{x} = \mathfrak{J}_x \Delta \boldsymbol{\alpha}$$

können die erforderlichen Winkeländerungen $\Delta \boldsymbol{\alpha}$ berechnet werden. Falls durch die so berechneten Winkeländerungen die maximale Verstellgeschwindigkeit eines der Gelenke überschritten wird, wird $\Delta \boldsymbol{\alpha}$ gleichförmig skaliert, so dass die maximale Verstellgeschwindigkeit eingehalten wird.

5. Ladungsentnahme

Die Ladungsaufnahme erfolgt in einem Flächenbereich um die Entladerspitze. Die Größe A_{Aufnahme} der Fläche kann als Objekteigenschaft des Entladers vorgegeben werden. Der erzielbare Massenstrom ist linear abhängig von der (über die Aufnahme­fläche gemittelten) Eintauchtiefe e .

$$\dot{m} = \begin{cases} 0 & e \leq e_{min} \\ \dot{m}_{max} \cdot \frac{e - e_{min}}{e_{opt} - e_{min}} & e_{min} < e < e_{opt} \\ \dot{m}_{max} & e \geq e_{opt} \end{cases}$$

Die maximale Förderleistung \dot{m}_{max} , die minimale und optimale Eintauchtiefe e_{min} bzw. e_{opt} können als Objekteigenschaften vorgegeben werden. Als zusätzliche Objekteigenschaft kann die maximale Eintauchtiefe e_{max} angegeben werden. Diese bestimmt bei der Steuerung des Entladevorgangs durch einen Task vom Typ "Entladungspunkt" den Regelungssollwert für die Eintauchtiefe:

$$e_{soll} = \frac{e_{max} - e_{opt}}{2}$$

Aus dem Massenstrom wird die in einem Zeitschritt zu entnehmende Ladungsmenge berechnet:

$$\Delta m_{soll} = \dot{m} \cdot \Delta t$$

Über eine Schnittstelle des dem Entlader zugeordneten Laderaum-Objekts wird die Massenentnahme durchgeführt. Wenn im Bereich der Aufnahme­fläche nicht genug Material vorhanden ist, kann die geforderte Menge nicht entnommen werden. Die tatsächlich erzielte Förderleistung wird berechnet zu

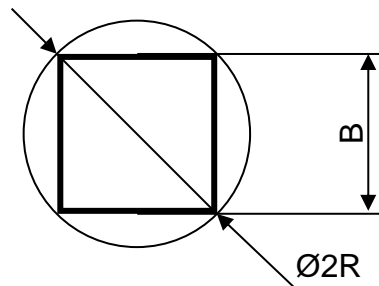
$$\dot{m}_{ist} = \frac{\Delta m_{ist}}{\Delta t}$$

6. Kollisionsbereich

Der Kollisionsbereich des Entladers wird durch drei Zylinder beschrieben. Die Bounding Sphere stellt eine Kugel dar, die den Entlader vollständig einhüllt.

Turm

Der Turm (inkl. Basiskonstruktion) wird im Kollisionsmodell durch einen Zylinder mit der Länge L und dem Radius R beschrieben. R wird so gewählt, dass die Basiskonstruktion vollständig umschlossen wird.



$$L_{\text{Turm}} = L_1$$

$$R_{\text{Turm}} = \frac{\sqrt{2} \cdot B}{2}$$

B entspricht der Kantenlänge der Basiskonstruktion.

Ausleger

Der Ausleger wird im Kollisionsmodell durch einen Zylinder der Länge L_2 dargestellt. Der Radius ist abhängig von der gewählten Aufnahme­fläche A_{Aufnahme} .

$$L_{\text{Ausleger}} = L_2$$

$$R_{\text{Ausleger}} = \frac{\sqrt{A_{\text{Aufnahme}}}}{2}$$

Vertikalförderer

Der Zylinder um den Vertikalförderer hat die Länge L_3 und den Radius

$$L_{\text{Vertikalförderer}} = L_3$$

$$R_{\text{Vertikalförderer}} = 0,71 \cdot R_{\text{Ausleger}}$$

Bounding Sphere

Der Mittelpunkt der Bounding Sphere wird im Gelenk (Turm - Ausleger) platziert. Der Radius beträgt

$$R = L_2 + L_3$$

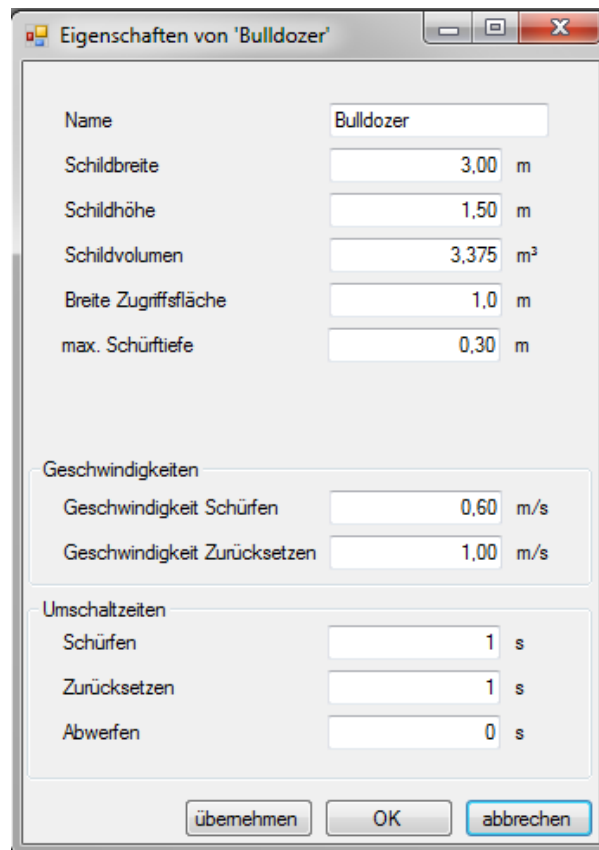
Bei dieser Wahl wurde vorausgesetzt, dass $L_1 \leq L_2 + L_3$ gilt, was bei allen betrachteten Entladern gegeben ist.

Der diskontinuierliche Entladertyp in Form eines Greifers wurde durch die Möglichkeit zur Hinterlegung entsprechender Spielzeiten und der Entladestrategie des Entladers in Form linearen bzw. kreisförmigen Abgreifens von Ladegut implementiert. Besagte beide Fahrstrategien entsprechen den mittels Greiferbetriebs in der Realität angewandten Verfahren – kreisförmige Ladungsentnahmen mit mittig verbleibenden Schüttgutkegeln werden von Wippdrehkränen ausgeführt, lineares Abgreifen von Ladungsgut wird durch Portalkrane praktiziert. Der Greiferfüllgrad, das max. mögliche Greifervolumen sowie die max. zulässige Tragkraft des Greifers sind die weiteren im Simulationsmodell zur Beschreibung des diskontinuierlichen Entladertyps erforderlichen Faktoren.

Eine 3D-Abbildung des Arbeitsprozesses des diskontinuierlichen Entladertyps ist nicht hilfreich bzw. zielführend und wurde deshalb nicht umgesetzt, zumal Kollisionen des diskontinuierlichen Entladers mit seiner Umgebung keine Betrachtung erfordern: Greifer werden ausschließlich vertikal in im Laderaum abgelassen, Schrägzug, Pendeln, Werfen sowie Untergreifen des Lukenrandes sind ausgeschlossen.

Anhang B Schüttgutzuführung

Hinsichtlich der Zuführung von Ladegut zum Entlader wurde der Zuführgerätetyp Planierraupe implementiert. Die wesentlichen Kenndaten zur Beschreibung der Schildcharakteristik und der Fahr- bzw. Arbeitsgeschwindigkeiten bilden diesen Gerätetyp entsprechend seines realen Verhaltens simulationskonform ab.

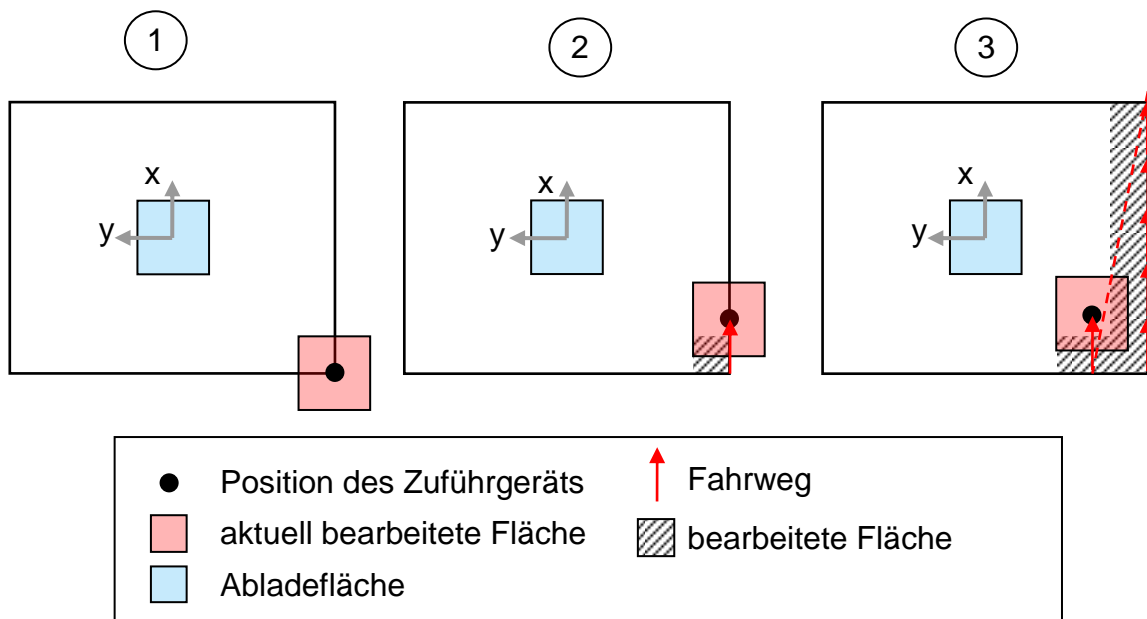


The image shows a software dialog box titled "Eigenschaften von 'Bulldozer'". It contains several input fields for defining the bulldozer's characteristics and performance. The parameters are organized into sections: Name, Schild (blade) characteristics, Geschwindigkeiten (speeds), and Umschaltzeiten (switching times).

Parameter	Value	Unit
Name	Bulldozer	
Schildbreite	3,00	m
Schildhöhe	1,50	m
Schildvolumen	3,375	m ³
Breite Zugriffsfläche	1,0	m
max. Schürftiefe	0,30	m
Geschwindigkeiten		
Geschwindigkeit Schürfen	0,60	m/s
Geschwindigkeit Zurücksetzen	1,00	m/s
Umschaltzeiten		
Schürfen	1	s
Zurücksetzen	1	s
Abwerfen	0	s

Buttons at the bottom:

Ergänzend zum Zuführtyp Planierraupe wurde zur möglichen Berücksichtigung abweichender Zuführgerätetypen die undefinierte Zuführung implementiert. Diese stellt ein fiktives Zuführgerät dar, das einen Laderaum in Streifen abfährt, dabei Ladung entnimmt und diese ohne Zeitverzögerung in der Mitte des Laderaums wieder ablädt.

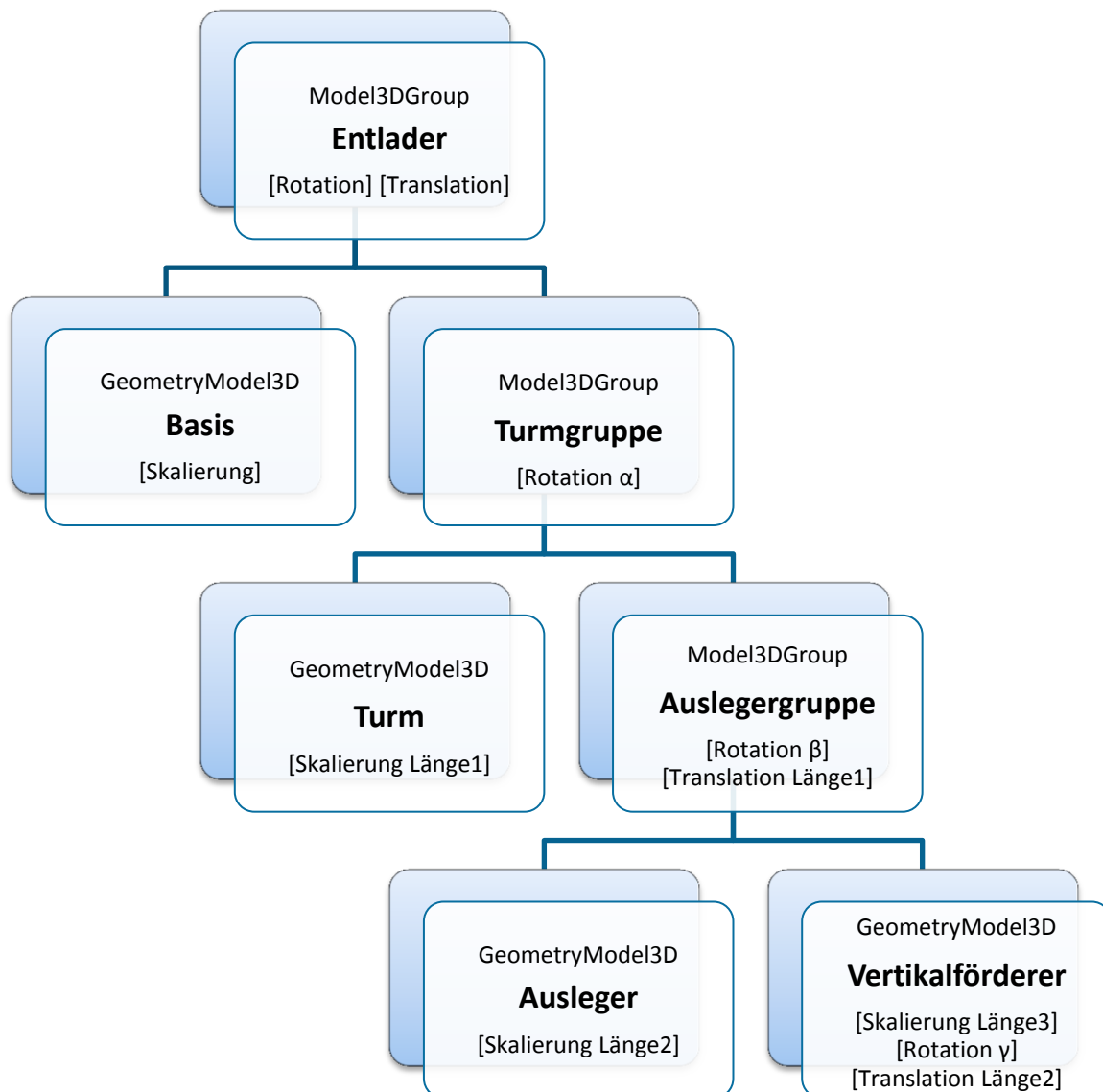


Das Zuführgerät beginnt in einer Ecke des Laderaums. Es entnimmt mit einer vorgegebenen Förderleistung Ladung aus einer quadratischen Fläche mit der Kantenlänge a (Aufnehmerbreite) und deponiert diese unverzüglich in der Mitte des Laderaums. Ist keine Masse mehr vorhanden, fährt es um eine Schrittweite in x -Richtung fort, ohne die konfigurierte Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten. Die Zuführleistung wird über die gesamte Bearbeitungszeit bilanziert. Zeiten mit zu geringer Förderleistung können durch höhere Förderleistung zu einem späteren Zeitpunkt wieder ausgeglichen.

Am Ende des Laderaums beginnt das Zuführgerät ohne Zeitverzug einen neuen, um eine Schrittweite in y -Richtung versetzten Streifen. Ist die Aufnehmerbreite a größer als die Schrittweite, überlappen die Streifen. Nach Bearbeitung des kompletten Laderaums beginnt das Zuführgerät von vorne.

Anhang C 3D-Modell des kontinuierlichen Entladers

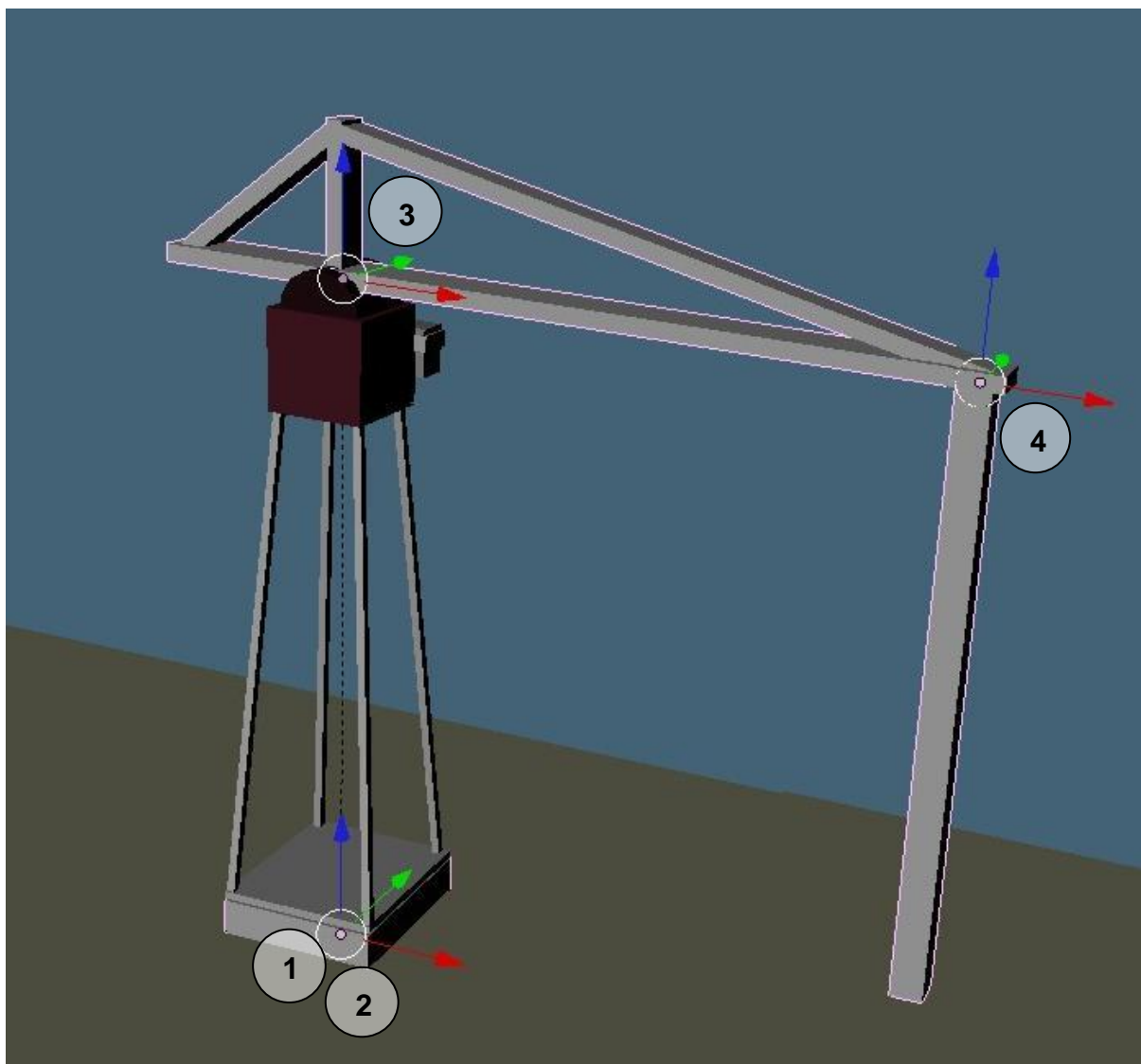
Das Modell wurde mit der 3D-Software Blender erzeugt. Mit Hilfe von Transformationen kann es skaliert und bewegt werden. Das Modell besitzt folgende hierarchische Struktur (die Transformationsmöglichkeiten sind in eckigen Klammern angegeben):



Auf die einzelnen Gruppen und Geometriemodelle können Transformationen angewendet werden. Es empfiehlt sich, Transformationen in der Reihenfolge Skalierung - Rotation - Translation durchzuführen. Transformationen, die auf eine Gruppe angewendet werden, wirken sich auf alle Unterelemente der Gruppe aus.

Skalierungen werden unmittelbar auf die einzelnen Geometriemodelle angewendet, nicht auf Gruppen. Die Skalierungsfaktoren für Längen ergeben sich durch die Division der gewünschten Länge durch die ursprüngliche Länge im 3D-Modell. Auf die gesonderte Angabe der Breitenskalierung, die auf jedes Geometriemodell angewendet wird, wurde im vorstehenden Strukturdiagramm verzichtet; sie findet über dieselbe Transformation wie die Längenskalierung statt.

Bei der Modellerstellung werden die einzelnen Geometriemodelle bereits entsprechend der zuvor skizzierten Hierarchie gruppiert. Jede Gruppe besitzt ein eigenes Koordinatensystem (die Farbcodierung der Koordinatenrichtungen wurde aus Blender übernommen: x: rot – y: grün – z: blau):

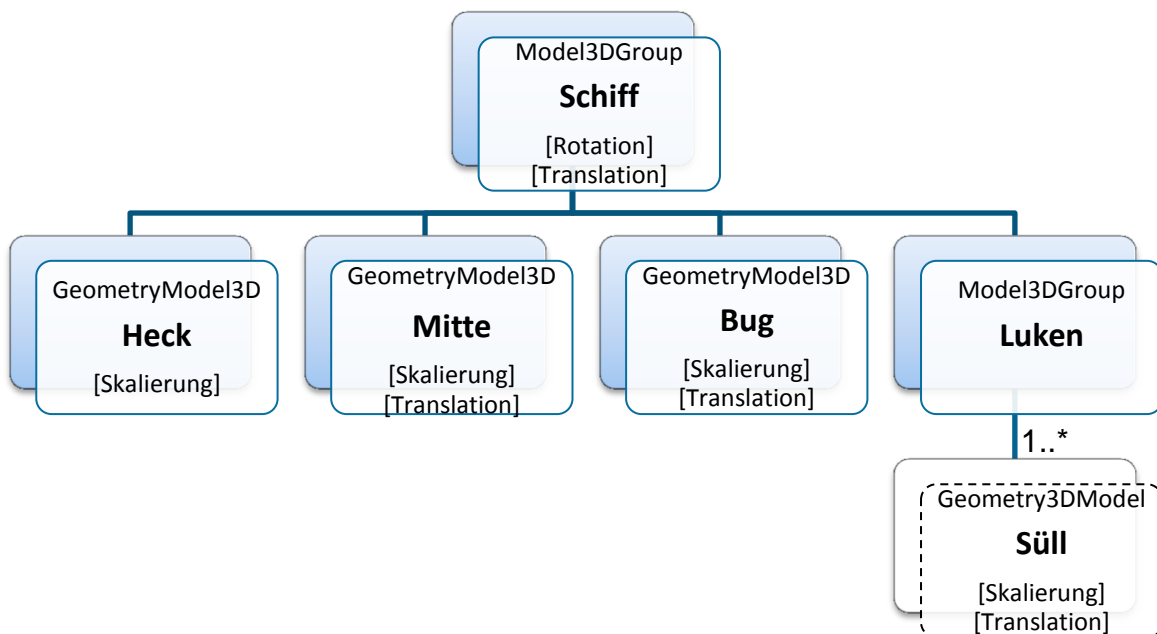


Das KoSy1 entspricht dem Basiskoordinatensystem des Entladens. Das Koordinatensystem der Turmgruppe geht aus KoSy1 durch Rotation um α um die z_1 -Achse hervor und ist in der dargestellten Lage ($\alpha = 0$) deckungsgleich mit diesem. Das KoSy3 der Auslegergruppe wird zunächst um β um die $(-y_2)$ -Achse gedreht (Aufwärtsbewegung des Auslegers wird positiv gezählt) und um L_1 in z_2 -Richtung verschoben. Das KoSy4 geht aus KoSy3 durch Drehung um β um y_3 und Translation um L_2 in Richtung von x_3 hervor.

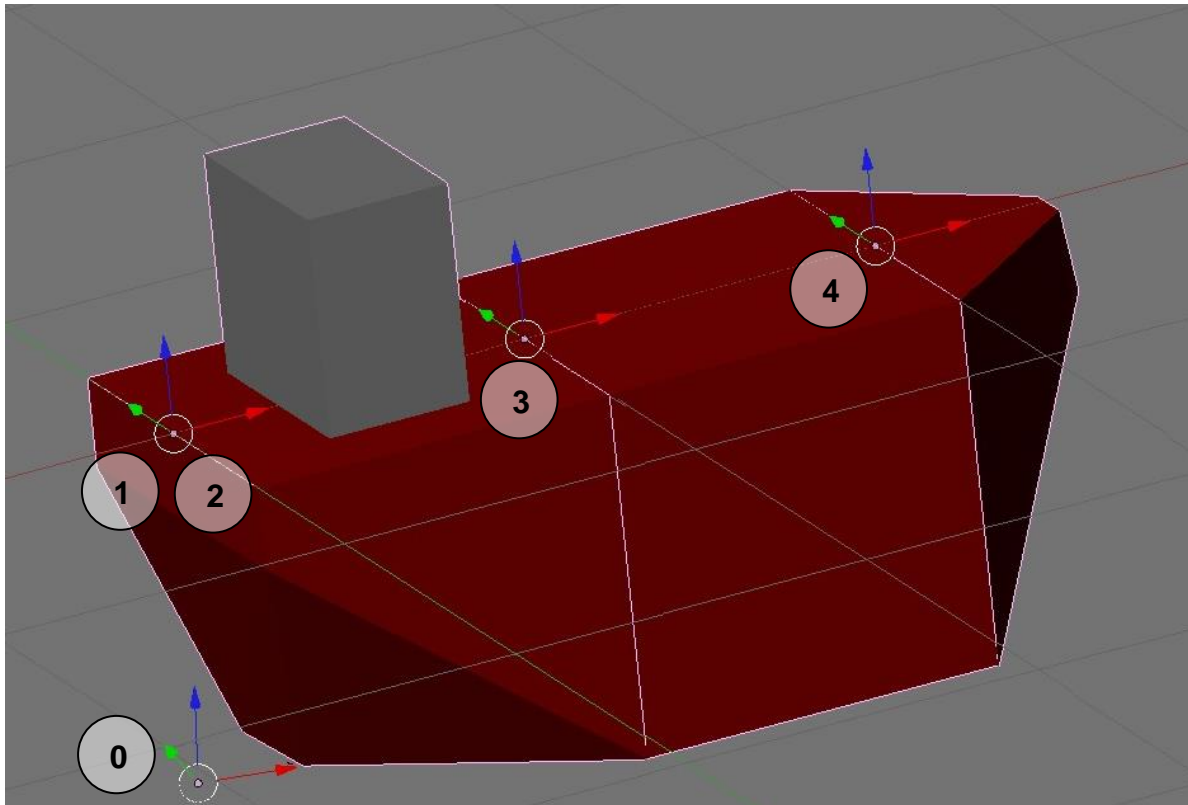
Anhang D 3D-Modell des Schiffs

Das Modell wurde mit der 3D-Software Blender erzeugt. Der Rumpf besteht aus drei einzelnen Geometriemodellen für Heck, Mittelteil und Bug. Zusätzlich ist eine Gruppe enthalten, in die dynamisch ein 3D-Modell des Lukensülls geladen werden kann.

Die Länge des Heckteils wird gleich der Schiffsbreite angenommen, die Länge des Bugteils wird zu 48% der Schiffsbreite gesetzt. Die exakte Nachbildung der tatsächlichen Schiffsgeometrie durch das 3D-Modell ist nicht erforderlich, da für den Entladevorgang hauptsächlich die Positionen der Laderäume relevant sind, welche im Schiff beliebig festgelegt werden können.



Bei der Erstellung wurden alle Maße auf Einheitswerte gesetzt, um die Berechnung der Skalierungsfaktoren zu vereinfachen (Höhe 1, Breite 1, Länge Heckteil 1, Länge Mittelteil 1). Demzufolge mutet das unskalierte Modell verhältnismäßig untypisch an.



Der Ursprung des 3D-Modells (KoSy1) liegt auf Höhe des Decks und entspricht nicht dem Ursprung des Schiffs (KoSy0, auf Höhe des Kiels), weshalb bei der Positionierung des Schiffmodells im 3D-Raum die Schiffshöhe als Offset zur z-Koordinate zu addieren ist.

Das Koordinatensystem des Heckteils (KoSy2) ist identisch mit KoSy1. KoSy3 des Mittelteils geht aus KoSy1 durch Translation um die Länge des Heckteils in x_1 -Richtung hervor. KoSy4 entsteht durch Translation um die Länge des Heck- und Mittelteils.

Anhang E Kollisionskontrolle

Kollisionsbereiche sind aus grundlegenden Geometrieelementen zusammengesetzt:

Kugel

Mittelpunkt \mathbf{M} , Radius R

gerader Kreiszyylinder

Anfangspunkt \mathbf{A} , Richtungsvektor \mathbf{v} , Länge L , Radius R

Der Richtungsvektor muss ein Einheitsvektor sein: $|\mathbf{v}| = 1$

Die Zylinderachse wird beschrieben durch

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} + \lambda \mathbf{v}$$

$$0 \leq \lambda \leq L$$

rechteckige Ebene

Mittelpunkt \mathbf{M} , Richtungsvektoren \mathbf{u} und \mathbf{v} , (halbe) Ausdehnung λ_{\max} , μ_{\max}

\mathbf{u} und \mathbf{v} müssen senkrecht zueinander stehende Einheitsvektoren sein.

Die Ebene ist definiert durch die Menge der Punkte \mathbf{x}

$$\mathbf{x} = \mathbf{M} + \mu \mathbf{u} + \lambda \mathbf{v}$$

$$|\mu| \leq \mu_{\max} ; \quad |\lambda| \leq \lambda_{\max}$$

zusätzlich wurde zur vereinfachten Beschreibung der Luken eingeführt:

rechteckige Ebene mit rechteckigem Ausschnitt

Wie rechteckige Ebene, zusätzlich (halbe) Ausdehnung des Ausschnitts λ_{\min} , μ_{\min}

Die Ebene ist definiert durch die Menge der Punkte \mathbf{x}

$$\mathbf{x} = \mathbf{M} + \mu\mathbf{u} + \lambda\mathbf{v}$$

$$|\mu| \leq \mu_{\max} ; \quad |\lambda| \leq \lambda_{\max}$$

$$|\mu| \geq \mu_{\min} ; \quad |\lambda| \geq \lambda_{\min}$$

Für jede Kombination von Elementtypen wird ein eigenes Verfahren zur Kollisionskontrolle benötigt.

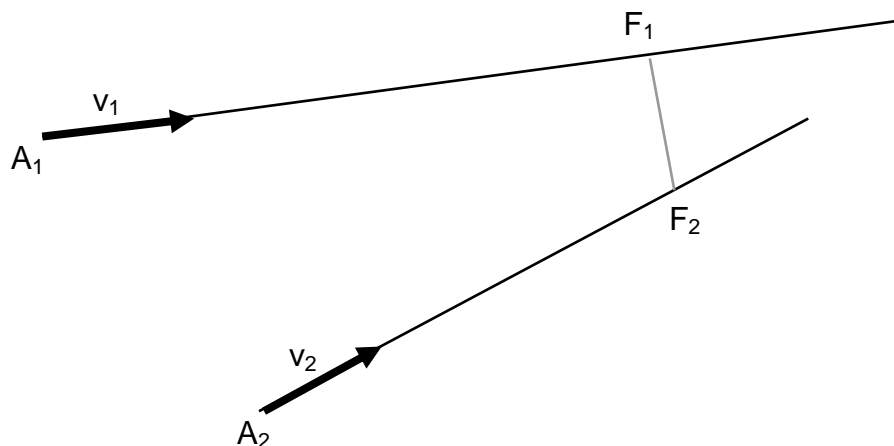
1. Kugel - Kugel

Die Kugeln schneiden sich, wenn der Abstand der Mittelpunkte kleiner ist als die Summe der Radien.

$$\|\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2\| < R_1 + R_2$$

2. Zylinder - Zylinder

Falls die Zylinder nicht parallel sind, wird das Gemeinlot (und damit die kürzeste Verbindung) zwischen ihnen gesucht.



Dazu wird die folgende Vektorgleichung aufgestellt:

$$\mathbf{A}_1 + \lambda_1 \mathbf{v}_1 + d \mathbf{n}_0 = \mathbf{A}_2 + \lambda_2 \mathbf{v}_2$$

\mathbf{n}_0 bezeichnet einen Einheitsvektor, der senkrecht auf \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 steht. $|d|$ ist der gesuchte kürzeste Abstand zwischen den Zylinderachsen. Die Vektorgleichung lässt sich als lineares Gleichungssystem schreiben:

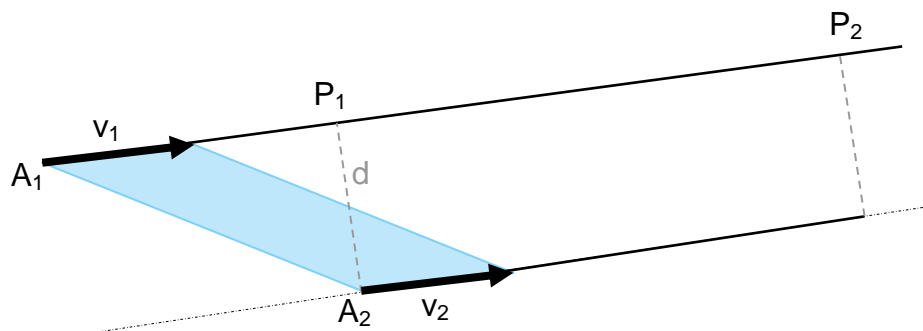
$$[\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{n}_0 \quad -\mathbf{v}_2] \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ d \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$$

Die Zylinder kollidieren, insofern gilt:

$$0 \leq \lambda_1 \leq L_1 \quad \wedge \quad 0 \leq \lambda_2 \leq L_2 \quad \wedge \quad |d| \leq R_1 + R_2$$

Bei dieser Art des Kollisionstests sind Kollisionen nicht erkennbar, insofern ein Zylinder nur im Bereich der Spitze kollidiert und der Lotfußpunkt infolgedessen knapp außerhalb der Zylinderlänge zu liegen kommt. Die Behandlung dieses Sonderfalls wird als wenig relevant eingestuft und aus diesem Grunde auf eine zusätzliche rechenintensive Überprüfung verzichtet. Soll der Fall dennoch abgefangen werden, empfiehlt es sich, die Zylinderspitzen mit zusätzlichen Kugeln zu versehen, deren Radius gleich dem Zylinderradius ist und deren Mittelpunkt bei $\mathbf{M} = \mathbf{A} + (L - R)\mathbf{v}$ liegt.

Falls die Zylinder parallel sind, kann kein Normalenvektor zwischen ihnen bestimmt und das oben beschriebene Verfahren somit nicht durchgeführt werden.



Stattdessen wird der Abstand aus der Fläche des Parallelogramms berechnet, das durch den Vektor \mathbf{v}_1 und den Verbindungsvektor der Anfangspunkte $(\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1)$ aufgespannt wird und in dem d die Höhe darstellt.

$$d = \frac{A_{\text{Parallelogramm}}}{\|\mathbf{v}_1\|} = \frac{\|(\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1) \times \mathbf{v}_1\|}{\|\mathbf{v}_1\|}$$

Zusätzlich werden Anfangs- und Endpunkt des zweiten Zylinders auf die Achse des ersten projiziert und ergeben dort die Lotfußpunkte P_1 und P_2 .

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{A}_1 + \lambda_i \mathbf{v}_1$$

mit

$$\lambda_1 = (\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1)^T \mathbf{v}_1$$

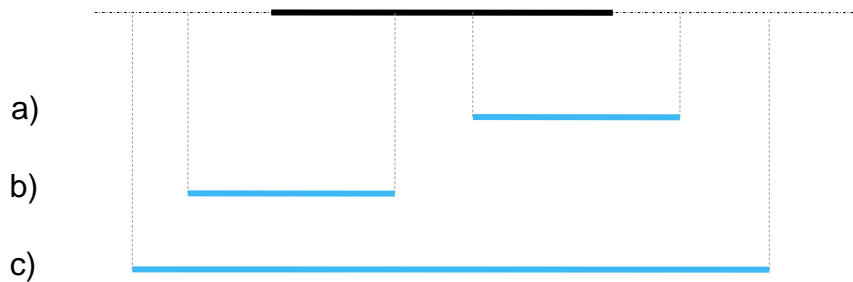
$$\lambda_2 = (\mathbf{A}_2 + L_2 \mathbf{v}_2 - \mathbf{A}_1)^T \mathbf{v}_1$$

Die parallelen Zylinder kollidieren, sobald der Abstand der Zylinderachsen kleiner oder gleich der Summe der Radien ist

$$d \leq R_1 + R_2$$

und gleichzeitig mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

$$0 \leq \lambda_1 \leq L_1 \quad \text{oder} \quad 0 \leq \lambda_2 \leq L_1 \quad \text{oder} \quad \text{sign}(\lambda_1) \neq \text{sign}(\lambda_2)$$



3. Ebene - Ebene

nicht implementiert da nicht erforderlich.

4. Kugel - Zylinder

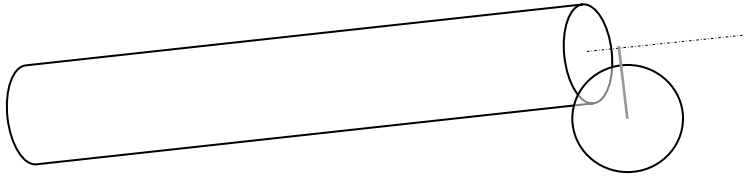
Vom Kugelmittelpunkt aus wird das Lot auf die Zylinderachse gefällt (wie schon zuvor beschrieben im Fall zweier paralleler Zylinder). Eine Kollision liegt vor, wenn der Abstand kleiner ist als die Summe aus Kugel- und Zylinderradius

$$d \leq R_K + R_Z$$

und der Lotfußpunkt gleichzeitig auf dem Zylinder liegt

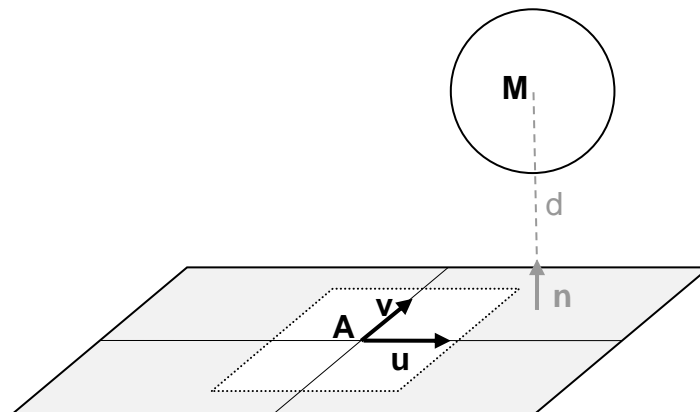
$$0 \leq \lambda \leq L_Z$$

Wiederum können mit diesem Verfahren Kollisionen am Ende des Zylinders nicht detektiert werden, wenn der Lotfußpunkt außerhalb der Zylinderlänge liegt.



5. Kugel - Ebene

Die Berechnung wird anhand einer Ebene mit Ausschnitt gezeigt.



$\mathbf{n} = \mathbf{u} \times \mathbf{v}$ bezeichnet den Normalenvektor der Ebene. Dieser ist ein Einheitsvektor, da \mathbf{u} und \mathbf{v} per Definition senkrechte Einheitsvektoren sind. Es gilt die Vektorgleichung

$$\underbrace{A + \mu \mathbf{u} + \lambda \mathbf{v}}_{\text{Lotfußpunkt}} + d \mathbf{n} = \mathbf{M}$$

die sich als lineares Gleichungssystem wie folgt schreiben lässt:

$$[\mathbf{u} \quad \mathbf{v} \quad \mathbf{n}] \begin{pmatrix} \mu \\ \lambda \\ d \end{pmatrix} = \mathbf{M} - \mathbf{A}$$

Eine Kollision wird erkannt wenn die folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

$$\begin{aligned} |d| &\leq R_K \\ |\mu| - R_K &\leq \mu_{max} \\ |\lambda| - R_K &\leq \lambda_{max} \end{aligned}$$

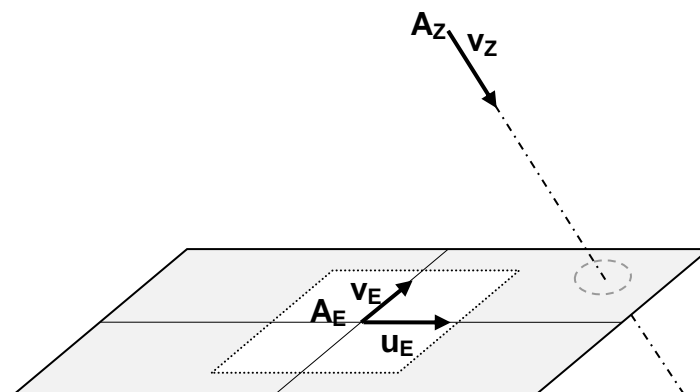
Falls die Ebene einen Ausschnitt besitzt, kommt als zusätzliche Bedingung hinzu, dass der Lotfußpunkt nicht im inneren Rechteck liegen darf:

$$\overline{(|\mu| + R_K \leq \mu_{min}) \wedge (|\lambda| + R_K \leq \lambda_{min})}$$

Diese Methode kann im Randbereich der Ebene zu falschen positiven Kollisionsmeldungen führen, weil die Randbereiche der Ebene um den Kugelradius vergrößert werden.

6. Zylinder - Ebene

Ebene Schnitte durch gerade Kreiszyylinder ergeben Ellipsen oder (falls Ebene und Zylinder parallel sind) zwei Geraden. Eine effiziente Kollisionsdetektion mit (für die gegebene Aufgabenstellung) akzeptablem Präzisionsverlust kann erreicht werden, wenn lediglich der Durchstoßpunkt der Zylinderachse durch die Ebene untersucht wird. Dieses Verfahren ist exakt, wenn Zylinder und Ebene senkrecht zueinander stehen, und umso weniger genau, je schräger der Zylinder auf die Ebene trifft.



Der Durchstoßpunkt \mathbf{P} kann ausgedrückt werden als

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_E + \mu_E \mathbf{u}_E + \lambda_E \mathbf{v}_E$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_Z + \lambda_Z \mathbf{v}_Z$$

Daraus ergibt sich das lineare Gleichungssystem

$$[\mathbf{u}_E \quad \mathbf{v}_E \quad -\mathbf{v}_Z] \begin{pmatrix} \mu_E \\ \lambda_E \\ \lambda_Z \end{pmatrix} = \mathbf{A}_Z - \mathbf{A}_E$$

Dieses ist nur lösbar, wenn Zylinder und Ebene nicht parallel zueinander sind. Eine Kollision wird erkannt, wenn die folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \lambda_Z \leq L_Z \\ |\mu_E| - R_Z &\leq \mu_{max} \\ |\lambda_E| - R_Z &\leq \lambda_{max} \end{aligned}$$

Falls die Ebene ausgeschnitten ist, muss für eine Kollision zusätzlich auch diese Bedingung erfüllt sein, damit eine Kollision erkannt wird:

$$\overline{(|\mu_E| + R_Z \leq \mu_{min}) \wedge (|\lambda_E| + R_Z \leq \lambda_{min})}$$

Anhang F Steuerelement Laderaum anzeigen

Das Steuerelement "Laderaum anzeigen" dient zum Anzeigen eines Laderaums und der darin enthaltenen Ladung (ggf. in mehreren Schichten). Es stehen drei Anzeigemodi zur Verfügung:

- Querschnitt
Darstellung einer Schnittebene ($x=\text{const.}$)
- Längsschnitt
Darstellung einer Schnittebene ($y=\text{const.}$)
- Höhenprofil
Blick von oben, Darstellung der Ladungshöhe in Falschfarben

Zwischen diesen Anzeigemodi kann über ein Auswahlfeld oder mit den Tasten F1, F2 und F3 umgeschaltet werden. Durch die Taste D können zusätzliche Informationen über den Laderaum eingeblendet werden. Mit den Tasten "Bild Auf" und "Bild Ab" kann die Darstellungstiefe angepasst werden. Die Darstellungstiefe bestimmt (nur in den Anzeigemodi Quer- und Längsschnitt), wie viele Schnittebenen nach bzw. vor der aktuellen Schnittebene zusätzlich dargestellt werden sollen.

Wird der Mauszeiger über das Steuerelement bewegt, so wird die aktuelle Position des Mauszeigers in Laderaumkoordinaten angezeigt. Wird bei diesem Vorgang die Strg-Taste gedrückt gehalten, so wird stattdessen der Punkt zurückgeliefert, der sich durch Projektion des Mauszeigers auf den Schichtboden der obersten Ladungsschicht ergibt. Bei gedrückter Alt-Taste wird die auf Ladungshöhe verschobene Mausposition zurückgeliefert.

Darüber hinaus werden durch das Steuerelement Funktionen zum Anzeigen eines Fadenkreuzes sowie zur Anzeige, Erzeugung und zum Verschieben von Punktdefinitionen im Laderaum implementiert. Diese Funktionen sind nicht zur direkten Verwendung im Code vorgesehen. Auf sie soll nur durch das Objekt `CLaderaumPunktwaehler`, welches von jedem Laderaum über die Methode `get_Punktwaehler()` erhalten werden kann, zugegriffen werden.

Anhang G Modellparameter Simulation Brake

1. Laderaum

Die SW Brasil besitzt sieben Laderäume, deren Nummerierung erfolgt aufsteigend vom Bug zum Heck. Deren Abmessungen betragen:

Laderaum 1:

		Innenmaße			Abdeckung
Länge [m]		25,82	Breite X [m]		5,56
Breite [m]		29,00	Breite Y [m]		8,1
Höhe [m]		18,35	Süllrand [m]		0,75
		Anschrägung			
Breite [m]		5,82			
Höhe [m]		5,82			

Laderaum 2:

		Innenmaße			Abdeckung
Länge [m]		26,68	Breite X [m]		4,69
Breite [m]		32,26	Breite Y [m]		8,63
Höhe [m]		18,35	Süllrand [m]		0,75
		Anschrägung			
Breite [m]		4,23			
Höhe [m]		4,23			

Laderaum 3:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	24,95		Breite X	[m]	3,83	
Breite	[m]	32,26		Breite Y	[m]	8,63	
Höhe	[m]	18,35		Süllrand	[m]	0,75	
		Anschrägung					
Breite	[m]	4,23					
Höhe	[m]	4,23					

Laderaum 4:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	24,09		Breite X	[m]	4,26	
Breite	[m]	32,26		Breite Y	[m]	8,63	
Höhe	[m]	18,35		Süllrand	[m]	0,75	
		Anschrägung					
Breite	[m]	4,23					
Höhe	[m]	4,23					

Laderaum 5:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,82		Breite X	[m]	4,26	
Breite	[m]	32,26		Breite Y	[m]	8,63	
Höhe	[m]	18,35		Süllrand	[m]	0,75	
		Anschrägung					
Breite	[m]	4,23					
Höhe	[m]	4,23					

Laderaum 6:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,82		Breite X	[m]	4,26	
Breite	[m]	32,26		Breite Y	[m]	8,63	
Höhe	[m]	18,35		Süllrand	[m]	0,75	
		Anschrägung					
Breite	[m]	4,23					
Höhe	[m]	4,23					

Laderaum 7:

		Innenmaße			Abdeckung
Länge	[m]	28,55	Breite X	[m]	5,63
Breite	[m]	32,26	Breite Y	[m]	8,63
Höhe	[m]	18,35	Süllrand	[m]	0,75
		Anschrägung			
Breite	[m]	7,98			
Höhe	[m]	7,98			

2. Ladung

Bei der untersuchten Entladung war die SW Brasil mit Sojaprodukten beladen. Die Laderäume 2 und 6 enthielten Sojapellets, alle weiteren Laderäume enthielten Sojaschrot.

Nach Angabe des Fachpersonals des Entladeterminals bzw. entsprechend durchgeführter Analysen genommener Ladungsproben sind die Schüttwinkel von Sojapellets bzw. Sojaschrot mit 40° bzw. 42° anzunehmen - deren Schüttdichte beträgt 720kg/m^3 bzw. 770kg/m^3 .

3. Entlader

Die Entladung erfolgte mittels zweier nicht baugleicher kontinuierlicher Entlader (Pneumaten). Nach Aussage der Anlagenbetreiber liegt deren maximale Förderleistung bei 520t/Std. bzw. 640t/Std. . Gemäß den Durchmessern der Entladerköpfe liegen deren Aufnahmeflächen bei $A_{\text{Aufnahme}} = 0,278\text{m}^2$ bzw. $0,181\text{m}^2$. Die optimale Eintauchtiefe beider Entlader liegt jeweils bei $e_{\text{opt}} = 1,5\text{m}$. Die erforderliche Mindesteintauchtiefe e_{min} liegt jeweils bei $0,5\text{m}$, die maximale Eintauchtiefe e_{max} liegt jeweils bei 2m .

4. Zuführung

Die Zuführung erfolgt zu jedem Zeitpunkt der Hauptentladung mittels drei baugleicher Planierraupen je Entlader. Die Restentladung wurde zusätzlich von einem Radlader unterstützt.

Anhang H Modellparameter Simulation Rostock

1. Laderaum

Die AP Jadran besitzt sieben Laderäume, deren Nummerierung erfolgt aufsteigend vom Bug zum Heck. Deren Abmessungen betragen:

Laderaum 1:

		Innenmaße			Abdeckung
Länge [m]		22,49	Breite X [m]		4,72
Breite [m]		22,64	Breite Y [m]		4,72
Höhe [m]		18,10	Süllrand [m]		1,94
		Anschrägung			
Breite [m]		3,65			
Höhe [m]		3,65			

Laderaum 2:

		Innenmaße			Abdeckung
Länge [m]		27,71	Breite X [m]		4,72
Breite [m]		29,86	Breite Y [m]		7,43
Höhe [m]		18,10	Süllrand [m]		1,94
		Anschrägung			
Breite [m]		3,65			
Höhe [m]		3,65			

Laderaum 3:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,10		Breite X	[m]	3,42	
Breite	[m]	29,86		Breite Y	[m]	7,43	
Höhe	[m]	18,10		Süllrand	[m]	1,94	
		Anschrägung					
Breite	[m]	3,65					
Höhe	[m]	3,65					

Laderaum 4:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,10		Breite X	[m]	3,42	
Breite	[m]	29,86		Breite Y	[m]	7,43	
Höhe	[m]	18,10		Süllrand	[m]	1,94	
		Anschrägung					
Breite	[m]	3,65					
Höhe	[m]	3,65					

Laderaum 5:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,10		Breite X	[m]	3,42	
Breite	[m]	29,86		Breite Y	[m]	7,43	
Höhe	[m]	18,10		Süllrand	[m]	1,94	
		Anschrägung					
Breite	[m]	3,65					
Höhe	[m]	3,65					

Laderaum 6:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	27,71		Breite X	[m]	4,72	
Breite	[m]	29,86		Breite Y	[m]	7,43	
Höhe	[m]	18,10		Süllrand	[m]	1,94	
		Anschrägung					
Breite	[m]	3,65					
Höhe	[m]	3,65					

Laderaum 7:

		Innenmaße				Abdeckung	
Länge	[m]	25,23		Breite X	[m]	4,79	
Breite	[m]	29,86		Breite Y	[m]	7,43	
Höhe	[m]	18,10		Süllrand	[m]	1,94	
		Anschrägung					
Breite	[m]	8,68					
Höhe	[m]	8,68					

2. Ladung

Bei der untersuchten Entladung war die AP Jadran mit Steinkohle beladen.

Nach Angabe des Fachpersonals des Entladeterminals bzw. entsprechend durchgeführter Analysen genommener Ladungsproben ist der Schüttwinkel von Steinkohle mit 40° anzunehmen - deren Schüttdichte beträgt 900kg/m³.

3. Entlader

Die Entladung erfolgte mittels eines diskontinuierlichen Entladers (Portalkran mit Greifer). Nach Aussage der Anlagenbetreiber liegt dessen max. Tragkraft bei 30t (exkl. Greifer), das max. Greifervolumen beträgt 30m³. Die maximale Förderleistung des Entladers beträgt 2.200t/Std.

4. Zuführung

Im Zuge der Hauptentladung erfolgt keine Zuführung. Die Restentladung wird durch einen Radlader und einen Kompaktlader durchgeführt.