



Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Masterarbeit

Transport von DRI (Direct Reduced Iron)



Johannes Rieder, BSc

Oktober 2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 09.11.22

Unterschrift Verfasser/in
Johannes Rieder

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Vorrangig gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Robert Schachermayer der Firma Logserv sowie Herrn Johannes Friess der Firma GATX für die vielen Informationen und deren Hilfe.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Johannes Rieder

Leoben, am 9. November 2022

Kurzfassung

Direkt reduziertes Eisen (DRI) oder auch Eisenschwamm genannt, wird durch die Direktreduktion von Eisenerz (in Form von Pellets, Briketts, Klumpen oder Feinteilen vorliegend) durch ein Reduktionsgas hergestellt. Das Reduktionsgas ist ein Gemisch aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO). Eisenschwamm hat einen vergleichbaren Eisengehalt wie Roheisen. Die Stahlherstellung mit DRI erzeugt wesentlich weniger CO₂ und ist daher ein umweltfreundlicher Eisenträger. DRI oder in brikettierter Form HBI (Hot Briquetted Iron) ersetzt in der Hochofenroute Sinter und in der Elektroofenroute den Schrott.

Die Herstellung von DRI erfolgt hauptsächlich in Staaten mit einem hohen Erdgasvorkommen wie beispielsweise Indien, Russland, dem Norden Afrikas oder den USA. Um die europäische Stahlindustrie mit diesem Rohstoff zu versorgen, muss dieser über weite Strecken transportiert werden. Dieser Transport ist jedoch mit gewissen Herausforderungen verbunden und aktuell nicht etabliert. Das hohe Oberflächen/Volumen - Verhältnis macht DRI sehr reaktiv, erhöht seine Anfälligkeit für Reoxidation und verleiht ihm seine pyrophore Natur.

Der Transport von DRI am Seeweg erfolgt bereits, beschränkt sich jedoch nur auf Stahlwerke mit küstennaher Lage oder einem Zugang zu Binnenhäfen. Um die Stahlwerke Zentraleuropas zu versorgen, soll das Frachtgut kostengünstig und in großen Mengen transportiert werden. Die Schiene ist hierfür das am besten geeignete Transportmittel. Diese Industrie bietet jedoch aktuell keine Lösung für den Transport von Eisenschwamm. Die vorliegende Arbeit soll einen Überblick über die verschiedenen Umschlagmöglichkeiten für DRI geben, welche Probleme während des Transportes auftreten können und Lösungsansätze aufzeigen. Ein Transportkonzept für die Schiene soll ausgearbeitet und untersucht werden.

Länder mit einem hohen Produktionsanteil an DRI liegen vorrangig in anderen Kontinenten. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Entwicklung des Transportkonzept auf einen einfachen Umschlag zwischen Schiff und Schiene. Standardisierte Containermaße bieten hierfür eine gute Basis, da der Containertransport in beiden Transportsparten bereits etabliert ist und so eine neue Transportart abseits des herkömmlichen Schüttguttransports für die Stahlindustrie erschlossen wird. In dem Transportkonzept wurden verschieden große DRI-Behälter in Container Stahlgerüste eingepasst. Der Verschleiß dieser Behälter während des Be- und Entladevorgangs wurde anschließend in einer Diskrete Elemente Methode (DEM) Simulation untersucht und validiert. Letztlich wurden die verschiedenen Konzepte hinsichtlich des Umschlages vor und nach dem Schienentransport und unter Berücksichtigung verschiedenster Parameter wie Ladevolumen, Gesamtmasse, Handhabungsfreundlichkeit etc. beurteilt. So konnte ein Konzept, welches am ehesten weiterer Untersuchungen bedarf, bestimmt werden.

Abstract

Direct reduced iron (DRI), also known as sponge iron, is produced by the direct reduction of iron ore (in the form of pellets, briquettes, lumps or fines) by a reducing gas. The reducing gas is a mixture of hydrogen (H₂) and carbon monoxide (CO). Sponge iron has an iron content comparable to pig iron. Steelmaking with DRI generates significantly less CO₂ and is therefore an environmentally friendly iron carrier. DRI or in briquette form HBI (Hot Briquetted Iron) replaces sinter in the blast furnace route or scrap in the electric furnace route.

DRI is mainly produced in countries with large natural gas deposits such as India, Russia, North Africa or the USA. In order to supply the European steel industry with this raw material, it has to be transported over long distances. However, this transport is associated with certain challenges and is currently or not established. The high surface area/volume ratio makes DRI very reactive, increasing its vulnerability to reoxidation and giving it its pyrophoric nature.

Transport of DRI by sea is already taking place but is limited to steel mills located close to shore or with access to inland ports. In order to supply the steelworks in Central Europe, the goods should be transported cheaply and in large quantities. Rail is the most suitable means of transport for this. However, this industry does not currently offer a solution for the transport of sponge iron. This thesis is intended to provide an overview of the various handling options for DRI, show which problems can occur during transport and possible solutions.

Countries with a high production share of DRI are primarily located on other continents. For this reason, when developing the transport concept, the focus was on a simple handling between ship and rail. Standardized container dimensions provide a good basis for this, since container transport is already established in both transport sectors, beside this opens up a new type of transport for the steel industry apart from the conventional bulk transport. In the transport concept, DRI containers of different sizes were fitted into container steel frames. The wear of these containers during loading and unloading was then examined and validated in a Discrete Element Method (DEM) simulation. Finally, the various concepts were evaluated regarding the handling before and after rail transport, also considering a wide range of parameters such as loading volume, total weight, ease of handling, etc. In this way a concept that most likely requires further investigation could be determined.

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Herstellung von DRI.....	9
2.1	Das MIDREX® Verfahren.....	9
2.2	Elektrolichtbogenofen (EAF).....	10
3	Eigenschaften von DRI.....	12
3.1	HDRI (Hot-Direct-Reduced-Iron)	13
3.2	CDRI (Cold-Direct-Reduced-Iron).....	13
3.3	Passivierung von DRI	13
4	Heißtransport von DRI.....	16
4.1	HYTEMP®-System	16
4.2	HOTLINK®-System.....	17
4.3	HTC-System (Hot Transport Conveyor)	17
4.3.1	Stahlzellenförderer	18
4.3.2	Trogplattenband.....	19
4.3.3	Becherwerke.....	20
4.4	HTV-System (Hot Transport Vessel)	21
5	Kalttransport von DRI	22
5.1	Vorkehrungen für DRI-Fördersysteme	23
5.2	Rohrgurttförderer	24
6	Lagerung von DRI.....	27
6.1	Behälterlagerung.....	27
6.2	Bodenlagerung	28
6.3	Selbsterhitzung und Selbstzündung von DRI.....	28
7	Transport auf der Schiene	30
8	Transport auf dem Seeweg	31
8.1	Alternative 1: Inertgas System (IGS).....	32
8.2	Alternative 2: Inertgas Generator (IGG).....	33
8.3	Alternative 3: Stickstoff Generator	33
8.4	Alternative 4: Stickstoff Speicher	34
8.5	Alternative 5: Externe Zufuhr von Inertgas oder Stickstoff.....	34
9	Transportkonzept.....	35
9.1	Variante 1	36
9.2	Variante 2	39
9.3	Variante 3	41
9.4	Varianten 4	43

9.5	Zusammenfassung der Transportkonzepte.....	44
10	Diskrete Elemente Modellierung	46
10.1	Definition der Geometrien	46
10.2	Werkstoffe.....	46
10.3	Kontaktmodelle	48
10.4	Berechnungsparameter.....	50
10.5	Simulationsergebnisse.....	50
11	Ergebnisse und Diskussion	52
1.1	Variante 1	52
1.2	Variante 2	53
1.3	Variante 4	55
12	Zusammenfassung und Ausblick	60
13	Literaturverzeichnis.....	63
14	Abbildungsverzeichnis.....	66
15	Tabellenverzeichnis	68
16	Nomenklatur und verwendete Abkürzungen.....	69

1 Einleitung

Stahl ist das Rückgrat der modernen Zivilisation. Die Dekarbonisierung der Stahlindustrie hat in den vergangenen Jahren massiv an Bedeutung gewonnen und macht es erforderlich abseits der herkömmlichen Hochofenroute nach Alternativen im Bereich der Roheisenerzeugung zu suchen. Ein alternativer Prozess mit deutlich reduziertem CO₂ Ausstoß ist das Direktreduktionsverfahren von Eisenerz (DRI). Unter Direktreduktion versteht man die Reduktion von Eisenerz unterhalb der Schmelztemperatur. Das dabei entstehende Endprodukt wird Direkt reduziertes Eisen (DRI, Direct Reduced Iron) oder Eisenschwamm genannt. Die weltweite Produktion von DRI nimmt stetig zu und hat sich, am Beispiel von der Region Naher Osten und Afrika, seit Beginn der 2000er Jahre mehr als verdreifacht (Abbildung 1). [1]

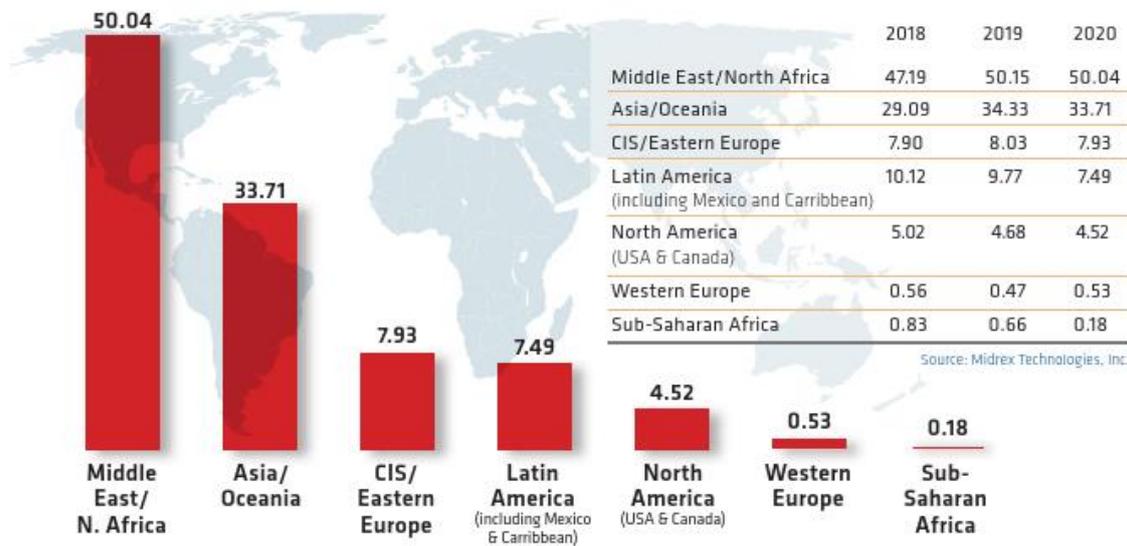


Abbildung 1: Weltweite Verteilung der Produktion von DRI [1]

Bei der Errichtung einer Direktreduktionsanlage bietet es sich an in unmittelbarer Nähe einen Elektrolichtbogenofen (EAF, Electric Arc Furnace) vorzusehen. So kann der Eisenschwamm unmittelbar weiterverarbeitet werden. Bei dieser Variante wird die Restwärme des Eisenschwamms rückgewonnen, um den gesamten Prozess energetisch günstiger zu gestalten. Hierfür müssen die Transportanlagen hohen Temperaturen bis zu circa 700°C standhalten können. Bei dem Transport über größere Distanzen ergeben sich neue Probleme.

Aufgrund der Porosität von DRI im erkalteten Zustand besitzt es ein sehr schlechtes Verhalten gegenüber Oxidation und Korrosion. Bei Umgebungsluft und Raumtemperatur geschieht dieser Vorgang der Oxidation und Korrosion recht langsam, gewinnt bei höheren Temperaturen aber an Geschwindigkeit. Da die Oxidationsreaktion von DRI ist Exotherm. Die dabei entstehende Wärme wird bei Anhäufung des Materials nur schlecht abgeführt. Diese Temperaturerhöhung kann bis zum Schmelzen des Produkts führen. Bei Kontakt mit Wasser, insbesondere mit Salzwasser, bildet DRI Wasserstoff, welcher in Kombination mit der Umgebungsluft eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen lässt. Dieses Verhalten wird als Pyrogenität bezeichnet.

Diese Probleme mit DRI führen dazu, dass beim Transport besondere Vorkehrungen getroffen werden müssen, um die Sicherheit für die Anlage und Personen zu gewährleisten. Da die

größten Hersteller von DRI aus dem Nahen Osten, Afrika und Indien kommen, ist ein sicherer Transport vor allem für die Schifffahrt von großer Bedeutung. Diverse Havarien von Transportschiffen in der Vergangenheit standen in Zusammenhang mit dem Transportgut DRI. Aus diesem Grund hat die International Marine Organization (IMO), Schifffahrtsverordnungen für den Transport von DRI erlassen. Diese sind aber als Empfehlung zu sehen und nicht verpflichtend. Da nicht ein jedes Stahlwerk einen Zugang zu einem Hafen hat ist der Binnentransport ebenfalls von großer Wichtigkeit. Hierbei spielt der Transport auf der Schiene eine große Rolle. Die Schiene ermöglicht einen zuverlässiger und ökonomischen Transport großer Mengen und ist seit je her ein wichtiger Bestandteil der Stahlindustrie.

In dieser Arbeit sollen die Probleme beim Transport von DRI aufgezeigt, die verschiedenen Transportmöglichkeiten nach aktuellsten Stand der Technik erfasst und mögliche Lösungsansätze dokumentiert werden.

2 Herstellung von DRI

Es gibt eine Reihe von Direktreduktionsverfahren. Wenige von ihnen erlangen jedoch kommerzielle Bedeutung. Zu den derzeit etabliertesten Verfahren zählt MIDREX[®], HYL/Energiron[®] oder der FINMET[®] Prozess. Das MIDREX[®] Verfahren ist mit weltweit 96 gebauten Modulen (Stand: 2020) und mit einem Anteil von 60,0% der weltweiten DRI Produktion der bedeutendste Prozess zur Herstellung von DRI. Aus diesen Gründen soll auf diesen Prozess kurz näher eingegangen werden. [1] [2]

2.1 Das MIDREX[®] Verfahren

Das Herzstück einer MIDREX[®] (Midland Ross Experimental)-Anlage ist der Schachtofen, welcher im Gegenstromprinzip von einem wasserstoffreichen Gas durchströmt wird. In Abbildung 2 ist ein Fließbild des MIDREX[®] Verfahren ersichtlich. [3]

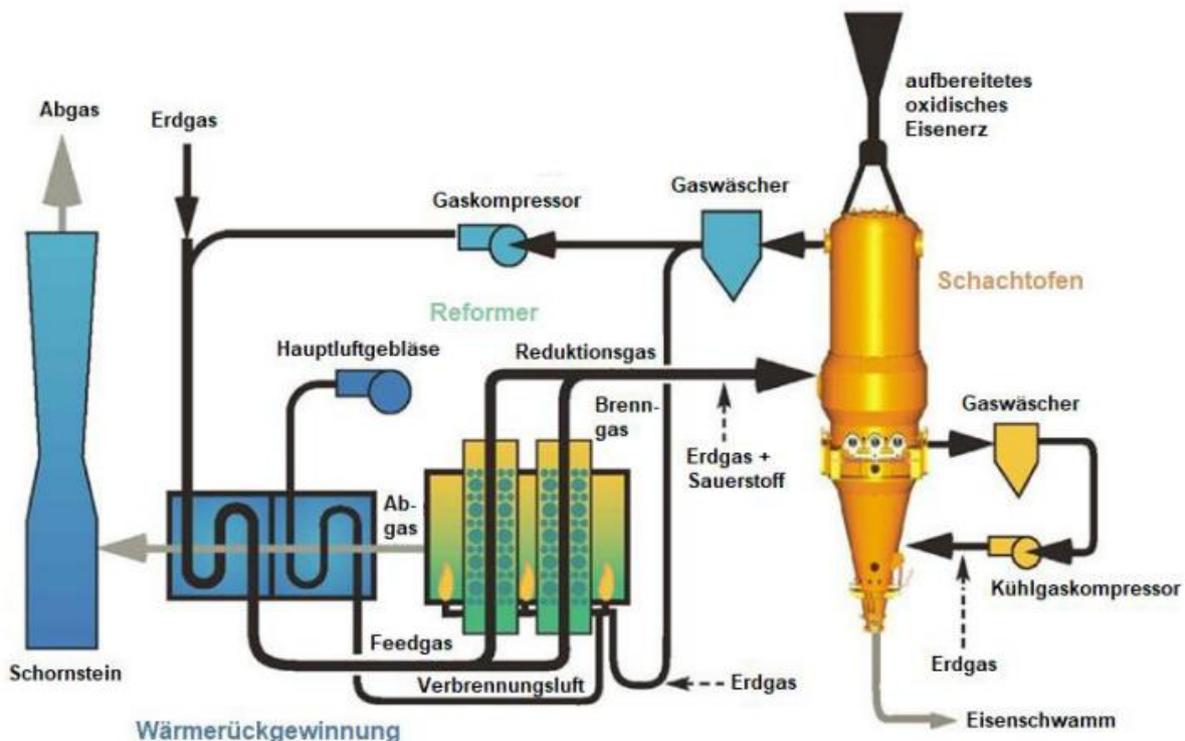
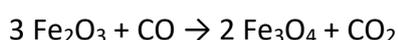


Abbildung 2: Fließschema einer MIDREX[®]-Anlage [3]

Beim MIDREX-Prozess werden die Einsatzstoffe, Eisenerzpellets oder Stückerz, von oben in einem unter 1,5 bar Überdruck stehenden Schachtofen eingebracht. Die Einsatzstoffe durchwandern den Schachtofen von oben nach unten und werden mittels eines wasserstoffreichen Gases bei circa 800°C - 900°C reduziert. Im Reformer wird das Reduktionsgas, bestehend aus H₂, CO, CO₂ und CH₄, gewonnen. Um den Prozess zu optimieren wird das Gichtgas am oberen Ende des Schachtofens abgeführt und mit „frischem“ Erdgas dem Schachtofen oder Reformer zugeführt. Die Befeuerung des Reformers erfolgt mit einem Gemisch aus dem gereinigten Gichtgas des Schachtofens und Erdgas. [4]

Die Reduktion des Eisenerzes im Schachtofen erfolgt nach den folgenden Gleichungen. Mit den Gleichungen 1.1 bis 1.3 wird die Reduktion mit Kohlenstoff C beschrieben, mit den Gleichungen 1.4 bis 1.6 die Reduktion mit Wasserstoff H: [3]



(Gl. 1.1)



Das Reduktionsgas durchströmt den Schachtofen nach dem Gegenstromprinzip. Das am oberen Ende ausströmende Gichtgas wird dem Reformer wieder zugeführt. Im unteren konischen Segment des Schachtofens erfolgt die Kühlung des Eisenschwamms. Hierfür wird oberhalb der Verjüngung Gas abgezogen, gekühlt, gereinigt und im konischen Teil wieder zugeführt. [2]

Das am unteren Ende des Schachtofens ausgetragene Produkt ist HDRI (Hot Direct Reduced Iron). Für das Endprodukt gibt es verschiedene Möglichkeiten der Weiterverarbeitung: [2] [5]

- Weitere Abkühlung des Eisenschwamms zu CDRI (Cold Direct Reduced Iron) da HDRI bei hohen Temperaturen in Kontakt mit Luftsauerstoff oder Wasser zu einer sofortigen Rückoxidation führen würde; Grund hierfür ist die Porosität des Endprodukts
- Weitertransport des heißen HDRI
- Die heiß Brikettierung des HDRI zu HBI (Hot Briquetted Iron)

Neben dem konventionellen MIDREX-Prozess, welcher Erdgas als Reduktionsgas verwendet, gibt es auch einen Prozess der auf Kohle basiert. Hier wird Kohle zu Synthesegas vergast, welches dann als Reduktionsgas verwendet wird. Um Flexibilität in den Prozess zu bringen, wurden flexible MIDREX-Anlagen entwickelt, welche eine Produktion von allen drei Produkten: kaltem Eisenschwamm (CDRI), heißem Eisenschwamm (HDRI) und heiß brikettiertes Eisen (HBI) erlaubt. Der weitere Umschlag der drei entstehenden Produkte (CDRI, HDRI und HBI) wird in den folgenden Seiten dokumentiert und erklärt.

2.2 Elektrolichtbogenofen (EAF)

Einer DR-Anlage wird meist ein EAF nachgeschaltet in welchem der Eisenschwamm unter Zugabe von Stahlschrott aufgeschmolzen wird. Die meisten Elektrolichtbogenöfen arbeiten mit Wechselstrom, welcher über die Elektroden dem Stahlbad zugeführt wird. Dabei entstehenden hohen Spannungen und Lichtbögen. Durch die Wärme der Lichtbögen schmilzt der Stahlschrott beziehungsweise das DRI. Die Stahlherstellung über die EAF-Route läuft wie folgt ab: [3] [6]

1. Beladen
2. Schmelzen
3. Oxidieren
4. Anstechen

Die Beladung eines Elektrolichtbogenofen kann mit 100 % Stahlschrott, als auch mit 100 % Eisenschwamm erfolgen. Üblicherweise erfolgt die Beladung mit 75 % Stahlschrott, 15 % DRI bzw. HBI und 10 % Roheisen. Das Fassungsvermögen eines Elektrolichtbogenofens beträgt bis zu 300t. [3]

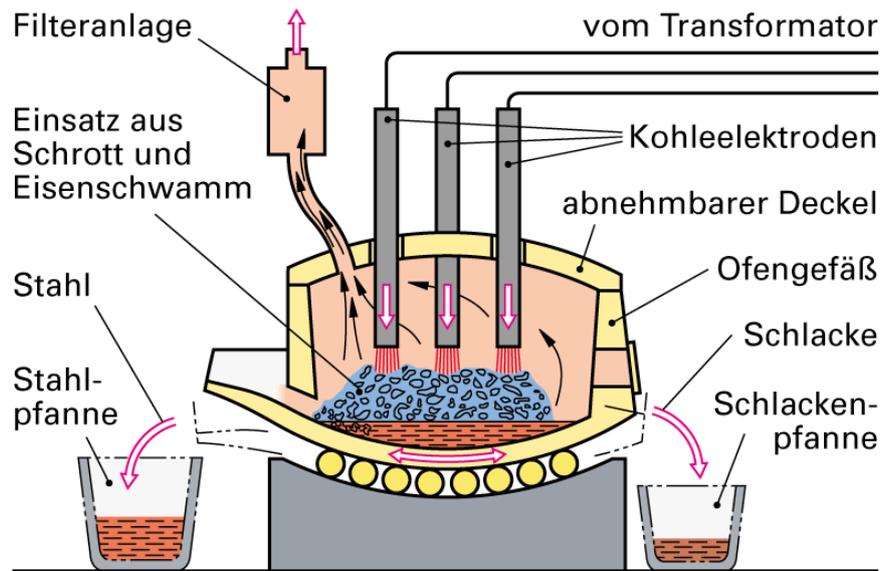


Abbildung 3: Skizze eines Elektrolichtbogenofens (EAF) [6]

Befindet sich kein EAF in unmittelbarer Nähe so wird das DRI zum nächstgelegenen Lichtbogenofen transportiert. Die für den Transport von DRI verwendeten Systeme werden in den nächsten Seiten thematisiert. Zuvor soll ein Überblick über das zu transportierende Gut gegeben werden.

3 Eigenschaften von DRI

Zahlreiche Forschungsarbeiten haben sich bereits mit den Eigenschaften und Problemen von DRI beschäftigt und verschiedenste Vorschläge zur Vermeidung oder Minimierung der Auswirkungen vorgeschlagen.



Abbildung 4: Direct Reduced Iron Pellets [5]

Es wurde beobachtet, dass die hohe Porosität des DRI der Hauptgrund für seine hohe Reaktivität ist. Das hohe Oberflächen/Volumen - Verhältnis macht DRI sehr reaktiv, erhöht seine Anfälligkeit für Reoxidation und verleiht ihm seine pyrophore Natur. Die chemische Reaktion bei der Reoxidation in trockener Luft ist exotherm. Dies bewirkt bei der Lagerung und dem Transport einem schnellen Temperaturanstieg aufgrund der Reaktionswärme. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des DRI ist die Wärmeabgabe an die Umgebung gering. Der dadurch entstehende Wärmestau kann zur Selbstentzündung führen und katastrophale Brände verursachen. [5]

Die Reoxidationsempfindlichkeit von DRI wird durch die Reduktionstemperatur beim Herstellungsprozess beeinflusst. Je niedriger die Temperatur im Schachtofen, desto größer die Porenoberfläche und umso größer ist die Neigung zur Reoxidation. Ein hoher Kohlenstoffgehalt begünstigt die Stabilität gegen Reoxidation, insbesondere wenn der Kohlenstoff in Form von Zementit vorliegt. Das Ausgangserz steht ebenfalls in Korrelation mit dem Reoxidationsverhalten zudem beeinflussen die klimatischen Bedingungen an der Produktionsstätte seine Reaktivität. [7]

Die Reoxidationsreaktion findet in einem topochemischen Muster statt. Bei der Reoxidation wandert die Oxidschicht von der Oberfläche hin zum Zentrum. In Abbildung 5 ist ein teilweise reoxidiertes DRI-Pellet mit Oxidschicht und unberührtem Kern ersichtlich. [7]



Abbildung 5: Mikrofotographie der topochemischen Struktur eines teilweise reoxidierten DRI-Pellets [7]

Kommt DRI mit Wasser - insbesondere Salzwasser - in Kontakt, so führt dies aufgrund der Korrosions- und Oxidationsreaktionen zur Bildung von explosiven und giftigen Gasen wie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid. Diese brennbaren Gase sind der Grund für das pyrogene Verhalten des DRI. [5]

3.1 HDRI (Hot-Direct-Reduced-Iron)

Der Transport und die Lagerung von HDRI ist in verschiedener Hinsicht kritisch. Die Herausforderung hier liegt in der hohen Temperatur des Transportgutes und dessen Anfälligkeit gegenüber Reoxidation. Transport- und Lagersystem arbeiten unter einer inerten Atmosphäre, um so das HDRI vor einer raschen Reoxidation zu schützen. So wird sichergestellt, dass das HDRI mit hoher Qualität den Schmelzaggregaten zugeführt wird. [7]

Man unterscheidet grundsätzlich vier Transportmöglichkeiten für HDRI. Jedes Konzept hat seine Vor- und Nachteile. Ihre Anwendung hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab, wie Transportentfernung, Komponentenanzahl und Förderkapazitäten. Die Transportmöglichkeiten werden im Kapitel 4 Heißtransport beschrieben.

3.2 CDRI (Cold-Direct-Reduced-Iron)

Nach dem das heiße DRI den Schachtofen verlassen hat wird es in Silos zur kontrollierten Abkühlung und Passivierung transportiert. Dies ist notwendig da ein Abziehen zur Einlagerung bei den hohen Temperaturen zu einer sofortigen Rückoxidation führen würde. [8]

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten für den Umschlag von CDRI. Es ist unumgänglich das DRI während des Transportes unter einer Schutzgasatmosphäre zu setzen. Hierfür wird dem Fördersystem ein inertes Gas zugeführt. So wird eine Reoxidation verhindert und die DRI-Staubbelastung der Umgebung so gering wie möglich gehalten. Die Transportmöglichkeiten werden im Kapitel 5 Kalttransport beschrieben.

3.3 Passivierung von DRI

Für eine erfolgreiche Passivierung sollte DRI nach der Herstellung vor dem weiteren Transport mindestens 72 Stunden gelagert werden. Unmittelbar nach der Herstellung weist DRI seine höchste Reaktivität auf. Nach seiner Passivierung nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit mit Luftsauerstoff um 3 Größenordnungen oder das 1000-fache ab. Die kontrollierte Passivierung erfolgt in Silos, welche mit einem Gasgemisch mit ca. 3% Sauerstoff (oder äquivalentem Sauerstoffpartialdruck) durchströmt werden. Während des Passivierungsprozesses reagiert die äußere Schicht des DRI und bildet eine dünne inerte Oxidschicht. Diese Oxidschicht reduziert die Reoxidationsempfindlichkeit und stabilisiert das DRI. Die chemische Zusammensetzung des Gasgemisches sowie die Temperatur während der Passivierung spielen eine untergeordnete Rolle. Essenziell sind konstante Reoxidationsbedingungen. Sollte diese nicht vorhanden sein so kann die Passivierung nicht vollständig erfolgen und es kann zur Selbsterhitzung und -entzündung des DRI kommen. Da während der Passivierung die üblichen Reoxidationsreaktionen ablaufen. [5]

Ein alternativer Passivierungsprozess ist die Alterung von DRI. Hier wird das DRI in Halden eingelagert, wobei auf eine gute Durchlüftung der Lagerstätte zu achten ist. Der Prozess der Alterung ist jedoch nicht so zuverlässig beziehungsweise konstant wie eine Passivierung in Behältern. [5]

Seit Beginn der Direktreduktion wurden Methoden zur Passivierung von DRI entwickelt und getestet. Die Heißbrikettierung hat sich hierfür als eines der zuverlässigsten Verfahren erwiesen. Bei der Heißbrikettierung wird der Eisenschwamm unmittelbar nach dem Austritt aus dem Schachtofen bei hoher Temperatur und hohem Druck verdichtet. Dies schließt die inneren Poren, verringert somit die reaktive Oberfläche und erhöht die Dichte und verbessert die Wärmeleitfähigkeit. In Abbildung 6 ist der Strukturelle Unterschied zwischen einem DRI-Pellet und einem HBI ersichtlich. [9]

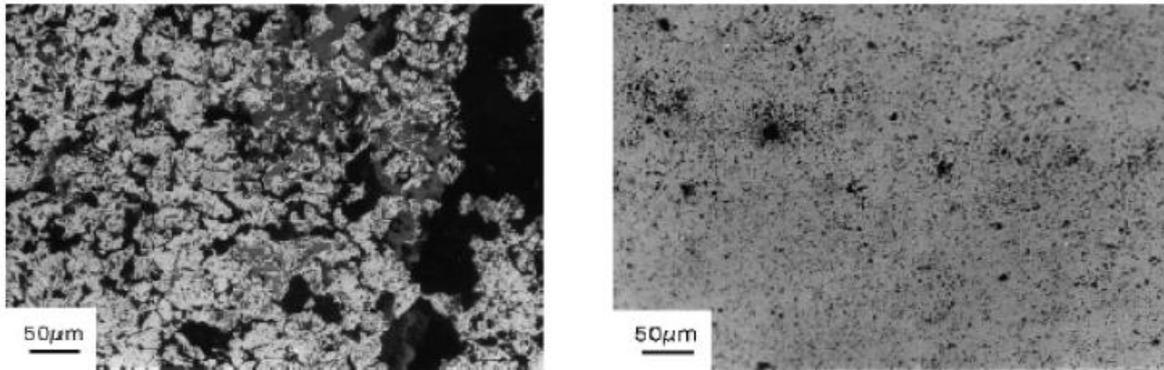


Abbildung 6: Vergleich der Struktur eines DRI-Pellet (links) und HBI (rechts) [9]

Eine Reoxidation und Überhitzung von HBI ist sehr unwahrscheinlich, was erheblich zur Verbesserung der Lager- und Transporteigenschaften beiträgt. Vorteile wie höhere Dichte, verbesserte Handhabung, einheitliche Produktform und -größe sowie reduzierter Feinstoffanteil resultieren aus den physikalischen Eigenschaften des HBI. Verschiedenste Versuche haben gezeigt, dass nach monatelanger Lagerung von HBI in tropischem Klima und salzhaltiger Atmosphäre (wie sie etwa in Küstennähe auftritt) keine Erwärmung sowie wenig Reoxidation auftrat. Auch im Kontakt mit Süß- und Salzwasser weist HBI ein sehr stabiles Verhalten gegenüber DRI auf. Die Eigenschaften der Heißbrikettierung als Passivierung überwiegen im Vergleich zu anderen Passivierungsverfahren. In Abbildung 7 ist eine Heißbrikettier Anlage ersichtlich. [9] [10]

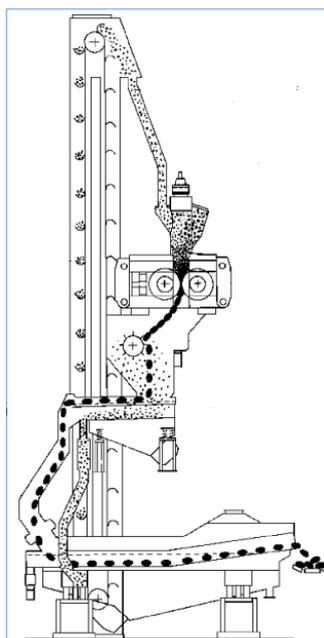


Abbildung 7: Fließbild einer Heißbrikettier-Anlage [9]

In den vergangenen Jahren hat sich ein deutlicher Trend hin zur Produktion von HDRI abgezeichnet. Dies ermöglicht die Rückgewinnung der thermischen Energie des HDRI. Wird eine Direktreduktionsanlage mit einem EAF (Electric Arc Furnace) kombiniert, so ermöglicht diese Anordnung eine signifikante Energieeinsparung, eine Verkürzung der tap-to-tap Zeit sowie eine Erhöhung der Produktivität. Der Heißtransport wird im folgenden Kapitel behandelt. In Abbildung 8 ist der Zusammenhang zwischen Energieeinsparung und Elektrodenverbrauch dargestellt. [1]

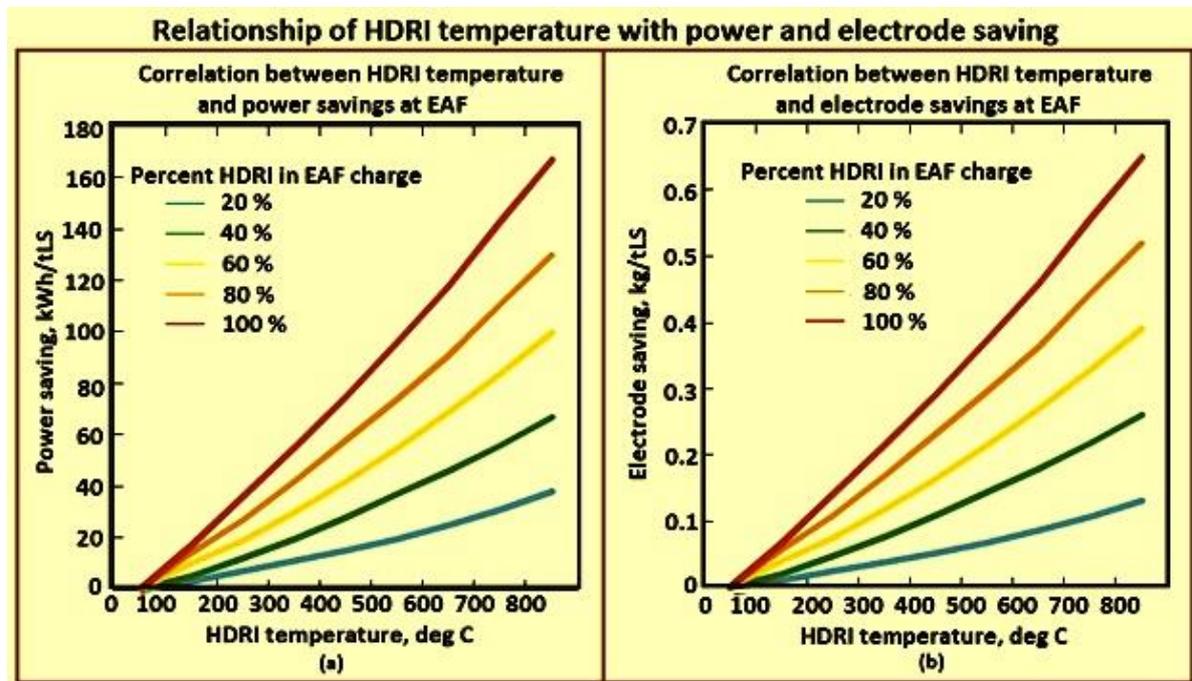


Abbildung 8: Diagramm für die Energieeinsparung und den Elektrodenverbrauch in Abhängigkeit von der Beschickungstemperatur von DRI in einem EAF [2]

4.2 HOTLINK®-System

Durch den von MIDREX entwickelten Prozess geschieht die Förderung nicht durch die Bewegung mechanischer Komponenten, sondern nutzt allein die Schwerkraft für den Transport. Dieses Verfahren wird zum Beispiel bei der Heißbrikettierung verwendet. Sozusagen bei der Produktion von HBI. Wird dieses System in Kombination mit einem Stahlschmelzwerk verwendet, so wird das HDRI aus dem Schachtofen über ein geschlossenes System in einen Zwischenbunker ausgetragen. Von diesem Vorratsbehälter gelangt das HDRI über eine rotierende Beschickungsanlage in den Elektro Lichtbogen Ofen. HOTLINK®-Module sind so ausgelegt, dass diese im Falle einer Störung nachfolgender Gewerke auf eine alternative Route umschalten können. So kann beispielsweise bei einer Störung des Ofens alternativ kaltes DRI produziert werden. Dieses System versorgt den EAF je nach Bedarf mit heißem DRI. Durch das geschlossene System wird eine Reoxidation des Eisenschwamms vermieden. Ein einfacher Transport und niedrige Logistikkosten sowie eine hohe Beschickungstemperatur sind die wesentlichen Vorteile des Systems. Das HOTLINK®-System findet Anwendung, wenn der Abstand zwischen dem Schachtofen und dem Stahlschmelzwerk geringer als 40 Meter ist. Ein Fließbild des HOTLINK®-System ist in Abbildung 10 ersichtlich. [12] [2]

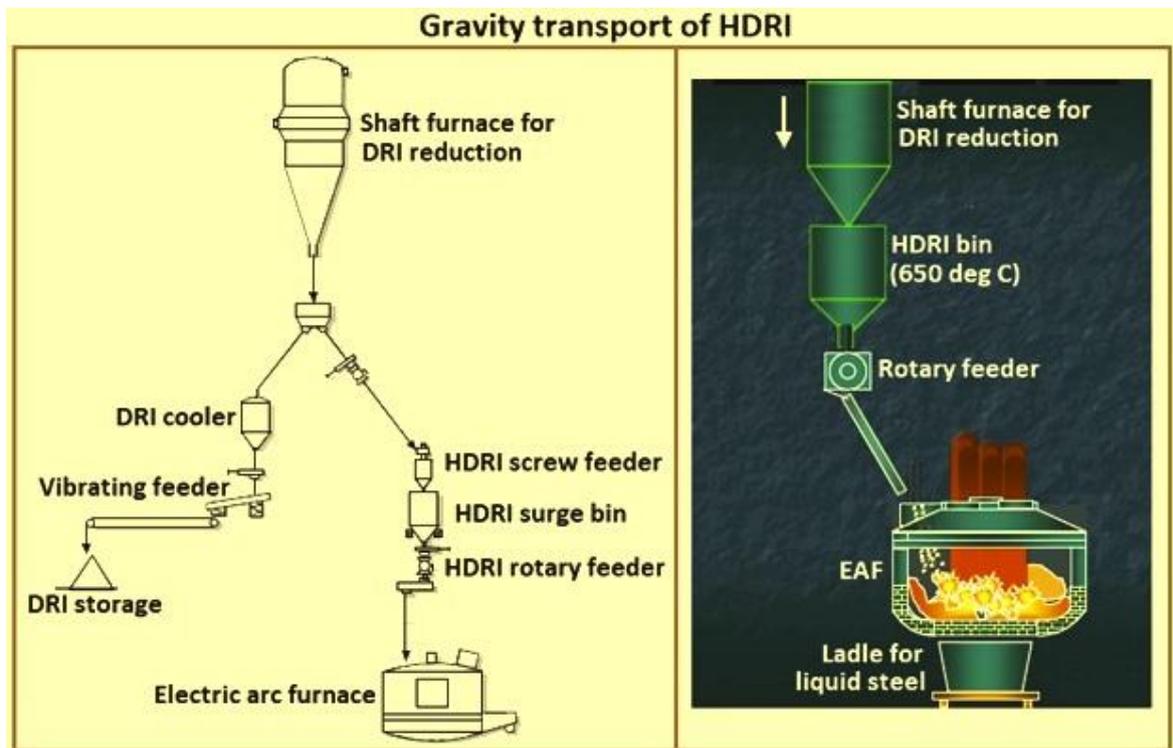


Abbildung 10: allgemeines Fließschema des HOTLINK®-Systems [2]

4.3 HTC-System (Hot Transport Conveyor)

Grenzt das Stahlschmelzwerk nicht an die Direkt-Reduktions-Anlage an (Distanzen zwischen 40 und 200 m), so erfolgt der Transport über mechanischer Fördereinrichtungen. Das HDRI wird aus dem Schachtofen ausgetragen und über ein isoliertes und nach außen hin abgeschlossen Fördersystem zum Schmelzwerk transportiert. Der Förderer befüllt am Ende der Transportstrecke wieder zwei Vorratsbehälter, welche zur Befüllung des EAFs dienen. Während ein Behälter in den Ofen entleert, wird der zweite Behälter vom Förderer befüllt. Der Vorteile dieses Systems ist eine flexible Geometrie des Förderers sowie große

Förderhöhen. Auf horizontalen Abschnitte ist die Förderleistung maximal, während diese mit zunehmenden Steigungswinkel abnimmt. Der Förderer ist so ausgelegt, dass die Temperaturverluste minimiert und eine Reoxidation verhindert wird. Die geschlossene Haube des Förderers enthält ein Schutzgassystem. Spezielle Sensoren überwachen die Atmosphäre im inneren des Förderers. Die genaue Menge an inertem Gas kann nur während des laufenden Betriebs eruiert werden. Die Gastemperatur korreliert mit der Materialtemperatur, über dieses Verhältnis kann die richtige Menge an inertem Gas für einen sicheren Betrieb eruiert werden. Für eine sichere Inbetriebnahme wird üblicherweise mit einem Überschuss an Gas gestartet. Dadurch, dass sich der Förderer in einem Abgeschlossenen System befindet, kann an bestimmten Stellen eine Absaugung für DRI Staub vorgesehen werden. In Abbildung 11 ist ein allgemeines Fließbild des HTC-Systems sowie ein Beispiel für einen Förderer ersichtlich. [8] [13]

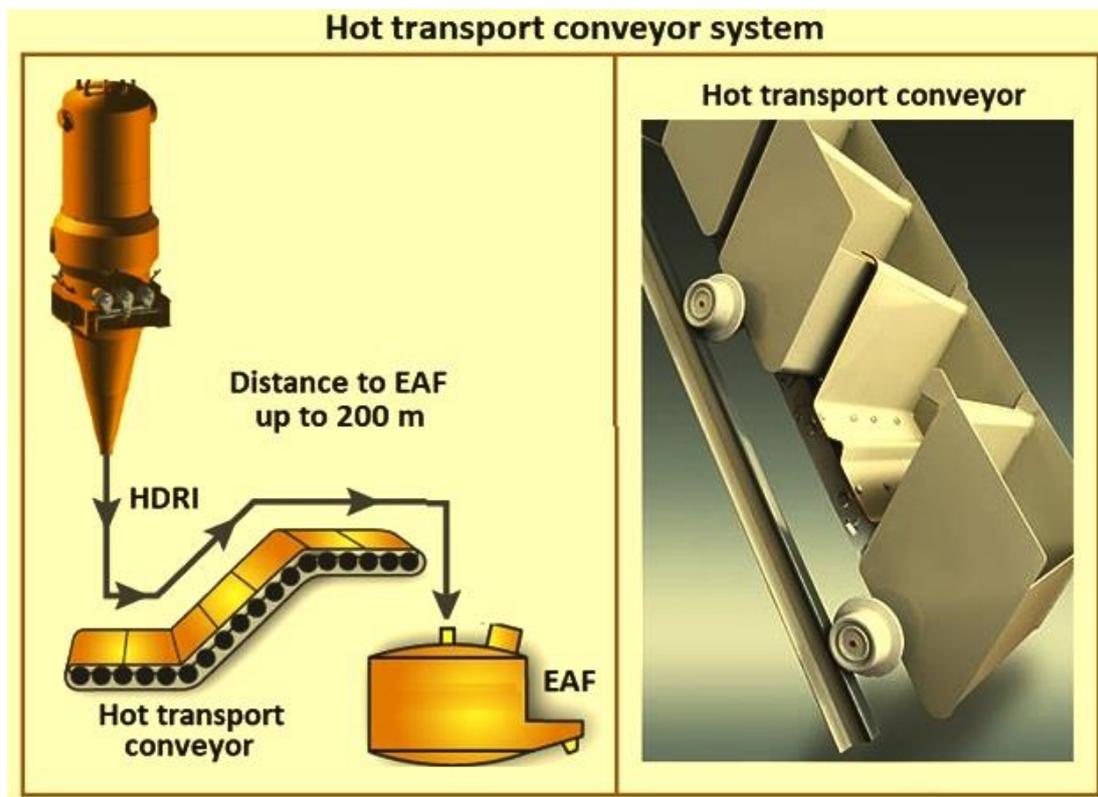


Abbildung 11: Allgemeines Fließschema des HTC-Systems (links), Beispiel für einen Stahlzellenförderer (rechts) [2]

4.3.1 Stahlzellenförderer

Mittels Zellenförderer können Heißgüter problemlos und wirtschaftlich in einem Steigungswinkel von bis zu 60° und einer Temperatur von bis zu 1100°C auf große Förderhöhen transportiert werden. Das Förderband hat speziell geformte tiefgezogenen Stahlzellen (Wannen), die eine ähnliche Form wie Eimer haben (Abbildung 12 links). Die Form der Wannen wird den jeweiligen Anforderungen an Fördermenge und Geometrie des Förderers angepasst. Als Zugorgan dienen beim Stahlzellenförderer verschiedenste Arten von Förderketten, äquivalent zu einem Becherwerk. Je nach Steigungswinkel kann der Förderer mit oder ohne Stegbleche ausgeführt werden. Als Führung dient dem Förderer eine Stahlschiene. In einem definierten Abstand sind an den Wannen Laufrollen angebracht,

welche auf den Schienen laufen. Der Stahl- oder Gurtzellenförderer bietet einen zuverlässigen Betrieb zu angemessenen Kosten. Abbildung 12 zeigt einen Stahlzellenförderer. [14] [15]



Abbildung 12: Stahlplattenband mit Stegblechen (links), Transport von Zementklinker (rechts) [14]

4.3.2 Troglplattenband

Das Troglplattenband kann mit oder ohne Zwischenabwurf ausgeführt werden. Wahlweise können eine oder mehrere Abwurfstellen vorgesehen werden. Plattenbänder werden üblicherweise mit gegossenen oder geschweißten Bandschuppen ausgestattet, welche mittels Ketten und Laufrollen geführt werden. Verschiedenste Schüttgüter wie Klinker, Kalkstein, Gips oder DRI können gleichzeitig transportiert und verteilt werden. So können zum Beispiel verschiedene aneinander gereiht Silos und Lagerhallen beschickt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die gleichzeitige Förderung auf Ober- und Untertrum, so können gleichzeitig unterschiedliche Schüttgüter gefördert werden. Als Führungselement dient eine Förderketten-Rollen-Kombination, welche seitlich an den Platten angebracht ist. Konstruktiv ist diese ähnlich wie bei einem Stahl- oder Gurtzellenförderer ausgeführt. Die Rollen befinden sich auf den Kettenbolzen und laufen auf einer Stahlschiene. In Abbildung 13 ist ein Troglplattenband schematisch abgebildet. [8] [14] [15]

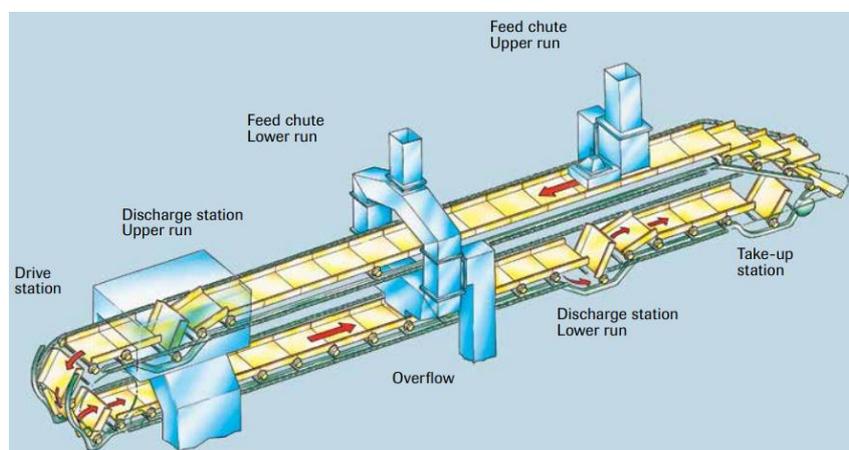


Abbildung 13: Schema eines Troglplattenband [14]

4.3.3 Becherwerke

Ein Becherwerk, auch Elevator genannt, ist ein Stetigförderer der in erste Linie zur senkrechten Förderung von Schüttgütern dient. Es sind Förderhöhen von bis zu 200 Meter möglich. Die Becherform wird dem jeweiligen zu förderndem Gut und der Fördermenge angepasst. Als umlaufendes Zugmittel wird entweder ein Stahlseilgurt oder eine Kette verwendet. Die Becher werden, über die im unteren Bereich befindliche Aufgabeschurre, beladen und nach oben gefördert. Überflüssiges Schüttgut wird an der unteren Umlenkung aufgenommen. An der maximalen Förderhöhe angekommen, wird der Becher nach der Umlenkung an der Antriebstation in die Entladeschurre abgeworfen. Kettenbecherwerke eignen sich im Gegensatz zu Gurtbecherwerken besser für höhere Temperaturen, wie sie etwa beim Heißtransport von DRI vorkommen. Ein Becherwerk ist immer in einem geschlossenen Gehäuse eingekapselt, was es einfach macht diesen unter einer Schutzgasatmosphäre zu betreiben. Die Antriebsstation befindet sich an der oberen Umlenkung. An der unteren Umlenkung befindet sich die Spannstation. Die Becher werden mit dem Zugmittel verschraubt. Kettenbecherwerke finden Anwendungen bei Temperaturen bis zu 350°C. In Abbildung 14 ist ein Becherwerk schematisch dargestellt. [8] [15] [16] [17]

Den Betrieb von Becherwerken unterscheidet man in der Art der Beschickung, [16]

- Schöpfbetrieb
- Aufgabebetrieb
- Mischbetrieb

und der Entleerung. [16]

- Schwerkraftentleerung
- Fliehkraftentleerung
- Mischentleerung

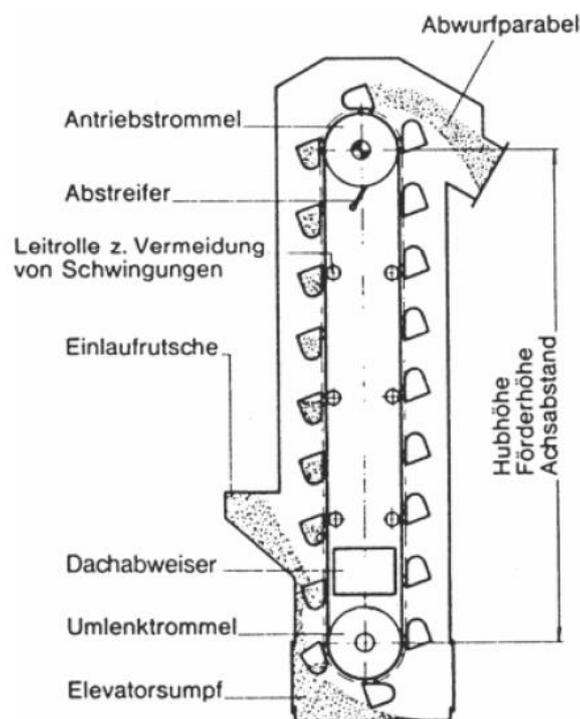


Abbildung 14: Prinzipzeichnung eines Becherwerks [18]

4.4 HTV-System (Hot Transport Vessel)

Beträgt die Entfernung zwischen der Direkt-Reduktions-Anlage und dem EAF mehr als 200 Meter oder sollen zwei oder mehr Stahlschmelzwerke versorgt werden, so bietet sich der Transport mittels isolierter Behältern an. Die Behälter haben in der Regel eine Kapazität von 45 bis 90 Tonnen und werden mittels speziell konstruierter Fahrzeugen zum Schmelzwerk transportiert. [19] [2]

Der Transportbehälter arbeitet während des gesamten Füll-Transport-Entladezyklus unter einer inerten Atmosphäre. So werden die Oxidationsverluste so gering als möglich gehalten. Die Entladung des Behälters in den EAF erfolgt über einen mechanischen oder pneumatischen Förderer. Der innerbetriebliche Transport des Behälters zum Schmelzwerk erfolgt auf der Schienen oder per Lastwagen. Die transportarten von HDRI mittels Transportbehälter ist in Abbildung 15 dargestellt, sowie ein Bild eines HDRI Behälters. [19] [2]

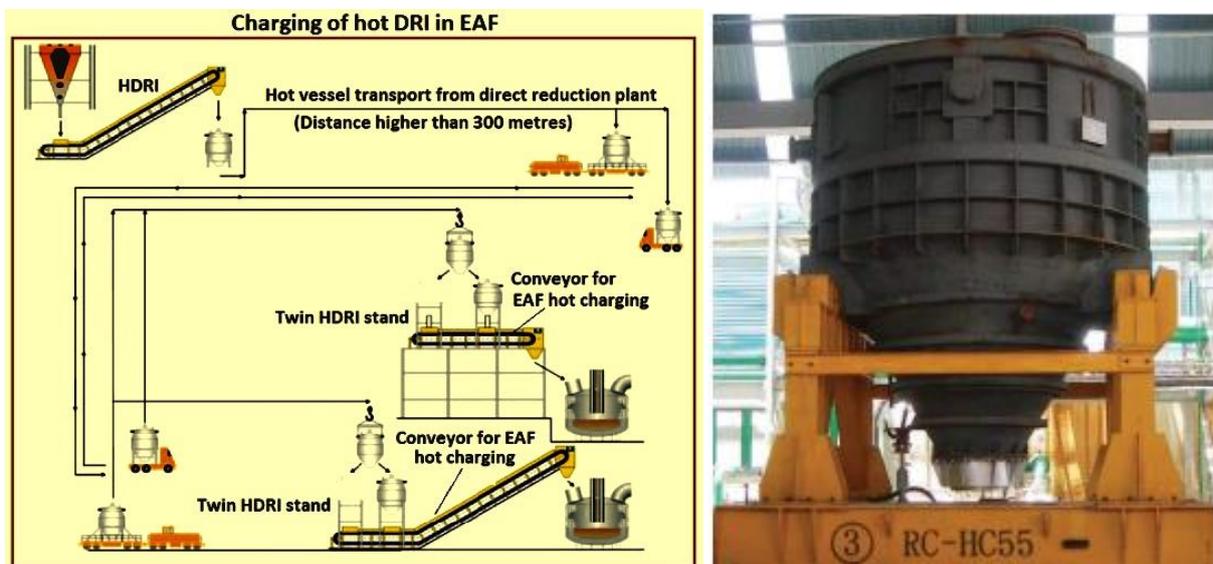


Abbildung 15: Fließbild des HTV-Systems (links) [2], Bild eines HTV-Behälters (rechts) [19]

Befindet sich kein Stahlschmelzwerk in unmittelbarer Nähe zur DR-Anlage so wird das am unteren Ende des Schachtofens ausgetragene heiße DRI für den weiteren Transport abgekühlt. Der Vorteil dieser Transportart ist, dass das Fördersystem keine hohen Temperaturen standhalten muss. Im nachfolgenden Kapitel werden nun die Möglichkeiten für den kalten Transport beschrieben.

5 Kalttransport von DRI

Kaltes pelletiertes DRI besitzt eine Schüttdichte von $1,6-1,8 \text{ t/m}^3$. Aufgrund seiner hohen Porosität neigt es dazu, in Kontakt mit Wasser und/oder Luftsauerstoff zu reoxidieren. Daher ist es unumgänglich das DRI vor dem Kalttransport zu passivieren, wie es in Kapitel 3.2 bereits beschrieben wurde. Es können alle Arten von konventionellen Schüttguthandhabungsgeräten für den Transport und Umschlag von DRI verwendet werden. Ob in der Produktionsanlage, im Hafen, Zwischenterminal oder am Lagerplatz die Handhabung von DRI ist ähnlich dem in der Industrie standardmäßigen Schüttgutumschlag. Hierzu zählen: [5]

- Schaufelradbagger
- Alle Arten von Stackern und Reclaimern
- Kräne mit Magneten oder Greifern
- Frontlader und Bagger
- Portalkräne
- Feste oder mobile Förderbänder
- Rohrgurtförderer
- Etc.



Abbildung 16: Fotocollage verschiedener Fördersystem für den Transport und Umschlag von DRI [5]

Es empfiehlt sich jedoch für den Transport besondere Vorkehrung zu treffen. Da DRI zur Bildung von Knallgas neigt sollte besonders auf mögliche Hitze- oder Zündquellen geachtet werden. Aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber Wasser sollten Förder- und Umschlagsysteme vor der Inbetriebnahme von stehendem Wasser gereinigt werden. Aufgrund der hohen Reaktivität und Pyrogenität von DRI-Staub und -Feinstoffen soll während des Transports eine übermäßige Verschüttung oder Ansammlung von Staub verhindert werden. Ist dies nicht möglich, so soll eine Einhausung des Fördersystems vorgesehen werden. [5] [13]

DRI kann während des Transportes von der Produktionsstätte zum Endverbraucher in feinere Teile zerbrechen. Damit verbunden ist die Erzeugung von eisenhaltigen Stäuben. Das

Hauptaugenmerk beim Umschlag von DRI liegt auf der Minimierung von Staub und der Bildung von Feinanteilen. Die Materialverluste ergeben sich aus den unterschiedlichsten Quellen: [5]

- Verschütten oder Bruch an Förderbändern und beim Umschlag mit mobilen Geräten
- zunehmende Reoxidation während Lagerung, Transport und Rückgewinnung
- Entstaubungsverluste

Materialverluste können durch Optimierung des Transportsystems auf ein Minimum reduziert werden, wie etwa durch die Minimierung der Anzahl von Übergabepunkten entlang der gesamten Förderkette oder durch die Begrenzung der Fallhöhe an Übergaben. Feinpartikel, die nach dem Austrag auf dem Band verbleiben und von den Bandreinigern abgeschabt werden, gilt es ebenfalls zu berücksichtigen. Der erfolgreiche Einsatz von Übergabeschurren in Bandförderanlagen erfordert eine entsprechende Konstruktion, um eine Umlenkung des Materialstroms so sanft wie möglich zu gestalten. Eine Diskrete Elemente Methode (DEM)-Modellierungsstudie kann für Übergaben und Schurren Verbesserungspotenzial aufzeigen. So kann die Leistung der Übergabe sowie des Bandes durch Optimierung der Konstruktion der Transferschurre verbessert werden. [20]

5.1 Vorkehrungen für DRI-Fördersysteme

Bei der Konstruktion von Fördersystem für DRI sollten im Allgemeinen folgende Vorsichtsmaßnahmen berücksichtigt werden: [5]

- Das Fördersystem soll im Idealfall eingehaust werden, dadurch wird der Kontakt mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft und Wasser vermieden. Zusätzlich können Absaugungen vorgesehen werden, um anfallenden Staub zu entfernen.
- Der Förderer sollte trocken und frei von stehendem Wasser sein, um die Bildung von brennbarem Wasserstoff und giftigem Kohlenmonoxid zu vermeiden.
- Vorsehen von Reinigungseinrichtungen, um die Anhäufung von Feinanteilen zu vermeiden.
- Optimale Konstruktion der Übergabepunkte, um Materialbruch und die Erzeugung von Feinanteilen zu vermeiden.
- Verwendung von automatischen Löscheinrichtungen, wobei hier Trockenlöschanlagen gegenüber Wasserlöschanlagen vorzuziehen sind. Bei Löschanlagen auf Wasserbasis ist auf eine eventuelle Leckage zu achten.
- Regelmäßige Wartung und Reinigung von Schurren und Übergabestationen. Für die Entfernung des DRI-Staubes wird die Verwendung von pneumatischen Reinigungssystem empfohlen, wobei komprimierter Stickstoff komprimierter Luft vorzuziehen ist.
- Förderanlagen sollten mit Temperaturüberwachungssystemen ausgestattet sein.
- Heißes oder feuchtes DRI sollte nicht in Silos gefördert und eingelagert werden. Gelangt heißes oder feuchtes DRI dennoch in das Silo, so ist dieses umgehend zu entfernen. Die Vorratssilos sollen mit Temperatur-, Stickstoff- und Wasserstoffdetektoren ausgestattet werden.
- Generell ist zu empfehlen, dass die gesamten Förderanlage mit Stickstoff- und Wasserstoffdetektoren ausgestattet wird.
- Material, welches sich unter Normalbetrieb oder aufgrund einer Fehlfunktion der Ausrüstung an der Förderanlage ansammelt, soll zeitnahe entfernt werden.

In Anbetracht der oben genannten Anforderungen an den Transport von DRI bieten Rohrgurtförderer die optimale Lösung.

5.2 Rohrgurtförderer

Rohrgurtförderer, auch Schlauchgurtförderer genannt, gehört zur Gruppe der Bandförderer und transportieren das Schüttgut in einem geschlossenen System. Während des Transportes ist das Fördergut durch das geschlossene Rohr von äußeren Umwelteinflüssen geschützt und eine Verschmutzung der Umwelt durch Staub wird verhindert. Im Bereich der Materialaufgabe ist der Gurt wie bei einem Muldenförderband geöffnet. Danach schließen spezielle Tragrollen den Gurt zu einem überlappenden geschlossenen rohrförmigen Querschnitt um das Fördergut. Kurz vor dem Materialabwurf öffnet sich der Gurt durch die Anordnung der Tragrollen und das Fördergut wird wie bei herkömmlichen Bandsystemen ausgetragen. Nach der Umlenkung wird der Gurt erneut rohrförmig geschlossen und läuft im Untertrum zurück zur Materialaufgabestation. In Abbildung 17 ist der Aufbau eines Rohrgurtförderers schematisch dargestellt. [5] [13]

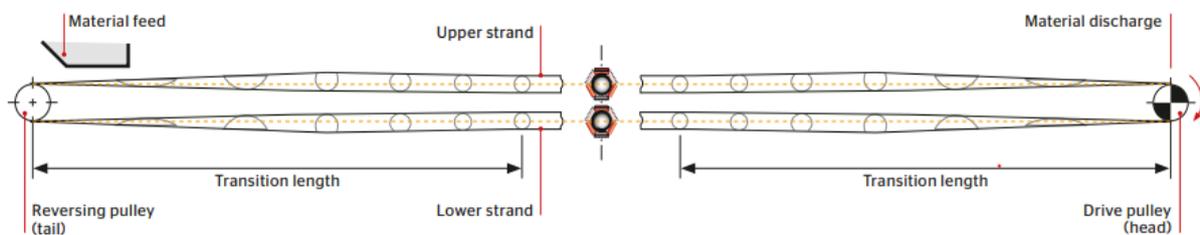


Abbildung 17: Schema eines Rohrgurtförderers [21]

In verschiedensten Bergbau- und Industrieanwendungen müssen oft relativ große Steigungen und enge Kurven auf engstem Raum bei hohen Massenströmen überwunden werden. Zu den herausragenden Merkmalen eines Rohrgurtförderers zählen: [5] [17] [21]

- keine Übergabestellen,
- keine Verschütten von Material entlang der Förderstrecke und
- eine enge dreidimensionale Kurvengängigkeit.

Dank seiner kompakten Bauweise sind Rohrgurtförderer platzsparend und erlauben eine einfache Navigation durch natürliches und infrastrukturelles Gelände. Durch seine Kurvengängigkeit ist ein flexibles Anlagendesign möglich. Schlauchgurtförderer erlauben einen Förderwinkel bis zu 30°. Wird die obere Deckschicht des Bandes mit Winkelrippen ausgestattet können sogar, je nach Schüttguteigenschaften, Neigungswinkel von bis zu 50° erreicht werden. Rohrgurtförderer erlauben eine schnelle und einfache Montage und kommen aufgrund ihrer modularen Bauweise ohne zusätzlichen Stahlbau aus. Die hohe Stabilität des Systems bei vergleichsweise geringem Eigenmasse erlaubt große Stützabstände von bis zu 75 m. [5] [17] [21]

Der Fördergurt ist das wichtigste Konstruktionselement. Er besteht aus einem endlosen umlaufenden Band, das gleichzeitig als Trag- und Zugmittel dient. Zum Einsatz kommen hochwertige Gewebegurte oder Stahlseilgurte. Je nach Einsatzgebiet ob für sehr heiße,

abrasive, ölige oder chemisch aggressive Schüttgüter können die Ober- und Unterseite des Gurtes mit Standard- oder Sondergummimischungen ausgestattet werden. [5] [17] [21]

Gurtverschmutzungen können den Geradelauf des Bandes beeinflussen, wodurch Schäden an Fördergurt, Tragrollen und Trommeln entstehen können. Um auch stark anhaftende Rückstände vom Fördergurt zu entfernen können an der Antriebsstation, Abstreifer vorgesehen werden. Diese Abstreifer sind in folgenden Ausführungen erhältlich: [5] [21]

- Leistenabstreifer
- Lamellenabstreifer
- Innenbandreiniger
- Reinigungsbürsten

In Rohrgurtförderern können fein- bis grobkörnige Schüttgüter transportiert werden. Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten ist es essenziell auf eine Überladung des Förderers zu achten. Hierfür können volumetrische Messinstrumente entlang der gesamten Förderstrecke vorgesehen werden. Eine Materialfüllgrad von 70% des Querschnittes darf nicht überschritten werden. [22]

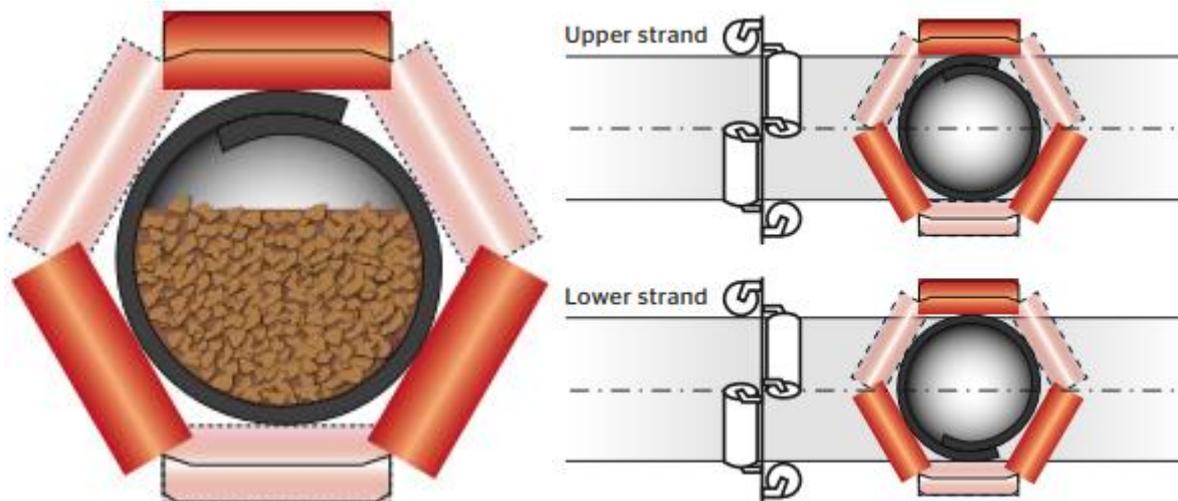


Abbildung 18: (links) Querschnitt eines Rohrgurtförderers, (rechts) Ober- und Untertrum eines Rohrgurtförderers [21]

Eine Sonderkonstruktion des Schlauchgurtförderers erlaubt den Transport in zwei Richtungen, den sogenannten Doppeltransport. Hierbei wird Material im ebenfalls geschlossenen Untertrum gefördert, wobei darauf geachtet werden muss, dass das Schüttgut stets auf der gleichen Seite des Gurtes aufliegt, da im überlappenden Teil des Gurtes kein Material aufliegen darf. Eine falsche Ausrichtung der Überlappung würde dazu führen, dass Material auslaufen und eine Verschüttung des Förderguts erfolgen würde, was wiederum eine Beschädigung der Komponenten des Rohrgurtförderers zur Konsequenz hätte. Aus diesem Grund bedarf es zweier Gurtwendestationen, um den Fördergurt in die jeweilig richtige Position zu drehen. Die Funktionsweise des Doppeltransportes ist in Abbildung 19 ersichtlich. [5] [21] [22]

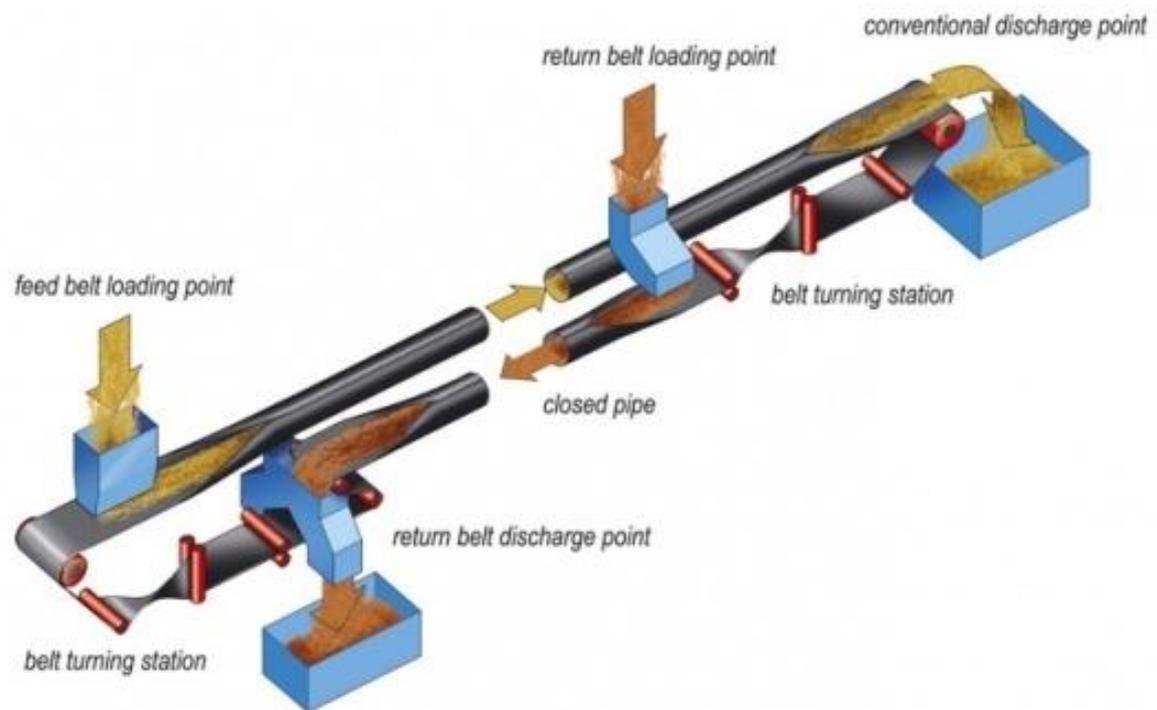


Abbildung 19: Schema eines Rohrgurtförderers für Förderung im Ober- und Untertrum [22]

Kaltes DRI wird nach seiner Herstellung meist nicht sofort weiterverarbeitet, sondern in Silos oder Lagerstätten eingelagert. Im nachfolgenden Kapitel werden die Möglichkeiten der Lagerung beschrieben.

6 Lagerung von DRI

Die Lagerung von kaltem DRI kann in Silos oder in offenen Lagerstätten erfolgen. Diese beiden Arten der Lagerung und die damit verbundenen Vorkehrungen werden in diesem Kapitel beschrieben.

6.1 Behälterlagerung

DRI soll bevorzugt in Silos, Behältern oder Trichtern gelagert werden. Anwendung findet dies beispielsweise in Beschickungssystemen für Stahlschmelzwerke oder an Terminals vor dem Versand. In Abbildung 20 sind DRI Silos ersichtlich. [5]



Abbildung 20: Lagersilos für DRI [5]

Als allgemeine Richtlinie für die Auslegung und Gestaltung von Behältern gelten die AD 2000 Merkblätter. Für die Herstellung von DRI-Silos findet als Baustoff im wesentlichen Stahl Anwendung. Die konstruktive Ausführung, insbesondere die Siloquerschnittsform, die vertikalen und horizontalen Versteifungen, sowie der Auslauf, richten sich weitgehend nach den speziellen örtlichen und prozessbedingten Umständen. Der Trichter wird anhand der Materialfließigenschaften bestimmt. Allgemein sollte bei der Konstruktion von DRI-Behältern folgende Vorkehrungen berücksichtigt werden: [5] [18]

- Anbringung von Temperatursensoren auf mindestens drei Ebenen innerhalb des Silos zur Überwachung der Temperatur
- Installation von Wasserstoffsonden auf der höchsten Ebene des Silos
- Vorsehen von Sauerstoffsonden im oberen Teil des Siloinneren
- Ausstattung der Behälter mit einer Entstaubungsanlage, da sowohl beim Befüllen als auch beim Entladen erhebliche Staubmengen entstehen können
- Integration von Sicherheitseinrichtungen an jedem geschlossenen Behälter, der DRI enthält, gegen eine DRI-Staub-Explosion; dies kann als Explosionsentlastung, Unterdrückung oder kontinuierliche Inertisierung realisiert werden
- Ausstattung des Personals, welches sich in der Nähe von Behältern mit DRI aufhält, mit geprüften Gasüberwachungsgeräten, um den Sauerstoff- und Kohlenmonoxidgehalt zu überprüfen

- Begrenzung der Fallhöhen auf ≤ 2 Meter, zur Minimierung des Partikelbruchs oder Vorsehen einer Falldämpfungsvorrichtungen
- Auslegung der Silos auf Restentleerung
- Maximale DRI-Ladetemperatur von 65°C nicht überschreiten, zu heißes Material getrennt und auf trockenem Boden in einer Schicht von ca. 0,5 Meter zum Abkühlen lagern
- Kein Mischen mit anderen Materialien wie zum Beispiel Kalk oder Kohle in DRI Behältern
- Durchspülung der Silos von unten mit Inertgas, bei längerer Lagerung soll ein leichter Überdruck des Behälters gewährleistet sein
- Öffnung der Boden- und Deckelöffnungen nur während der Dauer der Befüllung und Entladung
- Durchführung regelmäßiger Gasanalysen (Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlenmonoxidwerte). Eine Reoxidationsaktivität im Silo kann sich zunächst in einem Temperaturanstieg oder einem Anstieg von Wasserstoff oder Kohlenmonoxid oder allen drei Parametern widerspiegeln.

Da der Eisengehalt von DRI Pellets im Laufe der Zeit in Folge der Reoxidation durch Sauerstoff und Feuchtigkeit abnimmt, sollte die Lagerung von DRI idealerweise nach dem Prinzip „first-in, first-out“ stattfinden. Erfolgt die Lagerung nach dem „first-in, last-out“ Prinzip, muss mit einem schwankenden Eisengehalt gerechnet werden, was wiederum die Stahlschmelzwerke in deren Prozessen beeinflusst. Je nach Art der Lagerung ist der Qualitätsverlust unterschiedlich. Das in einem inertisierten Silo gelagertes DRI verliert im Laufe der Zeit kaum Eisengehalt. Passiviertes DRI, welches in einem überdachten Lager unter freiem Himmel gelagert wird, kann mehrere Prozent Metallisierung pro Monat verlieren. [5]

6.2 Bodenlagerung

Die Bodenlagerung erfolgt im Freien für witterungsunempfindliches und in Hallen für witterungsempfindliches Schüttgut. Für DRI finden beide Arten Anwendung. Der Lagerbereich sollte sauber und frei von brennbaren und fremden Materialien gehalten werden. Wechselwirkungen mit Fremdmaterial kann zur Selbsterhitzung und Entzündung führen. Üblicherweise besteht der Lagerplatz aus einem Betonfundament mit einer Abdichtungsschicht aus Teer, Bitumen oder einem anderen wasserundurchlässigen Material. Dies soll das Eindringen von Wasser durch den Boden verhindern. Stehendes Wasser soll an und in der Nähe des Lagerbereichs vermieden werden. Hierfür werden die Oberflächen mit mäßiger Neigung ausgeführt und ein Drainagesystem vorgesehen. [5] [18]

Die Schüttguthalden werden entweder im Längslager oder Kreislager Layout ausgeführt. Es wird empfohlen DRI nicht höher als 5 Meter in konischen Kegeln (Cone-Shell-Aufschüttung) zu stapeln. Bei der Haldenanordnung kann es jedoch sehr schwierig sein, heißes Material zu entfernen. Personal, welches sich in der Nähe von DRI-Lagerstätten aufhält, soll unbedingt ein tragbares Gasüberwachungsgerät mit sich führen, um den Sauerstoff- und Kohlenmonoxidgehalt zu überprüfen. [5] [18]

6.3 Selbsterhitzung und Selbstzündung von DRI

Nach dem Umschlag von DRI kann aufgrund der Selbsterhitzung mit einem vorübergehenden Temperaturanstieg von bis zu 30°C über der Einlagerungstemperatur gerechnet werden.

Unter normale Umständen fällt die Temperatur allmählich wieder auf Umgebungstemperatur. Beim Stapeln von DRI sollte die Lagerung übermäßiger Mengen von Feinanteilen und DRI-Staub vermieden werden. Staub und Feinanteile neigen dazu schneller zu reoxidieren und Hitze zu erzeugen. Die Temperatur der Lagerstätte sollte demnach täglich mit Thermoelementen von circa 30 cm Länge an mehreren Stellen kontrolliert werden. Mittels einer Wärmebildkamera oder einem Infrarot-Pyrometer kann die Oberflächentemperatur der Lagerstätte berührungslos überwacht werden. Sollten sich im Schüttkegel Hot-Spots entwickeln (örtlich begrenzte Stellen mit Temperaturen über 100°C), so soll das betroffene Material vom Haufen entfernt und auf trockenem Boden in einer Schicht von etwa 0,5 Metern verteilt werden. Dieser Vorgang ist in Abbildung 21 schematisch dargestellt. [5]

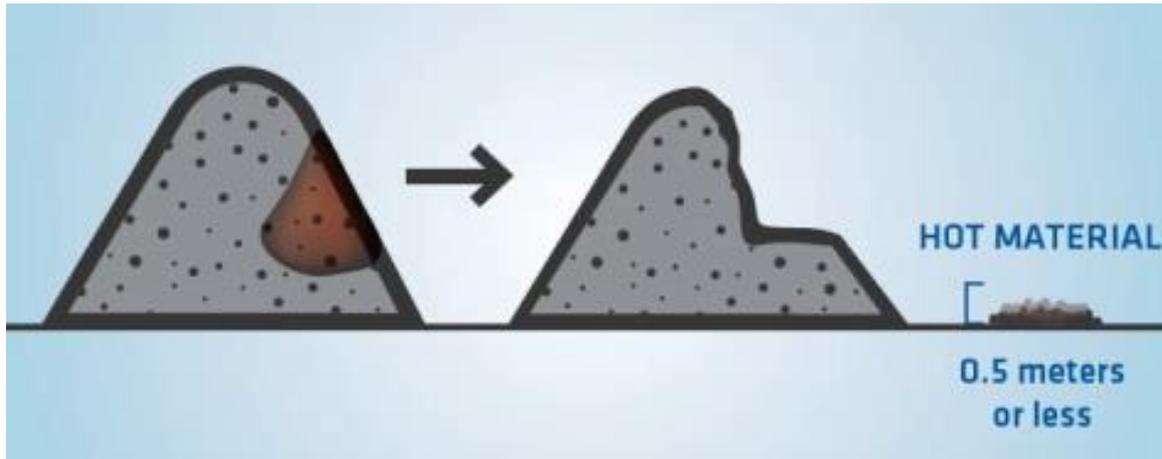


Abbildung 21: Entfernung von heißem Material aus dem Schüttkegel [5]

Bei der Bewegung von heißem Material besteht die Gefahr der Entzündung von Staubwolken und einer daraus resultierenden Stichflammen. Die häufigste Ursache für die Erwärmung von DRI und den damit verbundenen Materialverlust ist, wenn trockenes DRI auf nasses DRI (oder umgekehrt) geschichtet wird oder Wasser in die Halde durch den Boden oder durch Regenfälle eindringt. Nasses Material soll von der Halde entfernt und getrocknet werden, bevor es dem Haufen wieder zugeführt wird. [5]

7 Transport auf der Schiene

Die Schiene gilt als prädestinierter Verkehrsträger für die Stahlindustrie. Aus ökologischer Sicht ist die Schiene eine der nachhaltigsten Transportarten. Die Schiene ist nachweislich und objektiv betrachtet der sicherste Verkehrsträger (im Vergleich zur Straße), weshalb diese Transportart für Gefahrgüter besonders interessant ist. Wird ein Stahlschmelzwerk mit DRI beschickt, so wird dieser Rohstoff in großen Mengen benötigt. Aufgrund der beschränkten Zuladung von Lastkraftwagen (LKW) scheidet dieser Verkehrsträger für den Transport über größere Distanzen aus. [23] [24]

Laut meinen Gesprächen mit Mitarbeitern der Firmen Railcargo Logistics Austria GmbH und der Logistik Service GmbH, wurde in Europa noch kein DRI auf der Schiene transportiert. HBI dagegen wird bereits in die Häfen Europas verschifft und von dort aus in trichterförmigen Erzwägen mit Seitenentladung oder in offenen Güterwägen zum Endkunden transportiert. Das Problem während des Transports von HBI ist, dass durch das eintretende Wasser das HBI zum zusammenkleben beginnt. Bei der Entladung des offenen Güterwagens stellt dies kein Problem dar, da die Entladung durch einen Bagger erfolgt. Bei der Schwerkraftentladung der Erzwägen ist dies problematischer, da durch das Zusammenkleben restliches HBI im Wagon verbleibt. Um den Wagon vollständig zu entladen, muss dieser nachträglich ausgekratzt werden. [23] [24]

Laut Gesprächen mit der Firma GATX Rail Austria GmbH, bezüglich des Transports von DRI, könnte dieser Transport ähnlich wie jener von Kalziumcarbid erfolgen. Kalziumcarbid reagiert bei Kontakt mit Wasser stark exotherm und entwickelt große Wärmemengen. Dieses Gefahrgut wird in Staubgutwagen transportiert. Die Befüllung des Waggons erfolgt unter einer Schutzgasatmosphäre. Ist der Beladevorgang abgeschlossen, wird der Staubgutwagen mit Stickstoff gefüllt bis dieser unter wenigen Bar Überdruck steht. So wird sichergestellt, dass eine Reaktion mit dem Luftsauerstoff nicht stattfinden kann. Das Entladen erfolgt pneumatisch, mittels komprimiertem Stickstoff. Der Transport von DRI könnte ähnlich erfolgen. Erzwägen können jedoch durch die seitlichen Öffnungen für die Seitenentladung nicht zuverlässig abgedichtet werden. Offene Güterwagen bieten kaum Schutz vor Luftsauerstoff und Wasser. Tankwägen sind nicht für Schüttgüter geeignet, da eine vollständige Entladung nicht praktikabel ist. [23] [24]

Da der Transport auf der Schiene aktuell in Europa nicht etabliert ist, soll im Zuge dieser Arbeit ein Konzept für den Schienentransport ausgearbeitet werden. Dieses Konzept soll nicht nur den Transport auf der Schiene, sondern auch den Umschlag vor und nach dem Schienentransport berücksichtigen. Die Konzepte werden in Kapitel 9 behandelt.

8 Transport auf dem Seeweg

Der Transport von Schüttgut mit Seeschiffen nimmt immer mehr zu. Bulk-Carrier bilden inzwischen gut ein Drittel der Welthandelsflotte. Für den Zweck des internationalen Seetransports hat der Schiffsicherheitsausschuss der Internationalen Schifffahrtsorganisation (IMO) und die International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) den IMSBC-Code verabschiedet. Die Abkürzung IMSBC steht für "International Maritime Solid Bulk Cargoes Code". Dieser ist seit dem 1. Januar 2011 gültig. Aufgrund von Meinungsverschiedenheiten zwischen den Herstellern und den Logistikunternehmen hat dieser allerdings nur empfehlenden Charakter. Zweck des IMSBC-Codes ist es, unbekannte Schüttgüter ohne gekennzeichneten Eigenschaften oder jeglicher Gefahreinstufung besser zu kontrollieren und zu klassifizieren. Dazu muss der Hersteller oder Versender des Schüttgutes eine Vereinbarung mit den beteiligten Flaggenstaaten der IMO und den Häfen abschließen. So soll ein sicherer und zuverlässiger Transport von Schüttgütern über See gewährleistet werden. [13] [25]

Schüttgüter, welche nicht im IMSBC-Code angeführt sind, müssen in der Dienststelle für Schiffsicherheit zugelassen werden. Hierfür muss die Dienststelle des Landes der führenden Flagge des Schiffes oder des anzulaufenden Hafens herangezogen werden. Nach der Überprüfung wird das Schüttgut in Abhängigkeit seiner Eigenschaften und Ladungscharakter in eine der drei Gruppen eingeteilt: [25]

- Gruppe A: Ladungen, welche breiartig oder flüssig werden können
- Gruppe B: Ladungen, welche durch ihre chemischen Eigenschaften eine gefährliche Situation herbeiführen
- Gruppe C: Ladungen, welche weder dazu neigen breiartig zu werden noch chemische Gefahren besitzen, um eine gefährliche Situation herbeizuführen

Für die Beförderung von Schüttgütern schreibt der IMSBC-Code spezifische bauliche Vorkehrungen und Sicherheitsausrüstungen vor. Je nach Eigenschaften des zu befördernden Gutes müssen besondere Sicherheitsvorkehrungen bezüglich Brandschutz oder Belüftung vorgesehen werden. Diese Vorkehrungen sind für jedes einzelne Schüttgut dokumentiert. [25]

Beim Transport von DRI besteht Überhitzungs-, Brand- und Explosionsgefahr. Die Ladung reagiert mit Luftsauerstoff und mit Süß- oder Salzwasser und neigt dabei Wärme und Wasserstoff zu erzeugen. Wasserstoff ist ein brennbares Gas, welches mit Luftsauerstoff ein explosionsfähiges Gemisch bilden kann. Die Reaktivität von DRI hängt von der Herkunft des Erzes, dem Herstellverfahren und der Temperatur der Reduktion und den anschließenden Passivierungsverfahren ab. Die Erwärmung der Ladung kann sehr hohe Temperaturen erzeugen, welche ausreichen, um die Ladung zu entzünden. Eine Ansammlung von DRI-Feinstaub verstärkt den Effekt der Selbsterhitzung, Selbstentzündung und Explosionen. Der einfachste Weg um Gefahren wie Feuer, Flammen oder Explosionen vorzubeugen, besteht darin, Sauerstoff aus der Umgebung zu entfernen. [5]

Bei Gefahrgutschiffen wird der Sauerstoffgehalt durch das Einleiten von inertem Gas in die Laderäume gesenkt. Dies geschieht während des Beladevorgangs, dem Transport und dem Löschen der Fracht. Der Sauerstoff Gehalt des inertes Gases variiert je nach Art der Ladung

und der Art des flüchtigen brennbaren Gases, welches die Fracht freisetzt. Schiffe für die Beförderung von Erdölprodukten und flüssiger chemischerer Fracht verwenden derartige System. Inertgas Systeme finden auf Massengutfrachter standardmäßig keine Verwendung. Um die Gefahr bei der Verschiffung von DRI zu beseitigen ist es notwendig das Schiff mit diesem System auszustatten. Nur so können sichere Transportbedingungen geschaffen werden. [13]

Ein inertes Gas enthält in etwa 83 % Stickstoff, 12–14 % Kohlendioxid, 2–4 % Sauerstoff. Gemäß der International Life Safety Convention (SOLAS) wird für Ladungen, welche Wasserstoff emittierten, der Grenzwert für Sauerstoff mit maximal 5 % vorgeschrieben. Das Gas kann aus den Abgasen der Haupt- und Hilfskessel des Schiffes, aus Inertgas-Erzeugungssystemen oder aus einem unabhängigen Inertgas-Generator gewonnen werden. Es wird verwendet um Gefahren wie Entflammbarkeit, Explosion und Feuer auf Schiffen, die gefährliche Fracht auf Seewegen befördern, zu vermeiden. [13]

Es gibt mehrere Möglichkeiten ein geeignetes Inertgas-System auszuwählen. Hierfür muss zu Beginn die Dauer des Transportes, Kurzzeit- oder Langzeittransport, herangezogen werden. [5]

Wird mit einem Massengut-/Trockenfrachtschiff nur ab und zu DRI transportiert, so empfiehlt es sich, die Inertisierung der Laderäume von einer externen Quelle im Hafen nach dem Beladevorgang vorzusehen. Ein sicherer Transport kann hierbei nicht vollständig garantiert werden, weshalb es unumgänglich ist, den Transportweg so kurz wie möglich zu halten. Aus externen Quellen zugeführtes Inertgas oder Stickstoff kann eher bevorzugt werden, da hier keine Wartungskosten entstehen und hinsichtlich des Zeitverlusts vorteilhafter sind als andere Systeme. Wird dennoch beabsichtigt dauerhaft DRI zu befördern, so besteht die Möglichkeit der Nachrüstung eines Inertgas-Generators. Wird bei der Anschaffung eines Schiffes beabsichtigt DRI kontinuierlich zu transportieren, so wird der Einbau eines festen Inertgas- oder Stickstoff-Systems in der Schiffsbauphase empfohlen. Der Sicherheitsfaktor eines bereits integrierten Generators ist im Vergleich zum nachgerüsteten Generator höher. Ein stationäres Stickstoffrohrsystem ist hier in Bezug auf Betriebs- und Wartungskosten günstiger als andere. Der Unterschied von Übersee- zur Binnenschiffahrt liegt in der Wahl des Systems. Aufgrund der kleinen Bauweise von Binnenschiffen findet hier hauptsächlich der Stickstoffspeicher Anwendung. [13] [5]

Es gibt fünf Alternativen von Inertgas Systemen für den Transport von DRI. Der Aufbau dieser Systeme wird auf den folgenden Seiten näher erklärt.

8.1 Alternative 1: Inertgas System (IGS)

Abgas oder Rauchgas wird vom Antriebsmotor oder dem Dampfkessel des Schiffes abgezogen. Anschließend wird aus dem Rauchgas durch Reinigungs-, Kühl- und Trocknungsprozesse das Inertgas gewonnen. Das erzeugte Inertgas wird mittels Ventilatoren den Laderäumen über die an Deck befindlichen Rohrleitungen und Sicherheitsventile zugeführt. Wird eine Gasturbine für den Antrieb des Schiffes oder zur Generierung von Strom zur Versorgung der Bordelektronik verwendet, so bietet es sich an in der Turbine einen Nachbrenner vorzusehen. So kann durch zusätzliches Einspritzen von Marine-Diesel der Sauerstoffgehalt des Abgases weiter herabgesetzt werden und dieses in weiterer Folge als Inertgas verwendet werden. So

kann die Sauerstoffkonzentration auf das gewünschte Niveau reduziert werden. In Abbildung 22 ist ein Fließschema des Inert Gas System ersichtlich. [13]

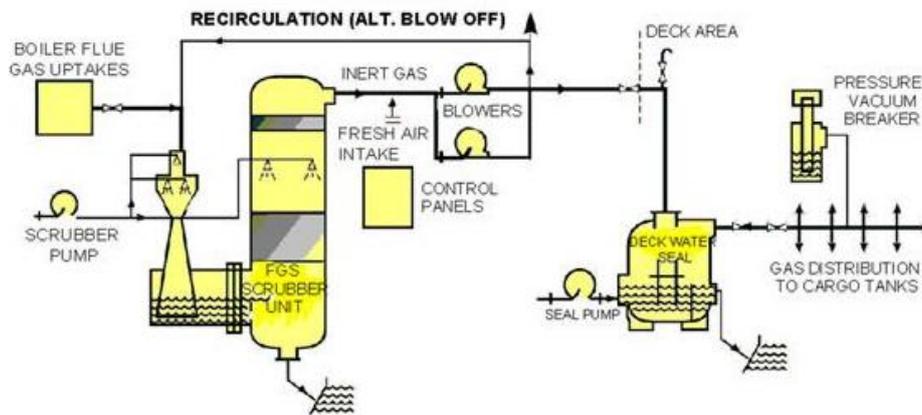


Abbildung 22: Fließbild des Inertgas Systems (IGS) [26]

8.2 Alternative 2: Inertgas Generator (IGG)

Das Inertgas wird durch Verbrennen von Marine-Diesel in einem alleinstehenden Ofen gewonnen. Das Abgas wird von Gebläsen über einen Wäscher oder eine Filtereinheit zum Reinigen, Kühlen und Trocknen in Richtung der Ladetanks geblasen. In Abbildung 23 ist das Fließbild des Inertgas Generators dargestellt. [13]

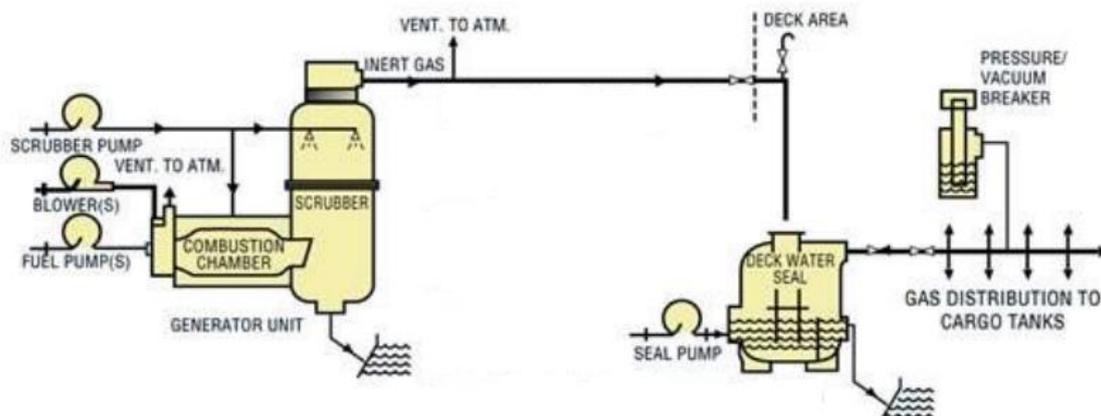


Abbildung 23: Fließbild des Inertgas Generators (IGG) [27]

8.3 Alternative 3: Stickstoff Generator

Bei diesem System werden Hohlfasermembranen verwendet, um die Luft in Stickstoff und Sauerstoff zu trennen. Das Trennprinzip basiert auf der selektiven Permeation von Stickstoff und Sauerstoff. Jedes Gas hat eine charakteristische Permeationsrate, diese beschreibt seine Fähigkeit sich aufzulösen und durch eine Membran zu diffundieren. Die „schnelleren“ Gase Sauerstoff und Kohlendioxid dringen viel schneller durch die Membran als das „langsamere Gas“ Stickstoff. Die treibende Kraft des Trennvorgangs ist der Partialdruckgradient zwischen Hochdruck- und der Niederdruckseite der Membran. Der Nachteil der selektiven Permeation ist ein geringer Volumenstrom an Stickstoff. [13]

Eine Alternative zur Membrantechnologie ist die Druckwechsel-Absorption. Diese besteht aus zwei Absorptionstürmen. Hier werden spezielle poröse Materialien als Absorber eingesetzt. Komprimierte, gereinigte Luft strömt durch die Türme und Sauerstoff wird vom porösen

Material absorbiert, während das Stickstoff angereicherte Gas den Turm oben verlässt. Während in einem Turm die Absorption stattfindet, regeneriert sich der andere Turm. Der Druckwechsel-Absorber kann Stickstoff kontinuierlich in großen Mengen produzieren, weshalb diese Variante am häufigsten Anwendung findet. Der Aufbau dieses Stickstoff Generator Systems ist in Abbildung 24 ersichtlich. [13]

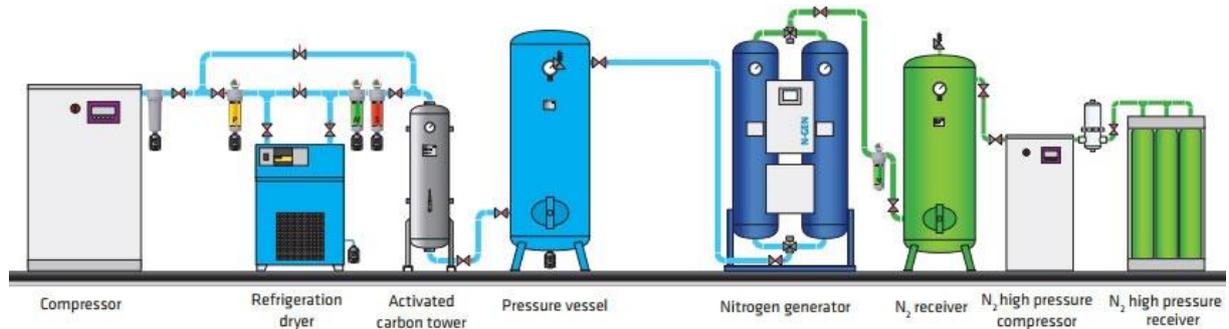


Abbildung 24: Fließbild eines Druckwechsel Absorbers mit zwei Adsorptionstürmen [28]

8.4 Alternative 4: Stickstoff Speicher

Diese Variante findet hauptsächlich Anwendung in der Binnenschifffahrt. Für den Transport wird ausreichend komprimierter Stickstoff in Gasflaschen mitgeführt. [13]

8.5 Alternative 5: Externe Zufuhr von Inertgas oder Stickstoff

An Hafenanlagen, in denen gefährliche Fracht umgeschlagen wird, kann die Inertisierung der Laderäume durch Inertgas oder Stickstoff, welches von der Hafenbehörde oder den Belader bereitgestellt wird, erfolgen. Dieses System wird von großen Tankschiffen und Chemikalientankern in Notfällen verwendet und kann für Massengutfrachtern oder Trockenfrachtschiffen ebenfalls eingesetzt werden. Hierbei wird das Gas über ein Pipelinesystem in die Laderäume gepumpt, um die gewünschte Sauerstoffkonzentration zu erhalten. [13]

Die folgenden Schüttgutfrachter-Typen werden für den Seetransport von DRI verwendet: [5]

- Eindecker
- Handy-Size
- Handy-Max
- Supra-Max oder
- Panmax mit hydraulisch oder mechanisch betätigten oder zweifach gefaltetem Lukendeckel in wasserdichter Konstruktion.

In den folgenden Seiten wird das Transportkonzept beschrieben.

9 Transportkonzept

Vereinheitlichung und Standardisierung spielt im weltweiten Transport von Gütern eine immer größere Rolle. Wirft man einen Blick auf Frachtstatistiken so ist eindeutig zu erkennen, dass der Transport von Frachtcontainern in den vergangenen Jahren massiv zugenommen hat. Der Vorteil ist die weltweit einheitliche Größe von ISO-Containern. Dieser Trend der Vereinheitlichung spielt auch in der Industrie eine signifikante Rolle. So können Prozesse vereinfacht und standardisiert werden.

Im Gegensatz zum Transport von HBI ist jener von DRI auf der Schiene in Europa aktuell noch nicht erschlossen. Aus diesem Grund gilt es hierfür einen Lösungsvorschlag zu finden. Es wurden vier Varianten konzipiert die nicht nur den Transport auf der Schiene, sondern auch den Transport davor und danach berücksichtigen sollen. DRI wird in Ländern mit einem hohem Erdgasvorkommen produziert wie Indien, Afrika, USA oder Russland. Soll dieses nach Zentraleuropa importiert werden, so erfolgt der erste Transport meist per Schiff. Von den Häfen Europas soll der Transport zu den Stahlwerken dann auf der Schiene stattfinden. Um den Transport, das Umladen und Einlagern während dieses Prozesses zu vereinfachen, wurden die ISO-Container Maße als Grundlage für die Konstruktion der Transportbehältnisse herangezogen. So wird auch ein weiteres Transportsegment abseits des Bulk Transportes, nämlich der Containersektor, für die Stahlindustrie erschlossen.

Als Grundkonstrukt wurden 10, 20 und 40 Fuß Containern verwendet. In dem Containerstahlgerüst wurden verschiedene Behälterformen eingepasst. Die Verwendung dieses Systems bieten den Vorteil, dass das DRI effizient an einer Direkt-Reduktions-Anlage (DR-Anlage) in Behälter abgefüllt und zwischengelagert werden kann. Die Fertigung in standardisierten Maßen ermöglicht eine einfache Stapelung und Umladung zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln.

Beim derzeitigen Umschlag von losem DRI zum Beispiel in einen Schüttgutfrachter oder in ein Zwischenlager, etc. kann Materialbruch vorkommen und Feinstaub entstehen. Dies führt, wie in den Kapitel 4, 5 und 6 bereits erwähnt, zu Gefährdung von Material und Gerät. Aufgrund der einmaligen Be- und Entladung der Behälter während der gesamten Transportkette wird Materialbruch und Feinstaubgenerierung weitgehendst unterbunden.

Nach der Verschiffung an den Bestimmungshafen können die Container per Portalkran auf Tragwagen umgeladen und über die Schiene zum Stahlwerk transportiert werden. Die Verwendung der standardisierten Containerabmaße soll eine rasche Löschung der Fracht ermöglichen. Auch die Investition in Konstruktion und Fertigung neuer Waggons für den Schienentransport entfällt.

9.1 Variante 1

In dieser Variante wird ein Silo stehend in einen 10 Fuß Container Stahlbau eingepasst. Zwei 10 Fuß Einheiten können für die Verschiffung und dem Transport auf der Schiene zusammen verschraubt werden und ergeben somit wieder eine gängige 20 Fuß Einheit. Diese Anordnung ist in Abbildung 28 abgebildet. Da das Silo stehend in die Stahlkonstruktion eingebaut ist verbleibt dieses für das Be- und Entladen und dem Transport stets in aufrechter Position. In Abbildung 25 ist die isometrische Ansicht der Variante 1 ersichtlich.

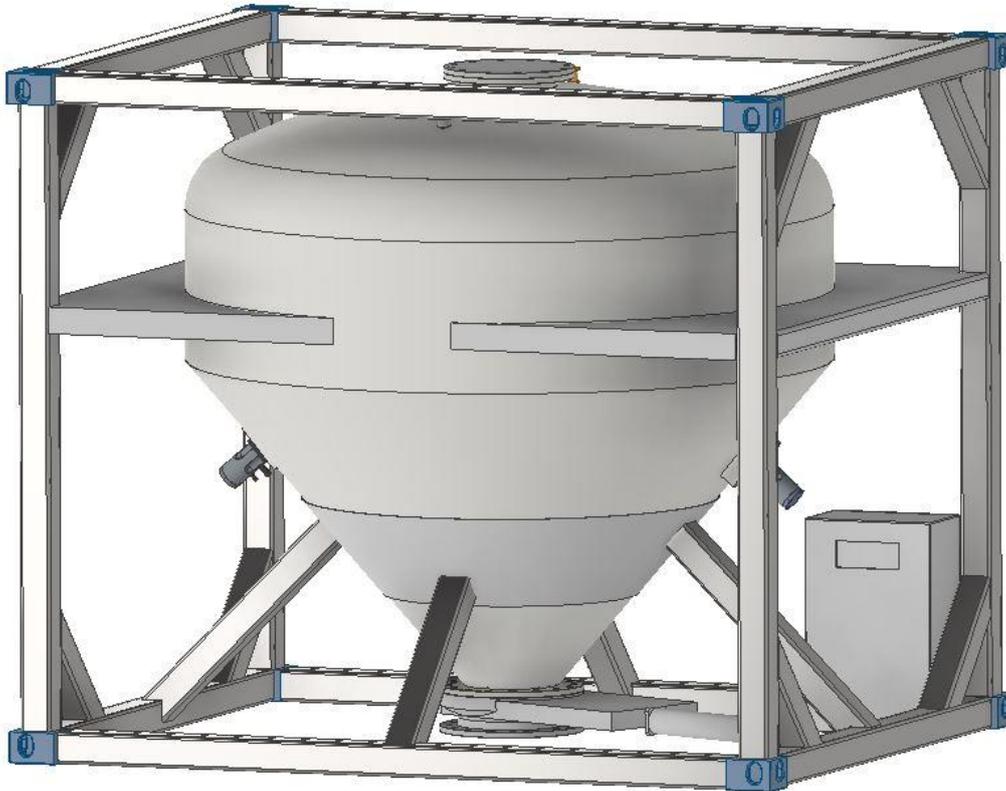


Abbildung 25: Isometrische Ansicht von Variante 1

Konzept	Masse Konstruktion [kg]	Füllmenge [m ³]	Füllgrad [%]	tatsächliche Füllmenge [m ³]	mittlere Dichte [kg/m ³]	Masse Transportgut [kg]	Masse gesamt [kg]
Variante 1	3.500	6,00	90,00	5,40	1.875	10.125	13.625

Tabelle 1: Daten zu Variante 1

Das Silo wird in einen konischen Ring eingesetzt, welcher diesen in aufrechter Position hält. Anschließend wird das Silo über eine gekantetes Blech in U-Form mit dem Stahlgerüst verschweißt. Dieses U-Blech dient als Verstärkungsrippe. Am Konus des Behälters befinden sich zwei pneumatische Vibratoren, welche während des Entladevorgangs den Materialfluss begünstigen sollen. Diese werden auf U-Profile aufgeschraubt und anschließend auf den Konus geschweißt. So sollen verklebende Reste im Silo gelockert und der Fluss im Silo begünstigt werden.

Am Klörperboden befindet sich zentrisch ein DN350 Stutzen mit einem Flansch, welcher zur Befüllung dient. Nach der Befüllung wird dieser mit einem Deckel verschraubt. Es wird eine Flachdichtung beigelegt, um einwandfreie Dichtheit zu garantieren. Im Klörperboden

befinden sich noch zwei weitere Stützen mit einem Innenrohrgewinde. Diese können für die Installation von Überwachungs- und Füllkomponenten verwendet werden. Wie im Kapitel 6.1 erwähnt, sollten Behälter, welche für die langfristige Lagerung von DRI vorgesehen werden unter leichtem Überdruck stehen, sowie über Temperatur- und Gasmessgeräte verfügen. Um eine Reoxidation des Gutes zu verhindern, wird das Silo durch eingeschraubte Armaturen nach seiner Befüllung unter 1,5-2,0 Bar Überdruck, mit einem inerten Gas, gestellt. Im anderen Stützen können Sensoren zur Überwachung eingeschraubt werden. Im Stahlgerüst wird ein Schaltkasten für den Anschluss von Steuerungskomponenten zur Bedienung und Überwachung des Behälters vorgesehen. Komponenten für den Datenaustausch können ebenfalls im Schaltschrank platziert werden. Am unteren Ende des Konusses befindet sich ein Plattenschieber in gasdichter Ausführung, welcher für Schüttgüter geeignet ist. Schüttgutschieber sind einseitig abdichtend und speziell für die Schüttguttechnik entwickelt. Durch seine geringe Bauhöhe sowie einfache Bauweise kann das Volumen des Silos größtmöglich ausgelegt werden. Der Plattenschieber ist pneumatisch gesteuert. Alternativ kann der Plattenschieber auch manuell über ein Handrad oder hydraulisch betätigt werden.

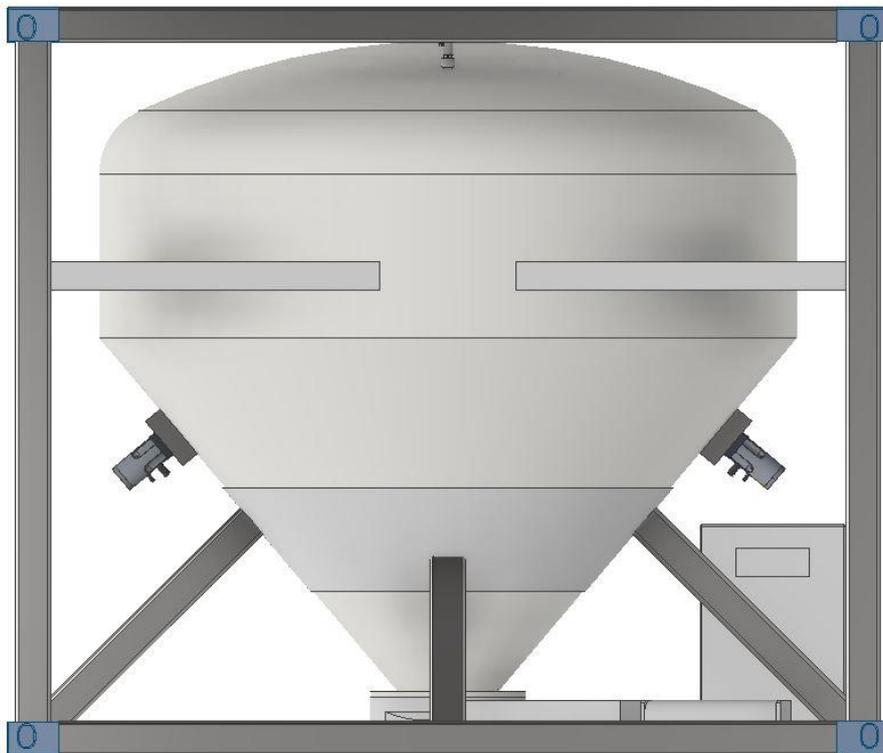


Abbildung 26: Aufriss der Variante 1

Da DRI in weiterer Folge hauptsächlich in Elektrolichtbogenöfen weiterverarbeitet wird, gilt auch für diesen Prozess eine einfache Beschickung zu berücksichtigen. Hierbei wird hauptsächlich zwischen zwei Beschickungsarten unterschieden:

1. Diskontinuierliche Beschickung: Der Silo wird vom Hallenkran über den EAF gehoben und durch pneumatische Betätigung des Schiebers direkt in diesen geladen. Diese Vorgehensweise ist ident zum Ablauf bei der Beschickung mit Schrott.
2. Kontinuierliche Beschickung: Ein Vorratsbehälter über dem EAF wird mit dem DRI beladen. Von diesem Behälter wird das DRI nach Vorgabe in den EAF entladen.

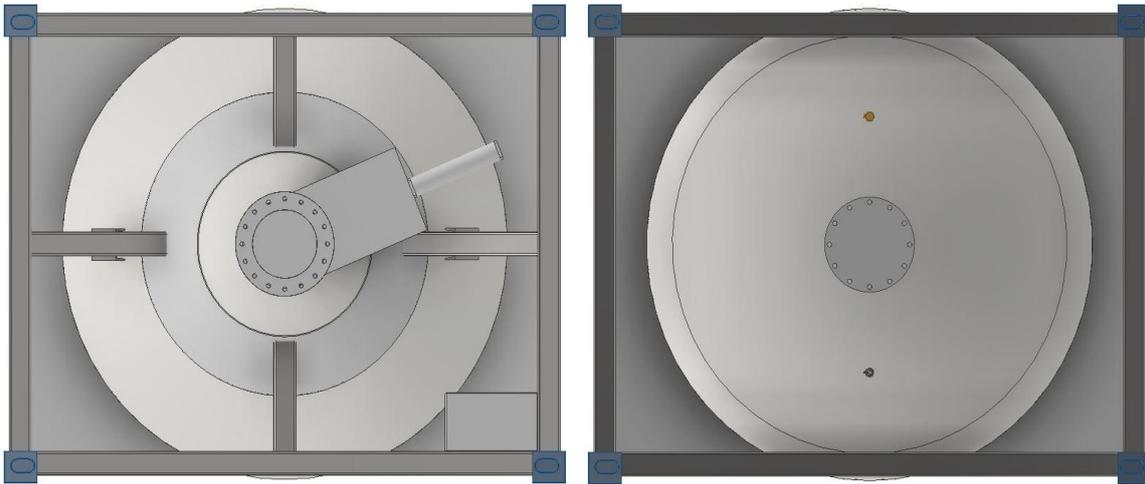


Abbildung 27: (links) Ansicht von Unten mit Plattenschieber, (rechts) Ansicht von Oben auf den Klöpperboden mit Verschlussdeckel und den zwei Anschlussstutzen

In Abbildung 28 ist der Zusammenbau zweier 10 Fuß Einheiten zu einer 20 Fuß Einheit ersichtlich. Für die Verbindung der Einheiten werden Twistlocks und Laschstangen verwendet. Twistlocks sind Verriegelungen, welche für Sicherung von ISO-Container untereinander oder mit dem Transportfahrzeug oder mit einem Hebezeug dienen. Dabei werden die Twistlocks in die genormten Eckbeschläge eingesetzt und um 90° verdreht. Dadurch eine formschlüssige Verbindung hergestellt.

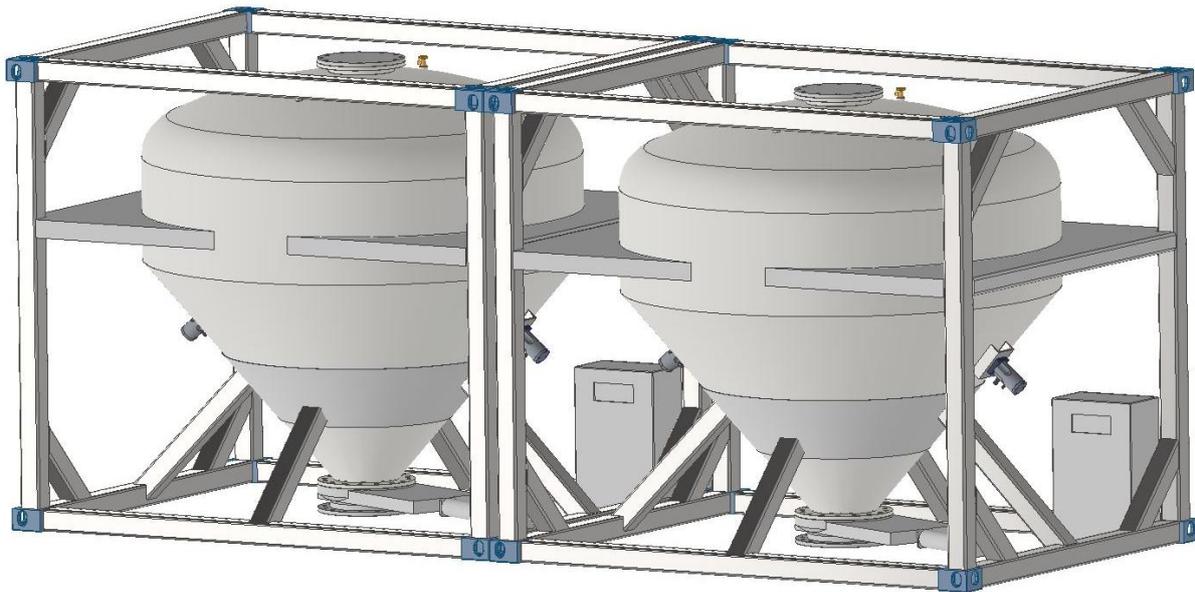


Abbildung 28: Isometrische Ansicht des Zusammenbaus zweier 10 Fuß Einheiten zu einer 20 Fuß Einheit

9.2 Variante 2

Als Vorbild für Variante 2 diente die Asphaltbirne. Es wurde ein Silo liegend in ein 20 Fuß Stahlgerüst eingepasst. Der Konus verjüngt sich exzentrisch zu der Entladeöffnung. Die dem Konus gegenüberliegende Seite des Silos wird mit einem Flachboden verschlossen. Die Beladung erfolgt über zwei Öffnungen im Silomantel. Diese Variante verbindet großes Ladevolumen mit einfacher Be- und Entladung. Diese Konstruktion soll ein einfaches Be- und Entladen ohne aufwendige Manipulation ermöglichen, weshalb das Silo während der Befüllung und dem Transport stets in horizontaler Lage verbleibt. Das Entladen geschieht ähnlich wie bei der Asphaltbirne durch ein einseitiges Anheben der Konstruktion. In Abbildung 29 ist die Isometrische Ansicht der Variante 2 dargestellt.

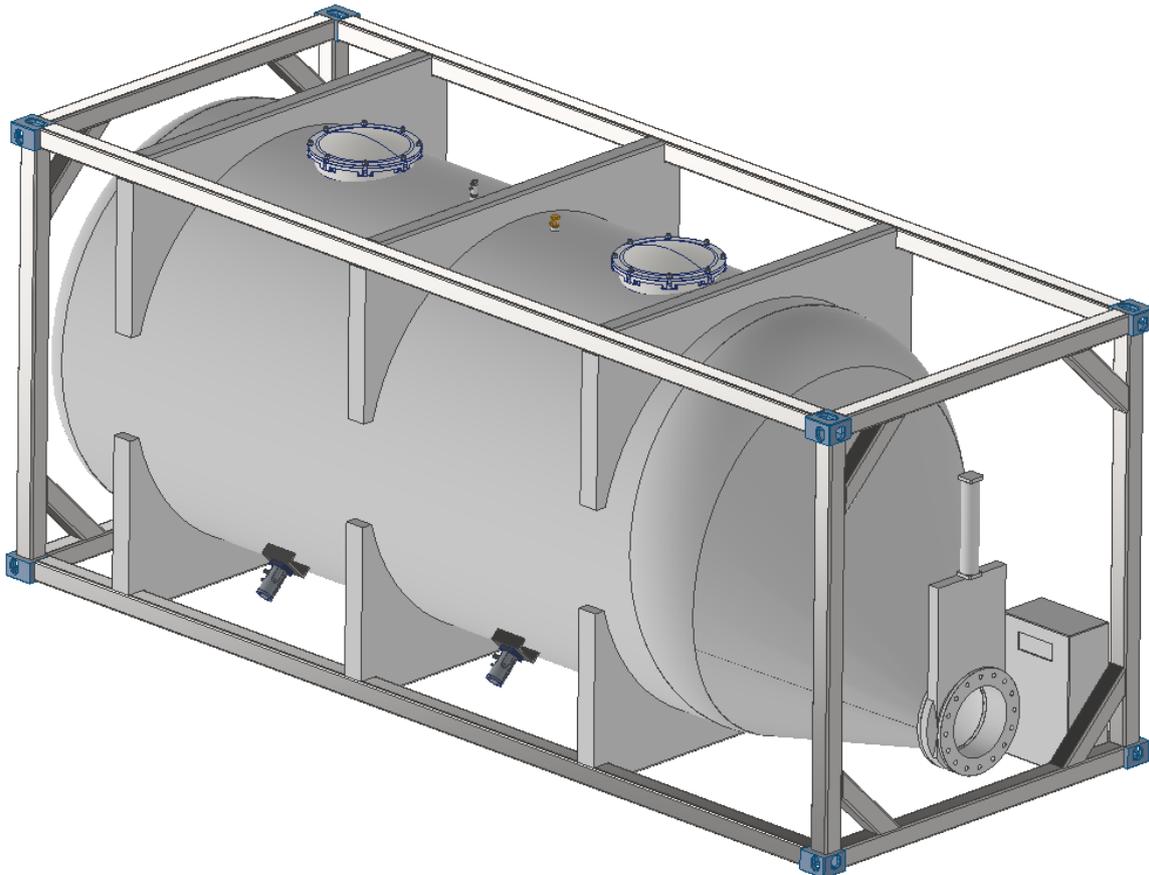


Abbildung 29: Isometrische Ansicht von Variante 2

Konzept	Masse Konstruktion [kg]	Füllmenge [m ³]	Füllgrad [%]	tatsächliche Füllmenge [m ³]	mittlere Dichte [kg/m ³]	Masse Transportgut [kg]	Masse gesamt [kg]
Variante 2	4.700	20	90,00	18,0	1.875	33.750	38.450

Tabelle 2: Daten zu Variante 2

Der Konus an der Auslasseite verjüngt sich exzentrisch zu einem DN400 Stutzen mit Flansch. Auf diesem wird wieder ein für Schüttgüter geeigneter, gasdichter Plattenschieber installiert. Der Plattenschieber kann pneumatisch, hydraulisch oder manuell betätigt werden. Zur Befüllung dienen zwei DN400 Druckverschlüsse mit Klappschrauben am oberen Silomantel. Dies soll eine zügige Abnahme des Deckels gewährleisten. Im Deckel befindet sich eine integrierte Silikondichtung, um die Dichtheit gegenüber der Atmosphäre zu gewährleisten.

Zwei weitere Stützen zu Installation von Überwachungskomponenten werden ebenfalls wieder vorgesehen. Am unteren Mantel des Silos finden sich vier pneumatische Vibratoren. Diese werden, wie bei der Variante zuvor, auf U-Profilen aufgeschraubt und mit dem Silo verschweißt. Die Vibratoren sollen das Fließen des Schüttgutes während des Entladevorgangs begünstigen. Im Stahlrahmen findet sich ebenfalls wieder ein Schaltkasten für die Versorgungskomponenten. Mehrere Verstärkungsrippen garantieren wieder einen soliden Halt und ausreichend Steifigkeit in der Konstruktion. Das Silo wird nach seiner Befüllung wieder unter wenige Bar Überdruck gestellt, um die Reoxidation des Transportgutes zu verhindern. Wie in Abbildung 30 ersichtlich verjüngt sich der Konus exzentrisch. Der Neigungswinkel des Auslassstutzens zur Horizontalen beträgt 20° . Diese Anhebung ist notwendig, um eine Kollision des Plattenschiebers mit dem Stahlrahmen zu unterbinden.



Abbildung 30: Seitenansicht der Variante 2

Die Entleerung des Behälters kann kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgen. Für ein diskontinuierliches Entleeren des Silos kann dieses in einem dafür vorgesehenen Stahlrahmen eingesetzt und befestigt werden. Für diesen Vorgang wird die Gesamtkonstruktion einseitig durch einen Hydraulikzylinder angehoben. Alternativ kann das einseitige Anheben auch von einem Hallenkran ausgeführt werden. Der Plattenschieber wird geöffnet und das DRI rieselt aus dem Silo über eine Rutsche/Schurre in den EAF. Alternativ kann das DRI wieder in einen Vorratsbehälter über dem Elektrolichtbogenofen ausgetragen werden. In Abbildung 31 ist der diskontinuierliche Entladevorgang beispielhaft dargestellt.



Abbildung 31: Bildliche Darstellung des diskontinuierlichen Entladevorgang von Variante 4

9.3 Variante 3

In dieser Variante wurden ein Silo in einen 40 Fuß Containerstahlrahmen eingepasst. Das Silo liegt horizontal im Stahlrahmen. Nach dem Beladevorgang erfolgt die Inertisierung des Silos mit wieder mit wenigen Bar Überdruck. Bei diesem Konzept lag der Fokus auf einer maximalen Beladung pro Einheit. In Abbildung 32 ist der Behälter Variante 3 in isometrischer Darstellung ersichtlich.

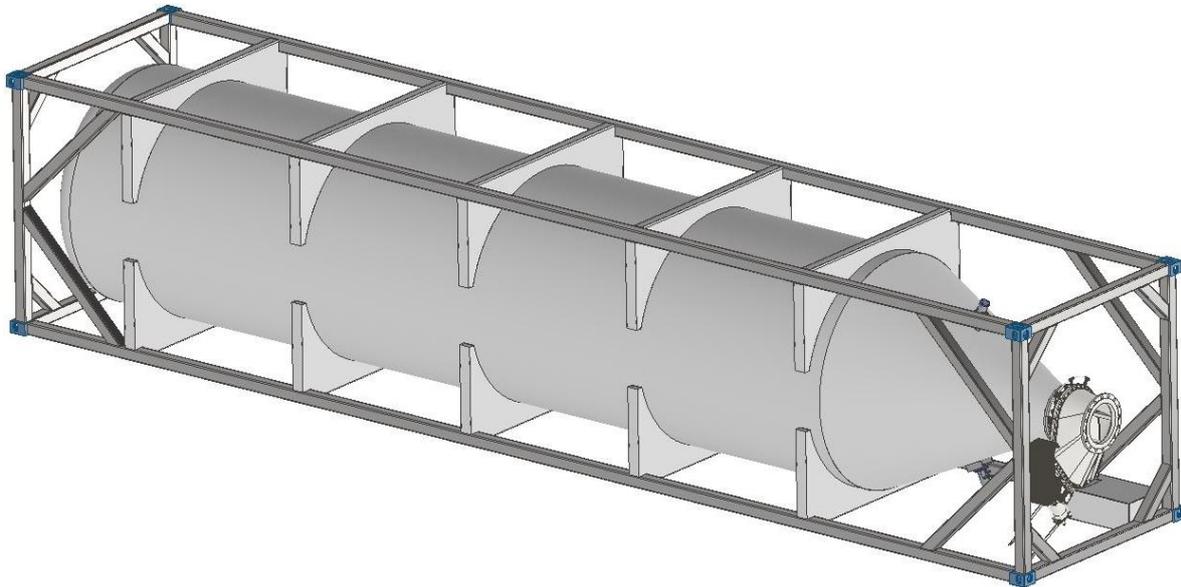


Abbildung 32: Isometrische Ansicht von Variante 2

Konzept	Masse Konstruktion [kg]	Füllmenge [m ³]	Füllgrad [%]	tatsächliche Füllmenge [m ³]	mittlere Dichte [kg/m ³]	Masse Transportgut [kg]	Masse gesamt [kg]
Variante 3	7.900	41,69	90,00	37,5	1.875	70.352	78.252

Tabelle 3: Daten zu Variante 3

Um einen sicheren Halt des Silos innerhalb des Stahlkonstruktes zu gewährleisten, wurden mehrere Verstärkungsrippen vorgesehen. Wie in der Variante zuvor bestehen diese aus gekanteten Stahlblechen in U-Form. Es wurde auf sicheren Halt in liegender Position geachtet, da das Silo die meiste Zeit des Transportes in horizontaler Lage verbringt. Für den Be- und Entladevorgang wird das Silo in eine aufrechte Position gebracht. Bei dieser Variante wird anstatt eines Plattenschiebers ein Schwenkschieber vorgesehen. Aufgrund der zentralen Position des Auslassstutzens ist nicht ausreichend Platz für einen Plattenschieber vorhanden. Der Schwenkschieber in gasdichter Ausführung ist für Schüttgüter geeignet. Der Schwenkschieber zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise aus. Gegenüber dem Plattenschieber baut dieser jedoch etwas höher. Am Konus des Silos befinden sich wie bei den zuvor genannten Konzepten zwei Vibratoren, welche den Materialfluss begünstigen sollen und um verklebtes DRI zu lockern.

Im Klörperboden befindet sich zentrisch ein DN400 Stutzen mit Druckverschluss zur Befüllung des Behälters. Bei diesem Konzept wurde wie in Variante 2 ein Druckverschluss mit Klappschrauben vorgesehen. Dies soll eine rasche Abnahme des Deckels gewährleisten. Im Deckel befindet sich eine integrierte Silikondichtung, um die Dichtheit gegenüber der Atmosphäre zu gewährleisten. Am Klörperboden finden sich, wie zuvor bei Variante 1, auch

hier wieder zwei weitere Stützen für die Installation von Überwachungskomponenten und Armaturen für die Inertisierung des Behälters.

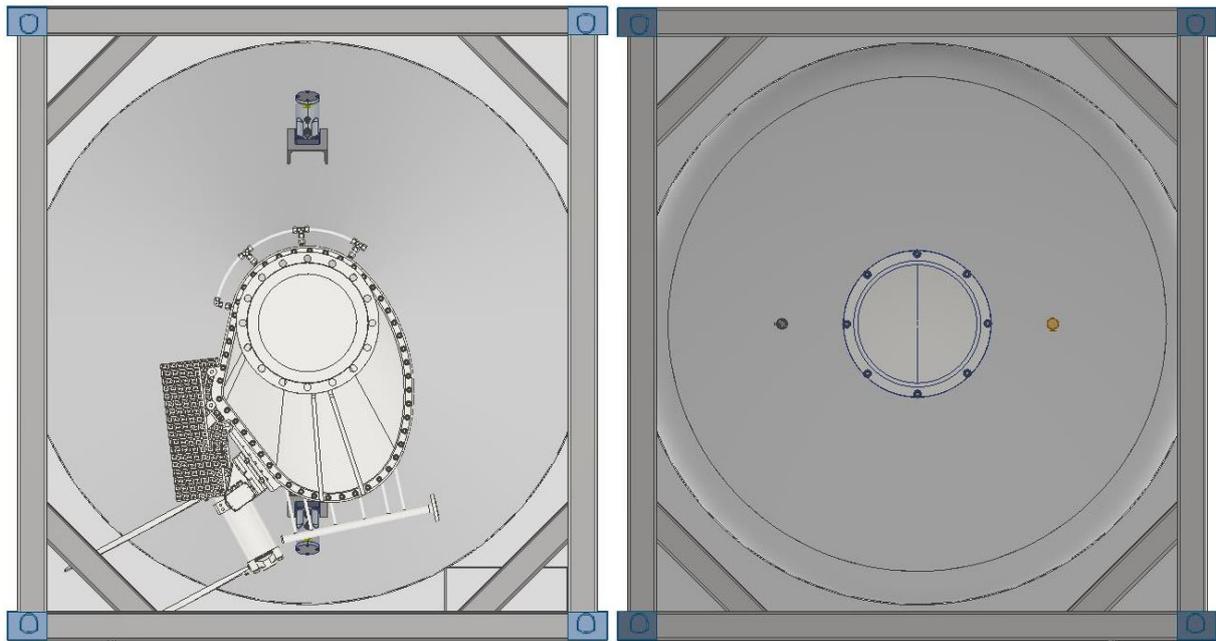


Abbildung 33: (links) Ansicht von Unten, (rechts) Ansicht von Oben auf den Klöpperboden

Der wesentliche Vorteil dieser Variante ist, dass mit diesem Behälter das meiste DRI pro Einheit transportiert werden kann. Der große Nachteil ist das Aufstellen des Behälters für die Beladung und Entleerung. Dies beansprucht zusätzliche Zeit und Aufwand beim Hersteller und Kunden. Weiters kann es beim Beladen des Behälters, aufgrund der großen Fallhöhe vom Einfüllstutzen bis zum Schwenkschieber, zu Materialbruch kommen. Hierfür müsste ein Falldämpfungs Vorrichtung zur Dämpfung des freien Falls für das Schüttgut vorgesehen werden.

Dadurch, dass dieser Behälter für die Entleerung in eine aufrechte Position gehoben werden muss, eignet sich diese Variante nur für eine kontinuierliche Beschickung eines Elektrolichtbogenofens. Hierbei wird das DRI aus dem Transportbehälter in einen Vorratsbunker über dem Elektrolichtbogenofen ausgetragen und anschließend nach Bedarf in diesen gefördert.

9.4 Varianten 4

Da in Variante 3 Bedenken hinsichtlich Materialbruch beim Beladevorgang bestehen, wurde in diesem Konzept das Silo aus der vorherigen Variante 3 auf 20 Fuß Containermaße verkleinert. Die isometrische Ansicht von Variante 4 ist in Abbildung 34 ersichtlich.

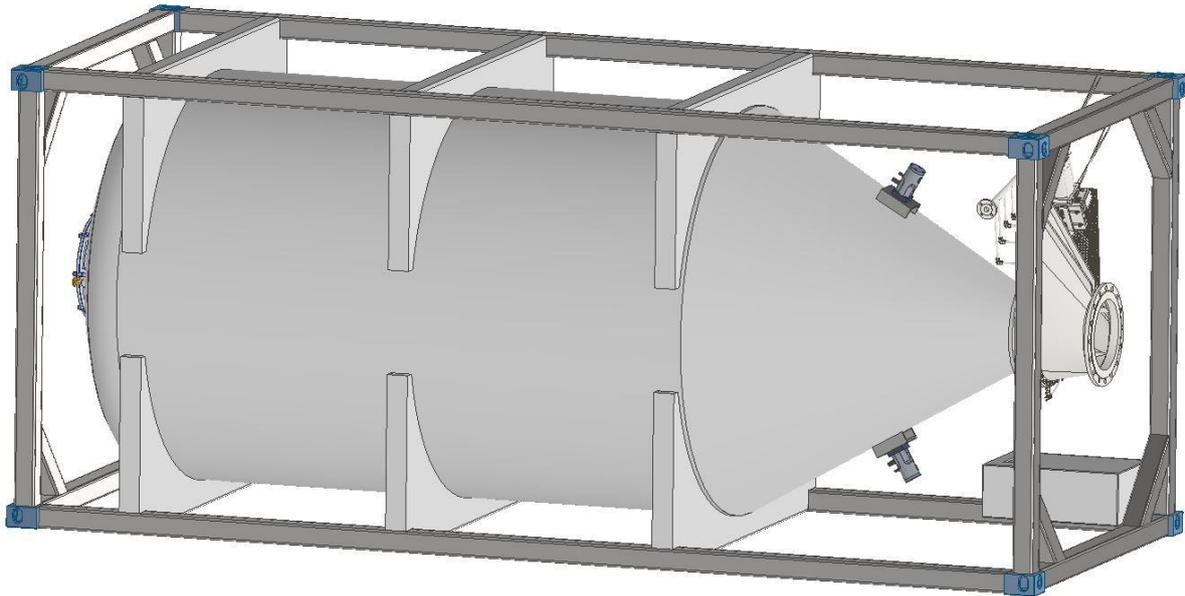


Abbildung 34: Isometrische Ansicht von Variante 3

Konzept	Masse Konstruktion [kg]	Füllmenge [m ³]	Füllgrad [%]	tatsächliche Füllmenge [m ³]	mittlere Dichte [kg/m ³]	Masse Transportgut [kg]	Masse gesamt [kg]
Variante 4	4.900	17,6	90,00	15,8	1.875	29.700	34.600

Tabelle 4: Daten zu Variante 4

Die Komponentenanzordnung dieser Variante ist ident zu jener in Variante 3. In Abbildung 33 ist der Klöpperboden mit dem Mannloch detaillierter ersichtlich. Der Druckdeckel mit Klappschrauben ist einfach im Aufbau. Die Verwendung von Klappschrauben ermöglicht eine einfache Abnahme des Deckels sowie eine einfache Zentrierung während der Montage. Durch den Klappmechanismus wird vermieden, dass Schrauben verloren gehen.

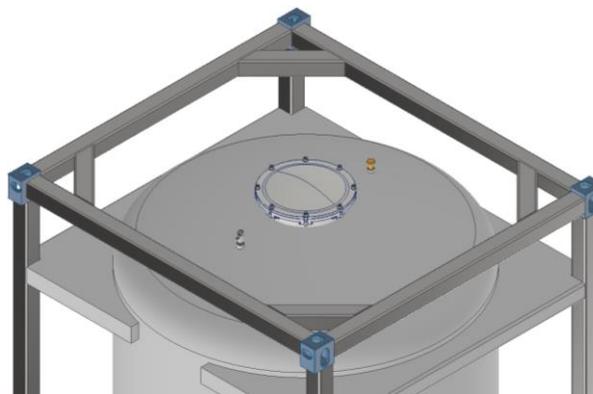


Abbildung 35: Isometrische Ansicht auf den Klöpperboden Variante 3

Dieses Konzept ist wie Variante 3 nur für eine kontinuierliche Beschickung in einen EAF geeignet.

9.5 Zusammenfassung der Transportkonzepte

Die vier Varianten wurde auf einem einfachen Standardtragwagen platziert, um den Transport auf der Schiene besser zu veranschaulichen. Der Schienentransport der einzelnen Konzepte ist in Abbildung 36 ersichtlich.

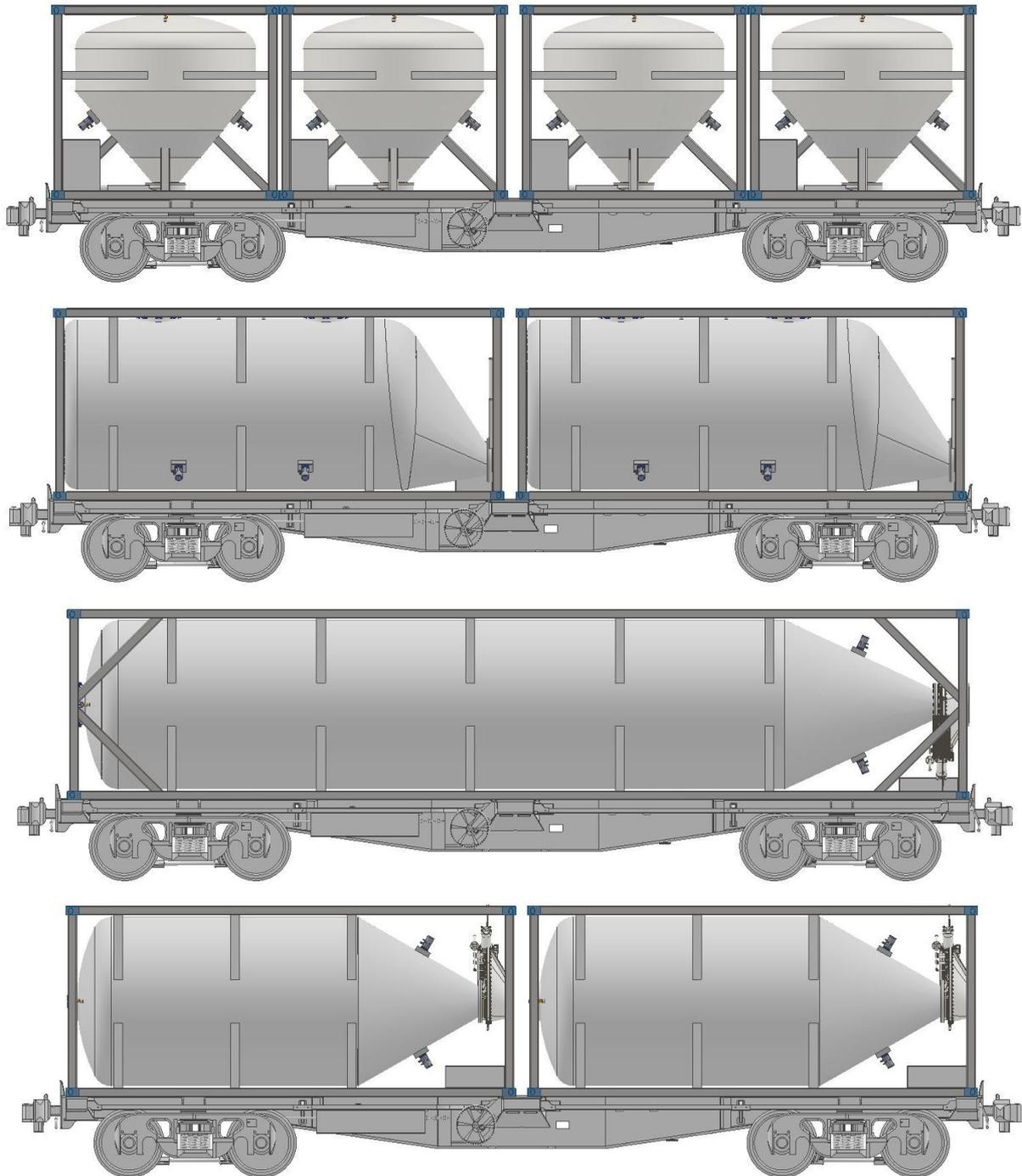


Abbildung 36: v. o. n. u. Variante 1, 2, 3 und 4 auf Tragwagen

Der Fokus bei der Erstellung der Konstruktionen liegt darauf, möglichst große Mengen DRI pro Einheit zu transportieren. Um die Umsetzung der einzelnen Konzepte vorab beurteilen zu können, wird deren Gesamtmasse herangezogen und mit den Tragfähigkeiten von Verkehrsmitteln für den Containerumschlag verglichen. Die Gesamtmasse setzt sich aus der Masse der Konstruktion und der Masse der Ladung zusammen. Für diese Berechnung der

Masse an DRI wurde die mittlere Dichte von DRI herangezogen und ein Füllgrad von 90% angenommen. In Tabelle 5 sind die Daten aller vier Transportkonzepte gesammelt dargestellt.

Konzept	Masse Konstruktion [kg]	Füllmenge [m ³]	Füllgrad [%]	tatsächliche Füllmenge [m ³]	mittlere Dichte [kg/m ³]	Masse Transportgut [kg]	Masse gesamt [kg]
Variante 1	3.500	6,0	90%	5,4	1.875	10.125	13.625
Variante 2	4.700	20	90%	18,0	1.875	33.750	38.450
Variante 3	7.900	41,69	90%	37,5	1.875	70.352	78.252
Variante 4	4.900	17,6	90%	15,8	1.875	29.700	34.600

Tabelle 5: Übersicht der Daten aller 4 Transportkonzepte

Der Umschlag von ISO Containern zwischen Schiff und Kai im Hafen erfolgt über Containerbrücken, welche eine Tragfähigkeit von bis zu 120t besitzen. Der Umschlag am Containerplatz erfolgt zumeist über Portalkränen mit einer Tragfähigkeit von ca. 41t. Die Manipulation der Container kann auch mittels Stapler erfolgen, welche Container quer über einem Greifarm aufnehmen und diese in weiterer Folge auf die verschiedenen Transportmittel umladen. Diese Stapler haben eine Tragfähigkeit von 20 bis 50t. Für den Transport und die Stapelung am Verladeplatz werden auch Portalstapler (Vancarrier) mit einer Nutzlast von 30t eingesetzt, welches dem maximalen Masse eines beladenen 20 oder 40 Fuß Containers entspricht. Eine Umsetzung von Variante 3 ist aus diesen umschlagtechnischen Gründen leider nicht realisierbar. [18]

Für den Schienenverkehr gilt eine maximale Nutzlast pro Tragwagen in Regelbauart mit vier Achsendrehgestellen von 140t. Aus dieser Sichtweise betrachtet wären alle vier Transportkonzepte realisierbar. [18]

Für Variante 3 gilt aus den oben genannten Gründen eine beschränkte Verwendbarkeit. Eine Diskrete Elemente Simulation ist aufwändig und zeitintensiv. Aus diesem Grund wurden Simulationen nur für jene Transportkonzepte aufgesetzt, welche auch für den Umschlag im Hafen geeignet sind, in diesem Fall für die Varianten 1, 2 und 3. Die Aufsetzung der Simulationen und deren Validierung wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

10 Diskrete Elemente Modellierung

Da DRI ein sehr abrasiv wirkendes Schüttgut ist, bietet es sich an, die Belastung auf die Behälterwände während des Be- und Entladevorgangs zu untersuchen. Um die Höhe der Belastung auf die Innenwand zu eruieren, wurde für jedes Silo eine Diskrete Elemente Methode (DEM) Simulation aufgesetzt. Die Diskrete Elemente Simulationen, welche dieser Arbeit zugrunde liegen, werden mit EDEM der Firma Altair Engineering Inc. durchgeführt. EDEM ist eine leistungsstarke Software für die Simulierung von Schüttgütern. Die 3D-Konstruktionen wurden in das Programm eingelesen und mit den unten genannten Parametern simuliert. Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt in Kapitel 11.

10.1 Definition der Geometrien

Für die Simulationsstudie werden sphärische Partikel mit gesperrter Rotationsfähigkeit verwendet. Durch das Sperren der Rotationsfähigkeit kann die Simulationszeit signifikant verkürzt werden, die Detailgenauigkeit wird dadurch nicht wesentlich beeinflusst. In den Simulationen wurden vier DRI Partikelgrößen definiert mit einem Radius von:

- $r_1 = 4\text{mm}$
- $r_2 = 10\text{mm}$
- $r_3 = 15\text{mm}$
- $r_4 = 20\text{mm}$

Für die Simulationen wird eine vordefinierte Korngrößenverteilung, wie sie in Tabelle 6 ersichtlich ist, implementiert.

Partikel	Massenanteil
DRI 4mm	10%
DRI 10mm	30%
DRI 15mm	30%
DRI 20mm	30%
Summe	100%

Tabelle 6: Korngrößenverteilung in den Simulationen

Die vier Silos werden im Zeichenprogramm jeweils im STEP-Format abgespeichert. Eine STEP-Datei ist eine 3D-Modelldatei in einem ISO-Standardaustauschformat. Es enthält dreidimensionale Daten in einem Format, das von mehreren Programmen erkannt wird und gilt als Standard für den Austausch von Produktdaten. In der Software EDEM können diese STEP-Dateien unkompliziert importiert und weiterverarbeitet werden.

10.2 Werkstoffe

Für jeden Partikel oder jede Geometrie, welche in der Simulation verwendet wird, muss ein bestimmtes Material sowie dessen Wechselwirkungen zugewiesen werden. Wechselwirkungen werden verwendet um zu definieren, wie sich Materialien verhalten wenn sie miteinander in Kontakt kommen. Diese Wechselwirkungen müssen für alle Materialien definiert werden, welche in der Simulation verwendet werden.

Die Behälter werden aus Stahl gefertigt. Für die Implementierung des Werkstoffs Stahl verlangt die Simulationssoftware keine für eine Stahllegierung spezifischen Daten. Lediglich die für Stahl typischen Kennwerte sind notwendig, um den Werkstoff in der Simulation

hinzuzufügen. In der Simulation treten Wechselwirkungen zwischen Stahl und DRI auf. In Abbildung 37 sind die Materialdaten für Stahl und dessen Wechselwirkungen mit DRI ersichtlich.

Stahl Properties	
Poisson's Ratio (ν):	0,25
Solids Density (ρ):	7850 kg/m ³
<input checked="" type="radio"/> Shear Modulus (G):	8,4e+10 Pa
<input type="radio"/> Young's Modulus (E):	2,1e+11 Pa
Interactions	
Interaction:	DRI
+ -	
Coefficient of Restitution:	0,5
Coefficient of Static Friction:	0,839
Coefficient of Rolling Friction:	0,01

Abbildung 37: Materialdaten Stahl

Für das Schüttgut DRI wurden ebenfalls Materialdaten der Simulation hinzugefügt. Da für DRI keine Daten vorliegen, werden die Materialdaten einer früheren Simulation mit Sinter herangezogen, da sich Sinter und DRI in vielerlei Hinsicht sehr ähnlich sind. Bei der Eingabe der Materialdaten für DRI ist darauf zu achten, dass es Wechselwirkungen zwischen DRI und Stahl als auch zwischen DRI und DRI gibt. In Abbildung 38 sind die Materialdaten für DRI mit den Wechselwirkungen zwischen DRI und Stahl abgebildet.

DRI Properties	
Poisson's Ratio (ν):	0,25
Solids Density (ρ):	3717 kg/m ³
<input checked="" type="radio"/> Shear Modulus (G):	5e+06 Pa
<input type="radio"/> Young's Modulus (E):	1,25e+07 Pa
Interactions	
Interaction:	Stahl
+ -	
Coefficient of Restitution:	0,5
Coefficient of Static Friction:	0,839
Coefficient of Rolling Friction:	0,01

Abbildung 38: Materialdaten DRI für Wechselwirkungen mit Stahl

In Abbildung 39 sind die Materialdaten für Wechselwirkungen zwischen DRI und DRI abgebildet.

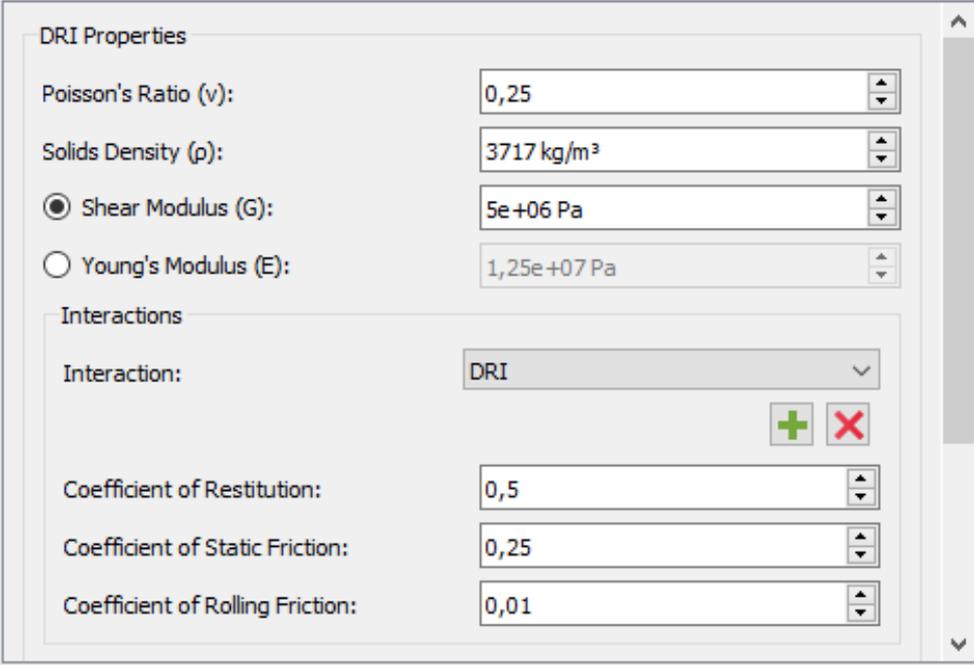


Abbildung 39: Materialdaten DRI für Wechselwirkungen mit DRI

Der Rollreibungskoeffizient spielt bei der Implementierung der Materialeigenschaften keine Rolle, da Partikel mit gesperrter Rollfähigkeit verwendet werden.

10.3 Kontaktmodelle

Das Kontaktmodell beschreibt in der DEM Simulation, wie sich Elemente verhalten, wenn sie miteinander in Kontakt kommen. Hierbei gilt zu unterscheiden zwischen Kontakt von Partikel und Partikel oder Partikel und Geometrie. [29]

Für die Interaktion zwischen den Partikeln wird das Hertz-Mindlin (no slip) und Standard Rolling Friction Kontaktmodell implementiert.

Das Basiskontaktmodell Hertz-Mindlin ist aufgrund seiner genauen und effizienten Kraftberechnung das Standardmodell, das bei DEM Simulationen verwendet wird. Bei diesem Modell basiert die Berechnung der Normalkraftkomponente auf der Hertz'schen Kontakttheorie und das Tangentialkraftmodell auf der Arbeit von Mindlin-Deresiewicz. Die tangentielle Reibungskraft folgt dem Modell des Coulomb-Reibungsgesetzes. Die Rollreibung wird als kontaktunabhängiges richtungsconstantes Drehmomentmodell implementiert. [29]

Die Standard Rolling Friction ist die Widerstandskraft, welche die Bewegung eines rollenden Objekts verlangsamt. Bei der Standard Rolling Friction wird die Rollreibung berücksichtigt, indem ein Drehmoment auf die Kontaktflächen aufgebracht wird. Pro Simulation kann nur ein Rollreibungsmodell hinzugefügt werden. In Abbildung 40 sind die physikalischen Kontaktmodelle für Interaktionen zwischen Partikel und Partikel abgebildet. [29]

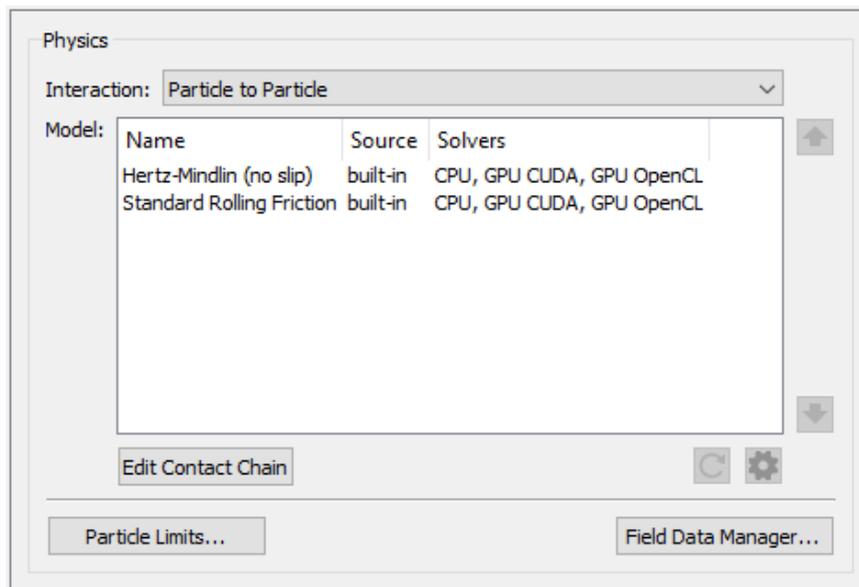


Abbildung 40: Physikalische Umgebung für Wechselwirkungen zwischen Partikel und Partikel

Für die Wechselwirkungen zwischen Partikel und Geometrie wurde zu den Kontaktmodellen Hertz-Mindlin und Standard Rolling Friction zusätzlich noch das Relative Wear Kontaktmodell implementiert.

Das Relative Wear Modell ist eine Möglichkeit, Bereiche mit hohem Aufprall (normal) und abrasivem (tangentialem) Verschleiß innerhalb einer Simulation zu identifizieren. Sie wird auf der Grundlage der Relativgeschwindigkeit und der damit verbundenen Kräfte zwischen dem Partikeln und der Ausrüstung berechnet. Dieses Modell stellt dem Benutzer Daten zur Verfügung, um Regionen anzugeben, in denen Verschleiß stattfindet. [29]

Während es quantitative Werte für den Vergleich zwischen zwei oder mehr Konstruktionsiterationen liefert, bestimmt es keine explizite Materialabtragsrate. Die in den Simulationen implementierten Kontaktmodelle für Wechselwirkungen zwischen Partikel und Geometrie sind in Abbildung 41 ersichtlich. [29]

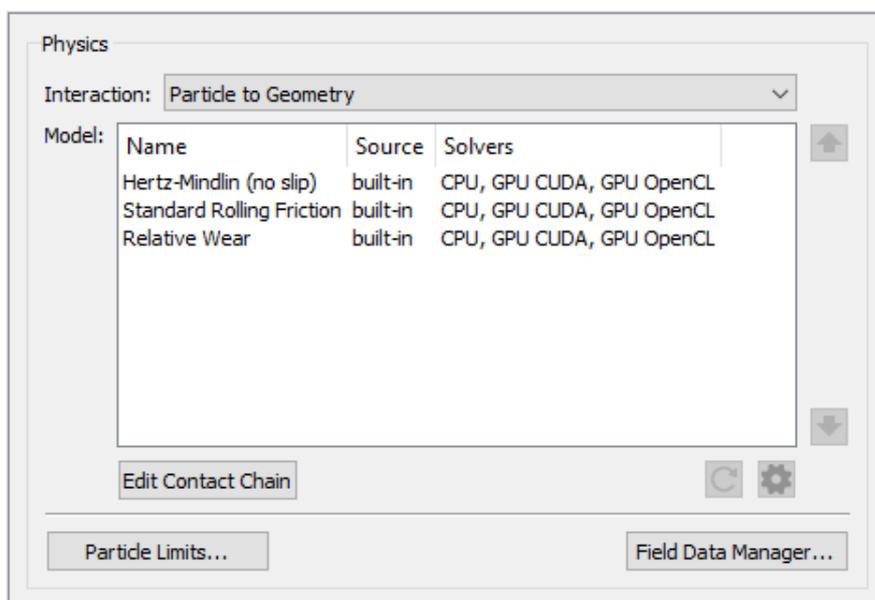


Abbildung 41: Physikalische Umgebung für Wechselwirkungen zwischen Partikel und Geometrie

10.4 Berechnungsparameter

Der Zeitschritt ist die Zeitspanne zwischen den Iterationen (Berechnungen) im Simulator. Der Zeitschritt bleibt während der gesamten Simulation konstant. Der Zeitschritt kann als tatsächlicher Zeitschritt (in Sekunden) als auch als Prozentsatz des Rayleigh Zeitschritt definiert werden.

Der Rayleigh Zeitschritt ist die Zeit die eine Scherwelle benötigt um sich durch ein festes Teilchen auszubreiten. In einer Simulation mit unterschiedlichen Partikelgrößen wird der Raleigh Zeitschritt basierend auf dem kleinsten Partikel berechnet. Je kleiner der Zeitschritt definiert wird umso mehr Datenpunkte werden erzeugt. Eine große Anzahl an Datenpunkten liefert akkurate Ergebnisse mit einem sehr feinen Detaillierungsgrad. Die Simulationszeit verlängert sich jedoch mit zunehmenden Detaillierungsgrad, aufgrund des erhöhten Berechnungsaufwands. [29]

Für die Simulation in dieser Arbeit wird der Rayleigh Zeitschritt von 20% gewählt. Dies bedeutet eine Zeitintervall von 0,00037349s. So soll eine möglichst schnelle Rechenzeit bei ausreichender Detailgenauigkeit erreicht werden.

Um große Simulationen mit Millionen von Partikeln in überschaubarer Zeit simulieren zu können gibt es eine Reihe an „Solvem“, welche in EDEM gewählt werden können. EDEM ermöglicht es Benutzern, ihre Simulationen mit der Graphical Processing Unit (GPU) auszuführen. Dies bedeutet, dass große Simulationen schneller ausgeführt werden können. Alternativ kann die Simulation allein auf der Central Processing Unit (CPU) berechnet werden. Die GPU- und Multi-GPU-Solver sind vollständig doppelt präzise, um die Genauigkeit zu gewährleisten und wurden auf OpenCL entwickelt, um Benutzern zusätzliche Flexibilität zu bieten. Um die Berechnung weiter zu beschleunigen kann ein GPU-CUDA Solver-Präzisionsmodi verwendet werden. Durch die Gleitkommadarstellung kann die Rechenzeit nochmals optimiert werden. [29]

Für die Berechnung der Konzepte, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen, wurden GPU-CUDA und GPU-OpenCL Solver verwendet. Dadurch soll eine schnelle und präzise Auswertung ermöglicht werden.

10.5 Simulationsergebnisse

Die Diskrete Elemente Methode eignet sich hervorragend, um die Wechselwirkung von Schüttgütern und Komponenten zu modellieren und so Verschleißbereiche vorherzusagen. Für die Validierung der Konzepte liefert das Relative Wear Kontaktmodell vier verschleißrelevante Parameter. Die vier relevanten Verschleißparameter sind normale kumulative Kontaktenergie, tangentielle kumulative Kontaktenergie, normale kumulative Kraft und tangentielle kumulative Kraft. Die Normal- und Tangentialenergien messen die kumulative Energie aufgrund des Materialaufpralls bzw. -gleitens pro Flächenelement.

Gleitverschleiß tritt auf, wenn Partikel über Geometrieoberflächen gleiten. Diese Verschleißart wird in dieser Arbeit mittels der tangentialen kumulativen Kontaktenergie validiert.

Prallverschleiß tritt auf, wenn Partikel auf Geometrieoberflächen auftreffen. Diese Verschleißart wird in dieser Arbeit mittels der normalen kumulativen Kontaktenergie validiert.

Für den Abfragetyp wurde der Maximalwert herangezogen. Dieser liefert den maximalen Wert des Attributs über alle Elemente des ausgewählten Typs für jeden Zeitschritt im definierten Bereich. Um eine zulässige Validierung der Ergebnisse zu erhalten ist es essenziell, dass alle Konstruktionen mit ident großen Flächenelemente vernetzt werden. Die in dieser Arbeit gewählte Vernetzung der Behälter erfolgt mit Elementen von 100mm Seitenlänge.

Im nachfolgenden Kapitel 11 werden die Simulationsergebnisse präsentiert.

11 Ergebnisse und Diskussion

Für die Simulation der Behälter wurden die in Kapitel 10 erwähnten Parameter herangezogen. Die Rechenzeit sowie die Entleer-, Befüll- und gesamt Simulationszeit der verschiedenen Konzepte ist in Tabelle 7 ersichtlich.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Rechenzeit [h]	16,8	83,1	-	118,3
Beladezeit [s]	95	100	-	155
Entladezeit [s]	56	155	-	120
Gesamte Simulationszeit [s]	156	255	-	275

Tabelle 7: Rechen- und Simulationszeiten der Varianten 1 bis 4

Als Orientierung für die Bewertung der Simulationsergebnisse diene der Artikel von Hossein Madadi Najafabadi et al. [30], dieser klassifiziert Verschleißschäden durch Partikel in zwei Arten. Schäden durch Gleit- und Rollkontakt von Partikeln (Abrasion) und Verschleißschäden durch Stöße. Diese beiden Kriterien werden ebenfalls zur Bewertung in dieser Arbeit herangezogen. Repräsentativ für den Prallverschleiß ist die normale kumulative Kontaktenergie, für den Gleitverschleiß die tangentielle kumulative Kontaktenergie.

1.1 Variante 1

Die normale kumulative Kontaktenergie konzentriert sich vorwiegend auf den konischen Teil des Behälters. Im Zylindermantel finden sich einzelne Elemente mit hoher Belastung. Dies kann auf abprallendes Material während des Füllvorgangs oder auf numerische Rechenfehler zurückgeführt werden. In Abbildung 42 ist das DEM Simulationsergebnis für die normale kumulative Kontaktenergie von Behälter 1 ersichtlich.

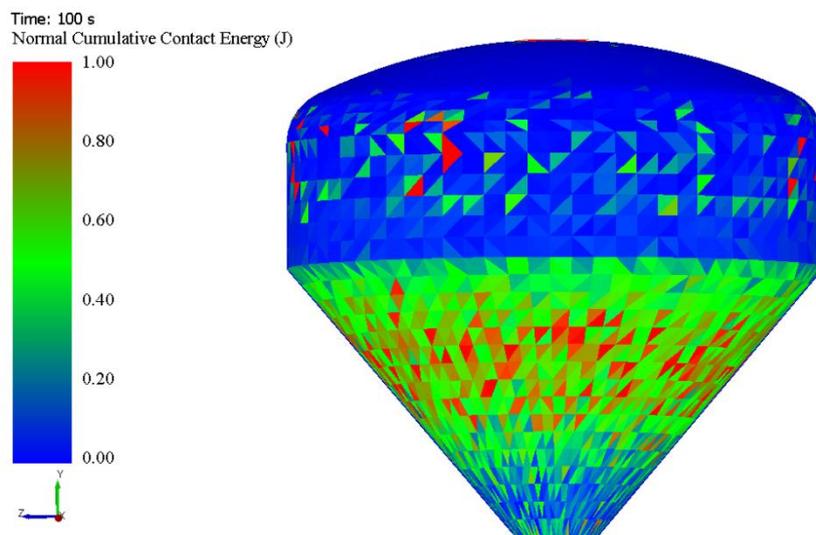


Abbildung 42: DEM Simulationsergebnis Behälter 1 der normalen kumulativen Kontaktenergie

Die tangentielle kumulative Kontaktenergie beschreibt den Verschleiß von Oberflächen aufgrund von darüber gleitendem Material. Durch den Entladevorgang reibt das Schüttgut an Zylinder und Konus, weshalb sich dieses Belastungsmuster gleichmäßiger auf die Innenfläche des Behälters verteilt. In Abbildung 43 ist das DEM Simulationsergebnis der tangentialen kumulativen Kontaktenergie von Behälter 1 dargestellt.

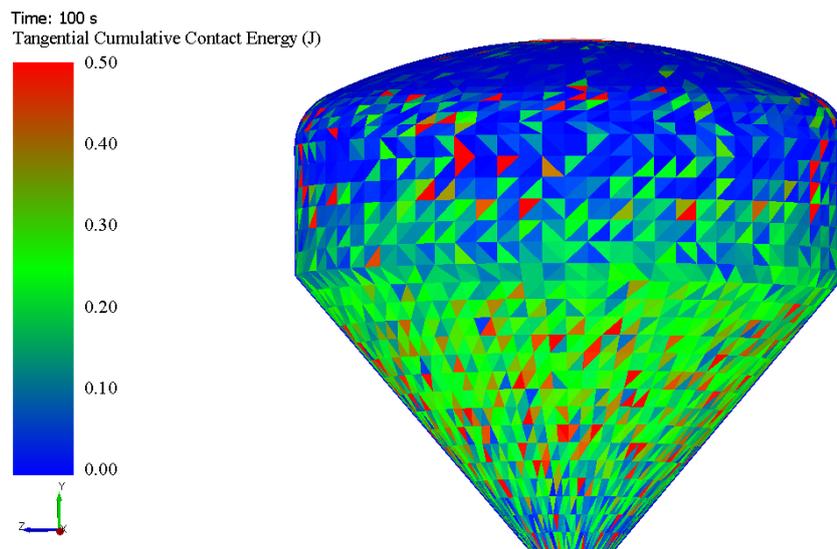


Abbildung 43: DEM Simulationsergebnis Behälter 1 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie

Die maximalen Werte für eine Be- und Entladevorgang wurden für die normale und tangentiale kumulative Kontaktenergie aus der Simulation exportiert, ausgewertet und in Abbildung 44 graphisch dargestellt:

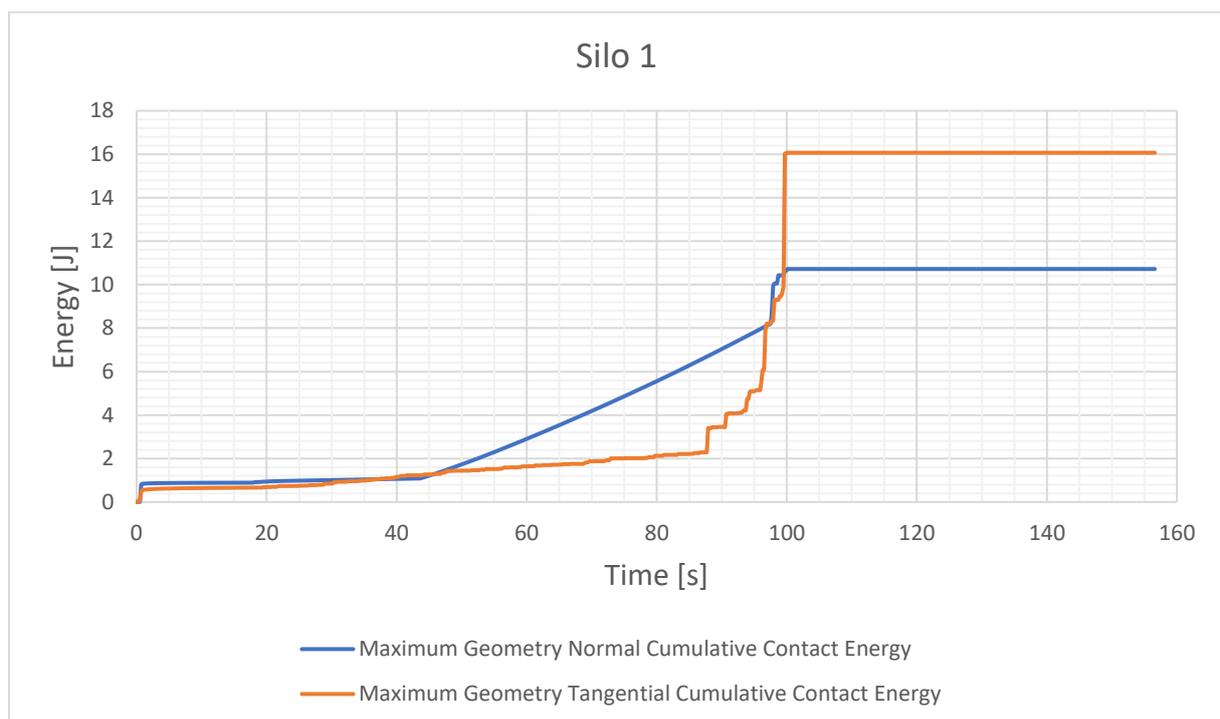


Abbildung 44: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 1

1.2 Variante 2

Wie in Abbildung 45 ersichtlich, fokussiert sich die normale kumulative Kontaktenergie in diesem Konzept auf den Bereich direkt unter den beiden Füllstutzen. Diese hohe Belastung durch Prallverschleiß lässt sich durch den lang anhaltenden Füllstrom begründen. Es entwickelt sich nicht, wie bei dem Varianten 1 und 4, rasch eine dämpfende Masse an Schüttgut unterhalb des Füllstutzen. Die Belastung auf die übrigen Bereiche des Silos fällt

vergleichsweise sehr gering aus. Vereinzelt finden sich Elemente mit etwas höherer Belastung. Diese Interferenzen sind jedoch auf numerische Rechenfehler zurückzuführen.

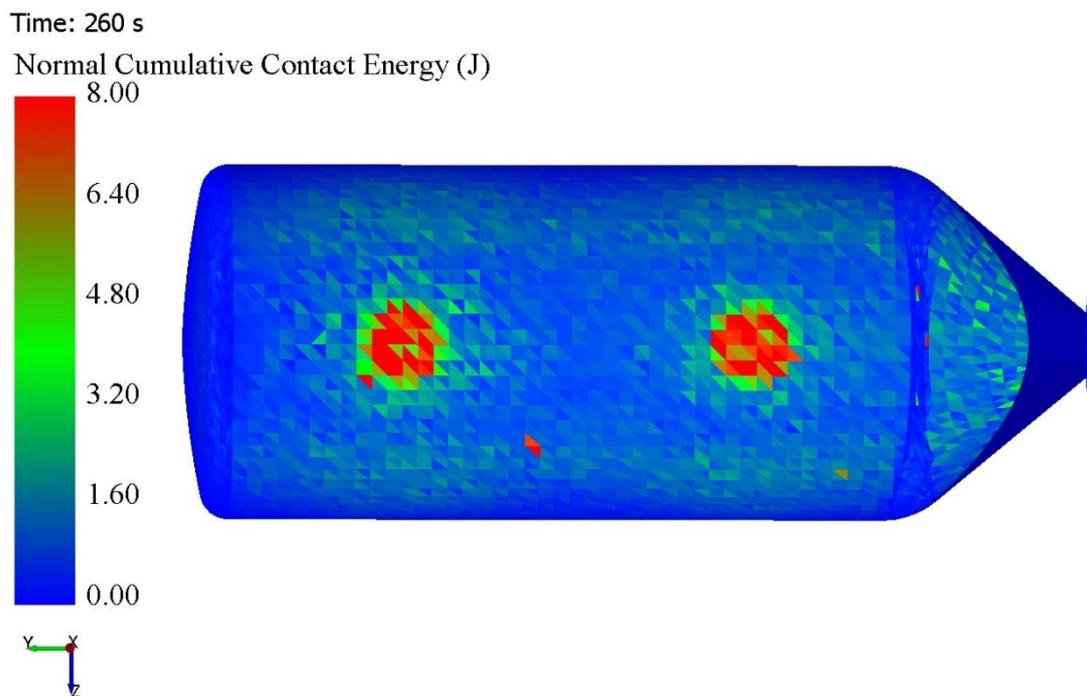


Abbildung 45: DEM Simulationsergebnis Behälter 2 der normalen kumulativen Kontaktenergie

Wie in Abbildung 46 ersichtlich verteilt sich der Gleitverschleiß über die gesamte untere Siloinnenwand. Die Belastung konzentriert sich mehr in Richtung der Entladeseite des Silos. Hohe Belastungen finden sich im exzentrischen Konus und im Bereich der Auslassöffnung. Dies begründet sich dadurch, dass durch das einseitige Anheben während des Entladevorgangs viel Material über die gesamte Innenwand der Mantelunterseite gleitet.

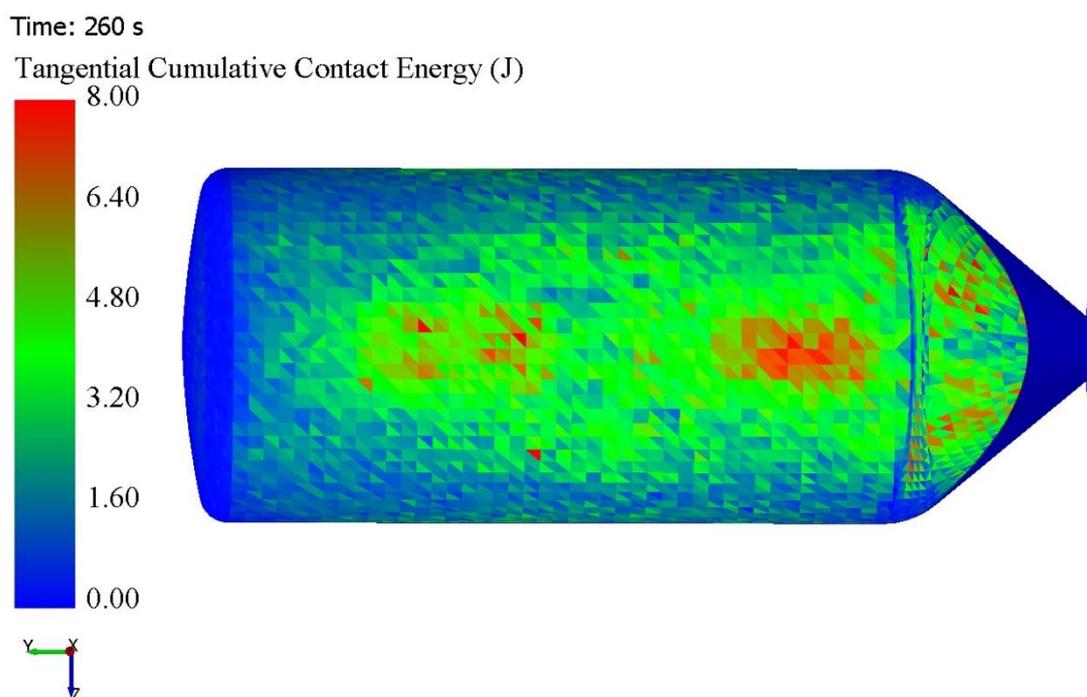


Abbildung 46: DEM Simulationsergebnis Behälter 2 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie

Die maximalen Werte je Zeitschritt wurden für die normale und tangentielle kumulative Kontaktenergie aus der Simulation exportiert. Die grafische Auswertung eines Be- und Entladevorgangs ist in Abbildung 47 dargestellt:

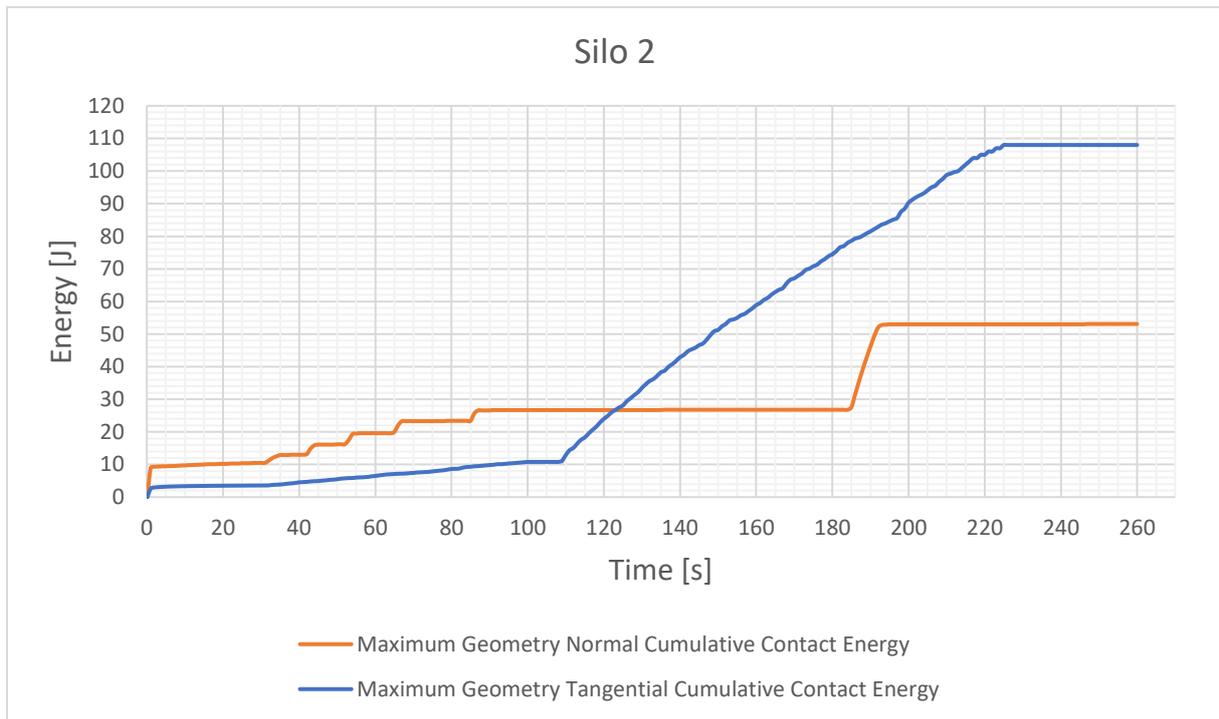


Abbildung 47: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 2

1.3 Variante 4

In Variante 4 finden sich aufgrund der hohen Fallhöhe während des Beladevorgangs Prallverschleißerscheinungen vorwiegend im konischen Teil des Silos. Die höchsten Belastungen finden sich am Ende des Konusses in der Nähe der Auslassöffnung (siehe Abb. 48).

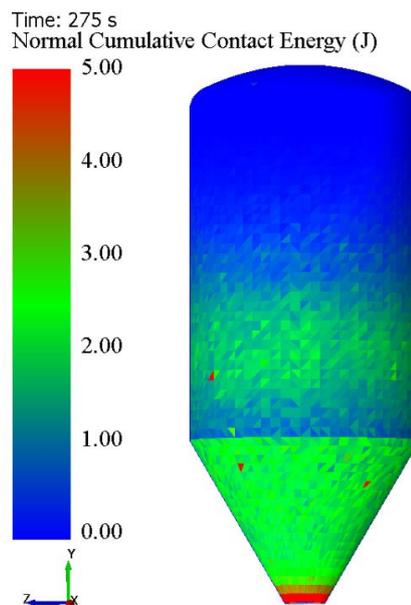


Abbildung 48: DEM Simulationsergebnis Behälter 4 der normalen kumulativen Kontaktenergie

Während des Entladevorgangs gleitet viel Material entlang des Mantels und Konusses. Die Belastungen durch Gleitverschleiß auf den Silomantel fällt vergleichsweise gering aus. Die höchste Belastung wirkt auf die Trichterwand in unmittelbarer Umgebung der Auslassöffnung (siehe Abb. 49).

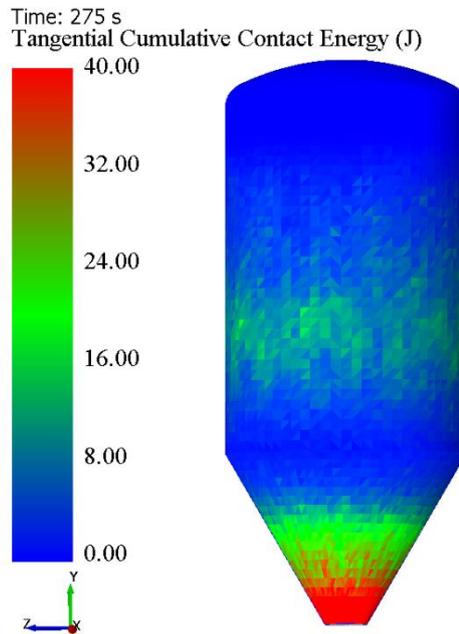


Abbildung 49: DEM Simulationsergebnis Behälter 4 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie

Die für den Gleit- und Prallverschleiß indikativen Parameter wurden für einen Be- und Entladevorgang aus der Simulation exportiert und verarbeitet. Der Verlauf der beiden Energien ist in Abbildung 50 graphisch dargestellt:

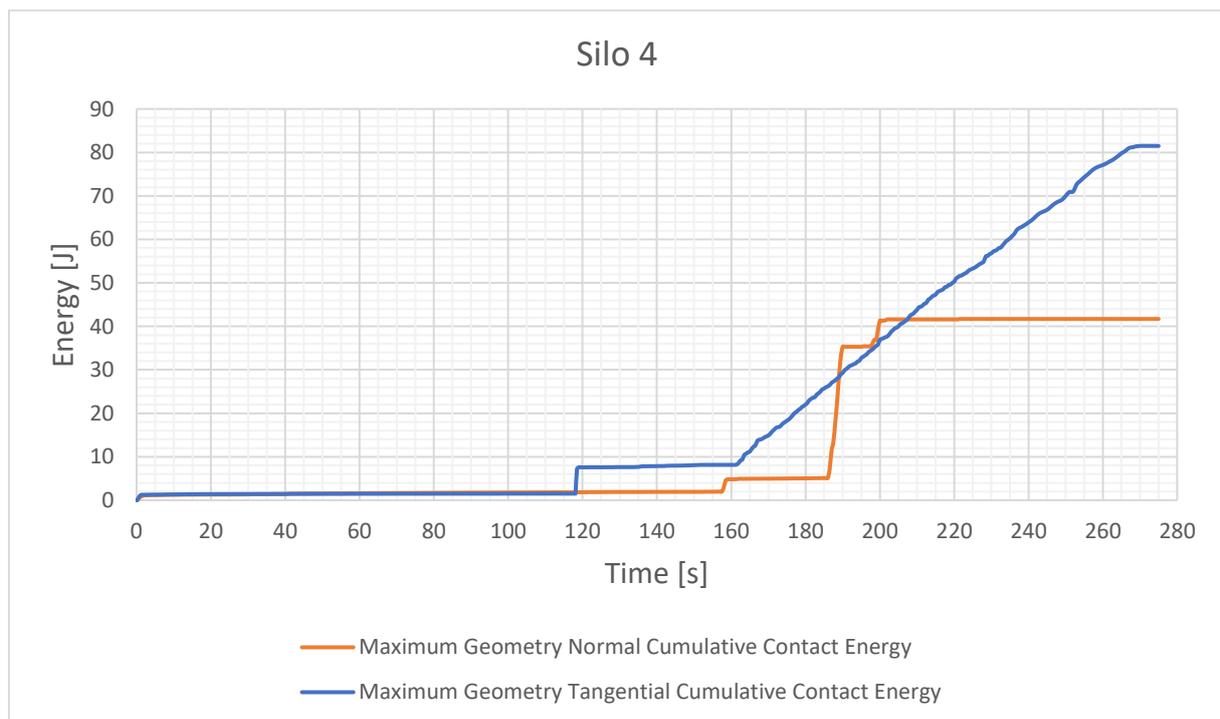


Abbildung 50: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 4

Zur qualitativen Bewertung der Modelle wurde die maximale normale und tangentielle kumulative Kontaktenergie herangezogen. Um die Belastung der Behälter zu beurteilen, müssen diese äquivalent zueinander sein. Da die Silos unterschiedliche Füllmengen besitzen ist eine Betrachtung für einen einzelnen Be- und Entladevorgang der unterschiedlichen Behälter nicht aussagekräftig. Um einen zulässigen Vergleich zu erstellen, wird deshalb jeder Behälter mit identem Massenäquivalent an DRI be- und entladen. Behälter 4 weist das größte Ladevolumen in der Simulation auf, weshalb diese Masse als Referenz genommen wurde. Für die übrigen Silos ergeben sich folgende Faktoren :

- Variante 1: *4,48 Massenäquivalent
- Variante 2: *1,35 Massenäquivalent

Die maximale normale kumulative Kontaktenergie wird für die Beurteilung des Prallverschleißes herangezogen. Dieser tritt auf, wenn Partikel auf Oberflächen aufprallen. Im Wesentlichen tritt dieses Verschleißmuster während der Befüllung auf. Zum Beispiel wenn der Materialstrom auf den noch leeren Silotrichter trifft. Eine Verringerung des Prallverschleißes kann durch eine geringere Füllhöhe oder eine Falldämpfeinrichtung erreicht werden. In Abbildung 51 sind die Simulationsdaten der normalen kumulativen Kontaktenergie für die Behälter 1, 2 und 4 ersichtlich.

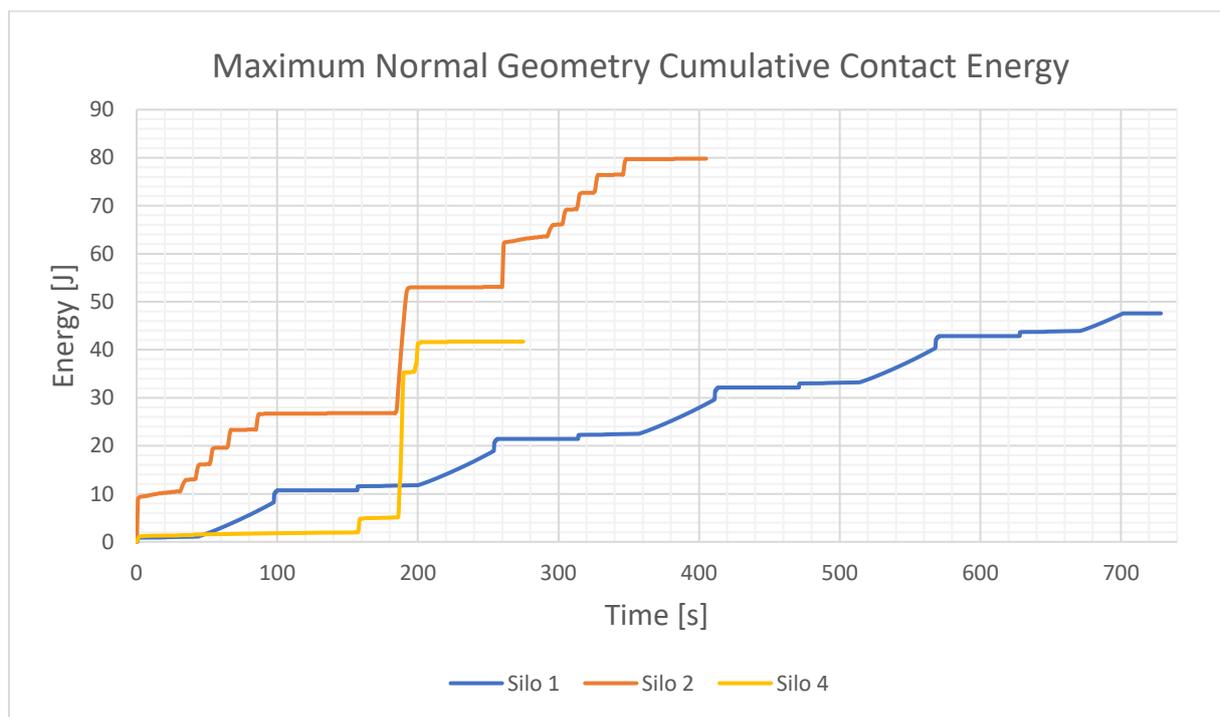


Abbildung 51: Diagramm maximale normale kumulative Kontaktenergie

Für die Beurteilung des Gleitverschleißes wird die maximale tangentielle kumulative Kontaktenergie herangezogen. Diese tritt auf, wenn Partikel über Oberflächen gleiten. Während des Entladevorgangs ist die höchste abrasive Belastung zu erwarten, da das Material in Richtung der Auslassöffnung fließt. Die Kontaktenergie hängt maßgeblich von der Reibung zwischen Schüttgut und Behälterwand ab. Durch die Auswahl einer geeigneten Auskleidung oder Verschleißschutzmaterials kann ein gutes Fließverhalten bei niedrigem Verschleiß verbunden werden. In Abbildung 52 sind die Simulationsdaten der tangentialen kumulativen Kontaktenergie für die Behälter 1, 2 und 4 abgebildet.

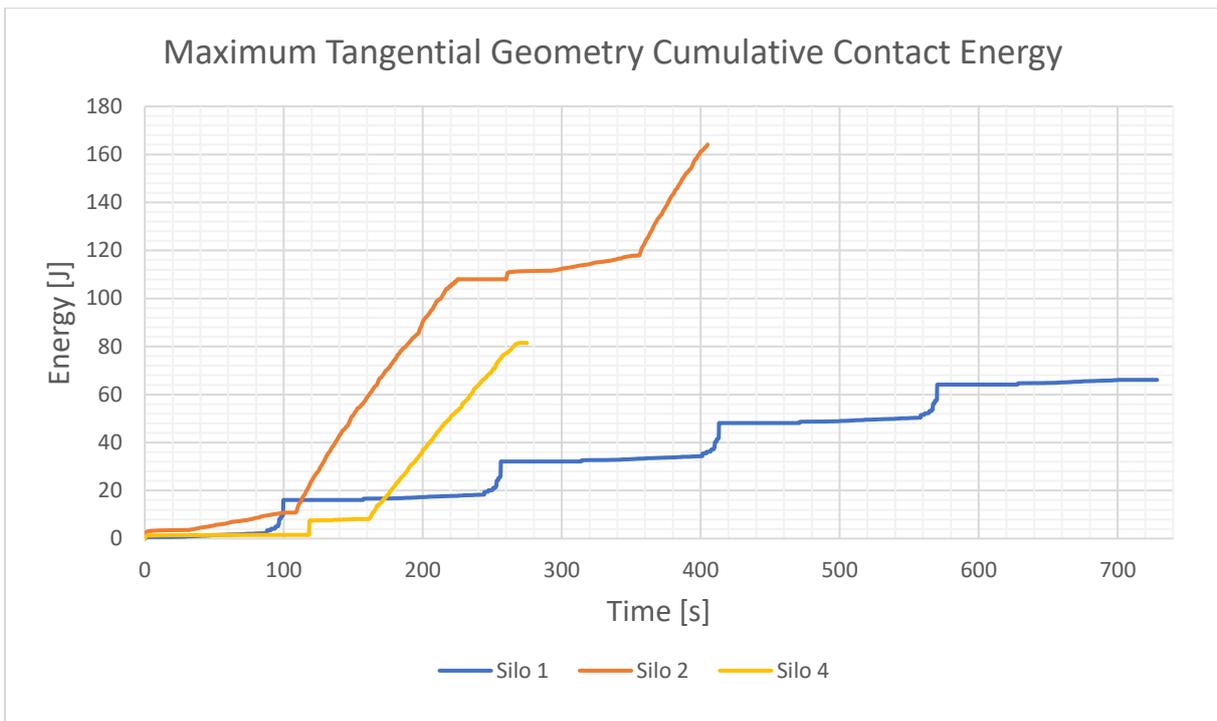


Abbildung 52: Diagramm maximale tangentielle kumulative Kontaktenergie

Um die Belastungen auf das Transportgut zu beurteilen, wurde die maximale Druckkraft auf die Partikel herangezogen (siehe Abb. 53). Zu Beginn der Befüllung steigt die Belastung auf die Partikel aufgrund der hohen Fallhöhe stark an und pendelt sich nach wenigen Sekunden ein. Im weiteren Verlauf steigt die Partikelbelastung erneut an, da sich die Partikel unter großen Spannungen relativ zueinander bewegen. Für die Evaluierung wurde jeweils ein einzelner Be- und Entladevorgang betrachtet. Ein identes Massenäquivalent ist bei dieser Beurteilung nicht notwendig.

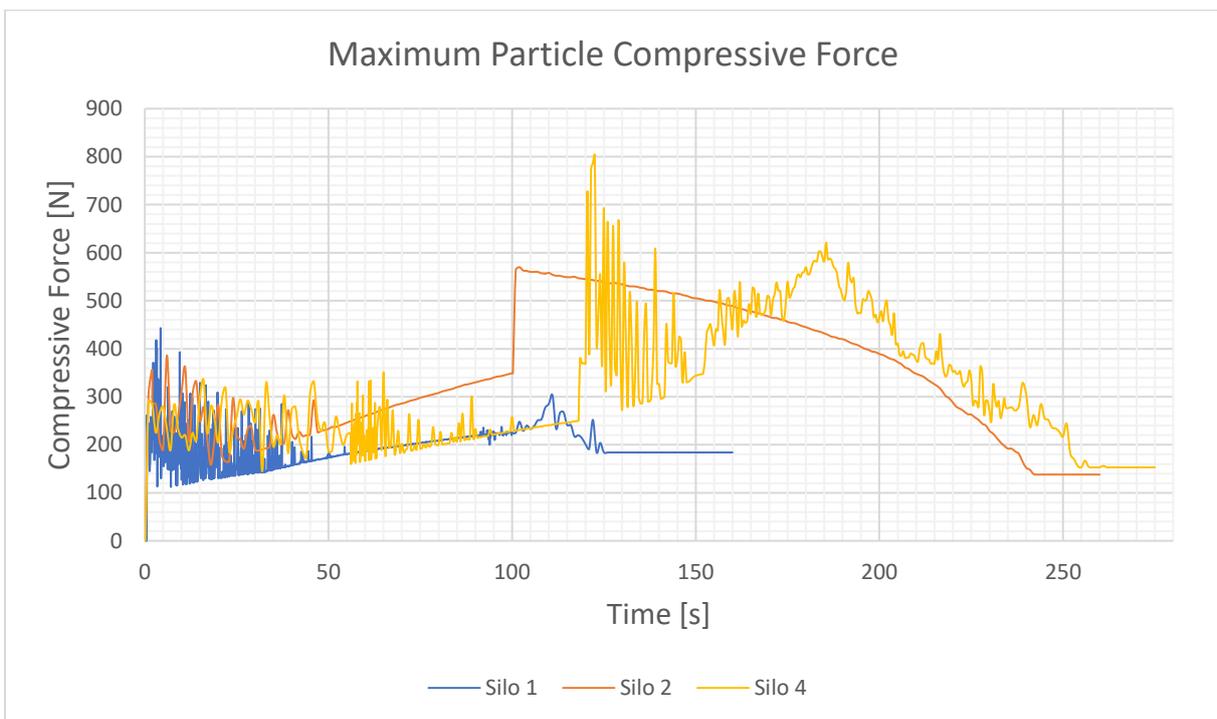


Abbildung 53: Diagramm der maximalen Partikel Druckkraft

Hinsichtlich des Prallverschleißes ist Silo 4 die günstigste Variante. Zu Beginn des Beladevorgangs wirken hohe Aufprallkräfte. Nach wenigen Sekunden Füllzeit hat sich eine dämpfende Schüttgutmasse im Konus gebildet welche die Kräfte durch den anhaltenden Materialstrom dämpft. Dies wirkt sich hinsichtlich des Prallverschleißes günstig auf dieses Konzept aus.

Die abrasiven Gleitverschleißerscheinungen fallen bei Silo 1 am geringsten aus. Durch seine geringe Füllmenge wirken die Reibkräfte der Partikel nicht so stark auf die Behälterwände wie vergleichsweise bei den übrigen Konzepten.

Über den Zeitraum eines Be- und Entladevorgangs betrachtet ist die Belastung auf die Partikel bei Konzept 1 am geringsten. Dies ist bedingt durch die vergleichsweise geringe Höhe während des Beladevorgangs.

In Kapitel 12 erfolgt der Fazit und Ausblick.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Transportmöglichkeiten von DRI zu erfassen und zu dokumentieren. Anschließend sollte ein Transportkonzept für den Schienenverkehr ausgearbeitet werden. Grundsätzlich gilt es zu erwähnen, dass es die ökonomischste und energetisch günstigste Variante ist, eine DR-Anlage direkt an ein Stahlschmelzwerk anzubinden, wodurch die thermische Energie des HDRI zurückgewonnen und das Endprodukt anschließend weitertransportiert werden kann. Weltweit ist der Produktionsanteil von kaltem DRI am höchsten, weshalb es von großer Bedeutung ist, dieses sicher und effizient über große Distanzen zu transportieren. DRI wird vorrangig in Ländern mit einem hohen Erdgasvorkommen produziert, weshalb es effizient und geschützt vor Umwelteinflüssen nach Europa transportiert werden soll, um den heimischen Bedarf an alternativen Eisenträgern zu decken. Für den Transport von CDRI wurden in dieser Arbeit vier Konzepte ausgearbeitet, von denen drei in die engere Wahl für eine weitere Untersuchung kamen. DEM Simulationen wurden aufgesetzt, um Aufschluss über den Verschleiß der Behälter zu geben. Nach dieser ersten Studie wäre nun der nächste Schritt die Anfertigung eines Prototypen sowie weitere Untersuchungen im Labor, um zu überprüfen, ob die Simulationsergebnisse den tatsächlichen Werten entsprechen.

Zur Bewertung, welches Transportkonzept am ehesten für weitere Untersuchungen heranzuziehen ist, wurden den einzelnen Konzepten Schulnoten gegeben. Als Bewertungskriterium wurde der Gleit- und Prallverschleiß, die Partikelbelastung und das Ladevolumen herangezogen. Die Notenvergabe ist in Tabelle 8 ersichtlich.

Konzept	Prallverschleiß	Gleitverschleiß	Partikelbelastung	Ladevolumen	Summe	Note
Variante 1	2	1	1	3	7	2
Variante 2	3	3	3	2	11	3
Variante 4	1	2	2	1	6	1

Tabelle 8: Bewertung der Transportkonzepte

Aus dieser Bewertung geht hervor, dass Konzept 4 in Anbetracht der oben genannten Kriterien die Schulnote eins bekäme und dementsprechend am ehesten für weitere Untersuchungen heranzuziehen wäre. Eine nähere Betrachtung von Variante 1 wäre ebenfalls interessant, da der Unterschied zu Konzept 4 marginal ist. Konzept 1 ist in Hinblick auf den Verschleiß das günstigste Modell. Silo 4 sticht durch sein hohes Ladevolumen hervor, jedoch ist die abrasive Belastung örtlich stark fokussiert, was zu hohen Verschleißerscheinungen führen könnte.

Die durchgeführten Simulationen liefern Werte für die normale und tangential kumulative Kontaktenergie. Um diese Werte für ein geeignetes Verschleißverhalten bzw. Lebensdauervorhersage zu verwenden, müssten Versuche an realen Materialien und Behältern durchgeführt werden. Mit den Daten aus den Versuchen und Simulationen könnte dann eine akkurate Abschätzung über die Lebensdauer der Silos berechnet werden.

Um den Abrieb zu vermindern und die Lebensdauer der Silos zu erhöhen, müssten die Behälter mit einer Verschleißschicht ausgestattet werden, welche in erster Linie den Grundwerkstoff vor Abrieb schützen und den Materialfluss begünstigen soll. Zudem soll eine einfache Instandsetzung dieser Schicht möglich sein. Ein wesentlicher Parameter für die Wahl

der Verschleißschuttschicht ist die Reibung zwischen dem im Silo gelagerten Schüttgut und der Silowand. Um das Wandreibungsverhalten zu optimieren, werden vielfach Auskleidungen aus Stahl, Kunststoff oder Keramik eingesetzt. Nach aktueller Recherche und Gesprächen mit Herstellern kommen als Verschleißschicht folgende Konzepte in Frage: [31]

- Anbringen von Hardox oder CDP® 1001 Verschleißplatten
- Vollständige Imprägnierung der Silowand mit einem aushärtenden Kunststoff (Polyurea, Polyurethan, Sikagard®, etc.)
- Aufbringen einer hochfesten Verschleißschicht durch thermisches Spritzen.

Eine geeignete Wahl des Verschleißschutzes kann das Fließverhalten und den Verschleißschutz des Silos wesentlich optimieren. Bezüglich einer Beschichtung der Innenwand mit einem Kunststoff bestehen Bedenken hinsichtlich der Standzeit der Auskleidung, da Kunststoffe eine geringere Oberflächenhärte als metallische Werkstoffe haben. Eine dämpfende Kunststoffschicht könnte jedoch positive Auswirkungen auf den Verschleiß und Materialfluss haben. Eine alternative wäre die Anwendung von faserverstärkten Metallen (Metal Matrix Composites, MMC) oder keramischen Faserverbundwerkstoffen (Ceramic Matrix Composites, CMC), welche durch thermisches Spritzen aufgebracht werden. Die hohen Preise dieser Werkstoffe könnten diesen als Verschleißschutz ausscheiden lassen. Welche Beschichtung für die vorliegende Belastung am besten geeignet ist, wäre ebenfalls Gegenstand weiterer Untersuchungen. [31]

Im Zuge der Literaturrecherche für die vorliegende Masterarbeit konnten keine Materialdaten für DRI aufgefunden werden. Um das Be- und Entladen der Behälter hinsichtlich Materialbruch besser zu validieren, wären diese Daten dringend notwendig, um das Fließprofil und den damit verbundenen Verschleiß nochmals besser zu beurteilen.

Die Silos, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen sind auf Kernfluss ausgelegt. Kernfluss ist dadurch gekennzeichnet, dass kein Fließen entlang der Silowand auftritt. Dadurch ist weniger Verschleiß an der Innenwand des Behälters während des Entladevorgangs zu erwarten. Bei Massenfluss finden Bewegungen entlang der Behälterwand statt, wodurch es bei einem abrasiven Schüttgut zu Abrieb an der Innenwand kommen kann. Dennoch sind die Gleitverschleißerscheinungen höher als die durch den Füllstrom hervorgerufenen Prallverschleißerscheinungen. Kernfluss ist mit Nachteilen verbunden, da sich tote Zonen verfestigen können. Um dies zu vermeiden, wurden die Vibratoren am Konus vorgesehen, sodass eine aufwändige manuelle Entleerung möglichst entfällt. Gegebenenfalls wären geringe Anpassungen des Konusses nötig. [31] [32]

Eine Reduzierung des Silodurchmessers vermindert die Belastung auf die Silowand. Der Effekt eines kleineren Silodurchmessers lässt sich mit einem Entleerungsrohr erzielen. Dieses Rohr wird zentrisch oberhalb der Auslassöffnung angeordnet. Entlang des Rohrs befinden sich in unterschiedlichen Höhen mehrere Öffnungen. Aus diesen Öffnungen kann das Schüttgut während des Be- und Entladevorgangs nachfließen. Die prinzipielle Funktion eines Entleerungsrohrs ist in Abbildung 54 ersichtlich. [31] [32]

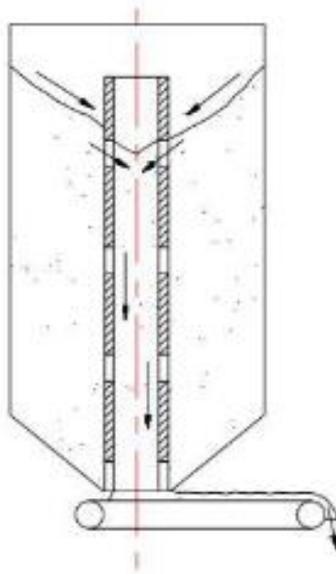


Abbildung 54: Prinzipielle Funktion eines Entleerungsrohrs [31]

Die Beanspruchung der Partikel fällt bei Kernflusssilos, je nach Ausbildung der Fließzone, eher ungünstig aus. Um die Partikelbelastung während des Beladevorgangs, das Aufprallen aus großer Fallhöhe, zu minimieren, können verschiedene Systeme vorgesehen werden: [32]

- Leitern System
- Wendelrutsche
- Kaskaden System

Ob eines dieser Systeme baulich möglich ist und ob dessen Verwendung zu einer Verbesserung der Verschleißerscheinungen oder der Partikelbelastungen führt, wäre ebenfalls Gegenstand weiterer Untersuchungen.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Midrex Technologies Inc., 2020 World Direct Reduction Statistics, 14 09 2021. [Online]. Available: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbookprint-2020.Final_.pdf. [Zugriff am 17 04 2022].
- [2] S. Sarna, „www.ispatguru.com,“ 14 12 2013. [Online]. Available: <https://www.ispatguru.com/discharge-options-for-direct-reduced-iron-and-its-hot-transport/>. [Zugriff am 05 05 2022].
- [3] P. Krenn, Eisenherstellung aus Eisenkarbonat – vom Stand der Technik zur Zukunftstechnologie, Technischen Universität Graz: Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, 2017.
- [4] H. Sikovc, Bestimmung der Reduktionseigenschaften von HCl (Hot compacted iron) bei verschiedenen Versuchsbedingungen, Montanuniversität Leoben: Lehrstuhl für Metallurgie, 2012.
- [5] International Iron Metallics Association, Direct Reduced Iron (DRI): Guide to Shipping, Handling and Storage, 04 2022. [Online]. Available: <https://www.metallics.org/assets/files/Public-Area/Guides/IIMA-DRI-Guide-2022.pdf>. [Zugriff am 25 05 2022].
- [6] R. Vetter, Fachkunde Metall, Europalehrmittel, ISBN: 978-3-8085-1290-6, 2017.
- [7] S. S. AbdElmomen, „Reoxidation of direct reduced iron in ambient air,“ *Ironmaking & Steelmaking*, pp. 107-111, 06 12 2013.
- [8] Aumund Fördertechnik GmbH, Conveying and Cooling in the Iron and Steel Industry, 2019. [Online]. Available: https://aumund.com/wp-content/uploads/2020/08/AUMUND_Conveying-and-Cooling-in-the-Iron-and-Steel-Industry.pdf. [Zugriff am 05 05 2022].
- [9] W. Schütze, Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG, HBI – Hot Briquetting of Direct Reduced Iron, [Online]. Available: https://www.koeppern-international.com/fileadmin/user_upload/downloads/Briquetting/Brochure_HBI_-_Hot_Briquetting_of_Direct_Reduced_Iron.pdf. [Zugriff am 26 05 2022].
- [10] International Iron Metallics Association, Hot Briquetted Iron (HBI): A Guide to Shipping, Handling and Storage, 05 2020. [Online]. Available: https://www.metallics.org/assets/files/Public-Area/Guides/HBI_Guide_Amendment1May20.pdf. [Zugriff am 26 05 2022].
- [11] D. Pauluzzi und P. Duarte, „Premium Quality DRI Products from ENERGIRON,“ [Online]. Available: <https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2019/07/Premium-Quality-DRI-Products-from-ENERGIRON.pdf>. [Zugriff am 07 05 2022].
- [12] Midrex Technologies Inc., HOTLINK® System, 08 2014. [Online]. Available: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot_Transport_-_HOTLINK.pdf. [Zugriff am 05 05 2022].

- [13] D. Yazir, „Selection of an Inert Gas System for the Transportation of Direct Reduced Iron,“ *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-15, 16 11 2021.
- [14] Aumund Fördertechnik GmbH, Pan Conveyors, 2019. [Online]. Available: https://aumund.com/wp-content/uploads/2020/08/AUMUND_Pan-Conveyors.pdf. [Zugriff am 05 05 2022].
- [15] Beumer Group GmbH & Co. KG, Wirtschaftliche Lösung für die Zementindustrie, 03 2019. [Online]. Available: <https://www.beumergroup.com/app/uploads/2019/03/BEUMER-Zementindustrie.pdf>. [Zugriff am 01 06 2022].
- [16] S. Höcht, „Logistikkompodium Technische Universität München,“ 19 12 2020. [Online]. Available: <https://wiki.tum.de/display/logistikkompodium/Becherwerk>. [Zugriff am 02 06 2022].
- [17] L. Ruge, Bachelorthesis Förderprozesstechniken der Zementindustrie, Hamburg: Hamburg University of Applied Science, 2012.
- [18] H. Martin, Transport- und Lagerlogistik, Hamburg: ISBN: 978-3-658-03142-8, 2013.
- [19] Midrex Technologies Inc., Hot Transport Vessel (HTV) System, 08 2014. [Online]. Available: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot_Transport_-_HTV.pdf. [Zugriff am 05 05 2022].
- [20] D. Ilic, „Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes,“ *Wear*, Nr. 202986, pp. 434-435, 15.09.2019.
- [21] ContiTech AG, „CONTI® PIPE Conveyor Belts,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.continental-industry.com/getmedia/7672bdb4-5b4a-4445-9dcc-05595af76ca5/CBG9016-En-Conti-Pipe.pdf>. [Zugriff am 13 10 2022].
- [22] H. Susanne, „Logistikkompodium Technische Universität München,“ 16 12 2020. [Online]. Available: <https://wiki.tum.de/pages/viewpage.action?pageId=283772976>. [Zugriff am 13 10 2022].
- [23] J. Friess, Interviewee, *Transport DRI*. [Interview]. 20 05 2022.
- [24] R. Schachermayer, Interviewee, *Schienentransport DRI*. [Interview]. 20 05 2022.
- [25] Deutsche Flagge, „Schüttgüter (IMSBC),“ Bundesministerium für Digitales und Verkehr der Bundesrepublik Deutschland, [Online]. Available: <https://www.deutsche-flagge.de/de/sicherheit/ladung/imsbc/imsbc#:~:text=Die%20Abk%C3%BCrzung%20IMSBC%20steht%20f%C3%BCr,Januar%202011%20verbindlich%20vorgeschrieben..> [Zugriff am 09 06 2022].
- [26] A. Sharma, „www.marinegyaan.com,“ 12 08 2016. [Online]. Available: <https://www.pinterest.co.uk/pin/845621267502571763/>. [Zugriff am 02 08 2022].
- [27] Tecoveritas, Crash course MRV carbon trading & ship energy efficiency module IV, [Online]. Available: <https://www.tecoveritas.net/wp-content/uploads/2018/03/Module-IV.pdf>. [Zugriff am 02 08 2022].

- [28] Omega Air d.o.o. Ljubljana, Nitrogen and Oxygen generators, [Online]. Available: <https://www.omega-air.si/products/generator-stations>. [Zugriff am 02 08 2022].
- [29] „EDEM 2022 User Guide,“ Altair Engineering Inc., 1986-2022. [Online]. Available: <https://2022.help.altair.com/2022.1/EDEM/#t=IPRN.htm>. [Zugriff am 09 10 2022].
- [30] A. Hossein Madadi Najafabadi, „Analysis of abrasive damage of iron ore pellets,“ *Powder Technology 331*, pp. 20-27, 25 02 2018.
- [31] H. Heinrici, „Schüttgut portal,“ 03 03 2021. [Online]. Available: <https://www.schuettgut-portal.com/fachbeitrag/30159/verschleisschutz-bei-der-verfahrenstechnischen-auslegung-silo-anlagen.html>. [Zugriff am 20 10 2022].
- [32] G. Gustaf, Mechanical characterization and modelling of iron ore pellets, Universitetsyckeriet Luleå: ISBN: 978-91-7439-435-1, 2012.

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltweite Verteilung der Produktion von DRI [1].....	7
Abbildung 2: Fließschema einer MIDREX®-Anlage [3].....	9
Abbildung 3: Skizze eines Elektrolichtbogenofens (EAF) [6].....	11
Abbildung 4: Direct Reduced Iron Pellets [5].....	12
Abbildung 5: Mikrofotographie der topochemischen Struktur eines teilweise reoxidierten DRI-Pellets [7]	12
Abbildung 6: Vergleich der Struktur eines DRI-Pellet (links) und HBI (rechts) [9].....	14
Abbildung 7: Fließbild einer Heißbrikkettier-Anlage [9].....	14
Abbildung 8: Diagramm für die Energieeinsparung und den Elektrodenverbrauch in Abhängigkeit von der Beschickungstemperatur von DRI in einem EAF [2].....	15
Abbildung 9: Prozessschema des HYTEMP®-Systems [11]	16
Abbildung 10: allgemeines Fließschema des HOTLINK®-Systems [2].....	17
Abbildung 11: Allgemeines Fließschema des HTC-Systems (links), Beispiel für einen Stahlzellenförderer (rechts) [2].....	18
Abbildung 12: Stahlplattenband mit Stegblechen (links), Transport von Zementklinker (rechts) [14].....	19
Abbildung 13: Schema eines Trogplattenband [14].....	19
Abbildung 14: Prinzipzeichnung eines Becherwerks [18]	20
Abbildung 15: Fließbild des HTV-Systems (links) [2], Bild eines HTV-Behälters (rechts) [19]	21
Abbildung 16: Fotocollage verschiedenster Fördersystem für den Transport und Umschlag von DRI [5]	22
Abbildung 17: Schema eines Rohrgurtförderers [21]	24
Abbildung 18: (links) Querschnitt eines Rohrgurtförderer, (rechts) Ober- und Untertrum eines Rohrgurtförderers [21].....	25
Abbildung 19: Schema eines Rohrgurtförderers für Förderung im Ober- und Untertrum [22]	26
Abbildung 20: Lagersilos für DRI [5].....	27
Abbildung 21: Entfernung von heißem Material aus dem Schüttkegel [5]	29
Abbildung 22: Fließbild des Inertgas Systems (IGS) [26]	33
Abbildung 23: Fließbild des Inertgas Generators (IGG) [27].....	33
Abbildung 24: Fließbild eines Druckwechsel Absorbers mit zwei Adsorptionstürmen [28].....	34
Abbildung 25: Isometrische Ansicht von Variante 1.....	36
Abbildung 26: Aufriss der Variante 1	37
Abbildung 27: (links) Ansicht von Unten mit Plattenschieber,(rechts) Ansicht von Oben auf den Klöpperboden mit Verschlussdeckel und den zwei Anschlussstützen	38
Abbildung 28: Isometrische Ansicht des Zusammenbaus zweier 10 Fuß Einheiten zu einer 20 Fuß Einheit	38
Abbildung 29: Isometrische Ansicht von Variante 2.....	39
Abbildung 30: Seitenansicht der Variante 2	40
Abbildung 31: Bildliche Darstellung des diskontinuierlichen Entladungsvorgang von Variante 4	40
Abbildung 32: Isometrische Ansicht von Variante 2.....	41
Abbildung 33: (links) Ansicht von Unten, (rechts) Ansicht von Oben auf den Klöpperboden	42
Abbildung 34: Isometrische Ansicht von Variante 3.....	43
Abbildung 35: Isometrische Ansicht auf den Klöpperboden Variante 3	43
Abbildung 36: v. o. n. u. Variante 1, 2, 3 und 4 auf Tragwagen	44
Abbildung 37: Materialdaten Stahl.....	47
Abbildung 38: Materialdaten DRI für Wechselwirkungen mit Stahl	47
Abbildung 39: Materialdaten DRI für Wechselwirkungen mit DRI	48
Abbildung 40: Physikalische Umgebung für Wechselwirkungen zwischen Partikel und Partikel.....	49
Abbildung 41: Physikalische Umgebung für Wechselwirkungen zwischen Partikel und Geometrie	49
Abbildung 42: DEM Simulationsergebnis Behälter 1 der normalen kumulativen Kontaktenergie.....	52
Abbildung 43: DEM Simulationsergebnis Behälter 1 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie.....	53
Abbildung 44: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 1.....	53
Abbildung 45: DEM Simulationsergebnis Behälter 2 der normalen kumulativen Kontaktenergie.....	54
Abbildung 46: DEM Simulationsergebnis Behälter 2 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie.....	54
Abbildung 47: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 2.....	55

Abbildung 48: DEM Simulationsergebnis Behälter 4 der normalen kumulativen Kontaktenergie 55

Abbildung 49: DEM Simulationsergebnis Behälter 4 der tangentialen kumulativen Kontaktenergie 56

Abbildung 50: Diagramm der Simulationsergebnisse Behälter 4 56

Abbildung 51: Diagramm maximale normale kumulative Kontaktenergie 57

Abbildung 52: Diagramm maximale tangentielle kumulative Kontaktenergie 58

Abbildung 53: Diagramm der maximalen Partikel Druckkraft 58

Abbildung 54: Prinzipielle Funktion eines Entleerungsrohrs [31] 62

15 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Daten zu Variante 1</i>	36
<i>Tabelle 2: Daten zu Variante 2</i>	39
<i>Tabelle 3: Daten zu Variante 3</i>	41
<i>Tabelle 4: Daten zu Variante 4</i>	43
<i>Tabelle 5: Übersicht der Daten aller 4 Transportkonzepte</i>	45
<i>Tabelle 6: Korngrößenverteilung in den Simulationen</i>	46
<i>Tabelle 7: Rechen- und Simulationszeiten der Varianten 1 bis 4</i>	52
<i>Tabelle 8: Bewertung der Transportkonzepte</i>	60

16 Nomenklatur und verwendete Abkürzungen

Symbol	Einheit	Beschreibung
DRI	-	Direct Reduced Iron, direkt reduziertes Eisen, Eisenschwamm
CDRI	-	Cold Direct Reduced Iron, kaltes direkt reduziertes Eisen
HDRI	-	Hot Direct Reduced Iron, heißes direkt reduziertes Eisen
HBI	-	Hot Briquetted Iron, heiß brikettiertes Eisen
EAF	-	Electric Arc Furnace, Elektro-Lichtbogenofen
DR-Anlage		Direkt-Reduktions-Anlage
DEM	-	Diskrete Elemente Methode
GPU	-	Graphical Processing Unit
CPU	-	Central Processing Unit
MMC	-	Metal Matrix Composite
CMC	-	Ceramic Matrix Composite