



DIPLOMARBEIT

Simulation von Bunkeraustragschnecken mit Diskreter Elemente Methode (DEM)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Hoffmann

E 307

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing. Roland E. Winkler

Verfahrenstechnik E 734

Heiligenstädter Straße 80/3/1

1190 Wien

Wien, am

Unterschrift

Kurzfassung

Zu Beginn der Arbeit wird generell auf Bunkeraustragschnecken eingegangen, beziehungsweise werden ihre vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und Anwendungen aufgezeigt.

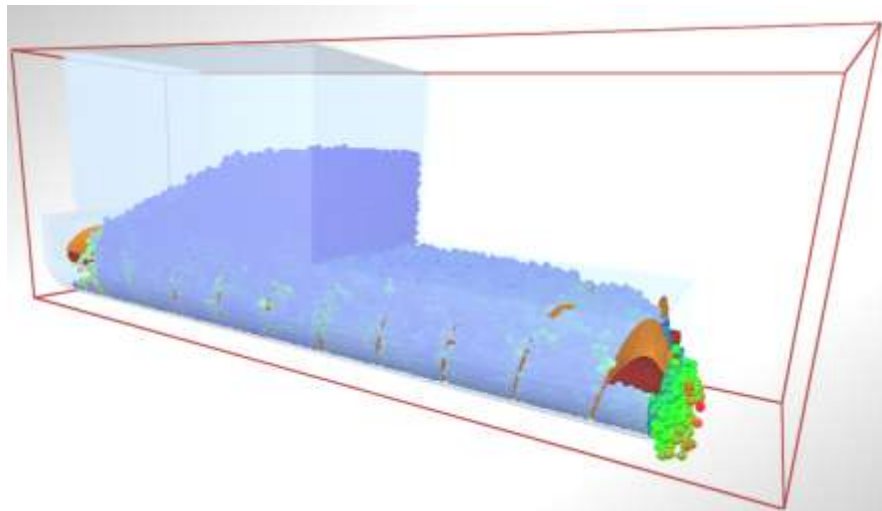
Ein Berechnungsverfahren für Schüttgutbewegungen, Diskrete Elemente Methode (DEM) genannt, wird vorgestellt und weiters ihr prinzipieller Ablaufzyklus erklärt.

Im nächsten Kapitel werden die Grundlagen der Auslegung von Bunkeraustragschnecken nach DIN 15262 beleuchtet.

Daran schließt die strukturierte Aufarbeitung der für die Simulation mittels Diskreter Elemente Methode zugrunde liegenden Ansätze.

Der folgende Schritt beinhaltet die Modellierung eines Schneckenförderers samt Bunkeraustragvorgang, durchgeführt mit einer DEM-Simulationssoftware. Zur Simulationsdatenspeicherung wird im Modell eine Abfrage eingebaut mit der Parameter des Partikelflusses rechentechnisch aufgezeichnet werden können.

Die generierten Simulationsergebnisse werden mit jenen von bereits vorliegenden Werten, welche an einem realen Versuchsstand gemessen wurden, sowie theoretischen Berechnungen verglichen und in weiterer Folge interpretiert.



Danksagung

Herzlich bedanken möchte ich mich bei allen, die mir im Laufe der Arbeit zur Seite gestanden sind. Im Speziellen danke ich meinem Betreuer, Herrn Univ.Prof. Hoffmann. Sein positives Wirken und sein Vertrauensvorschuss haben mich stark geprägt.

Herr Univ.Ass. Decker hat ebenfalls dazu beigetragen, dass diese Diplomarbeit erfolgreich verlaufen ist.

Erwähnt seien auch die Herren Ljuboja und Pantic für Ihre gute Kooperation hinsichtlich der Software Implementierung.

Meiner Familie

INHALTSVERZEICHNIS

1	<i>Einleitung.....</i>	1
2	<i>Einsatz und Anwendungen von Bunkeraustragschnecken.....</i>	4
2.1	Schneckenförderer	4
2.2	Vor- und Nachteile von Schneckenförderer	5
2.3	Horizontaler Schneckenförderer – Aufbau	6
2.4	Anwendung des Schneckenförderers als Bunkeraustragschnecke	10
3	<i>Theoretische Auslegung sprich Dimensionierung von Bunkeraustragschnecken – Auszug.....</i>	13
3.1	Wirkende Kräfte an einer Schnecke - Prinzipdarstellung	13
3.2	Berechnung der theoretischen Fördergeschwindigkeit v_{th}	14
3.3	Berechnung der Fördermenge Q	14
3.4	Berechnung der Antriebsleistung P	15
3.5	Berechnung der Umfangskraft U an der Schnecke	16
3.6	Berechnung der wirkenden Axialkraft F_a	16
4	<i>Grundlagen der Simulation des Bunkeraustrages mit DEM.....</i>	18
4.1	Diskrete Elemente Methode DEM.....	18
4.2	Berechnungskreislauf - Simulationsmethodik	19
4.3	Kraftverschiebungsgesetz	20
4.4	Bewegungsgleichungen	23
4.5	Integrationsverfahren.....	26
4.5.1	Geschwindigkeits-Verlet-Algorithmus	26
4.5.2	Zeitschrittkriterien	27
4.6	Randbedingungen	28
4.6.1	Periodische Randbedingungen	28
4.6.2	Wandmodell	30
4.7	Numerische Implementierung.....	30
4.7.1	Programmablauf - Nachbarschaftsbestimmung.....	30
4.8	Modelle zur Kontaktspezifikation	32
4.8.1	Steifigkeitsmodell	32
4.8.1.1	Lineares Kontaktmodell	33
4.8.1.2	Steifigkeitsmodell – Hertz Mindlin	34
4.8.2	Gleitmodell	36
4.8.3	Bindungsmodell	36
4.8.3.1	Kontaktbindungsmodell	37
4.8.3.2	Parallelbindungsmodell.....	39

4.9	Mechanische Dämpfung	41
4.9.1	Lokale Dämpfung	41
4.9.2	Viskose Dämpfung	42
4.9.3	Kombinierte Dämpfung	45
5	<i>Modellierung eines Schneckenförderer Bunkeraustrag Vorganges mit DEM</i>	47
5.1	Basis der Modellierung – Doppelschneckenförderer Versuchsanlage	47
5.2	Simulationsvorbereitung und Durchführung.....	49
5.2.1	CREATOR: Bestimmung des Modells	49
5.2.1.1	Schritt 1: Globale Modellparameter setzen	50
5.2.1.2	Schritt 2: Definition der Basispartikel	53
5.2.1.3	Schritt 3: Definition der Geometrie.....	54
5.2.1.4	Schritt 4: Definition des Berechnungsraumes.....	57
5.2.1.5	Schritt 5: Definition der Partikelgenerierung	58
5.2.2	SIMULATOR: Durchlauf der Simulation	59
5.2.2.1	Schritt 1: Setzen der Zeit – Optionen/Einstellungen	59
5.2.2.2	Schritt 2: Festlegung der Raster Optionen	60
5.2.2.3	Schritt 3: Simulationsdurchlauf.....	60
5.2.3	ANALYSATOR: Ergebnisanalyse.....	61
5.2.3.1	Schritt 1: Konfiguration der Anzeige	62
5.2.3.2	Schritt 2: Farbgebung der Elemente	63
5.2.3.3	Schritt 3: Aufzeichnung von Daten.....	64
6	<i>Referenzbeispiel Bunkeraustrag – Vergleich mit Messergebnissen</i>	67
6.1	Erstellung einer Volumetrischen Abfrage	67
6.1.1	Generieren einer „Grid Bin Group“ zur Volumenabfrage Erstellung.....	67
6.1.2	Datenaufzeichnung mithilfe der generierten „Grid Bin Group“	68
6.2	Simulationsdatenauswertungen von Abfragen mit Parametervariationen	69
6.3	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Versuchsstand Messungen und berechneten Werten.....	91
6.4	Bunkerfüllstand Änderungen Vergleich durch Schüttgutaustrag	94
6.4.1	Differenzierte Absenkung des Schüttgutes	94
7	<i>Resümee und Ausblick</i>	97
8	<i>Anhang</i>	99
a.	Literaturverzeichnis	99
b.	Abbildungsverzeichnis.....	101
c.	Eidesstattliche Erklärung	103

1 Einleitung

In der Fördertechnik stellen Stetigförderer ein wichtiges Bindeglied zwischen unterschiedlichen verfahrenstechnischen Prozessen dar. Auch finden diese in anderen Bereichen, wie zum Beispiel dem Bergbau, Einsatz.

Aufgrund von kontinuierlich arbeitenden Prozessen ist ein ständiger Materialtransport erforderlich. Das benötigte Fördergut wird durch das Fördermittel, in den meisten Fällen handelt es sich um Stetigförderer, bereitgestellt. Treten Störungen im Materialtransportsystem auf muss meist die Gesamtanlage abgeschaltet werden, wodurch es zu erheblichen Ausfallkosten kommt. Um diese Ausfallrisiken zu senken, gleichzeitig die Leistungsfähigkeit verwendeter Förderguttechnik zu optimieren bedarf es stetig höhere Investitionskosten zu generieren. Die zunehmende Marktglobalisierung beziehungsweise der dadurch kontinuierlich wachsende Druck auf die Hersteller führt dazu, die vorhandenen Unternehmensstrukturen zu überdenken und diese effizienter zu gestalten. Es werden fix fertige Module einzelner Produktbaugruppen produziert, welche in weiterer Folge bis zu einem gewissen Grad individuell zusammengestellt werden können. Der Großteil der Schüttgutförderer wird meist mithilfe von standardisierten Regelwerken und Vorschriften, welche auf Erfahrungswerten basieren, dimensioniert.

Daraus resultiert die Folge, dass nicht jedes Fördermittel, aufgrund der Komplexität des Fördergutstromes in Verbindung mit mechanisch berührten, beanspruchten Bauteilen, optimal funktioniert. Wichtige Faktoren, sprich Zeit und Kosten, sind dafür verantwortlich, dass nur selten Experimente an Versuchsförderanlagen durchgeführt werden, um das einwandfreie Funktionieren besagter Gutförderer gewährleisten zu können.

Aufgrund des Umstandes, dass es sich bei Großförderanlagen meist um Unikate handelt, werden diese in der Praxis nur selten optimiert. Als Resultat von unzureichend dimensionierten Gutförderern, sei es auf mangelnde Erfahrung bei der Auslegung zurückzuführen, oder aufgrund von zu grober mathematischer

Formulierung des „Problems“, kommt es wiederholt zu Schäden beziehungsweise zu Ausfällen von Stetigförderern.

Ein Verfahren, genannt die Diskrete Elemente Methode (DEM), macht es nun möglich Schüttgutmassenströme zu simulieren, bei gleichzeitiger rechentechnischer Erfassung. Anders als bei der klassischen kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise findet die DEM Einsatz bei diskreten, diskontinuierlichen Vorgängen, wie das Fördergutbeispiel mittels Stetigförderer zeigt.

Die DEM basiert auf der Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichungen jedes einzelnen Partikels im Partikelkollektiv für jeden erdenklichen Freiheitsgrad. [1]

Nachstehende Abbildung 1.1 zeigt den Berechnungszyklus der Diskreten Elemente Methode. Als Ausgangspunkt dient das einzelne Partikel. Hierfür werden alle vom Partikel, aufgrund seiner Bewegung, möglichen Bewegungsgleichungen gelöst. Man erhält Kräfte und Momente, wodurch man neue Partikelpositionen, Wandpositionen sowie Kontaktpunkte bestimmen kann. Im nächsten Schritt wendet man das Kraft-Verformungsgesetz auf jeden Partikelkontakt an und erhält eine Relativbewegung. Mit dieser Relativbewegung des Partikels im Kollektiv entstehen natürlich neue Kontaktkräfte, welche wiederum durch Lösen der maximal möglichen Bewegungsgleichungen des Partikels bestimmt werden, wodurch der Zyklus von Neuem beginnt.

Bei Verfahrenstechnischen Prozessen zählt die DEM-Simulation heute bereits zum Stand der Technik. Sie findet zum Beispiel Anwendung beim Mischen, Sichten, Klassieren beziehungsweise zur Schüttgut Parameterbestimmung. Im Gegensatz dazu steckt die DEM-Simulation im Bereich der Fördertechnik noch in den Kinderschuhen, wobei es eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten zur Lösung fördertechnischer Probleme gibt.

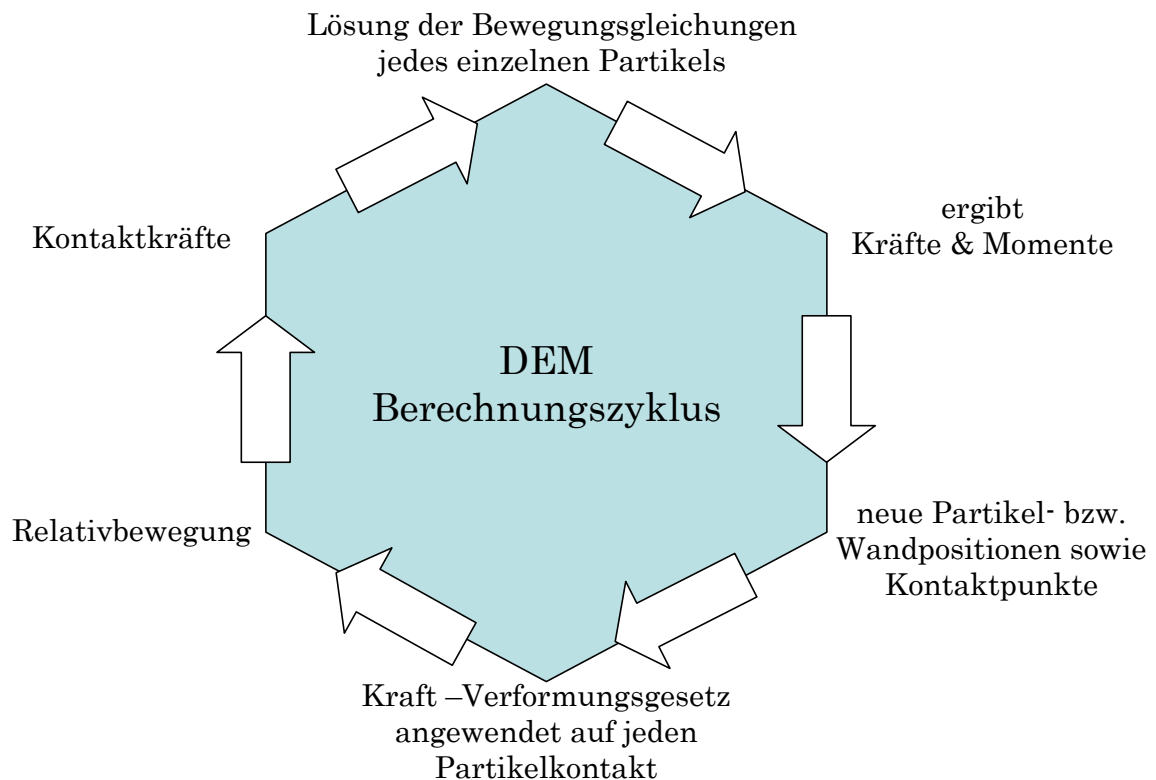


Abbildung 1.1: DEM Berechnungszyklus

Als weiterer Vorteil der DEM-Simulation ist zum Beispiel die Visualisierung des Förderprozesses anzusehen, wodurch sich der Kunde selbst von der Funktionalität des Förderers ein Bild machen kann.

Wichtige Bereiche in denen es verstärkt zu fördertechnischen Problemen kommt, können mithilfe der Simulation besser verstanden werden. Solche Problemzonen befinden sich beispielsweise im Gutaufgabebereich, Gutumlenkbereich, bei Gutübergabestellen z.B. Schurren, Gutabgabebereich etc. . Weiters lassen überschaubare Simulationskosten Funktionalitätsprüfungen von Förderern mit diversen Variationsmöglichkeiten bei verhältnismäßig geringem Aufwand zu. Diese zusätzliche Komponente der Flexibilität erscheint als wichtiger positiver Aspekt der DEM Simulation.

2 Einsatz und Anwendungen von Bunkeraustragschnecken

Als Bunkeraustragschnecken werden Schneckenförderer eingesetzt, welche zur Gruppe der mechanischen Stetigförderer gehören. Besagte Gruppe bietet sich nahezu für den Einsatz der DEM-Simulation an, da diese Förderer in sehr vielen Bereichen eingesetzt sind, beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, Pharmazieindustrie, Metallindustrie usw. . Trotz des häufigen Einsatzes von Schneckenförderern wird die Dimensionierung vielfach nur mit groben Schätzmethoden und Erfahrungswerten durchgeführt (z.B. DIN 15262).

2.1 Schneckenförderer

Schneckenförderer zählen zu den ältesten, bekannten Fördermitteln. Der Grieche, Archimedes von Syrakus, ein bedeutender Mathematiker und Physiker legte in der Antike hierfür den Grundstein mit der ingenieurwissenschaftlichen Erfindung der Archimedischen Schraube. Erste Anwendungen fanden die Schneckenförderer als Be- und Entwässerungsanlagen für Grund und Boden, sowie für Schiffswasserpumpen.

Aufgrund ihrer Robustheit findet man diese Fördermittel in allen Industriebereichen. Schneckenförderer werden für die waagrechte, leicht geneigte und in Spezialanwendungen auch für die teilweise senkrechte Förderung von Schüttgütern eingesetzt. Einige wenige maschinell bewegte Bauteile reduzieren die Ausfallswahrscheinlichkeit und erhöhen dadurch die Zuverlässigkeit dieses Stetigförderers enorm. Das Prinzip der Förderung entspricht der eines Gewindes, wobei die Schraube durch die Schnecke und die Mutter durch das zu fördernde Gut, ersetzt wird.

2.2 Vor- und Nachteile von Schneckenförderer

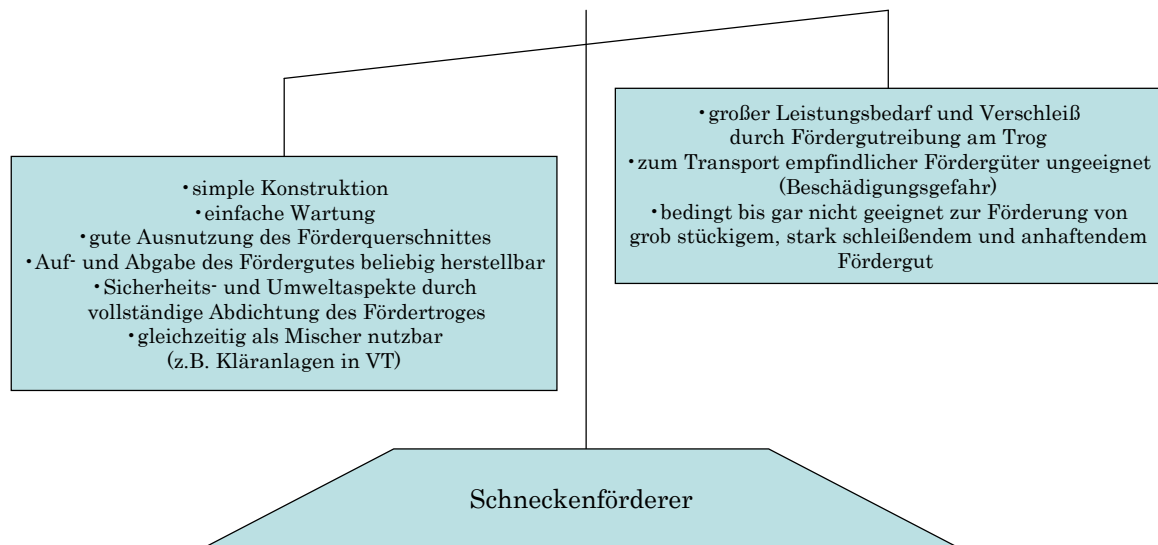


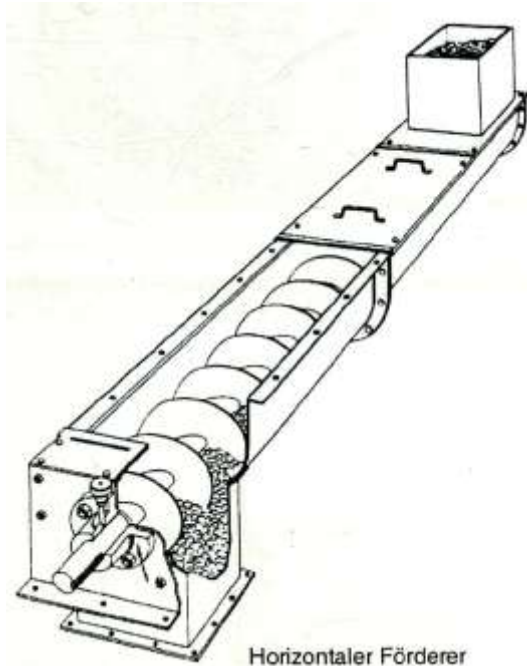
Abbildung 2.1: Vor- und Nachteile von Schneckenförderer

In voran stehender Abbildung 2.1 sind die Vor- und Nachteile von Schneckenförderer dargestellt. Ein Hauptargument für dessen Einsatz stellt sicher die einfache, variable Konstruktionsweise dar. Weiters ist natürlich eine einfache Wartung als positiv anzusehen, die aus der Konstruktionsweise von wenigen mechanisch bewegten Bauteilen resultiert. Das Verhältnis von Innenfördertrog Durchmesser zu Förderlänge ergibt eine durchaus gute Ausnutzung des Förderquerschnittes. Durch die konstruktive Möglichkeit eine vollständige Abdichtung des Fördertroges zu gewährleisten, können auch Umweltaspekte berücksichtigt werden. Da durch gänzliche Abdeckungen mechanisch drehende Bauteile nicht mehr direkt zugänglich sind, bedeutet dies eine Erhöhung der Sicherheit, für das sich in unmittelbarer Nähe befindliche Personal.

Natürlich gibt es bei der Schneckenförderer Anwendung auch Nachteile, wie zum Beispiel der hohe Leistungsbedarf hinsichtlich Antrieb aufgrund von Fördergut Reibung am Trog und der Schnecke, was sich weiters durch verstärkten Verschleiß bemerkbar macht. Für leicht beschädigbare Fördergüter ist dieser Förderer somit ungeeignet. Als letzter Punkt sei erwähnt, dass grob stückige,

stark schleißende und anhaftende (anbackende) Fördergüter nur bedingt bis gar nicht gefördert werden können.

2.3 Horizontaler Schneckenförderer – Aufbau



Nebestehende Abbildung 2.2 zeigt eine räumliche Darstellung eines horizontalen Schneckenförderers. Im Einlaufbereich des Gutaufgabebunkers befindet sich Schüttgut, welches mit der Förderschnecke horizontal gefördert wird. Da der Fördertrog nur teilweise abgedeckt ist, sind Förderschnecke und das zu fördernde Gut ersichtlich.

Abbildung 2.2: Horizontaler Schneckenförderer - Räumliche Darstellung [2]

Bei der folgenden Abbildung 2.3 handelt es sich um eine Prinzip Darstellung eines horizontalen Schneckenförderers samt Anbauteilen. Die rotierende Schnecke, als durchgehender Körper, bewegt das Fördergut in waagrechter Richtung. Allen Bauteilen sind Nummern zugeordnet, welche anschließend erklärt werden.

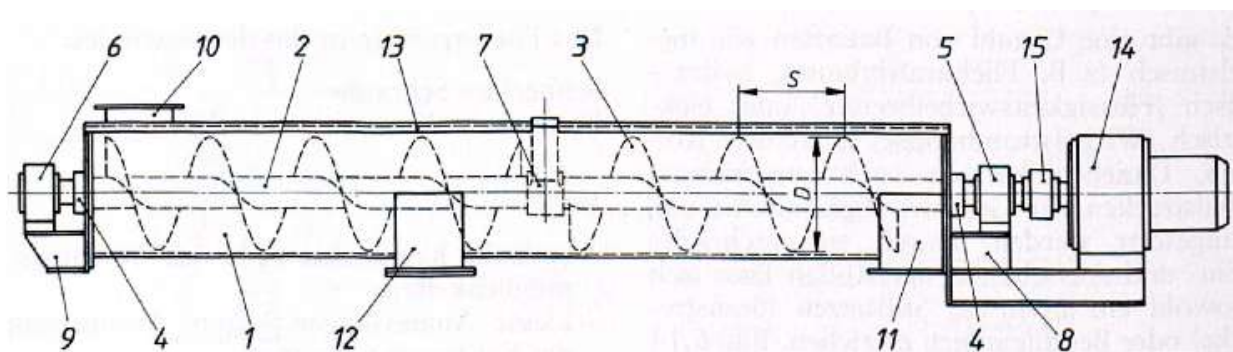


Abbildung 2.3: Horizontaler Schneckenförderer mit Anbauteilen [3]

1 Schneckentrog	10 Einlaufgosse
2 Schneckenwelle	11 Auslaufgosse
3 Schneckenscheiben (-blatt)	12 Zwischenauslauf mit Schieber
4 Abdichtung	13 Trogabdeckung
5 Antriebslager	14 Antriebsaggregat (Getriebemotor)
6 Endlager (Loslager)	15 elastische Kupplung
7 Zwischenlager	D Schneckenscheibendurchmesser
8 Antriebsschild	S Steigung
9 Endschild	

Aufgrund von unterschiedlichen Fördergutarten (Stoffströmen) kommen beim Förderprozess verschiedene Bauarten von Schnecken (siehe Abbildung 2.4) zum Einsatz.

- Vollschncke: Sie ist einsetzbar zur Förderung von feinkörnigen bis staubförmigen, jedoch nicht anhaftenden Fördergütern.
- Bandschncke: Diese Förderschncke eignet sich für die Förderung von stückigen, zähen leicht anhaftenden Fördergutströmen.
- Segment-(Paddel)-Schncke: Diese individuelle Schnckenbauart findet Einsatz zur Förderung, bei gleichzeitiger Durchmischung, des Fördergutes. Weiters ist diese Schnckenart auch für anbackendes Fördergut geeignet.

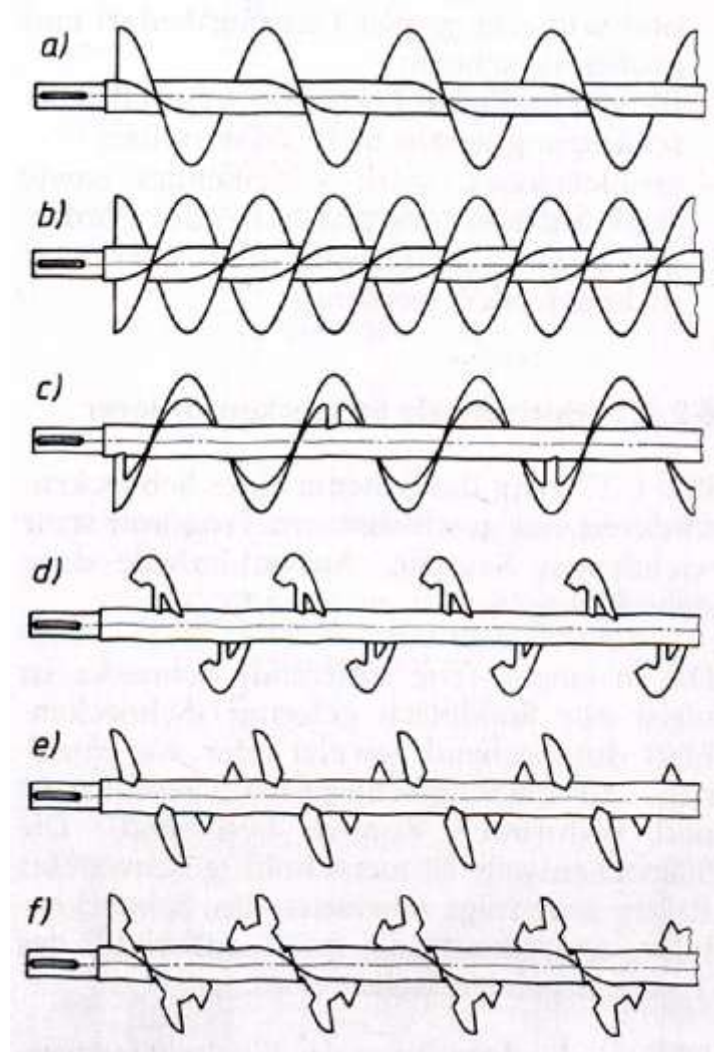


Abbildung 2.4: Bauarten von Schnecken [3]

- a) und b) Vollschnecke eingängig und zweigängig (Doppelwendel)
- c) Bandschnecke
- d) e) f) Segment-(Paddel-) Schnecken unterschiedlicher Bauarten

Diese sich im Inneren eines Fördertroges drehenden Schnecken sind meist aus Stahlblech gefertigt. Das Schneckenblatt kann entweder durchgehend gewalzt sein, oder aus aneinander geschweißten, geschlitzten, verformten Ronden bestehen. Schneckenwellen werden normalerweise als Hohlwellen ausgeführt. Auf diesen Wellen sind wiederum die Schneckenblätter aufgebracht, wobei die Lagerung dieser meist außerhalb des Troges erfolgt.

Übliche Schneckenblattdurchmesser bewegen sich etwa von 100 mm bis zu 1250 mm, wobei die Förderlängen bis zu 40 m pro Trog betragen können. Um die Durchbiegung der Schneckenwelle überschaubar zu halten, müssen diese in gewissen Mindestabständen gelagert werden. Als maximal erlaubte Durchbiegung wird hierfür $f_{\max} \leq l/500$ angesetzt. Daraus mögliche, resultierende Mittellager werden im Fördertrog hängend angeordnet, um die Gefahr der Verstopfung zu minimieren. Gleitlager finden meistens als Mittellager Einsatz, hingegen werden Wälzlager (z.B. Pendelrollenlager) als Endlager verwendet. Um die Schnecke in Längsrichtung primär auf Zug zu beanspruchen, wird das Axiallager am Abgabeende angeordnet.

Abbildung 2.5 zeigt verschiedene Trogbauweisen beziehungsweise nachstehend ihre differenzierten Anwendungsmöglichkeiten sowie Einsatzbereiche.

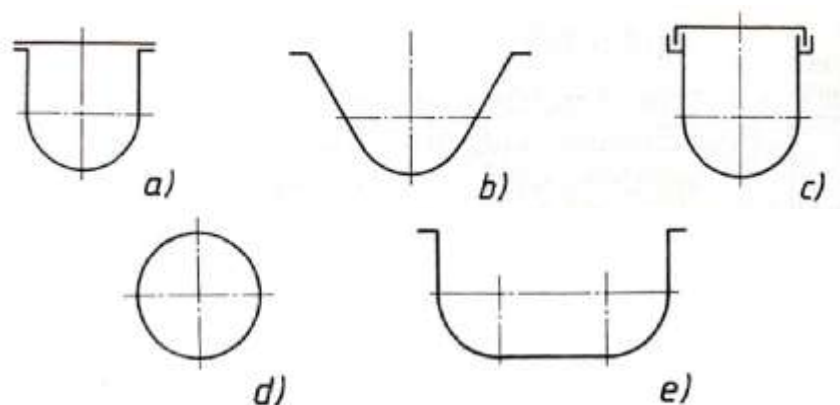


Abbildung 2.5: Trogformen [3]

- a) U-Trog mit einfacher Abdeckung (Normalausführung)
- b) V-Trog für grobstückiges und klebriges Fördergut
- c) U-Trog mit staub- und gasdichter Abdeckung
- d) Schneckenrohr für Dosier- und Abzugschnecken (Trogform ist staubdicht, jedoch schlechte Reinigungsmöglichkeit)
- e) Doppeltrog für Misch- und Rührwerkschnecken, Entwässerungsschnecken

2.4 Anwendung des Schneckenförderers als Bunkeraustragschnecke

Schneckenförderer werden auch als integraler Teil einer Anlage zur Bunkerentleerung von Schüttgütern eingesetzt. Die Hauptfunktion besteht aus dem zuverlässigen Austrag des gespeicherten Füllstoffes.

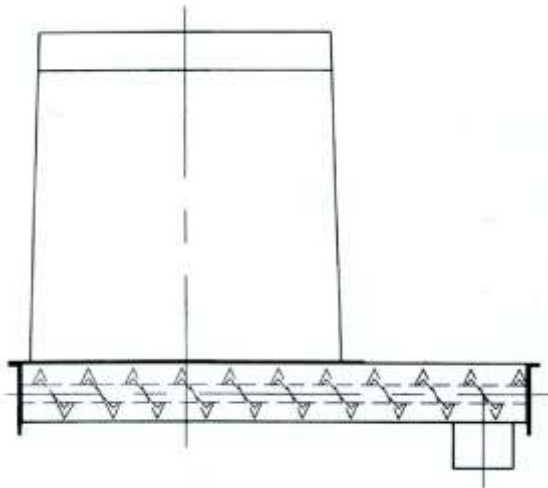


Abbildung 2.6: Bunkeraustragschnecke [4]

Abbildung 2.7 illustriert das Prinzip eines Schüttgut Bunkeraustrages beziehungsweise den bevorzugten Ausfluss des Schüttgutes bei einer Förderschnecke mit folgenden konstanten Konstruktionsparametern: Schneckenwellen Durchmesser, Steigung, Schneckenwendel Durchmesser. Gut erkennbar ist, dass der Schüttgutaustrag des Bunkers nicht über dessen ganze Bunkerlänge erfolgt, sondern sich lediglich im vorderen ersten Drittel des Bunkers (laut Betrachtungsweise) abspielt. Beim teilweisen Nichtausfluss des Schüttgutes kommt es zu einer so genannten Brückenbildung. Um dieser Brückenbildung, ergo dem ungleichmäßigen Schüttgut Bunkerausfluss entgegen zu wirken, werden konstruktive Maßnahmen getroffen, welche in weiterer Folge behandelt werden.

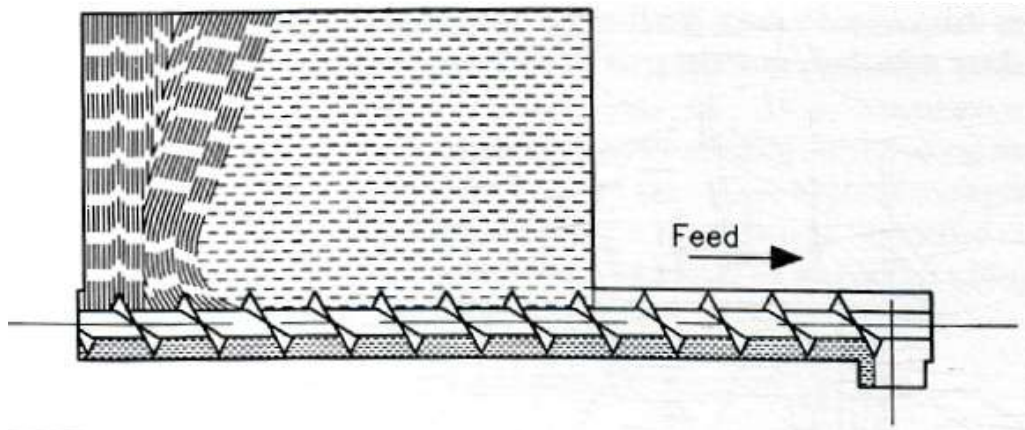


Abbildung 2.7: Bevorzugte Förderung eines gleichförmigen Schraubengewindes [4]

Die folgenden Darstellungen in Abbildung 2.8 zeigen unterschiedliche Bauformen von Förderschnecken. Beim so genannten „Stepped pitch“ handelt es sich um einen abgestuften Gewindegang differierender Steigungen, des auf der Schneckenwelle aufgetragenen Schneckenblattes. Der „Variable pitch“ stellt eine abgewandelte Form des „Stepped pitch“ dar, welcher sich durchaus positiv auf eine gleichmäßige Bunkerentleerung auswirkt. Eine weitere, jedoch äußerst aufwendige Bauform, stellt die „Stepped shaft“ Anwendung dar. Hierbei setzt sich die Schneckenwelle aus Wellenteilstücken divergierender Durchmesser zusammen, was eine Anpassung der Schneckenwendel zur Folge hat. Der „Variable diameter“ des Schneckenblattes beinhaltet eine konstruktive Anpassung des Schneckenblattes bei konstantem Schneckendurchmesser. Bei einer „Tapered shaft“ Förderschnecke wird unterhalb der Bunkeröffnung die Schneckenwelle konisch gestaltet. Der Schneckenwendel Außendurchmesser wird jedoch konstant gehalten. Als letzte hier angeführte Ausführung einer Förderschnecke gilt die „Part centreless“. Es handelt sich bei dieser Ausführung um eine abgestufte Schneckenwelle im Bereich des Bunkergutausflusses, welche in eine wellenlose geführte Schneckenwendel übergeht.

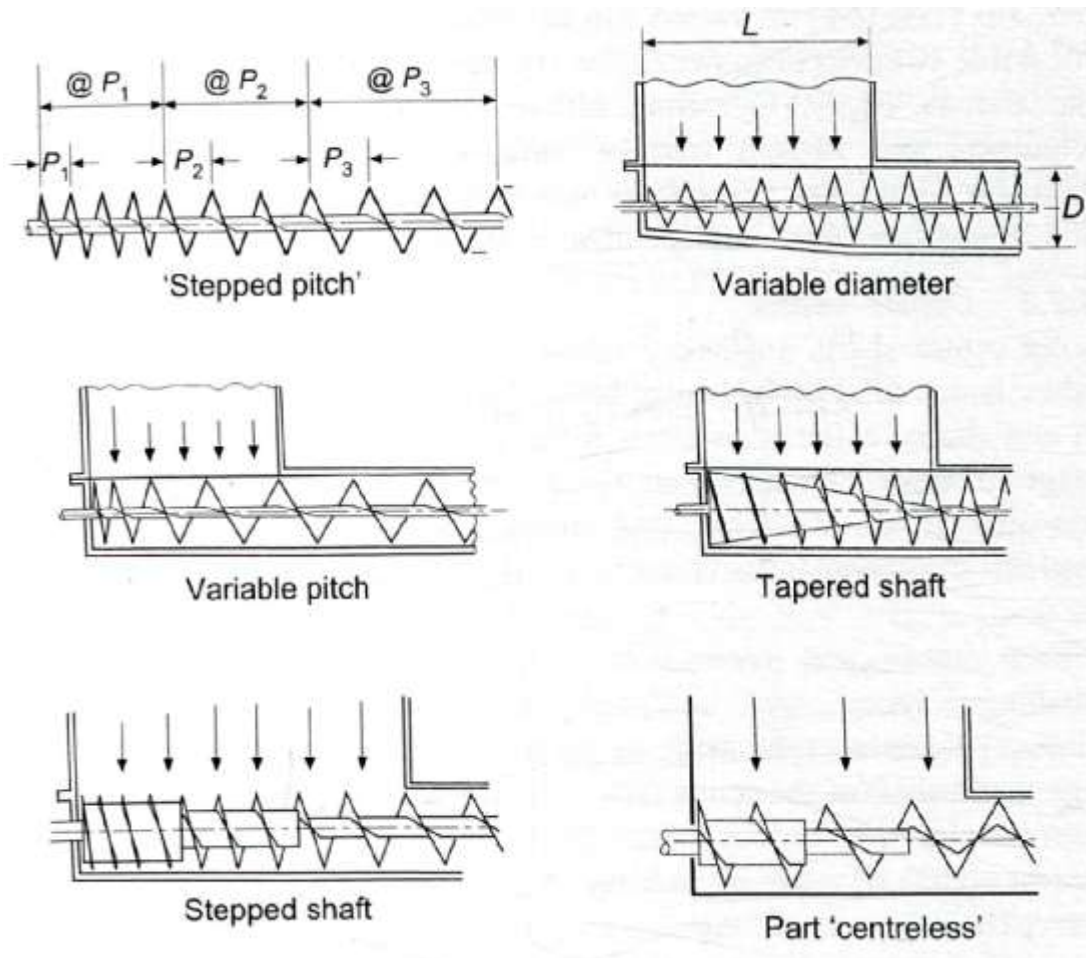


Abbildung 2.8: Formen von Förderschnecken [4]

3 Theoretische Auslegung sprich Dimensionierung von Bunkeraustragschnecken – Auszug

3.1 Wirkende Kräfte an einer Schnecke - Prinzipdarstellung

Um die Axiallagerung von Förderschnecken richtig dimensionieren zu können, ist es überaus wichtig über die Intensität der Beanspruchung der Förderschnecke, beziehungsweise deren beanspruchende Wirkung auf die Lager im entsprechenden Maße Bescheid zu wissen. Vereinfachend wird angenommen, dass die gesamte zugeführte Antriebsleistung vom Schneckenblatt auf das Fördergut übertragen werden muss.

Auf das Schneckenblatt wirkt die Normalkraft N und die zugehörige Reibkraft $\mu \cdot N$. Die daraus resultierende Kraft entspricht der resultierenden Kraft von Axialkraft F_a sowie der Umfangskraft U . Der Kraftangriffspunkt wird fiktiv bei einem mittleren Schneckenblattradius r_m angenommen.

Nachstehende Abbildung 3.1 zeigt die wirkenden Kräfte an einer Förderschnecke.

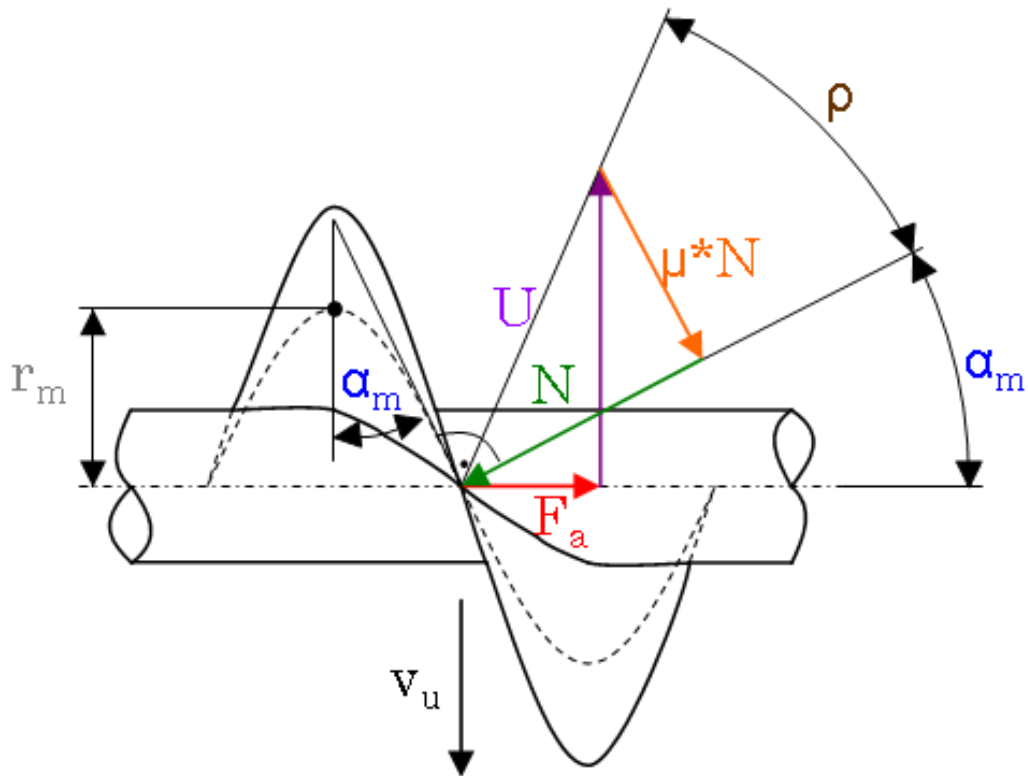


Abbildung 3.1: Wirkende Kräfte an einer Schnecke

3.2 Berechnung der theoretischen Fördergeschwindigkeit v_{th}

$$v_{th} = \frac{n \cdot S}{60} \quad [\text{m/s}] \quad 3.1$$

Die theoretische Fördergeschwindigkeit v_{th} erhält man aus dem Produkt der Drehzahl der Schnecke n in U/min und der Schneckensteigung S in m. Im gängigen Einsatz bewegen sich die Schneckendrehzahlen zwischen 15 und 150 U/min.

3.3 Berechnung der Fördermenge Q

$$Q = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \varphi \cdot v_{th} \cdot C \cdot \rho \quad [\text{kg/s}] \quad 3.2$$

Die Fördermenge Q errechnet sich aus dem kreisförmigen Schneckenförderquerschnitt, multipliziert mit dessen Füllungsgrad φ , der

theoretischen Fördergeschwindigkeit v_{th} , einem vordefinierten Geschwindigkeitsbeiwert C und der Fördergutschüttdichte ρ in kg/m^3 . Der Maximalwert des üblichen Füllungsgrades kann bis zu 45% (in Sonderfällen bis zu 60%) des zur Verfügung stehenden Fördertrogvolumens, reduziert um die Förderschnecke und sonstige mögliche Einbauten sprich Lagerungen, betragen. Ein solch hoher Grad an Füllung kann maximal bei leicht bis sehr leicht fließenden Gütern wie beispielsweise Getreide und Gries, aber auch mit Kohlenstaub erfolgen. Im Gegensatz dazu können schwer fließende Stoffe wie Erze, Kies und Kalkstein nur mit einem Füllungsgrad von bis circa 15% gefördert werden. Besagte Stoffe verursachen trotzdem einen äußerst starken Verschleiß an den berührten Bauteilen. Der Geschwindigkeitsbeiwert, auch Schlupf genannt, beginnt für Segmentschnecken bei einem Wert von 0,5. Ab einem Wert von 0,8 folgen Bandschnecken und darauf folgen die Vollschncken mit einem Wertebereich von 0,9 bis 1.

3.4 Berechnung der Antriebsleistung P

$$P = Q \cdot g \cdot L \cdot \omega_{Sch} + Q \cdot g \cdot H + \text{Leerlaufleistung} \quad [\text{W}] \quad 3.3$$

Die Antriebsleistung besteht aus mehreren, unterschiedlichen Leistungsanteilen, der horizontalen, vertikalen und der Leerlaufförderleistung.

Die horizontale Förderleistung setzt sich aus dem Produkt der Fördermenge Q , Erdbeschleunigung g , der Horizontalprojektion der Förderstrecke L und einem Reibungsbeiwert ω_{Sch} zusammen. Dieser Reibungsbeiwert bewegt sich entsprechend DIN 15262 [5] je nach dem zu fördernden Gut, von zum Beispiel 2,3 für Getreide, Gries, Kohlestaub bis hin zu über 5,0 für Erze, Kies und Kalkstein.

Die vertikale Förderleistung berechnet sich aus dem Produkt von Fördermenge Q , Erdbeschleunigung g und der Förderhöhe H .

Als letzter Anteil folgt die Leerlaufleistung, welche jedoch in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann. Der Grund dafür liegt darin, dass der besagte Leistungsanteil im Verhältnis zu den anderen Leistungsanteilen äußerst gering ist.

Daraus resultiert die vereinfachte Formel:

$$P = Q \cdot g \cdot (L \cdot \omega_{sch} + H) \quad [W] \quad 3.4$$

Zu erwähnen ist, dass voran stehende Formel nur für leicht positiv oder negativ geneigte Schneckenförderer gilt.

3.5 Berechnung der Umfangskraft U an der Schnecke

$$U = \frac{P}{r_m \cdot \omega} = \frac{30 \cdot P}{r_m \cdot n \cdot \pi} \quad [N] \quad 3.5$$

Für die Berechnung der Umfangskraft U wird näherungsweise angenommen, dass die Kräfte an einem gedachten Punkt, dem mittleren Schneckenblattradius angreifen. Dieser wird abgeschätzt mit $r_m = (0,7 \div 0,8) \cdot \frac{D}{2}$ [m]. Die Umfangskraft U errechnet sich schließlich aus der Antriebsleistung P , besagten mittleren Schneckenblattradius r_m und der Winkelgeschwindigkeit ω in s^{-1} .

3.6 Berechnung der wirkenden Axialkraft F_a

$$F_a = \frac{U}{\tan(\alpha_m + \rho)} \quad [N] \quad 3.6$$

Die an der Förderschnecke wirkende Axialkraft F_a , welche in Abbildung 3.1 ersichtlich ist, berechnet sich aus der Umfangskraft U , dem mittleren Schneckensteigungswinkel α_m und dem Reibungswinkel ρ zwischen Schneckenblatt und Fördergut. Den mittleren Schneckensteigungswinkel α_m

kann man wiederum durch die Schneckensteigung S , der Konstanten π und den mittleren Schneckenblattradius r_m ausdrücken. [3]

$$\tan \alpha_m = \frac{S}{2 * \pi * r_m} \quad [^\circ]$$

Der Reibungswinkel ρ , welcher zwischen Schneckenblatt und Fördergut besteht, ist weiters definiert als: $\tan \rho = \mu$ [°]

4 Grundlagen der Simulation des Bunkeraustrages mit DEM

Wie bereits in der Einführung erläutert, stellt die Simulation des Bunkeraustrages mit Diskreter Elemente Methode eine innovative effiziente Möglichkeit dar, um das Fließverhalten von Schüttgütern besser zu verstehen sowie verifizieren zu können.

In den folgenden Unterpunkten wird auf die theoretischen Hintergründe und Aspekte der zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten der DEM Simulation eingegangen.

4.1 Diskrete Elemente Methode DEM

Technische Anlagen werden sehr häufig in traditioneller Weise anhand von Erfahrungswerten und durchgeführten Experimenten, welche für spezielle Anwendungen entwickelt wurden, dimensioniert. Dabei werden zu verwendende granulare Materialien eingesetzt. Heutzutage gewinnen Simulationsmethoden verstärkt an Bedeutung. Man unterscheidet hier zwischen den grundsätzlichen Methoden der Diskreten Elemente Methode (DEM) und der Finiten Elemente Methode (FEM). Bei der DEM wird eine Simulation jedes einzelnen Partikels in Wechselwirkung mit den umgebenden Partikeln sowie den äußeren Kräften durchgeführt. Als Resultat ist ein Gewinn an höherem Verständnis, auf mikroskopischer Ebene in Zusammenhang mit den Materialeigenschaften, gegeben.

Der Vollständigkeit halber sei hier die FEM erwähnt, bei der zum Beispiel ein Pulver als Kontinuum beschrieben wird, das wiederum in die finiten Elemente zerlegt wird. Was bedeutet, dass viele Teilchen in Einheiten zusammen gefasst werden, denen dann Materialeigenschaften zugeordnet werden.

4.2 Berechnungskreislauf - Simulation methodology

Generell unterscheidet man zwischen zwei Ansätzen (siehe Abbildung 4.1), um das Verhalten eines definierten Systems mit partikelbasierten Methoden zu modellieren.

Bei der Variante „Bottom-Up“ stellen mikroskopische Gegebenheiten die Ausgangsbasis, um Aussagen betreffend des makroskopischen Verhaltens treffen zu können. Ein Beispiel aus der Molekulardynamik sind makroskopische Eigenschaften von Flüssigkeiten wie Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung aufgrund der stattfindenden Molekül Wechselwirkungen.

Der zweite Ansatz „Top-Down“ wählt als Ausgangsbasis die makroskopischen Gesetzmäßigkeiten und formuliert daraus passende Wechselwirkungen zwischen den diskreten Partikeln. Am Beispiel einer Flüssigkeit werden für die Gesetzmäßigkeiten die Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsmechanik herangezogen.

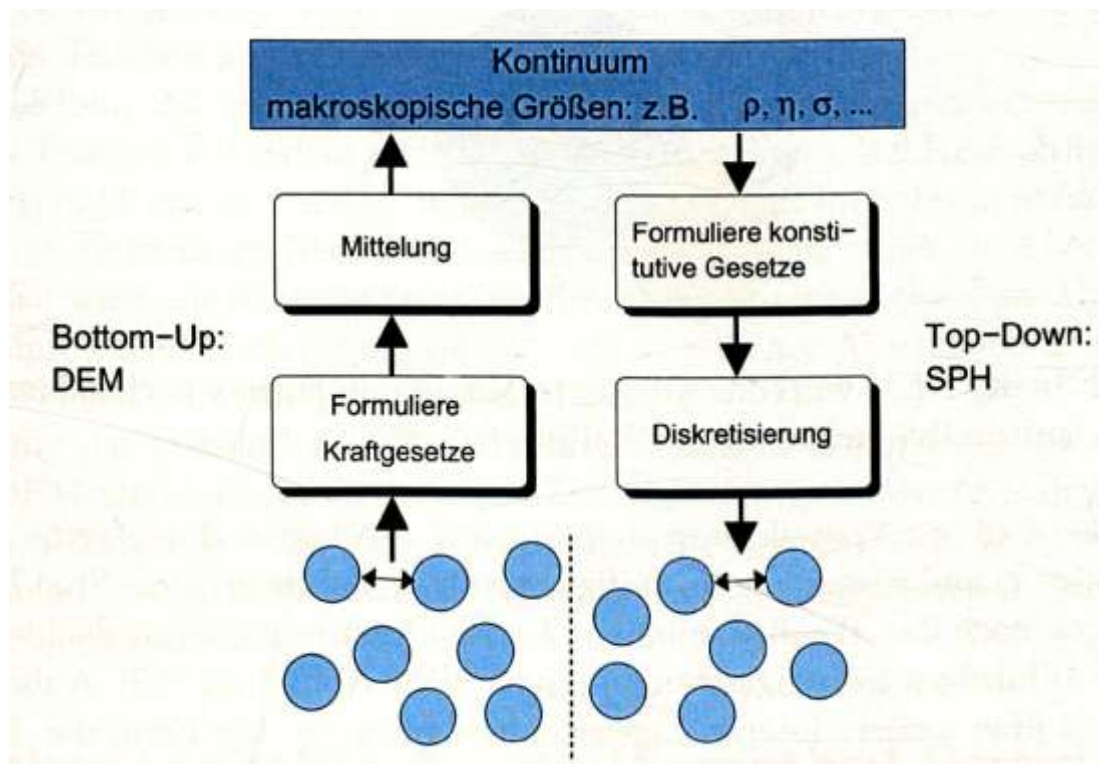


Abbildung 4.1: Differenzierte Vorgangsweise bei der Prozesssimulation mit Diskreter Elemente Methode (DEM) sowie Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [6]

4.3 Kraftverschiebungsgesetz

Das Gesetz der Kraftverschiebung stützt sich auf die relative Verschiebung zweier separater Teilchen an den Kontakten, mit einem vordefinierten Kontaktmodell. Für Kugel-Kugel sowie Kugel-Wand Kontakte kommt es zur Entstehung von Kontaktkräften in den Kontaktpunkten $\mathbf{x}_i^{[c]}$ anhand des Kraftverschiebungsgesetzes. Für die Lage jedes Kontaktpunktes gilt, dass sich dieser innerhalb des überschrittenen Volumens beider Körper in einer durch den Normalenvektor $\mathbf{n}$ definierten Kontaktebene befindet. Dieser Normalenvektor ist bei Kugel-Kugel Kontakten die kürzeste Verbindungslinie zwischen den zwei Kugelmittelpunkten. Tritt ein Kugel-Wand Kontakt auf so entspricht der Normalenvektor der kürzesten Geraden zwischen Wand und Kugelmittelpunkt. Weiters kommt es zur Aufspaltung der Kontaktkraft in Richtung des Normalenvektors der Normalkomponente beziehungsweise in eine Scherkomponente (diese ist vertikal zur Normalkomponente) in der Kontaktebene (siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3). Das hier beschriebene Gesetz stellt einen Zusammenhang der Kraftkomponenten von Normalkraft und Scherkraft mittels Normal- und Schersteifigkeit dar. Als Voraussetzung dienen die entsprechenden relativen Verschiebungen einschließlich deren zugehörige Bewegungsgleichungen.

Die Ausführung des Kraftverschiebungsgesetzes für Kugel-Kugel sowie Kugel-Wand Kontakte erfolgt nachstehend. Aus Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 sind die einzelnen Formelzeichen zu entnehmen, insbesondere U^n der Überlappung der einzelnen Elemente.

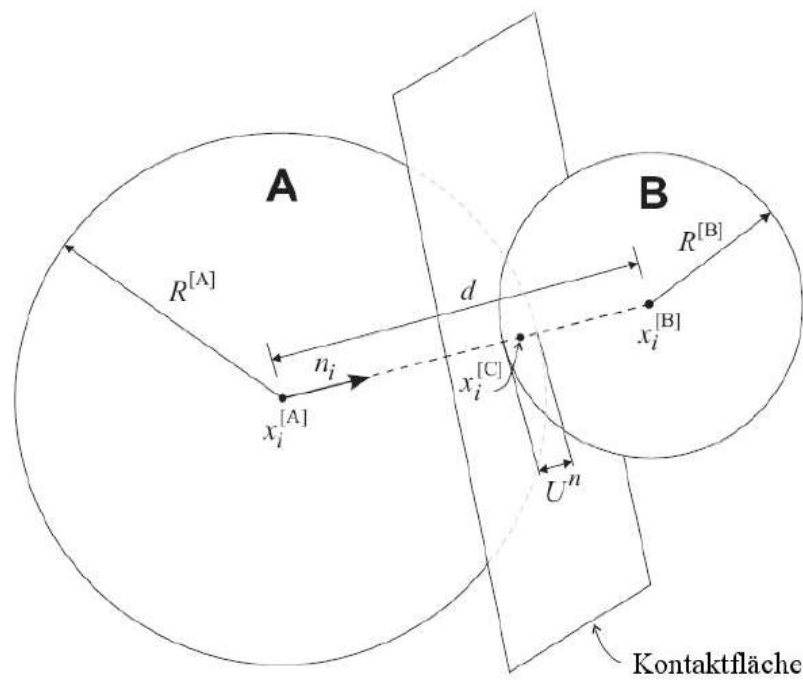


Abbildung 4.2: Kugel-Kugel Kontakt nach Itasca [7]

In nachstehender Gleichung 4.1 wird der Normalenvektor n_i durch die Positionsvektoren $x_i^{[A]}$, $x_i^{[B]}$ der Kugelmittelpunkte von Kugel A und B sowie der kürzesten Verbindungslinie d berechnet.

$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d} \quad 4.1$$

Wobei die kürzeste Distanz der Kugelmittelpunkte d wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]}) \cdot (x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad 4.2$$

Für den Fall eines Kugel-Wand Kontaktes (siehe Abbildung 4.3) wird d entsprechend adaptiert. Hierbei entspricht der Normalenvektor n_i der kürzesten Distanz d vom Kugelmittelpunkt der Kugel b zur Wand w.

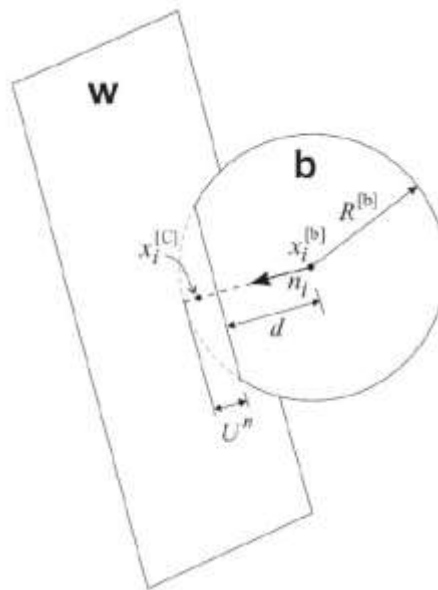


Abbildung 4.3: Kugel-Wand Kontakt nach Itasca [7]

Da eine genauere Betrachtung der Lage des Normalenvektors wichtig erscheint, folgt nachstehend die zweidimensionale Veranschaulichung in Abbildung 4.4.

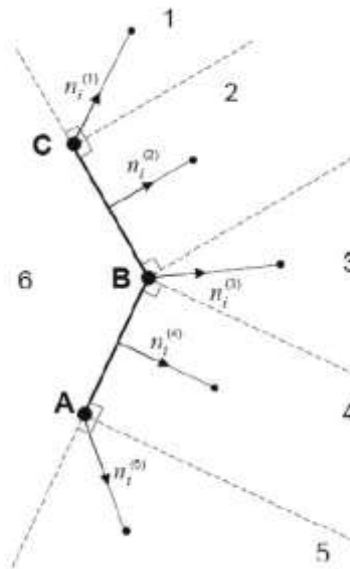


Abbildung 4.4: Kugel-Wand Kontakt Normalenvektor Ermittlung nach Itasca [7]

Man unterteilt die zweidimensionale Wand in zwei Teilsegmente AB und BC.

Eine Seite der Wand ist aktiv, die andere Seite wird inaktiv definiert. Ball-Wand Kontakte können ausschließlich auf der aktiven Seite wahrgenommen werden.

Weiters wird der hier in der Darstellung aktive rechte Bereich der Wand in fünf Teilbereiche (anhand von Wandnormalen), an den Punkten A,B und C, unterteilt.

Befindet sich beispielsweise ein Kugelmittelpunkt im Bereich 2 oder 4, so steht der Normalenvektor n_i orthogonal auf den zugehörigen Wandabschnitt. Anders ist dies jedoch, wenn sich die Kugel in den Bereichen 1, 3 beziehungsweise 5 befindet. Die Kugel-Wand Berührung erfolgt dann an einem ihrer Endpunkte und n_i liegt auf einer Geraden zwischen Wandendpunkt und Kugelmittelpunkt. Die auf der linken (passiven) Seite befindlichen Kugeln nehmen keinen Einfluss durch die Wand.

Die Überlappung U^n (siehe 4.3) entspricht der relativen Verschiebung an den Kontakten in Richtung der Normalen, wobei $R^{[\Omega]}$ der Radius der Kugel Ω ($\Omega = A,B,b$) ist. [7]

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d, (Kugel - Kugel) \\ R^{[b]} - d, (Kugel - Wand) \end{cases} \quad 4.3$$

Die Kontaktpunkt Position wird wie folgt bestimmt:

$$x_i^{[c]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + \left(R^{[A]} - \frac{U^n}{2} \right) \cdot n_i, (Kugel - Kugel) \\ x_i^{[b]} + \left(R^{[b]} - \frac{U^n}{2} \right) \cdot n_i, (Kugel - Wand) \end{cases} \quad 4.4$$

4.4 Bewegungsgleichungen

Der Grundstein der nach dem mikroskopischen Ansatz arbeitenden Diskreten Elemente Methode wurde in der Gesteinsmechanik gelegt. Es handelt sich hier um ein numerisches Simulationsverfahren, bei dem das zu simulierende System aus N unterschiedlichen diskreten Elementen besteht. Als diskrete Elemente werden Partikel beziehungsweise Teilchen gewählt, die vorerst nicht näher bekannt sind.

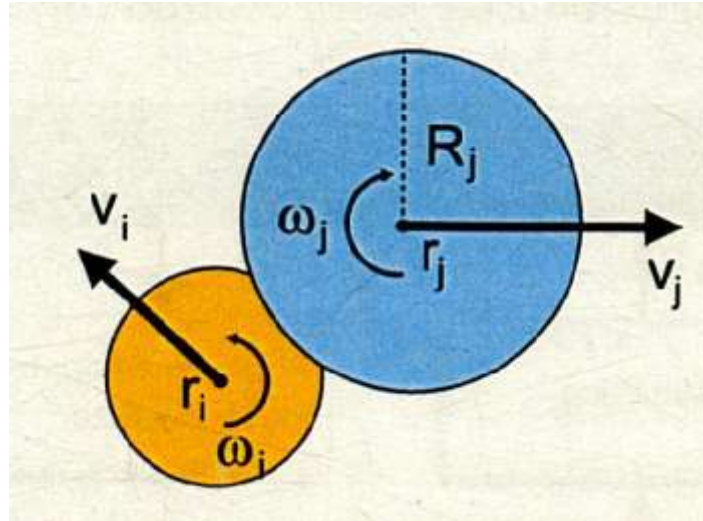


Abbildung 4.5: Partikeldarstellung mit individuellen Eigenschaften [6]

Man beschreibt jedes einzelne Partikel i ($i = 1$ bis N) des Vielteilchen Systems durch seine Masse m_i , seinen Ortsvektor r_i , sowie seinen Geschwindigkeitsvektor v_i . Sind Bewegungen in Form von Rotationen zulässig, wird noch das Trägheitsmoment I_i , der Orientierungsvektor φ_i und der Winkelgeschwindigkeitsvektor ω_i hinzugefügt. Weiters können die Teilchen über zusätzliche innere Eigenschaften verfügen. Die Teilchenform wird vorerst nicht näher spezifiziert, resultiert jedoch aus der Art der Wechselwirkung.

Das erste und zweite Newtonsche Gesetz der zeitlichen Ableitung der Teilchenkoordination lautet somit:

$$\frac{d}{dt}r_i = v_i \quad 4.5$$

$$m_i * \frac{d}{dt}v_i = F_i^{tot} \quad 4.6$$

Die Gesamtkraft F_i^{tot} wirkend pro Teilchen, setzt sich aus der Summe der Kräfte zwischen den Partikeln F_{ij} und externer Kräfte F_i^{ex} zusammen.

$$F_i^{tot} = \sum_{j \neq i} F_{ij} + F_i^{ex} \quad 4.7$$

Analog zu den Gleichungen 4.5 und 4.6 erhält man für rotatorische Freiheitsgrade:

$$\frac{d}{dt}\varphi_i = \omega_i \quad 4.8$$

$$I_i * \frac{d}{dt}\omega_i = T_i^{tot} \quad 4.9$$

Das Drehmoment zweier Partikel zueinander lässt sich über die Kräfte als $T_{ij} = l_{ij} \times F_{ij}$ errechnen. Hierbei stellt l_{ij} den Verbindungsvektor vom Partikelmittelpunkt zum Kontaktpunkt dar. Weiters setzt sich das gesamte Drehmoment T_i^{tot} eines Partikels aus der Summe der Drehmomente mit anderen Partikeln zusammen (vergleiche Gleichung 4.7). Die wichtigsten Größen der DEM-Simulation sind die zwischen den Teilchen wirkenden Kräfte. Die Art und Form dieser, in Verbindung mit deren Anfangs- und Randbedingungen, bestimmen die Dynamik des Systems maßgeblich. Idealerweise geht bei einer mikroskopischen Simulation (DEM) kein Wissen über das makroskopische Verhalten ein, was ein gutes und genaues Verständnis der zugrunde liegenden Wechselwirkungen zwischen den Teilchen auf mikroskopischer Ebene erfordert.

Die bereits formulierte Gleichung 4.7 stellt eine Aufsummation der zwischen den Partikeln wirkenden Kräfte dar, wodurch alle Teilchen untereinander in Wechselwirkung stehen. Wirken Kontaktkräfte jedoch nur am Kontaktpunkt zweier Partikel, wodurch eine Formabhängigkeit gegeben ist, sind nur die direkten Nachbarn zu berücksichtigen. Bei langreichweitigen Kräften wird zur Minimierung der Rechenzeit ein so genannter Abscheideradius eingeführt. Dies erfolgt aus numerischen Gründen, wenn die Kraft hinreichend stark abgefallen ist.

Das Lösen der „ordinary differential equations“ (ODE) - gewöhnlicher Differentialgleichungen, 4.5, 4.6, 4.8 und 4.9 erfolgt bei der DEM-Simulation in diskreten Zeitschritten. Es wird der Systemzustand zum Zeitpunkt t und in

weiterer Folge der Zustand zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ berechnet. Δt symbolisiert einen hinreichend kleinen Zeitschritt.

4.5 Integrationsverfahren

Um den zeitlichen Verlauf der Teilchenkoordinaten zu ermitteln - durch die Integration der Bewegungsgleichungen 4.5, 4.6 usw. beschrieben - wird ein hinreichend geeignetes Verfahren benötigt. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Verfahren mit differenzierten Genauigkeiten und Komplexitäten. Hauptaugenmerk wird im hier vorliegenden Fall auf die stabile Integration des Systems gelegt.

4.5.1 Geschwindigkeits-Verlet-Algorithmus

Die Eulersche Methode, welche auf der Taylorentwicklung der Ortskoordinaten basiert, zählt als einfachstes Integrationsverfahren. Dieses Verfahren weist einen relativ großen Fehler der Größenordnung $(\Delta t)^2$ auf. Hingegen gilt der bekannte Geschwindigkeits-Verlet-Algorithmus (GVA) als stabileres und genaueres Verfahren, welches ebenfalls aus der Taylorreihenentwicklung hergeleitet werden kann.

$$r(t + \Delta t) = r(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2} \frac{F(t)}{m} (\Delta t)^2 \quad 4.10$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{1}{2} \left(\frac{F(t)}{m} + \frac{F(t + \Delta t)}{m} \right) \Delta t \quad 4.11$$

Bei Kräften, welche geschwindigkeitsabhängig sind, erfolgt eine Abschätzung dieser in zwei vollen Zeitschritten. Diese ist nachstehend angeführt.

$$v(t + \frac{\Delta t}{2}) = v(t) + \frac{1}{2} \frac{F(t)}{m} \Delta t \quad 4.12$$

Der Geschwindigkeitsfehler bewegt sich hier in etwa in einer Größenordnung von $(\Delta t)^3$, während der Ortsfehler eine Größenordnung von $(\Delta t)^4$ aufweist. Als zeitlich reversibel und exakt Phasenraum erhaltend (symplektisch) wird der Geschwindigkeits-Verlet-Algorithmus bezeichnet. Mit diesen Eigenschaften wird ihm auch anstelle von Integrationsverfahren höherer Ordnung, wie zum Beispiel dem Runge-Kutta-Verfahren (einem Verfahren vierter Ordnung) meist der Vorzug gegeben, da diese Verfahren im Normalfall über schlechtere Konvergenzeigenschaften verfügen. Aus diesem Grund findet der GVA überhaupt in der Partikelmechanik den häufigsten Einsatz.

Wird ein System von translatorischen Freiheitsgraden um rotatorische erweitert, so können simultan zu den Geschwindigkeitsberechnungen in den Gleichungen 4.10, 4.11, 4.12 die Winkelgeschwindigkeiten ω berechnet werden. Hierzu werden die Kräfte F durch Drehmomente T ersetzt.

4.5.2 Zeitschrittkriterien

Besonders wichtig für die stabile zeitliche Entwicklung der Positionen und Geschwindigkeiten der Teilchen ist die richtige Wahl des geeigneten Zeitschrittes Δt . Wird Δt zu groß gewählt, kann dies möglicherweise zum Zusammenbruch der gesamten Simulation führen. Der Grund hierfür ist in der enormen Veränderung von Partikel Ort und Geschwindigkeit zu suchen, was wiederum zu Instabilitäten bei der Berechnung führt. Erfolgt die Auswahl von Δt zu klein, so wird die Rechenzeit unnötig verlängert. Der für die Simulation notwendige Zeitschritt Δt lässt sich anhand Gleichung 4.13 über die wirkenden Kräfte, wie beispielsweise dem mittleren Partikelabstand R_i und zunächst einer nicht bestimmten Konstanten C_f , bestimmen.

$$\Delta t \leq C_f \max(\sqrt{\frac{R_i \cdot m_i}{|F_i|}}) \quad 4.13$$

Anhand von durchgeführten Versuchsrechnungen wurde bestätigt, dass die Wahl von $C_f = 0,25$ ausreichend ist. Weiters hängt dies natürlich auch von der Kräfteart ab, wobei Kräfte mit großem Gradienten kleine Zeitschritte benötigen. Bei Verwendung realistischer Materialparameter resultiert meist ein sehr kleiner Zeitschritt infolge der Kriterien, was die Simulationsdauer (Rechenzeit) vielfach überschreiten würde. Abhilfe wird durch intelligentes Skalieren ausgewählter Größen geschafft. Als Resultat erhält man eine Erhöhung des Zeitschrittes. Nachstehend sind einige, wichtige Möglichkeiten zur Größenänderung von Parametern für eine optimierte Simulation angeführt. Allerdings sollte man darauf achten, dass bei Änderung physikalischer Eigenschaften die Simulationsergebnisse hinsichtlich unerwünschter physikalischer Effekte überprüft werden.

- Erhöhung der Trägheit (der Masse) um mehrere Größenordnungen bei quasistatischen Prozessen
- Verringerung des Kompressionsmoduls bei nahezu inkompressiblen Flüssigkeiten (z.B. Wasser) um mehrere Größenordnungen

4.6 Randbedingungen

Partikelsimulationen werden zusätzlich zu den verwendeten Kräften (bei der DEM), maßgeblich von den Randbedingungen, beeinflusst. Diese können entweder periodischer Natur, oder zum Beispiel auch definierte Geometrien bei Prozesssimulationen sein.

4.6.1 Periodische Randbedingungen

Werden periodische Randbedingungen bei einer Simulation eingesetzt, so wird die rechteckige Simulationszelle in eine oder mehrere Raumrichtungen vervielfältigt (siehe Abbildung 4.6).

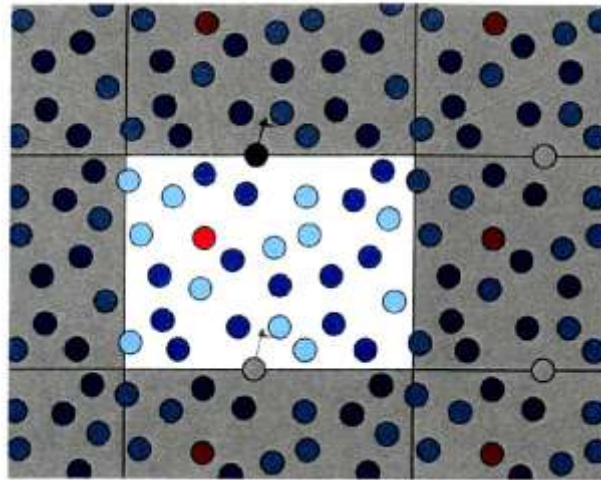


Abbildung 4.6: Zweidimensionales Beispiel von Replikationen (graue Felder) einer Simulationsbox (weißes Feld) in einer oder mehreren Raumrichtungen bei periodischen Randbedingungen. Das schwarze Partikel, welches sich am oberen Ende der Simulationsbox befindet, wird beim Verlassen dieser wieder unten eingefügt.[6]

Es folgt eine Wechselwirkung zwischen Teilchen an einer Seite der Simulationsbox, mit Teilchen, welche sich an der gegenüberliegenden Seite befinden. Verlassen Teilchen die Simulationsbox auf einer Seite, so werden diese an der gegenüber liegenden Seite wieder eingefügt. Die Modellierung des Grenzfalles eines unendlich ausgedehnten Systems ist das Resultat des Einsatzes periodischer Randbedingungen. Der Vorteil in der mikroskopischen Simulation liegt darin, mit wenigen Teilchen (in der Größenordnung von einigen Tausend) makroskopische Systeme simulieren zu können.

Die Voraussetzung hierfür ist, dass das Größenverhältnis der mikroskopischen Simulation klein ist im Verhältnis zur makroskopischen Simulationsbox. Als Beispiel hierfür kann eine Untersuchung des Einflusses der mikroskopischen Eigenschaften (z.B. An- und Umordnung) auf makroskopische Größen angeführt werden.

4.6.2 Wandmodell

Werden technologische Prozesse simuliert sind die vorhandenen Geometrien bestmöglich nachzubilden. Hierfür ist ein Wandmodell zu verwenden, welches den zur Verfügung stehenden Raum begrenzt. Man unterscheidet zwischen zwei Varianten, um eine Wand in einer Partikelsimulation darzustellen:

- Erzwingung der Randbedingung durch entsprechende Bedingung an der Grenzfläche
- Indirekte Repräsentation der Randbedingung durch eine Schicht von Wandteilchen

4.7 Numerische Implementierung

Aufgrund der Tatsache, dass Partikelsimulationsmethoden einen sehr hohen numerischen Rechenaufwand bedeuten, erscheint es überaus wichtig effiziente Algorithmen und Optimierungsstrategien anzuwenden.

4.7.1 Programmablauf - Nachbarschaftsbestimmung

Nachfolgende Abbildung 4.7 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer Simulationsrechnung. In der Hauptschleife werden für jeden Zeitschritt Δt neue Teilchenpositionen sowie deren neue Geschwindigkeiten und mögliche weitere benötigte Parameter rechentechnisch ermittelt. Die Durchlaufzahl der Hauptschleife (blau eingefärbt) bewegt sich normalerweise in einer Größenordnung von 10^6 bis 10^9 , je nach gewünschter Simulationsdauer und Fragestellung der Simulationsaufgabe. Bei der DEM ist es erforderlich vor dem Durchlauf der Schleife die Anfangsbedingungen, sprich Teilchenpositionen und deren Geschwindigkeiten, Kraftgesetze und Konstanten, Randbedingungen sowie mögliche weitere Simulationsparameter festzulegen (makroskopische Größen bei SPH). Wird die Simulation gestartet, so werden am Anfang jedes Schleifendurchlaufes Orte und Geschwindigkeiten der Teilchen um einen halben

Zeitschritt propagiert sprich ausgedehnt (siehe Gleichungen 4.10, 4.11 und 4.12). Anschließend erfolgt für jedes Ausgangsteilchen eine Bestimmung der Nachbarsteilchen, mit denen diese in Wechselwirkung stehen. Die Kräfte Reichweite wird in der DEM zunächst nicht näher beschrieben. In der Regel kommen bei Simulationen kurzreichweitige Kräfte zum Einsatz, da sich bei unendlich langreichweitigen Kräften jedes Teilchen mit jedem anderen in Wechselwirkung befinden müsste, was zu einer erheblichen Verlängerung der Rechenzeit führen würde.

Somit werden normalerweise die verwendeten Kräfte nach einem gewissen Abstand r_{cut} auf Null abfallen. [6]

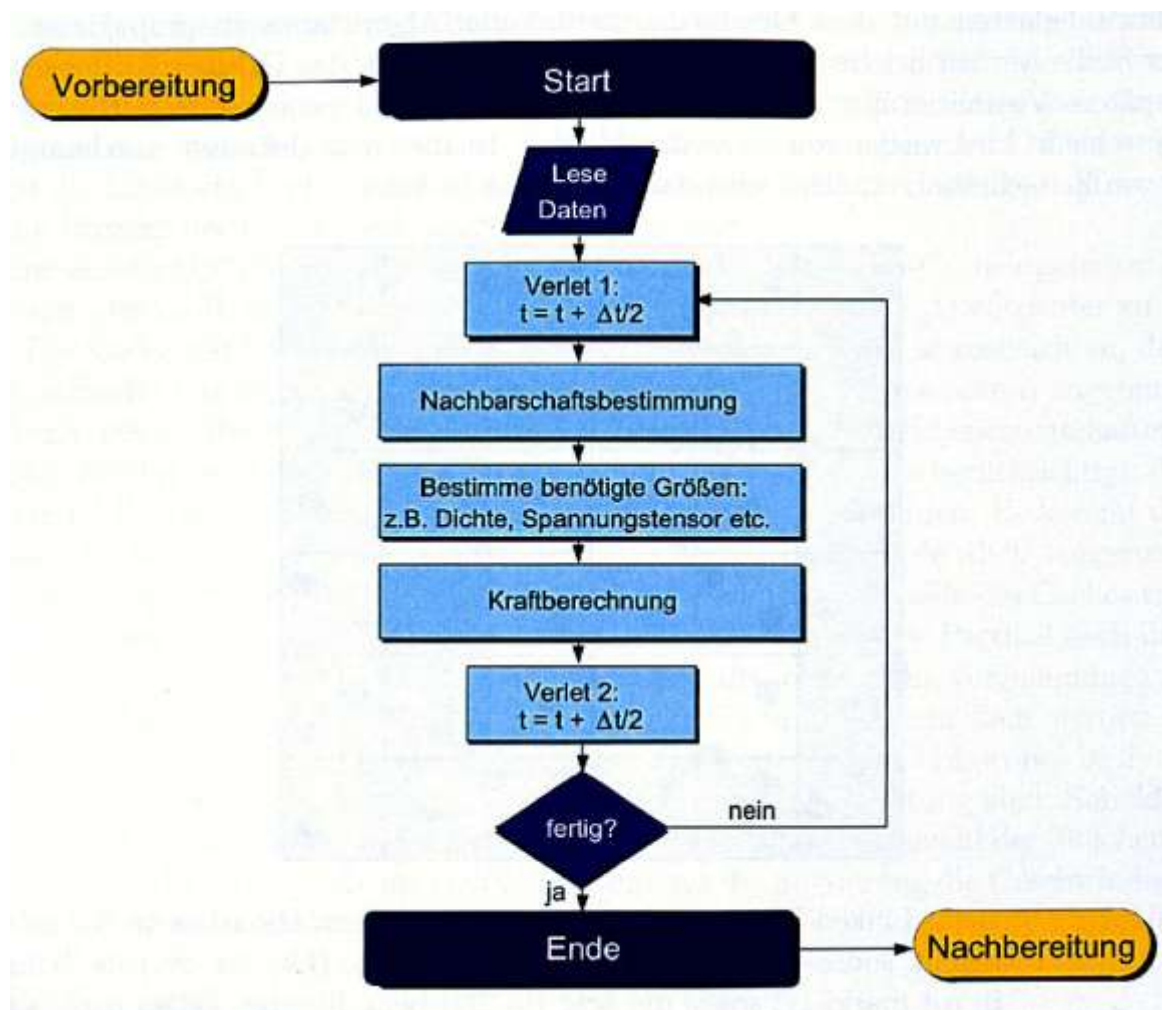


Abbildung 4.7: Allgemeiner Programmablaufplan einer Simulationsrechnung [6]

4.8 Modelle zur Kontaktspezifikation

Das bestimmende Materialverhalten an Hand des vorliegenden Beispiels Schüttgut wird durch Kontaktmodelle beschrieben. Genannte Modelle werden jedem einzelnen Partikelkontakt zugeordnet. Man unterscheidet drei unterschiedliche Kontaktmodelle:

- Steifigkeitsmodell: Umfasst die Herstellung einer elastischen Beziehung zwischen Kontaktkraft und der Relativbewegung.
- Gleitmodell: Beinhaltet die Verknüpfung der Normalkraft mit der Scherkraft, wodurch Gleiten zwischen zwei Partikeln ermöglicht wird.
- Bindungsmodell: Ermöglicht das Setzen von festen Verbindungen, sowie die Begrenzung der aufnehmbaren Normal sowie Scherkraft in einem Kontakt.

4.8.1 Steifigkeitsmodell

Die Kontaktsteifigkeit ist für die Wechselwirkungen zwischen den Kontaktkräften und Relativverschiebungen in der Normalenrichtung sowie der Scherrichtung verantwortlich.

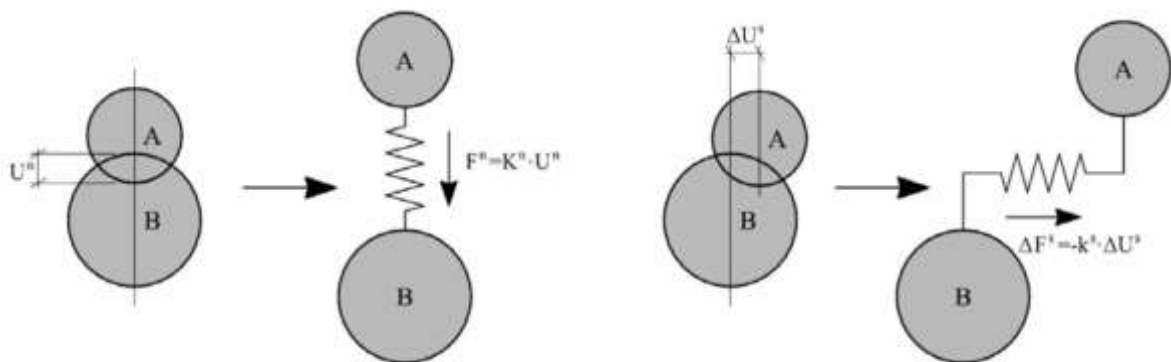


Abbildung 4.8: Steifigkeitsmodell nach Hainbücher [8]

Die Gesamtnormalkraft F_i^n setzt sich zusammen aus der sekanten Normalsteifigkeit K^n , der Partikelüberlappung U^n und dem Normalvektor n_i .

$$F_i^n = K^n \cdot U^n \cdot n_i \quad 4.14$$

Die Erhöhung der elastischen Scherkraft ΔF_i^s errechnet sich aus der Tangenten-Scherkontaktsteifigkeit k^s und dem Inkrement der Scherverschiebung ΔU_i^s .

$$\Delta F_i^s = -k^s \cdot \Delta U_i^s \quad 4.15$$

4.8.1.1 Lineares Kontaktmodell

Die Definition des linearen Kontaktmodells zweier Kontaktelemente erfolgt zum einen mittels der tangentialen Normalsteifigkeit k^n , die im vorliegenden Modell der sekanten Normalsteifigkeit K^n entspricht (siehe 4.16).

Zum Anderen wird die tangentiale Schersteifigkeit k^s , welche in Gleichung 4.17 dargestellt ist, benötigt. Besagte Kontaktelemente bestehen entweder aus Ball-Ball oder Ball-Wand Kombinationen.

Zur Kontaktsteifigkeitsermittlung wird die Vereinbarung getroffen, dass die Steifigkeiten der beiden Kontaktelemente einer Serienschaltung unterliegen. Als [A] beziehungsweise [B] werden Indizes, für die sich in Interaktion befindlichen Elemente, bezeichnet. [8]

$$k^n = \frac{k_n^{[A]} \cdot k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} = K^n \quad 4.16$$

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} \cdot k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad 4.17$$

4.8.1.2 Steifigkeitsmodell – Hertz Mindlin

Wir treffen die einfache Annahme, dass sich zwei elastische Kugeln mit den Radien r_k und r_a berühren. Folgende Abbildung 4.9 zeigt in einer Prinzipdarstellung die Kontaktfläche zwischen den besagten Kugeln.

Für jeden einzelnen Kontakt resultieren die Steifigkeiten in normaler und tangentialer Richtung (Mindlin 1949).

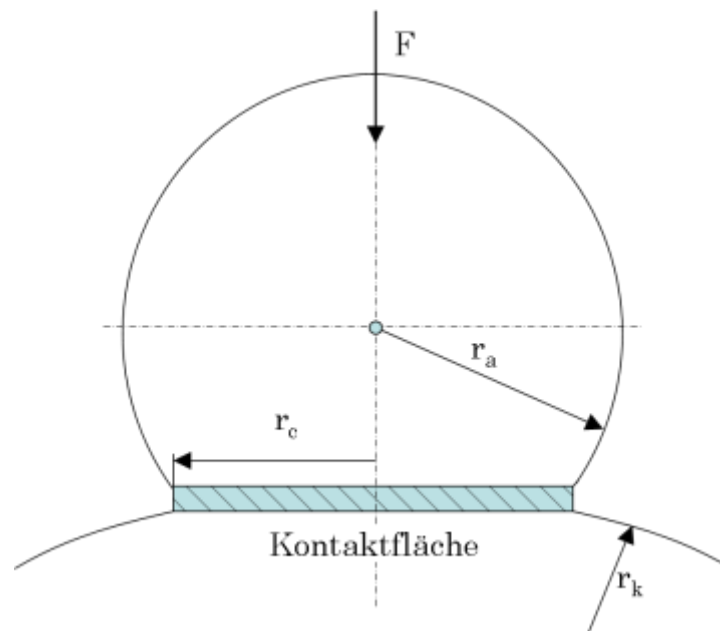


Abbildung 4.9: Hertz-Mindlin Kontakt

Die Normalsteifigkeit K_n hängt vom Schermodul G_s in Pa, vom Radius des Hertz-Mindlin Kontaktes r_c und von der Poissonzahl μ_s der sich berührenden Kugeln ab.

$$K_n = \frac{4 \cdot G_s \cdot r_c}{1 - \mu_s} \quad 4.18$$

Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Tangentialsteifigkeit im Wesentlichen, dass anstelle des Radius r_c der anfängliche Bindungsradius r_b bei der Berechnung verwendet wird.

$$K_t = \frac{8 \cdot G_s \cdot r_b}{2 - \mu_s} \quad 4.19$$

Vorausgesetzt wird hierfür eine zu Beginn vorliegende Bindung der Kugeln auf einer Kreisfläche mit Radius r_b . Zugrunde liegende Effekte diesbezüglich sind wohl beispielsweise in der Zementation oder Sinterung zu finden.

Wird der hydrostatische Druck auf die Kugeln durch Einwirkung einer äußeren Kraft F erhöht, so vergrößert sich der Hertz-Mindlin Kontakt auf einen Radius $r_c \geq r_b$.

Die Tangentialsteifigkeit des Kontaktes verschwindet im Falle einer losen Anordnung von Kugeln, ergo ist $r_b = 0$. Es besteht somit keine anfängliche Bindung. Das Kontaktverhalten wird somit bei bekanntem Material nur durch den Radius r_c beeinflusst. Tutuncu & Sharma entwickelten 1992 die nachfolgende Beziehung für r_c , in welche die externe Auflast F direkt eingeht. Weiters beinhaltet diese Gleichung die Radien r_k und r_a der sich berührenden Kugeln sowie den Schermodul G_s .

$$r_c^3 = \frac{3 \cdot (1 - \mu_s)}{4 \cdot G_s} \cdot \frac{r_k \cdot r_a}{r_k + r_a} \cdot F \quad 4.20$$

Bei folgender Gleichung 4.21, zur Berechnung der externen Auflast F , wird nur ein auf die Kugeln wirkender Druck p_h berücksichtigt.

$$F = 4 \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot p_h \quad 4.21$$

Der Radius r_c berechnet sich bei einem Größenverhältnis $r_k \gg r_a$ wie folgt:

$$r_c = \left(\frac{3 \cdot \pi \cdot (1 - \mu_s) \cdot p_h}{G_s} \cdot \frac{r_a}{r_k} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot r_k \quad 4.22$$

Als Radius r_k wird der Kornradius der größeren sich berührenden elastischen Kugeln bezeichnet, während der Radius der zweiten Kontaktkugel mit definierter Rauigkeit als r_a Benennung findet. [9]

4.8.2 Gleitmodell

Anhand des hier angeführten Gleitmodells wird das Gleiten zweier in Kontakt stehender Elemente (Kugel-Kugel oder Kugel-Wand) durch Limitierung der Scherkraft, geregelt. Im Allgemeinen ist dieses Modell immer aktiv, es sei denn eine Kontaktbindung ist gegeben, welche das Gleiten am Kontaktpunkt nicht zulässt. Definiert wird das Modell über μ den so genannten auftretenden Reibungskoeffizient im Kontaktpunkt. Erwähnenswert ist hier, dass immer der kleinere Reibungskoeffizient der beiden Kontaktelemente angewendet wird. Es kommt zum Gleiten der beiden in Kontakt stehenden Elemente, wenn die maximal zulässige Scherkontaktkraft $F_{\max}^s$ überschritten wird.

$$F_{\max}^s = \mu \cdot |F_i^n| \quad 4.23$$

Diese Gleichung wird auch als Coulombsche Gleitbedingung bezeichnet.

Gleiten wird beim folgenden Berechnungsschritt möglich, wenn F_i^s die Scherkraft im Kontakt größer ist als die maximal zulässige Scherkontaktkraft $F_{\max}^s$ (siehe 4.23). Die aktuell ermittelte Scherkraft wird hierbei auf die maximale beschränkt.

$$F_i^s \leftarrow F_i^s \cdot \left(\frac{F_{\max}^s}{|F_i^s|} \right) \quad 4.24$$

4.8.3 Bindungsmodell

Anhand des Bindungsmodells können Partikel fest miteinander verbunden werden. Man differenziert dabei grundsätzlich zwischen folgenden Modellen:

- Kontaktbindungsmodell
- Parallelbindungsmodell

Die Definition der Bindungen beider Modelle erfolgt mittels Zug- und Scherfestigkeiten. Beim Kontaktbindungsmodell erfolgt die Kontaktbindung einzig und allein im Kontaktpunkt, wodurch nur Kräfte übertragen werden können. Im Gegensatz dazu können bei einer Parallelbindung sowohl Kräfte, als auch Momente übertragen werden, was auf einen kreisförmigen Wirkungsquerschnitt zwischen den Partikeln zurückzuführen ist. Es ist zulässig beide Modelle zum gleichen Zeitpunkt an einer Kontaktstelle anzuwenden. Kugeln untereinander können verbunden werden, hingegen ist eine Verbindung zwischen Kugeln und den umgebenden Wänden nicht möglich. Erst mit Überschreitung der zulässigen Normal- und Scherkraft bricht eine Kontaktbindung zwischen zwei Kugeln auf. Eine Serienschaltung herrscht zwischen der Kontaktbindung und dem Gleitmodell, wobei die Kontaktbindung vorrangig wirkt. Ein gleichzeitiges Wirken von Parallelbindung und Gleitmodell ist auf eine Parallelschaltung zurückzuführen.

4.8.3.1 Kontaktbindungsmodell

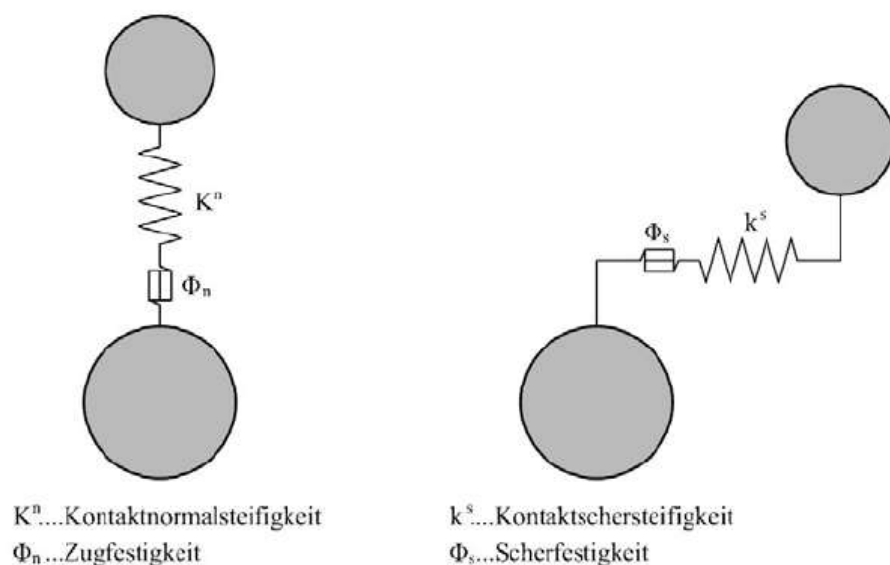


Abbildung 4.10: Kontaktbindungsmodell nach Preh [8]

Eine Kontaktbindung beinhaltet die Kombination eines Hook- mit einem St.Vernant-Körper. Wobei der Hookesche Körper eine konstante Normal- sowie Schersteifigkeit und der St.Vernant-Körper hingegen eine konstante Zug- und Scherfestigkeit aufweist. Partikel können aneinander weder Rollen noch Gleiten, solange eine einwandfreie Bindung vorliegt. Rollen und Gleiten tritt nur dann ein, wenn die Scher- und Zugfestigkeit überschritten wird, wodurch die vorhandenen Bindungen aufbrechen. Liegt keine Überlappung U^n mit ($U^n < 0$) vor, wird die Zugkraft mithilfe des Kraftverschiebungsgesetzes berechnet. Verantwortlich für den Zusammenhalt der Partikel ist hier die Kontaktbindung, mit einer Größenbegrenzung der Zugkraft, hervorgerufen durch die Bindungszugfestigkeit.

Kräfte Parameter für die Bestimmung der Kontaktbindung:

- Bindungszugfestigkeit F_c^n
- Bindungsscherfestigkeit F_c^s

Weist die Bindungszugkraft einen Wert auf der gleich oder größer ist als die Bindungszugfestigkeit, kommt es zum Bruch der Bindung. Normal- und Scherkontaktkraft werden Null gesetzt. Behält die Scherkontaktkraft ihren Wert, beziehungsweise wird dieser größer als die Bindungszugfestigkeit, so kommt es auch zum Bindungsbruch. Eine Änderung der Kontaktkräfte erfolgt nicht, außer es kommt zum Überschreiten des Reibungslimits (wurde bereits im Gleitmodell ermittelt) durch die Scherkraft. Nachstehende Abbildung 4.11 zeigt eine Darstellung des konstitutiven Verhaltens der Normal- und Scherkomponenten der Kontaktkraft und Relativverschiebung. Jeder Zeitschritt impliziert nur ein aktives Kontaktmodell oder Gleitmodell.

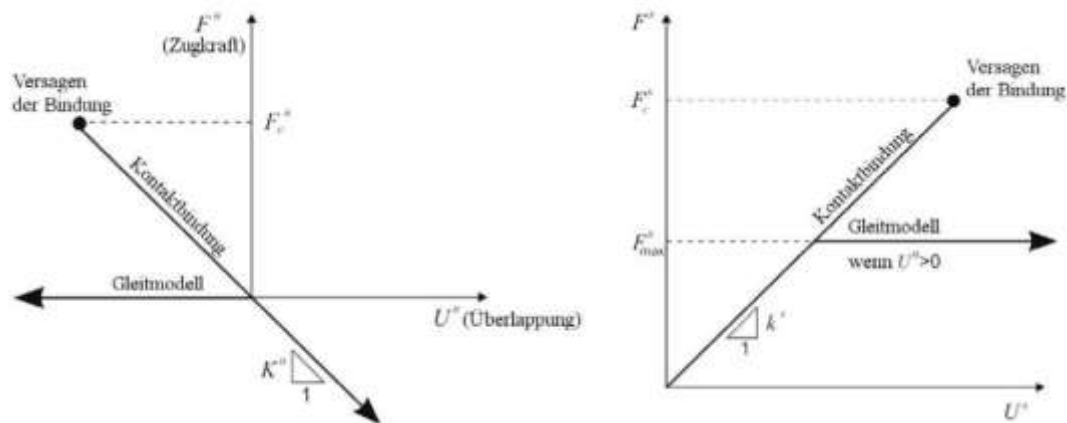


Abbildung 4.11: Konstitutive Beziehungen der Kontaktbindung nach Itasca [8]

Der linke Teil der Abbildung 4.11 zeigt unter anderem die Normalkomponente der Kontaktkraft, während rechts die Scherkomponente der Kontaktkraft dargestellt ist. F^n wird als Normalkontaktkraft bezeichnet. Ist diese positiv, so handelt es sich um eine Zugkraft. U^n beschreibt die relative Normalverschiebung. Eine Partikelüberlappung liegt dann vor, wenn der Wert größer als Null ist. F^s beschreibt die Größe der Gesamtscherkontaktkraft und U^s die Gesamtscherverschiebung relativ zum Punkt, an dem die Kontaktbindung entstanden ist.

4.8.3.2 Parallelbindungsmodell

Beim Parallelbindungsmodell erfolgt die Beschreibung des Verhaltens eines finiten Bereichs. Bei diesem Bereich handelt sich um zementartiges Material zweier Partikel. Aufgrund der vorliegenden Bindung, kommt es zu einer elastischen Interaktion, diese wirkt parallel zum Gleit- oder Kontaktbindungsmodell. Anders als bei der Kontaktbindung kommt es bei der Parallelbindung zur Übertragung von Kräften und Momenten, weiters ist ein Gleiten der Kugeln möglich. Als eine größere Anzahl elastischer Federn mit konstanter Normal- und Schersteifigkeit kann die Parallelbindung gesehen werden. Hierbei sind die Steifigkeiten über eine runde Kontaktebene, wobei der Kontaktpunkt als Mittelpunkt dient, verteilt. Für die Erzeugung der

4.9 Mechanische Dämpfung

Die kinetische Partikelenergie erfährt eine Reduktion bei der Kontaktflächen Berührung. Diese Energiereduktion ist auf Reibung zwischen den sich berührenden Partikeln zurückzuführen. Aufgrund der Tatsache, dass die Reibungskraft oftmals eine unzureichende Größe aufweist, um einen Gleichgewichtszustand im vorliegenden System bei einer vertretbaren Zeitschrittanzahl herzustellen, werden drei Dämpfungsmodelle herangezogen:

- Lokale nichtviskose Dämpfung
- Viskose (geschwindigkeitsproportionale) Dämpfung
- Kombinierte Dämpfung

4.9.1 Lokale Dämpfung

Cundall beschreibt 1987 ein Modell einer lokalen Dämpfung, bei welchem der 2. Newtonschen Bewegungsgleichung eine zusätzliche Dämpfungskraft hinzugefügt wird.

$$F_{(i)} + F_{(i)}^d = M_{(i)} \cdot A_{(i)}; i = 1 \dots 6 \quad 4.25$$

$$M_{(i)} \cdot A_{(i)} = \begin{cases} m \cdot \ddot{x}_{(i)}, & \text{für } i = 1 \dots 3 \\ I \cdot \dot{\omega}_{(i-3)}, & \text{für } i = 4 \dots 6 \end{cases} \quad 4.26$$

$F_{(i)}$, $M_{(i)}$, $A_{(i)}$ stellen die verallgemeinerten Kraft-, Massen-, und Beschleunigungskomponenten dar. $F_{(i)}$ beinhaltet den Anteil der Gravitationskraft und die Dämpfungskraft $F_{(i)}^d$ berechnet sich wie folgt zu

$$F_{(i)}^d = -\alpha \cdot |F_{(i)}| \cdot \text{sign}(v_i); i = 1 \dots 6 \quad 4.27$$

wobei

$$\text{sign}(v_i) = \begin{cases} +1, & \text{wenn } v_i > 0 \\ -1, & \text{wenn } v_i < 0 \\ 0, & \text{wenn } v_i = 0 \end{cases}$$

mit der verallgemeinerten Bewegung

$$\mathbf{v}_{(i)} = \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{(i)}, & \text{für } i = 1 \dots 3 \\ \boldsymbol{\omega}_{(i-3)}, & \text{für } i = 4 \dots 6 \end{cases} \quad 4.28$$

Die Dämpfungskraft wird anhand der Dämpfungskonstanten α bestimmt, deren Basiswert 0,7 beträgt und sowohl für jedes Partikel individuell als auch für ein Partikelkollektiv einheitlich definiert werden kann.

Diese Art der Dämpfung weist folgende Voraussetzungen, sprich Vorteile, auf:

- Es kommt nur zur Dämpfung beschleunigter Bewegungen, wodurch keine fehlerhaften Dämpfungskräfte stationärer Zustände entstehen.
- Bei α handelt es sich um eine dimensionslose Dämpfungskonstante.
- Da die Dämpfung von der Frequenz nicht beeinflusst ist, werden alle Bereiche von Partikelagglomerationen mit unterschiedlichen Eigenschwingungen gleich stark gedämpft.

Die vorliegende Dämpfung weist keinen Einfluss des Energieverlustes je Berechnungsschritt vom gewählten Zeitschritt auf. Anders als bei der geschwindigkeitsabhängigen viskosen Dämpfung, wirkt die Dämpfungskraft entgegen der Bewegung und ergibt sich aus den angreifenden Kräften.

4.9.2 Viskose Dämpfung

Beim viskosen Dämpfungsmodell verhalten sich Dämpfungskraft und Geschwindigkeit direkt proportional zueinander.

Jedem einzelnen Kontakt, welcher parallel zum existierenden Kontaktmodell wirkt, werden Normal- und Scherdämpfungselemente zugeordnet (siehe Abbildung 4.13). Die Dämpfungskräfte einer Kontaktkraft ergeben sich mit den Normal- und Scherkomponenten zu

$$\begin{aligned} D_n &= c_n \cdot |\mathbf{V}_n| \\ D_s &= c_s \cdot |\mathbf{V}_s| \end{aligned} \quad 4.29$$

Hierbei handelt es sich bei c_n und c_s um Dämpfungskoeffizienten in Normalen- und Scherrichtung, beziehungsweise bei V_n und V_s um Kontaktrelativgeschwindigkeiten ebenfalls in Normalen- sowie Scherrichtung. Weiters ist hier festzuhalten, dass die Dämpfungskraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkt.

Die bereits angeführten Dämpfungskoeffizienten c_n und c_s werden über kritische Dämpfungsverhältnisse in Normalen- und Scherrichtung β_n und β_s berechnet.

$$\begin{aligned} c_n &= \beta_n \cdot c_n^{crit} \\ c_s &= \beta_s \cdot c_s^{crit} \end{aligned} \quad 4.30$$

Es folgen die kritischen Dämpfungsfaktoren c_n^{crit} und c_s^{crit} mit:

$$\begin{aligned} c_n^{crit} &= 2 \cdot m \cdot \omega_n = 2 \cdot \sqrt{m \cdot k_n} \\ c_s^{crit} &= 2 \cdot m \cdot \omega_s = 2 \cdot \sqrt{m \cdot k_s} \end{aligned} \quad 4.31$$

Hierbei ist m die effektive Systemmasse, ω_n und ω_s stellen die Eigenkreisfrequenzen des ungedämpften Systems dar. Als Kontaktsteifigkeiten werden k_n und k_s bezeichnet. Am Beispiel eines Kugel-Wand-Kontaktes ist m durch die Masse der Kugel definiert. Kommt es zum Kugel-Kugel Kontakt, erfolgt die Definition von m laut nachstehender Gleichung mit den in Kontakt stehenden Kugelmassen m_1 und m_2 .

$$m = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad 4.32$$

In Abbildung 4.13 sind Interaktionen des viskosen Dämpfungsmodells mit dem linearen Kontaktmodell in Normalenrichtung und der Scherrichtung ersichtlich.

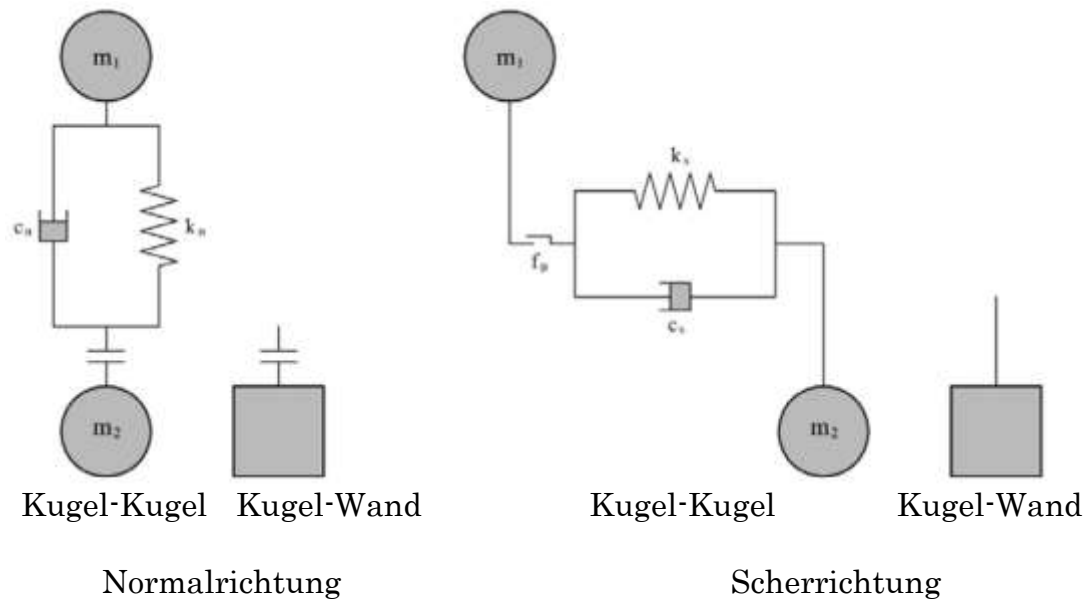


Abbildung 4.13: Interaktion viskoses Dämpfungsmodell mit linearem Kontaktmodell nach Itasca [8]

Liegt eine viskose Dämpfung vor, so wird diese mit dem kritischen Dämpfungsverhältnis β charakterisiert. Dieses Verhältnis ist festgelegt als vorhandene Dämpfung zur kritischen Dämpfung. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen kritisch gedämpften, schwach gedämpften und stark gedämpften Systemen. Ein kritisch gedämpftes System liegt bei $\beta = 1$ vor. Der System Gleichgewichtszustand ist schnellstmöglich erreicht. Mit $\beta < 1$ hingegen wird ein schwach gedämpftes System bezeichnet. Hierbei kommt es zu großen Auslenkungen, starken Schwingungen und langen Abklingzeiten. Ein stark gedämpftes System mit $\beta > 1$ reagiert schnell auf Resonanz bei geringem Nachschwingen.

Die Rückprallhöhe fester Materie wird in Simulationsprogrammen anhand des Restitutionskoeffizienten R angegeben. Besagter Koeffizient besteht wiederum aus zwei Teilkoeffizienten R_n und R_s in Normalen bzw. Scherrichtung (siehe 4.33), welche jeweils aus den Verhältnissen von Kontaktgeschwindigkeit vor und nach dem Aufprall des Partikels an einer Oberfläche gebildet werden.

$$R_n = \frac{v_n^f}{v_n^i}$$

$$R_s = \frac{v_s^f}{v_s^i}$$
4.33

Vor dem Aufprall werden die Geschwindigkeiten mit v_n^i und v_s^i , beziehungsweise nach dem Aufprall mit v_n^f sowie v_s^f , bezeichnet.

Der Restitutionskoeffizient R in Abhängigkeit des kritischen Dämpfungsverhältnisses β kann beispielsweise anhand von Fallversuchen, wie in Abbildung 4.14 veranschaulicht, generiert werden.

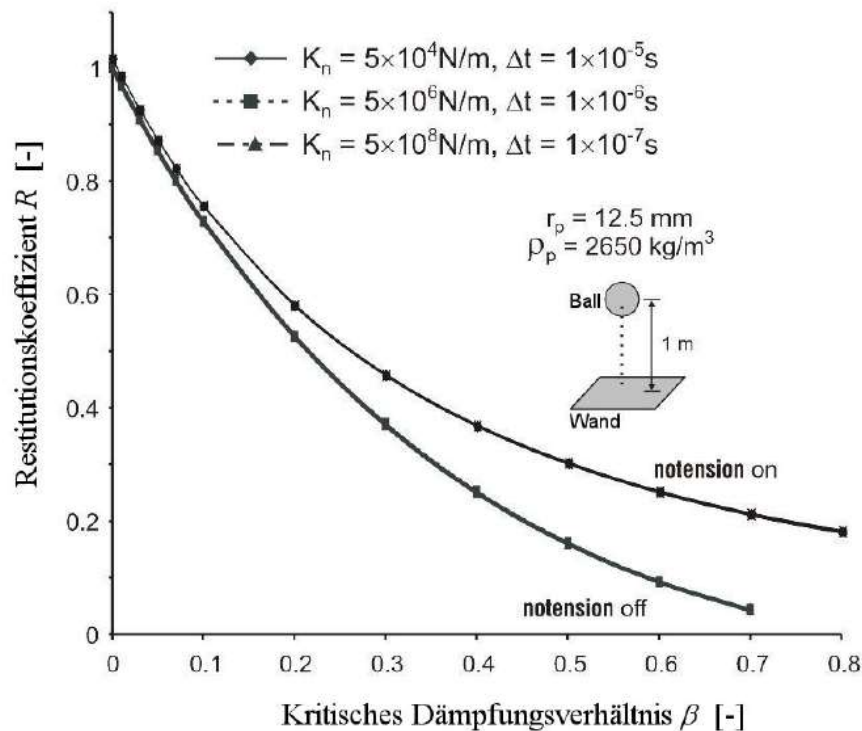


Abbildung 4.14: Restitutionskoeffizient R über Kritischem Dämpfungsverhältnis β [8]

4.9.3 Kombinierte Dämpfung

Die Grundlage des kombinierten Dämpfungsmodells beruht auf der Geschwindigkeit sowie der Ableitung der vorherrschenden Kraft. Ein

wesentlicher Unterschied zur lokalen Dämpfung besteht darin, dass hier weniger Energie umgewandelt wird.

Eine Aktivierung der in Gleichung 4.27 angeführten Dämpfungskraft erfolgt ausschließlich, wenn die Geschwindigkeitskomponente ihr Vorzeichen ändert. Bleibt die Geschwindigkeit beispielsweise konstant, so kommt es möglicherweise zu keinen Nulldurchgängen, wodurch wiederum keine Energieumwandlung durch Dämpfung stattfindet.

Aufgrund der Tatsache der fehlenden Effizienz und des spärlichen Einsatzes des Modells wird hier auf eine weitere Ausführung verzichtet. [8]

5 Modellierung eines Schneckenförderer Bunkeraustrag Vorganges mit DEM

5.1 Basis der Modellierung – Doppelschneckenförderer Versuchsanlage

Als Ausgangsbasis für die durchzuführende Simulation wurde eine Doppelschneckenförderer Versuchsanlage DSF VA (siehe Abbildung 5.1) der Firma Doubrava Industrieanlagen GesmbH & Co KG herangezogen. In den bereits vorangegangenen Diplomarbeiten von Szecsenyi F. und Grohmann P. finden sich unter anderem diverse Messreihen beziehungsweise Datenauswertungen hinsichtlich besagter Versuchsanlage.

Messergebnisse älterer Versuchsreihen wurden hier mittels Frequenz Umrichter geliefert, wobei der Antrieb durch einen Kegelaufsteck Getriebemotor erfolgte.

Um die Drehbewegungen und Aufzeichnungsmöglichkeiten effizienter und exakter gestalten zu können, wurde ein Synchronbremsmotor mit Servo-Umrichter in die Anlage integriert. In weiterer Folge war es nun möglich Leistung, Drehmoment und Drehzahl der VA mit der zugehörigen Software exakter zu bestimmen.

Die Eckdaten der Versuchsanlage wurden in nachstehender Tabelle zusammengefasst:

Schneckenlänge L	1890 mm
Schneckensteigung s	180 mm
Schneckensteigungswinkel α	18,72°
Schneckenaußendurchmesser d_a	235 mm
Wellendurchmesser d_i	76 mm
Anzahl der Schnecken i	2
Bunkerlänge a	930 mm
Bunkerbreite b	520 mm
Bunkerhöhe c	960 mm

Tabelle 5.1: DSF VA Eckdaten

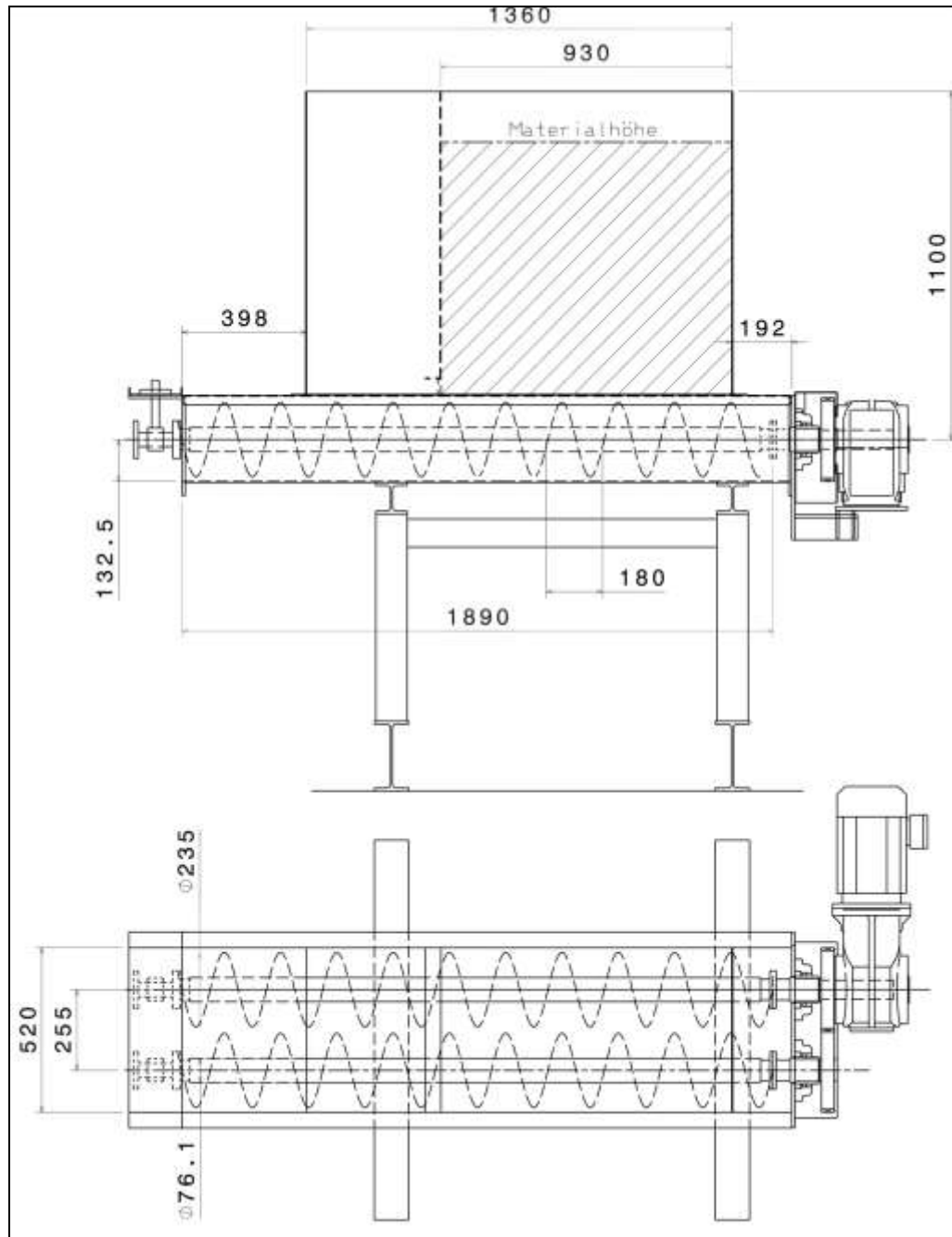


Abbildung 5.1: Doppelschneckenförderer Versuchsanlage DSF VA

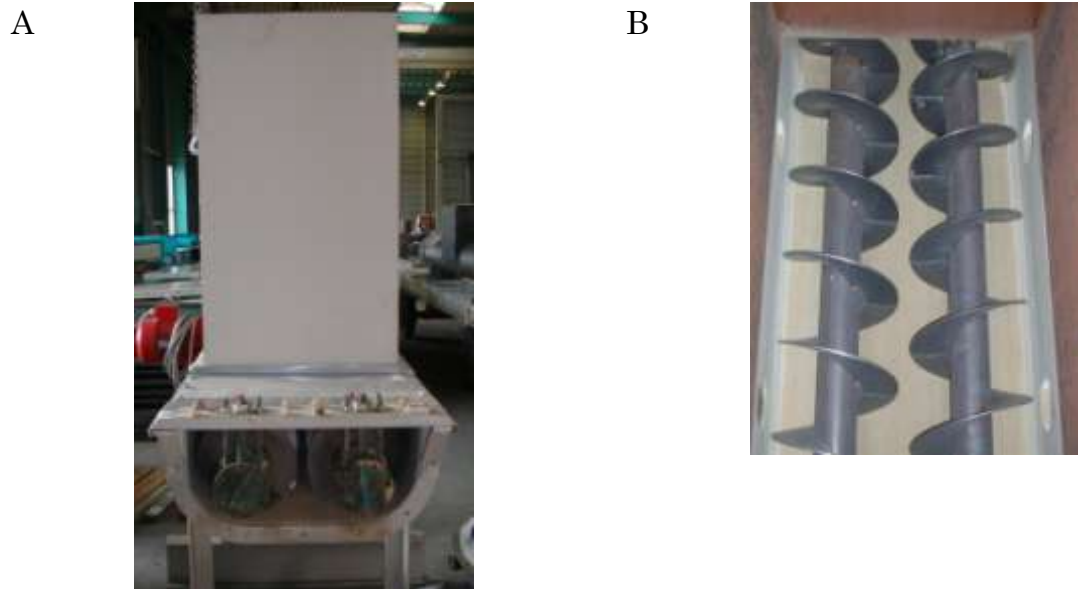


Abbildung 5.2: DSF VA Firma Doubrava (A),
Austragschnecken aus Bunkersicht (B)

5.2 Simulationsvorbereitung und Durchführung

Die Durchführung der Simulation erfolgte mit der Simulationssoftware EDEM 2.2 und 2.3 der Firma DEM Solutions. Hierfür war es notwendig ein 3D-Modell der Versuchsanlage (siehe Abbildung 5.1) zu generieren. Die Ausführung erfolgte mit Catia V5R19. Zum gegebenen Zeitpunkt wurde dann das 3D-Modell (wie folgt ausgeführt) in die Simulation implementiert.

5.2.1 CREATOR: Bestimmung des Modells

Nach dem Start von EDEM befindet man sich in der Hauptmaske der Simulationssoftware.

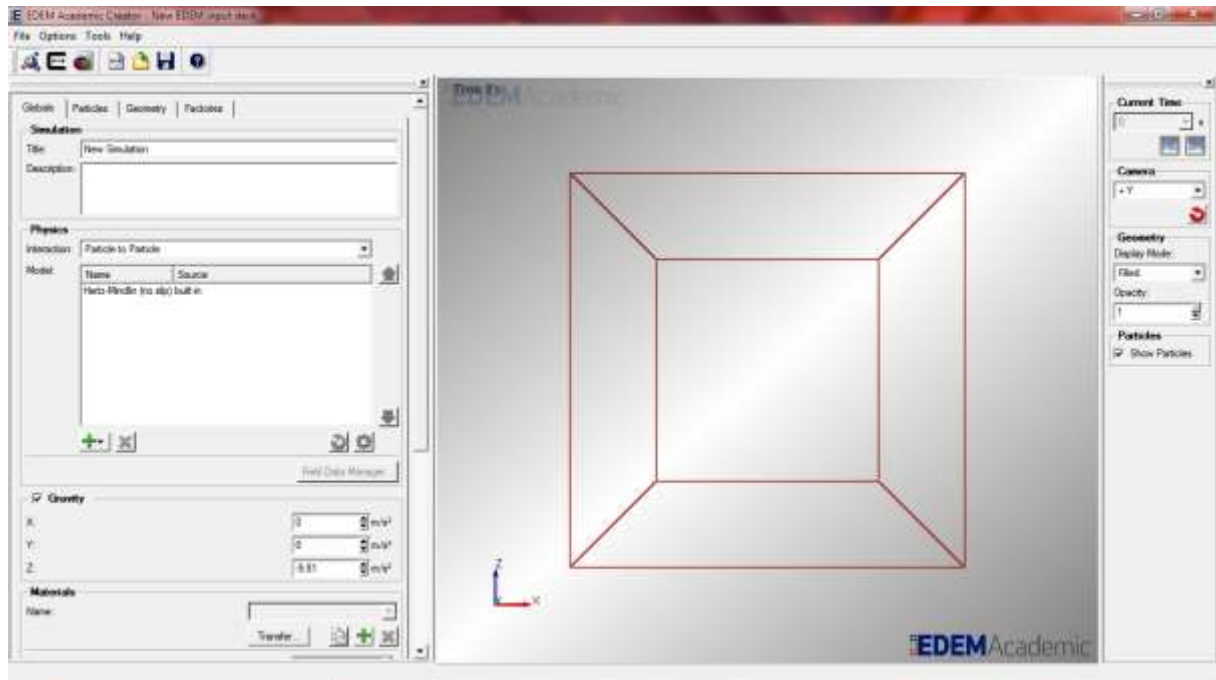


Abbildung 5.3: Hauptmaske Simulationssoftware

Zu Beginn legt man einen Namen und Speicherort der durchzuführenden Simulation des Schneckenförderers fest [unter File, Save As..] (z.B. Screw_Auger.dem) .

5.2.1.1 Schritt 1: Globale Modellparameter setzen

Wahl der Einheiten

Die Einheiten werden wie folgt gewählt beziehungsweise festgelegt [unter Options, Units]:

- Angle to degrees → deg
- Angular acceleration → deg/s²
- Angular velocity → deg/s
- Length → mm

Simulationstitel und Beschreibung

Als nächstes wird ein Simulationstitel und gegebenenfalls eine Beschreibung in der Registerkarte „Globals“ eingegeben.

Festlegung des Kontaktmodells

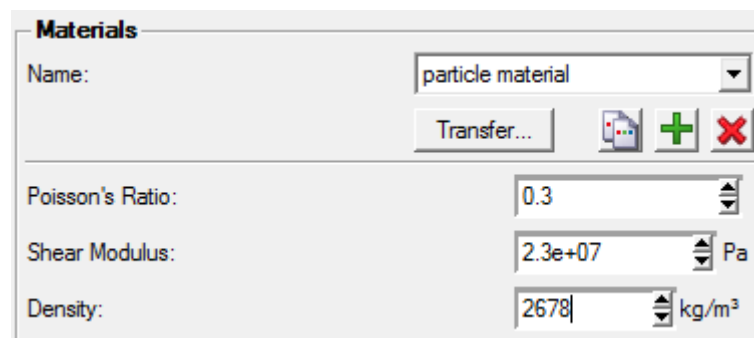
Der Abschnitt „Physics“ beinhaltet die Kontaktmodelle und Kräfte. Ein Kontaktmodell beschreibt das Kontaktverhalten von Elementen, wenn diese mit anderen in Kontakt treten.

Für die Wechselwirkung des Partikel-Partikel Kontaktes sowie des Partikel-Geometrie Kontaktes wird jeweils das Hertz-Mindlin Kontaktmodell ausgewählt.

Gravitation und Materialdefinitionen

Jedes Partikel bzw. jeder Geometrieabschnitt, welche in einem Modell eingesetzt werden, wird eigens dafür eindeutig bestimmt. Alle Materialien und deren Wechselwirkungen sind im Bereich „Materials“ zu definieren.

1. Im Abschnitt „Gravity“ wird die Z-Komponente der Erdbeschleunigung des Koordinatensystems mit $-9.81 \cdot \frac{m}{s^2}$ festgelegt.
2. Im Materialabschnitt ermöglicht ein Drücken der  Schaltfläche das Generieren eines neuen Materials. Durch markieren des Textes kann dieser beliebig umbenannt werden. Im vorliegenden Fall wird der Materialname in „particle material“ umbenannt, beziehungsweise nachstehende Größen werden eingegeben.
3. Die Querkontraktionszahl, der Schubmodul sowie die Dichte des Partikelmaterials sind wie folgt zu setzen:



Materials	
Name:	particle material
	Transfer...   
Poisson's Ratio:	0.3
Shear Modulus:	2.3e+07 Pa
Density:	2678 kg/m³

Abbildung 5.4: Partikel Materialdefinition

Das Material des Schneckenförderers (siehe Abbildung 5.5) kann aus der vorhandenen Materialdatenbank importiert werden.

Als Erstes drückt man die „Transfer Schaltfläche“ wodurch sich die Materialdatenbank öffnet. Jetzt wählt man aus dem Materialstammbaum „steel“ aus und durch Drücken der  Schaltfläche wird das ausgewählte Material in das vorhandene Simulationsmodell kopiert. Natürlich ist eine selbstständige Materialeingabe analog des bereits erläuterten Beispiels „particle material“ möglich. Nachstehende Abbildung 5.5 zeigt die Definitionen des Schneckenförderer Materials.

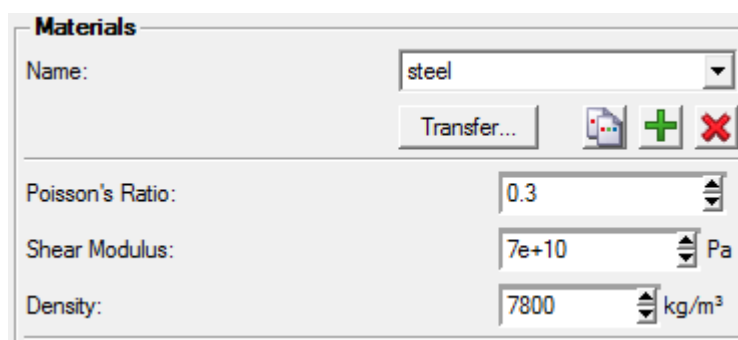


Abbildung 5.5: Schneckenförderer Materialdefinition

Material Wechselwirkungen setzen

1. Man wählt das zuvor definierte Partikelmaterial aus der Auswahlliste aus.
2. Nach dem Klicken der  Schaltfläche bei „Interaction“ wird das mit dem Ausgangsmaterial in Wechselwirkung zu setzende Material ausgewählt.
3. Die Koeffizienten beim Partikel-Partikel Kontakt sind wie folgt zu setzen:



Abbildung 5.6: Wechselwirkung Partikel – Partikel

4. Es wird nun die  Schaltfläche erneut gedrückt und als Material Stahl ausgewählt.

5. Aufgrund der gewählten Materialwechselwirkung zwischen den Partikeln und dem Bauteil werden die Koeffizienten analog der nachstehenden Abbildung eingegeben.



The screenshot shows a software interface for defining particle interactions. At the top, there is a label 'Interaction:' followed by a dropdown menu set to 'high-stiffness'. To the right of the dropdown are two buttons: a green '+' and a red 'X'. Below this, there are three input fields with labels and numerical values: 'Coefficient of Restitution:' with a value of '0.2', 'Coefficient of Static Friction:' with a value of '0.5', and 'Coefficient of Rolling Friction:' with a value of '0.01'. Each input field has a small up/down arrow button to its right.

Abbildung 5.7: Wechselwirkung Partikel – Stahl

5.2.1.2 Schritt 2: Definition der Basispartikel

In der Registerkarte „Particles“ werden alle Arten von Partikeln, welche für das Simulationsmodell verwendet werden, generiert. Diese Partikel werden auch als Basis oder Musterpartikel bezeichnet.

Erzeugen eines neuen Partikeltyps

1. Man klickt auf die Registerkarte „Particles“
2. Durch Betätigen der  Schaltfläche wird ein neues Grundpartikel hergestellt. Anschließend wird der Name in „grain particle“ umbenannt.

Oberflächen und Eigenschaften Definitionen

Partikel bestehen aus einer oder mehreren kugelförmigen Oberflächen. Da das Einzelkornpartikel im hier vorliegenden Fall aus einer sphärischen Oberfläche besteht, ist es nicht notwendig weitere Oberflächen zu erzeugen. Eine Oberfläche wird automatisch kreiert, wenn man ein neues Partikel generiert.

Man setze die nachfolgenden Parameter im Abschnitt „Surfaces“ und „Properties“ wie folgt:

1. Radius → 10 mm
2. Material → particle material

3. Nach dem Drücken der „Calculate Properties“ Schaltfläche erfolgt die Auswahl sowie die Bestätigung der Option „Surfaces“ und „Automatically Center Particle“.

5.2.1.3 Schritt 3: Definition der Geometrie

Im nächsten Schritt erfolgt die Definition der Schneckenförderer Geometrie, welche im Simulationsmodell verwendet wird.

Importieren der Schneckenförderer Geometrie

Die Geometrie des Schneckenförderers, welche vorab in einem CAD System erzeugt wurde, wird nun in EDEM importiert. Bei den Hauptbauteilen des Schneckenförderers handelt es sich um die Schneckenblätter, deren Kerne und der Hauptgeometrie. Besagte Hauptgeometrie vereint Bunker und Schneckenfördertrog.

1. Anwählen der „Geometry“ Registerkarte
2. Durch Klicken auf die „Import“ Schaltfläche im Abschnitt „Sections“ öffnet sich ein Auswahlfenster, um in weiterer Folge die Geometrie des Schneckenförderers einzubinden.
3. Die voreingestellten „Geometry Import Parameters“ werden belassen und bestätigt.
4. Im nächsten Schritt wird bei den „Import Options“ die Einheit auf „Millimeters“ gesetzt.

Der Ursprung des Koordinatensystems wird beim Importieren der Geometrie automatisch festgelegt.

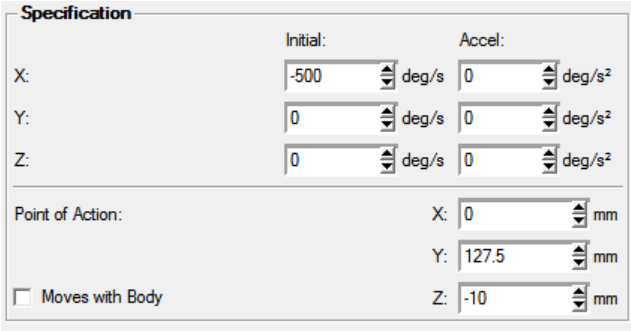
Der Schneckenförderer wird nun im so genannten „Viewer“ dargestellt. Er besteht aus fünf Einzelteilen, welche im Abschnitt „Sections“ in der Auswahlliste angeführt sind. Wird ein Bauteil ausgewählt, so weist dieses Bauteil im 3D-Modell die „aktive“ Farbe rot auf. Um innen liegende Geometrien anzuzeigen wird im Bereich „Geometry Display Mode“ „Mesh“ ausgewählt.

1. Jetzt wird jede einzelne Geometrie aus der Liste ausgewählt und entsprechend in Kern 1, Kern 2, Schneckenblatt 1 und 2 sowie Hauptgeometrie umbenannt.
2. Jeder Geometrie wird in weiterer Folge das bereits definierte Material Stahl zugeordnet.

Spezifikation der Förderschneckenbewegung

Ausgewählte Bereiche von Geometrien können während der Simulation in Bewegung versetzt werden. Im vorliegenden Simulationsmodell rotieren die Schnecken um die Partikel zu fördern.

1. Auswahl von Schneckenblatt 1 (es handelt sich um eine Betrachtungsweise des Schneckenförderers von der linken Seite in Abbildung 5.12) aus der Auswahlliste
2. Durch Klicken auf die „Dynamics“ Registerkarte gelangt man zu dessen Haupteingabefeldern.
3. Mit der Betätigung der  Schaltfläche wird eine neue Bewegung hergestellt, wobei die Art „linear Rotation“ ausgewählt wird. Die Schraube rotiert mit einer festgelegten Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse der Schraubenwelle. Werte sind der nachstehenden Abbildung zu entnehmen.



	Initial:	Unit	Accel:	Unit
X:	-500	deg/s	0	deg/s ²
Y:	0	deg/s	0	deg/s ²
Z:	0	deg/s	0	deg/s ²

Point of Action:	
X:	0 mm
Y:	127.5 mm
Z:	-10 mm

☐ Moves with Body

Abbildung 5.8: Spezifikation der Rotation Welle 1

Für das Schneckenblatt 2 (rechte Schnecke) wurden die Werte entsprechend der folgenden Abbildung adaptiert.

	Initial:	Unit	Accel:	Unit
X:	500	deg/s	0	deg/s ²
Y:	0	deg/s	0	deg/s ²
Z:	0	deg/s	0	deg/s ²

Point of Action:	X:	Y:	Z:
	0 mm	-127.5 mm	-10 mm

☐ Moves with Body

Abbildung 5.9: Spezifikation der Rotation Welle 2

Herstellung und Positionierung der Partikelgenerierungsebene

Es wird definiert wo, wann und wie Partikel in der Simulation auftreten. Jeder Partikel Generierungsursprung basiert auf einem Geometrie Abschnitt, dieser kann entweder als real oder virtuell definiert werden. Im hier vorliegenden Simulationsmodell wird eine rechteckige Ebene zur Partikelgenerierung am oberen Ende des Bunkers festgelegt.

1. Ausgehend von der „Geometry“ Registerkarte wird im Bereich „Sections“ die  Schaltfläche und anschließend Polygon betätigt.
2. Jetzt wird „Section“ in „Factory plate“ umbenannt.
3. Nach dem Drücken der Polygon Registerkarte, legt man die Anzahl der Ecken, weiters den X/Y/Z Mittelpunkt sowie die „Dimensions“ des Polygons wie folgt fest:

Specification	
Number of Edges:	4

	Center:	Unit	Rotation:	Unit
X:	660	mm	0	deg
Y:	0	mm	0	deg
Z:	650	mm	0	deg

Dimensions:	
Side 1:	930 mm
Side 2:	520 mm

Abbildung 5.10: Ursprung der Partikelgenerierungsebene

4. Als letzter wichtiger Punkt dieses Schrittes wird in der vorliegenden Simulation in der „Details“ Registerkarte der Typ auf virtuell gesetzt, da es sich bei der Partikelgenerierung um keinen physischen Teil der Maschine handelt.

5.2.1.4 Schritt 4: Definition des Berechnungsraumes

In diesem Schritt wird der Berechnungsraum definiert, in welchem die Simulation stattfindet.

Definition des Modell Berechnungsraumes

Der Berechnungsraum, dargestellt anhand der roten Box, ist der Bereich in welcher die Simulation stattfindet. Jedes Partikel wird durch den Simulator gestoppt, wenn sich dieses aufgrund seiner Bewegungsbahn aus dem Berechnungsraum hinaus bewegt. Die Größe des Berechnungsraumes hat einen direkten Einfluss auf die Simulationszeit. Je größer der Simulationsraum gewählt wird, desto länger wird die benötigte Zeitspanne, die für eine Durchführung der Simulationsberechnung notwendig ist.

1. Man wählt die „Geometry“ Registerkarte aus
2. Die „Auto Update from Geometry“ Option wird aktiviert, wodurch der Berechnungsraum automatisch begrenzt wird.
3. Jetzt wird die „Auto Update from Geometry“ Option deaktiviert und der maximale X Wert auf 2200 mm gesetzt. Dies ermöglicht eine genaue Beobachtung der austretenden Partikel aus dem Schneckenförderer hinaus.

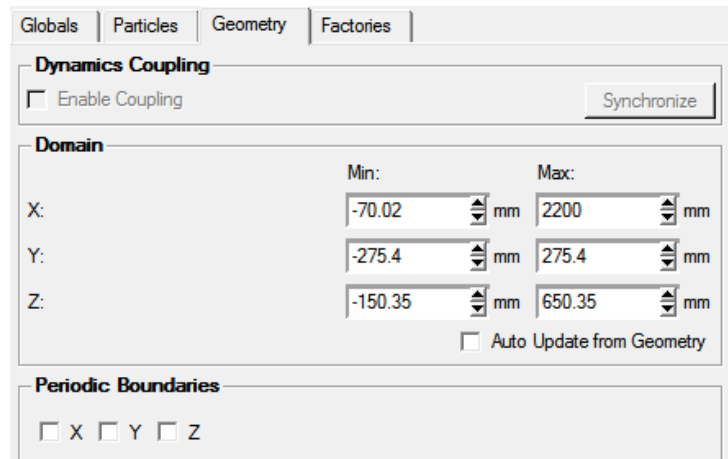


Abbildung 5.11: Definition des Simulationsraumes

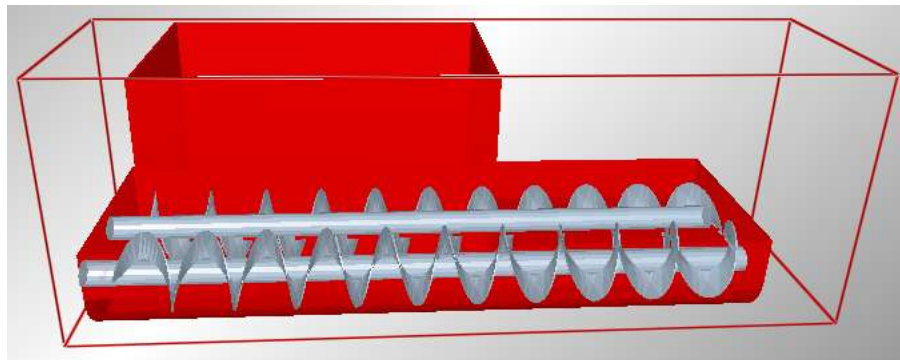


Abbildung 5.12: Schneckenförderer Simulationsraum

5.2.1.5 Schritt 5: Definition der Partikelgenerierung

Anhand der Definition einer Partikelgenerierung wird festgelegt, wie, wann und wie viele in die Simulation eingebracht werden.

Partikelgenerierung erstellen

1. Drücken der Registerkarte „Factories“
2. Als nächstes betätigt man die  Schaltfläche, um eine neue Partikelgenerierung zu erzeugen. Diese wird in „Factory“ umbenannt.

Setzen des Generierungs – Typs

1. „Factory Type“ ist auf „dynamic“ zu setzen
2. Die Zahl der zu erzeugenden Partikel wird mit 40000 festgelegt.
3. Die Partikelgenerierungsrate pro Sekunde wird mit 50000 gewählt.

Setzen der Generierungsgrundeinstellungen

1. Im Abrollmenü wird die zuvor erzeugte Partikelgenerierung ausgewählt. Wird diese nicht angezeigt, so ist sicherzustellen, dass der Ursprung besagter Partikelgenerierung virtuell gesetzt wurde.
2. Jetzt wird für die Größe „normal“ ausgewählt und anschließend die Größeneinstellungsschaltfläche betätigt.
3. Der mittleren Abweichung wird der Wert 1, der Standard Abweichung 0,05 zugewiesen – bzw. erfolgt eine Auswahl von „Skalieren mit Radius“.
4. Man setzt die Position auf „Random“ um sicherzustellen, dass die Partikel über dem gesamten Flächeneintrittsgebiet regellos erzeugt werden.
5. Die Geschwindigkeit wird stationär gesetzt, anschließend drückt man die daneben angeordnete Schaltfläche für Einstellungen.
6. Weiters wird die Geschwindigkeitskomponente in Z-Richtung auf $-10 \cdot \frac{m}{s}$ festgelegt, alle anderen Geschwindigkeitskomponenten werden bei den Voreinstellungen 0 belassen. In diesem Modell sollen sich die Partikel abwärts mit einer vordefinierten Geschwindigkeit gegen den Boden des Bunkers bewegen.
7. Man wählt File → Speichern

Im folgenden Schritt wird das Simulationsprogramm im „Simulator“ gestartet.

5.2.2 SIMULATOR: Durchlauf der Simulation

5.2.2.1 Schritt 1: Setzen der Zeit – Optionen/Einstellungen

Zeitschritt Setzung

Im Simulator entspricht der Zeitschritt dem Abstand zwischen den einzelnen Iterationen, sprich den Rechenschritten. Man setzt einen Zeitschritt von 20% des Rayleigh Zeitschrittes, da die Mehrheit der Partikel in diesem Modell dicht gepackt sind (Erfahrungswerte aus dem Tutorial).

1. Betätigen der Simulator  Schaltfläche in der Symbolleiste

2. Man setzt den Zeitschritt auf 20%

Simulationszeit und Datenaufzeichnungsfrequenz festlegen

Die Simulationszeit entspricht der realen Zeitdauer, welche die Simulation repräsentiert.

1. Eine Festlegung der Gesamtsimulationsdauer erfolgt mit 10 sec
2. Man setzt die Aufzeichnungsrate auf 0,05 sec

Gewonnene Resultate in einem Datenpunkt werden hier beispielsweise alle rund 700 Zeitschritte aufgezeichnet.

(In einer Simulation ist es nicht notwendig jeden Datenpunkt pro Iteration aufzuzeichnen, da dies die Simulation erheblich verlangsamen würde, hervorgerufen durch eine enorm große erzeugte Datenmenge).

Als Beispiel würde eine Datenaufzeichnung für jeden Zeitschritt dieser Simulation theoretisch über 130.000 Datenpunkte ergeben.

5.2.2.2 Schritt 2: Festlegung der Raster Optionen

Die Raster-Optionen dienen zum Optimieren der Simulation.

1. Vorab setzt man die „Cell Size“ auf 2 Rmin
2. Die Anzahl der Rasterzellen sollte jetzt weniger als 100.000 betragen, ist dies nicht der Fall wird die Rastergröße schrittweise angehoben, damit das zuvor angegebene Limit nicht überschritten wird.

Hinweis: Die erreichten Simulationsresultate werden aufgrund der Rasterzellenanzahl nicht beeinflusst. Einzig und allein die Zeitdauer zum Erreichen dieser ist von der Rastergröße bzw. von der Anzahl der Zellen abhängig.

5.2.2.3 Schritt 3: Simulationsdurchlauf

Im Vorfeld des Simulationsdurchlaufes kann man einige Schritte durchführen, um die Durchlaufzeit zu minimieren.

1. Der „Solve Report“ wird geschlossen
2. Man stelle sicher, dass die Option „Auto-Update“ ausgeschaltet ist

Für eine optimale Beobachtung der Simulation lässt sich der „Geometry Display Mode“ wie folgt ändern.

3. Die Anzeige der Geometrie wird auf „Mesh“ gesetzt

Nun ist man für die Simulation bereit.

4. Zum Starten der Simulation wird die „Progress“ Schaltfläche, welche am unteren Ende des Simulationsfensters positioniert ist, gedrückt (siehe Abbildung 5.13).

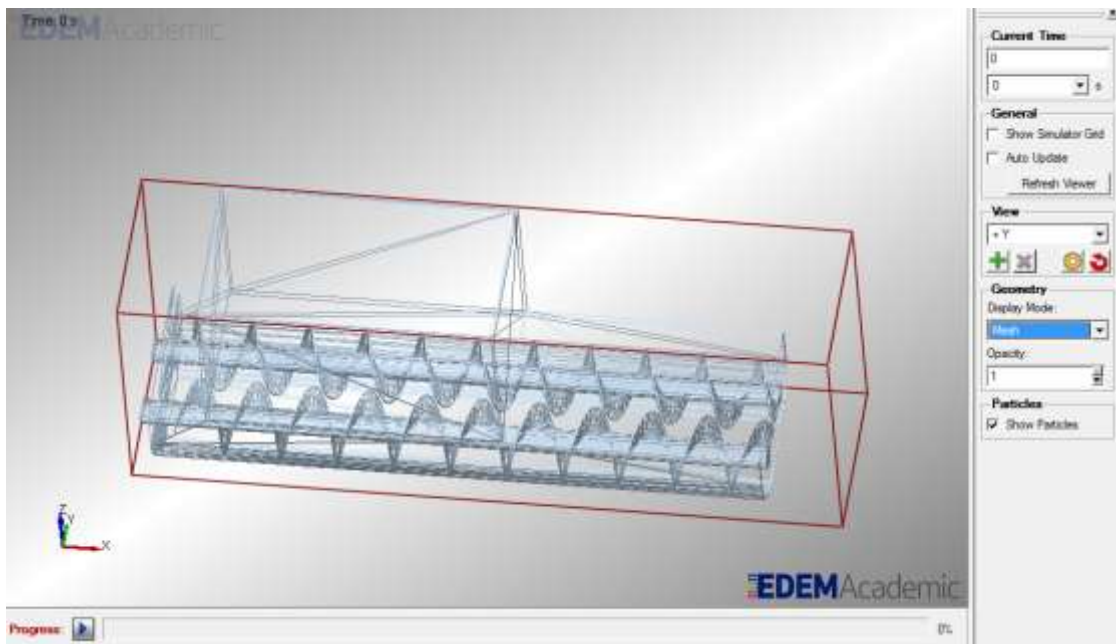


Abbildung 5.13: Viewer und zugehörige Controls (links unten: Progress Schaltfläche)

5. Ein Drücken der „Refresh Viewer“ Schaltfläche ermöglicht zu jedem Zeitpunkt die Darstellung zu aktualisieren, wodurch der Simulationsverlauf besser verfolgt werden kann.

5.2.3 ANALYSATOR: Ergebnisanalyse

Der Analysator wird zum Nachprüfen, Überwachen sowie Analysieren der Simulationsergebnisse verwendet.

1. Betätigen der Analysator  Schaltfläche in der Symbolleiste

2. Durch Drücken der „Play“ Schaltfläche gelangt man zu jedem Zeitschritt der Simulation.

5.2.3.1 Schritt 1: Konfiguration der Anzeige

Einzelne Geometrieabschnitte können unterschiedlich dargestellt werden. Sei es beispielsweise als feste Körperform, in Form von Gitternetzlinien oder als Punkte, basierend auf den Netzverbindungen. Weiters ist eine Änderung der Opazität möglich. Diese Darstellungseinstellungen können individuell auf alle Teile der Geometrie angewandt werden.

1. Man betätigt die „Model“ Registerkarte um den Modellabschnitt zu öffnen
2. Zur Übung wird die Geometrieanzeige des Bunkers transparent, die Kerne werden als Gitternetze sowie die Schneckenblätter 100% blickdicht geändert (Opazität = 1,0).
3. Jetzt wird die Anzeige des Bunkers auf Gitternetz gesetzt und den Schneckenblättern wird die Darstellungsart „filled“ zugewiesen. Die optische Anzeige der Partikelgenerierungsfläche wird ausgeschaltet.

Konfiguration der Partikel

Die Partikeldarstellung kann in gleicher Weise geändert werden wie die der zuvor angeführten Geometrie. Weiters ist es möglich die Partikel in unterschiedlichen Formen darzustellen. Eine dieser Darstellungsform ist z.B. die „Stream“ Form, diese zeichnet die Bahnkurven der sich durch die Simulation bewegendenden Partikel auf.

1. Mit der „Jump to Start“ Schaltfläche, gelangt man an den Simulationsbeginn (bei der Zeit $t=0$).
2. Nun stellt man den „Geometry Display Mode“ auf „filled“ mit einer Opazität von 0,3 und drückt „Apply“.
3. Im „Particles“ Abschnitt wird die Darstellungsart auf „Stream“ gesetzt und ebenfalls „Apply“ gedrückt.
4. Durch Betätigung der „Play“ Schaltfläche ist eine Beobachtung der Strömungsdarstellung bzw. Abfolge möglich.

5. Nach dem Drücken der „Stop“ Schaltfläche wird der Darstellungstyp auf den voreingestellten zurückgesetzt.

Konfiguration der Kontakte

Definition der Kontaktdarstellung im Modell. Im Simulationsprogramm besteht die Auswahlmöglichkeit, sich entweder alle Kontakte oder aber auch nur Teilmengen dieser darstellen zu lassen. Beispiele hierfür sind Partikel-Partikelkontakte, aber auch bestimmte Abschnitte von Partikel-Wandkontakten. Es gibt weiters verschiedene Arten von Kontaktdarstellungen, wie beispielsweise die Kontaktvektor Darstellung oder eine Normal Überlappung der Partikel.

1. Die Partikelanzeige wird zur Standardeinstellung hin geändert und anschließend mit „Apply“ bestätigt.
2. Man versucht nun die Anzeige der Kontakte zwischen den verschiedenen Arten der Elemente ein und auszuschalten. Um die Kontakte besser sehen zu können, kann es hilfreich sein die Partikeldarstellung auszuschalten.
3. Nun schaltet man die Kontaktdarstellung wieder aus und überprüft ob die Partikeldarstellung ausgewählt ist.

5.2.3.2 Schritt 2: Farbgebung der Elemente

Im Modell lassen sich Partikel, Geometrie sowie Kontakte farblich unterschiedlich darstellen. Jeder Geometrieabschnitt, jede Partikelart bzw. Kontaktart oder ausgewählte Gruppe kann farblich unabhängig voneinander angezeigt werden.

Geometrie Farbzuordnung

Das Schneckenblatt ist farblich so zu separieren, dass sich dieses vom Rest der Geometrie abhebt.

1. Man klickt auf die „Coloring“ Registerkarte um den Farbabschnitt zu öffnen.
2. Im Bereich „Select Element“ wird „Geometry“ und „Type“ bzw. Schneckenblatt 1 ausgewählt.

3. Weiters erfolgt im Bereich „Static Coloring“ die Auswahl der Farbe dunkelrot, welche dem Schneckenblatt 1 zugewiesen wird. Zum Ausführen des Befehls wird „Apply“ gedrückt.

Partikelfarbzuordnung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Als nächstes erfolgt eine Farbgebung der Partikel entsprechend ihrer vorliegenden Eigenschaften, sprich Geschwindigkeiten.

1. Im Abschnitt „Select Element“ wird „Particle“ sowie „Type to All“ gewählt.
2. Als nächstes wählt man im Abschnitt „Attribute Coloring“ „Velocity“ aus.
3. Den minimalen, mittleren und maximalen Geschwindigkeitswerten werden entsprechend die Farben blau, grün und rot zugeordnet.
4. Durch Drücken der Schaltflächen neben den min. und max. Werten, werden die aktuellen Werte direkt vom gegenwärtigen Simulationspunkt angezeigt. Mit Bestätigung der „Auto-Update“ Option wird sichergestellt, dass die Werte beim Abspielen der Simulation, kontinuierlich aktualisiert werden.
5. Man drückt die „Apply“ Schaltfläche um die Farbgebung der Partikel durchzuführen.
6. Jetzt setzt man die Simulation zurück an den Start.
7. Durch Betätigung der „Play backwards“ Schaltfläche lässt sich verfolgen, wie sich die Farben beim Zurückspielen während der Simulation ändern.

5.2.3.3 Schritt 3: Aufzeichnung von Daten

Daten, welche während der Simulation erhoben wurden, können für Analysen aufgezeichnet werden.

Es bestehen die Möglichkeiten Daten eines einzelnen Zeitschrittes, eine Auswahl an Zeitschritten aller Elemente, oder aber nur eine Auswahl bzw. einen ausgelagerten Bereich, aufzuzeichnen.

Herstellung einer Aufzeichnungsconfiguration

1. Es wird „Export Data“ vom Menü „File“ gewählt. In weiterer Folge erscheint das Dialogfenster für die Datenaufzeichnung.

2. Man drückt die  Schaltfläche um eine neue Konfiguration zu erstellen. Eine einmalige Konfiguration kann mehrere Vielfachabfragen beinhalten und zu jedem Punkt im Modell wieder verwendet werden.
3. Jetzt setzt man das Aufzeichnungsformat auf Text, wodurch die Daten in einer .csv Datei gespeichert werden.
4. Im letzten Schritt wird der Dateiname „Screw Auger“ angegeben und ein Speicherort gewählt.

Definition einer Abfrage zur Aufzeichnung der durchschnittlichen Partikelgeschwindigkeit

Große Datenmengen Aufzeichnungen können einige Zeit in Anspruch nehmen, daher erscheint es als sinnvoll Geschwindigkeitsdaten ausgewählter Zeitbereiche des Modells aufzuzeichnen.

1. Im Abschnitt „Time Steps“ des Hauptfensters „Export Results Data“ kann ein individueller Zeitschrittbereich festgelegt werden. Dieser sollte zwischen 10 bzw. 20 Schritten, für jeden Punkt in der Simulation, liegen.
2. Man wählt die „Checkbox“-Option „Output Averages, Maximums, Minimums and Totals in Columns“ aus.
3. Als nächstes geht man auf die Registerkarte „Queries“. Hier werden die Daten definiert, welche aufgezeichnet werden sollen.
4. Durch Drücken der  Schaltfläche erstellt man eine neue Abfrage. Es wird ihr der Name „Velocity Query“ zugewiesen.
5. Man klickt auf „Particle“ in der Liste und wählt die Eigenschaft „Velocity“ aus.
6. „Component“ wird auf „Magnitude“ gesetzt und „Query Type“ auf „Average“. Weitere vorhandene Optionen sind mit deren Voreinstellungen zu belassen.

Definition einer Abfrage zur Aufzeichnung der Positionsbestimmung der Z-Komponente jedes Partikels

1. Um eine zweite Abfrage zu erstellen, wird wiederum die  Schaltfläche gedrückt. Der Name „Position Query“ wird ihr zugewiesen.
2. Man klickt, wie bereits zuvor, auf „Particle“ in der Liste und wählt „Position“ aus.
3. Es erfolgt die Auswahl von „Component“ Z. Weitere Voreinstellungen werden beibehalten.

Aufzeichnen von Daten

1. Durch Betätigung der „Export“ Schaltfläche werden die Daten in der vordefinierten Datei gespeichert.
2. Die Datei wird in einer externen Anwendung für eine weitere Auswertung der aufgezeichneten Daten (z.B. einem Tabellen Kalkulationsprogramm) geöffnet.

6 Referenzbeispiel Bunkeraustrag – Vergleich mit Messergebnissen

In Bezugnahme auf das vorherige Kapitel 5 wurde nun eine spezielle Auswertungsmethode gesucht und angewandt, um die bereits vorliegenden Messdaten aus den Versuchen und Berechnungen vergleichen zu können.

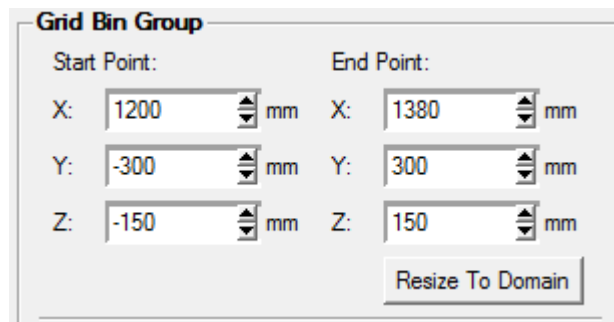
6.1 *Erstellung einer Volumetrischen Abfrage*

6.1.1 Generieren einer „Grid Bin Group“ zur Volumenabfrage Erstellung

1. Man betätigt die Analysator  Schaltfläche in der Symbolleiste.
2. Jetzt wird die Registerkarte „Selection“ ausgewählt und anschließend im Abschnitt „Selection Groups“ eine neue Abfrage generiert. Nach dem Drücken der  Schaltfläche wird „Grid Bin Group“ ausgewählt. Die entstandene „Selection“ wird in Abfrage 1 umbenannt.
3. Im Abschnitt „Options“ klickt man auf die „Edit“ Schaltfläche, wodurch sich das „Selection Query Editor“ Fenster öffnet. Bei den „Define Queries“ wird „Particle“ markiert und bei den angeführten Abfragemöglichkeiten „Volume“ ausgewählt. „Type“ wird auf „All“ gesetzt, sowie „Query Type“ auf „Total“.

Anschließend wird die  Schaltfläche gedrückt und das Ganze bestätigt.

4. Im „Representation“ Abschnitt wird die „Display Mode“ Anzeige auf „Always“ gestellt. Somit wird der aktuelle Wert während der Simulation permanent im „Viewer“ dargestellt.
5. Die Erzeugung einer Simulationsbox, welche es unter anderem ermöglicht, Volumenströme des Doppelschneckenförderers zu messen, wird in nachstehender Abbildung 6.1 verdeutlicht. Die entsprechend dem Versuchsstand adaptierten Werte sind daraus zu entnehmen.



Grid Bin Group	
Start Point:	End Point:
X: 1200 mm	X: 1380 mm
Y: -300 mm	Y: 300 mm
Z: -150 mm	Z: 150 mm
<button>Resize To Domain</button>	

Abbildung 6.1: Definition der „Grid Bin Group“

Weiters werden die „Number of Bins“ in den X-Y-Z Koordinaten auf 1 gesetzt.

6.1.2 Datenaufzeichnung mithilfe der generierten „Grid Bin Group“

1. Durch Anwählen von „Export Data“ vom Menü „File“ erscheint das „Export Results Data“ Fenster.
2. Mithilfe der  Schaltfläche wird eine neue Konfiguration erstellt und das „Export Format“ auf Text gesetzt.
3. „Filename“ bzw. der Speicherort und „Title“ (dieser ist optional) werden eingegeben.
4. In der „General“ Registerkarte wird „Output Averages, Maximums, Minimums and Totals in Columns“ ausgewählt. Ebenfalls angehakt wird das Auswahlkästchen „Line Break at 255 Columns“. Im Abschnitt „Time Steps“ wird „All“ belassen.
5. Man geht nun auf die „Queries“ Registerkarte und drückt die  Schaltfläche, um eine neue Abfrage zu erstellen. In weiterer Folge wird „Particle“, sodann „Volume“ markiert. Bei „Type“ wird „All“ ausgewählt, bei „Selection“ Abfrage 1 und zu guter Letzt erfolgt bei „Query Type“ die Einstellung auf „Total“.
6. Um die Aufzeichnung der Datenausgabe zu starten, wie die „Export“ Schaltfläche gedrückt.

6.2 Simulationsdatenauswertungen von Abfragen mit Parametervariationen

Der Schubmodul G errechnet sich allgemein aus dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl μ wie folgt:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad 6.1$$

Für den Werkstoff Quarzglas (SiO_2), dieser wurde bei den realen Versuchsstand-Messungen (VS-M) eingesetzt, ergeben sich unter der Berücksichtigung von $E = 94 \frac{\text{GN}}{\text{m}^2}$ [10] somit folgende Schubmodule.

μ	0,2	[-]	G	39,166e09	[N/m ²]
	0,3			36,153e09	
	0,4			33,571e09	

Tabelle 6.2: Schubmodul G in Abhängigkeit der Poissonzahl μ

Nachstehend befinden sich ausgewählte Simulationsdurchführungen sowie dessen Auswertungen aus einer Vielzahl durchgeführter Simulationsreihen mit Parametervariationen. Es sei darauf hingewiesen, dass Materialparameter hinsichtlich der Realität teilweise geändert wurden, um die Simulationszeit zu verkürzen. Dies wurde auf Anraten des Software Supports, von DEM-Solutions, durchgeführt. „Ein um den Faktor 100 reduzierter Schubmodul ergibt eine um 10 mal schnellere Simulation, bei einem 10 mal größeren Zeitschritt“ so der Support.

Tabelle 6.3 stellt eine Auflistung der Grundparameter Festlegungen der in dieser Arbeit angeführten Simulationen dar. Diese Parameter bleiben für alle Versuchsreihen gleich.

DEM Simulation Allgemeine Grundparameter Festlegung der Versuchsreihen			
<i>Surfaces</i>			
Partikelradius	10		[mm]
<i>Dynamics - Specification</i>			
Linear Rotation	Start Time	End Time	
	2	10	[s]
<i>Point of Action</i>			
x	0	0	[mm]
y	127,5	-127,5	[mm]
z	-10	-10	[mm]
<i>Polygon - Factory</i>			
Number of Edges	4		[-]
Center	x	660	[mm]
	y	0	[mm]
Dimensions	Side 1	930	[mm]
	Side 2	520	[mm]
<i>Factory</i>			
Particle Generation: Total Number		40000	[-]
Generation Rate: Target Number/Sec		50000	[-]
<i>Time Step</i>			
Simulation Time		10	[s]
<i>Simulator Grid</i>			
Smallest Radius (Rmin)		10	[mm]

Tabelle 6.3 Allgemeine Grundparameter Festlegung der Versuchsreihen

Nachstehende Tabelle 6.4 zeigt eine Auflistung der Hauptparameter Variationen durchgeführter Versuchsreihen.

DEM Simulation Hauptparameter Variationen der Versuchsreihen												
	Material						Kontakt					
	Partikel			Schneckenförderer			Partikel · Partikel			Partikel · Schneckenförderer		
VS...Versuchsstand	Poissonzahl [-]	Schubmodul [Pa]	Dichte [kg/m³]	Poissonzahl	Schubmodul	Dichte	Stoßzahl [-]	Haftreibungskoeffizient [-]	Rollwiderstandsbeiwert [-]	Stoßzahl	Haftgrenzkoeffizient	Rollwiderstandsbeiwert
VS_1 3_7_2 010_5	0,3	2,3e+07	2678	0,3	7e+10	7800	0,1	0,545	0,01	0,2	0,545	0,01
VS_2 5_8_2 010_2	0,3	3e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01
VS_3 9_20 10_1	0,3	3e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,2	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01
VS_4 9_20 10_1	0,3	3e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,05	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01
VS_5 9_20 10_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,05	0,545	0,01	0,2	0,5	0,02
VS_6 9_20 10_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,02
VS_6 9_20 10_2	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,02	0,2	0,5	0,01
VS_7 9_20 10_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01
VS_8 9_20 10_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,05	0,5	0,01
VS_9 9_20 10_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01
VS_1 0_9_2 010_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,02
VS_1 3_9_2 010_1	0,3	3,6e+07	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,3	0,5	0,01
VS_3 1_8_2 010_1	0,3	3,6e+10	2678	0,3	8e+10	7850	0,1	0,545	0,01	0,2	0,5	0,01

Tabelle 6.4: Hauptparameter Variationen der Versuchsreihen

In weiterer Folge wird nun für jeden einzelnen Versuch die individuelle Parameter Festlegung tabellarisch angeführt. Danach erfolgt jeweils die

zugehörige, graphische Darstellung der erhaltenen Messwerte, sowie deren Minimal-, Mittel- und Maximalwerte.

DEM Simulation Parameter Festlegung: Versuchsstand_13_7_2010_5				
Dynamics - Specification				
W...Wendel	W1		W2	
	-500		500	[deg/s]
Polygon - Factory				
Center	z		650	[mm]
Factory				
Velocity	z		-10	[m/s]
Time Step				
Rayleigh Time Step			0,000311	[s]
Fixed Time Step	20	[%]	6,23e-05	[s]
Data Save				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,0501			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	804			[-]
Simulator Grid				
Cell Size	2,21	Rmin	22,1	[mm]
Approx. Number of Cells	95275			[-]

Tabelle 6.5: Parameter VS_13_7_2010_5

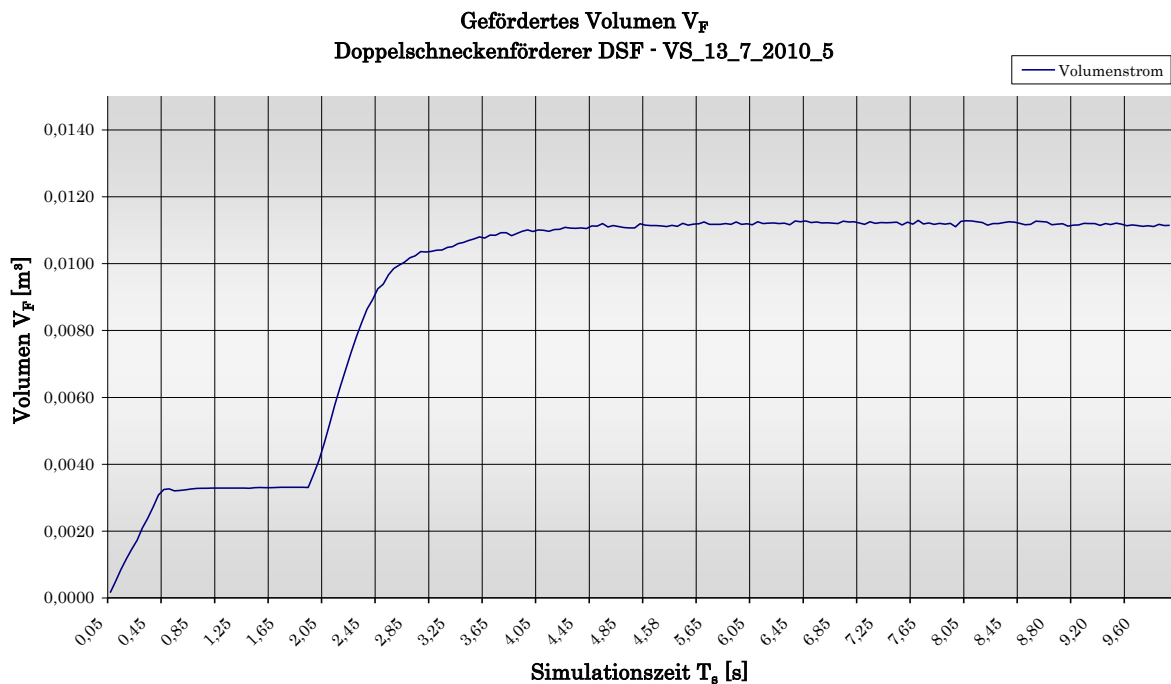


Abbildung 6.2: Fördervolumen DSF - VS_13_7_2010_5

In der voran stehenden Abbildung 6.2 ist der gesamte Partikelfluss von der Befüllung des Bunkers bis zur kontinuierlichen Entleerung mittels DSF dargestellt. Von 0 bis 0,85 sec erfolgt die Befüllung des Schüttgutbunkers, wobei sich ab einer Simulationszeit von rund 0,6 sec ein konstant bleibender Volumenstrom einstellt. Hervorgerufen wird dieser durch die Schüttgut-Setzung im Bunker. Ab 2 sec beginnt der ausfließende Volumenstrom wiederum anzusteigen, da die Förderschnecken in Rotation versetzt werden. Schließlich stellt sich bei einer Simulationszeit von rund 5 sec ein konstanter Volumenstrom ein.

Bei den weiteren Graphiken der Versuchsstände mit diversen Parameter Variationen (siehe Tabelle 6.4) erfolgen die Darstellungen speziell für den Bereich der sich bei fortschreitender Simulationsdauer, konstant einstellenden Volumenströme.

Tabelle 6.6 und nachfolgende Tabellen gleicher Art bieten eine Übersicht des gemessenen minimalen, mittleren und maximalen geförderten Volumens.

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011103	[m ³]
$V_{F,Mit}$	0,011196	
$V_{F,Max}$	0,011293	

Tabelle 6.6: Fördervolumen DSF - VS_13_7_2010_5

Als weitere Abfrage wurde die Partikelanzahl für VS_13_7_2010_5 gewählt, welche in Abbildung 6.3 graphisch ersichtlich ist.

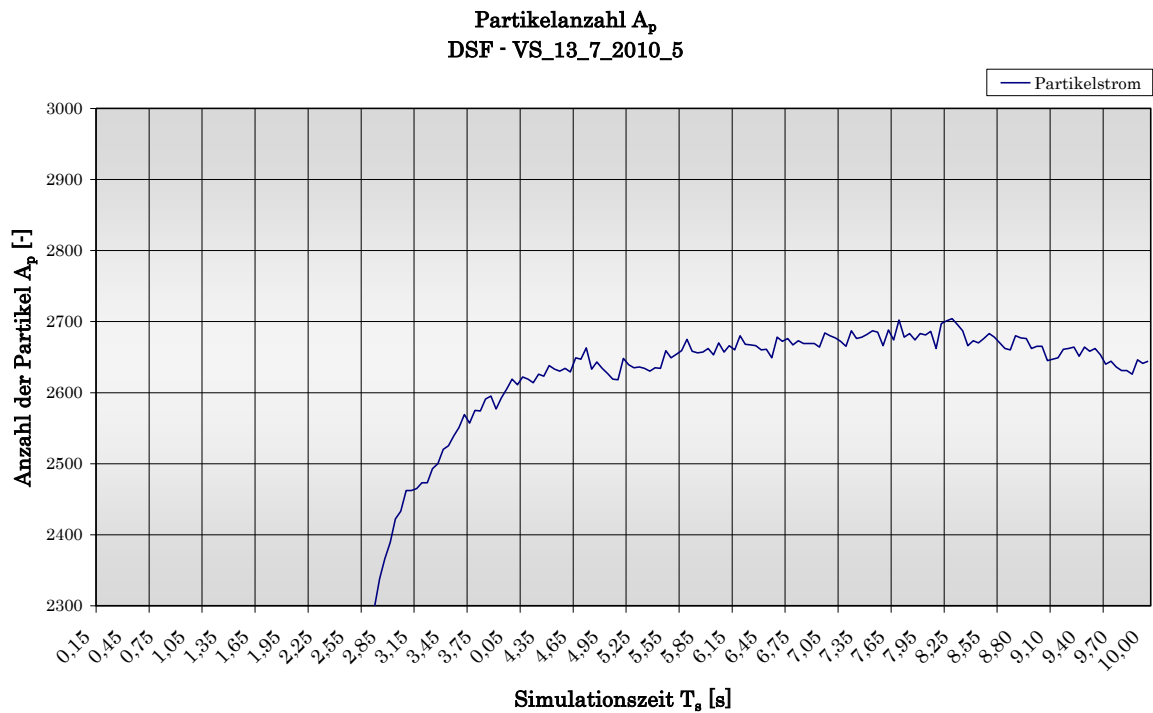


Abbildung 6.3: Partikelanzahl DSF - VS_13_7_2010_5

Nachstehend sind die minimalen, mittleren und maximalen Partikelzahlen von VS_13_7_2010_5 angeführt.

Partikelanzahl A_p		
$A_{p,Min}$	2626	[-]
$A_{p,Mit}$	2667	
$A_{p,Max}$	2704	

Tabelle 6.7: Partikelanzahl DSF - VS_13_7_2010_5

Das gesamte, theoretische Zwischenraumvolumen $V_{ges,ZR}$ berechnet sich aus Gleichung 6.8 mit dem Partikeldurchmesser d und der mittleren

Partikelanzahl $A_{P,Mit}$ wie folgt (vorausgesetzt ist hier, dass es zu keiner Schüttgut-Setzung kommt):

$$V_{ges,ZR} = (V_{Würfel} - V_{Partikel}) \cdot A_{P,Mit} = d^3 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) \cdot A_{P,Mit} \quad 6.8$$

Es folgt $V_{ges,ZR}$ mit einem Wert von 0,010165334 m³. Die Partikelmessung wurde auch wie die Volumsmessung mit einer geometrisch definierten Abfrage durchgeführt.

Das Verhältnis von Würfelvolumen zu Kugelvolumen lässt sich aus Gleichung 6.8 mit einem Wert von 0,476 ausdrücken. Wird der Kehrwert dieser Verhältniszahl mit einem gemittelten Schüttvolumen aus Tabelle 6.33 von 0,011238 m³ multipliziert, so ergibt sich ein theoretisches Schüttvolumen von 0,023609 m³.

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_25_8_2010_2				
Dynamics - Specification				
W...Wendel	W1		W2	
	-300		300	[deg/s]
Polygon - Factory				
Center	z		650	[mm]
Factory				
Velocity	z		-10	[m/s]
Time Step				
Rayleigh Time Step			0,000273	[s]
Fixed Time Step	20	[%]	5,45e-05	[s]
Data Save				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	918			[-]

<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.9: Parameter VS_25_8_2010_2

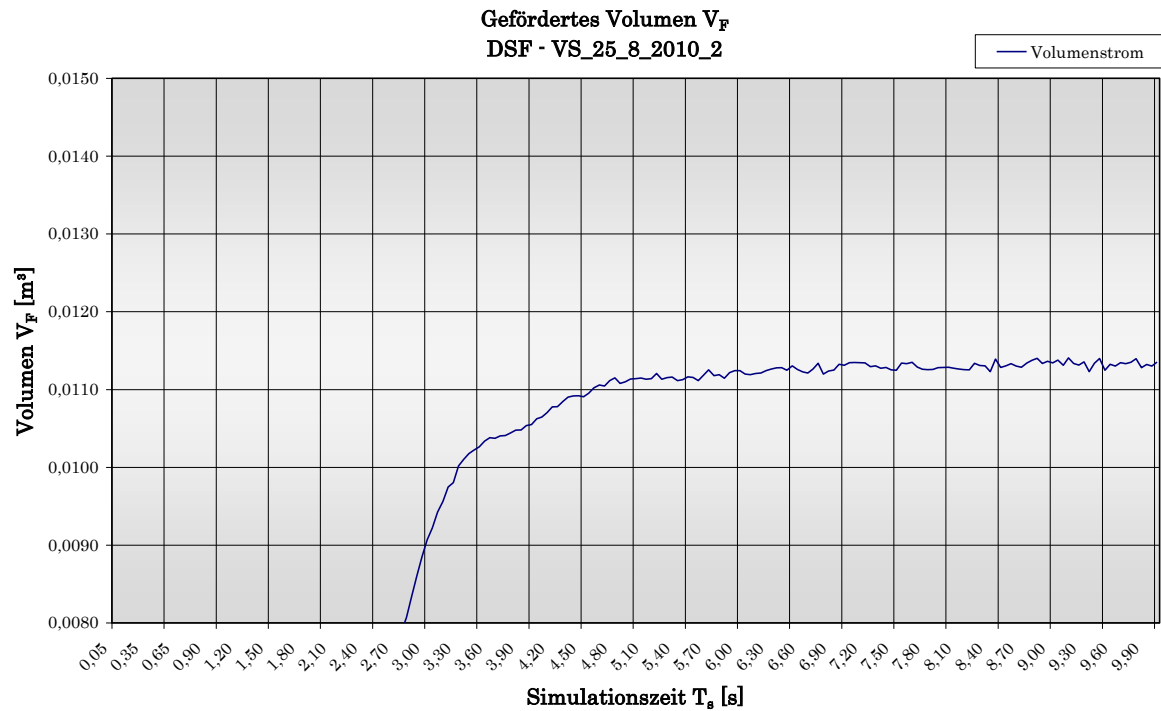


Abbildung 6.4: Fördervolumen DSF - VS_25_8_2010_2

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011113	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011274	
$V_{F,Max}$	0,011405	

Tabelle 6.10: Fördervolumen DSF - VS_25_8_2010_2

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_3_9_2010_1			
<i>Dynamics - Specification</i>			
W...Wendel	W1	W2	
	-300	300	[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>			
Center	z	650	[mm]
<i>Factory</i>			
Velocity	z	-10	[m/s]

Time Step				
Rayleigh Time Step			0,000294	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,38e-05	[s]
Data Save				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	930			[-]
Simulator Grid				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.11: Parameter VS_3_9_2010_1

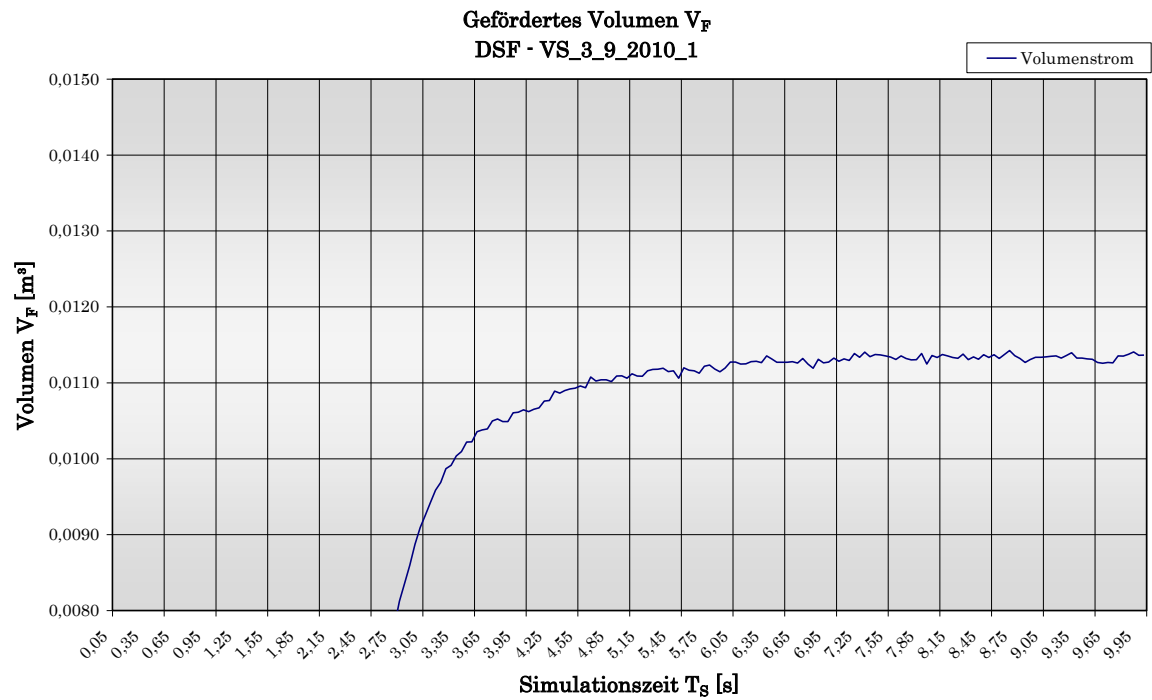


Abbildung 6.5: Fördervolumen DSF - VS_3_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011060	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011293	
$V_{F,Max}$	0,011424	

Tabelle 6.12: Fördervolumen DSF - VS_3_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_4_9_2010_1				
Dynamics - Specification				
W...Wendel	W1		W2	
2 bis 10 sec	-300		300	[deg/s]
Polygon - Factory				
Center	z		650	[mm]
Factory				
Velocity	z		-10	[m/s]
Time Step				
Rayleigh Time Step			0,000294	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,48e-05	[s]
Data Save				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	913			[-]
Simulator Grid				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.13: Parameter VS_4_9_2010_1

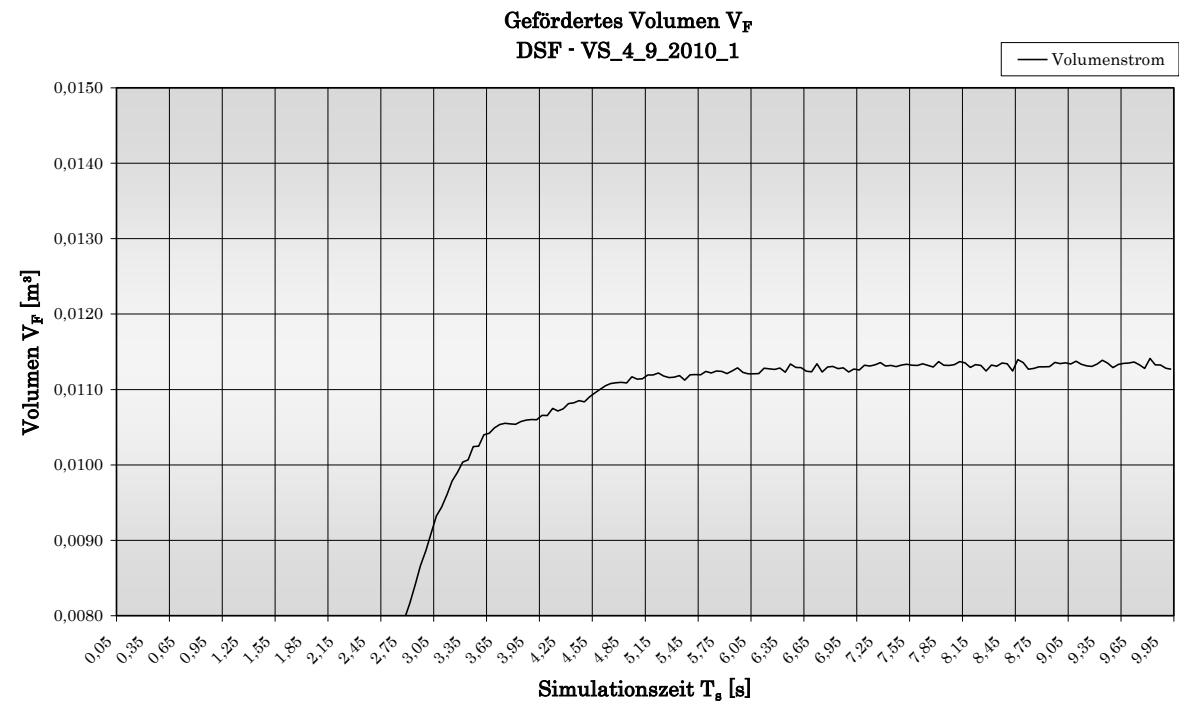


Abbildung 6.6: Fördervolumen DSF - VS_4_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011123	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011291	
$V_{F,Max}$	0,011410	

Tabelle 6.14: Fördervolumen DSF - VS_4_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_5_9_2010_1				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	650		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-10		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000294	[s]
Fixed Time Step	23	[%]	5,72e-05	[s]
<i>Data Save</i>				

Target Save Interval	0,05		[s]
Synchronized Data Save	0,05		[-]
Data Points	200		[-]
Iterations per Data Point	874		[-]
<i>Simulator Grid</i>			
Cell Size	2,3	Rmin	23 [mm]
Approx. Number of Cells	83160		[-]

Tabelle 6.15: Parameter VS_5_9_2010_1

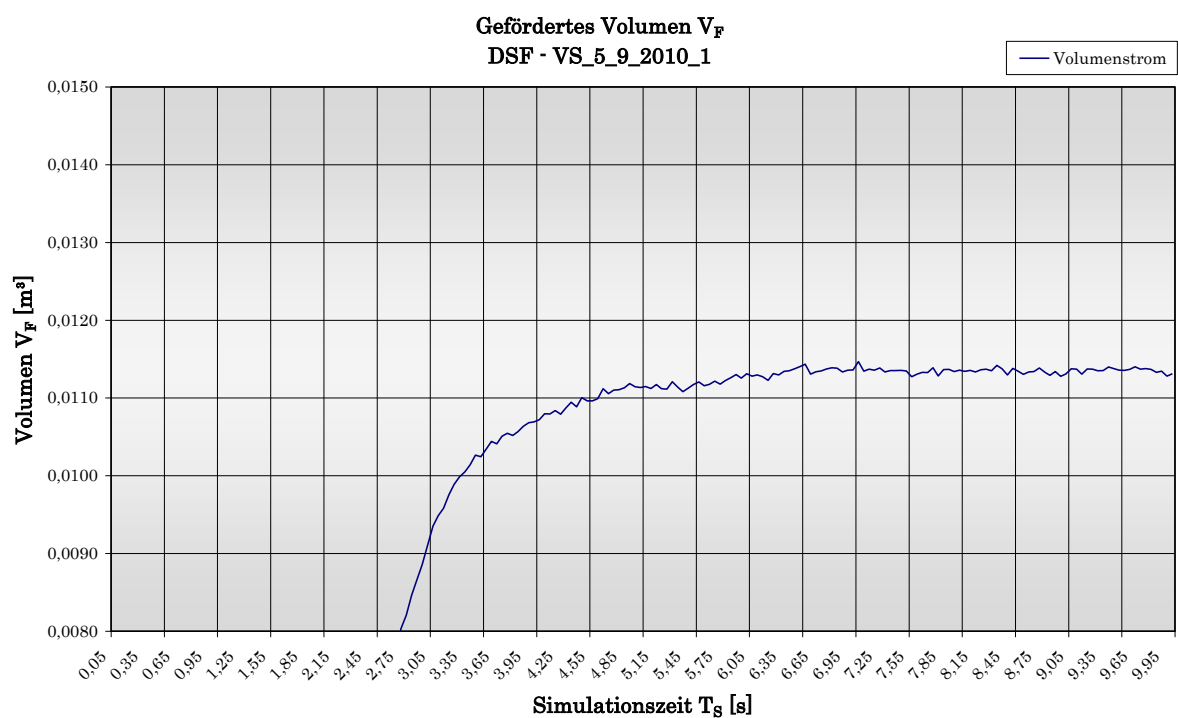


Abbildung 6.7: Fördervolumen DSF - VS_5_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011081	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011318	
$V_{F,Max}$	0,011466	

Tabelle 6.16: Fördervolumen DSF - VS_5_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_6_9_2010_1			
<i>Dynamics - Specification</i>			
W...Wendel	W1	W2	
	-300	300	[deg/s]

<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z		650	[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z		-10	[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000294	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	874			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.17: Parameter VS_6_9_2010_1

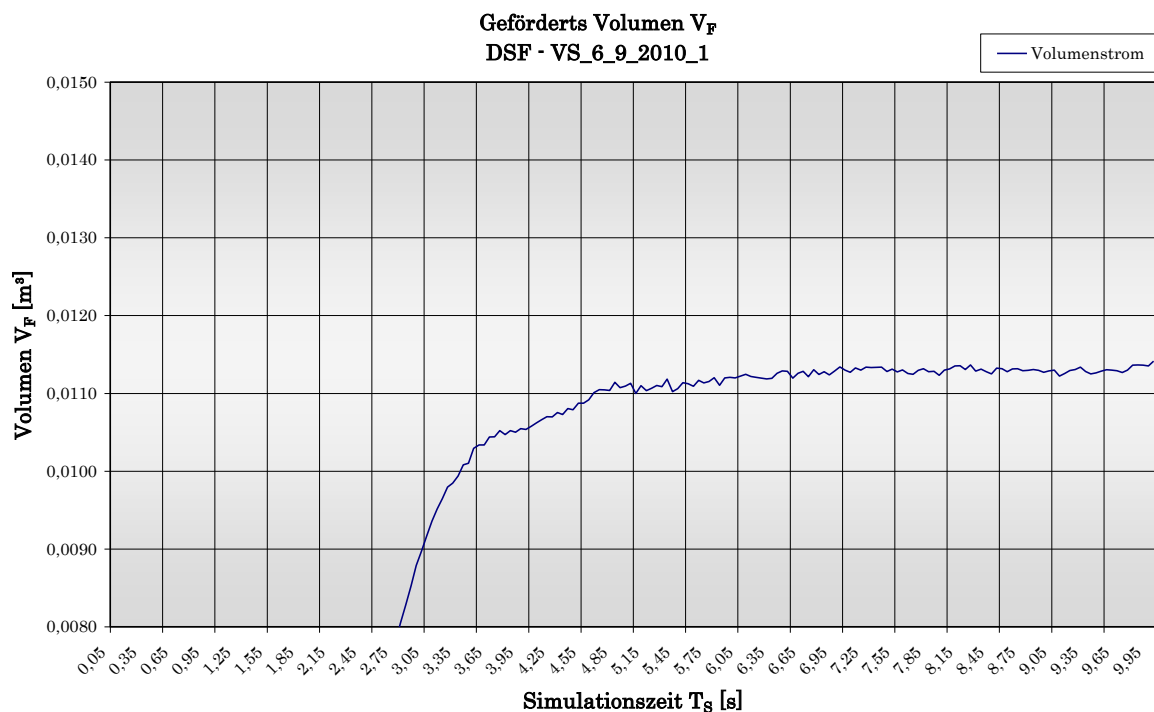


Abbildung 6.8: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011022	[m ³]
$V_{F,Mit}$	0,011258	
$V_{F,Max}$	0,011414	

Tabelle 6.18: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_6_9_2010_2				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	650		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-10		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step		0,000294		[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	914			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.19: Parameter VS_6_9_2010_2

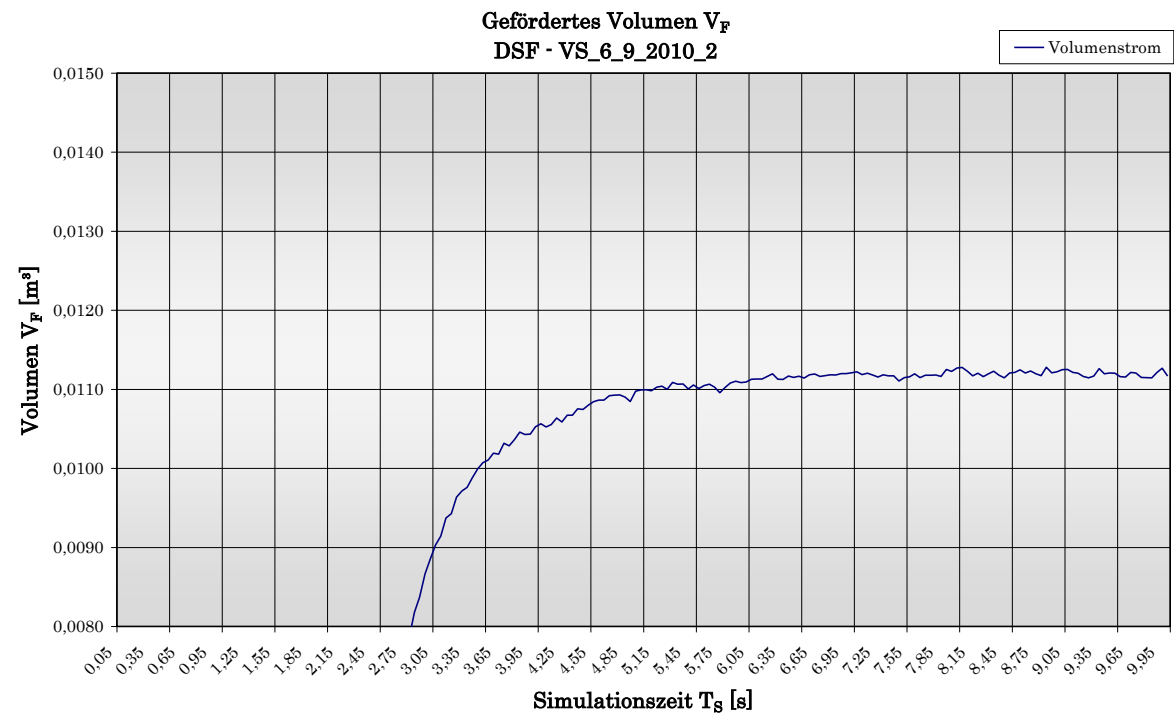


Abbildung 6.9: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_2

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,010956	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011162	
$V_{F,Max}$	0,011278	

Tabelle 6.20: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_2

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_7_9_2010_1				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	650		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-10		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000249	[s]
Fixed Time Step	23	[%]	5,72e-05	[s]
<i>Data Save</i>				

Target Save Interval	0,05		[s]
Synchronized Data Save	0,05		[-]
Data Points	200		[-]
Iterations per Data Point	874		[-]
<i>Simulator Grid</i>			
Cell Size	2,3	Rmin	23 [mm]
Approx. Number of Cells	83160		[-]

Tabelle 6.21: Parameter VS_7_9_2010_1

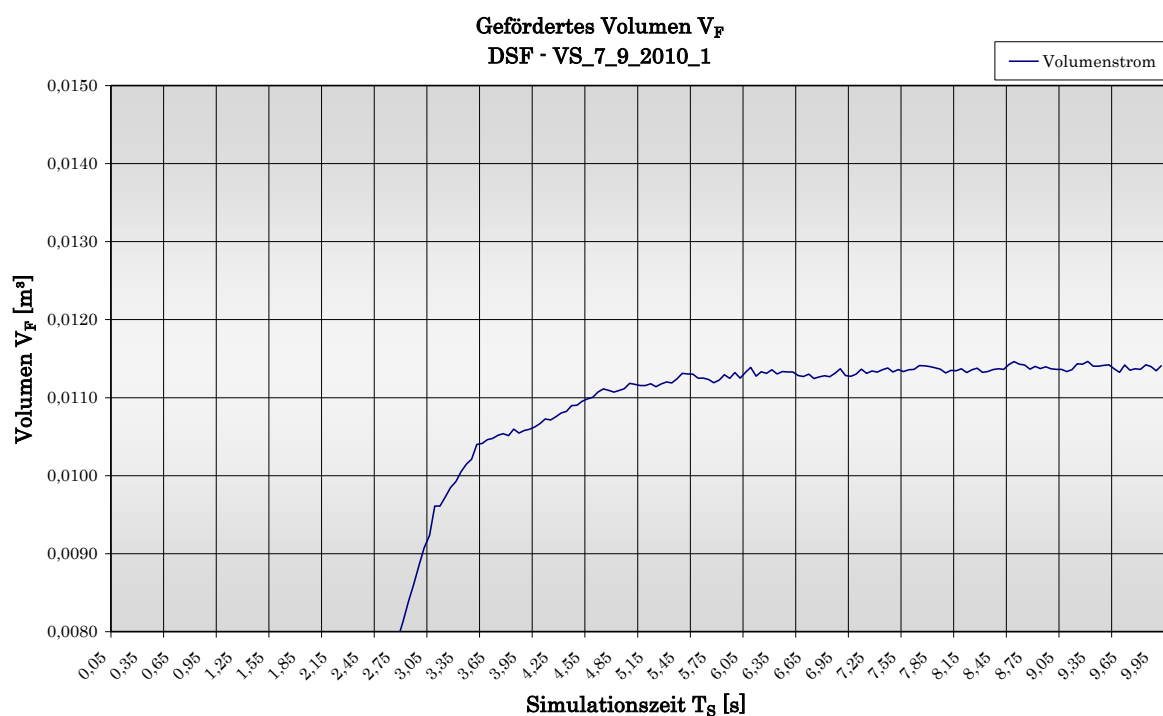


Abbildung 6.10: Fördervolumen DSF - VS_7_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011140	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011334	
$V_{F,Max}$	0,011464	

Tabelle 6.22: Fördervolumen DSF - VS_7_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_8_9_2010_1			
<i>Dynamics - Specification</i>			
W...Wendel	W1	W2	
	-300	300	[deg/s]

<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z		650	[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z		-10	[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000249	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	914			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.23: Parameter VS_8_9_2010_1

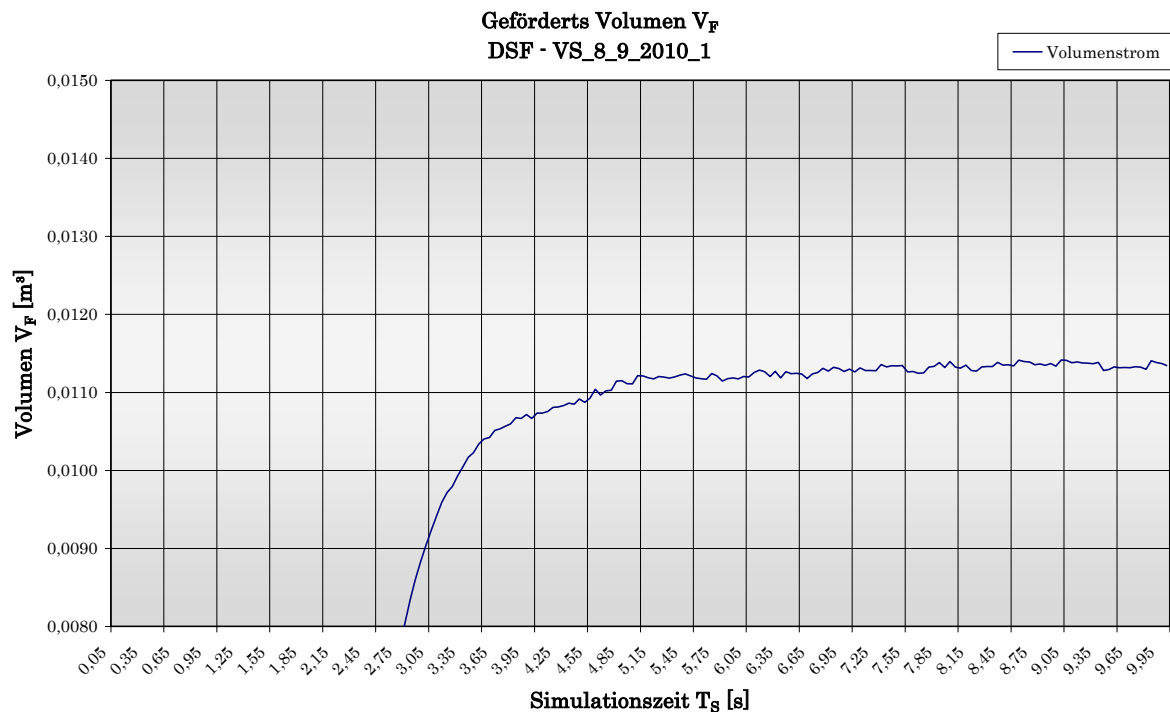


Abbildung 6.11: Fördervolumen DSF - VS_8_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011144	[m ³]
$V_{F,Mit}$	0,011293	
$V_{F,Max}$	0,011416	

Tabelle 6.24: Fördervolumen DSF - VS_8_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_9_9_2010_1				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	650		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-10		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step		0,000249		[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	914			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.25: Parameter VS_9_9_2010_1

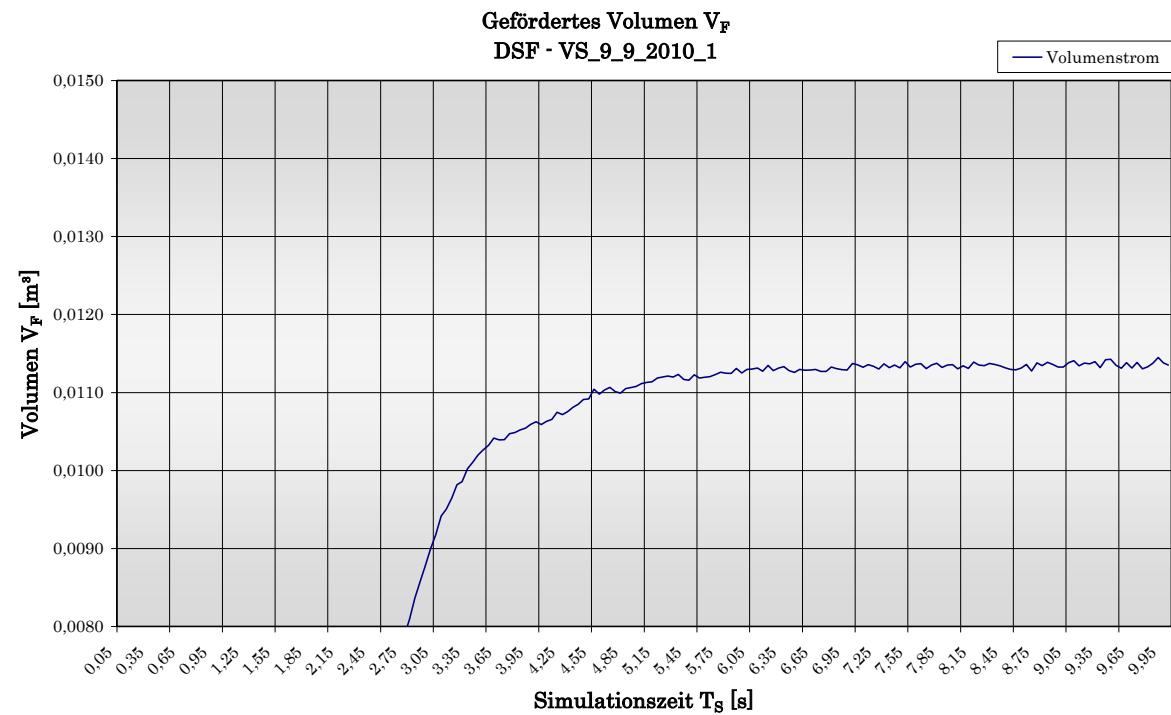


Abbildung 6.12: Fördervolumen DSF - VS_9_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011156	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011315	
$V_{F,Max}$	0,011448	

Tabelle 6.26: Fördervolumen DSF - VS_9_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_10_9_2010_1				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	650		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-10		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000249	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				

Target Save Interval	0,05		[s]
Synchronized Data Save	0,05		[-]
Data Points	200		[-]
Iterations per Data Point	914		[-]
<i>Simulator Grid</i>			
Cell Size	2,3	Rmin	23 [mm]
Approx. Number of Cells	83160		[-]

Tabelle 6.27: Parameter VS_10_9_2010_1

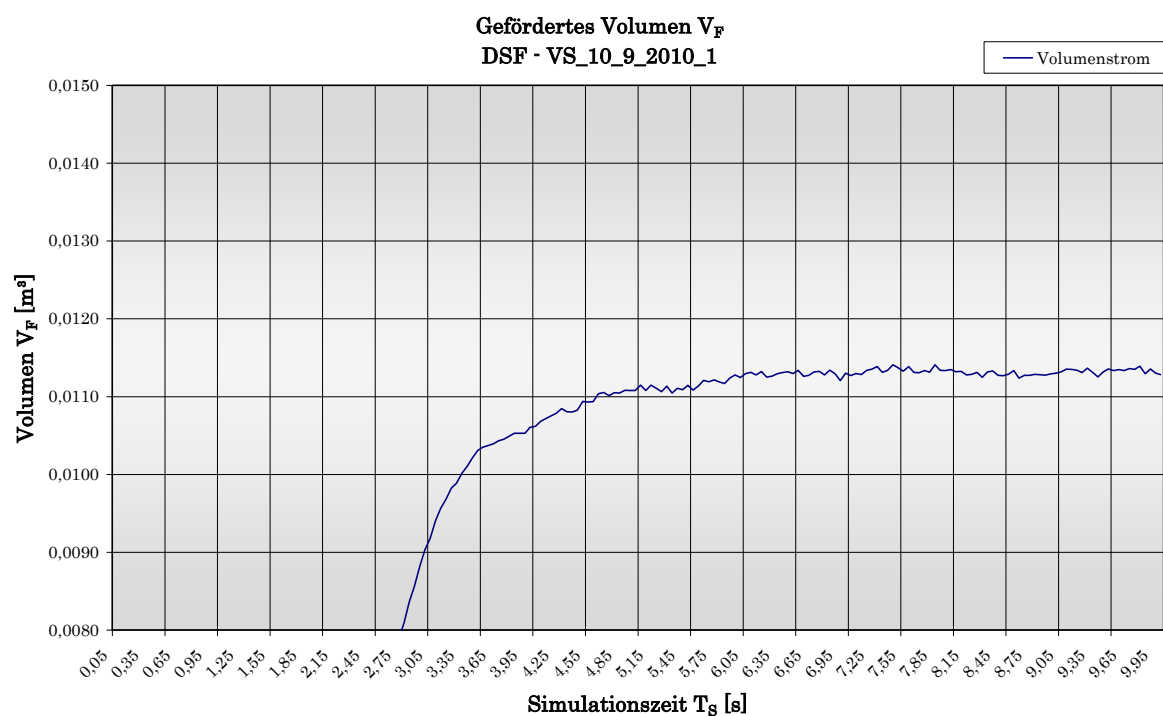


Abbildung 6.13: Fördervolumen DSF - VS_10_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011044	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011283	
$V_{F,Max}$	0,011407	

Tabelle 6.28: Fördervolumen DSF - VS_10_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_13_9_2010_1			
<i>Dynamics - Specification</i>			
W...Wendel	W1	W2	
	-300	300	[deg/s]

<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z		650	[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z		-10	[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step			0,000249	[s]
Fixed Time Step	22	[%]	5,47e-05	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,05			[s]
Synchronized Data Save	0,05			[-]
Data Points	200			[-]
Iterations per Data Point	914			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.29: Parameter VS_13_9_2010_1

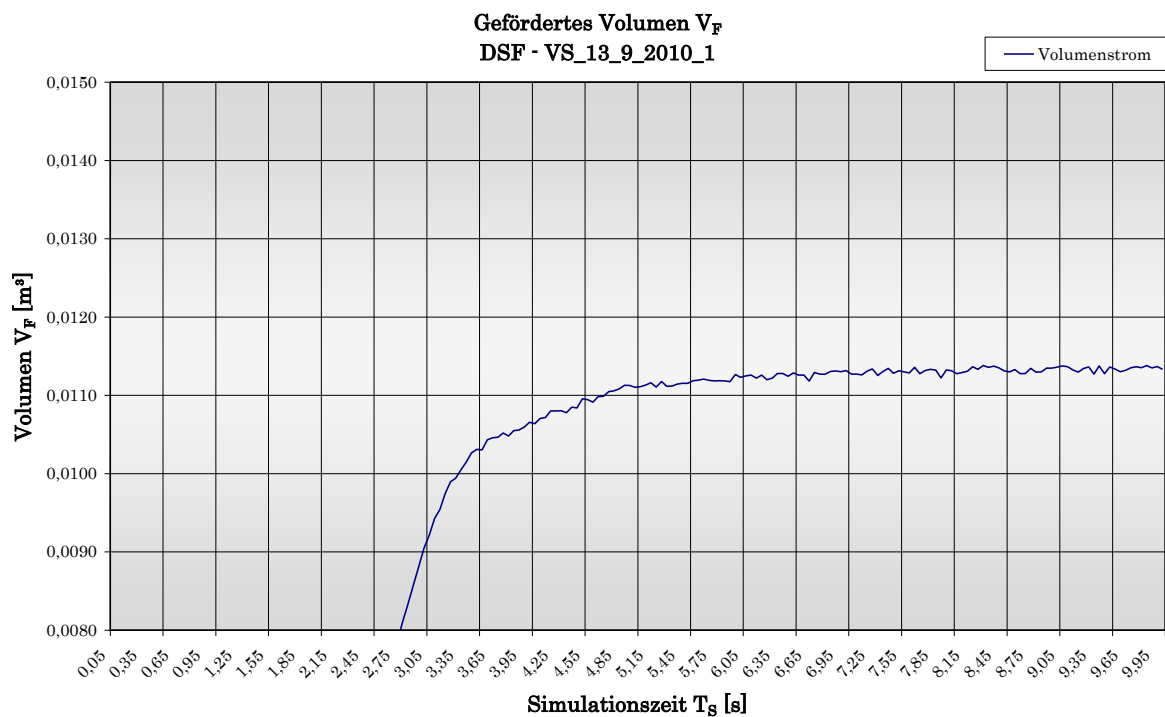


Abbildung 6.14: Fördervolumen DSF - VS_13_9_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011104	[m ³]
$V_{F,Mit}$	0,011282	
$V_{F,Max}$	0,011380	

Tabelle 6.30: Fördervolumen DSF - VS_13_9_2010_1

DEM Simulation Parameter Festlegung: VS_31_8_2010_1				
<i>Dynamics - Specification</i>				
W...Wendel	W1	W2		
	-300	300		[deg/s]
<i>Polygon - Factory</i>				
Center	z	600		[mm]
<i>Factory</i>				
Velocity	z	-5		[m/s]
<i>Time Step</i>				
Rayleigh Time Step		7,87e-06		[s]
Fixed Time Step	33	[%]	2,6e-06	[s]
<i>Data Save</i>				
Target Save Interval	0,01			[s]
Synchronized Data Save	0,01			[-]
Data Points	1e+03			[-]
Iterations per Data Point	3,85e+03			[-]
<i>Simulator Grid</i>				
Cell Size	2,3	Rmin	23	[mm]
Approx. Number of Cells	83160			[-]

Tabelle 6.31: Parameter VS_31_8_2010_1

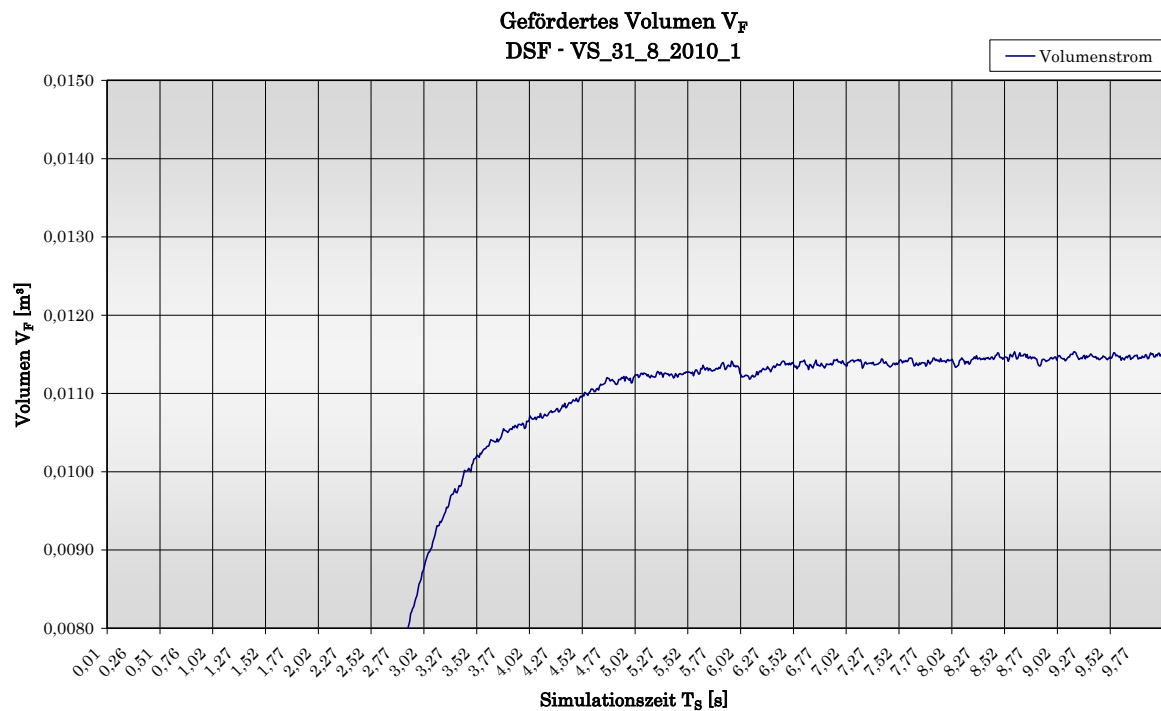


Abbildung 6.15: Fördervolumen DSF - VS_31_8_2010_1

Gefördertes Volumen V_F		
$V_{F,Min}$	0,011181	[m³]
$V_{F,Mit}$	0,011389	
$V_{F,Max}$	0,011520	

Tabelle 6.32: Fördervolumen DSF - VS_31_8_2010_1

6.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Versuchsstand Messungen und berechneten Werten

In Abbildung 6.16 sind alle erzielten Volumsverläufe der Versuche zusammen gefasst. Deutlich zu erkennen ist, dass bei VS_31_8_2010_1 der konstant bleibende Volumenstrom von 0,7 bis 2,15 sec Simulationszeit geringer ist, als bei den übrigen Versuchsständen.

Ab einem Zeitpunkt von 2 sec, beim Rotationsstart der Förderschnecken, sieht man dass bei VS_13_7_2010_5 ein schnellerer bzw. steilerer Volumenstromanstieg im Vergleich zu den anderen Messergebnissen gegeben ist.

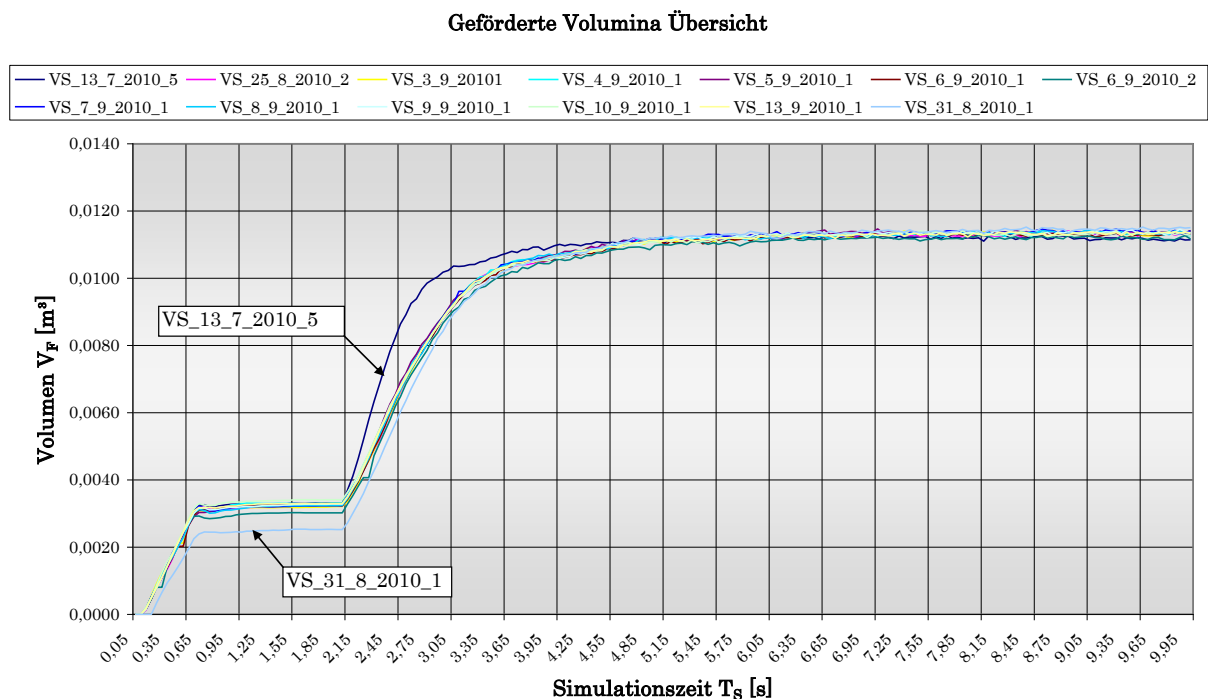


Abbildung 6.16: Fördervolumina Übersicht

Wie man nachfolgender Tabelle 6.33 entnehmen kann, haben diverse Parameter Änderungen auf das Fördervolumen nur einen äußerst geringen Einfluss. Der größte Einfluss aufgrund von Parameter Variationen ist im Bereich des Anstieges des Volumenstrom Förderverhaltens zu finden (siehe Abbildung 6.16).

Das größte Fördervolumen wurde bei VS_31_8_2010_1 mit 0,011520 m³ erzielt, hingegen entstand das kleinste Fördervolumen bei VS_6_9_2010_2 mit 0,010956 m³. Da das gesamte Fördervolumen mit zwei Förderschnecken gefördert wird, bezieht sich jedes Teilfördervolumen einer Schneckenwelle auf eine Schneckenwendel.

DSF - VS Fördervolumen Übersicht			
$V_{F,Min}$	$V_{F,Mit}$	$V_{F,Max}$	Versuchsstand..VS
0,011103	0,011196	0,011293	[m³]
0,011113	0,011274	0,011405	
0,011060	0,011293	0,011424	
0,011123	0,011291	0,011410	
0,011081	0,011318	0,011466	
0,011022	0,011258	0,011414	
0,010956	0,011162	0,011278	
0,011140	0,011334	0,011464	

0,011144	0,011293	0,011416		VS_8_9_2010_1
0,011156	0,011315	0,011448		VS_9_9_2010_1
0,011044	0,011283	0,011407		VS_10_9_2010_1
0,011104	0,011282	0,011380		VS_13_9_2010_1
0,011181	0,011389	0,011520		VS_31_8_2010_1

Tabelle 6.33: DSF-VS Fördervolumen Übersicht

An dieser Stelle wird auf die vorhergehende Diplomarbeit von Grohmann P. „Berechnung der Antriebsleistung sowie Optimierung von Bunkeraustragsschnecken“ verwiesen. Die Versuchsstand Messdaten sowie Rechenwerte wurden dieser wie folgt entnommen:

n [1/min]		6	12	23	46	63
V _{gemessen}	[m ³]	0,016067	0,0164814	0,01647325	0,016889	0,0162
V _{gemittelt}		0,01642213				
V _{berechnet}		0,01365332	0,01365332	0,01365332	0,01365332	0,01365332

Tabelle 6.34: Fördervolumina Übersicht

Betrachtet wurde die gesamte Versuchsanlage, das heißt für die sich ergebende Fördermenge waren zwei Schneckenwellen im Einsatz. Die erhaltenen Volumina beziehen sich immer auf eine Schneckenwendel pro Umdrehung. In nachfolgender Abbildung 6.17 sind die geförderten Volumina hinsichtlich gemessener und berechneter Werte dargestellt.

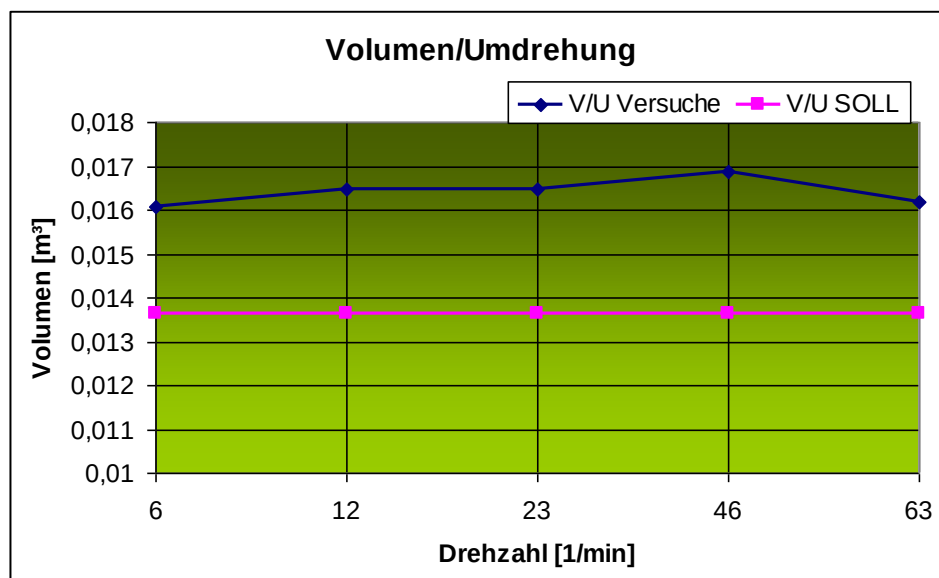


Abbildung 6.17: Volumina Vergleich (gemessen – berechnet) [11]

Bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen, geförderten Volumina ist ersichtlich, dass es bei den Versuchen an der Anlage zu einer erhöhten Förderleistung im Vergleich zu den Berechnungen gekommen ist. Dies entspricht einer zusätzlichen Mitförderung des Schüttgutes am Auslauf. [11]

6.4 Bunkerfüllstand Änderungen Vergleich durch Schüttgutaustrag

6.4.1 Differenzierte Absenkung des Schüttgutes

Die nachstehenden Abbildungen zeigen den Doppelschneckenförderer - Versuchsstand (DSF-VS) mit unterschiedlichem Schüttgut Austragungsfortschritt. Die Darstellungen wurden mit Raster versehen, um die sich ausgebildeten Schüttgutwinkel einfacher bestimmen zu können.

Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 6.18 eine verstärkte Absenkung des Schüttgutes nahe der linken Bunkerwand, nach einmaliger Schneckenwellen Umdrehung. Eine solche unregelmäßige Absenkung des Schüttgutes in diesem Bereich wird durch die Partikel-Wand bzw. Partikel-Partikel Wechselwirkungen (siehe Tabelle 6.4) in Verbindung mit den sich drehenden Förderschnecken hervorgerufen. Durch anhaltenden, kontinuierlichen Austrag des Schüttgutes kommt es zur Ausbildung eines Schüttwinkels anderer Form.

Abbildung 6.19 illustriert eine Schüttgutwinkelausbildung des DSF-VS nach fünf vollen Schneckenumdrehungen. Der Schüttgutwinkel beträgt rund 25°.

Vergleicht man die DEM Simulation mit der von Grohmann durchgeführten linearisierten Schüttgut Animation (der Winkel wurde in Abbildung 6.20 mit 30° gemessen), so ist eine qualitative Übereinstimmung zu erkennen, wenngleich die Simulation realistischer erscheint.

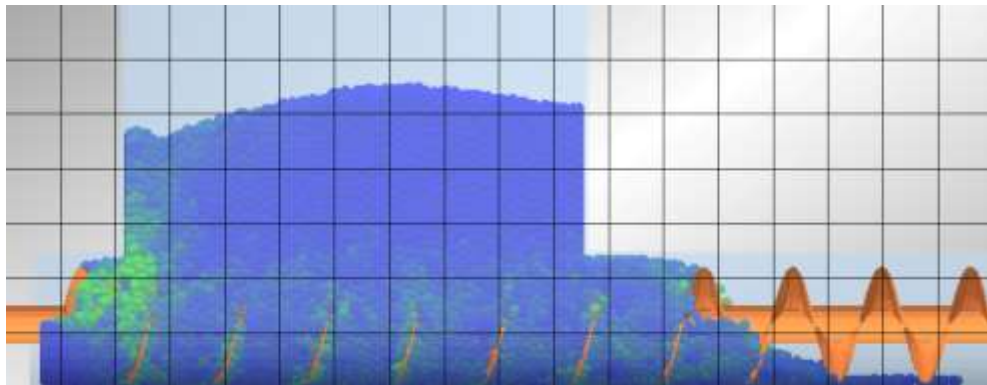


Abbildung 6.18: Schüttwinkelbildung bei Bunkeraustrag
nach 1 Schneckenwellen Umdrehung

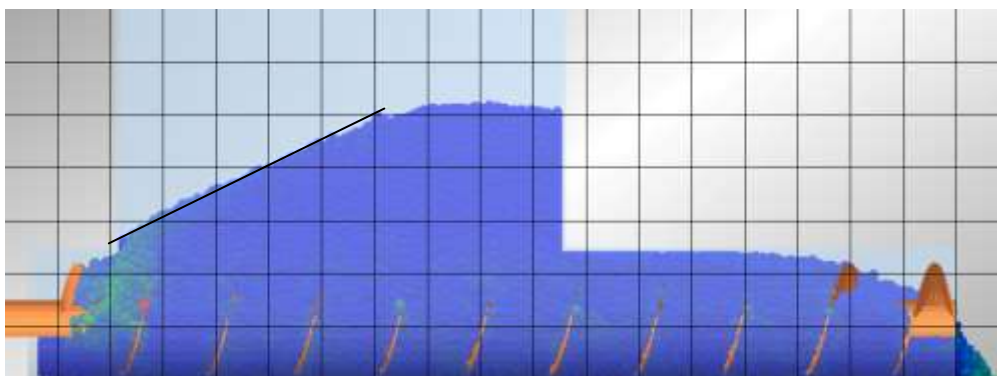


Abbildung 6.19: Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag
nach 5 Schneckenwellen Umdrehungen)

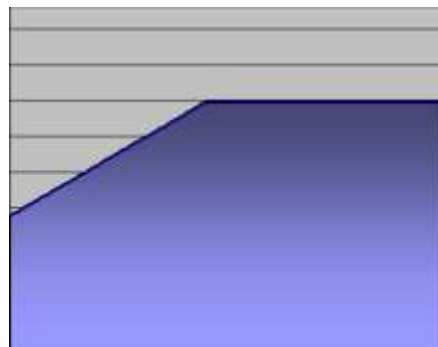


Abbildung 6.20: Linearisierte Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag
nach 5 Schneckenwellen Umdrehungen [11]

Bei fortschreitendem Bunker Schüttgut Austrag (siehe Abbildung 6.21) kommt es immer deutlicher zur Ausbildung einer linearen Schüttgutoberfläche.

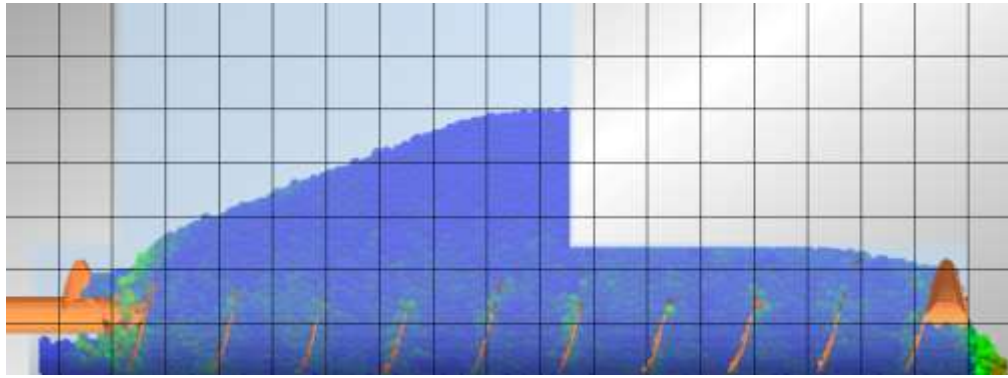


Abbildung 6.21: Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag
nach 6 Schneckenwellen Umdrehungen

7. Resümee und Ausblick

Das Ziel der Arbeit bestand in der Modellierung eines realen, vordefinierten Versuchsstandes, eines Doppelschneckenförderers DSF samt Bunker. Verwendet wurde hierfür eine 3D-Simulationssoftware, welche nach dem nichtlinearen Berechnungsmodell Hertz-Mindlin arbeitet. Nach einer entsprechenden Einarbeitungsphase in die Software war es möglich ein 3D-Cad Modell des Versuchsstandes in die Software zu implementieren. Anschließend folgte die korrekte Modellierung der dynamischen Bewegungen beider Austragschnecken. Weiters wurde das eingesetzte Schüttgut bzw. wurden die Bauteile des Schneckenförderers modelliert. Das Verhalten der Schüttgutpartikel zueinander, bzw. in Verbindung mit den Bauteilen wurde festgelegt.

Daran folgten verschiedene Versuchsreihen mit diversen Parametervariationen. Abfragen machten es möglich, die erhaltenen Simulationswerte mit jenen von durchgeführten Versuchen bzw. Berechnungsergebnissen gegenüber zu stellen bzw. vergleichbar zu machen.

Das Preprocessing betrug bei den in der Arbeit angeführten Simulationen jeweils ca. 12 bis 15 Stunden, ausgenommen VS_31_8_2010_1. Wohlgemerkt wurden diese Versuchsreihen mit reduziertem Partikel Schubmodul, auf Anraten der Softwarefirma, sowie weiteren individuellen Parametereinstellungen durchgeführt (siehe Tabelle 6.4). Zum Vergleich wurde die Simulation VS_31_8_2010_1 des Versuchsstandes mit realem Schubmodul durchgeführt. Die Rechenzeit der Simulation verlängerte sich auf über 160 Stunden, was einen enormen zeitlichen Aufwand darstellte. Stellt man diese Simulation den anderen, durchgeführten gegenüber (siehe Abbildung 6.16), so weisen diese Ergebnisse nur unwesentliche, geringe Unterschiede auf (siehe Tabelle 6.33). Hinsichtlich des Vergleiches der durch die Simulation erhaltenen Werte und den berechneten Werten von Grohmann sei gesagt, diese seine Berechnungen wurden aufgrund von reinen Geometrieabmessungen durchgeführt. Bei der hier vorliegenden Arbeit wurde in den definierten volumetrischen Abfragen direkt auf die Partikel

eingegangen. Somit folgt der Schluss, dass die Simulationsvolumina hier kleiner sein müssen.

In Bezugnahme auf den Vergleich der Differenz der erhaltenen Messvolumina an der Versuchsanlage sowie den generierten Simulationsvolumina muss festgehalten werden, dass bei allen hier angeführten Simulationen ein Partikel Durchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ festgelegt wurde (siehe Tabelle 6.3).

Hingegen wurde bei den realen Messungen SiO_2 mit einer Korngröße von $d = 0,1$ bis $0,8 \text{ mm}$ verwendet.

Aufgrund des vorliegenden Korngrößenverhältnisses zwischen Messung und Simulation und in weiterer Folge auch den somit entstehenden größeren Hohlraumvolumina bei den Simulationen sind die im geringen Maße verminderten Simulationsvolumina zu erklären.

Diverse weitere im Zuge dieser Arbeit versuchte Simulationen mit $d < 20 \text{ mm}$ haben gezeigt, dass hier ein extrem hoher Simulationsrechenzeitaufwand entsteht, welcher nur mit Hochleistungsrechenmaschinen zu bewältigen ist.

Hinsichtlich der Datenauswertungen sei angemerkt, dass die Ergebnisse wegen der schwierigen Parameterwahl stets kritisch betrachtet werden sollten.

Die DEM Simulation bietet unzählige Einsatzmöglichkeiten für Prozessabläufe, sowie deren rechentechnische Datenerfassung, Ausgabe usw. . Meiner Meinung nach bietet sich diese dynamische Simulationsmethode in Verbindung mit realen Versuchen sowie Berechnungen nahezu an, da ein wertvolles Gesamtverständnis hinsichtlich der Prozesstechnik erzielt werden kann.

8. Anhang

a. Literaturverzeichnis

- [1] Katterfeld A., Krause F.; Einsatz der Diskreten Elemente Methode in der Schüttgut-Fördertechnik, Schüttguttagung, Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, 2003
- [2] Günther, W. A.; Schüttgutförderung, Vorlesungsskript, Kap. 5 – 1, TU München
- [3] Hoffmann, K., Krenn E., Stanker G.; Fördertechnik Band 2, Oldenburg Verlag Wien München, 2004
- [4] Bates L.; Guide to the Design, Selection, and Application of Screw Feeders, Cromwell Press UK, 2000
- [5] DIN 15262; Stetigförderer, Schneckenförderer für Schüttgut, Berechnungsgrundsätze, 1983
- [6] Wonisch, A.; Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationstechniken für die Modellierung von Unordnungseffekten und Anisotropieentwicklung in pulvertechnologischen Prozessen, Dissertation, Shaker Verlag Aachen, 2008
- [7] Kotov R.; Modellierung der Formstoffströme beim Vollformgießen, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2008
- [8] Mair am Trinkhof K.; Numerische Untersuchung von Felsmassenstürzen vom Roten Kögele am Hallstätter Salzberg mittels PFC^{3D}, Diplomarbeit, TU Wien, 2007
- [9] Tillmann A.; Lösung der Grenzflächenproblematik bei der gemeinsamen Inversion geoelektrischer und seismischer Daten von oberflächennahen, porösen Schichten, Dissertation, Universität Bochum, 2001
- [10] Degischer H.P.; Werkstoffkunde und Materialprüfung 1, Vorlesungsskript, S.32, TU Wien
- [11] Grohmann, P.; Berechnung der Antriebsleistung sowie Optimierung von Bunkeraustragsschnecken, Diplomarbeit, TU Wien, 2009
- [12] Katterfeld A., Krause F.; Untersuchungen mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode, Fachtagung Schüttguttechnik, Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, 2004
- [13] Gröger T., Katterfeld A.; Kalibrierung von DEM-Simulationsmodellen für die Schüttgutfördertechnik, Wissensportal baumaschine.de, 2005
- [14] Millner, R.; Horizontale Schneckenförderer – Antriebsleistungsberechnung unter Berücksichtigung der Geometrie und Reibungsverhältnisse, Diplomarbeit, TU Wien, 1994
- [15] Szecsenyi, F.; Bunkeraustrag mittels Förderschnecken –Praxisgerechte Berechnung der Antriebsleistung für Bunkeraustragsschnecken, Diplomarbeit, TU Wien, 2008
- [16] Will J.; Die Diskrete Elemente Methode (DEM) und ihre Anwendung in der Felsmechanik, Mitteilungen des Institutes für Strukturmechanik, Bauhaus Universität Weimar, 1995

- [17] Kadau D.; Porosität in kohäsiven granularen Pulvern und Nano-Pulvern, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [18] Curry D., Favier J., LaRoche R.D.; A Systematic Approach to DEM Material Model Calibration, 6th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, 2009

b. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: DEM Berechnungszyklus	3
Abbildung 2.1: Vor- und Nachteile von Schneckenförderer	5
Abbildung 2.2: Horizontaler Schneckenförderer - Räumliche Darstellung [2]	6
Abbildung 2.3: Horizontaler Schneckenförderer mit Anbauteilen [3]	6
Abbildung 2.4: Bauarten von Schnecken [3]	8
Abbildung 2.5: Trogformen [3]	9
Abbildung 2.6: Bunkeraustragvorrichtung [4]	10
Abbildung 2.7: Bevorzugte Förderung eines gleichförmigen Schraubengewindes [4]	11
Abbildung 2.8: Formen von Förderschnecken [4]	12
Abbildung 3.1: Wirkende Kräfte an einer Schnecke	14
Abbildung 4.1: Differenzierte Vorgangsweise bei der Prozesssimulation mit Diskreter Elemente Methode (DEM) sowie Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [6]	19
Abbildung 4.2: Kugel-Kugel Kontakt nach Itasca [7]	21
Abbildung 4.3: Kugel-Wand Kontakt nach Itasca [7]	22
Abbildung 4.4: Kugel-Wand Kontakt Normalenvektor Ermittlung nach Itasca [7]	22
Abbildung 4.5: Partikeldarstellung mit individuellen Eigenschaften [6] ...	24
Abbildung 4.6: Zweidimensionales Beispiel von Replikationen (graue Felder) einer Simulationsbox (weißes Feld) in einer oder mehreren Raumrichtungen bei periodischen Randbedingungen. Das schwarze Partikel, welches sich am oberen Ende der Simulationsbox befindet, wird beim Verlassen dieser wieder unten eingefügt.[6]	29
Abbildung 4.7: Allgemeiner Programmablaufplan einer Simulationsrechnung [6]	31
Abbildung 4.8: Steifigkeitsmodell nach Hainbücher [8]	32
Abbildung 4.9: Hertz-Mindlin Kontakt	34
Abbildung 4.10: Kontaktbindungsmodell nach Preh [8]	37
Abbildung 4.11: Konstitutive Beziehungen der Kontaktbindung nach Itasca [8]	39
Abbildung 4.12: Parallelbindung - zementartiges Bindungsmaterial nach Itasca [8]	40
Abbildung 4.13: Interaktion viskoses Dämpfungsmodell mit linearem Kontaktmodell nach Itasca [8]	44
Abbildung 4.14: Restitutionskoeffizient R über Kritischem Dämpfungsverhältnis β [8]	45

Abbildung 5.1: Doppelschneckenförderer Versuchsanlage DSF VA.....	48
Abbildung 5.2: DSF VA Firma Doubrava (A), Austragschnecken aus Bunkersicht (B)	49
Abbildung 5.3: Hauptmaske Simulationssoftware.....	50
Abbildung 5.4: Partikel Materialdefinition	51
Abbildung 5.5: Schneckenförderer Materialdefinition.....	52
Abbildung 5.6: Wechselwirkung Partikel – Partikel	52
Abbildung 5.7: Wechselwirkung Partikel – Stahl	53
Abbildung 5.8: Spezifikation der Rotation Welle 1	55
Abbildung 5.9: Spezifikation der Rotation Welle 2	56
Abbildung 5.10: Ursprung der Partikelgenerierungsebene.....	56
Abbildung 5.11: Definition des Simulationsraumes	58
Abbildung 5.12: Schneckenförderer Simulationsraum	58
Abbildung 5.13: Viewer und zugehörige Controls (links unten: Progress Schaltfläche)	61
Abbildung 6.1: Definition der „Grid Bin Group“	68
Abbildung 6.2: Fördervolumen DSF - VS_13_7_2010_5	73
Abbildung 6.3: Partikelanzahl DSF - VS_13_7_2010_5.....	74
Abbildung 6.4: Fördervolumen DSF - VS_25_8_2010_2	76
Abbildung 6.5: Fördervolumen DSF - VS_3_9_2010_1	77
Abbildung 6.6: Fördervolumen DSF - VS_4_9_2010_1	79
Abbildung 6.7: Fördervolumen DSF - VS_5_9_2010_1	80
Abbildung 6.8: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_1	81
Abbildung 6.9: Fördervolumen DSF - VS_6_9_2010_2	83
Abbildung 6.10: Fördervolumen DSF - VS_7_9_2010_1	84
Abbildung 6.11: Fördervolumen DSF - VS_8_9_2010_1	85
Abbildung 6.12: Fördervolumen DSF - VS_9_9_2010_1	87
Abbildung 6.13: Fördervolumen DSF - VS_10_9_2010_1	88
Abbildung 6.14: Fördervolumen DSF - VS_13_9_2010_1	89
Abbildung 6.15: Fördervolumen DSF - VS_31_8_2010_1	91
Abbildung 6.16: Fördervolumina Übersicht	92
Abbildung 6.17: Volumina Vergleich (gemessen – berechnet) [11]	93
Abbildung 6.18: Schüttwinkelbildung bei Bunkeraustrag	95
Abbildung 6.19: Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag.....	95
Abbildung 6.20: Linearisierte Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag	95
Abbildung 6.21: Schüttgutwinkelbildung bei Bunkeraustrag.....	96

c. Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

DIPLOMARBEIT

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am _____

Unterschrift