



DIPLOMARBEIT

Entwicklung einer Versuchsanlage zur Kalibrierung von DEM-Modellen für Schüttgüter in der Fördertechnik

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom Ingenieurs (Dipl. Ing) unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig

Mitbetreuer

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Decker

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Yusuf KALKAN

0827007 (066 445)

Menzelgasse 12/4-5

1160 Wien

Wien, im Dezember 2013

Vorname Nachname

I. DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik. Da diese Arbeit den Abschluss meines Masterstudiums darstellt, möchte ich die Gelegenheit nutzen, einigen Personen meinen Dank auszusprechen.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer, Herrn Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Decker, für seine stetige Hilfsbereitschaft bei der Erstellung der Masterarbeit bedanken.

Herrn Johannes Handler BSc bedanke ich mich für die anfängliche Unterstützung bei der Verwendung der Simulationssoftware EDEM und für die zahlreichen Diskussionen diverser Probleme. Ein besonderer Dank geht auch an Herrn Markus Schneider für seine Unterstützung bei der Herstellung und dem Aufbau der Versuchsanlage.

Ein ganz großer Dank gilt meinen Eltern Fatma und Hüseyin, die mir nicht nur durch ihre Finanzierung ein sorgenfreies Studium ermöglichten, sondern auch durch ihren Glauben an mich und die moralische Unterstützung einen hilfreichen und ermunternden Beitrag geleistet haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Geschwistern Lokman, Meryem, Zübeyde und Yakup bedanken, die mit viel Geduld meine Launen während des gesamten Studiums ertragen und mich in allen Lebenslagen unterstützt haben. Einen herzlichen Dank für ihre Liebe, die sie mir immer wieder entgegen gebracht haben.

Allen meinen Studienkolleginnen und Studienkollegen möchte ich noch meinen aufrichtigsten Dank aussprechen. Vor allem bedanke ich mich bei Christof Partl und Stefan Doppler für ihre großen Unterstützungen im Studium.

II. KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Diskreten Elemente Methode (DEM) für Schüttgüter in der Fördertechnik. Am Anfang dieser Arbeit wird kurz der Aufbau und die Funktion der DEM beschrieben. Dabei wird neben dem Berechnungszyklus auf die unterschiedlichen Partikelmodelle und Kontaktmodelle sowie auf die Ermittlung der Zeitschrittlänge eingegangen. Die Problematik der DEM ist die Festlegung der Materialparameter in der Simulation. Die Genauigkeit der DEM Modelle hängt wesentlich von der Wahl der Parameter ab. Doch diese sind in den meisten Fällen unbekannt, da für jede Anwendung ein individuelles Partikelmodell verwendet wird. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die unbekannt Parameterwerte von Schüttgütern für die Simulation zu bestimmen. Dies soll mit Hilfe einer Versuchsanlage durch Beobachtung des Schüttgutverhaltens geschehen. Es sollen dabei mechanische sowie geometrische Größen in Betracht gezogen werden. Diese Ergebnisse dienen dann als Vergleich mit den Ergebnissen von DEM-Simulationen. Die Abweichung dieser Ergebnisse in der Simulation von den realen Ergebnissen sollte nicht mehr als $\pm 10\%$ betragen. Als zu untersuchendes Schüttgut kamen dabei Urea und Kantkörner mit der Körnung 4/8 zum Einsatz. Die Simulationen werden mit Hilfe des Softwares EDEM Academic 2.4 der Firma DEM Solutions durchgeführt.

Ausgehend von den vorzugebenden Parametern für die Simulation werden diese in bekannte und unbekannte Parametern eingeteilt. Mit den unbekannt Parametern wird dann ein statistischer Versuchsplan erstellt, um eine mathematisch durchdachte Reihe von Simulationen aufzustellen, mit denen das Gesamtverhalten des Systems analysiert und die Parameter optimiert werden können. Mit den optimierten Parametern werden nochmals Simulationen durchgeführt und mit den Ergebnissen des Laborversuches verglichen. Zum Schluss sind drei Validationsversuche durchgeführt worden, um eine genaue Bewertung der Partikelmodelle zu bekommen.

III. ABSTRACT

The present work deals with the discrete element method for bulk solids in conveyor technology. The beginning of the work is a briefly description of the structure and function of DEM. In this part will be described in addition to the calculation cycle also other points, which includes the different particle models and contact models and the determination of the length of the time step. The problem of DEM is to determine the material parameters in the simulation. The accuracy of DEM models depends largely on the choice of this parameters. But in most cases, these parameters are unknown, since for each application an individual particle model is used. The aim of this work is to determine the unknown parameter values of bulk materials for the simulation. This will be done by using a test facility by observing the bulk behavior. Mechanical and geometrical properties should be observed. These results serve as a comparison with the results of DEM simulations. The deviation of the results in the simulation from the results of the real experiment should not be more than $\pm 10\%$. Urea and edge grain with a grain size of 4/8 are used as examined bulk material. The simulations are performed using EDEM Academic 2.4 by the company DEM Solutions.

The presettable parameters for the simulation are divided in known and unknown parameters. With the unknown parameters an experimental design is created, to establish a mathematically sophisticated set of simulations. This is required to analyze the overall behavior of the system and to optimize the parameters efficiently. With the optimized parameters, simulations are performed again and compared with the results of the laboratory experiment. Finally, three validation experiments have been carried out in order to get an accurate assessment of the determined particle models.

IV. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung der Diplomarbeit	7
1.2	Allgemeines.....	7
2	Diskrete Elemente Methode (DEM).....	10
2.1	Länge eines Zeitschritts.....	11
2.2	Partikelgeometrie.....	12
2.2.1	Cluster und Klumpen.....	13
2.3	Kontaktmodelle.....	14
3	Vorhandene Methoden zur Bestimmung der Schüttgutparameter	16
3.1	Versuche zur Ermittlung der statischen Böschungswinkel	16
3.2	Neigbarer Behälter	20
3.3	Rotierende Mühle – Kräftevergleich	23
3.4	Rotierende Trommel – Dynamischer Böschungswinkel	24
3.5	Drei einfache Versuche zur Bestimmung der Materialparameter für DEM-Modelle.....	25
4	Versuchsanlage	28
4.1	Motor	33
4.1.1	NanoPro 1.7.....	35
4.2	Kraftsensor	39
4.2.1	VS2	44
4.3	Versuchsdurchführung	50
4.4	Messergebnisse	52
5	Computersimulation (EDEM)	62
5.1	Erzeugung der Geometrie der Versuchsanlage und Definition ihrer Eigenschaften.....	62
5.2	Definition der Partikelform	66
5.3	Definition der Partikeleigenschaften und –generierung	68

5.4 Allgemeine Simulationseinstellungen	70
6 Parameterkalibrierung / Kalibrierung der Simulation	72
6.1 Parameterliste	72
6.1.1 Querkontraktionszahl ν und Schubmodul G	75
6.1.2 Partikelradius R	76
6.1.3 Feststoffdichte ρ	76
6.1.4 Restitutionskoeffizient e	78
6.1.5 Haftreibungs- und Rollwiderstandskoeffizient	79
6.1.6 Zusammenfassung der Eingabeparameter	79
6.2 Statistische Versuchsplanung / Design of Experiments (DOE)	80
6.2.1 Terminologie	82
6.2.2 Modelle	82
6.2.3 Versuchspläne für Optimierungen.....	85
6.3 Durchführung der Simulationen mit Hilfe des Versuchsplans.....	90
7 Vergleich Mess- & Simulationsergebnisse.....	106
8 Validation	112
8.1 Dynamischer Böschungswinkel.....	112
8.2 Statischer Böschungswinkelversuch 2	120
8.3 Schieben der Box mit Schüttgut auf einer Stahlplatte	122
9 Weitere Erkenntnisse	124
10 Zusammenfassung	127
11 Ausblick	129

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Diplomarbeit

Mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode kann das Schüttgutverhalten analysiert werden. Die realen Schüttgüter werden dabei mit Partikelmodellen beschrieben. Um kürzere Rechenzeiten zu erreichen werden diese Partikel vereinfacht und größer gewählt als die realen Partikel. Die Genauigkeit dieser Modelle ist von der Wahl der Modellparameter abhängig, welche in den meisten Fällen unbekannt sind. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine Kalibriermethode bzw. Versuchsanlage zu entwickeln, mit der diese unbekannt Parameter bestimmt werden können.

Mit der Versuchsanlage sollen vorerst die DEM Modelle zweier Schüttgüter kalibriert werden. Dabei soll eine Methode angewendet werden, welche die Findung der optimalen Parameterwerte zeitlich effizient ermöglicht. Die maximale Abweichung der simulierten Ergebnisse von den realen Ergebnissen sollte nicht mehr als $\pm 10\%$ betragen. Zum Schluss sollen einerseits die Simulationsergebnisse mit den realen Ergebnissen verglichen und diskutiert und andererseits die Modelle anhand eines anderen Versuches validiert werden.

1.2 Allgemeines

Die Diskrete Elemente Methode wurde 1979 von Peter A. Cundall als numerische Berechnungsmethode für Partikelsysteme vorgestellt. Im Jahre 1985 stellten Grant Hocking, John R. Williams und Graham Mustoe die verallgemeinerte Diskrete Elemente-Methode vor. 1988 entwickelte Shi die diskontinuierliche Deformationsanalyse (DDA). Bei der DDA wird die Finite Elemente Methode zur Lösung von Spannungen und Deformationen in der Diskreten Elemente Methode verwendet [1].

Die Methode von Cundall basiert auf die sukzessive Überwachung der Wechselwirkungen und Modellierung der meist diskreten, diskontinuierlichen Bewegungen von Partikeln. Der grundlegende Gedanke der DEM ist, dass für alle Partikel, die im einfachsten Falle Kugeln sind, abwechselnd die Newton'schen Bewegungsgleichungen (bezogen auf die Teilchen) gelöst und Kraft-Weg-Gesetze (bezogen auf die Kontakte zwischen den Teilchen) angewendet werden. Dies wird mittels einer numerischen Simulation erreicht. Der Vorteil darin liegt, dass die Anwendung flexibler ist gegenüber analytischer Untersuchung. Im Vergleich zu

physikalischen Modellierungen hat es den Vorteil, dass alle Daten zu jedem Zeitpunkt der Simulation zugänglich sind. Allerdings liegt das Problem an der hohen Anzahl der zu berücksichtigenden Teilchen. Bis Anfang der 1990er Jahre war die Anwendung dieser Methode wegen der Rechentechnik begrenzt. Mit heutzutage leistungsfähigen Computern ist es möglich komplexe Simulationen mit mehreren hunderttausend Partikel durchzuführen [2]. Doch die Rechenzeit kann bei solchen Simulationen für Simulationszeiten von 30 – 60s immer noch mehrere Tage bis Wochen betragen, welches den größten Nachteil dieser Methode darstellt [3].

Das Modellieren von Schüttgutströmungen stellt einen bedeutenden wissenschaftlichen Fortschritt in der Fördertechnik dar, was aber einige Herausforderungen in den Industrieanwendungen aufweist. Dazu gehören die Bestimmung der Materialeigenschaften (Restitutionskoeffizienten, Reibwerte, Schubmodul,...) und die Akzeptanz der Entwickler, als ein genaues und kostengünstiges Werkzeug. Bevor alle zweckdienlichen Modellierungen und Vorhersagen gemacht werden können, sollten in der Regel zahlreiche Simulationen durchgeführt werden, um das Partikelmodell innerhalb der erforderlichen Zeit zu optimieren, um ein zuverlässiges Ergebnis zu bekommen. Um sicherzustellen, dass die DEM mit maximaler Effizienz eingesetzt wird, ist im Folgenden ein Verfahren zur Optimierung des Charakterisierungs- und Simulationsprozesses vorgeschlagen [4]:

1. Bestimmung der Schüttguteigenschaften, wie Partikelform und Partikelgröße bzw. deren Verteilung, Partikeldichte und Schüttdichte.
2. Festlegen des Geometriematerials und Partikelmaterials, um ausreichende Materialeigenschaften, wie das E-Modul und der Querkontraktionszahl, so zu wählen, damit ein Zeitschritt (nur abhängig von Partikeleigenschaften) abgeschätzt werden kann, um eine stabile Simulation zu erreichen.
3. Nachdem alle Parameter, die zur Abschätzung des Zeitschrittes dienen, ausgewählt sind, kann über eine Berechnung oder ein Programm die tolerierbare Anzahl an Partikeln bestimmt werden, um eine angemessene Simulationszeit zu erhalten. Gegebenfalls kann die Partikelgröße vergrößert, kleinere Partikel vernachlässigt und die Partikelform vereinfacht modelliert werden. Dadurch kann eine Reduktion der Anzahl der Partikel in der Simulation erreicht werden. Die Erhöhung des Zeitschritts durch Verringerung des Schubmoduls kann ebenfalls durchgeführt werden. Der Einfluss dieser

Vereinfachungen auf die Simulation wurde bisher nicht intensiv studiert, aber geringfügige Vereinfachungen sind teils notwendig, um Simulationen aufzustellen. Die Veränderungen der Parameter sind sorgfältig durchzuführen, da eine übermäßige Modifikation ein unrealistisches Verhalten des Schüttguts hervorrufen kann.

4. Damit das virtuelle Verhalten der Partikel ein realistisches Partikelverhalten bzw. ein ähnliches Schüttgutverhalten wie das reale Schüttgut aufweist, können zahlreiche Laborversuche durchgeführt werden, mit denen die DEM Parameter fein abgestimmt werden können. Das Schätzen von Parametern, wie z.B. des Restitutionskoeffizienten, die statische Reibung oder die Rollreibung, kann sehr riskant sein und das Vertrauen auf die Richtigkeit der Ergebnisse reduzieren.
5. Nachdem alle Parameter bestimmt wurden, können einfache Simulationen durchgeführt werden, mit dem Ziel, den Zeitschritt nochmals zu erhöhen und die Korrektheit des DEM Modells festzustellen oder kleinere Änderungen durchzuführen, bevor eine detaillierte Simulation stattfindet.

In dieser Arbeit wurde eine Versuchsanlage entwickelt, mit der die Simulationsparameter kalibriert werden können. Zur Untersuchungen kamen dabei als Schüttgüter Urea und Kantkörner 4/8 zum Einsatz. Urea ist ein weißer, kristalliner, ungiftiger und hygienisch unbedenklicher Feststoff. Es ist ein Harnstoff mit hohem Stickstoffgehalt und das weltweit bedeutendste Stickstoffdüngemittel. Als wässriger Lösung dient Harnstoff zur Reduktion von Stickoxiden im Abgas von Kraftwerken und Verbrennungsmotoren [5]. Die Kantkörner mit der Körnung 4/8 bestanden aus einer Mischung von unterschiedlichen Steinarten. Diese waren hauptsächlich Quarzsteine, Granitsteine und Kalksteine.

2 Diskrete Elemente Methode (DEM)

Mit der Diskreten Elemente Methode werden die Kräfte und Ortsveränderungen einer beanspruchten Schüttung durch numerische Berechnung gefunden, wobei die Schüttung bei der Simulation aus diskreten Einzelpartikeln besteht, die sich an den Kontaktstellen berühren. Die Berechnung erfolgt in Zeitschritten. Dabei wird die Bewegung der einzelnen Partikel verfolgt, die Folge von Änderungen der Randbedingungen ist. Die Länge eines Zeitschritts ist in Kapitel 2.1 beschrieben.

Der Berechnungszyklus besteht aus zwei Schritten (Abbildung 1), die in jedem Zeitschritt wiederholt werden. Nach Angabe eines einmaligen Startparameters, z.B. einer Startbewegung, werden die resultierenden Kräfte und Momente an jedem Kontakt der Partikel mittels Kraft/Bewegungs-Gesetz ermittelt. Anschließend wird mittels des zweiten Newton'schen Gesetzes die Beschleunigung der Partikel aus den resultierenden Kräften und Momenten berechnet. Durch Integration der Beschleunigung über einen kurzen Zeitschritt werden die Geschwindigkeiten und Position jedes Partikels aktualisiert. Mit den neuen Positionen ergeben sich eine neue Anzahl der Kontaktpunkte und die entsprechende Überlappung, aus denen im nächsten Zyklus die neuen Kontaktkräfte und Momente für alle Partikel berechnet werden. Die Berechnungszyklen wiederholen sich solange bis die gewünschte Simulationszeit erreicht ist [6].

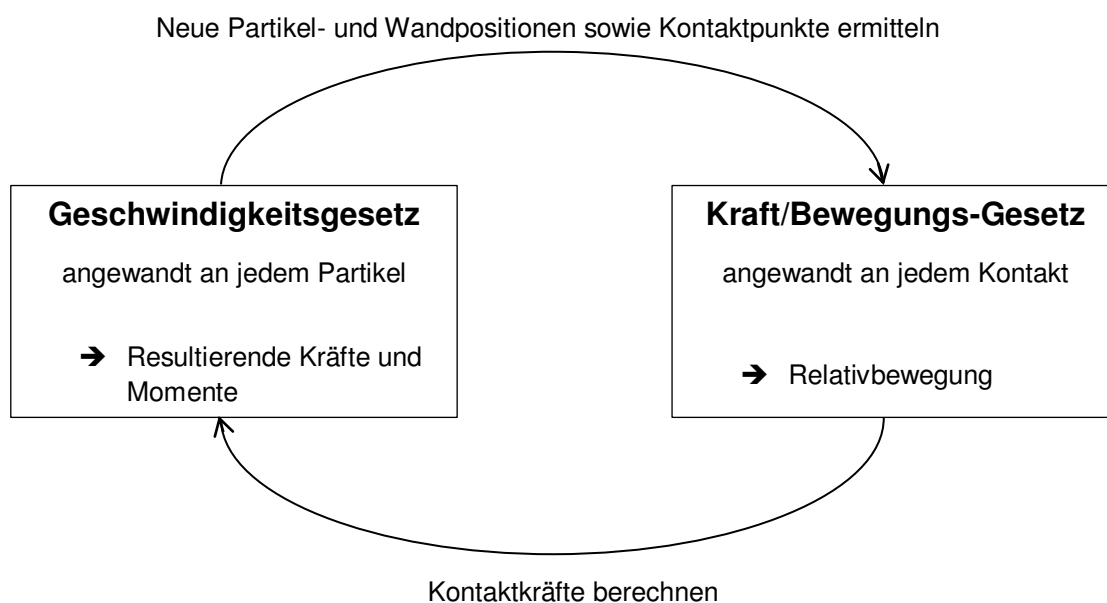


Abbildung 1: Berechnungszyklus [7]

2.1 Länge eines Zeitschritts

Während eines Zeitschritts sind alle Beschleunigungen konstant. Durch Integration können die Geschwindigkeiten und die neuen Positionen errechnet werden. Die Länge des Zeitschritts ist so auszulegen, dass Störungen nur von einem Partikel zum nächsten gelangen können. Die Geschwindigkeit der Störungen ist dabei abhängig von den physikalischen Eigenschaften der Partikel. In jedem Zeitschritt werden die Kontakterkennung und der Berechnungszyklus (Abbildung 1) durchgeführt [8]. Der Zeitschritt darf nicht zu kurz gewählt werden, weil mit kürzeren Zeitschritten lange Rechenzeiten verbunden sind. Die Länge eines Zeitschritts darf auch nicht zu groß sein. Ansonsten könnte ein Partikel während eines Zeitschritts durch ein anderes Partikel durchdringen, was in der Realität unmöglich wäre. Es könnte auch sein, dass die Überlappung zweier Partikel sehr groß wird und dementsprechend auch die Kontaktkraft, sodass im nächsten Zeitschritt die beiden Partikel voneinander wegprallen würden → Instabilität [9]. Um ein dafür geeignetes Maß der Länge eines Zeitschritts zu finden, wird angenommen, dass die gesamte Energie der Partikel über Rayleigh-Wellen entlang der Oberfläche übertragen wird. Dies ist eine gute Näherung, da die Geschwindigkeitsdifferenz der Rayleigh-Welle und der s-Wellen (Transversalwellen) klein ist und die Energie die über p-Wellen (Longitudinalwellen) übertragen wird vernachlässigbar klein ist. Die Rayleigh-Zeit T_R , welche die Zeit ist, bei der sich eine Welle durch ein festes Teilchen ausbreitet (Abbildung 2), wird folgendermaßen berechnet:

$$T_R = \frac{\pi * R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0.1631 * \nu + 0.8766} \quad (2.1)$$

Hierbei ist R der Radius, ρ die Dichte, G das Schubmodul und ν die Querkontraktionszahl (Poissonzahl) eines Partikels. Bei der Simulation eines Partikelsystems (zwei oder mehrere verschiedenartige Partikel) existieren von einem Parametertyp mehrere Werte. In diesem Fall muss von diesen Werten derjenige gewählt werden, der den Zeitschritt minimiert. Für eine ausreichende Genauigkeit wird die Länge des Zeitschritts mit 10-30% der Rayleigh-Zeit angenommen [10] [11].

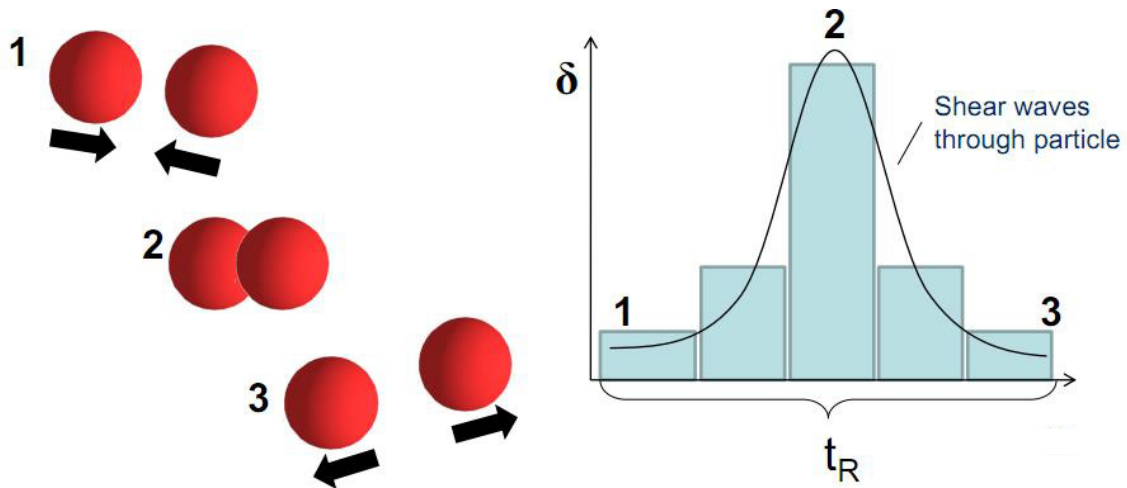


Abbildung 2: Rayleigh-Zeit über Überlappung δ [12]

Falls ein Grenzwert für die Überlappung gegeben ist, kann der Zeitschritt nach oben hin begrenzt werden. Es kann z.B. angenommen werden, dass die maximale Überlappung 0,5% vom Partikeldurchmesser sein soll. Mit der Kenntnis der maximalen Geschwindigkeit v_{max} und Partikeldurchmesser d wird der Zeitschritt dann aus

$$v_{max} * \Delta t = 0.005 * d \quad (3.9)$$

berechnet [12]. Typische Zeitschritte für fördertechnischen Zwecke liegen im Bereich von etwa 10^{-6} bis 10^{-5} Sekunden [3].

2.2 Partikelgeometrie

Die Schüttgutpartikel werden durch einfach beschreibbare geometrische Objekte abgebildet wie z.B. durch Kugeln, Superquadriks oder Polyedern (Abbildung 3) [7]. Für die numerische Effizienz werden allerdings Kugeln oder aus Kugeln zusammengesetzte Objekte (siehe Kapitel 2.2.1 *Cluster und Klumpen*) verwendet, die den folgenden Annahmen genügen. Die Partikel werden als starre Körper betrachtet und die Fläche eines Kontaktes geht gegen Null bzw. wird mathematisch als Punkt angesehen. Außerdem wird angenommen, dass die Kontakte „weich“ sind. D.h. starre Partikel überlappen einander an den Kontaktpunkten. Unter anderem steht die Kontaktkraft in Relation zur Überlappungslänge, die im Verhältnis zum Partikel sehr klein ist [8].

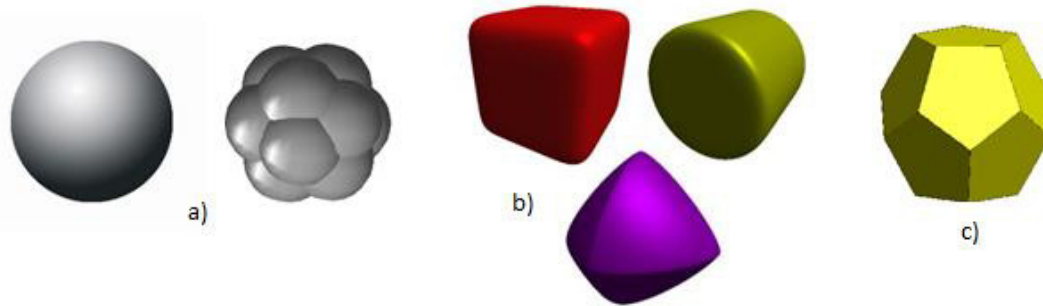


Abbildung 3: Partikelgeometrien

a) Kugel (li. einfach, re. mehrere Kugeln zusammengesetzt), b) Superquadrats, c) Polyeder (Dodekaeder)

Die Packungen und Formen der diskreten Elemente tragen zur Verteilung der Interaktionskräfte und deren Intensivität stark bei. Außerdem müssen diese Modelle das Verhalten des Schüttgutes, die bei Laborbeobachtungen oder Feldbeobachtungen erfasst wurden, widerspiegeln. Dies wird allerdings aufgrund der Komplexität des physikalischen Verhaltens von Schüttgütern erschwert. Bei derzeit verfügbaren mathematischen Werkzeugen und Methoden in der Informatik werden nur die wichtigsten Eigenschaften des Verhaltens von Schüttgütern mittels Kontaktmodelle beschrieben [13].

2.2.1 Cluster und Klumpen

Die Schüttgutpartikel können auch aus mehreren zusammengesetzten einfachen Formen modelliert werden (Abbildung 3a rechts bzw. Abbildung 4). Solche Modelle werden Cluster oder Klumpen genannt.

Ein Cluster wird aus mehreren Partikel an bestehenden Kontakten aufgebaut. Die Partikel können sich dabei beliebig weit überlappen. Es können auch mehrere Cluster miteinander verbunden werden. Die wichtigste Eigenschaft von Clustern ist, dass sie brechen können, wenn die Zug- bzw. Scherkraft die gesetzte Steifigkeit der Kontaktverbindung überschreitet.

Der Unterschied zwischen einem Klumpen und einem Cluster ist, dass die Kontaktverbindung der Partikeln eines Klumpens permanent erhalten bleibt. D.h. die Bindung kann als sehr steif angesehen werden. Außerdem werden die Kontakte der Partikel eines Klumpens nicht in der numerischen Berechnung berücksichtigt, wodurch dieses Modell effizienter ist, als jenes mit Cluster [14].

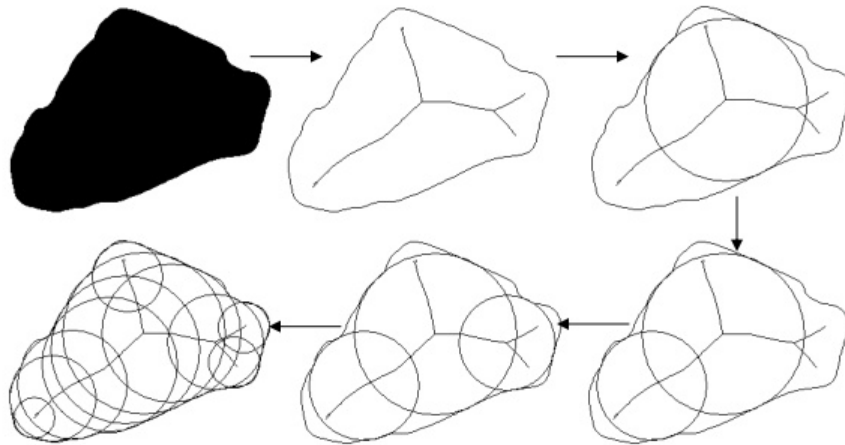


Abbildung 4: 2D-Modellierung eines Sandpartikels mittels überlappenden Kreisen (Klumpen) [15]

2.3 Kontaktmodelle

Das Materialverhalten eines Schüttguts wird durch ein Kontaktmodell für jeden einzelnen Kontakt zwischen Partikel und zwischen Partikel und Wänden festgelegt. Hierbei werden Simulationsparameter definiert, die mit Hilfe von Laborversuchen kalibriert werden. Die Interaktionen der Partikel kann mit sehr komplexen, nichtlinearen Kontaktmodellen beschrieben werden, wie z.B. das Hertz-Mindlin-Kontaktmodell. Bei diesem Modell liefert die Kontaktbeanspruchung eine nichtlineare Kraft-Weg-Funktion, womit eine höhere Rechenzeit für die Lösung entsteht. Die Erweiterung des Hertz-Mindlin-Kontaktmodells auf das einfache linear elastische Kontaktmodell vom Herrn Cundall ermöglicht es, die Simulation schneller zu berechnen. Mit weiteren Kontaktmodellen können spröde Brüche (duktils Modell), Van-der-Waals-Wechselwirkungen (kohäsives Modell), Auswirkungen von der Umgebung (elektrostatisches Modell) sowie Kriechprozesse (Burger's Modell) berücksichtigt werden [16]. In dieser Arbeit wird ausschließlich auf das nichtlineare Hertz-Mindlin-Kontaktmodell eingegangen.

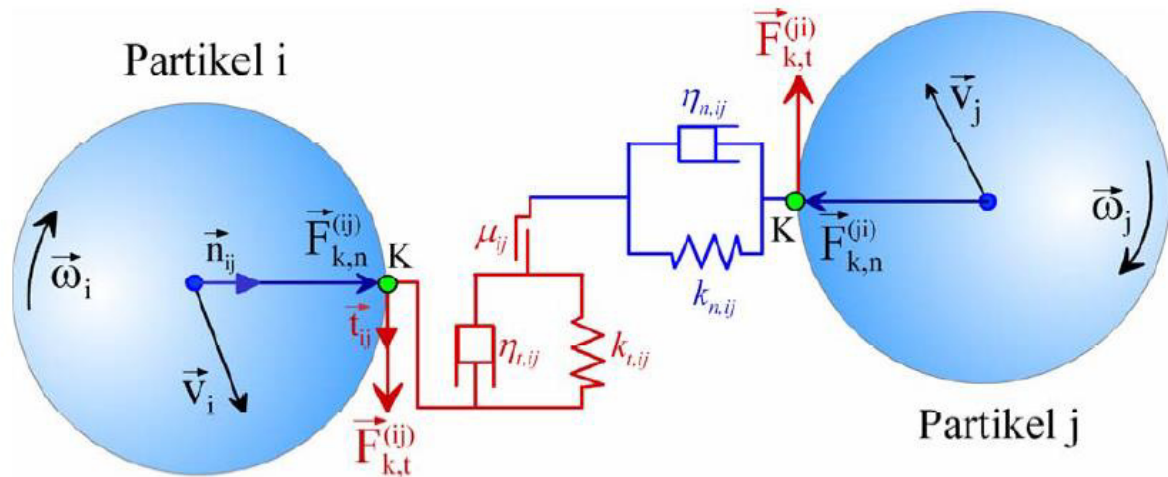


Abbildung 5: Kontaktmodell [17]

Dieses Modell berücksichtigt drei wichtige Kontakteigenschaften:

- 1) Steifigkeit
- 2) Viskose Dämpfung
- 3) Coulombsche Reibung

Die Konstanten $k_{n,ij}$ und $k_{t,ij}$ sowie $\eta_{n,ij}$ und $\eta_{t,ij}$ sind die Materialparameter für die Steifigkeiten und Dämpfung in Normal- und Tangentialrichtung. Es ergibt sich ein viskoelastischer Kontakt. Zur Berücksichtigung der Reibung ist ein Reibglied mit dem Reibungskoeffizient μ_{ij} in Tangentialrichtung angeordnet. Das Kontaktmodell kann auch auf einen Partikel-Wand Kontakt angewendet werden [8]. Nähere Informationen über die Diskrete Elemente Methode sind in der Bachelorarbeit [18] zu finden.

3 Vorhandene Methoden zur Bestimmung der Schüttgutparameter

In diesem Abschnitt werden Methoden zusammengefasst, die für die Ermittlung der unbekannt Parameter der Schüttgüter in der Simulation schon realisiert wurden.

3.1 Versuche zur Ermittlung der statischen Böschungswinkel

Grima und Wypych [19] entwickelten einen Schwungarmversuch (Abbildung 6) bestehend aus einem gespaltenen Acrylglasrohr, das mit einem Schwungarmmechanismus verbunden ist, welches die beiden Rohrhälften zusammenhält bzw. bei der Versuchsdurchführung voneinander trennt, um das Schüttgut sich selbst zu überlassen. Der entstehende Schüttwinkel wird anschließend gemessen. Als Schüttgut wurden im Versuch von Grima und Wypych Polyethylen Pellets verwendet. Die Anlage besteht aus einer Vielzahl von verschiedenen Rohren, um verschiedene Partikelgrößen und –mengen zu untersuchen. Neben dem Schwungarmversuch ist in der Abbildung 7 ein weiterer Versuch dargestellt, bei dem das Rohr senkrecht mit einer konstanten Geschwindigkeit nach oben gezogen wird. Die Geschwindigkeit kann variiert werden, um deren Einfluss auf die Schüttkegelbildung zu analysieren. In der Arbeit betrug der Rohrinne Durchmesser 60 mm und die Füllhöhe 150 mm. Diese Methode zur Messung des Schüttwinkels ist computertechnisch effizienter als die übliche Methode, bei dem die Partikel aus einem Zylinder rausfließen. Denn in diesem Versuch sind weniger Partikel notwendig, was die Simulationszeit erheblich verkürzt.

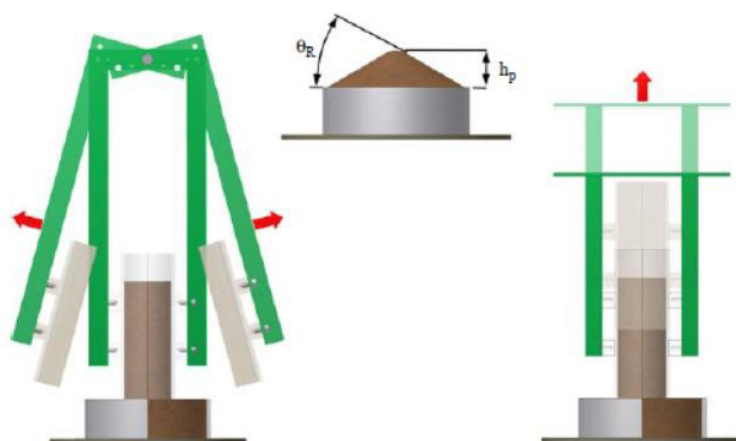


Abbildung 6: li. Schwungarmversuch; re. Hochziehen des Behälters [19]

Zur Verminderung der Interaktion zwischen Partikel und Grundplatte wurde ein Behälter mit 150 mm Innendurchmesser, gefüllt mit dem Schüttgut, unter dem Rohr platziert. Der Vorteil darin ist, dass die Effekte aus der Interaktion von Partikel-Platte

nicht berücksichtigt werden muss und somit hauptsächlich auf die Partikel-Partikel Interaktion eingegangen werden kann.

Der sich einstellende Schüttwinkel, wenn das Schüttgut aus einem Trichter herausrieselt, wurde mit einem stationären konischen Edelstahltrichter, wie in der Abbildung 7 dargestellt, analysiert. Mit Hilfe dieser drei verschiedenen Verfahren, kann die Abhängigkeit der Rollreibung und Gleitreibung von der Partikelgeschwindigkeit ermittelt werden.

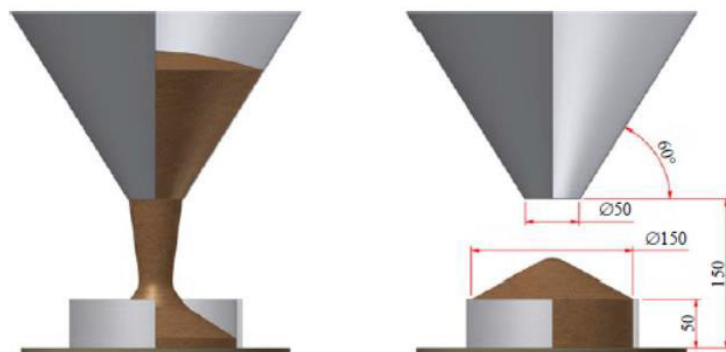


Abbildung 7: Trichterauslaufversuch [19]

Die DEM Simulationen werden in gleicher Weise durchgeführt, wie die Laborversuche. Hierbei wurde ein 3D Modell in die EDEM Software importiert, die die Geometrie darstellt (Abbildung 8). In der Simulation wurde der Behälter mit dem Schüttgut aus einer runden Platte mit den Eigenschaften des Schüttguts modelliert. Die translatorische Bewegung und die rotatorische Bewegung des Rohrs in den jeweiligen Verfahren wurden durch Hinzufügen von kinematischen Bedingungen zu den starren Geometrien erzeugt. Die Winkelgeschwindigkeit beim Schwungarmversuch betrug 1,57 rad/s, damit die geteilten Rohrhälften keinen Einfluss auf das Fließverhalten des Schüttguts haben. Beim Hochziehversuch wurde die Geschwindigkeit zwischen 10 und 200 mm/s variiert. Als Partikel kam Polyethylen mit niedriger Dichte zum Einsatz.

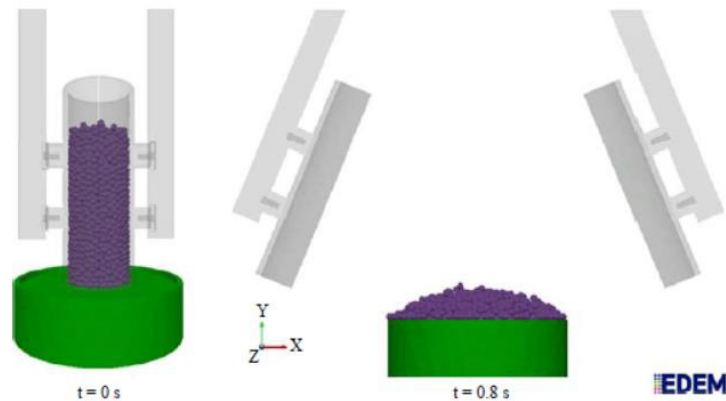


Abbildung 8: DEM-Modell des Schwungarmversuchs [19]

Rojek et al. [20] hat gezeigt, dass der Schüttwinkel von der statischen Reibung und Rollreibung abhängt. In DEM Simulationen wurde der zu erzielende Schüttwinkel durch die Kombination der statischen Reibungskoeffizient μ_s und Rollreibungskoeffizient μ_r erhalten. Allerdings gab es mehrere Kombinationen von diesen beiden Parametern für einen bestimmten Schüttwinkel. Um die Anzahl der Simulationen, die für jede Parameteränderung notwendig ist, gering zu halten, sollte nur ein minimal empfindlicher Parameter zur Verfeinerung verwendet werden. Deswegen wurden vor diesen Versuchen möglichst viele Parameter, wie die Partikelgröße und Verteilung, E-Modul, Querkontraktionszahl, Partikeldichte, Restitutionskoeffizient und der statische Reibungskoeffizient abgeschätzt oder gemessen. Danach wurde die Partikelform mit einfachen Geometrien modelliert und schließlich mit einer geringen Anzahl an Simulation, wo die Rollreibung verändert wurde, das gewünschte Ergebnis erreicht. Dass der statische Reibungskoeffizient ab $\mu_s = 0,3$ einen geringen Einfluss auf den Schüttwinkel hat, ist in der Arbeit von Grima und Wypych [19] beschrieben.

Der statische Coulombsche Reibungskoeffizient wurde anhand von zwei Methoden gemessen. Mit dem Jenike Scherzellenversuch konnte der kinematische Wandreibungswinkel und mit einem ähnlichen Gerät von Li et al. [21] der statische Reibungswinkel bestimmt werden. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Methoden ist, dass der kinematische Wandreibungswinkel mit einer konstanten Scherrate von ungefähr 2.5 mm/min gemessen wird während die Ermittlung der statischen Reibungswinkel zwischen ruhenden Körpern erfolgt. Die Abbildung 9 zeigt die ermittelten Werte für die möglichen Partikel-Wand Wechselwirkungen. Um die statische Reibung zwischen Polyethylen Pellets zu bestimmen, wurden die Pellets

aufgeschmolzen und zu einer Wand geformt, um anschließend die Reibung zwischen dieser Wand und den Pellets zu messen. Da die beiden gemessenen Reibungswinkel sich geringfügig unterschieden, ist die Schätzung der statischen Coulombschen Reibung μ_s nur mit dem Scherzellenversuch auch möglich. Zudem liefert der kinematische Reibungswinkelversuch eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des realen Versuchs, im Gegensatz zum statischen Reibungswinkelversuch, welche auch schwieriger durchzuführen ist.

Material	Kinematic wall friction angle (coefficient) ^a	Static wall friction angle (coefficient) ^b	DEM parameter μ_w
Polyethylene (melted coupon)	16.5 (0.3)	15.8 (0.28)	0.3
Acrylic	18 (0.32)	16 (0.29)	0.32
Stainless steel 304-2B finish	12.3 (0.22)	11.5 (0.2)	0.22

Sources: ^aObtained from the Jenike shear tester; ^bobtained from the static wall friction tester (Li *et al.*, 2005)

Abbildung 9: Gemessene und in DEM angesetzte Reibwerte für die Partikel-Wand-Interaktion [19]

Die Restitutionskoeffizienten wurden wie üblich mit Aufprallversuchen mit verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 2 und 4 m/s bestimmt. Die Ergebnisse und weitere Informationen sind in der Arbeit von Grima und Wypych [19] zu lesen.

Eine einfache Methode zur Bestimmung der Rollreibung zwischen Partikel und Wand ist, wenn eine gewisse Anzahl an Schüttgut auf einer Platte platziert und die Platte langsam geneigt wird, bis die Partikel zum Rollen oder Rutschen beginnen. Der Versuch wird dann im DEM Programm durchgeführt. Hierbei wird die Rollreibung solange erhöht bis der Winkel, bei dem die Partikel beginnen zu Rutschen, mit dem im Experiment übereinstimmt (Abbildung 10) [4].

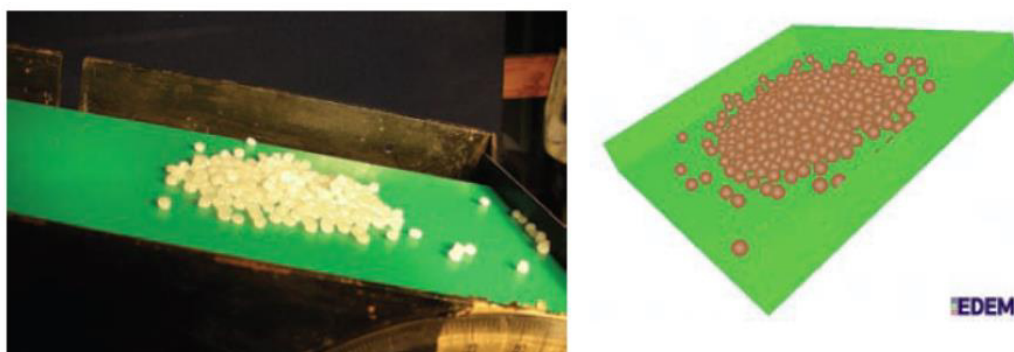


Abbildung 10: Ermittlung der Rollreibung [4]

3.2 Neigbarer Behälter

Die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von Chou et al. [22] ist in Abbildung 11 dargestellt. Ein neigbarer Behälter wurde mit trockenem körnigem Schüttgut aufgefüllt. Das Modell diente zur Analyse des Fließverhaltens von Schüttgütern bei plötzlichem Wegfall der rechten Wand. Der Behälter hat eine Länge von $L_i = 60$ cm, eine Höhe $H = 40$ cm, eine Breite $W = 5$ cm und ist gegenüber der Horizontalen mit der Neigung φ definiert. Als Schüttgut wurden weiße kugelförmige Polystyrol Perlen verwendet. Dieser Versuch wurde sowohl in der DEM-Simulation als auch real durchgeführt. Das DEM Modell basierte auf dem vereinfachten Hertz-Mindlin Kontaktmodell und wurde auf PFC3D modelliert.

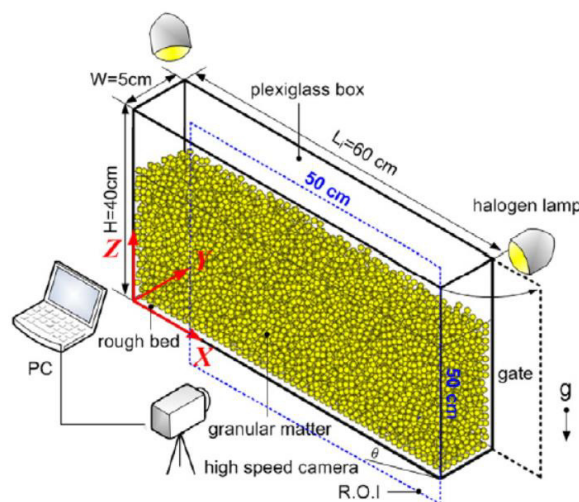


Fig. 1. Physical model and experimental setup for falling tests of dry granular steps.

Abbildung 11: Schematische Darstellung des Versuchs mit dem neigbaren Behälter [22]

Die Polystyrol Perlen wurden in der Simulation innerhalb des Behälters willkürlich generiert. Während der Generierung besaßen alle Partikel keine Anfangsgeschwindigkeiten. Sie wurden zudem ab einer gewissen Höhe generiert um die Packung allein durch die Gravitation zu erzielen. Nachdem die Partikel in Ruhelage kamen, wurde die rechte Wand zügig weggeschoben und der Partikelfluss beobachtet. Der Versuch wurde bei einem Neigungswinkel von 0° , 5° , und 10° durchgeführt. Bei den beiden letzten Versuchsanordnungen neigte man den Behälter sehr langsam um die rechte untere Ecke des Behälters damit die Packungsstruktur nicht zerstört wird.

Die DEM Parameter für die Perlen sind in der Abbildung 12 aufgelistet. Für eine quantitative Validierung wurden die ausschlaggebenden Eigenschaften

(Reibungskoeffizient und Restitutionskoeffizient), die für das Modell notwendig waren, nicht einfach angenommen, sondern gemessen. Die Werte für die Partikelgröße, Dichte, E-Modul, und Querkontraktionszahl wurden vom Herstellerkatalog direkt übernommen. Die Partikelgröße wurde einheitlich angenommen, obwohl die realen Partikel geringe Größenunterschiede aufwiesen.

Properties	Mean value	CoV (%)	Unit
Diameter (d)	5.8 ± 0.1		mm
Density (ρ)	2100		kg/m ³
Young's modulus (E)	3.25		GPa
Poisson's ratio (ν)	0.34		
Number of polystyrene beads ($\theta = 0^\circ$ and 5°)	9000		
Number of polystyrene beads ($\theta = 10^\circ$)	12000		
Bead-wall static friction coefficient (μ_w)	0.43	8.3	
Bead-bead static friction coefficient (μ_p)	0.38	7.9	
Bead-wall restitution coefficient (e_w)	0.66	7.6	
Bead-bead Restitution Coefficient (e_p)	0.69	7.2	

Abbildung 12: DEM-Parameter für Polystyrol Perlen [22]

Für das reale Experiment benötigte man neben dem Behälter eine Hochgeschwindigkeitskamera, zwei Halogenlampen und einen Rechner. Der Behälter bestand aus einem transparenten Acrylglas, um die Vorgänge innerhalb des Behälters aufzuzeichnen. Zwei Halogenlampen an beiden oberen Ecken des Behälters dienten zur besseren Aufnahme mit der Kamera. Zur Verhinderung des Rutschens der Partikel am Behälterboden wurde eine Schicht aus Polystyrol Perlen am Behälterboden angeklebt. Nach dem Auffüllen des Behälters betrug die Packungsdichte ungefähr 0.64 und die Schütthöhe ungefähr 10 cm. Anschließend wurde der oben beschriebene Versuch für 0° , 5° und 10° durchgeführt. Mit Hilfe einer Bildbearbeitungsanalyse wurden die Partikelgeschwindigkeiten ermittelt. Daraus leitete man drei Zonen, die während eines Versuchs entstanden, ab (Abbildung 13). Die Ergebnisse aus der Simulation und Experiment sind in der Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

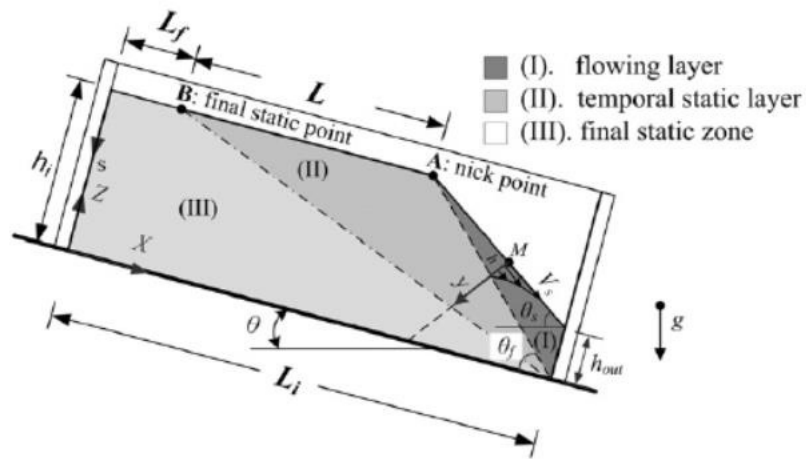


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Rieserverhaltens von Polystyrol Perlen [22]

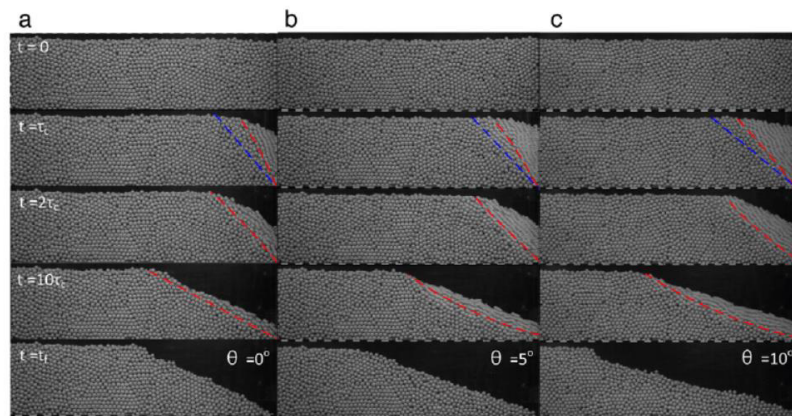


Abbildung 14: Aufnahme vom Laborversuch für: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 5^\circ$; (c) $\theta = 10^\circ$ [22]

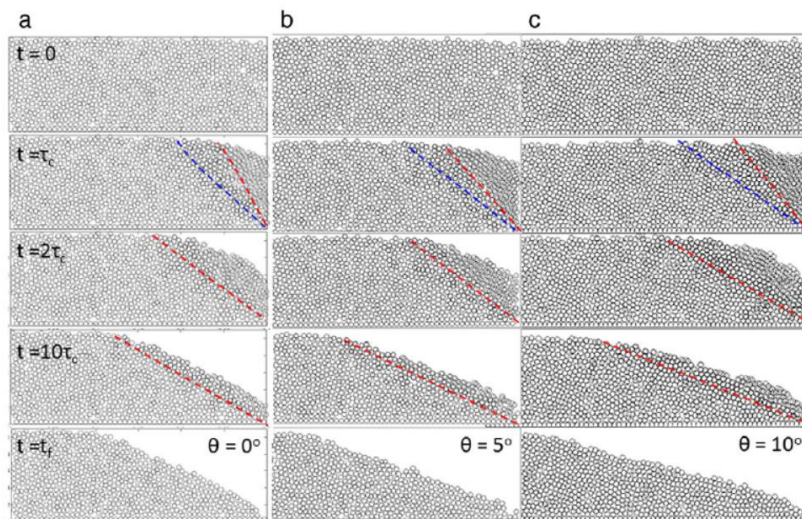


Abbildung 15: Aufnahme von der DEM-Simulation für: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 5^\circ$; (c) $\theta = 10^\circ$ [22]

Weitere Information zu diesem Versuch ist in den Unterlagen von Chou et al. [22] zu finden.

3.3 Rotierende Mühle – Kräftevergleich

In der Arbeit von Kalala et al. [23] wurde in einer rotierenden Mühle mit Erhebungen die Kraft von den Partikeln auf die Erhebung gemessen, um mechanische Eigenschaften von Schüttgütern zu untersuchen. Die Mühle hat einen Durchmesser von 0.55 m und eine Länge von 0.023 m. Die Länge wurde so gewählt, dass die Bewegung der Partikel mit einem Durchmesser von 0.0222 m nur zweidimensional verläuft. Das Experiment wurde jedoch mit Partikeln mit 6 mm Durchmesser durchgeführt, da die 22 mm Partikel die Erhebungen eher beschädigen. Die Mühle wurde mit zwölf gleichen Erhebungen mit quadratischen Querschnitten von 0.022 m x 0.022 m ausgeführt. Eine Erhebung wurde mit Dehnungsmesstreifen versehen, um die Normal- und Tangentialkraft aufzuzeichnen (Abbildung 16).

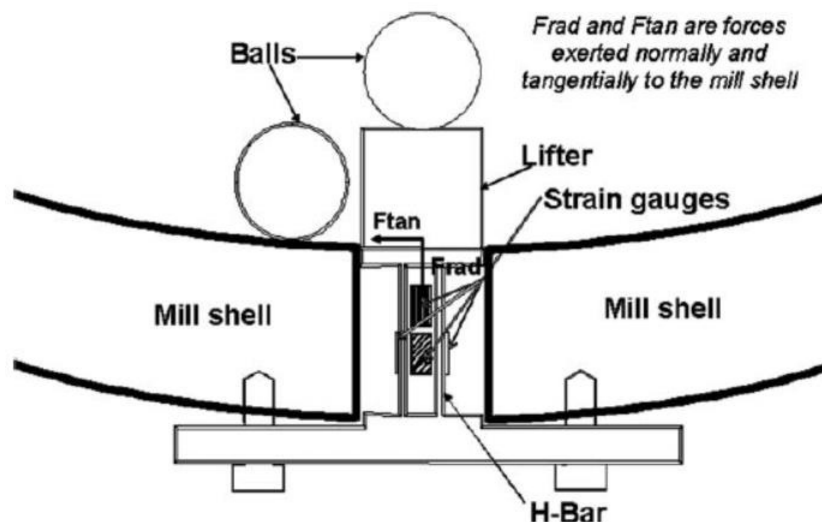


Abbildung 16: DMS an einer Erhebung in der Mühle [23]

Der gleiche Aufbau wurde danach in einer 3D DEM-Simulation modelliert. Die DEM gibt dabei direkt die Normal- und Tangentialkräfte nicht nur auf eine Erhebung, sondern auf alle Erhebung in Newton aus. Die Aufzeichnung der Kräfte wurde für eine Umdrehung aufgezeichnet und erfolgte, nachdem die Mühle in den stationären Zustand gelangte. Somit erhielt man zwölf verschiedene Messungen für die zwölf Erhebungen. Anschließend optimierte man die Parameter so, dass die Kräfte, die Antriebsenergie und das Verhalten der Partikel in der Simulation mit denen im Experiment übereinstimmten. Detailliertes über diesen Versuch findet man in der Veröffentlichung von Kalala et al. [23].

3.4 Rotierende Trommel – Dynamischer Böschungswinkel

Pandey et al. [24] entwickelte ein auf MATLAB basierendes DEM Modell, mit dem die Partikelbewegungen in einer Partikelbeschichtungstrommel, wie sie in der Pharmaindustrie für die Beschichtung der Tabletten verwendet wird, untersucht werden können. Es ist ein in sich geschlossenes Programm und beinhaltet die Simulation, Visualisierung und statistische Analyse der Partikelbewegung. Die Ergebnisse der DEM Simulation wurden mit denen vom Experiment mit Videoaufzeichnungen verglichen. Als Partikel kam 9 mm großes kugelförmiges Polystyrol zum Einsatz. Der Trommeldurchmesser betrug 58 cm. Es wurden der dynamische Schüttwinkel und die Partikelgeschwindigkeit in x- (axial) und y- (parallel zur obersten Schicht) Richtung verglichen. Außerdem hat man die Auswirkungen von Trommelfüllgrad und Trommelrotationsgeschwindigkeit (6, 9, 12 U/min) auf die Partikelbewegung verglichen und diskutiert. Eine gute Übereinstimmung zwischen DEM Simulation und Experiment konnte gefunden werden. Es stellte sich heraus, dass sich der dynamische Schüttwinkel vergrößert, wenn die Ladung und Rotationsgeschwindigkeit der Trommel erhöht wird. Die mittlere Geschwindigkeit der Partikel an der obersten Schicht besaß zudem ein lineares Verhalten gegenüber der Rotationsgeschwindigkeit, d.h. bei Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit erhöhte sich die mittlere Geschwindigkeit der Partikel an der obersten Schicht. Weiters wurden die Geschwindigkeitsverteilungen in x- und y-Richtung sowie die Geschwindigkeitsprofile entlang der obersten Schicht der Partikel untersucht und verglichen.

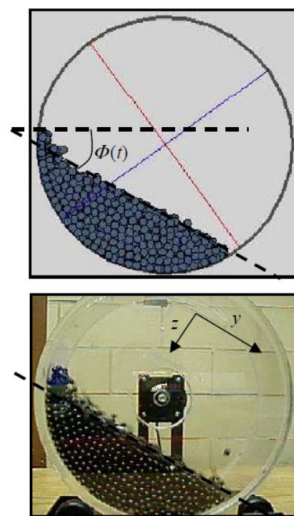


Abbildung 17: Rotierende Trommel (oben Simulation; unten Laborversuch); Darstellung des dynamischen Schüttwinkels [24]

3.5 Drei einfache Versuche zur Bestimmung der Materialparameter für DEM-Modelle

Die DEM Parameter wurden oft durch Versuche ermittelt doch selten in Labortests gemessen, sodass die Interpretation der DEM-Simulation mehrdeutig sein kann. Da die Energieaufnahme des Systems hauptsächlich vom Reibungskoeffizient und Restitutionskoeffizient abhängt, müssen diese zwei Parameter in der DEM sorgfältig bestimmt werden. Dazu haben Chou et al. [22] drei Laborversuche entwickelt, nämlich einen Gleitreibungsversuch mit drei Partikeln, einen Schüttwinkelversuch und einen Fallversuch.

Der Gleitreibungsversuch mit drei Partikeln (Abbildung 18) wurde entwickelt, um die statische Reibung zwischen Partikel und Wand zu ermitteln. In dem Versuch klebte man drei willkürlich gewählte Partikel auf eine horizontale Platte. Auf die Partikel legte man eine Acrylglasplatte. Die Neigung der Platte mit den aufgeklebten Partikeln wurde anschließend sehr langsam und konstant erhöht, bis die Acrylglasplatte zu rutschen begann. Der Neigungswinkel θ , bei dem die Platte zu rutschen begann, wurde über die Höhe, gemessen mit einem Lineal, errechnet. Der statische Reibungskoeffizient ergibt sich dann zu:

$$\mu_W = \tan \theta_W$$

Der Schüttwinkelversuch (Abbildung 19) wurde entwickelt, um den Reibungskoeffizienten μ_P zwischen den Partikeln zueinander zu bestimmen. Das Schüttgut wurde in diesem Fall in ein senkrecht stehendes zylindrisches Rohr gefüllt. Das Rohr wurde anschließend mit konstanter Geschwindigkeit hochgehoben und es entstand ein Schüttkegel. Der Schüttwinkel wurde mit Hilfe einer Bildbearbeitungsanalyse gemessen. Der Reibungskoeffizient ergibt sich zu:

$$\mu_P = \tan \beta$$

Der Fallversuch (Abbildung 20) wurde entwickelt, um die Restitutionskoeffizienten von Partikel-Wand und Partikel-Partikel zu bestimmen (e_{P-W} und e_{P-P}). Mit Hilfe einer Vakuumpumpe hat man ein Korn in einer bestimmten Höhe gehalten und auf eine Platte oder auf ein anderes Partikel fallengelassen. Eine Hochgeschwindigkeitskamera zeichnete die Bewegung des fallengelassenen Partikels kurz vor und nach dem Aufprall auf. Die Restitutionskoeffizienten konnten somit mit:

$$e_{P-W} \text{ oder } e_{P-P} = \sqrt{\frac{E_{out}}{E_{in}}}$$

errechnet werden, wobei E_{out} und E_{in} die kinetische Energie des Partikels kurz vor und nach dem Aufprall ist.

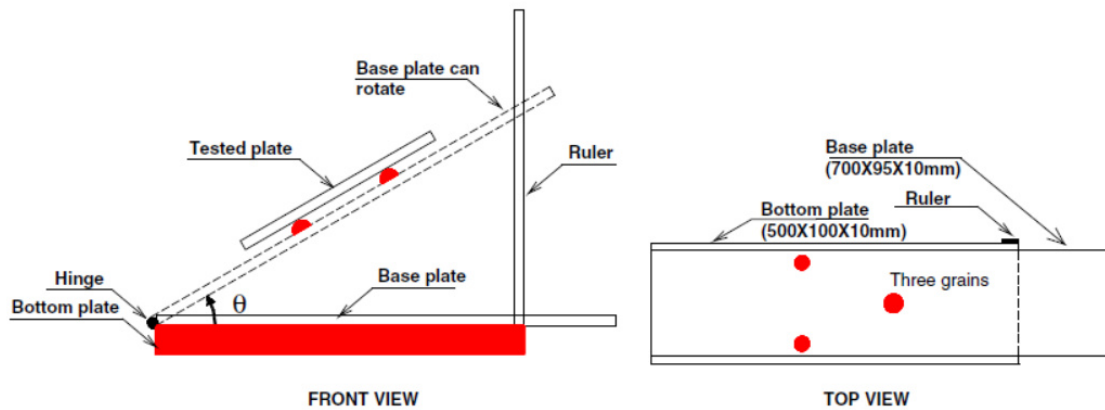


Abbildung 18: Rutschversuch [22]

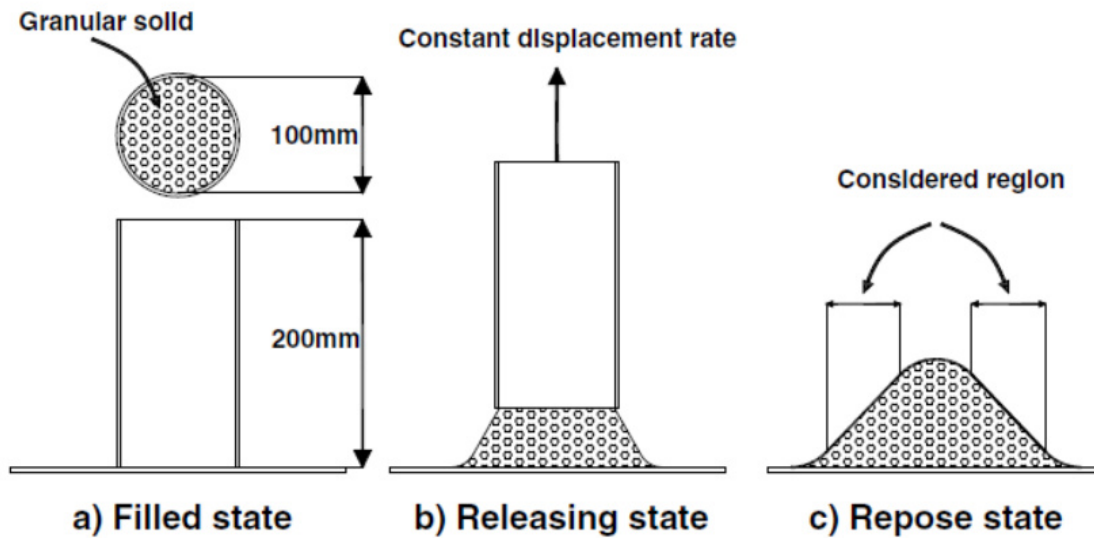


Abbildung 19: Schüttwinkelversuch [22]

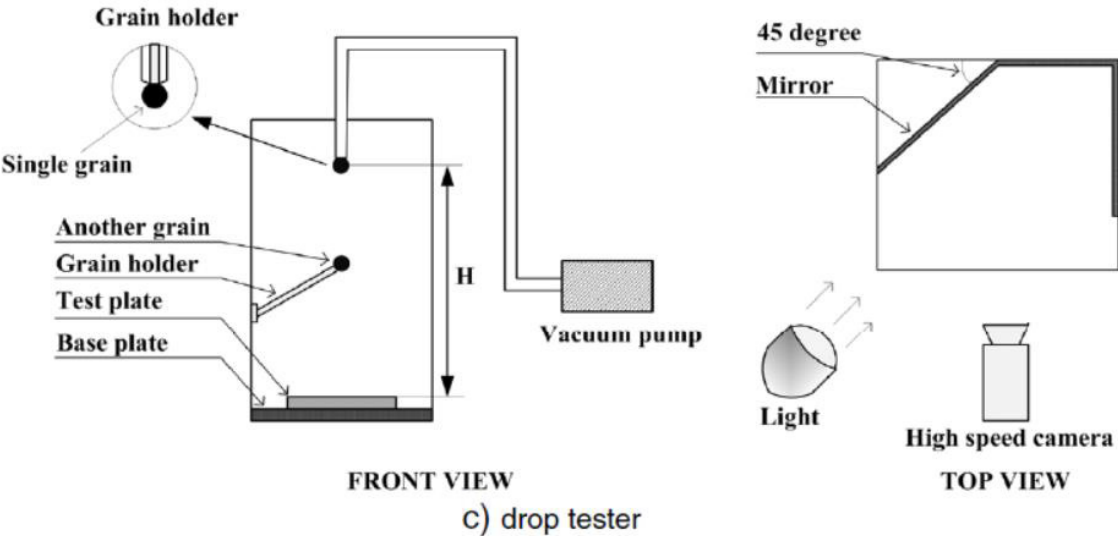


Fig. 3. Schematic illustration of laboratory testers: (a) three-particle sliding tester; (b) repose angle tester; (c) drop tester.

Abbildung 20: Fallversuch [22]

4 Versuchsanlage

Das Problem in der DEM Simulation liegt darin, dass die Schüttgutparametern, wie Restitutionskoeffizient oder Reibwerte, meist unbekannt sind. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die unbekannt Parameterwerte des Schüttguts für die Simulation zu bestimmen. Dies soll mit Hilfe einer Versuchsanlage durch Beobachtung des Schüttgutverhaltens geschehen. Es sollen dabei mechanische sowie geometrische Eigenschaften in Betracht gezogen werden. Diese Ergebnisse dienen dann als Vergleich mit den Ergebnissen von DEM-Simulationen. Aus Kapitel 3 kann abgeleitet werden, dass die Problematik der vorhandenen Kalibrieranlagen ist, dass eine Versuchsanordnung nicht ausreicht, um die Schüttgutparameter eindeutig zu bestimmen. Es können mehrere Parameterkombinationen möglich sein, um das beobachtete Verhalten in der Kalibrieranlage auch in der Simulation zu erreichen. Die Anforderung für die zu entwickelnde Versuchsanlage lautet somit, dass eine eindeutige Parameterbestimmung möglich sein soll. Um dies zu erlangen, müssen möglichst viele Größen, die das Schüttgutverhalten beschreiben, sogenannte Zielgrößen, betrachtet werden. Außerdem soll die Anlage flexibel sein bzw. verstellbare Komponenten aufweisen, damit unterschiedliche Schüttgüter untersucht werden können. Daraus ergab sich das folgende Konzept für die Versuchsanlage:

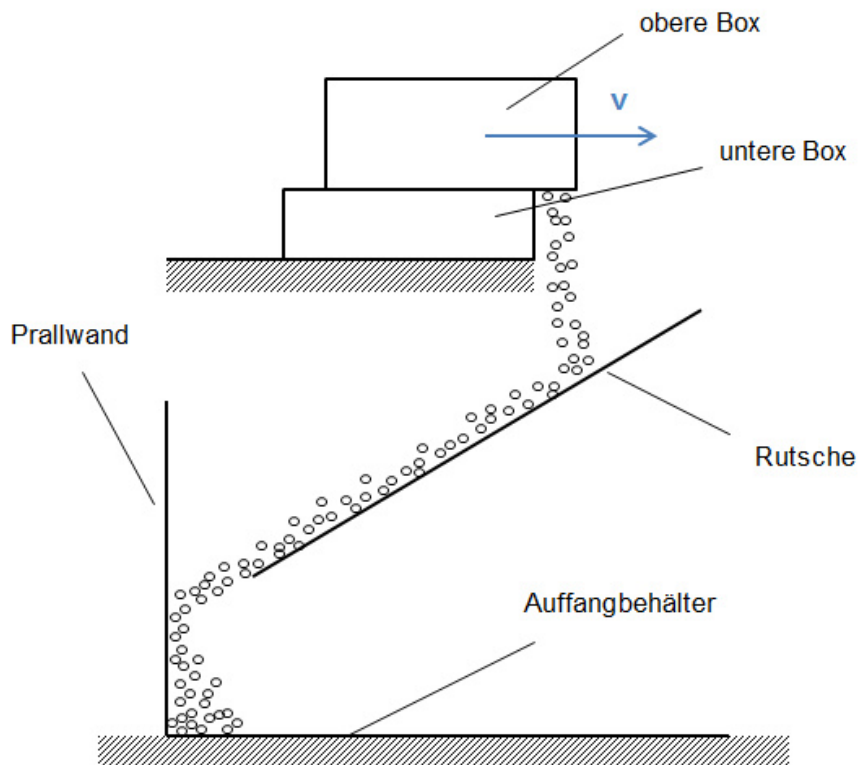


Abbildung 21: Prinzipische Skizze Versuchsanlage

Die Anlage sollte aus drei Bereichen bestehen. Im oberen Bereich ist eine Abscherung der Partikel vorgesehen. Im mittleren Bereich wird das Rutschverhalten der Partikel beobachtet und im unteren Bereich werden die Partikel aufgefangen und der statische Böschungswinkel ermittelt. Mit diesen Vorgaben wurde eine Versuchsanlage entworfen und hergestellt. Nachfolgend ist eine mögliche Liste der in der Versuchsanlage zu messenden Parameter bzw. Zielgrößen für den Vergleich zwischen realem Versuch und Simulation gegeben:

- Schüttwinkel in der oberen Box
- Schüttwinkel im Auffangbehälter
- Schiebekraft an der oberen Box
- Auftreffhöhe nach dem Rutschen an der vertikalen Wand des Auffangbehälters
- Abstand der Schüttspitze von der Wand in der oberen Box (falls die Spitze nicht an der Wand ist)
- Schütthöhe im Auffangbehälter
- Durchlaufzeit

Die maximale Abweichung der Simulationsergebnisse sollte von den realen Ergebnissen nicht mehr als $\pm 10\%$ betragen. Bei den vorhandenen Versuchsanlagen beträgt die Kalibriergenauigkeit 10% oder mehr [4]. In den folgenden Abbildungen ist die Anlage dargestellt.

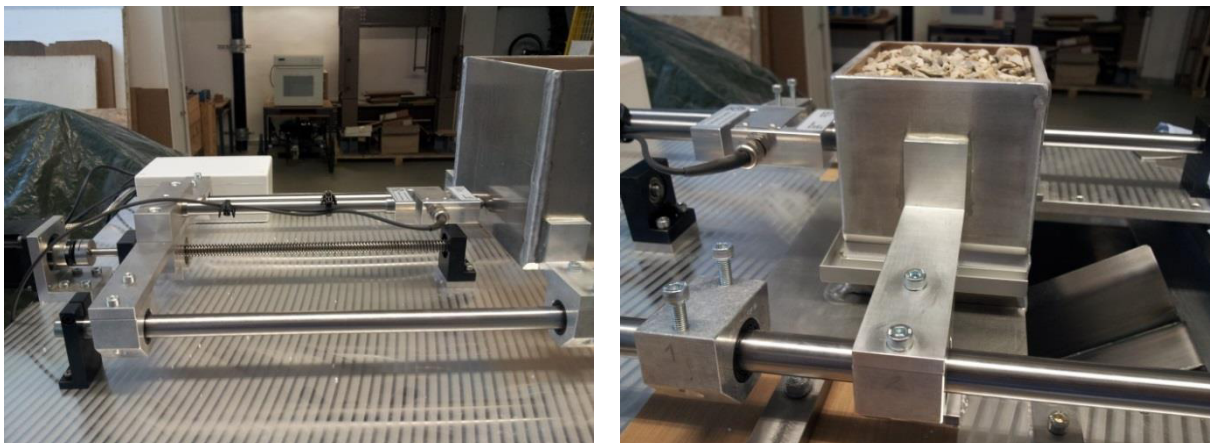


Abbildung 22: Versuchsanlage; li. Schiebevorrichtung, re. untere und obere Box

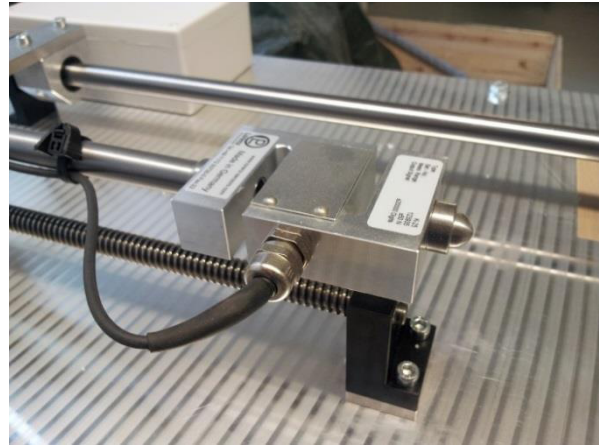
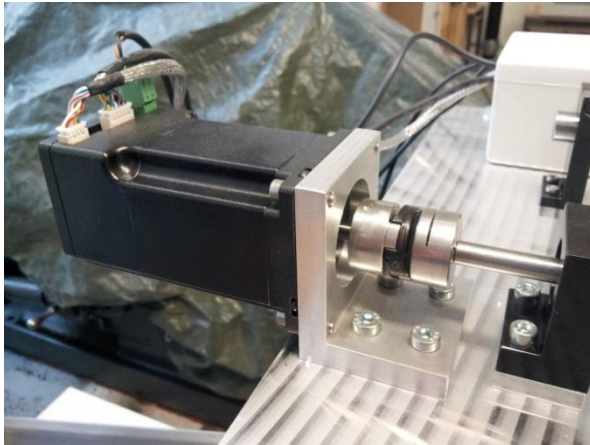


Abbildung 23: Versuchsanlage; li. Schrittmotor, re. Kraftsensor

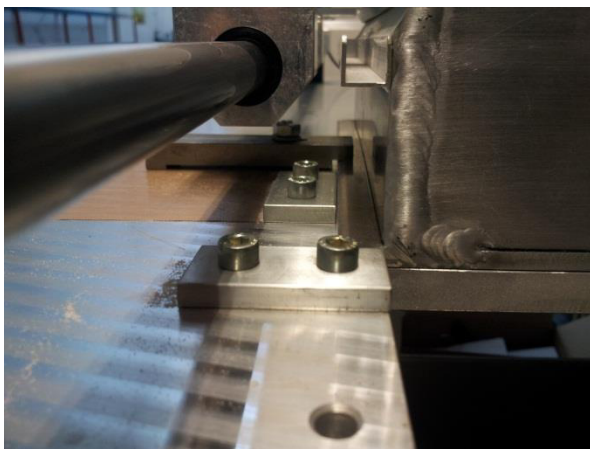


Abbildung 24: Versuchsanlage; li. Niederhalter und Anschläge; re. Anschlag für Rutsche

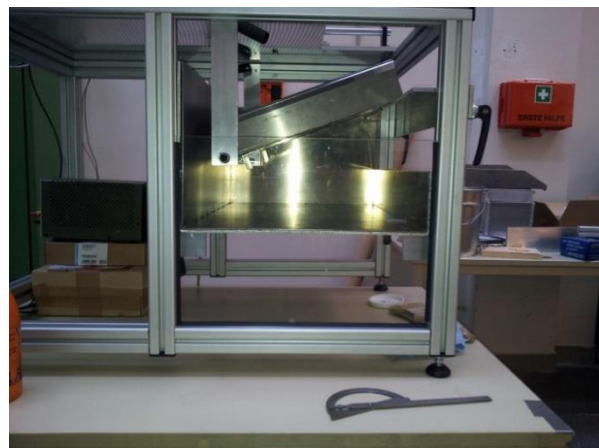
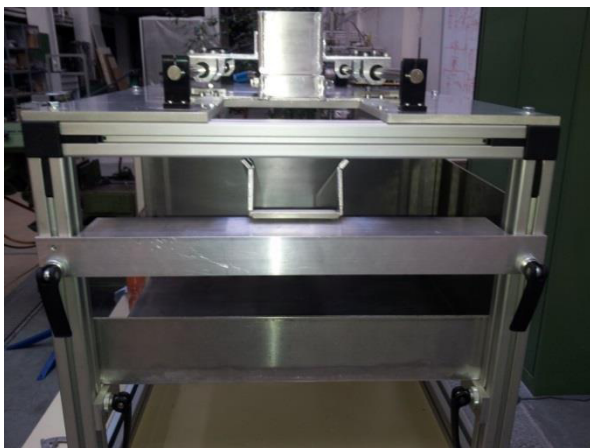


Abbildung 25: Versuchsanlage; li. & re. Rutsche und Auffangbehälter



Abbildung 26: Gesamtansicht der Versuchsanlage

Sie besteht aus folgenden Baugruppen:

1. Gestell
2. Schiebevorrichtung mit Kraftaufnehmer und Motor
3. Obere Box (unten und oben offen, verschiebbar)
4. Untere Box (oben offen und unten geschlossen, feststehend)
5. Rutsche
6. Auffangbehälter

Da Schüttgüter jeglicher Art untersucht werden sollen, z.B. kleine sowie große Schüttgutteilchen, ist die Anlage so entworfen, dass die Anordnung der Bauteile anpassbar ist. Man kann den Auffangbehälter nach oben und unten verschieben, die Neigung der Rutsche verändern und die Rutsche nach links oder rechts verschieben. Ein Plexiglas an der Vorderseite des Gestells dient der Beobachtung des Schüttgutverhaltens während der Versuch läuft. Die obere und untere Box sowie die Rutsche sind in zwei Größen hergestellt. Der Zweck ist, dass in der Simulation ein möglichst großer Auswahlbereich für den Partikelradius abgedeckt werden kann. Aufgrund der Rechenzeit können die Partikel nicht in ihrer wahren Größe modelliert werden. Deswegen werden die Partikelmodelle größer dimensioniert. Doch dadurch entsteht das Problem, dass die Partikel im Vergleich zur Umgebung (obere und untere Box) relativ groß werden und das simulierte Schüttgutverhalten demzufolge beeinträchtigt bzw. die Realität nicht gut widerspiegelt wird. Aus diesem Grund wurden ein Satz aus Boxen und Rutsche in kleiner Ausführung und ein Satz in

großer Ausführung hergestellt. Die Boxen sind quadratisch und haben eine Breite von 100 mm in der kleinen Ausführung und 200 mm in der großen Ausführung. Die Wandstärke beträgt 5 mm. Die Rutschen haben demzufolge die Breiten 110 mm und 210 mm. Sie sind ein wenig größer dimensioniert damit die Partikel beim Herunterrieseln die Rutsche nicht verfehlen. Mit diesen Ausführungen können Partikel mit Radien von ca. 3 mm bis 10 mm simuliert werden (siehe Kapitel 5.2 *Definition der Partikelform*). Der Austausch der Boxen erfolgt sehr rasch mit einfachen Handbewegungen. Die untere Box ist mit Anschlägen positioniert und mit zwei Niederhalter fixiert (Abbildung 24 links). Die obere Box ist mit Schrauben an den beiden Führungsschlitten befestigt (Abbildung 22 rechts). Die Rutsche liegt lose auf zwei Auflageflächen (vorne und hinten) und ist am vorderen Ende mit einem Anschlag gegen das Verrutschen nach unten gesichert (Abbildung 24 rechts). Die Boxen, die Rutsche und der Auffangbehälter sind aus Aluminium hergestellt. In dem Auffangbehälter und in der Rutsche sind jedoch Stahleinlagen platziert, um die Interaktion der Partikel mit Stahl zu untersuchen. Die oberen und unteren Boxen sind innen mit einem Glasgewebe überzogen. Dadurch wird die Reibung zwischen Boxeninnenwand und Partikel möglichst gering gehalten, damit die Schiebekraft einzig und allein von den Partikelparametern abhängt. Es wurde auch überlegt die obere Box über eine längere Strecke über der unteren Box, welches demzufolge Länger dimensioniert werden muss, zu verschieben, um einen Kraftverlauf mit konstantem Bereich zu erhalten. Jedoch besteht die Problematik darin, dass sich die in der unteren Box befindlichen Partikel während der Verschiebung vor der oberen Box aufstauen und somit die Verschiebung erschweren bzw. verhindern. Mit der gewählten Anordnung wird die obere Box um die halbe Länge der Boxen verschoben, um einen zusätzlichen Böschungswinkel als Vergleichsgröße innerhalb der oberen Box zu erhalten. Die Verschiebung der oberen Box wird über eine Trapezgewindespindel mit Hilfe eines Schrittmotors realisiert (Abbildung 22 links Abbildung 23 links). Mit zwei Führungsstangen wird zudem die obere Box geführt (Abbildung 22 rechts). An der Spitze der Schiebestange, welche über einen Aufbau mit der Gewindemutter verbunden ist, ist der Kraftaufnehmer montiert (Abbildung 23 rechts). Motor und Kraftaufnehmer sind über die Datenkabel mit dem Steuerteil bzw. Laptop verbunden. Detaillierte Angaben zu diesen beiden Komponenten sind in *Kapitel 4.1 Motor* und *4.2 Kraftsensor* erläutert. In dieser Arbeit wurden beispielhaft zwei Schüttgüter, nämlich Ureapartikel und Kantkornteilchen (Kies) betrachtet, um

ihre Parameterwerte für die DEM Simulation zu ermitteln. Die Vorgehensweise von der Messung des realen Verhaltens der Schüttgüter über die Bestimmung der Parameterwerte für die Simulation für diese Schüttgüter bis hin zur Validation dieser Partikelmodelle ist auf den folgenden Seiten beschrieben.

4.1 Motor

Als Antriebsmotor für die Realisierung der Verschiebung der oberen Box kommt ein Nanotec Plug&Drive Schrittmotor mit der Modelnummer PD4-N5918L4204 zum Einsatz. Die technischen Daten zu diesem Motor sind im Anhang zu finden. Betrieben wird der Motor mit 24V Gleichstrom. In der Abbildung 27 ist die Kennlinie des Motors zu sehen. Die Ansteuerung des Motors erfolgt über die Testplatine ZIB2-PDX-N ebenfalls von der Fa. Nanotec und mit Hilfe eines Laptops, auf dem die Software NanoPro 1.7 installiert ist. Die Verbindung zwischen Motor und Testplatine ist mit dem Anschlusskabelset ZK-D4N von der Fa. Nanotec aufgebaut, das gleichzeitig den Motor mit Spannung versorgt. Zwischen Testplatine und Laptop wird die Verbindung mit einer handelsüblichen mini-USB auf USB Kabel aufgebaut. Der mini-USB Anschluss des Kabels ist mit der vorgesehenen mini-USB Schnittstelle der Testplatine zu verbinden. Vor dem Anstecken des USB Kabels an den Laptop muss das Netzkabel gezogen werden, da beim Laden des Akkus eine Wechselspannung von 115V entsteht. Beim Anstecken des USB Kabels fließt, aufgrund des Bezuges zu einer zweiten Masse der Platine, der Ausgleichstrom über die Verbindung und zerstört die Platine. Damit der Laptop während des Betriebs aufgeladen werden kann, wird die Verbindung galvanisch getrennt, um die Zerstörung der Platine zu vermeiden. Durch Zwischenstecken eines USB-Isolators wird diese Trennung ermöglicht. Als USB-Isolator wird jener von der Firma W&T eingesetzt. Die technischen Daten dazu sind im Anhang zu finden. Eine schematische Darstellung der Verbindungen ist in Abbildung 28 dargestellt.

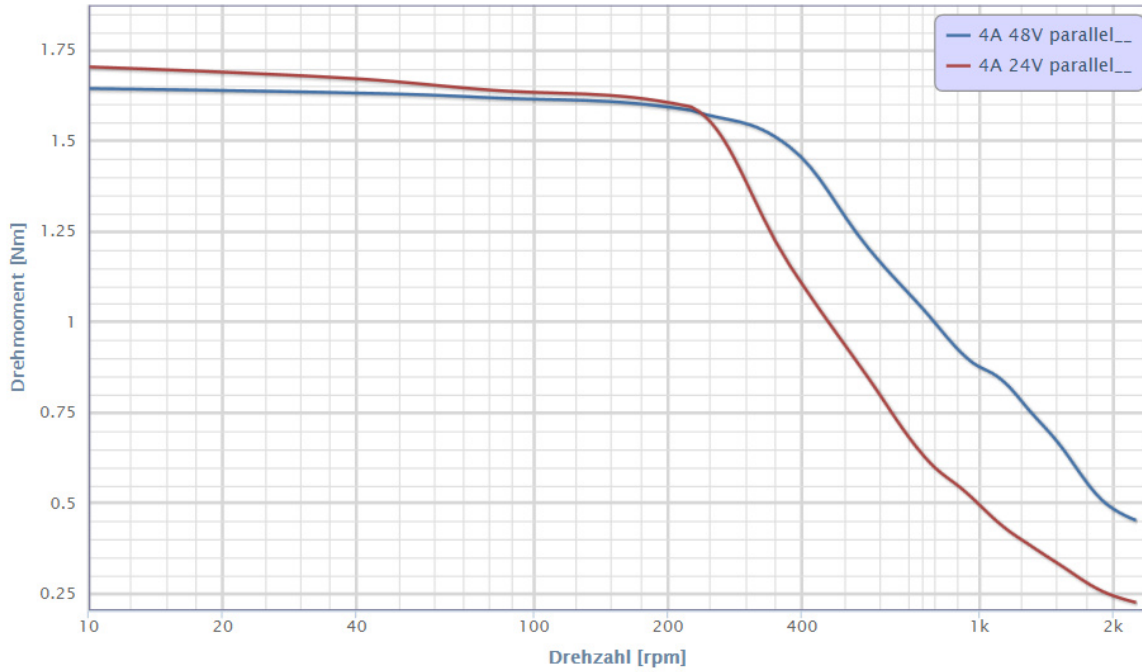


Abbildung 27: Motorkennlinie PD\$-N5918L4204 [25]

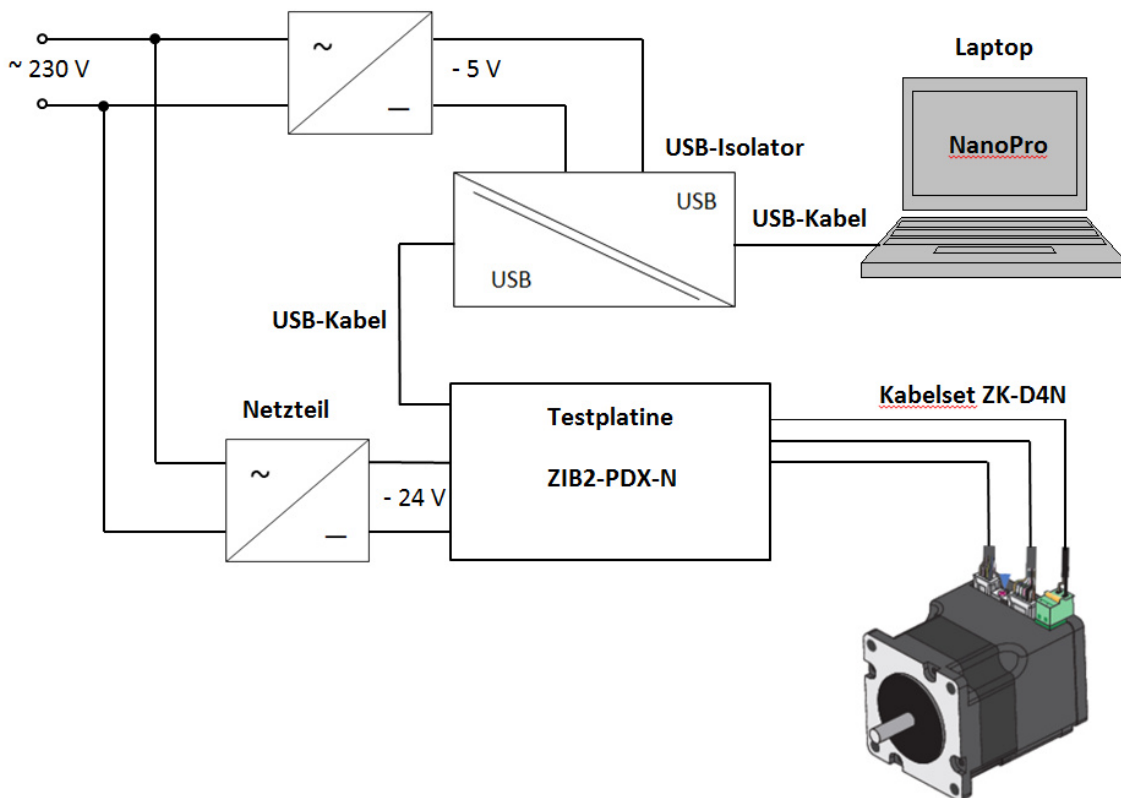


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Motoransteuerung

4.1.1 NanoPro 1.7

In diesem Abschnitt wird die Motorsteuerung erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der Software ist im Handbuch des Herstellers zu finden [26]. Die Bedienoberfläche ist in Abbildung 29 dargestellt. Sie gliedert sich in die Menüleiste (1) und das je Motor separate Menüfenster (2). Ist der Motor unter Spannung und verknüpft mit dem Laptop, kann über die Registerkarte „Kommunikation“ im Menüfenster (Abbildung 29 gelb markiert) die angeschlossene Steuerung eingelesen werden. Durch Betätigen der Schaltfläche „Steuerung suchen“ werden alle COM-Ports und Baudraten so lange durchlaufen, bis eine Steuerung gefunden wurde. Anschließend wird die Steuerung konfiguriert. Für den Versuch sind die Registerkarten „Modus“, „Motoreinstellung“, „Anzeigeneinstellungen“ und „Ausgänge“ relevant.

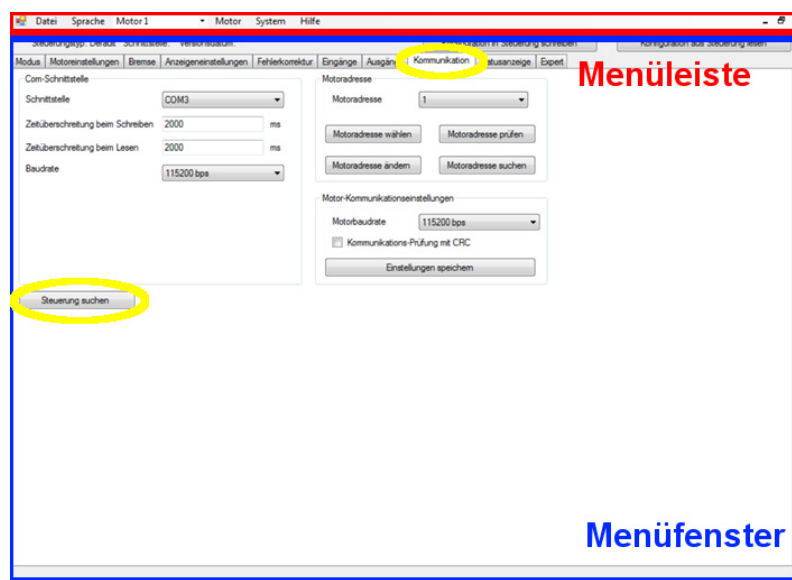


Abbildung 29: NanoPro 1.7 Oberfläche

Motoreinstellung

Als ersten Schritt stellt man die Motoreinstellungen in der gleichnamigen Registerkarte ein (Abbildung 30). In der Regel können die voreingestellten Werte beibehalten werden. Allerdings könnte man hier den Schrittmodus ändern um die Genauigkeit der Bewegung und Positionierung zu erhöhen. Doch da im Versuch eine konstante Geschwindigkeit gefahren wird und eine geringe Positionierungsgenauigkeit für diesen Zweck keine großen Auswirkungen hat, ist dies nicht notwendig. Die Eigenschaften der anderen Parameter können im Handbuch nachgelesen werden und sind für den Versuch mit den Standardwerten belegt.

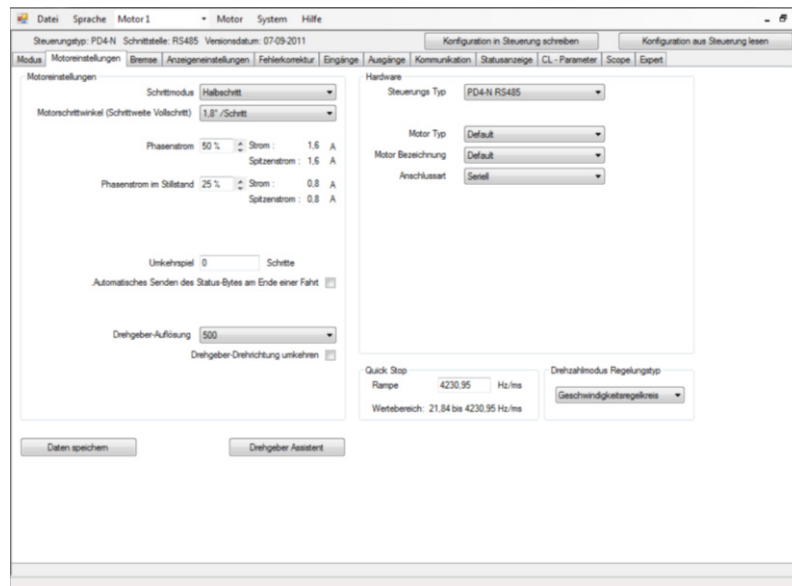


Abbildung 30: Motoreinstellungen

Anzeigeneinstellungen

Die Anzeigeneinstellungen sollten über die Registerkarte „Anzeigeneinstellungen“ geändert werden. Die zu wählenden Einstellungen bzw. Einheiten sind in Abbildung 31 dargestellt. Dadurch wird die Erstellung der Fahrprofile, die im Folgenden erläutert werden, erleichtert, da eine Umrechnung der Einheiten nicht erforderlich ist. Wichtig ist die Vorschubkonstante auf 3 zu setzen, welche der Gewindesteigung der Spindel entspricht. Der Wert für „Positions Polling“ kann auf dem Standardwert gelassen werden. Dieser definiert lediglich das Aktualisierungsintervall für die Rampengrafik in der Registerkarte „Modus“ in ms.

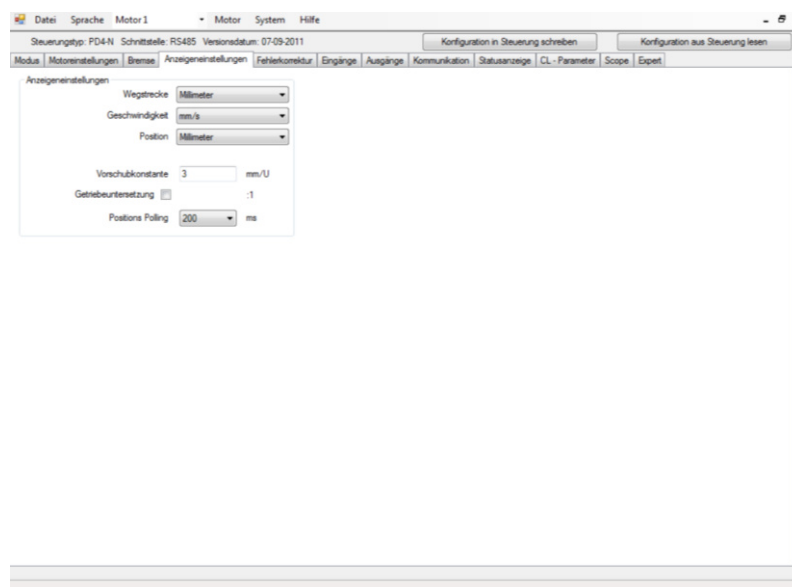


Abbildung 31: Anzeigeneinstellungen

Ausgänge

In der Registerkarte „Ausgänge“ (Abbildung 32) ist die Belegung der vorhandenen Ausgänge dargestellt. Diese Ausgänge stellen die Leuchten auf der Platine dar. Standardmäßig sind die ersten beiden Ausgänge für „Bereit“ und „Fahrend“ belegt. Die Aussagen für diese beiden Ausgänge sind in der Tabelle 1 definiert. „Benutzerdefiniert“ belegte Ausgänge werden nicht direkt von der Steuerung interpretiert sondern stehen dem Anwender als „General-Purpose“-Ausgang zur Verfügung, was für die Versuchsdurchführung nicht benötigt wird. Für jeden Ausgang kann ausgewählt werden, ob er bei steigender oder fallender Flanke schaltet. Die farbliche Markierung neben jedem Ausgang beschreibt deren Status, der beim Öffnen der Registerkarte anlag (grün = high, rot = low). Für die Echtzeit-Anzeige der Ausgänge auf dem Bildschirm muss „Ausgang Polling aktivieren“ gesetzt werden. Ansonsten wird nur der Zustand, der beim Öffnen der Registerkarte anlag, angezeigt.

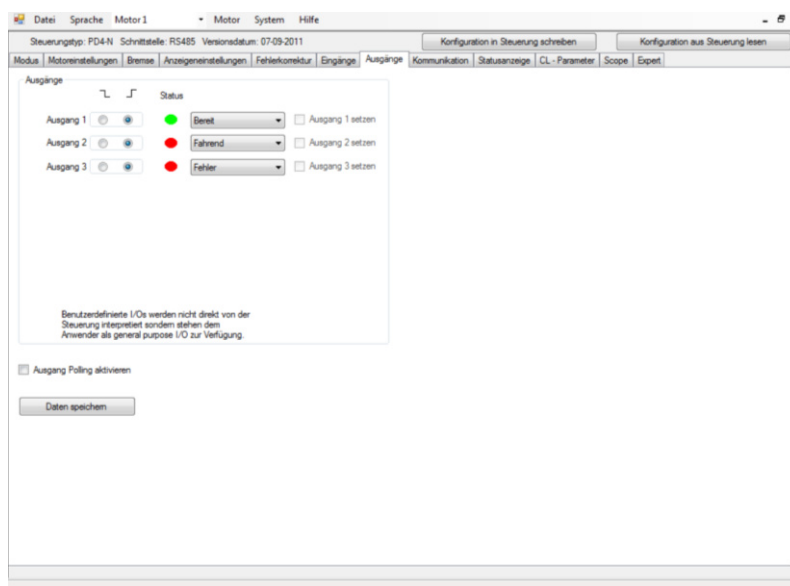


Abbildung 32: Ausgänge

„Bereit“	„Fahrend“	Zustand
0	1	Motor bearbeitet letzten Befehl
1	0	Motor steht und wartet auf neuen Befehl
0	0	Fehler (Drehüberwachung) oder Endschalter (Normalbetrieb)
1	1	Referenzpunkt (Null-Position) erreicht.

Tabelle 1: Aussagen der Leuchtenkombinationen [26]

Modus

Diese Registerkarte ist die Bedienoberfläche für den Versuch. Es können bis zu 32 Fahrprofile definiert und programmiert werden (Abbildung 33). Nach Auswahl eines Fahrprofils aus der linken Liste können die Profilparameter im mittleren Bereich der Anzeige eingestellt werden. Als Operationsmodus ist einzig und allein der „Positionsmodus – Relativ“ für den Versuch ausreichend. Bevor die Fahrparameter angegeben werden, muss vorerst im letzten Punkt der Rampentyp entweder als „Trapez Rampe“, „Sinus Rampe“ oder „Jerk Free Rampe“ ausgewählt werden, weil die Einstellmöglichkeiten dem jeweiligen Rampentyp angepasst werden. In unserem Fall ist die „Sinus Rampe“ angemessen. Danach wird die Stellgröße angegeben, welche die Wegstrecke, die gefahren werden soll, definiert. Die Eingabe erfolgt in mm, da die Einstellung in der „Anzeigeneinstellung“ in mm definiert wurde. Da nur die halbe Länge der Boxen verschoben wird, um einen zusätzlichen Böschungswinkel innerhalb der oberen Box zu bekommen, beträgt die Stellgröße bei Einsatz der kleineren Boxen 50 mm und der größeren Boxen 100 mm. Als nächstes wurde die Drehrichtung, Sollgeschwindigkeit, Start- und Bremsrampe definiert. Mit der Drehrichtung „links“ erfolgt die Bewegung weg von der Box und mit „rechts“ zur Box hin. Beim Versuch mit Urea und Kantkörner als Schüttgut beträgt die Geschwindigkeit 10 mm/s und die beiden Rampen können mit 50 Hz/ms angenommen werden. Dies entspricht einer Beschleunigungs- und Verzögerungszeit von 4 ms. Da nur eine lineare Bewegung realisiert werden soll, ist die Anzahl der Durchgänge eins. Zudem ist eine Richtungsumkehr nicht notwendig und es folgt kein Folgesatz, mit dem ein weiteres Fahrprofil automatisch nach Beenden des aktuellen Fahrprofils aufgerufen wird. Somit ist die Pausenzeit zwischen den einzelnen Durchgängen und Sätzen irrelevant. Das eingestellte Fahrprofil wird im unteren Diagramm auf der Anzeige dargestellt. Im rechten Bereich ist die Anzeige der Parameter des angeschlossenen Motors zu sehen. Unterhalb der Motorparameter kann mit „Satz testen“ und „Satz stoppen“ das aktuelle Fahrprofil gestartet bzw. gestoppt werden. Alle weiteren Funktionen können vernachlässigt werden. [26]

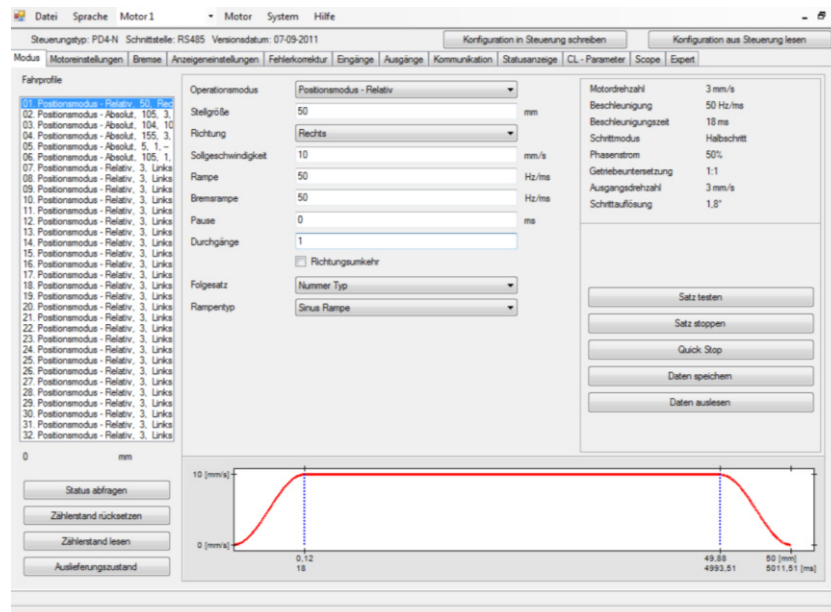


Abbildung 33: Modus

4.2 Kraftsensor

Die Messung der Schiebekraft erfolgt mit einem Zug-Druck-Kraftsensor und einem Messverstärker aus dem Hause Lorenz-Messtechnik GmbH. Der Kraftsensor hat die Bezeichnung K-25. Er dient zur Messung von statischen und dynamischen Kräften. Die Einbaulage des Kraftsensors kann sowohl horizontal als auch vertikal angeordnet werden. In unserem Fall liegt der Sensor horizontal.

Der Sensor besteht aus einem Messkörper und einem Gehäuse. Durch die eingeleitete Kraft entstehen im Messkörper Verformungen, die mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen werden. Diese sind in eine Vollbrücke zusammengeschaltet, da das erhaltene Signal sehr klein ist. Mit einer Vollbrücke ist zudem eine Temperaturkompensation des Messsignals gewährleistet. Allerdings sind die Temperaturänderungen während der Versuchsdurchführung relativ klein und können vernachlässigt werden. In der Abbildung 34 sind neben dem gewählten Zug-Druck-Kraftsensor weitere Typen von Kraftaufnehmern dargestellt, die das Unternehmen Lorenz-Messtechnik GmbH anbietet [27].

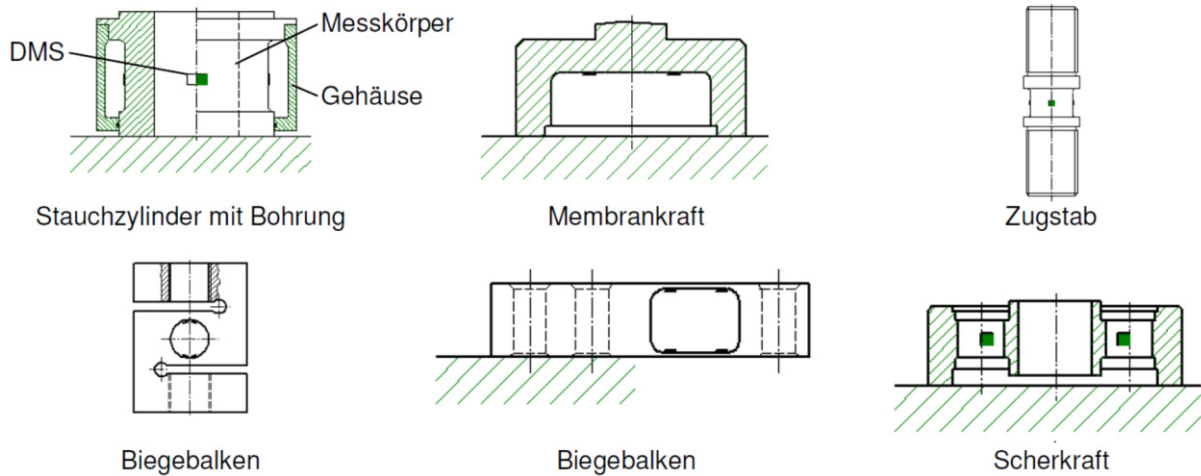


Abbildung 34: Typen von Kraftaufnehmern [27]

Vor der Auswahl eines Kraftsensors wurde die maximale Last bzw. der Messbereich folgendermaßen grob bestimmt:

Obere Box (Hohlprofil Abbildung 35):

$$l_A = 0,2 \text{ m}; b_A = 0,2 \text{ m}; h = 0,1 \text{ m};$$

h ... angenommene Schüttgutfüllhöhe

$$l_I = 0,19 \text{ m}; b_I = 0,19 \text{ m}$$

Feststoffdichte Aluminium (Box):

$$\rho_{Alu} = 2,7 * 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Reibung der Linearführung angenommen:

$$\mu_F = 0,05$$

Feststoffdichte Schüttgut (Kies):

$$\rho_S = 1,5 * 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Reibung zwischen Schüttgutpartikel angenommen:

$$\mu_S = 0,9$$

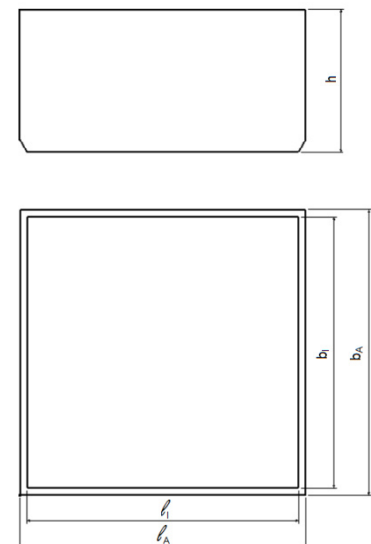


Abbildung 35: obere Box

Hohlprofilvolumen V_{HP} :

$$V_A = l_A * b_A * h = 0,2 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * 0,1 \text{ m} = 4 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_I = l_i * b_i * h = 0,19 \text{ m} * 0,19 \text{ m} * 0,1 \text{ m} = 3,61 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{HP} = V_A - V_I = 4 * 10^{-3} \text{ m}^3 - 3,61 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 3,9 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Masse Hohlprofil m_{HP} :

$$m_{HP} = V_{HP} * \rho_{Alu} = 3,9 * 10^{-4} \text{ m}^3 * 2,7 * 10^3 \text{ kg/m}^3 = 1,053 \text{ kg}$$

$$F_{HP} = m_{HP} * g = 1,053 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 10,33 \text{ N}$$

Reibungskraft $F_{R_{HP}}$ aufgrund des Hohlprofils an der Linearführung:

$$F_{R_{HP}} = F_{HP} * \mu_F = 10,33 \text{ N} * 0,05 = 0,52 \text{ N}$$

Masse Schüttgut m_S ¹:

$$m_S = V_I * \rho_S = 3,61 * 10^{-3} \text{ m}^3 * 1,5 * 10^3 \text{ kg/m}^3 = 5,415 \text{ kg}$$

$$F_S = m_S * g = 5,415 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 53,12 \text{ N}$$

Reibungskraft F_{R_S} zwischen Schüttgut:

$$F_{R_S} = F_S * \mu_S = 53,12 \text{ N} * 0,9 = 47,81 \text{ N}$$

Der zu erwartende Verschiebekraft F_V :

$$F_V = F_{R_{HP}} + F_{R_S} = 0,52 \text{ N} + 47,81 \text{ N} = 48,33 \text{ N}$$

Die Verhakungen der Partikel, die zu einer Krafterhöhung führen, wurden vernachlässigt, da einerseits eine Sicherheit aufgrund der Annahme der Packungsdichte mit „1“ gibt und andererseits die meisten Sensoren eine Grenzlast von 150% der Nennlast aushalten können.

¹ Die Packungsdichte wurde vernachlässigt. Um eine Abschätzung der maximalen Kraft zu bekommen wird angenommen, dass das Schüttgut das ganze Volumen einnimmt.

Ausgewählt wurde schlussendlich der Kraftaufnehmer K-25 mit einer Nennlast von 50N. Dieser besitzt einen maximalen Messfehler von 0,2%. Die Grenzlast beträgt 75N und die Bruchlast mindestens 150N. Demzufolge war dieser Kraftaufnehmer den Anforderungen gerecht. Weitere Spezifikationen zu diesem Sensor sind auf dem Datenblatt im Anhang [080019] zu finden.

Bei der Konstruktion der Anlage wurde darauf geachtet, dass die Belastung des Aufnehmers mit Querkräften verhindert wird, um eine plastische Verformung des Federkörpers zu vermeiden. Zudem erzeugen selbst kleine Querkräfte unter Umständen größere Messunsicherheiten. Querkräfte können im vorliegenden Fall nur alleine aufgrund der Reibungskraft quer zur Boxoberfläche erzeugt werden. Dieser Reibungskraft entsteht allerdings nur dann, wenn die Bewegungsrichtung des Kraftaufnehmers bzw. der Schiebestange und der oberen Box nicht parallel verläuft (Abbildung 36). Deswegen wird die Führungsstange nicht nur zur Führung der oberen Box sondern auch für die Führung der Schiebestange eingesetzt. Somit kann keine Relativbewegung zwischen Kraftaufnehmer und obere Box entstehen. Allerdings muss bei der Montage die Parallelität der Führungsstangen und der Gewindespindel möglichst genau eingestellt werden, damit bei der Bewegung kein hoher Widerstand entsteht.

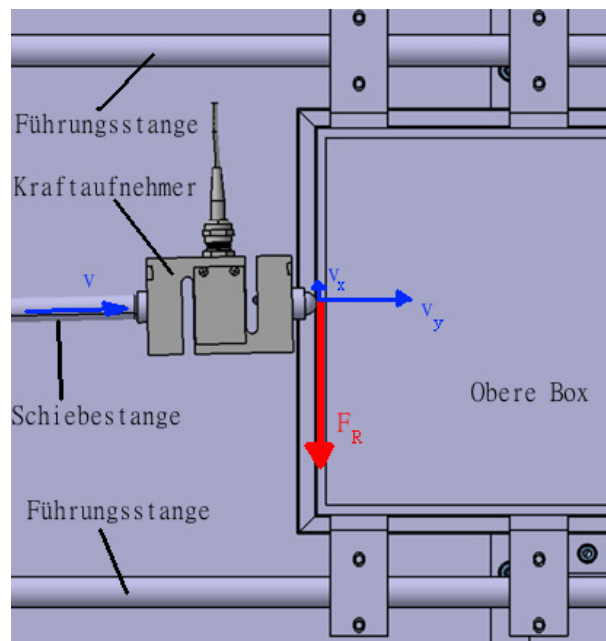


Abbildung 36: Entstehung der Reibkraft bei Relativbewegung der Schiebestange

Ein weiterer wichtiger Punkt war, dass die Krafteinleitung möglichst punktförmig erfolgt und minimale Winkelfehler (Abbildung 37), die z.B. aufgrund des Verzugs der

Boxen nach dem Schweißen entstehen, die Messung nicht verfälschen sollen. Der aus dem Winkelfehler entstehende Messfehler bezogen auf den Endwert beträgt $(1 - \cos(\alpha))$ [27]. Dazu wurde ein Druckstück zwischen dem Sensor und der Box konzipiert, der eine plane Auflagefläche auf der Sensorseite und eine runde Oberfläche auf der Seite der Box aufweist (Abbildung 38).

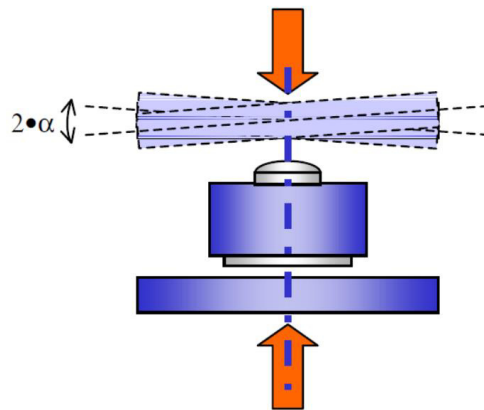


Abbildung 37: Darstellung des Winkelfehlers [27]

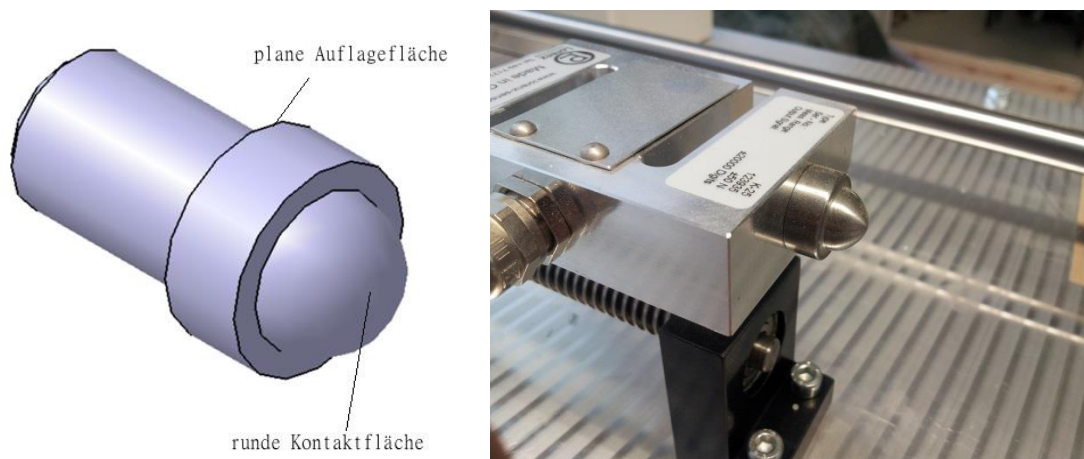


Abbildung 38: Druckstück

Während der Messung ist es wichtig, dass das Messkabel nicht zusammen mit Steuerleitungen oder Starkstromkabeln verlegt wird. Außerdem sollte das Kabel immer einen möglichst großen Abstand zum Schrittmotor haben, um Störungen im Messsignal zu vermeiden.

Der Messverstärker hat die Bezeichnung 1m-LCV/DMS-2m-USB (Abbildung 39) und ist ein Gleichspannungsmessverstärker für DMS Sensoren. Dieser wird zwischen die Zuleitung von Sensor und Signalerfassung (VS2) geschaltet und wandelt das analoge Signal vom DMS in digitale Messwerte um. Diese Messwerte können dann mittels USB-Schnittstelle vom PC angefordert werden. Die Stromversorgung erfolgt

ebenfalls über die Schnittstelle [28]. Der ganze Bausatz (Sensor, Messverstärker, Kabel) wurde von der Firma Lorenz-Messtechnik GmbH geprüft und kalibriert. Das Prüfzertifikat dazu liegt im Anhang bei.



Abbildung 39: Messverstärker 1m-LCV/DMS-2m-USB [28]

4.2.1 VS2

Die Auswertung der Messwerte erfolgt mit der VS2 Software am Laptop, die folgenden Funktionsumfang bietet:

- Konfigurationsmöglichkeiten für die VS2
- Speichern sensorbezogener Skalier- und Einstellungsdaten
- Anzeige zur Darstellung der Messdaten (aktueller Messwert, Tarierwert, Minimalwert und Maximalwert)
- Darstellung der Messdaten im Diagramm
- Speichern der Messdaten im CSV Format
- Speichern des Diagramms im BMP Format
- Drucken des Diagramms
- Darstellung der Sensorinformation

Vor dem Starten der Software muss der Sensor mit der USB Schnittstelle verbunden werden. Andernfalls startet die Software nicht. Die Bedienoberfläche der Software ist einfach gestaltet. Es besteht aus einer Menüleiste, einer Navigationsleiste, einer Statusleiste und einem Arbeitsbereich (Abbildung 40). Die Funktionen der Menüleiste entsprechen denen der Navigierleiste. Das Umschalten zwischen den Dialogen kann in beiden Leisten durchgeführt werden. Die Statusleiste stellt aktuelle Zustandsinformationen der Anwendung dar:

- „Betriebsbereit. Sensor verbunden“
- „Sensor getrennt“
- „Messen...“
- „Warten auf Triggerstart-Ereignis“

- „Messen! Warten auf Triggerstopp-Ereignis“
- Weiterer Informationen über die Steuerelemente aus der Menü- und Navigierleiste

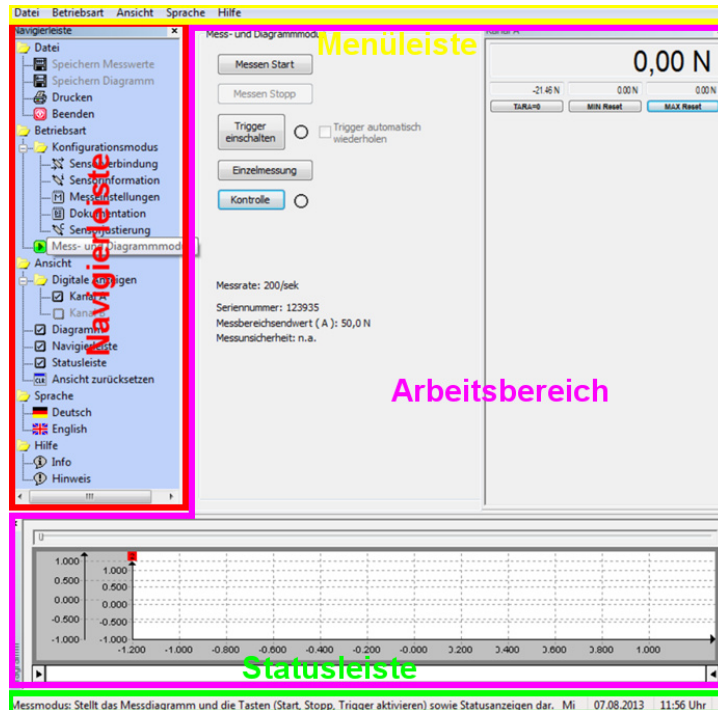


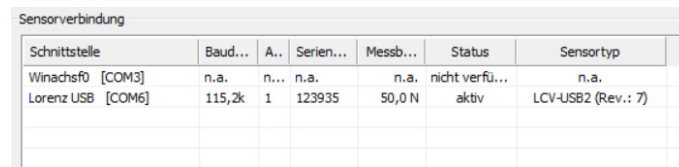
Abbildung 40: VS2 Oberfläche

Im Arbeitsbereich werden die unter „Betriebsart“ zusammengefassten Dialoge „Konfigurationsmodus“ und „Mess- und Diagrammmod“ angezeigt.

Bevor mit den Messungen begonnen werden kann, müssen die Einstellungen des Sensors kontrolliert bzw. geändert werden. Dies erfolgt im Dialog „Konfigurationsmodus“ unter „Betriebsart“. Im ersten Punkt in diesem Dialog ist die „Sensorverbindung“ zu sehen. Hier werden die Schnittstellen- und Sensorinformationen der angeschlossenen Sensoren aufgelistet. Mit der Software kann immer nur ein Sensor angesprochen werden. Falls mehrere Sensoren angeschlossen sind, muss der gewünschte mit einem Doppelklick aktiviert werden. In der Status Spalte wird dann der Eintrag auf aktiv geändert. Die Liste gibt weitere Informationen zum Sensor wie Baudrate, Adresse, Seriennummer, Messbereichsendwert und Sensortyp an. Die Baudrate kann zwischen 115,2 kBaud und 230,4 kBaud umgeschaltet werden, um die maximale Messrate anzupassen (Tabelle 2). Doch dies ist nicht notwendig, da die Messung im Versuch mit 200 Messwerten pro Sekunden ausgeführt wird (siehe Abbildung 43).

Baudrate in Baud	Maximal einstellbare Messrate
115200	2500/s
230400	5000/s

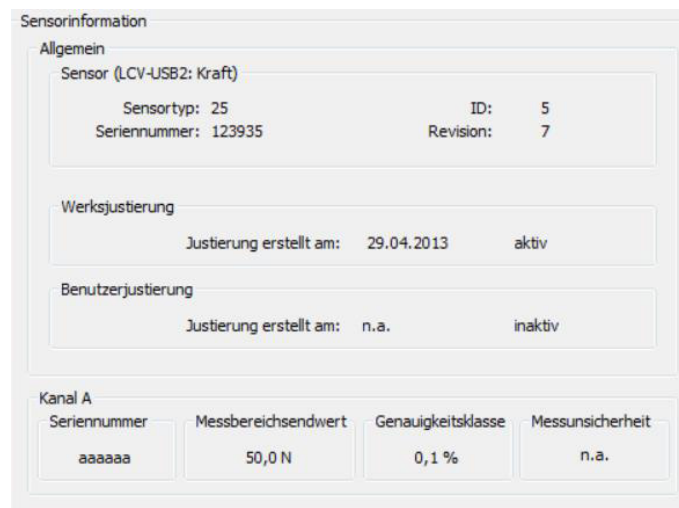
Tabelle 2: Baudrate – Messrate [29]



Schnittstelle	Baud...	A..	Serien...	Messb...	Status	Sensortyp
WinachsR0 [COM3]	n.a.	n...	n.a.	n.a.	nicht verfü...	n.a.
Lorenz USB [COM6]	115,2k	1	123935	50,0 N	aktiv	LCV-USB2 (Rev.: 7)

Abbildung 41: Sensorverbindung

Im Dialog „Sensorinformation“ werden die Informationen und Eigenschaften des aktivierten Sensors angezeigt. Zum Beispiel kann unter „Allgemein“ der Sensortyp (DMS, Spannung, Strom, Drehmoment, Kraft, ...) abgelesen werden.



Sensorinformation			
Allgemein			
Sensor (LCV-USB2: Kraft)			
Sensortyp: 25	ID: 5		
Seriennummer: 123935	Revision: 7		
Werksjustierung			
Justierung erstellt am:	29.04.2013	aktiv	
Benutzerjustierung			
Justierung erstellt am:	n.a.	inaktiv	
Kanal A			
Seriennummer	Messbereichsendwert	Genauigkeitsklasse	Messunsicherheit
aaaaaa	50,0 N	0,1 %	n.a.

Abbildung 42: Sensorinformation

Die Messeinstellungen können im gleichnamigen Dialog eingesehen und verändert werden. Diese sind aufgeteilt in Messgröße, Diagramm und Trigger. Die für den Versuch einzustellenden Werte sind in der Abbildung 43 dargestellt.

Abbildung 43: Messeinstellungen

Im Eingabefeld „Die Reduzierung der Messrate mit Mittelung über X Werten.“ ist es möglich, die Anzahl der zu speichernden Messpunkte zu verringern. Die eingestellte Messrate 200/sec wird folglich bei $X=10$ auf 20 Messwerte pro Sekunde reduziert. Dabei findet eine Mittelung über jeweils X Werte statt. Da allerdings beim Versuch nicht so großen Datenmengen (geringe Messzeit und Messrate) zu erwarten sind, wird dieser Wert auf „1“ gesetzt, d.h. es findet keine Mittelung statt. Die Aufzeichnung der Kraft beginnt automatisch mit Hilfe der Trigger-Funktion der Software. Die Einstellungen dazu werden im Bereich „Trigger“ definiert. Als Startimpuls der Aufzeichnung kann die Betätigung des Buttons „Messen Start“ im „Mess- und Diagrammmodus“, die Systemzeit oder abhängig vom aktuellen Wert des Sensors (Kanal A) definiert werden. Um die Aufzeichnung zu beenden gibt es die Möglichkeiten den „Messen Stop“ Button zu betätigen, die Messdauer oder die Anzahl der Messpunkte anzugeben. Für den Versuch wird der Beginn der Aufzeichnung abhängig vom aktuellen Wert des Sensors (Kanal A) festgelegt. Als weitere Einstellung wird die Richtung „unterschreiten“ gewählt und der Wert mit $-0,04$ N eingegeben. Das bedeutet, wenn eine Druckkraft auf den Sensor von mehr als $0,04$ N anliegt, wird die Aufzeichnung gestartet. Der Abschluss der Aufzeichnung wird mit einer Messdauer angegeben. Diese ist abhängig vom Verschiebeweg der oberen Box und deren Verschiebegeschwindigkeit. Bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s und 50 mm Verschiebeweg ergibt sich eine Verschiebezeit von 5 Sekunden für die Versuche mit Ureapartikeln (10 Sekunden für Versuche mit Kantkörnern, da 100 mm Verschiebeweg). Die Messdauer wird allerdings $2-3$ Sekunden länger gewählt als die Verschiebezeit, damit die Aufzeichnung weiter läuft, bis alle Partikel

vollkommen in Ruhe gekommen sind. Ein entsprechendes Ablaufdiagramm zur Trigger-Funktion ist in Abbildung 44 dargestellt.

Ablauf:

1. Startereignis auswählen.
2. Stoppereignis auswählen.
3. Trigger Taste betätigen.
4. Triggerstart Ereignis auslösen.
5. Triggerstopp Ereignis auslösen.
6. Messung aufgezeichnet.

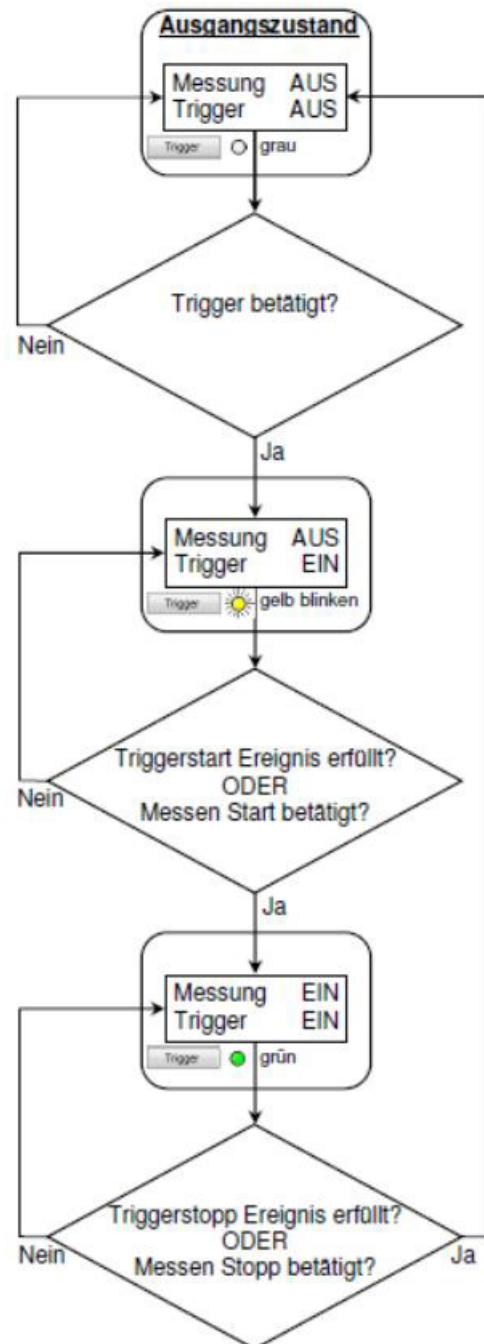


Abbildung 44: Ablaufdiagramm Triggerung [29]

Die unter dem Dialog „Dokumentation“ befindlichen Einstellungen dienen der individuellen Gestaltung der Ausgabedateien (Messwerte & Diagramm). Die Messunsicherheit kann unter dem Dialog „Sensorjustierung“ im Sensor hinterlegt werden. Doch dies war nicht notwendig, da dieser Wert schon bei der Werks-Kalibrierung bestimmt und eingetragen wurde. Der Wert dient lediglich zur Dokumentation. Auf die Messwerte hat es keinen Einfluss.

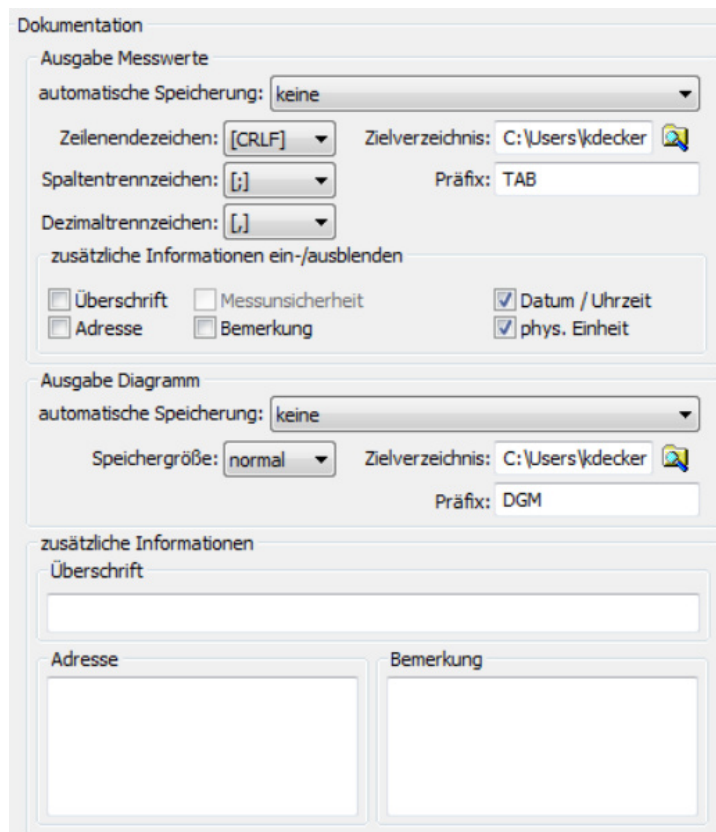


Abbildung 45: Dokumentation

Im „Mess- und Diagrammmodus“ sind die digitale Anzeige der physikalischen Größe und das Diagramm ersichtlich (Abbildung 46). Die digitale Anzeige verfügt über vier Ausgabefelder. Je eines für den aktuellen Messwert, den tarierten Wert, den minimalen Wert und den maximalen Wert. Die letzteren Beiden können mit den Tasten „MIN Reset“ und „MAX Reset“ zurückgesetzt werden. Der aktuelle Messwert wird durch Klicken auf die Taste „TARA“ auf Null gesetzt. Mit nochmaligem Klicken auf die gleiche Taste wird die Tarierung wieder aufgehoben. Die Tasten „Messen Start“, „Messen Stopp“ und „Trigger einschalten“ (Messeinstellungen → Trigger) sind selbsterklärend. Mit Hilfe der Taste „Einzelmessung“ wird der aktuelle Wert des Sensors angefordert und in der digitalen Anzeige ausgegeben. Die Taste „Kontrolle“ dient der Ausgabe des Nennbereichs des Sensors durch Verstimmung der DMS

Messbrücke im Sensor. Eine rote Leuchte neben der Taste kennzeichnet eine aktive Kontrollaufschaltung.

Nach einem erfolgreichen Messdurchlauf werden die Messwerte und das Diagramm über die Befehle in der Menüleiste oder Navigierleiste (Abbildung 47) abgespeichert [29].

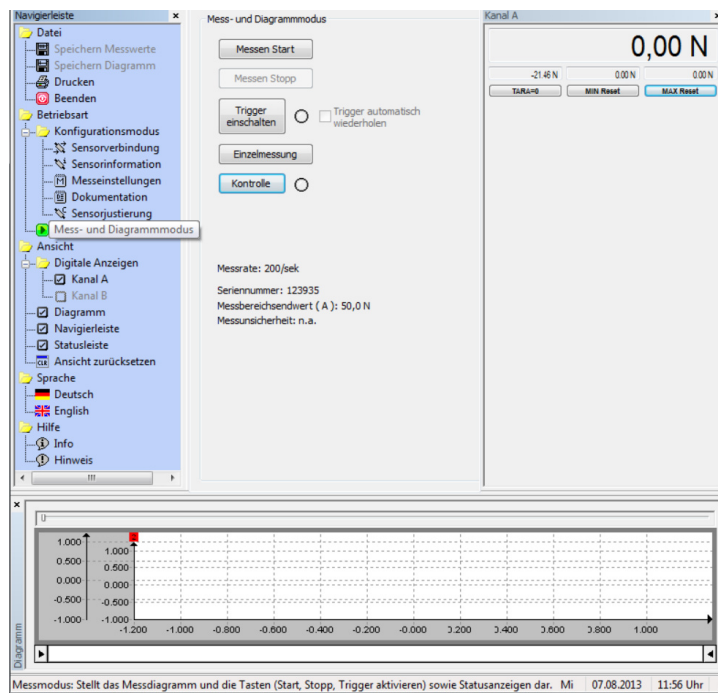


Abbildung 46: Mess- und Diagrammmodus

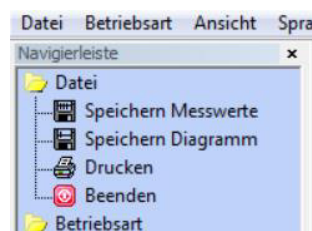


Abbildung 47: Navigierleiste

4.3 Versuchsdurchführung

Bevor mit den Messungen gestartet werden kann, muss die Größe der Boxen und Rutsche ausgewählt werden. Dies ist abhängig vom Partikelradius in der Simulation, d.h. der Partikelradius muss schon vor dem realen Versuch festgelegt werden. Für die Ureapartikel wurde ein Radius von 3 mm und für die Kantkörner von 7 mm gewählt bzw. festgelegt. Weshalb diese Wahlen getroffen wurden, ist in Kapitel 5.2 *Definition der Partikelform* erläutert. Nach der Tabelle 11 in dem genannten Kapitel erfolgte die Untersuchung der Ureapartikeln mit der kleineren Ausführung und der

Kantkörner mit der größeren Ausführung. Anschließend werden die Position und Neigung der Rutsche und die Position des Auffangbehälters an die Schüttgüter angepasst, sodass die Partikel nicht auf der Rutsche stauen und sich ein Auftreffpunkt der Partikel nach der Rutsche an der vertikalen Wand des Auffangbehälters ergibt. Die endgültigen Einstellungen sind in der Tabelle 3 definiert. Die Maße sind in den Abbildung 48 dargestellt.

	Urea	Kantkorn
Ausführung	kleine Box	große Box
Neigung der Rutsche α	30°	30°
x-Abstand Rutsche zu Auffangbehälter $x_{R,Ab}$	44 mm	47 mm
z-Abstand Rutsche zu Auffangbehälter $z_{R,Ab}$	115 mm	116 mm
z-Abstand Auffangbehälter zu Grundplatte $z_{Ab,G}$	351 mm	351 mm

Tabelle 3: Anlagenkonfiguration

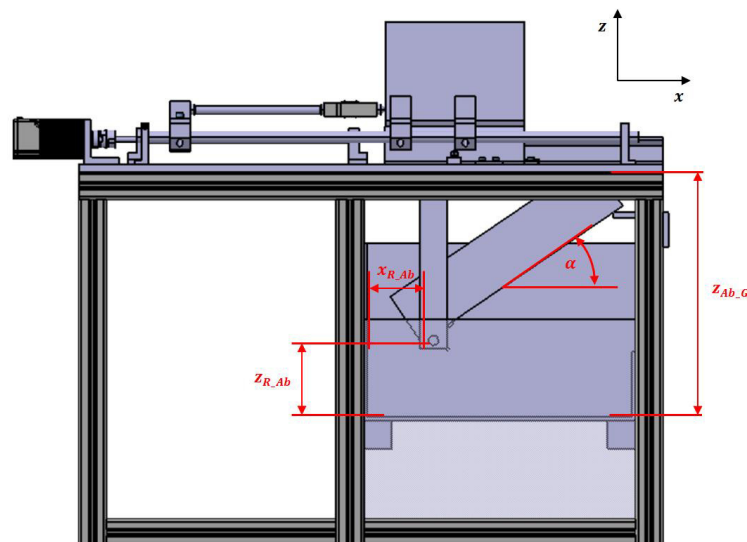


Abbildung 48: Anlagenkonfiguration (Maße)

Sind Rutsche und Auffangbehälter richtig positioniert wird die obere Box genau über die untere Box platziert und das Schüttgut in die Boxen eingefüllt. Die Füllhöhe wird so bestimmt, dass genügend Partikel in den Auffangbehälter rutschen und einen großen Schütthaufen bilden können, jedoch dürfen es nicht zu viele Partikel werden, damit die Rechenzeit in der Simulation in annehmbarer Zeit liegt. Für die Versuche

mit Urea wurde eine Füllhöhe von 86 mm (35 mm von der oberen Kanten der oberen Box) festgelegt. In den Versuchen mit den Kantkörnern betrug die Füllhöhe 103,5 mm (93 mm von der oberen Kante der oberen Box). Nach dem Einfüllen ist das Schüttgut eben zu streichen und gegebenenfalls nachzufüllen, um die Füllhöhen zu erreichen. Anschließend werden die Einstellungen für den Motor und den Kraftaufnehmer, wie es in den Kapiteln 4.1.1 NanoPro 1.7 und 4.2.1 VS2 erläutert ist, vorgenommen und der Kraftaufnehmer Richtung Box bewegt, bis dieser an der Box anliegt. Für die Aufzeichnung des Auftreffverhaltens der Partikel nach der Rutsche ist ein Webcam im Auffangbehälter platziert. Dadurch kann die Auftreffhöhe einfach bestimmt werden. Nach diesen Vorbereitungen kann schließlich der Versuch durchgeführt werden. Mit einer Stoppuhr wird zusätzlich die Durchlaufzeit gemessen. Am Ende jeden Versuches werden der Kraftverlauf abgespeichert, Bilder vom Endzustand aufgenommen (Schütthaufen) und einige Messungen mit dem Messschieber durchgeführt. Diese Messungen und weitere Ergebnisse sind im Folgenden beschrieben.

4.4 Messergebnisse

Urea

Der Versuch mit Ureapartikeln wurde fünf Mal durchgeführt. Die Ergebnisse zu den Durchlaufzeiten und Böschungswinkel in der oberen Box sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

	Durchlaufzeit	$z_{S,A}$ Abstand Schüttspitze zu oberer Kante der oberen Box	$\beta_{Ur_obere_Box}$ Böschungswinkel in der oberen Box
Urea Versuch 1	7,38 s	61,5 mm	32,35°
Urea Versuch 2	7,82 s	62,5 mm	31,43°
Urea Versuch 3	8,02 s	62,4 mm	31,52°
Urea Versuch 4	7,69 s	63 mm	30,96°
Urea Versuch 5	7,8 s	62,5 mm	31,43°

Tabelle 4: Messergebnisse obere Box (Urea)

Mit den Abmessungen (Abbildung 49):

$x_{S,B} = 45 \text{ mm}$ Schüttlänge Urea in der oberen Box

$h_{kl_ob_Box} = 90 \text{ mm}$ Höhe der kleinen oberen Box

errechnet sich der Böschungswinkel zu:

$$\beta_{Ur_obere_Box} = \arctan\left(\frac{h_{kl_ob_Box} - z_{S_A}}{x_{S_B}}\right)$$

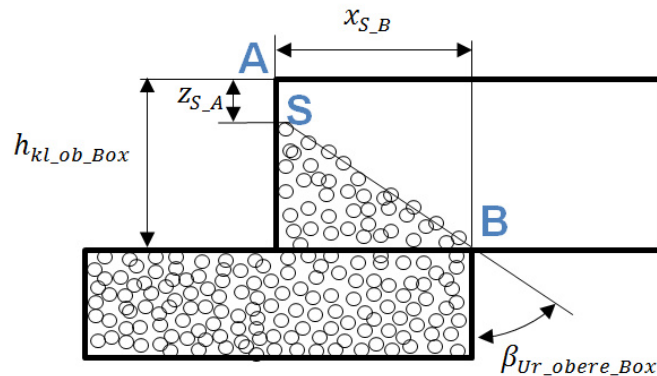


Abbildung 49: Abmessungen für oberen Böschungswinkel (Urea)

Der Mittelwert für den Böschungswinkel in der oberen Box ergibt sich zu $31,5^\circ$ und die Durchlaufzeit betrug im Mittel 7,7 Sekunden.

Die Auftreffhöhe der Partikel an der vertikalen Wand des Auffangbehälters vom Boden des Auffangbehälters wurde mit Hilfe der Webcam-Aufzeichnung gemessen und lag zwischen 80 mm und 88 mm (Abbildung 50).



Abbildung 50: Auftreffpunkt (Urea)

Der Böschungswinkel im Auffangbehälter betrug im Durchschnitt 25° und die Schütthöhe 48 mm. Messungen dazu sind in den Abbildung 51 & Abbildung 52 dargestellt.

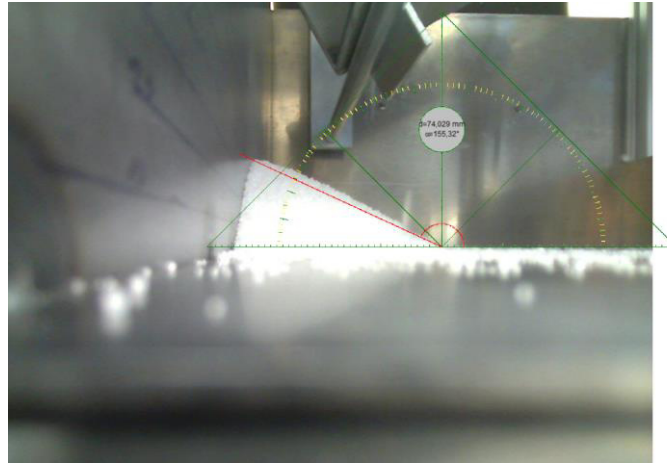


Abbildung 51: Böschungswinkel im Auffangbehälter (Urea)

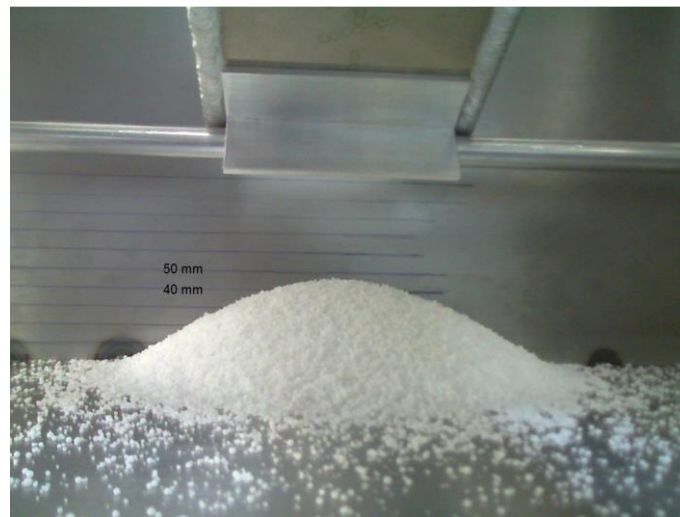


Abbildung 52: Schütthöhe im Auffangbehälter (Urea)

Die Abbildung 53 zeigt die Kraftverläufe der jeweiligen Versuche. Die negativen Kräfte deuten an, dass es sich um Druckkräfte handelt. Um die realen Kraftverläufe mit denen aus der Simulation vergleichen zu können, müssen noch die Reibkräfte, die durch die Führungen entstehen, abgezogen werden. Dazu wurden Versuche ohne Schüttgut durchgeführt und die Kraft, die zum Verschieben der leeren Box notwendig ist aufgezeichnet (Abbildung 54).

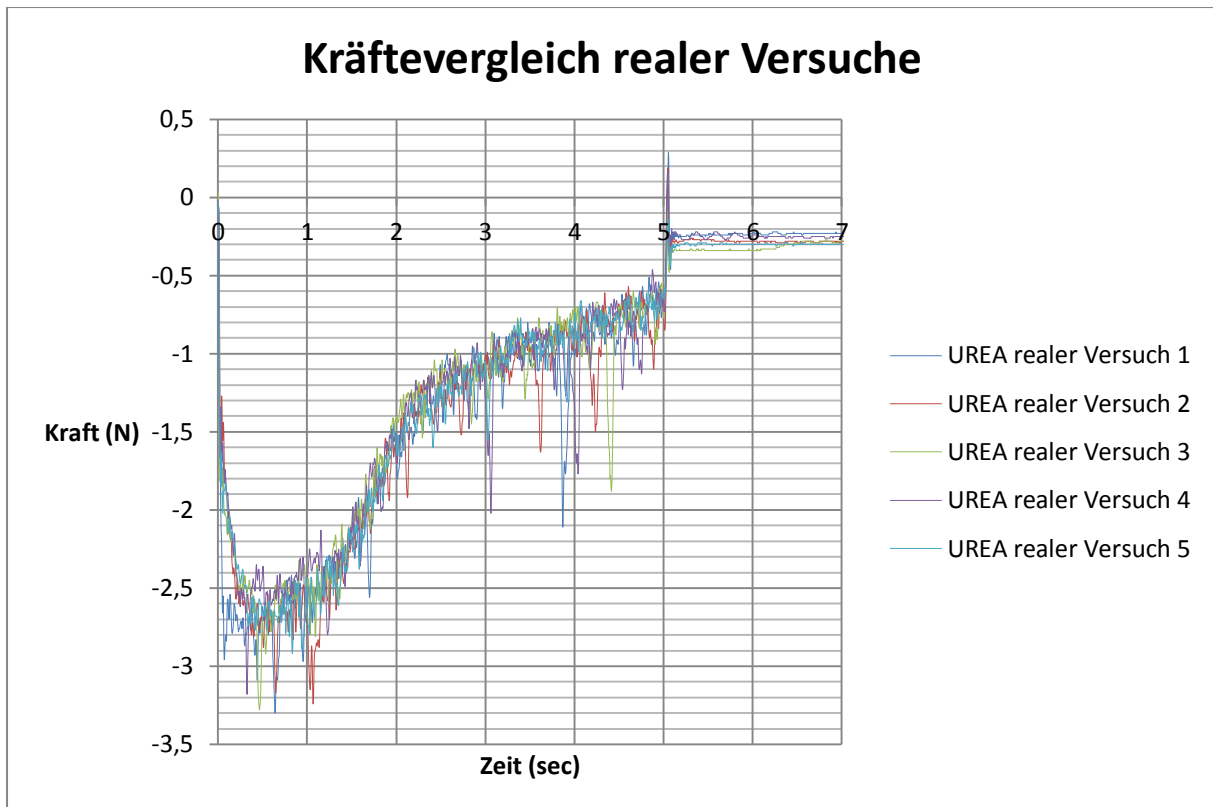


Abbildung 53: Reale Schiebekraftverläufe (Urea)

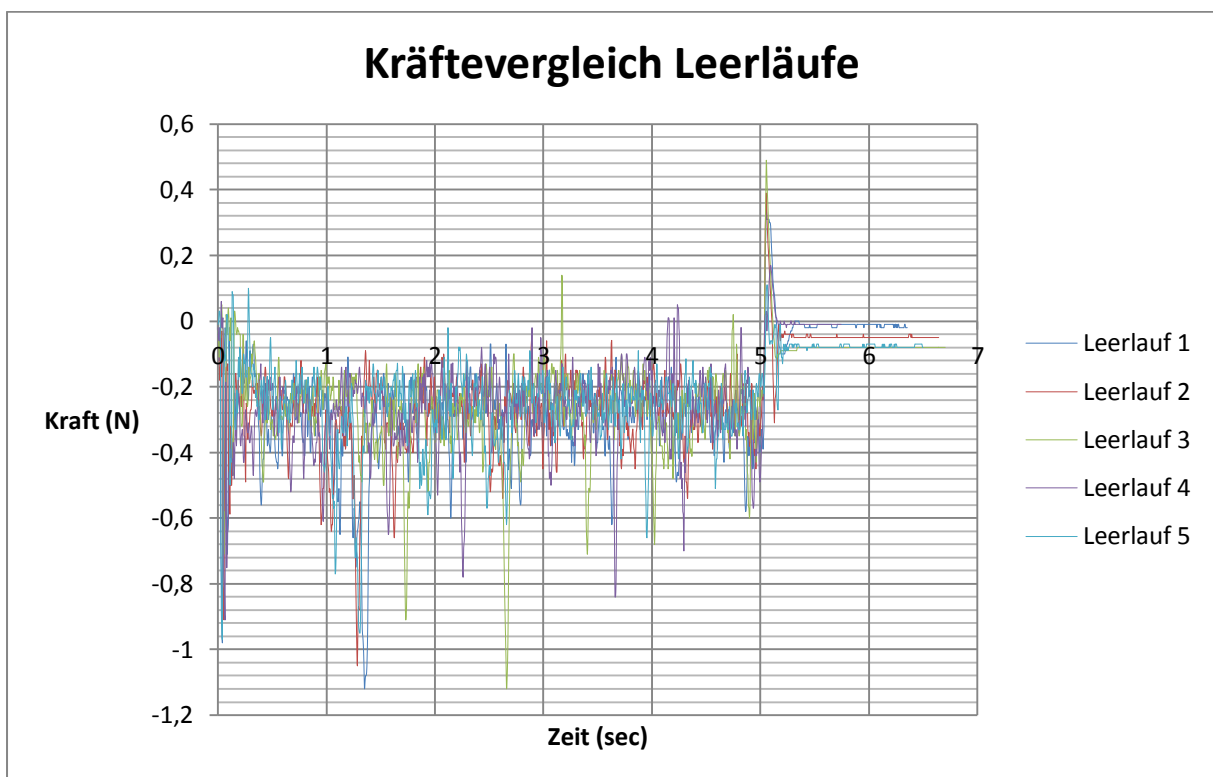


Abbildung 54: Reale Schiebekraftverläufe ohne Schüttgut (kleine Box)

Im Mittel beträgt die Reibkraft -0,3 N. Die Kraftverläufe von den Versuchen vermindert um den mittleren Reibkraft ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

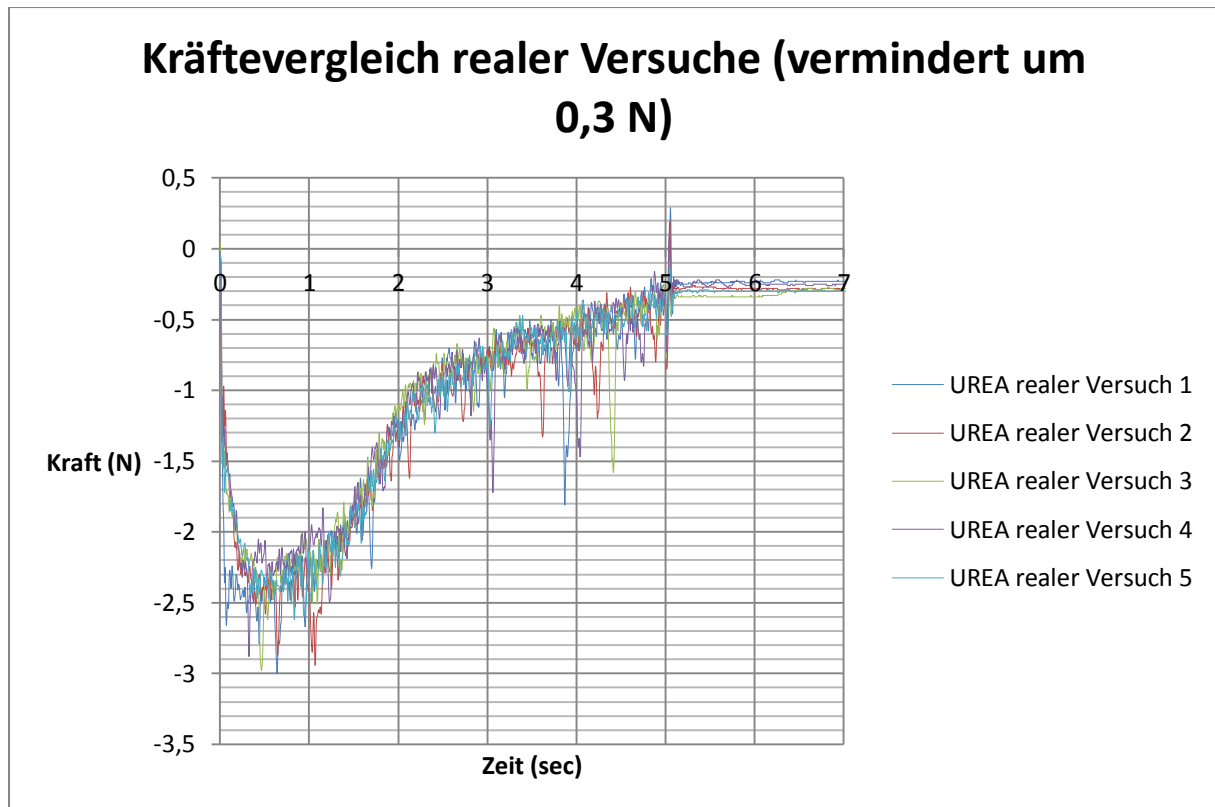


Abbildung 55: Schiebekraftverläufe vermindert um 0,3 N (Urea)

Als Bewertungsmaß wird der durchschnittliche Wert zwischen 0,4 und 1 Sekunden (Ort des Maximums) betrachtet. Dieser ergibt sich zu ca. -2,3 N. Die Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Durchlaufzeit	7,7 s
Böschungswinkel in der oberen Box	31,5°
Auftreffhöhe	80 - 88 mm
Böschungswinkel im Auffangbehälter	25°
Schütthöhe im Auffangbehälter	48 mm
Schiebekraft	2,3 N

Tabelle 5: Zusammengefasste Messergebnisse (Urea)

Kantkorn

Bei den Versuchen mit den Kantkörnern wurde die Versuchsanzahl auf drei reduziert. Die Durchlaufzeiten und Werte für den Böschungswinkel in der oberen Box sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

	Durchlaufzeit	z_{S_C} Abstand Schüttspitze zu oberer Kante der oberen Box	x_{E_S} x-Abstand obere Box zu Schüttspitze	$\beta_{KK_obere_Box}$ Böschungswinkel in der oberen Box
Kantkorn Versuch 1	13 s	75 mm	26 mm	47°
Kantkorn Versuch 2	12,46 s	73 mm	23 mm	46,55°
Kantkorn Versuch 3	12,1 s	74 mm	25 mm	46,97°

Tabelle 6: Messergebnisse obere Box (Kantkorn)

Mit den Abmessungen:

$x_{E_D} = 95 \text{ mm}$ Abstand vordere Kante der unteren Box zu Innenwand der oberen Box

$h_{gr_ob_Box} = 149 \text{ mm}$ Höhe der großen oberen Box

Schüttlänge:

$$x_{S_D} = x_{E_D} - x_{E_S}$$

errechnet sich der Böschungswinkel zu:

$$\beta_{KK_obere_Box} = \arctan\left(\frac{h_{kl_ob_Box} - z_{S_C}}{x_{S_D}}\right)$$

Der Mittelwert für den Böschungswinkel in der oberen Box ergibt sich zu 46,8° und die Durchlaufzeit betrug im Mittel 12,5 Sekunden.

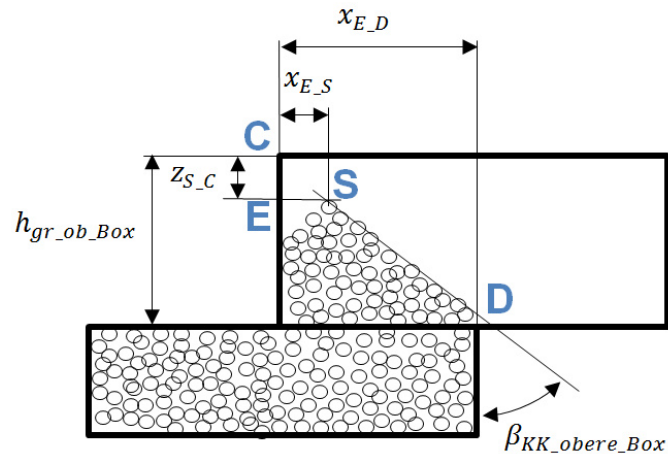


Abbildung 56: Abmessungen für oberen Böschungswinkel (Kantkorn)

Die Auftreffhöhe der Partikel an der vertikalen Wand des Auffangbehälters vom Boden des Auffangbehälters lag zwischen 70 mm und 90 mm (Abbildung 57; im angehaltenen Videoausschnitt sind die Partikel nicht gut ersichtlic).



Abbildung 57: Auftreffpunkt (Kantkorn)

Der Böschungswinkel im Auffangbehälter betrug im Durchschnitt 36° und die Schütthöhe 85 mm (Abbildung 58). Der Böschungswinkel wurde mit Hilfe der Schütthöhe und der Ausbreitung der Schüttung, welche direkt nach den Versuchen gemessen wurde, errechnet. Die Ausbreitung der Schüttung lag in den Versuchen zwischen 115 mm und 120 mm (Abbildung 59).

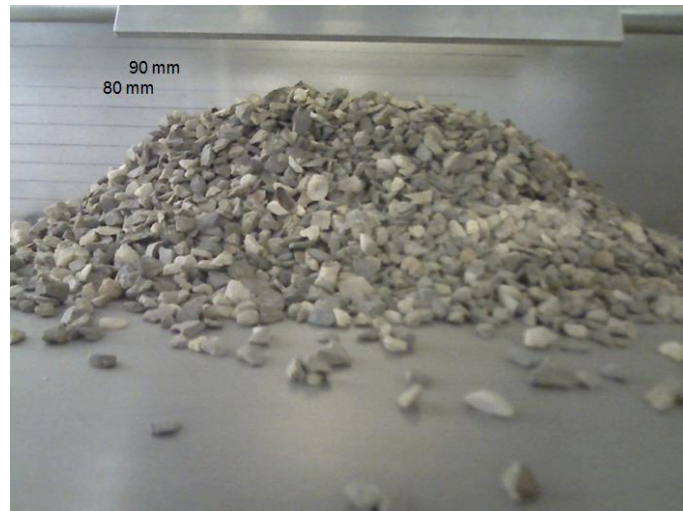


Abbildung 58: Schütthöhe im Auffangbehälter (Kantkorn)

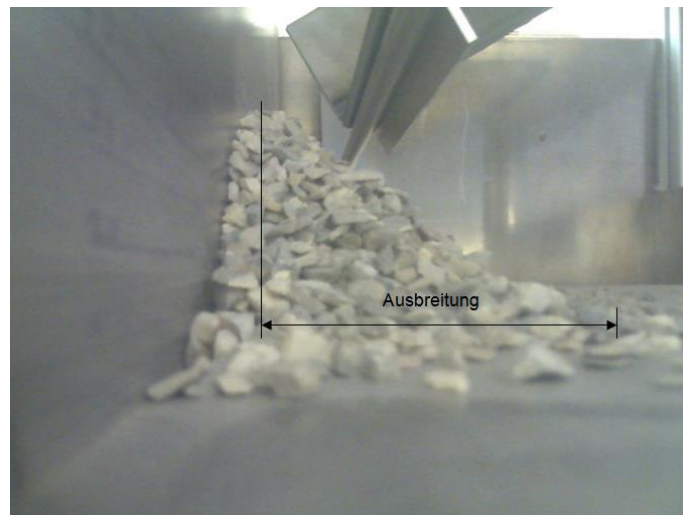


Abbildung 59: Ausbreitung im Auffangbehälter (Kantkorn)

Die Abbildung 60 zeigt die Kraftverläufe der jeweiligen Versuche. Analog wie in den Versuchen mit Ureapartikeln werden die Reibkräfte der Führungen mit Leerlaufversuchen ermittelt und von den gemessenen Kraftverläufen mit Schüttgut abgezogen (Abbildung 61).

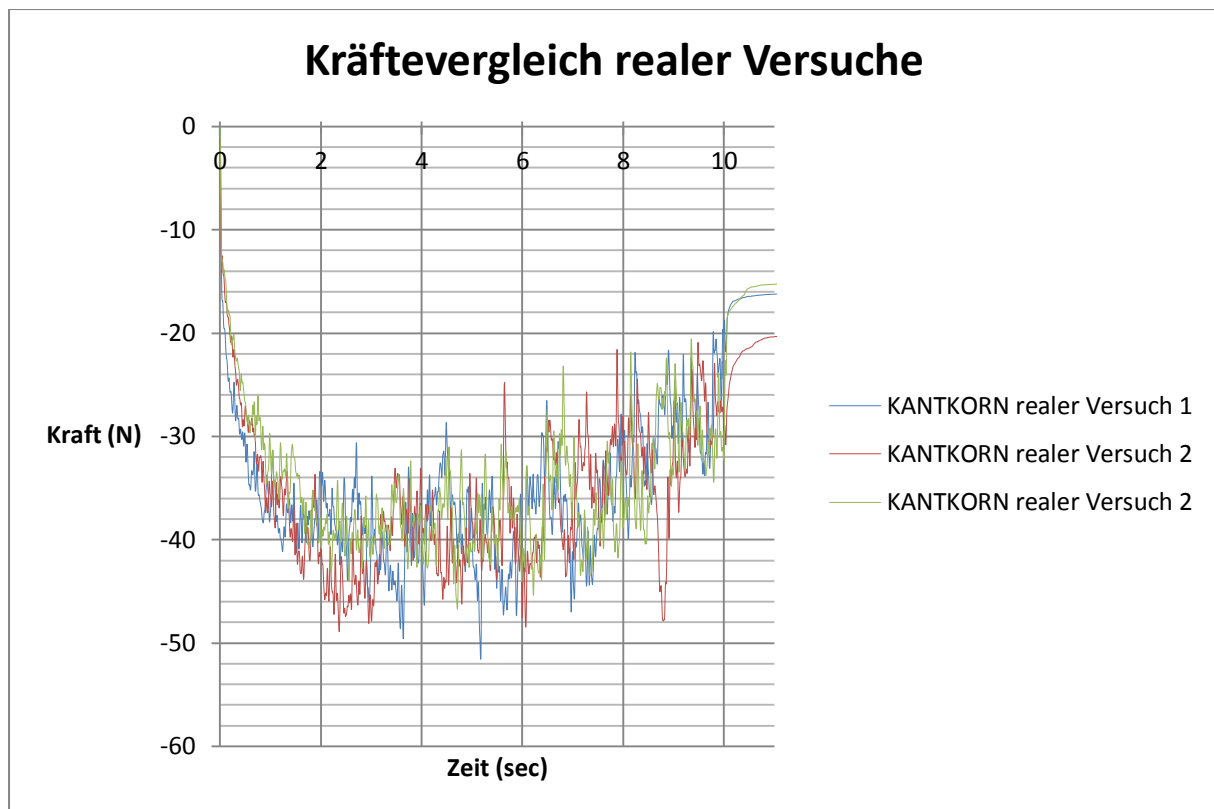


Abbildung 60: Reale Schiebekraftverläufe (Kantkorn)

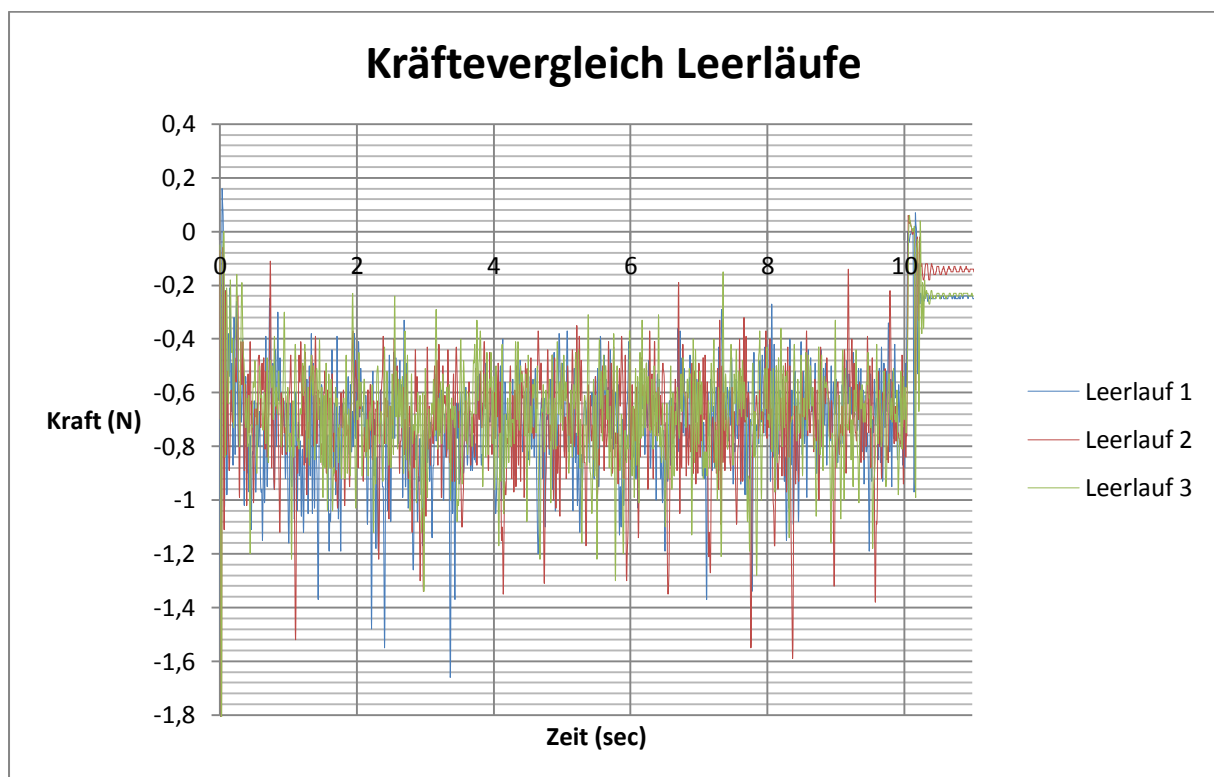


Abbildung 61: Reale Schiebekraftverläufe ohne Schüttgut (große Box)

Im Mittel beträgt die Reibkraft $-0,7$ N. Die Kraftverläufe von den Versuchen vermindert um den mittleren Reibkraft ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

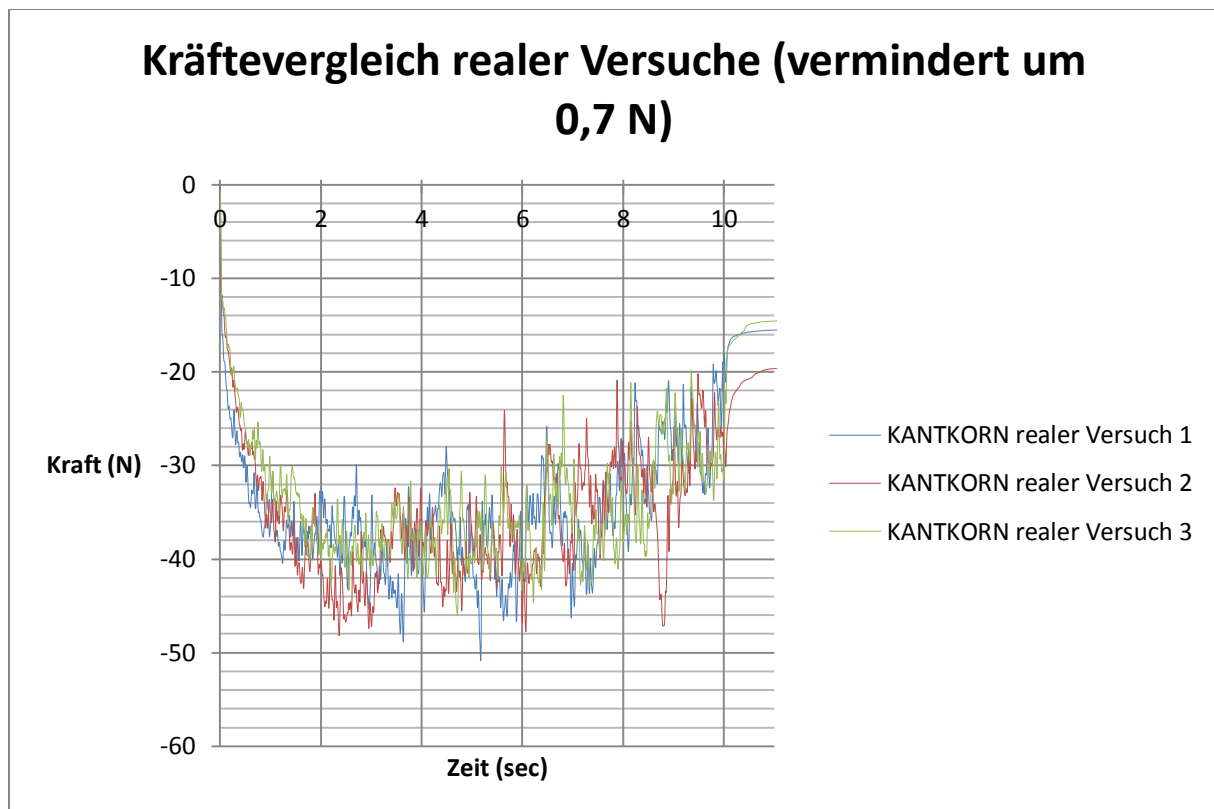


Abbildung 62: Schiebekraftverläufe vermindert um 0,7 N (Kantkorn)

Als Bewertungsmaß wird der durchschnittliche Wert zwischen 2 und 4 Sekunden betrachtet. Dieser ergibt sich zu ca. -37 N. Die Tabelle 7 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Durchlaufzeit	12,5 s
Böschungswinkel in der oberen Box	46,8°
x-Abstand obere Box zu Schüttspitze	24,6 mm
Auftreffhöhe	70 - 90 mm
Böschungswinkel im Auffangbehälter	36°
Schütthöhe im Auffangbehälter	85 mm
Schiebekraft	37 N

Tabelle 7: Zusammengefasste Messergebnisse (Kantkorn)

5 Computersimulation (EDEM)

Die Simulationen werden mit Hilfe der Software EDEM Academic 2.4 der Firma DEM Solutions durchgeführt. DEM Solutions ist eines der etablierten Unternehmen im Bereich der Schüttgutsimulation. Die Besonderheit der EDEM Softwares ist die benutzerfreundliche Bedienung und die zahlreichen Möglichkeiten der visuellen und quantitativen Analyse eines Problems. Das EDEM Simulationspaket besteht aus drei Teilen. Diese sind der „Creator“, der „Simulator“ und der „Analyst“. Im „Creator“ erfolgt die Simulationsvorbereitung und Initialisierung. Hier werden neben der Definition der Umgebung, die Partikeleigenschaften, wie z.B. Größe, Form und Material sowie einige weitere Einstellungen vorgenommen. Auf den folgenden Seiten werden diese Einstellungen beschrieben. Im „Simulator“ werden die für die Simulationsberechnung notwendigen Einstellungen durchgeführt und im „Analyst“ kann die durchgeführte Berechnung visuell im 3D Modus oder mit Graphen analysiert und gegebenenfalls die berechneten Daten exportiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der EDEM Software findet man in [30].

5.1 Erzeugung der Geometrie der Versuchsanlage und Definition ihrer Eigenschaften

UREA

Der erste Schritt zur Simulation ist die Erzeugung der Geometrie der Versuchsanlage. Dies erfolgt unter dem Reiter „Geometrie“ im „Creator“. EDEM bietet hierzu zwei Möglichkeiten an. Einerseits können relativ komplexe Geometrien und Bauteile durch den Import-Befehl aus vorhandenen CAD-Konstruktionen als IGES, STEP oder STL Dateien in EDEM importiert werden. Andererseits ist es auch möglich mit einfachen Geometrien, wie z.B. Platten, Zylinder oder Box, direkt in EDEM die Bauteile zu erzeugen. Es ist vorteilhaft die letztere Methode zu verwenden, da aufgrund der Einfachheit die Rechenzeit kürzer ausfällt. Demzufolge wurde die Versuchsanlage wie in Abbildung 63 dargestellt erzeugt. Der Versuch mit Urea wurde mit der kleineren Ausführung der Anlage durchgeführt. Die Abmessungen der Geometrien entsprechen denen der realen Bauteile. Jedoch wurde die Wandstärke der Boxen bzw. der unteren Box vernachlässigt, obwohl das Schüttgut über diese Fläche verschoben wird. Es wird davon ausgegangen, dass die dünne Wandstärke keinen großen Einfluss hat. In der Simulation kommen zusätzlich zwei weitere Körper vor, nämlich ein Abstreiferbox und eine weitere Rutsche. Diese

sind notwendig um die gleiche Ausgangssituation für alle Simulationen zu erhalten. Dies wird erreicht, indem man mehr Schüttgutpartikel erzeugt als notwendig, um danach den Überschuss mit der Abstreiferbox abzustreifen, damit die gewünschte Füllhöhe erreicht wird. Die Höhe der Abstreiferbox ist von der Partikelgenerierung (Kapitel 5.3 *Definition der Partikeleigenschaften und –generierung*) abhängig.

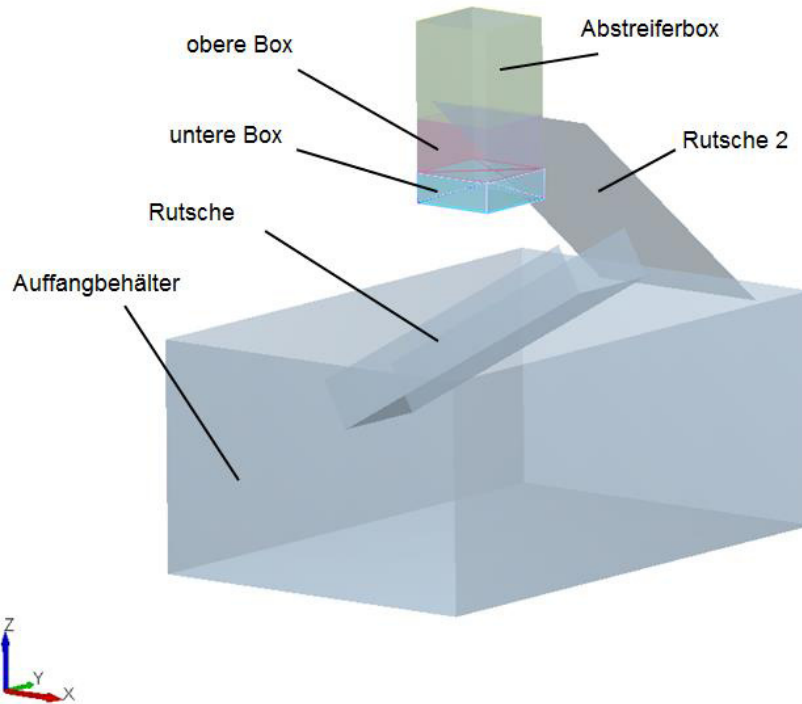


Abbildung 63: EDEM Geometrie der Versuchsanlage (kleine Ausführung)

Für die obere Box und die Abstreiferbox wird eine Bewegung vorgegeben. Beide besitzen eine lineare Bewegung mit einer definierten Richtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung sowie Start- und Endzeitpunkt. Die Einstellungen werden aus dem realen Versuch übernommen und sind in der Tabelle 8 gegeben.

	Abstreiferbox	Obere Box
Typ	Lineare Bewegung	Lineare Bewegung
Startzeitpunkt	0,5 sec	0,95 sec
Endzeitpunkt	0,9 sec	5,95 sec
Geschwindigkeit	0,25 m/s	0,01 m/s
Beschleunigung	0 m/s ²	0 m/s ²
Bewegungsrichtung	y-Richtung	x-Richtung

Tabelle 8: Dynamik der Geometrien in EDEM (kleine Ausführung)

Die Bewegung der Abstreiferbox beginnt erst ab 0,5 Sekunden, da zuvor genügend Zeit für die Generierung der Partikel vorgesehen werden muss. Die Bewegungszeit der oberen Box beträgt fünf Sekunden. Mit einer Geschwindigkeit von 0,01 m/s entspricht laut der Formel

$$s = v * t \quad (5.1)$$

der zurückgelegte Weg der oberen Box 50 mm, was mit dem realen Experiment übereinstimmt.

Zu guter Letzt müssen den Bauteilen deren Materialien zugewiesen werden. Doch zuerst müssen die Materialien mit ihren Eigenschaften (Querkontraktionszahl, Schubmodul und Feststoffdichte) unter dem Reiter „Globals“ definiert werden. Als Werkstoff kommen Stahl und Aluminium, mit einem dünnen Glasgewebe überzogen, zum Einsatz. Bis auf die untere und obere Box bestehen die restlichen Bauteile aus Stahl. In der Tabelle 9 sind die Materialeigenschaften aufgelistet. Die Werte wurden aus der Literatur [31, 32, 33, 34] entnommen.

	Stahl	Aluminium mit Glasgewebe
Querkontraktionszahl ν	0,3	0,34
Schubmodul G	$8 \cdot 10^{10}$ N/m ²	$2,5 \cdot 10^{10}$ N/m ²
Feststoffdichte ρ	7800 kg/m ³	2700 kg/m ³

Tabelle 9: Materialeigenschaften

KANTKORN

Für den Versuch mit Kantkorn musste die Geometrie in EDEM teils modifiziert werden, da beim realen Versuch das Schüttgut während der Verschiebung der oberen Box nach oben wanderte und einen Haufen bildete (Abbildung 64). Hierbei wurde der Vorgang des Abstreifens abgeändert. Dieses erfolgt nämlich nun in x-Richtung. Über der oberen Box wurden zusätzliche Wände hinzugefügt, um ein Aufhäufen des Schüttguts wie im realen Versuch zu ermöglichen (Abbildung 65). Da die Position der zweiten Rutsche in der Bewegungsrichtung der oberen Box lag, musste der Rutsche eine Dynamik vorgegeben werden, die der oberen Box entspricht, um eine Kollision zu vermeiden. Zudem erfolgte die reale Versuchsdurchführung mit der größeren Ausführung der Anlage, d.h. die Geometrien wurden dementsprechend groß dimensioniert. In der Tabelle 10 sind die Bewegungen der Geometrien für den Kantkornversuch aufgelistet. Der zurückgelegte

Weg der oberen Box errechnet sich mit der Gleichung 5.1 zu 100 mm ($v = 0,01$ m/s, $t = 10$ sec).



Abbildung 64: Schütthaufen in der oberen Box

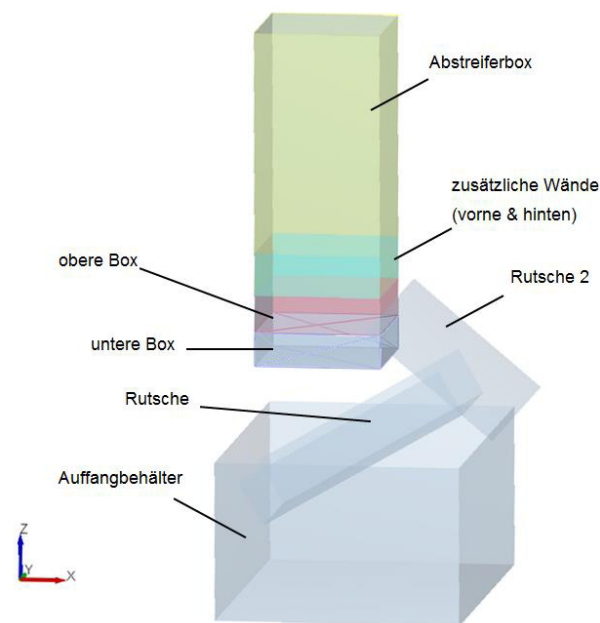


Abbildung 65: EDEM Geometrie der Versuchsanlage (große Ausführung)

	Abstreiferbox	Obere Box / Rutsche 2
Typ	Lineare Bewegung	Lineare Bewegung
Startzeitpunkt	0,45 sec	0,9 sec
Endzeitpunkt	1,25 sec	10,9 sec
Geschwindigkeit	0,5 m/s	0,01 m/s
Beschleunigung	0 m/s ²	0 m/s ²
Bewegungsrichtung	x-Richtung	x-Richtung

Tabelle 10: Dynamik der Geometrien in EDEM (große Ausführung)

5.2 Definition der Partikelform

UREA

Wie schon im Kapitel 2.2.1 *Cluster und Klumpen* erwähnt, kann das Partikelmodell zum Schüttgutpartikel mit der sogenannten „Clustering“ Methode erzeugt werden. Solche Partikelmodelle bestehen aus mehreren Partikel derselben simplen Form, um daraus dem realen Schüttgutpartikel ähnliche Geometrie zu erzeugen. Je genauer die Form der virtuellen Partikel denen der realen entsprechen, desto realitätsnähere Ergebnisse können erzielt werden. Der große Nachteil dieser Methode ist allerdings, der daraus resultierende hohe Rechenaufwand und somit eine deutlich längere Rechenzeit.

Für die Urea Partikeln kann allerdings davon ausgegangen werden, dass diese nahezu sphärisch sind (Abbildung 66). Jedoch sind sie relativ klein. Berücksichtigt man, dass diese Partikelmodelle später für die Analyse von fördertechnischen Anlagen, wie z.B. Schneckenförderern, eingesetzt werden, ist es erforderlich die Partikelgröße zu erhöhen, um die Rechenzeit in Grenzen zu halten, da die Vergrößerung der Partikel eine Verringerung der Partikelzahl zur Folge hat. Dass diese Veränderungen zu einem anderen Verhalten des Gutes führen können liegt auf der Hand. Doch durch passende Veränderungen von Partikelparametern, wie z.B. Roll- und Haftreibungsbeiwerten, wird versucht ein realitätsnahes Verhalten zu erreichen.

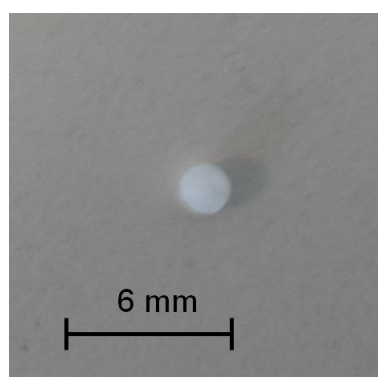


Abbildung 66: reales Ureapartikel

Die Auswahl der Größe der Partikel ist wegen der Dimension der Versuchsanlage eingeschränkt. Der kleinst mögliche Radius wird mit der Rechenzeit für einen einzelnen Lauf an der Versuchsanlage bestimmt. Da zur Bestimmung der optimalen Parameterwerte mehrere Simulationen (bis zu 80) notwendig werden, ist eine

maximale Rechenzeit für einen Lauf mit 30 Minuten vorgegeben. Nach oben hin ist die Partikelgröße aufgrund der Größenverhältnis Bauteil zu Partikel begrenzt. Je größer die Partikel werden, desto mehr weicht es dem realen Verhalten ab, sodass dies mit Parameteränderungen nicht mehr kompensiert werden kann. Für die beiden unterschiedlichen Ausführungen der Anlage ist in der Tabelle 11 ein vorgeschlagener Größenbereich der Partikel angegeben. Dieser wurde mittels Einzelexperimenten bestimmt. In den Experimenten betrug die Feststoffdichte 1500 kg/m^3 , die Querkontraktionszahl 0,3 und das Schubmodul $6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Der maximale Partikelradius sollte nicht überschritten werden, damit das reale Verhalten mit Parameteranpassung erreicht werden kann. Der minimale Partikelradius wurde aufgrund der Vorgabe von 30 Minuten Rechenzeit bestimmt. Da die Rechenzeit von der Feststoffdichte, von der Querkontraktionszahl und vom Schubmodul abhängt, kann für andere Materialparameterwerte der minimale Partikelradius anders sein. Zum Beispiel können mit kleineren Werten für Querkontraktionszahl und Schubmodul, kleinere Partikel, als die in der Tabelle vorgeschlagen, simuliert werden.

	kleine Ausführung	große Ausführung
minimaler Partikelradius	3 mm	5,5 mm
maximaler Partikelradius	5 mm	10 mm

Tabelle 11: Größenbereich der Partikelradien für die beiden Ausführungen

Um einerseits die realen Partikel mit Partikelmodellen, die möglichst der realen Größen entsprechen, zu simulieren und andererseits die Rechenzeiten nicht in die Höhe zu treiben, wurde schlussendlich das Partikelmodell für ein Urea Teilchen aus einer Kugel mit einem Radius von 3 mm dimensioniert. Die realen Teilchen besaßen einen Radius von 1 mm.

KANTKORN

Bei der Bestimmung des Partikelmodells für das Kantkorn wurden drei verschiedene Ausführungen bezüglich ihrer Rechenzeit verglichen. Diese sind in der Abbildung 67 dargestellt. Die ersten beiden sind nach der „Clustering“ Methode modelliert. Ausgehend von einer signifikanten Geometrie des realen Schüttguts wurde einerseits eine möglichst gute und andererseits eine simple Abbildung des Schüttguts erzeugt. Aus dem Vergleich wurde ersichtlich, dass die Rechenzeit bei den zusammengesetzten Partikeln wesentlich mehr als die vorgegebenen 30 Minuten

betrug. Die Vergrößerung dieser Partikelmodelle half wenig. Eine Erniedrigung des Schubmoduls half ebenso wenig, da die im realen beobachtete Verschiebekraft für die obere Box dann nicht mehr annähernd erreicht werden konnte. Somit fiel die Auswahl wieder auf ein einfaches kugeliges Modell. Analog der Begründung für die Größenwahl der Ureapartikel wurde der Partikelradius für das Kantkornmodell mit 7 mm festgelegt. Mit dieser Größe betrug die Rechenzeit weniger als 30 Minuten. Im Vergleich zu den realen Partikeln, die eine Gesamtlänge von bis zu 8 mm besaßen, ist dies eine nahezu Verdoppelung der Größe.

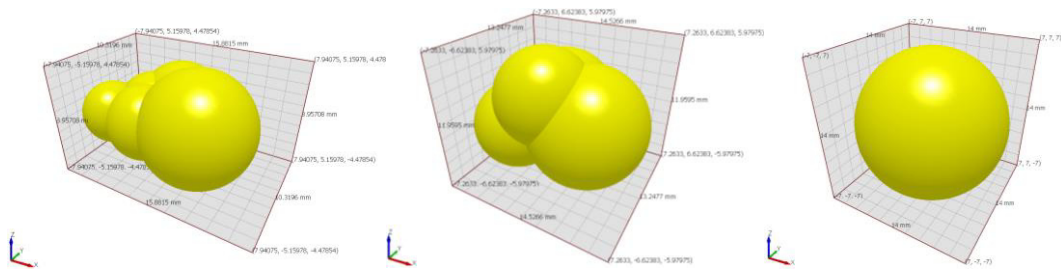


Abbildung 67: Partikelmodelle für das Kantkorn



Abbildung 68: reale Kantkornpartikel

5.3 Definition der Partikeleigenschaften und –generierung

Im nächsten Schritt erfolgt die Zuweisung der Materialeigenschaften für die Partikel. Für die Definition dieser Eigenschaften stehen die gleichen Eingabefelder zur Verfügung, die bereits für die Bestimmung der erzeugten Geometrien genutzt wurden. Die Werte für die Eigenschaften werden vorerst als unbekannt betrachtet. Die Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Werte ist in Kapitel 6 *Parameterkalibrierung / Kalibrierung der Simulation* beschrieben.

Um die Partikel generieren zu können, muss zuerst ein virtueller Bereich festgelegt werden, in welchem dies geschehen soll. Dazu wird wie bei der Erzeugung einer Geometrie vorgegangen, mit dem einzigen Unterschied, dass der Typ dieser Geometrie, welche direkt in EDEM einstellbar ist, nicht „physikalisch“ sondern „virtuell“ ist. Die Dimension dieser Geometrie ist exakt gleich groß, wie die der

Abstreiferbox. Wichtig ist, dass der Generierungsbereich möglich groß ist, damit die Rechenzeit beim Generieren nicht zu lange ausfällt.

Als nächstes wird die gesamte Anzahl oder die gesamte Masse der zu generierenden Partikel angegeben. Zudem muss eine Generierungsrate, die Startzeit und die Anzahl der Versuche pro Partikel, einen freien Ort zu finden, definiert werden. Die letzte Bedingung ist notwendig, da Partikel nur an freien Orten platziert werden können und es nicht garantiert wird, dass beim ersten Versuch ein freier Ort gefunden wird. Ein freier Ort bedeutet, dass keine Überlappungen oder Berührungen mit anderen Partikeln oder Geometrien gegeben sein dürfen. Bei Nichtvorhandensein dieser Einstellung kann es vorkommen, dass die Generierung fehlschlägt. Darüber hinaus wird noch vorgegeben, ob die Partikel einer bestimmten Größenverteilung und Formverteilung unterliegen, ob der Generierungsort (Position) zufällig oder nach einer bestimmten Anordnung erfolgt, ob eine Anfangsgeschwindigkeit oder Anfangsrotation vorliegt und ob die Partikel zufällig oder in eine vorgegebene Richtung orientiert sind. In der Tabelle 12 sind all diese Einstellungen für den Versuch mit Urea und Kantkorn zusammengefasst. Die Generierungsrate ist so einzustellen, dass die Partikel innerhalb einer halben Sekunde generiert werden und in Ruhe kommen. Die Anzahl der Partikel für die Simulationen mit Urea kann folgendermaßen grob bestimmt werden (für die Kantkörner erfolgt dies Analog):

Abmessungen:

$$x_{ges} = 90 \text{ mm} \dots \text{Fülllänge}$$

$$y_{ges} = 90 \text{ mm} \dots \text{Füllbreite}$$

$$z_{ges} = 86 \text{ mm} \dots \text{Füllhöhe}$$

Partikelradius:

$$r = 3 \text{ mm}$$

Füllfaktor (gewählt):

$$\varphi = 0,68$$

Volumen des mit Schüttgut aufzufüllenden Raums:

$$V_R = x_{ges} * y_{ges} * z_{ges} = 90 \text{ mm} * 90 \text{ mm} * 86 \text{ mm} = 696\,600 \text{ mm}^3$$

Partikelvolumen:

$$V_p = \frac{4}{3} * r^3 * \pi = \frac{4}{3} * (3 \text{ mm})^3 * \pi = 113,1 \text{ mm}^3$$

Gesamte Anzahl an Partikel:

$$z_P = \frac{V_R * \varphi}{V_p} = \frac{696\,600 \text{ mm}^3 * 0,68}{113,1 \text{ mm}^3} \approx 4188$$

	Urea	Kantkorn
gesamte Anzahl an Partikel	3500	1350
Generierungsrate (pro Sek.)	50 000	
Startzeit	0	
max. Anzahl an Versuchen zur Platzierung eines Partikels	20	
Partikelform	fix (gleich)	
Größenverteilung	fix (konstant)	
Position	zufällig	
Anfangsgeschwindigkeit	fix ($v = \vec{0}$)	
Orientierung	zufällig	
Anfangsrotation	fix ($\alpha = \vec{0}$)	

Tabelle 12: Einstellungen für die Partikelgenerierung

5.4 Allgemeine Simulationseinstellungen

Zu guter Letzt müssen noch einige allgemeine Simulationseinstellungen vorgenommen werden. Als erstens wird das Kontaktmodell definiert. Für leicht fließendes Schüttgut eignet sich das Hertz-Mindlin Kontaktmodell (siehe Kapitel 2.3 *Kontaktmodelle*), welches auch das Standardmodell in EDEM darstellt. Für kohäsive Schüttgüter kann dieses Modell um eine Kohäsionskraft erweitert werden. In unserem Fall kann von kohäsionslosem Schüttgütern ausgegangen werden. Des Weiteren ist die Wechselwirkung der Schüttgutpartikel miteinander und mit der Geometrie zu definieren. Hierbei sind der Restitutionskoeffizient und die Beiwerte für die statische Reibung und Rollreibung zwischen den einzelnen Materialpaarungen vorzugeben. Doch diese sind vorübergehend noch unbekannt. Die Bestimmung

dieser Werte ist ab Kapitel 6 *Parameterkalibrierung / Kalibrierung der Simulation* beschrieben.

Die Vorgabe für die zur Simulationsberechnung notwendigen Einstellungen erfolgt im „Simulator“. Es muss die gesamte Simulationszeit, das „Target Save Intervall“ die Zellengröße und ein Prozentwert, der das Verhältnis von dem bei der Iteration verwendeten Zeitschritt („Fixed Time Step“) zu der aus den Materialkennwerten errechneten Rayleigh-Zeit (siehe Kapitel 2.1 *Länge eines Zeitschritts*) angibt, eingestellt werden. Das „Target Save Intervall“ definiert das Intervall, in dem die berechneten Daten abgespeichert werden. Die Tabelle 13 zeigt die zu einstellenden Werte.

	Urea	Kantkorn
Simulationszeit	10 s	14 s
„Target Save Intervall“	0,02 s	
Zellengröße	4 * Radius	
Prozentwert	30 %	

Tabelle 13: Allgemeine Simulationseinstellungen

6 Parameterkalibrierung / Kalibrierung der Simulation

Die Wahl der Eingabeparameter ist für den Realitätsgrad der Simulation von immenser Bedeutung. Nicht immer sind die Werte der Parameter für das Kontaktmodell bekannt bzw. durch Laborversuche feststellbar. Zudem können die Werte aus Laborversuche, wie z.B. aus Scherzellenversuchen, nicht direkt für das Simulationsmodell verwendet werden, da man in der Simulation üblicherweise größere Partikel mit einfacherer Form verwendet, als das reale Schüttgutpartikel, damit die Rechenzeit verkürzt wird, um in absehbarer Zeit zu Ergebnisse zu gelangen.

Mit der Versuchsanlage soll ermöglicht werden, die unbekannt Parameter des Simulationsmodells zu kalibrieren. Doch die Frage ist: Wie bestimmt man diese Parameterwerte effizient? Die Antwort dazu wird in den folgenden Seiten beschrieben.

6.1 Parameterliste

Mit der folgenden Abbildung sind die Eingabeparameter für das Simulationsmodell in EDEM zusammengefasst:

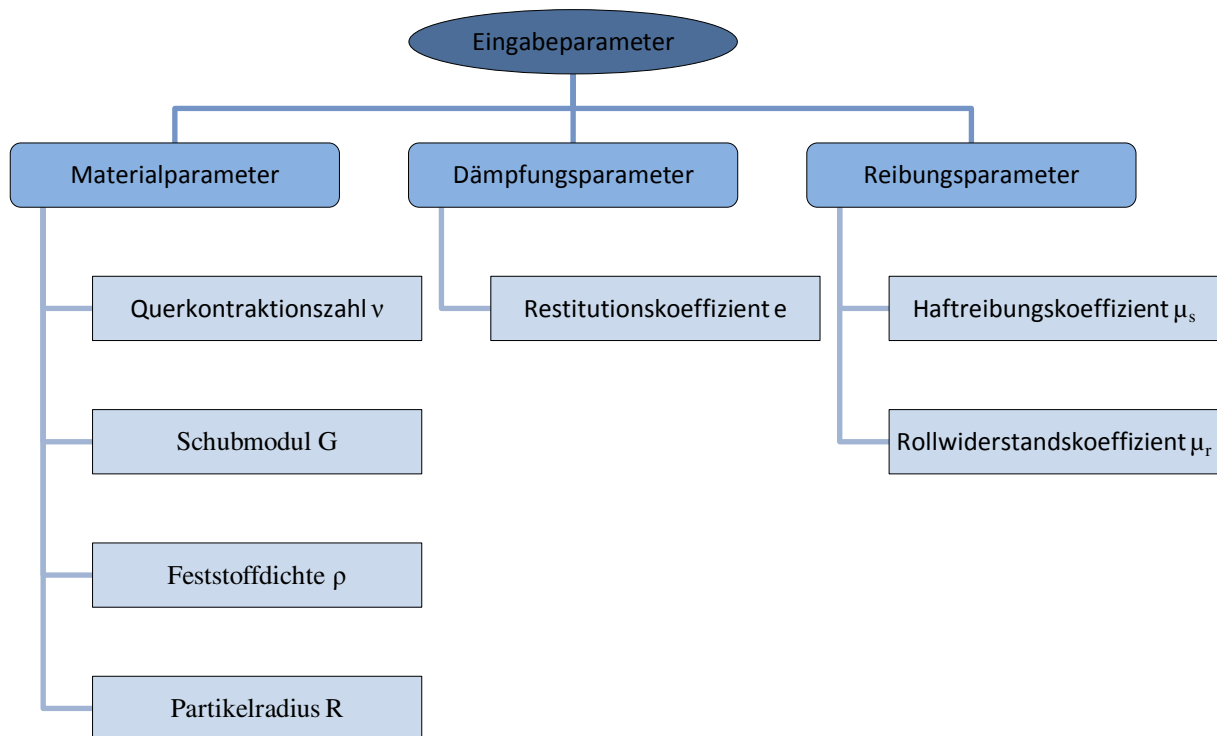


Abbildung 69: Eingabeparameter

Die Eingabeparameter werden in drei Gruppen eingeteilt:

1. Materialparameter
2. Dämpfungsparameter
3. Reibungsparameter

Die Materialparameter sind im Bereich der Schüttgüter am ehesten bekannt bzw. leicht zu ermitteln. Der Dämpfungsparameter und die Reibungsparameter werden als Wechselwirkungsparameter zusammengefasst. Diese beziehen sich ausschließlich auf die Kontaktstelle zwischen einem Partikel zum Anderem bzw. zur Geometrie. Für die Bestimmung dieser Parameter muss hingegen ein größerer Aufwand aufgebracht werden, da in der Literatur keine Erkenntnisse vorliegen. Eine effektive Methode für die Ermittlung der Dämpfungs- und Reibparameter ist die Durchführung einer sogenannten Versuchsplanung (siehe Kapitel 6.2 *Statistische Versuchsplanung / Design of Experiments (DOE)*). Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, welche Auswirkungen eine kleine Veränderung der Parameterwerte auf das Ergebnis hat. Bei der Sensitivitätsanalyse geht man aus einem Simulationsmodell mit willkürlich gewählten Parametern aus und führt Versuche mit jeweils einem geänderten Parameter durch, d.h. die restlichen Parameterwerte entsprechen den Ausgangswerten. Im Nachfolgendem sind die Parameter für das Ausgangsmodell aufgelistet und die jeweiligen Veränderungen. Statt den Aluminiumboxen mit Glasgewebe wurde aus Gründen der schnelleren Analyse Stahl als Werkstoff genommen. Die Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse für die einzelnen Simulationen. Wie zu sehen ist, haben die Querkontraktionszahl, der Schubmodul und der Restitutionskoeffizient einen relativ kleinen bzw. keinen Einfluss auf den Schüttwinkel. Die Reibwerte sind die signifikanteren Größen für den Schüttwinkel. Allerdings hat der Abstand der Schüttspitze von der Aufprallwand eine Abhängigkeit vom Restitutionskoeffizient zwischen Partikel und Stahl. Die Schiebekraft ist größtenteils vom Schubmodul des Partikels, Querkontraktionszahl des Stahls und von den Wechselwirkungen zwischen Partikel und Partikel abhängig. Doch die Querkontraktionszahlen und Schubmodule können direkt aus der Literatur übernommen werden. Daraus ergibt sich, dass die Wechselwirkungsparameter im Versuchsplan als Faktoren (siehe Kapitel 6.2.1 *Terminologie*) betrachtet werden.

Ausgangswerte:

Querkontraktionszahlen:

$$\nu_{Pa} = 0,3 ; \nu_{St} = 0,3$$

Schubmodulen:

$$G_{Pa} = 6 * 10^6 \text{ N/m}^2 ; G_{St} = 7 * 10^{10} \text{ N/m}^2$$

Feststoffdichten (wird konstant gehalten):

$$\rho_{Pa} = 1350 \text{ kg/m}^3 ; \rho_{St} = 7800 \text{ kg/m}^3$$

Restitutionskoeffizienten:

$$e_{Pa-Pa} = 0,5 ; e_{Pa-St} = 0,2$$

Haftreibungskoeffizienten:

$$\mu_{st_{Pa-Pa}} = 0,3 ; \mu_{st_{Pa-St}} = 0,3$$

Rollwiderstandskoeffizienten:

$$\mu_{R_{Pa-Pa}} = 0,2 ; \mu_{R_{Pa-St}} = 0,01$$

Veränderungen:

$$\nu_{Pa} = 0,4 ; \nu_{St} = 0,4 ; G_{Pa} = 7 * 10^6 \text{ N/m}^2 ; G_{St} = 8 * 10^{10} \text{ N/m}^2 ;$$

$$e_{Pa-Pa} = 0,4 ; e_{Pa-St} = 0,3 ; \mu_{st_{Pa-Pa}} = 0,4 ; \mu_{st_{Pa-St}} = 0,4 ;$$

$$\mu_{R_{Pa-Pa}} = 0,1 ; \mu_{R_{Pa-St}} = 0,1$$

	Winkel oben	Winkel unten	Auftreffpunkt	Schiebekraft
Ausgangsmodell	40°	26°	82 mm	-2,2 N
$\nu_{Pa} = 0,4$	40°	25°	80,7 mm	-2,22 N
$\nu_{St} = 0,4$	39°	24°	83,5 mm	-2,08 N
$G_{Pa} = 7 * 10^6 \text{ N/m}^2$	39°	25°	83 mm	-2,05 N
$G_{St} = 8 * 10^{10} \text{ N/m}^2$	39°	25°	81,5 mm	-2,25 N
$e_{Pa-Pa} = 0,4$	40°	26°	82 mm	-2,03 N
$e_{Pa-St} = 0,3$	41°	28°	81,7 mm	-2,19 N
$\mu_{St-Pa-Pa} = 0,4$	44°	30°	81,4 mm	-2,3 N
$\mu_{St-Pa-St} = 0,4$	36°	22°	82 mm	-2,2 N
$\mu_{R-Pa-Pa} = 0,1$	45°	28°	81,1 mm	-2,3 N
$\mu_{R-Pa-St} = 0,1$	41,5°	27,5°	81 mm	-2,25 N

Tabelle 14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

6.1.1 Querkontraktionszahl ν und Schubmodul G

Die Werte für die Querkontraktionszahl ν und den Schubmodul G können, wie schon erwähnt, aus der Literatur [31, 32, 35] direkt übernommen werden. Lediglich der Schubmodul wird um einen Faktor bis zu 1000 kleiner gewählt, damit die Rechenzeit geringer ausfällt. Zu beachten ist, dass dies nur für kleine Schüttgütern zulässig ist. Für das Kantkorn zum Beispiel, ist die Verringerung des Schubmoduls, wie schon zuvor erwähnt, nicht sinnvoll, da die Verschiebekraft für die obere Box nicht mehr erreicht wird, auch wenn die anderen Parameterwerte extrem eingestellt werden. Der Grund dafür liegt darin, dass die Schüttgutpartikel in der Scherebene gegeneinander gedrückt und somit zur Kompression gebracht werden. Um die Kompressionskraft in der Simulation widerzuspiegeln, darf der Schubmodul nicht verändert werden. Feinere Partikel, wie das Urea, können sich leichter aus der Scherebene verschieben und somit von der großen Kompression geschont werden. In der Tabelle 15 sind die gewählten Werte für die Querkontraktionszahl und den Schubmodul für Urea und Kantkorn aufgelistet.

	Urea	Kantkorn
Querkontraktionszahl ν	0,3	0,3
Schubmodul G	$8 * 10^6 \text{ N/m}^2$	$5 * 10^9 \text{ N/m}^2$

Tabelle 15: Querkontraktionszahl und Schubmodul der Schüttgüter

6.1.2 Partikelradius R

Der Partikelradius kann frei gewählt werden. Jedoch müssen die Grenzen für die verschiedenen Ausführungen der Versuchsanlage berücksichtigt werden (Tabelle 11), um eine angenehme Rechenzeit zu erlangen und das makroskopische Verhalten des Gutes erhalten bleibt. Eine ausführliche Beschreibung zu diesem Punkt ist im Kapitel 5.2 *Definition der Partikelform* gegeben.

6.1.3 Feststoffdichte ρ

Die Feststoffdichte ρ kann nicht direkt aus der Literatur übernommen werden, da meist die Form und Größe des Partikelmodells nicht mit dem realen Schüttgut übereinstimmt. Doch die Ermittlung dieses Wertes ist sehr einfach und erfolgt ähnlich wie beim Prinzip von Coetzee und Els [37]. Als Erstes wird die zugehörige untere Box mit dem betrachteten Schüttgut aufgefüllt. Bei Urea ist es die kleinere und bei Kantkorn die größere Ausführung. Anschließend werden die Massen der unteren Box samt Schüttgut und später die Masse der leeren unteren Box gemessen. Die Messung wird fünf Mal wiederholt, um danach einen statistischen Mittelwert für die Gesamtmasse und die Masse der leeren Box zu errechnen. Die Gesamtmasse reduziert um die Masse der leeren Box ergibt schließlich die Masse des Schüttguts. Sind die Materialparameter bis auf die Feststoffdichte in der Simulation festgelegt, können Versuche im äquivalenten Simulationsmodell durchgeführt werden, um die gleiche Masse des Schüttguts in der unteren Box zu erhalten. Dazu wird ein Volumen für die untere Box definiert, um nur die Masse der Partikel in diesem Volumen zu messen. Ausgehend von einem beliebigen Startwert für die Feststoffdichte wird in den darauf folgenden Simulationen die Feststoffdichte iterativ verändert. Die neue Feststoffdichte wird ermittelt, indem die aktuelle Feststoffdichte mit dem Verhältnis gemessene reale Masse zu gemessene Masse in der Simulation multipliziert wird. In der Regel reichen drei bis vier Iterationen aus, um die Partikelmasse in der Simulation grammgenau wie die reale Schüttgutmasse zu erhalten. Als Beispiel wird die Vorgangsweise für Urea beschrieben:

	1.Messung	2.Messung	3.Messung	4.Messung
Masse Urea + untere Box	0,745 kg	0,744 kg	0,747 kg	0,747 kg
Masse untere Box	0,559 kg	0,559 kg	0,559 kg	0,559 kg

Tabelle 16: Gewichtsmessungen

Gemessene Gesamtmasse (Urea + kleine untere Box; statistischer Mittelwert):

$$m_{GUrea} \approx 0,746 \text{ kg}$$

Gemessene Masse der leeren Box (kleine untere Box, statistischer Mittelwert):r

$$m_{LUrea} = 0,559 \text{ kg}$$

Masse der Ureapartikel:

$$m_{Urea} = m_{GUrea} - m_{LUrea} = 0,746 \text{ kg} - 0,559 \text{ kg} = 0,187 \text{ kg}$$

Startwert für die Feststoffdichte:

$$\rho_{0Sim} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

Aus der Simulation gemessene Masse:

$$m_{0Sim} = 0,275 \text{ kg}$$

Neue Feststoffdichte:

$$\rho_{(n+1)Sim} = \rho_{(n)Sim} * \frac{m_{Urea}}{m_{(n)Sim}} \quad n = 0, \dots$$

$$\rho_{1Sim} = \rho_{0Sim} * \frac{m_{Urea}}{m_{0Sim}} = 2000 \text{ kg/m}^3 * \frac{0,187 \text{ kg}}{0,291 \text{ kg}} = 1360 \text{ kg/m}^3$$

$$\rightarrow m_{1Sim} = 0,184 \text{ kg} \rightarrow \rho_{2Sim} = 1382 \text{ kg/m}^3 \rightarrow m_{2Sim} = 0,187 \text{ kg}$$

Somit ist die Feststoffdichte für Urea in der Simulation mit

$$\rho_{2Sim} = \rho_{UreaSim} = 1382 \text{ kg/m}^3$$

gegeben. Analoges gilt für die Kantkörner. Dabei wurde statt der kleinen die große untere Box verwendet. Die Masse der Kantkörner in der Box betrug im Durchschnitt:

$$m_{Kantkorn} = 0,24 \text{ kg}$$

Schlussendlich ergab sich für die Feststoffdichte des Kantkorns in der Simulation:

$$\rho_{KantkornSim} = 2600 \text{ kg/m}^3$$

6.1.4 Restitutionskoeffizient e

Dieser bzw. diese Parameter werden, wie schon erwähnt, als unbekannte Faktoren in den Versuchsplan übernommen. Für jeden möglichen Materialkontakt des Schüttgutpartikels wird ein Restitutionskoeffizient vorgegeben. Das Schüttgutpartikel kann mit einem anderen Partikel sowie mit der Umgebung in Kontakt kommen. Somit ergeben sich drei verschiedene Restitutionskoeffizienten, da die Umgebung aus Stahl bzw. Aluminium besteht. Doch je größer die Anzahl der unbekannt Parameter ist, desto mehr Simulationen müssten für den Versuchsplan durchgeführt werden. Deswegen wurde versucht, die Restitutionskoeffizienten für den Partikel-Stahl und Partikel-Aluminium Kontakt anhand von Fallversuchen (Abbildung 70) zu bestimmen. Allerdings war die Voraussetzung dafür, dass die Schüttgutpartikel kugelig sind und eine Mindestgröße besitzen. Lediglich die Ureapartikel erfüllten diese Voraussetzungen. Mit diesen wurden Fallversuche durchgeführt. Die Höhe h aus der die Partikel fallengelassen wurden betrug 25,5 mm. Eine Kamera diente der Ermittlung der Rückprallhöhe.

$$e = \frac{v_1' - v_2'}{v_2 - v_1} = -\frac{v_2'}{v_2} \approx \frac{\sqrt{2 * g * h'}}{\sqrt{2 * g * h}} = \sqrt{\frac{h'}{h}}$$

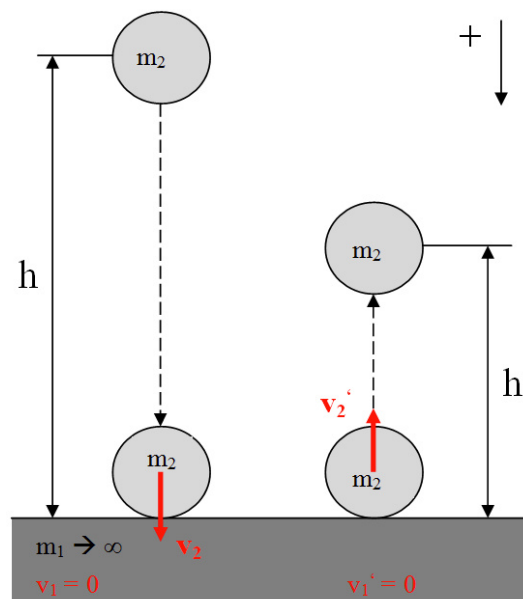


Abbildung 70: Fallversuch

Es wurden nur jene Versuche bewertet, in denen das Partikel senkrecht nach oben rückgeprallt ist. Zudem wurden in den einzelnen Versuchen immer andere Partikel verwendet. Die Restitutionskoeffizienten zwischen Ureapartikel und Stahl bzw. Ureapartikel und Aluminium ergaben sich durch Mittelwertbildung zu

$$e_{Pa-St} = 0,27$$

$$e_{Pa-Alu} = 0,2$$

Die Parameter für das Kantkornmodell waren messtechnisch nicht zu ermitteln und mussten als unbekannte Faktoren in den Versuchsplan eingebunden werden.

6.1.5 Haftreibungs- und Rollwiderstandskoeffizient

Analog dem Restitutionskoeffizienten mussten die Haftreibungs- und Rollwiderstandskoeffizienten für jede Materialpaarung vorgegeben werden. Insgesamt sind das sechs Werte, die in den Versuchsplan als unbekannte Faktoren übernommen werden, da sie messtechnisch nicht einfach zu ermitteln sind.

6.1.6 Zusammenfassung der Eingabeparameter

In der Tabelle 17 sind die Eingabeparameter nochmals übersichtlich aufgelistet.

Geometrie / Umgebung			
	Stahl	Aluminium mit Glasgewebe	
Querkontraktionszahl ν	0,3	0,34	
Schubmodul G	$8 \cdot 10^{10}$ N/m ²	$2,5 \cdot 10^{10}$ N/m ²	
Feststoffdichte ρ	7800 kg/m ³	2700 kg/m ³	
Partikel			
	Urea	Kantkorn	
Querkontraktionszahl ν	0,3	0,3	
Schubmodul G	$8 \cdot 10^6$ N/m ²	$5 \cdot 10^9$ N/m ²	
Feststoffdichte ρ	1382 kg/m ³	2600 kg/m ³	
Wechselwirkungen Urea			
	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	???	0,27	0,2
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	???	???	???
Rollwiderstandskoeff. μ_R	???	???	???
Wechselwirkungen Kantkorn			
	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	???	???	???
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	???	???	???
Rollwiderstandskoeff. μ_R	???	???	???

Tabelle 17: Eingabeparameter im Überblick

Im nächsten Abschnitt wird die statistische Versuchsplanung genauer erläutert und die Durchführung von Simulationen mit Hilfe einer auf Versuchspläne spezialisierten Software erklärt.

6.2 Statistische Versuchsplanung / Design of Experiments (DOE)

Für neue Erkenntnisse über ein Produkt oder einen Prozess sind Experimente ein wichtiges Werkzeug in fast jeder Wissenschaft. In der Statistischen Versuchsplanung wird mit statistischen Methoden eine Serie von Einzelexperimenten aufgestellt, die den Versuchsraum optimal erfassen und eine effiziente Analyse der Versuchsergebnisse ermöglichen. Das Ziel ist es, einzelne Versuche so zu planen und durchzuführen, dass aus möglichst wenigen Versuchen möglichst sehr viel Information über das System und seine Zusammenhänge gewonnen werden kann.

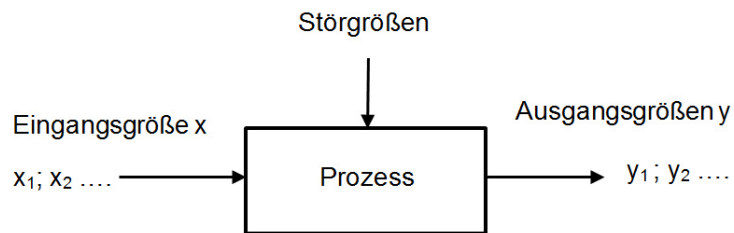


Abbildung 71: Prozessmodell

In Abbildung 71 ist ein allgemeines Prozessmodell dargestellt. Hierbei werden gewisse Eingangsgrößen durch ein System oder einen Prozess in einen Output verwandelt. Der Output charakterisiert das System und kann mit Hilfe von messbaren Ausgangsgrößen y bestimmt werden. Dieser ist abhängig von kontrollierbaren Eingangsgrößen x und nicht kontrollierbaren oder unbekanntem Störgrößen. Es wird angenommen, dass mit der folgenden mathematischen Funktion die Zielgröße beschrieben werden kann.

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (6.1)$$

$f(x)$ gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen den Ausgangsgrößen y und den kontrollierbaren Eingangsgrößen x an und wird auch als Modell bezeichnet. ε bezeichnet den Störterm, der unter anderem durch die nicht kontrollierbaren Eingangsgrößen entsteht. Ziel ist es, den funktionalen Zusammenhang f möglichst gut zu bestimmen.

Die Vorgehensweise lautet wie folgt: Es werden Experimente mit festgesetzten x -Werten durchgeführt und deren y -Werte gemessen. Anschließend wird das Modell $f(x)$ möglichst gut an die Daten-Paare (x,y) angepasst. Die entscheidende Frage in der Versuchsplanung ist: Welche x -Werte werden für die Einzelexperimente genommen? Im einfachsten Fall, wenn das System oder Prozess aus zwei Eingangsgrößen x_1 und x_2 besteht, die jeweils in einem Intervall variieren können, so ist der mögliche Versuchsraum ein Rechteck in der Ebene (Abbildung 72). Jeder Punkt innerhalb des Rechtecks stellt ein Experiment dar. Somit gibt es unendlich viele Experimente. Doch in der statistischen Versuchsplanung werden statistische Methoden verwendet, um genau diese Frage zu beantworten [37]. Die Festlegung der x -Werte und die Anzahl der Experimente werden im Kapitel 6.2.3 *Versuchspläne für Optimierungen* erklärt.

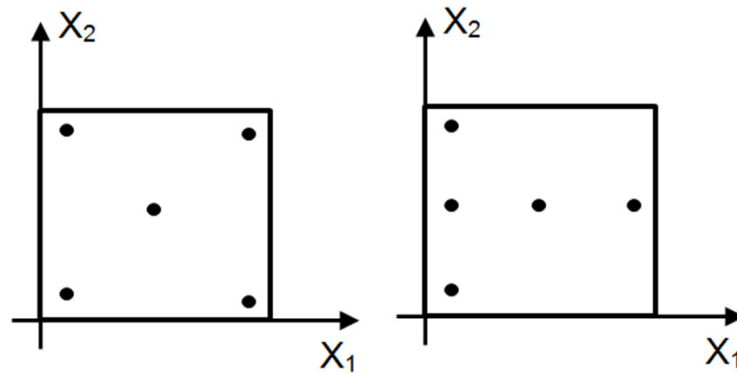


Abbildung 72: Zwei mögliche Versuchspläne für zwei Faktoren mit fünf Experimenten

6.2.1 Terminologie

Im Folgenden werden einige Begriffe erklärt, die im Zusammenhang mit der Versuchsplanung vorkommen. Wie bereits beschrieben, besteht ein Gesamtexperiment aus der Durchführung mehrerer Einzelexperimente (Runs). Die Einzelexperimente unterscheiden sich untereinander in den Eingangsgrößen x . Die Eingangsgrößen können unabhängig voneinander innerhalb eines zulässigen Bereichs variiert werden und heißen Faktoren. Die Werte dieser Eingangsgrößen werden als Stufen bezeichnet. Wenn jeder Faktor unabhängig voneinander variiert werden kann, ist der Versuchsraum für ein Modell mit N Faktoren ein N -dimensionaler Quader. Die Variablen am Ausgang heißen Zielgrößen. Als Effekt wird der Einfluss eines Faktors auf eine Zielgröße bezeichnet. Wie schon erwähnt, wird die Funktion f , die den Zusammenhang zwischen den Faktoren und Zielgrößen beschreibt, als Modell bezeichnet. Alle Einflüsse, die das Modell nicht erfassen kann, bilden den Rausch- oder Störterm. Für einen realisierten Einzelversuch heißt die Differenz zwischen dem vom Modell vorausgesagten Wert und dem tatsächlichen Messwert das Residuum [37].

6.2.2 Modelle

Der Zusammenhang zwischen den Zielgrößen und den Faktoren ist durch die Funktion 6.1 gegeben. Es ist vernünftig, dass die Funktion f in eine Taylor-Reihe entwickelbar ist, um über einen beschränkten Versuchsraum die Funktion f quadratisch approximieren zu können. Wenn wir zwei Faktoren betrachten, führt dies zu

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon$$

Bestimmt werden sollen die Koeffizienten β_i . Die Vorteile dieses Modells liegen darin, dass ein Minimum oder Maximum der Zielgröße bestimmt werden kann. Zudem enthält dieses Modell Haupteffekte (Wirkung der Parameter alleine auf die Zielgröße) und Wechselwirkungsterme (Wirkung von Parameterkombinationen auf die Zielgröße). Sie ist somit vielseitig einsetzbar und das am meisten verwendete Modell für Optimierungszwecke.

Durch Streichung der quadratischen Effekte erhält man das lineare Modell mit Wechselwirkungen

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon$$

Streicht man aus diesem Modell die Wechselwirkungen erhält man das einfachste Modell, ein lineares Modell

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \varepsilon$$

Dieser enthält nur noch die Haupteffekte. Die letzten beiden Modelle dienen lediglich zur Unterscheidung zwischen wichtigen und unwichtigen Einflussgrößen (Screening). Sie geben die wahre Natur des Prozesses im Allgemeinen unzureichend wieder aber für die Trennung der Faktoren nach Relevanz sind sie ausreichend. Durch ihre Einfachheit erlauben sie, mit vielen Faktoren gleichzeitig zu arbeiten [37]. Für die Bestimmung der einflussreichsten Faktoren wurde in dieser Arbeit allerdings eine andere Methode (Sensitivitätsanalyse) angewendet. Diese ist im Kapitel 6.1 *Parameterliste* erklärt. Alle drei oben genannten Modelle lassen sich natürlich auf beliebig viele Faktoren verallgemeinern.

Im Folgenden werden kurz die Schritte, die für eine erfolgreiche Durchführung eines statistisch geplanten Versuchs erforderlich sind, betrachtet [37]:

1. *Problembeschreibung und Versuchsziel:*

Ein offensichtlicher Punkt, erweist sich jedoch schwierig in der Praxis. Es muss bewusst sein, welches Problem angegangen wird und wie ein spezifisches, messbares und realistisches Versuchsziel formuliert werden kann. Beispiele für ein Versuchsziel sind das Verständnis von Wirkungszusammenhängen, das Feststellen der Faktoren mit größter Wirkung auf eine oder mehrere Zielgrößen oder die Optimierung von Faktoreinstellungen.

2. Auswahl der Zielgrößen:

Die Zielgrößen sollen das Versuchsziel messbar repräsentieren. Falls das Ergebnis qualitativ ist (gut / schlecht), müssen Stufen definiert (z.B. von sehr gut bis sehr schlecht) und die Ergebnisse zugeordnet werden. Je mehr Zielgrößen betrachtet werden, desto eindeutiger können Aussagen über das System getroffen werden. Die Zielgrößen sind mit einer Messgenauigkeit behaftet. Ist die Genauigkeit unzureichend werden nur große Effekte erkannt. Durch Wiederholungen der Einzelexperimente oder Erhöhung der Anzahl der Einzelexperimente wird dieses Problem reduziert.

3. Auswahl der Faktoren:

Man erstellt eine Liste aller möglichen Eingangsgrößen und teilt sie in drei Gruppen auf:

- *Störgrößen*, die man nicht beeinflussen kann
- *Variablen*, die nicht ins Experiment aufgenommen werden (bleiben konstant für alle Einzelexperimente)
- *Faktoren*, die im Experiment variiert werden sollen

Die nicht relevanten Eingangsgrößen können als Variablen aufgefasst werden. Die Bestimmung der relevanten Größen erfolgt mit Screening-Methode oder Sensitivitätsanalyse. Werden wichtige Faktoren im Versuch nicht berücksichtigt, so lässt sich die beobachtete Streuung im Versuch nicht ausreichend erklären.

4. Festlegung der Faktorstufen:

Nach Festlegung der Faktoren muss bestimmt werden in welchem Bereich die einzelnen Faktoren variiert werden. Dabei ist zu beachten, dass nicht realisierbare Faktorstufenkombinationen auszuschließen sind. Mit Hilfe von einzelnen Vorversuchen kann die untere und obere Grenze der Faktoren grob bestimmt werden. Sie sollten möglichst extrem gewählt werden, so dass die gewünschten Werte der Zielgrößen abgedeckt werden. Jedoch nicht zu extrem, um eine korrekte Beschreibung des Wirkungszusammenhanges zwischen Faktor und Zielgröße zu gewährleisten.

5. Erstellung des Versuchsplans:

In Abhängigkeit des Versuchsziels, der Anzahl der Faktoren und des Designtyps (siehe Kapitel 6.2.3 *Versuchspläne für Optimierungen*) wird ein

statistischer Versuchsplan erstellt. Die Einzelversuche können randomisiert werden, um unbekannte aber systematische Fehler zu vermeiden.

6. Durchführung des Versuchs:

Die Einzelexperimente werden nach dem Versuchsplan durchgeführt. Aufgrund der niedrigen Zahl der Experimente ist die Messung der Zielgröße besonders sorgfältig durchzuführen.

7. Analyse der Daten:

Mit Hilfe einer statistischen Software wird der Versuchsplan samt den Ergebnissen analysiert und validiert. Dabei können wichtige Faktoren identifiziert oder Vorhersagen getroffen werden.

6.2.3 Versuchspläne für Optimierungen

Wie schon erwähnt sollen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung effizient die unbekannt Parameterwerte optimiert werden. Für die Optimierung bzw. für die vollständige Beschreibung des Prozesses muss das Modell mindestens quadratischer Ordnung sein. Das nachfolgende Modell gilt für drei Faktoren, ist aber leicht auf mehr Faktoren verallgemeinbar:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \varepsilon$$

Der Graph dieser Funktion wird als Wirkungsfläche (Response Surface) bezeichnet. Ziel ist es, aus den Versuchsergebnissen die β_i Parameter zu schätzen und damit die Wirkungsfläche zu beschreiben. Diese lässt sich sowohl graphisch als auch analytisch untersuchen. Daraus können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden [37]:

- *Verständnis:*

Das Verhalten der Zielgrößen in Abhängigkeit der Faktoren können qualitativ und quantitativ untersucht werden.

- *Optimierung:*

Mit Hilfe des Modells können eine oder mehrere Zielgrößen optimiert werden. Die Zielgrößen können entweder auf ein Maximum, Minimum oder einen bestimmten Zielwert, gleichzeitig und untereinander gewichtet, optimiert werden.

- *Spezifikation:*
Es ist auch möglich, einen Bereich, in dem die Faktoren schwanken dürfen, zu definieren, ohne dass die Anforderungen auf die Zielgrößen verletzt werden.
- *Robustheit:*
Mit der Robustheitsstudie wird untersucht, welche Auswirkung kleinere Schwankungen aufgrund von Störgrößen auf die Zielgrößen haben. Ziel ist es, diese Auswirkungen klein zu halten. Gesucht werden also flache Bereiche auf der Wirkungsfläche.

Central Composite Design (CCD)	Central Composite Face-Centered (CCF)
Central Composite Circumscribed (CCC)	Central Composite Inscribed (CCI)
Box-Behnken Design	Mixture Design

Tabelle 18: Einige Versuchspläne für Optimierungsmodelle

In der Tabelle 18 sind einige Designs aufgelistet, die zur Anpassung von quadratischen Optimierungsmodellen zum Einsatz kommen. Für die Anpassung solcher quadratischen Funktionen werden mindestens drei Faktorstufen benötigt (Abbildung 73). Mit zwei Faktorstufen wird nur eine lineare Funktion erzielt, welches wie schon erwähnt nicht gut für Optimierungszwecke geeignet ist. Wichtig ist, dass in unserem Fall die Faktoren unabhängig voneinander eingestellt werden können. Falls eine Abhängigkeit herrscht ist ein Mixture-Design [38] zu wählen.



Abbildung 73: li. lineare Funktion (low, high); re. quadratische Funktion

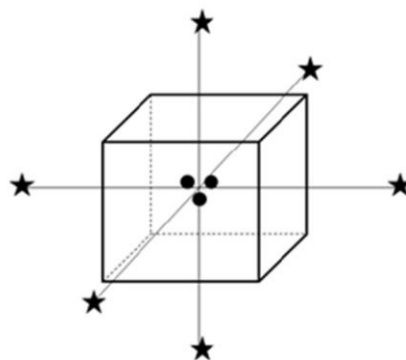


Abbildung 74: Central Composite Design [37]

Das am meisten verwendete Design ist der zentral zusammengesetzte Versuchsplan (Central Composite Design, CCD). In der Abbildung 74 ist dieses Design (Versuchsraum) für drei Faktoren dargestellt.

Ein CCD besteht aus drei Teilen. Bei n Faktoren ist ein vollfaktorieller 2^n -Plan [37] ein Teil eines CCD. Hinzu kommen sogenannte Axialpunkte (Sterne in der Abbildung) mit den Koordinaten

$$(\pm a, 0, \dots, 0), (0, \pm a, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, \pm a)$$

a bezeichnet die Abstände der Axialpunkte vom Zentrum. Pro Faktor werden zwei Axialpunkte benötigt ($\pm a$). Je nach Größe von a werden unterschiedliche Varianten des Versuchsplans abgebildet. Den dritten Teil des CCD bilden die Mittelpunktversuche. In der Abbildung sind drei Mittelpunktversuche dargestellt. Mittelpunktversuche sind notwendig um einen möglichen nicht-linearen Zusammenhang zwischen Faktoren und Zielgrößen festzustellen. Werden diese Versuche nicht durchgeführt, wird ein linearer Zusammenhang angenommen auch wenn ein nicht-linearer Zusammenhang herrscht. Dadurch werden die Ergebnisse aus dem Versuchsplan unbrauchbar. Der Zweck des CCD ist die Erreichung eines annähernd kugelförmigen Versuchsraums.

Ist der Abstand $a = 1$ gewählt, nennt man diese Variante CCF (Central Composite Face-Centered). Die Axialpunkte liegen hierbei auf den Seitenflächen des Versuchsraums. Die Besonderheit darin ist, dass die Werte der Faktoren innerhalb des festgelegten Bereichs bzw. Versuchsraums liegen, da es in manchen Fällen aus technischen Gründen nicht möglich ist, größere Werte zu realisieren. Allerdings ist CCF nicht sehr präzise zum Schätzen reiner quadratischer Effekte [13].

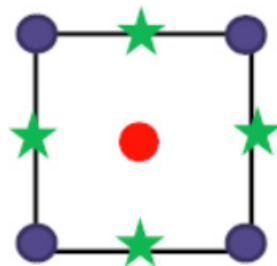


Abbildung 75: Central Composite Face-Centered (zwei Faktoren) [39]

Wird andererseits der Abstand a mit der folgenden Gleichung gewählt

$$a^2 = \frac{1}{2} \sqrt{2^n * N} - 2^{n-1}$$

$$N = 2^n + 2n + n_0$$

mit N als Gesamtzahl der Versuche, n_0 die Zahl der Mittelpunktversuche und n die Zahl der Faktoren, so ist der CCD orthogonal. Solche Versuchspläne nennt man CCC (Central Composite Circumscribed, Abbildung 76).

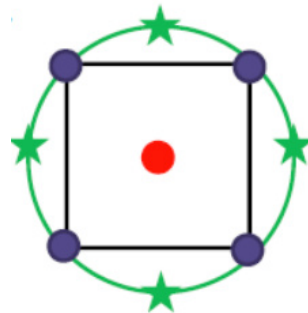


Abbildung 76: Central Composite Circumscribed (zwei Faktoren) [39]

Orthogonalität bedeutet, dass die Modellparameter unabhängig voneinander geschätzt werden können (jeder Faktor kann Werte annehmen, ohne die Werteeinstellungen der anderen Faktoren zu verändern) und man erhält die kleinst möglichen Konfidenzintervalle für die Schätzer [40] (Varianz der vorhergesagten Werte). D.h. diese Variante weist eine hohe Präzision auf. Allerdings bekommt man dabei Axialpunkte außerhalb des festgelegten Bereichs, was in unserem Fall unerwünscht ist [37].

Ein um a herunterskaliertes CCC wird CCI (Central Composite Inscribed) bezeichnet. Dies findet Anwendung, falls der festgelegte Bereich die Grenzen sind. Die Axialpunkte liegen nur noch an den Grenzen und die restlichen Versuchspunkte innerhalb des Bereichs, sodass der untersuchte Raum verkleinert wird. Dadurch weist diese Variante eine nicht so hohe Qualität wie das CCC [41].

Ein Versuchsplan wird als rotierbar bezeichnet, wenn die Konfidenzintervalle für die Zielgröße y an einem beliebigen Punkt x , die man vorhersagen möchte, nicht von der Richtung wo sich der Punkt zum Mittelpunkt befindet, sondern nur vom Abstand von x zum Mittelpunkt abhängt. Dies ist erfüllt wenn

$$a^2 = \sqrt{2^n}$$

ist [37].

G. E. P. Box und D. W. Behnken entwickelten 1960 spezielle Pläne (Box-Behnken-Versuchspläne), die von vollfaktoriellen 3^n -Plänen durch die Reduktion abgeleitet sind. Die Anzahl der Stufen für jeden Faktor bleibt bei drei. Jedoch fallen einige Versuchspunkte weg. Diese Punkte werden über die Überbestimmtheit des Regressionspolynoms kompensiert. Die Besonderheit dieser Versuchspläne ist, dass sie eine Orthogonalität aufweisen und rotierbar sind. Für drei Faktoren ist in der Abbildung 77 das zugehörige Design dargestellt. Man sieht, dass die Eckpunkte des Würfels und die Flächenmittelpunkte keinen Versuchspunkt enthalten. Um die Orthogonalität zu gewährleisten sind zwei Wiederholungen des Zentralpunktes notwendig. Somit beläuft sich die Anzahl der Versuchsreihen auf 15. Der Vorteil von Box-Behnken-Versuchsplänen gegenüber CCD und anderen Plänen, z.B. den vollfaktoriellen Plänen, liegt an der geringen Versuchs- und Auswertearbeit. Bei fünf Faktoren nämlich, benötigt ein vollfaktorieller Versuchsplan 243 Versuche (3^5) und das Box-Behnken-Versuchsplan lediglich 46 Versuche. Der Nachteil der Box-Behnken-Versuchsplänen ist, dass es Regionen gibt die mit weniger Präzision vorhergesagt werden. [42]. Für diese Arbeit wurden ausschließlich Box-Behnken Versuchspläne aufgrund ihrer Vorteile hinsichtlich Schnelligkeit gewählt.

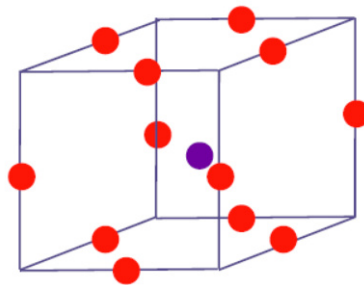


Abbildung 77: Box-Behnken Versuchsplan [39]

Zahl der Faktoren	Central Composite	Box-Behnken
2	13 (5 Mittelpunktversuche)	-
3	20 (6 Mittelpunktversuche)	15
4	30 (6 Mittelpunktversuche)	27
5	33 (teilkfaktoriell) 52 (vollfaktoriell)	46
6	54 (teilkfaktoriell) 91 (vollfaktoriell)	54

Tabelle 19: Benötigte Einzelerperimente für Central Composite und Box-Behnken [41]

Mit der Unterstützung des Softwarepakets JMP der Firma SAS erfolgte die Analyse des Schüttguts und Optimierung der Schüttgutparameter in EDEM. Die Software bietet eine durchgehende dynamische Verbindung von Daten und deren Visualisierung. Neben einigen nützlichen Werkzeugen der Statistik liegt der Schwerpunkt der Software bei umfangreichen Möglichkeiten zur statistischen Versuchsplanung und –auswertung. Detaillierte Informationen zu den Möglichkeiten der JMP Software zur Versuchsplanung finden sich in [43].

6.3 Durchführung der Simulationen mit Hilfe des Versuchsplans

Das Problem in der DEM Simulation ist, dass die Eingabeparameter für das Simulationsmodell meist unbekannt sind. Unser Ziel besteht darin, die unbekannt Parameterwerte zu bestimmen. Dies soll, wie bereits bekannt ist, mit Hilfe einer Versuchsanlage geschehen, bei der das makroskopische Schüttgutverhalten beobachtet wird. Es werden dabei mechanische sowie geometrische Eigenschaften in Betracht gezogen. Diese Eigenschaften werden als Zielgrößen für den Versuchsplan definiert und sind:

- Schüttwinkel in der oberen Box
- Schüttwinkel im Auffangbehälter
- Schiebekraft an der oberen Box
- Auftreffhöhe nach dem Rutschen an der vertikalen Wand des Auffangbehälters
- Abstand der Schüttspitze von der Wand in der oberen Box (falls die Spitze nicht an der Wand ist)
- ggf. die Schütthöhe im Auffangbehälter
- ggf. Durchlaufzeit

Als Faktoren, die im Versuchsplan variiert werden, werden die unbekannt Eingabeparameter, welche in Tabelle 20 aufgelistet sind, gewählt.

Wechselwirkungen Urea			
	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	???	0,27	0,2
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	???	???	???
Rollwiderstandskoeff. μ_R	???	???	???
Wechselwirkungen Kantkorn			
	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	???	???	???
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	???	???	???
Rollwiderstandskoeff. μ_R	???	???	???

Tabelle 20: Faktoren für den Versuchsplan

Für das Urea sind es ein Restitutionskoeffizient, drei Haftreibungskoeffizienten und drei Rollwiderstandskoeffizienten. In Summe sieben Faktoren. Für das Kantkorn kommen zusätzlich zwei Restitutionskoeffizienten dazu und damit ergeben sich für diesen Versuchsplan neun Faktoren. Das JMP Software ermöglicht allerdings die Erstellung einer Wirkungsfläche nur mit maximal acht Faktoren. Das bedeutet, dass für die Kantkörner ein anderer Weg gefunden werden muss. Dazu kamen zwei Möglichkeiten in Betracht. Einerseits kann die Aluminiumboxen, die mit Glasgewebe überzogen sind, durch Stahlboxen ausgetauscht werden, um die Faktorenanzahl auf sechs zu senken, oder man betrachtet das Verhalten des Schüttguts im oberen Bereich der Versuchsanlage getrennt vom Unteren. D.h. der Schüttwinkel in der oberen Box, die Schiebekraft und der Abstand der Schüttspitze von der Wand in der oberen Box werden zur Bestimmung der sechs Parameter der Partikel-Partikel und Partikel-Glasgewebe Interaktion verwendet, da Stahl im oberen Bereich keine Rolle spielt. Anschließend können die restlichen drei Parameter durch Betrachtung des Verhaltens des Schüttguts im unteren Bereich der Versuchsanlage bestimmt werden. Von den beiden Möglichkeiten wurde die letztere gewählt, weil gewünscht ist, dass das Schüttgut selbst die bestimmende Größe für die Ergebnisse im oberen Bereich der Versuchsanlage darstellen und der Einfluss der Geometrie möglichst klein sein soll. Im Folgenden ist eine detaillierte Beschreibung wie die Erstellung des Versuchsplans und eine Analyse im JMP für das Urea und Kantkorn durchgeführt wurde.

UREA

Ausgehend vom Hauptfenster der Software wurde in der Menüleiste unter dem Punkt „DOE“ ein neues Wirkungsflächendesign erzeugt (Abbildung 78). In dem sich neu öffnenden Fenster wurden die Zielgrößen und Faktoren wie in Abbildung 79 dargestellt definiert. Die Auswahl der unteren und oberen Grenze der einzelnen Faktoren erfolgte mithilfe von einzelnen Simulationsdurchläufen und einigen Vorkenntnissen. Das Ziel dieser Simulationsdurchläufe war die Antworten von extremen Parametereinstellungen (sehr niedrig bzw. sehr hoch) zu messen, um anschließend einen Vergleich mit den realen gemessenen Werten durchzuführen, damit grob die Wertebereiche der Parameter bestimmt werden konnten. Eine Bewertung hinsichtlich des Stauverhaltens auf der Rutsche war ebenfalls hilfreich für die Bestimmung der Grenzwerte. Die Wertebereiche sollten nicht zu schmal sein. Je schmaler sie sind, umso schwieriger ist der Nachweis einer Wirkung auf die Zielgröße. Sie sollten auch nicht zu breit sein, denn umso schwieriger ist die korrekte Beschreibung des Wirkungszusammenhanges zwischen Faktor und Zielgröße [37]. In den weiterfolgenden Dialogfenstern wurde der Designtyp als Box-Behnken Versuchsplan mit 62 Einzelexperimenten, davon sind sechs Mittelpunktsversuche, gewählt. Eine Randomisierung der Versuchsreihenfolge wurde nicht durchgeführt.

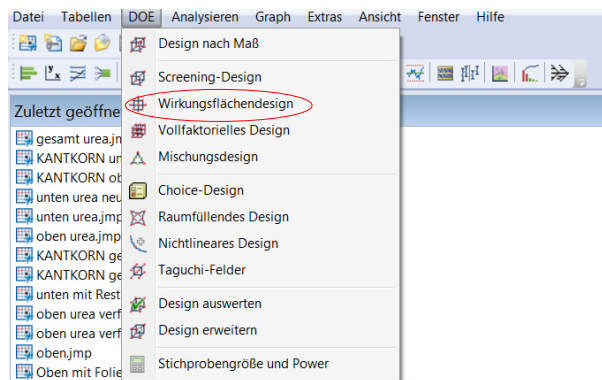


Abbildung 78: JMP Hauptfenster

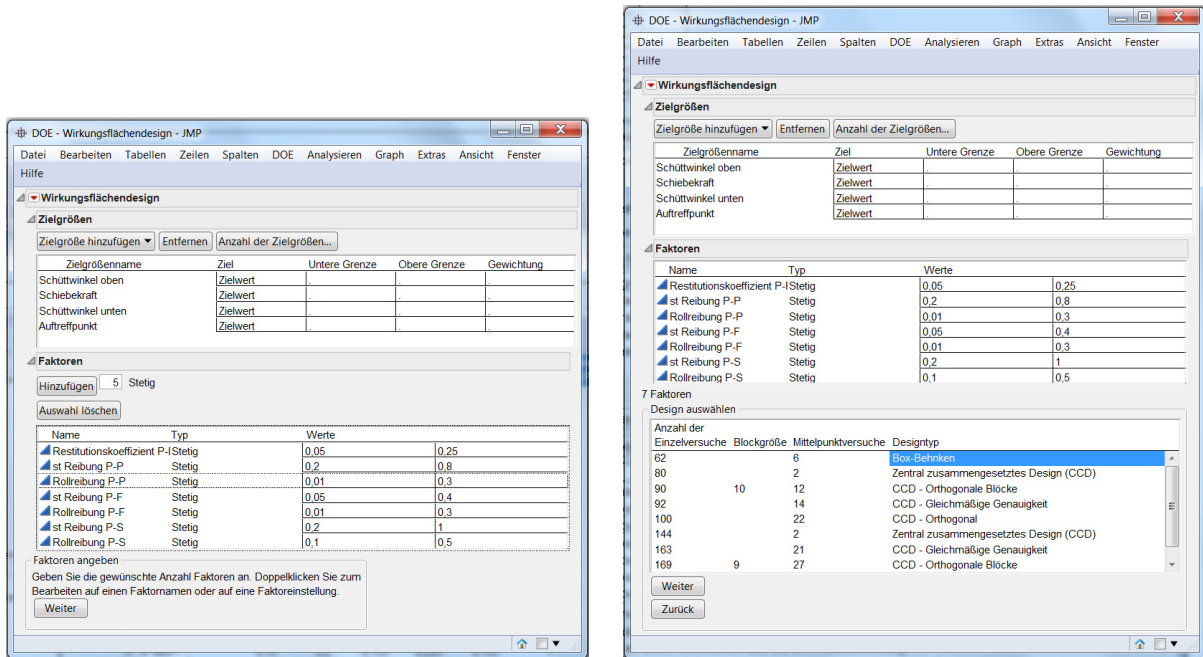


Abbildung 79: li. Zielgrößen und Faktoreneinstellungen; re. Designauswahl in JMP (Urea)

Muster	Restitutionskoeffizient P-P	st Reibung	Rollreibung P-P	st Reibung	Rollreibung P-F	st Reibung	Rollreibung P-S	Schüttwinkel oben	Schiebekraft	Schüttwinkel unten	Auftreffpunkt
1	--0-000	0,05	0,2	0,155	0,05	0,155	0,6	0,3			
2	--0+000	0,05	0,2	0,155	0,4	0,155	0,6	0,3			
3	-0-000-	0,05	0,5	0,01	0,225	0,155	0,6	0,1			
4	-0-000+	0,05	0,5	0,01	0,225	0,155	0,6	0,5			
5	-000-0	0,05	0,5	0,155	0,225	0,01	0,2	0,3			
6	-000+0	0,05	0,5	0,155	0,225	0,01	1	0,3			
7	-000+0	0,05	0,5	0,155	0,225	0,3	0,2	0,3			
8	-000++0	0,05	0,5	0,155	0,225	0,3	1	0,3			
9	-0+000-	0,05	0,5	0,3	0,225	0,155	0,6	0,1			
10	-0+000+	0,05	0,5	0,3	0,225	0,155	0,6	0,5			
11	-+0-000	0,05	0,8	0,155	0,05	0,155	0,6	0,3			
12	-+0+000	0,05	0,8	0,155	0,4	0,155	0,6	0,3			
13	0--0-00	0,15	0,2	0,01	0,225	0,01	0,6	0,3			
14	0--0+00	0,15	0,2	0,01	0,225	0,3	0,6	0,3			
15	0-000--	0,15	0,2	0,155	0,225	0,155	0,2	0,1			
16	0-000+-	0,15	0,2	0,155	0,225	0,155	0,2	0,5			

Abbildung 80: Ausschnitt der erstellten Datentabelle für den Versuchsplan

Nach Bestätigung der Einstellungen erstellte JMP eine neue Datentabelle mit dem Versuchsplan (Abbildung 80). Jede einzelne Zeile entspricht einem Simulationsdurchlauf mit den entsprechenden Parameterwerten. Bei Abarbeitung des Versuchsplans wurden die in der Simulation gemessenen Werte für die Zielgrößen direkt in die entsprechende Zelle in der Spalte der Zielgröße eingetragen. Die Simulationen wurden im Batch-Modus ausgeführt, damit diese automatisch ohne Befehlseingabe nacheinander gestartet werden. Allerdings mussten die Parameterwerte vorerst manuell für jede einzelne Simulation eingestellt und abgespeichert werden. Ein Beispiel für das Batch-File ist in Abbildung 81 zu sehen.

```
1 for /L %%x IN (1, 1, 50) DO (  
2 edem.exe -console -i "k:\Kali\UREA_%%x.dem" -e "k:\Kali\UREA_%%x.dfg" >> "k:\Kali\UREA_%%x Zeit.csv"  
3 RENAME "k:\Kali\totalforcex.csv" "UREA_%%x Kraft.csv"  
4 )
```

Abbildung 81: Batch-File

Die Simulationsfolge wurde mit einer „for“-Schleife festgelegt. Das /L nach dem „for“ kennzeichnet eine fortlaufende Schleife. Die darauf folgende „%%x“ ist die Laufvariable. In der Klammer sind der Reihe nach der Startwert, die Schrittweite und der Endwert definiert. In jedem Schritt der Schleife wird das EDEM Software geöffnet (edem.exe –console) und die entsprechende Simulation geladen und gestartet (-i ``...``). Der darauf folgende Befehl mit dem Kürzel „-e“ bedeutet die Ausgabe der Simulationsergebnisse als csv-Datei. Die Ausgabeeinstellungen wurden in EDEM definiert und in der dfg-Datei abgespeichert. Das „RENAME“ war notwendig, da für jede Simulation die gleiche dfg-Konfiguration verwendet wurde. Ansonsten würden die Ergebnisse der neuen Simulation die alten überschreiben. Die Definition, welche Simulationsergebnisse ausgegeben werden soll, wurde in EDEM im Bereich „Analyse“ unter dem Punkt „File“ → „Export“ → „Results Data...“ in der Menüleiste durchgeführt. Ziel war die Schiebekraft für die obere Box auszugeben. In der Abbildung 82 sind die dazu notwendigen Einstellungen zu sehen.

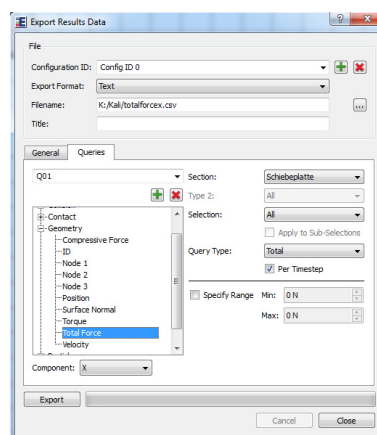


Abbildung 82: dfg-Konfiguration

Für die Bewertung der Schiebekraft wurde ein Excel-Makro programmiert, das den Aufwand für die Vorbereitung der zahlreichen csv-Dateien erleichtern soll. Das Excel-Makro ist in der beiliegenden CD zu finden. Mit Hilfe dieses Makros ist es möglich in beliebig vielen csv-Dateien die x- und y- Werte zu trennen, da diese zusammen in einer Zelle stehen, die Werte in eine xls-Datei abzuspeichern und in einem Diagramm (Kraftverlauf) darzustellen.

Die Schüttwinkel und der Auftreffpunkt bzw. gewisse Abstände wurden in EDEM im 3D-Viewer im Bereich „Analyse“ mit Hilfe einer externen Software namens „MB-Ruler“ manuell ermittelt. Für die Schüttwinkel wurde die „Geodreieck“ Funktion verwendet. Die Ermittlung des Auftreffpunkts oder bestimmte Abständen erfolgte mit der Längenmessung, in dem eine Referenzlänge (z.B. Auffangbehälterhöhe) angegeben werden musste. Beispiele zu den Messungen sind in der Abbildung 83 zu finden.

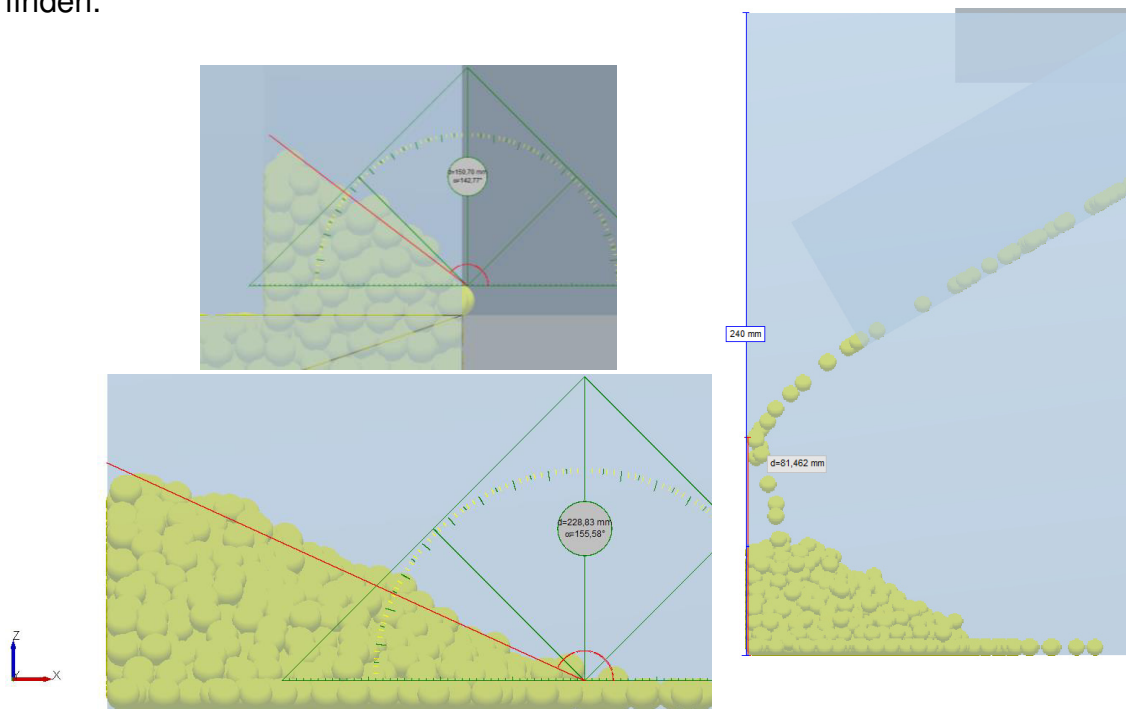


Abbildung 83: Messungen mit MB-Ruler

Nach Eingabe der Werte aller Zielgrößen konnte die Berechnung des Modells ausgeführt werden. Dies erfolgte im linken Bereich des Fensters unter „Modell“ → „Skript ausführen...“ (Abbildung 84, links). In dem sich neu öffnendem Dialogfenster wurden die Zielgrößen als Y-Werte hinzugefügt. Berücksichtigt wurden zudem Modelleffekte bis zu zweiten Grades. Die Einstellungen wurden in den Standardeinstellungen gelassen und mit „Ausführen“ die Berechnung gestartet (Abbildung 84, rechts).

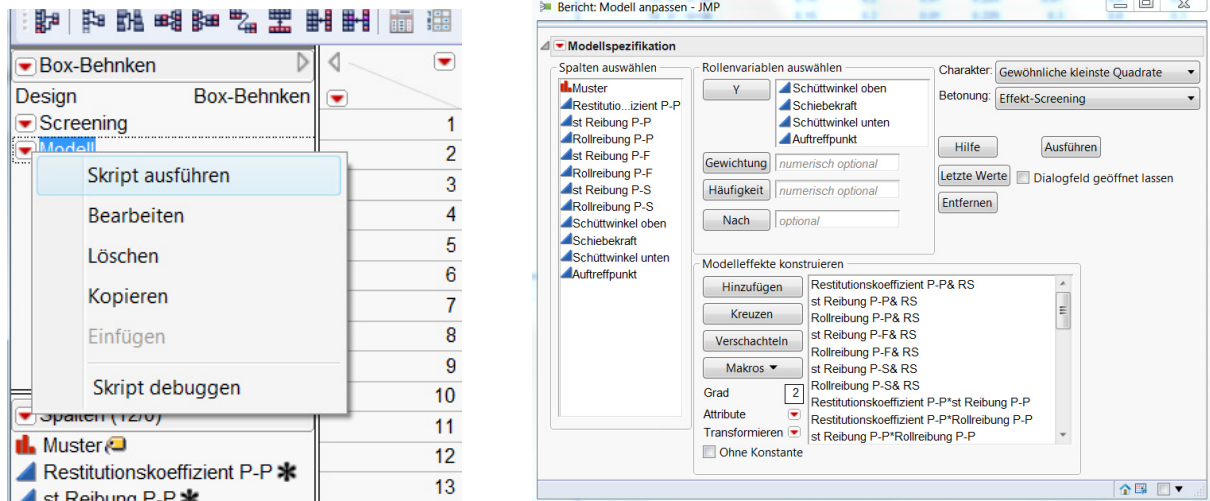


Abbildung 84: li. Ausführen der Berechnung; re. Modellspezifikation (Urea)

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Modellberechnung beschrieben.

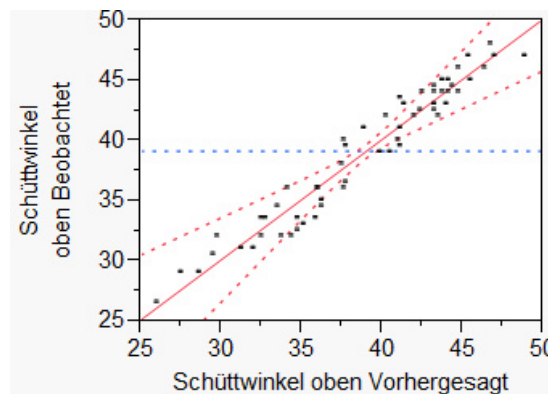


Abbildung 85: Beobachteter Schüttwinkel in der oberen Box über vorhergesagtem Wert

Die Abbildung 85 zeigt die tatsächlichen Werte über den mit der Vorhersageformel bestimmten Werte. Die Punkte definieren die einzelnen Versuche. Der Abstand dieser Punkte von der roten durchgezogenen Linie ist das Residuum, also die Differenz zwischen dem tatsächlichen Wert und vom Modell vorhergesagtem Wert. Die blaue punktierte Linie zeigt den Mittelwert der tatsächlichen Werte an. Die gepunkteten Kurven sind die sogenannten Konfidenzlinien. Diese begrenzen den 5%-tigen Vertrauensbereich.

Die Genauigkeit des Modells wird mit dem Bestimmtheitsmaß r^2 angegeben, welches Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Das Bestimmtheitsmaß für dieses Modell ist in der Abbildung 86 dargestellt. Ein hoher r^2 -Wert bedeutet, dass das Modell mit den Parametern die realen Werte der Zielgröße ausreichend erklärt. Umgekehrt bedeutet ein kleiner r^2 -Wert, dass das Modell unzureichend ist. Um den r^2 -Wert zu

erhöhen muss in diesem Fall der Versuchsplan mit zusätzlichen Parametern oder Punkten erweitert und gegebenenfalls Wiederholungen der Punkte durchgeführt werden. Das Bestimmtheitsmaß r^2 hat die Eigenschaft, dass es umso größer wird, je größer die Zahl der unabhängigen Parameter ist, unabhängig davon ob die unabhängigen Parameter wirklich einen Beitrag zur Erklärungskraft liefern. Daher wird eher das korrigierte Bestimmtheitsmaß r^2 zu Rate gezogen. Hierbei wird die Erklärungskraft des Modells (repräsentiert durch r^2) ausbalanciert mit der Komplexität des Modells (repräsentiert durch die Anzahl der unabhängigen Parameter) [44]. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß für dieses Modell beträgt 0,87 und deswegen kann davon ausgegangen werden, dass das Modell das System gut beschreibt. Die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes [44] ist im Folgenden erläutert:

Mittelwert von y:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

y_i ...*einzelne Werte der Zielgröße*

n ...*Anzahl der Werte*

Variation von y:

$$SS_{total} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$$

Variation von Residuen:

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2$$

f_i ...*mittels Modell vorhergesagte Werte*

Bestimmtheitsmaß:

$$r^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{total}}$$

korrigierter Bestimmtheitsmaß:

$$\bar{r}^2 = 1 - (1 - r^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}$$

p...Anzahl der unabhängigen Parameter

r ²	0,944997
r ² korrigiert	0,870953
Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung	2,020329
Mittelwert der Zielgröße	39,07258
Beobachtungen (oder Summe Gewichte)	62

Abbildung 86: Übersicht der Anpassung

In der Abbildung 87 sind die Parameter nach ihrer Signifikanz geordnet dargestellt. Die nicht relevanten Parameter befinden sich nicht in der Abbildung. Die größten signifikanten Größen sind die Partikel-Partikel Interaktionen 1. und 2.Ordnung. Der Schätzer kennzeichnet den Koeffizienten in der Vorhersageformel für den jeweiligen Term. Als Beispiel ist in der Abbildung 88 ein Ausschnitt aus der Vorhersageformel mit dem Haftreibungskoeffizient zwischen zwei Partikeln (st. Reibung Pa-Pa) dargestellt. Bei der Vorhersageformel handelt es sich dabei um eine Gleichung mit skalierten Parametern. Der in der großen Klammer befindlicher Ausdruck liegt zwischen -1 und +1. Die Formel in dieser Klammer passt den aktuellen Parameterwert an den Bereich -1 bis +1 an, sodass der kleinst mögliche Parameterwert (st. Reibung = 0,2) -1 und der größt mögliche Parameterwert (st. Reibung = 0,8) +1 ergibt.

Term	Schätzer	Std.-Fehler	t-Wert	Wahrsch.> t
Rollreibung P-P(0,01,0,3)	5,25	0,412398	12,73	<,0001*
Restitutionskoeffizient P-P(0,05,0,25)	4,0416667	0,412398	9,80	<,0001*
Rollreibung P-P*Rollreibung P-P	-4,479167	0,549864	-8,15	<,0001*
st Reibung P-P*st Reibung P-P	-3,385417	0,549864	-6,16	<,0001*
st Reibung P-P(0,2,0,8)	2,3958333	0,412398	5,81	<,0001*
Restitutionskoeffizient P-P*st Reibung P-P	3,8125	0,714294	5,34	<,0001*
Restitutionskoeffizient P-P*Restitutionskoeffizient P-P	-1,666667	0,549864	-3,03	0,0055*
st Reibung P-F(0,05,0,4)	0,8958333	0,412398	2,17	0,0391*
st Reibung P-P*Rollreibung P-F	1,5	0,714294	2,10	0,0456*
st Reibung P-P*st Reibung P-S	-1,375	0,714294	-1,92	0,0652
st Reibung P-S*Rollreibung P-S	1,125	0,714294	1,57	0,1274
st Reibung P-F*st Reibung P-S	0,9375	0,714294	1,31	0,2008

Abbildung 87: Parameterschätzer für Schüttwinkel in der oberen Box sortiert nach ihrer Signifikanz

$$+2,3958333333333333 \left[\frac{(\text{st Reibung P-P} - 0,5)}{0,3} \right]$$

Abbildung 88: Ausschnitt aus der Vorhersageformel

Der p-Wert (letzte Spalte in der Abbildung 87) kennzeichnet, wie signifikant der Parameter ist. Dieser liegt zwischen 0 und 1. Ist der p-Wert hoch, heißt das, dass die Zielgröße zufällig gleich groß sein wird, d.h. der entsprechende Term hat wenig Einfluss.

Im Folgenden sind die Modelle für die Zielgrößen Schiebekraft, Schüttwinkel oben und Auftreffpunkt abgebildet. Diese besitzen ebenfalls einen guten Bestimmtheitsgrad. Für die Schiebekraft sind die Partikel-Partikel Interaktionen hauptverantwortlich. Der Schüttwinkel unten hängt von der Partikel-Partikel und Partikel-Stahl Interaktion ab. Der Auftreffpunkt des Schüttguts an der Auffangbehälterwand hingegen hängt hauptsächlich von der Rollreibung zwischen Partikel und Stahl ab.

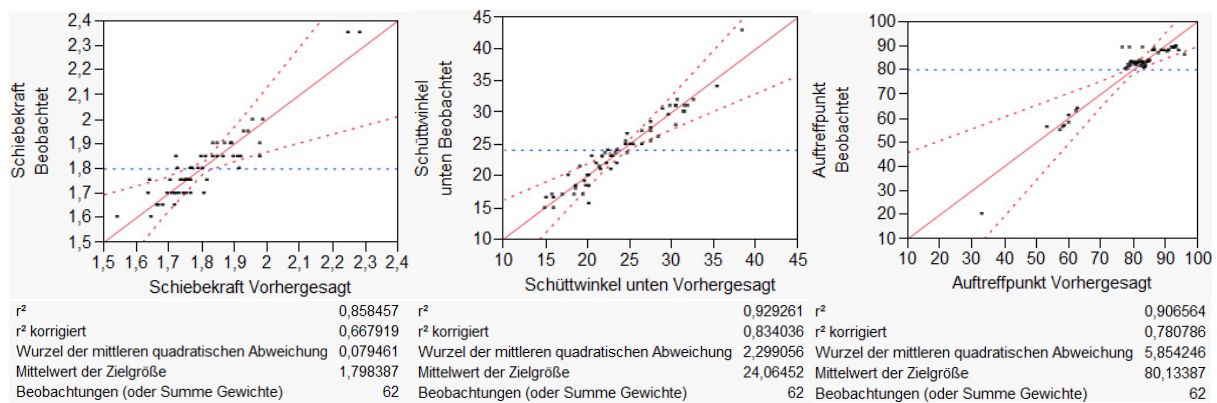


Abbildung 89: Modellübersicht (li. Schiebekraft, mi. Schüttwinkel im Auffangbehälter, re. Auftreffpunkt)

Term	Schätzer	Std.-Fehler	t-Wert	Wahrsch.> t
Restitutionskoeffizient P-P(0,05,0,25)	0,1145833	0,01622	7,06	<,0001*
Rollreibung P-P(0,01,0,3)	-0,1125	0,01622	-6,94	<,0001*
Restitutionskoeffizient P-P*Rollreibung P-P	-0,15	0,028094	-5,34	<,0001*
st Reibung P-P(0,2,0,8)	-0,045833	0,01622	-2,83	0,0089*
Rollreibung P-P*Rollreibung P-P	0,0527778	0,021627	2,44	0,0218*
Restitutionskoeffizient P-P*Restitutionskoeffizient P-P	0,0496528	0,021627	2,30	0,0300*
st Reibung P-F(0,05,0,4)	0,0229167	0,01622	1,41	0,1696
st Reibung P-F*st Reibung P-S	0,03125	0,028094	1,11	0,2762
st Reibung P-P*st Reibung P-S	0,03125	0,028094	1,11	0,2762
st Reibung P-P*st Reibung P-P	-0,022222	0,021627	-1,03	0,3136
Restitutionskoeffizient P-P*st Reibung P-P	0,025	0,028094	0,89	0,3817

Abbildung 90: Parameterschätzer für Schiebekraft sortiert nach ihrer Signifikanz

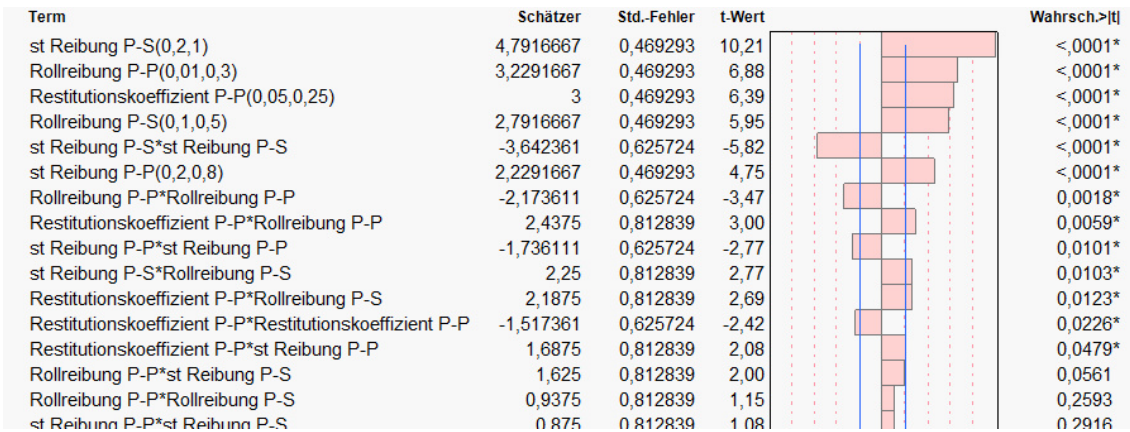


Abbildung 91: Parameterschätzer für Schüttwinkel im Auffangbehälter sortiert nach ihrer Signifikanz

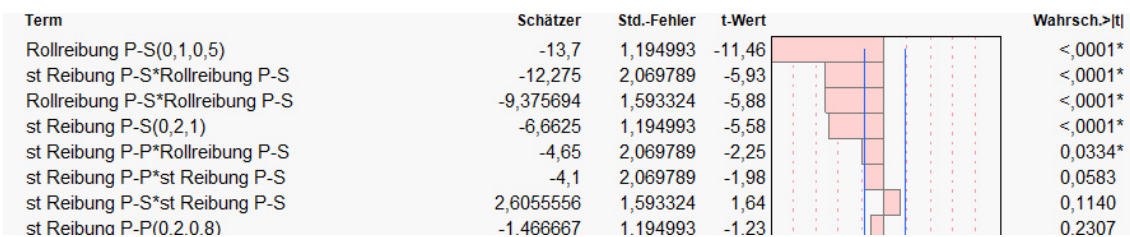


Abbildung 92: Parameterschätzer für Auftreffpunkt sortiert nach ihrer Signifikanz

Die Software bietet neben der Erstellung der Modelle ein weiteres Werkzeug namens „Prediction Profiler“, um das berechnete Modell zu visualisieren. Sie dient der Findung von Faktoreinstellungen, für die ein optimierter Wert in der Zielgröße zu beobachten ist. Insbesondere bei Untersuchungen von mehr als einer Zielgröße ist der „Prediction Profiler“ ein sehr nützliches Werkzeug. In der Abbildung 93 ist der „Prediction Profiler“ für das Urea dargestellt. Die schwarzen durchgezogenen Kurven sind die vorhergesagten Werte für das Modell und die blauen punktierten Kurven begrenzen das Konfidenzintervall (5%). Mit den roten punktierten Linien können die Faktoreinstellungen manuell variiert werden, um die Auswirkungen auf die Zielgrößen und anderen Faktoren zu beobachten. Andererseits können die optimalen Werte der Zielgrößen vorgegeben werden, um eine automatische Anpassung der Faktoren durchzuführen. Dafür geht man in die Option „Wünschbarkeit festlegen“, welches hinter dem roten Pfeil neben dem Überschrift zu finden ist. Die Abbildung 94 zeigt die Dialogfenster für die Einstellungen der jeweiligen Zielgrößen. Wichtig ist hier der mittlere Wert. Dieser entspricht dem im realen Experiment ermittelten Wert und bekommt die Wünschbarkeit „1“. Die obere und untere Grenze können beliebig gewählt werden. Eine Gewichtung ist notwendig, falls die Zielgrößen untereinander von der Relevanz her einen Unterschied besitzen. In unserem Fall wurden die Zielgrößen Schiebekraft und beide Schüttwinkel eine höhere Gewichtung (0,3)

vorgegeben als die Zielgröße Auftreffpunkt (0,1), da diese im realen eine große Streuung besaß. Anschließend werden mit dem Befehl „Wünschbarkeit maximieren“ die optimalen Werte berechnet. Nachdem alle optimalen Parameterwerte gefunden wurden, mussten erneut Simulationsdurchläufe für die Bestimmung der Feststoffdichte durchgeführt werden, da die Packungsdichte der Partikel auch von der Reibung abhängt. Allerdings muss in den meisten Fällen nur eine kleine Änderung der Feststoffdichte durchgeführt werden (Tabelle 22). Falls die Schiebekraft nicht der real gemessenen Schiebekraft entspricht, kann sie durch minimale Änderung des Schubmoduls angepasst werden. Diese Änderungen besitzen keine große Auswirkung auf die anderen Zielgrößen.

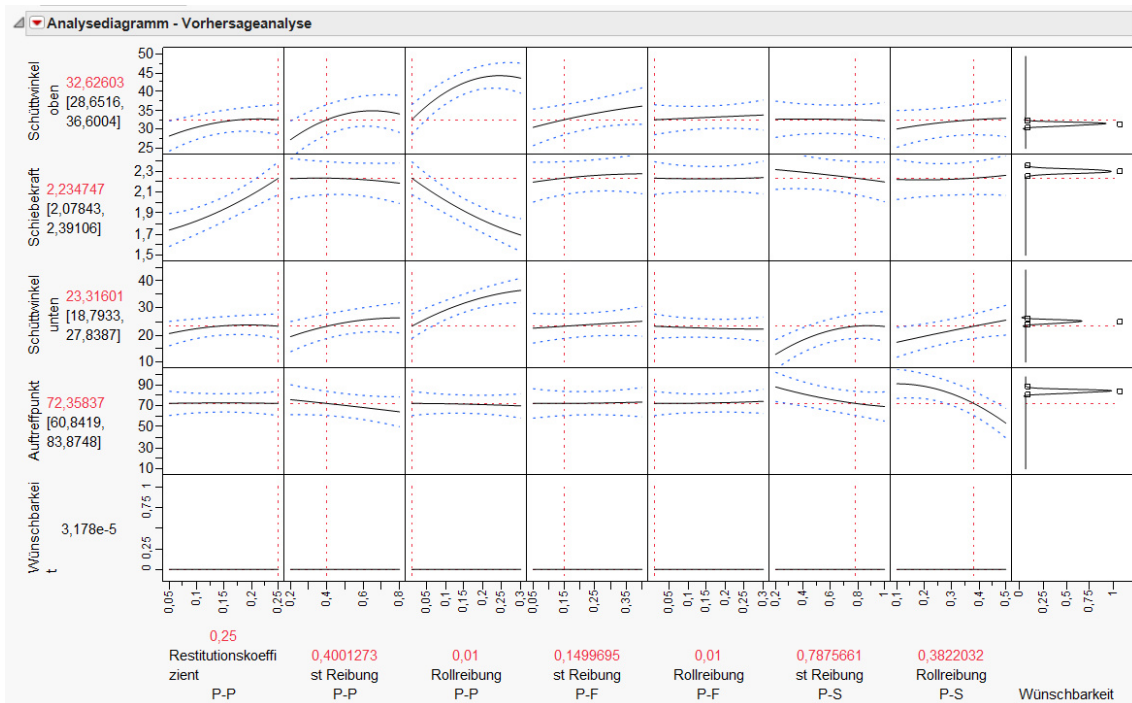


Abbildung 93: Prediction Profiler (Urea)

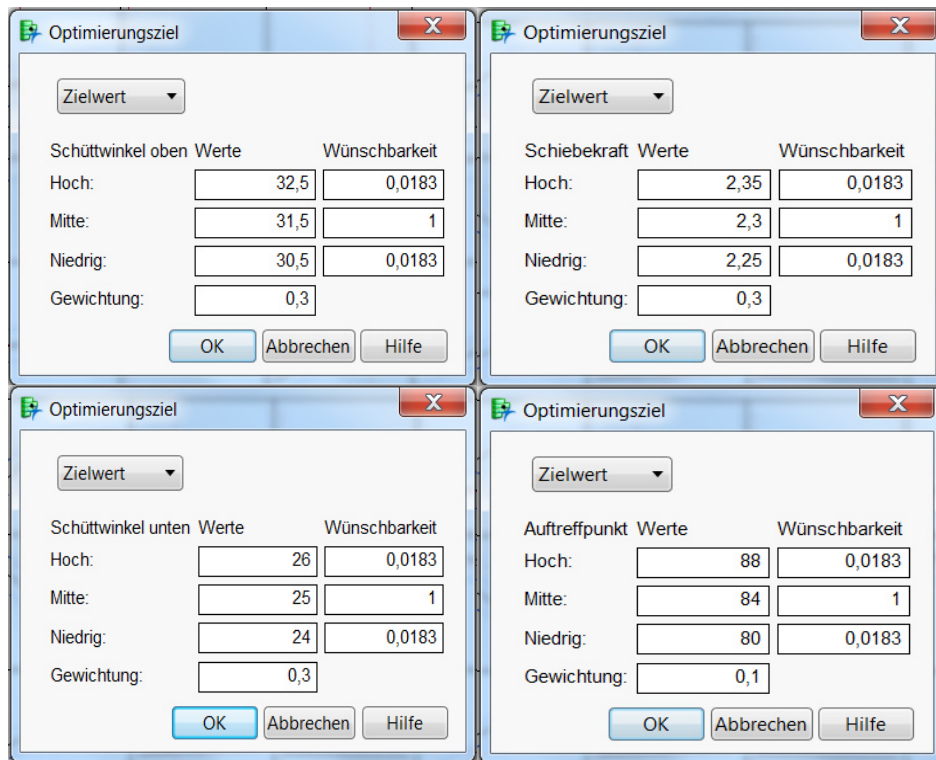


Abbildung 94: Optimierungseinstellungen (Urea)

	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	0,25	0,27	0,2
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	0,4	0,788	0,15
Rollwiderstandskoeff. μ_R	0,01	0,382	0,01

Tabelle 21: Zusammenfassung der optimalen Parameter (Urea)

	Urea
Querkontraktionszahl ν	0,3
Schubmodul G	$8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
Feststoffdichte ρ	1363 kg/m³

Tabelle 22: Endgültige Materialkennwerte (Urea)

KANTKORN

Beim Kantkorn wird analog vorgegangen wie bei Urea. Der Unterschied liegt, wie schon erwähnt darin, dass das Gesamtexperiment in zwei Versuchspläne aufgesplittert wird. Im ersten Versuchsplan werden die Faktoren für die Partikel-Partikel sowie Partikel-Aluminium Interaktion variiert und die Zielgrößen im oberen Bereich der Versuchsanlage beobachtet (Abbildung 95, links). Diese Zielgrößen sind der Schüttwinkel in der oberen Box, die Schiebekraft und der Abstand der Schüttspitze von der Boxwand, da die Schüttspitze sein Maximum nicht an der Wand

hat (Abbildung 56 auf Seite 58). Mit Hilfe dieses Versuchsplans wurden die optimalen Faktoreinstellungen für die Partikel-Partikel und Partikel-Glasgewebe Interaktion bestimmt. Anschließend wurden die Simulationsdurchläufe zur Anpassung des Gewichts der Partikel in der unteren Box und die Schiebekraft durchgeführt, in dem die Feststoffdichte und das Schubmodul minimal verändert wurden. Im zweiten Versuchsplan war dann nur noch notwendig, die Faktoreinstellung für die Partikel-Stahl Interaktion zu bestimmen (Abbildung 95, rechts). Hierbei wurden die optimierten Werte vom ersten Versuchsplan für die einzelnen Simulationen des zweiten Versuchsplans festgehalten. Als zusätzliche Zielgrößen im Vergleich zum Urea kamen die Höhe der Schüttung im Auffangbehälter und die Durchlaufzeit. Die Durchlaufzeit konnte beim Kalibrieren des Ureamodells nicht genommen werden, da in der Simulation ein nachrieseln der Partikel beobachtet wurde und dementsprechend die Quantifizierung sehr schwer war. Für das Kantkornmodell war das Nachrieseln nicht zu sehen, da die entsprechenden Parameter, verantwortlich für das Nachrieseln, schon im ersten Versuchsplan bestimmt wurden. Schlussendlich wurden die optimalen Faktoreinstellungen der Partikel-Stahl Interaktionen mit Hilfe des „Prediction Profiler“ bestimmt.

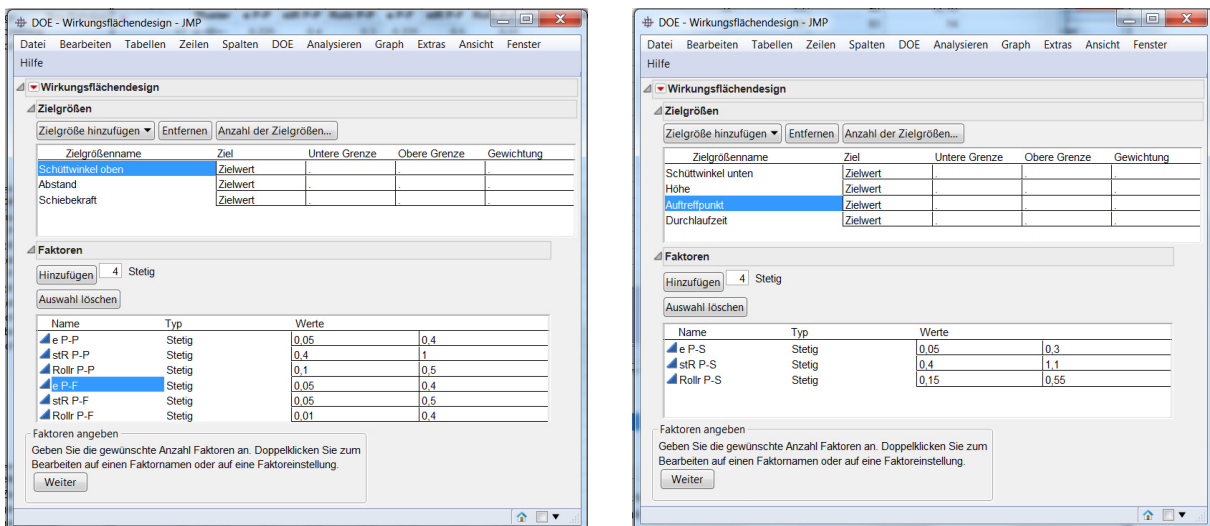


Abbildung 95: Zielgrößen und Faktoreneinstellungen; li. oberer Bereich; re. unterer Bereich (Kantkorn)

Entwicklung einer Versuchsanlage zur Kalibrierung von DEM-Modellen für Schüttgüter in der Fördertechnik

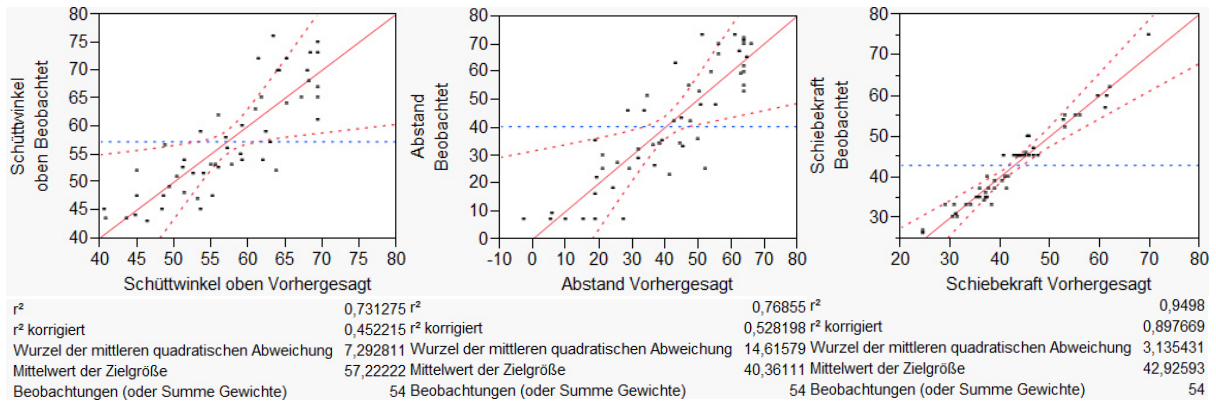


Abbildung 96: Modellübersicht (Kantkorn oberer Bereich)

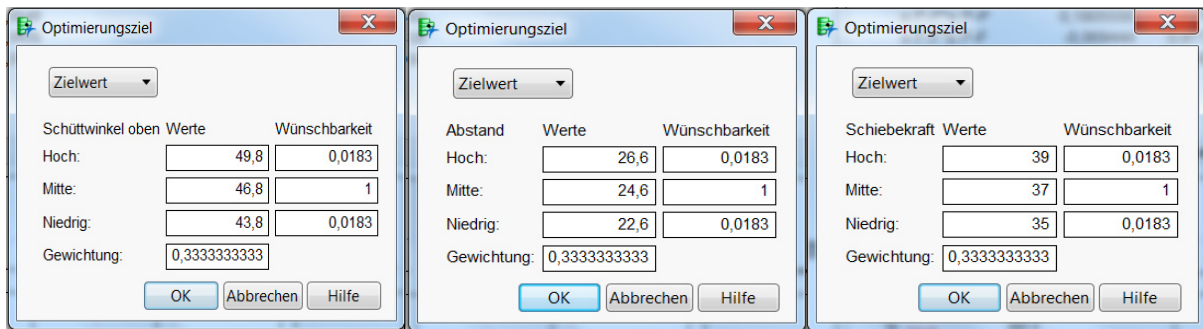


Abbildung 97: Optimierungseinstellungen (Kantkorn, oberer Bereich)

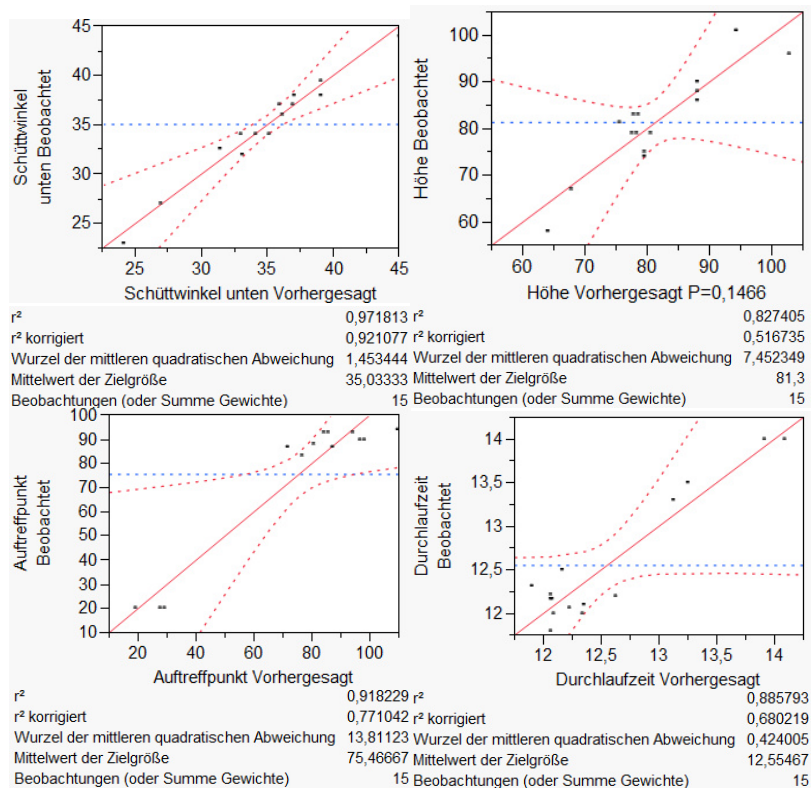


Abbildung 98: Modellübersicht (Kantkorn unterer Bereich)

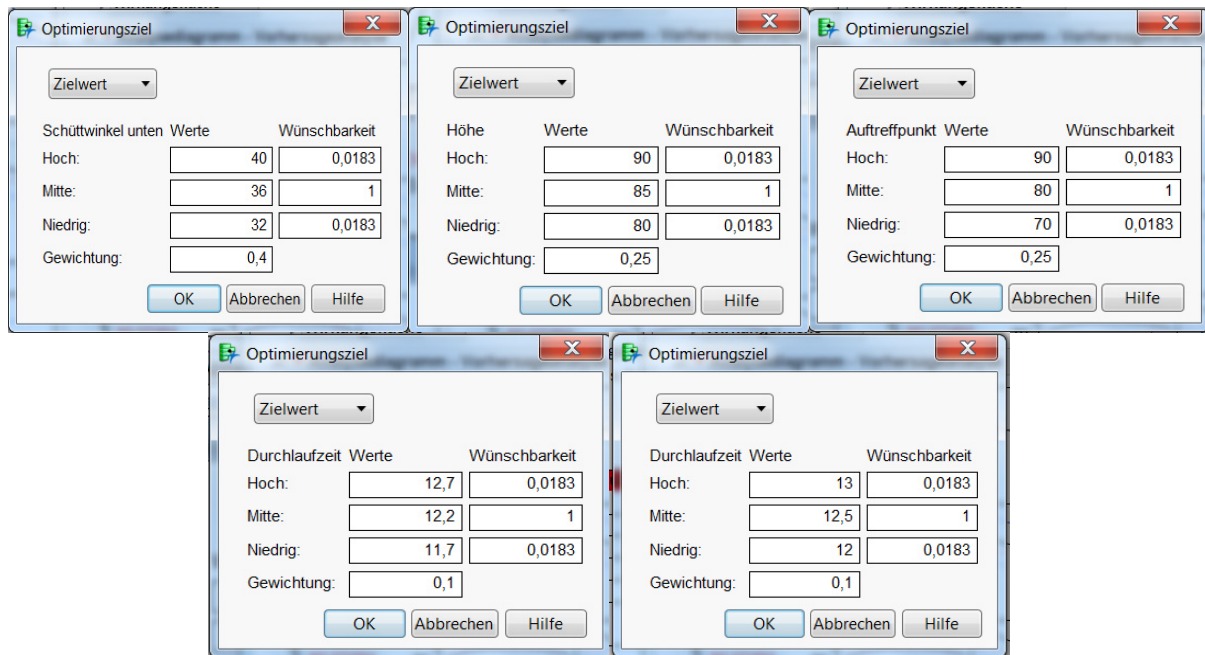


Abbildung 99: Optimierungseinstellungen (Kantkorn, unterer Bereich)

	Partikel-Partikel	Partikel-Stahl	Partikel-Glasgewebe
Restitutionskoeffizient e	0,278	0,261	0,4
Haftreibungskoeffizient μ_{st}	0,512	0,859	0,332
Rollwiderstandskoeff. μ_R	0,1	0,36	0,012

Tabelle 23: Zusammenfassung der optimalen Parameter (Kantkorn)

7 Vergleich Mess- & Simulationsergebnisse

Die Messergebnisse (Durchschnitt) aus dem Laborversuch für das Ureaschüttgut und Kantkornschtüttgut sind in der Tabelle 24 nochmals zusammengefasst.

	Urea	Kantkorn
Schüttwinkel oben	31,5°	46,8°
Schiebekraft	2,3 N	37 N
Schüttwinkel unten	25°	36°
Auftreffhöhe nach der Rutsche	80-88 mm	70-90 mm
Abstand Schüttspitze von Wand der oberen Box	0 mm	24,6 mm
Schütthöhe im Auffangbehälter	48 mm	85
Durchlaufzeit	7,7 s	12,5 s
Partikelmasse untere Box	0,187 kg	0,24 kg

Tabelle 24: Labormessergebnisse

Mit den optimalen Parameterwerten, die mit Hilfe des Versuchsplans gewonnen wurden, ergaben sich für das Ureamodell und Kantkornmodell folgende Simulationsergebnisse (Mittelwert aus drei Durchläufen):

	Urea	Kantkorn
Schüttwinkel oben	32°	46°
Schiebekraft	2,25 N	34 N
Schüttwinkel unten	24°	35°
Auftreffhöhe nach der Rutsche	80-82 mm	85-90 mm
Abstand Schüttspitze von Wand der oberen Box	0 mm	22,5 mm
Schütthöhe im Auffangbehälter	48 mm	79
Durchlaufzeit	6,75 s	12,34 s
Partikelmasse untere Box	0,187 kg	0,245 kg

Tabelle 25: Simulationsergebnisse

Die Tabelle 26 zeigt die prozentualen Abweichungen² der Simulationsergebnisse von den realen Ergebnissen.

² $\frac{|\text{Simulationsergebnis} - \text{realer Wert}|}{\text{realer Wert}} * 100\%$

	Urea	Kantkorn
Schüttwinkel oben	1,6 %	1,7 %
Schiebekraft	2,2 %	8,1 %
Schüttwinkel unten	4 %	2,8 %
Auftreffhöhe nach der Rutsche	-	-
Abstand Schüttspitze von Wand der oberen Box	0 %	8,5 %
Schütthöhe im Auffangbehälter	0 %	7,1 %
Durchlaufzeit	12,3 %	1,3%
Partikelmasse untere Box	0 %	2,1 %

Tabelle 26: Prozentuale Abweichungen der Simulationsergebnisse von den realen Ergebnissen

Die Simulationsergebnisse stimmen relativ gut mit den im Laborversuch gemessenen Werten überein ($<\pm 10\%$). Lediglich bei der Durchlaufzeit der Ureapartikel ist der Unterschied minimal höher. Trotz dessen bedeutet das, dass die im Versuchsplan gefundenen Parameterwerte die Realität gut widerspiegeln. In den nachfolgenden Diagrammen werden die Verläufe der Schiebekräfte zwischen Simulation und Laborversuch miteinander verglichen. Der Startzeitpunkt des realen Versuchs wurde auf 0,95 Sekunden verschoben damit ein überdeckender Vergleich mit den Kraftverläufen aus der Simulation durchgeführt werden kann (siehe Kapitel 5.1 *Erzeugung der Geometrie der Versuchsanlage und Definition ihrer Eigenschaften*).

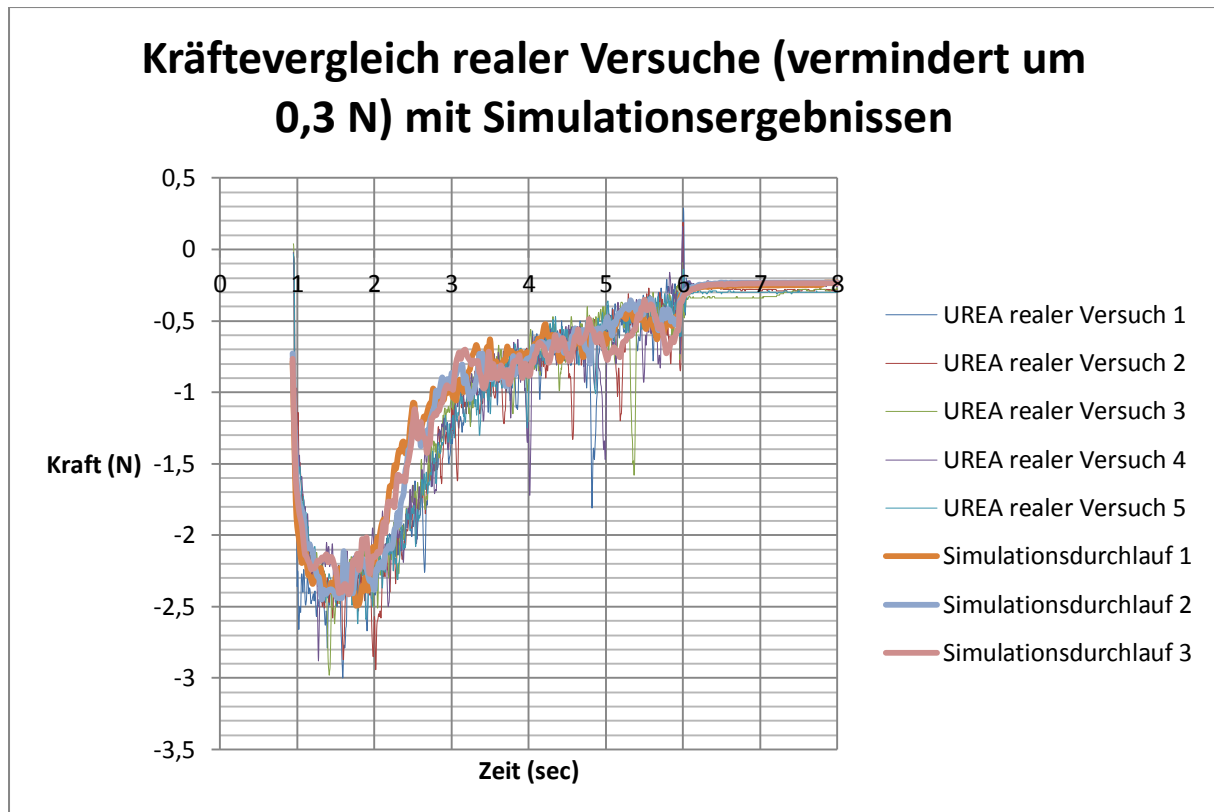


Abbildung 100: Schiebkräftevergleich zwischen realen und simulierten Ergebnissen (Urea)

Die Kraftverläufe für das Urea sind quantitativ sowie qualitativ recht gut übereinstimmend. Man sieht, dass die maximale Kraft zur gleichen Zeit auftritt. Nur im mittleren Fenster des Zeitintervalls zeigt die Kraft in der Simulation niedrigere Werte an.

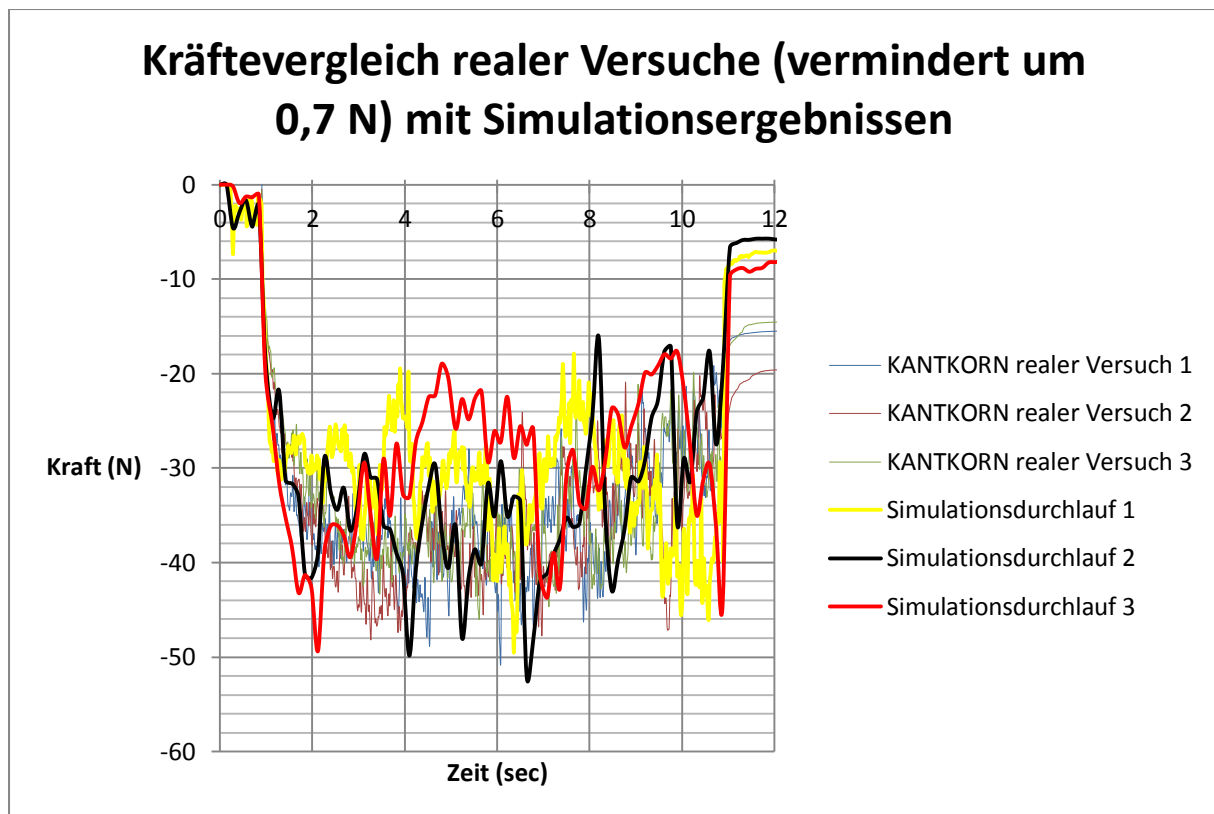


Abbildung 101: Schiebekräftevergleich zwischen realen und simulierten Ergebnissen (Kantkorn)

Für die Kantkörner wurde ebenfalls ein relativ gutes Ergebnis erzielt. Das Offset für die realen Versuche beträgt hier 0,9 Sekunden. Die maximale Kraft in der Simulation entspricht der im realen Versuch. Lediglich der zeitliche Verlauf schwankt in der Simulation relativ stark. In der anfänglichen Phase ist die Kraft sogar etwas niedriger. Doch nach einer gewissen Zeit, nachdem sich die Partikel mehr oder weniger geordnet haben, stimmen die Kraftverläufe gut überein.

Im weiterfolgenden sind Screenshots aus der Simulation mit Fotoaufnahmen des realen Schüttguts verglichen.



Abbildung 102: y-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Urea)



Abbildung 103: x-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Urea)

In der Abbildung 102 und Abbildung 103 ist zu sehen, dass die Kontur der Schüttung in der Simulation relativ genau der des realen Schüttguts entspricht. In der ersten Abbildung muss dabei die Kontur an der Auffangbehälterwand und im zweiten die sichtbare Kontur (Mitte der Schüttung) betrachtet werden, da die Blickrichtung der Bilder aus der Simulation normal zu einer Hauptebene (x-z oder y-z) ist. In den nachfolgenden Abbildungen wird der Schütthaufen in der oberen Box verglichen. Man sieht auch hier eine relativ gute Übereinstimmung.

Für das Kantkorn können ähnliche Aussagen getroffen werden. Der Schütthaufen im Auffangbehälter in der Simulation entspricht dem des realen Ergebnisses (Abbildung 104 & Abbildung 105). Die Schüttspitze in der oberen Box besitzt einen Abstand zur Boxinnenwand, welches auch im realen Versuch beobachtet wurde (Abbildung 106).

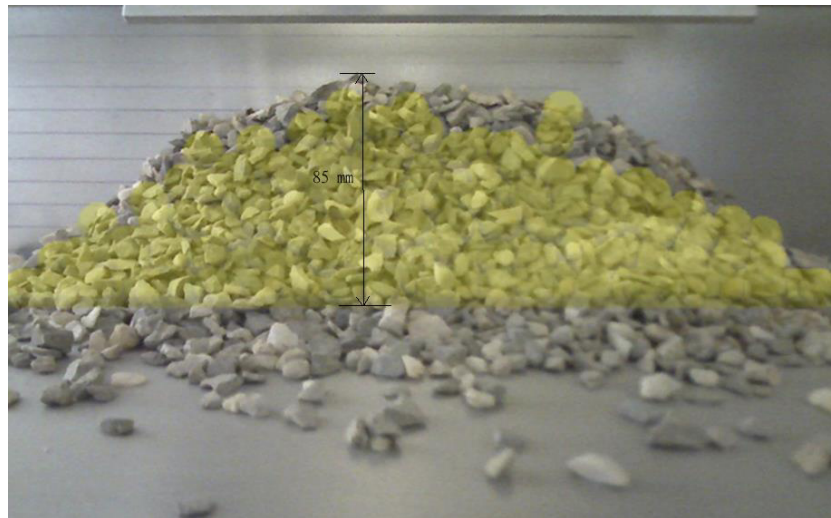


Abbildung 104: y-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Kantkorn)



Abbildung 105: x-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Kantkorn)



Abbildung 106: Schütthaufen in der oberen Box (Kantkorn)

Schlussendlich wurde festgestellt, dass die Partikelmodelle das gewünschte Verhalten der realen Schüttgüter für diese Versuchsanlage in angemessener Genauigkeit (<10%) widerspiegelt. Um zu zeigen, dass diese Modelle Allgemeingültigkeit besitzen, wurden diverse Versuche durchgeführt, die im nachfolgenden Kapitel erläutert sind.

8 Validation

8.1 Dynamischer Böschungswinkel

Für die Bewertung der Simulationsmodelle wurde der Versuch zur Beobachtung des dynamischen Böschungswinkels, der von Herrn Christoph Kogler an der FH Wels entwickelt wurde, herangezogen [45]. Das Ziel der Arbeit in Wels war die vertikale Bewegung eines Fördergutteilchens beim Durchlaufen eines Gurtabschnittes zwischen zwei Tragrollen zu beschreiben. Aus diesen Überlegungen wurde dann ein mechanischer Aufbau (Abbildung 107) hergestellt, der diese Vertikalbewegung nachbilden sollte. Der Prüfstand besteht aus folgenden Baugruppen:

1. Gestell
2. Trichter
3. Schüttgutplatte mit Führung
4. Antrieb
5. Messeinrichtung

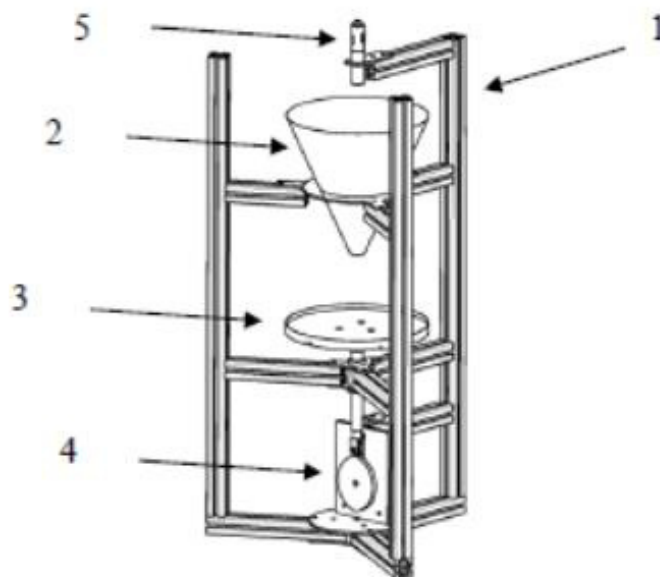


Abbildung 107: Prüfstand zur Ermittlung der dynamischen Böschungswinkel [45]

Der Prüfstand soll es ermöglichen den statischen und den dynamischen Böschungswinkel zu erfassen. Dazu wird das Schüttgut mit Hilfe eines Trichters aus einer bestimmten Höhe auf eine kreisrunde Platte fallen gelassen. Nach Durchlaufen des Schüttguts wird der Trichter entfernt und ein Ultraschallsensor wird eingeschwenkt. Dieser misst die Höhe des Schüttkegels. Zusammen mit dem Radius der Platte kann schließlich der Böschungswinkel berechnet werden. Die erste

Messung ergibt den statischen Böschungswinkel. Um den dynamischen Böschungswinkel zu ermitteln, ist der Prüfstand eine Rüttleinrichtung eingebaut. Die Bewegung der Rüttelung entspricht der Bewegung eines Förderbandes. Weitere Details zum Prüfstand und Messdurchführung sind in [45] zu finden.

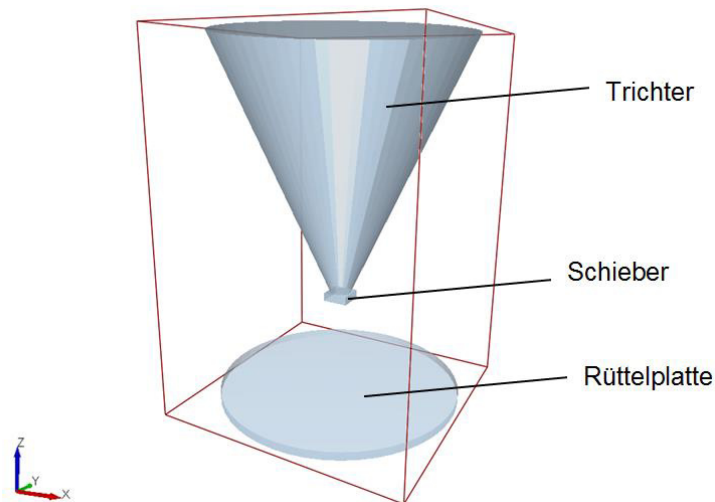


Abbildung 108: EDEM-Geometrie des dynamischen Böschungswinkelversuchs

Der Prüfstand wurde in EDEM aus einfachen Geometrien nachgebildet (Abbildung 108). Die Dimensionen und Materialien entsprechen denen im Realen. Lediglich wurde die Austrittsöffnung des Trichters an die Partikelgröße angepasst, um eine gleiche Austrittsbedingung (Geschwindigkeit) wie in der Realität zu erzielen. Z.B. wurde bei der Beobachtung des Verhaltens des Ureamodells die Austrittsöffnung des Trichters um den Faktor drei vergrößert, da der Größenunterschied der realen Schüttgutteilchen zum Partikelmodell den Faktor drei besitzt. Es wurde eine vereinfachte Dynamik für die Schüttgutplatte vorgegeben, als in der Arbeit von Herrn Kogler beschrieben. Der kurze Abschnitt am Rollenübergang wurde vernachlässigt. In der Tabelle 27 ist eine Periode angegeben. Diese wird solange wiederholt bis eine Gesamtdauer von 16 Sekunden erreicht ist. Die Bewegung entspricht einer Förderung des Schüttguts auf einem Förderband mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s, einem Rollenabstand von 1m und einem Krümmungsradius von 12,5 m.

$$v_{Band} = 3 \text{ m/s} \dots\dots\dots \text{Förderbandgeschwindigkeit}$$

$$l_{Rollen} = 1 \text{ m} \dots\dots\dots \text{Rollenabstand}$$

$$p = 12,5 \text{ m} \dots\dots\dots \text{Krümmungsradius}$$

Periodendauer T:

$$T = \frac{l_{\text{Rollen}}}{v_{\text{Band}}} = \frac{1 \text{ m}}{3 \text{ m/s}} = \frac{1}{3} \text{ s}$$

Halbe Periode $t_{1/2}$:

$$t_{1/2} = \frac{T}{2} = \frac{1}{6} \text{ s} \approx 0,16 \text{ s}$$

Geschwindigkeit v_y und Beschleunigung a_y :

$$v_y = \frac{v_{\text{Band}}^2 * t_{1/2}}{p} = \frac{(3 \text{ m/s})^2 * 0,16 \text{ s}}{12,5 \text{ m}} = 0,1152 \text{ m/s}$$

$$a_y = \frac{v_{\text{Band}}^2}{p} = \frac{(3 \text{ m/s})^2}{12,5 \text{ m}} = 0,72 \text{ m/s}^2$$

Dauer	Beginn	Geschwindigkeit	Beschleunigung
0,16 s	50 s	0 m/s	0,72 m/s ²
0,16 s	50,16 s	-0,1152 m/s	0,72 m/s ²

Tabelle 27: Dynamikvorgaben für die Rüttelplatte in EDEM

Die Schwingungsanregung beginnt erst nach 50 Sekunden, damit genügend Zeit für das Ausfließen des Schüttguts aus dem Trichter bleibt. Nach 66 Sekunden wird die Simulation beendet. Das Messen der Böschungswinkel wurde mit der Software MB-Ruler durchgeführt. Sie erfolgte ähnlich, wie es im realen Experiment durchgeführt wurde. D.h. die maximale Höhe der Schüttung wurde abgemessen und mit dem Radius der Schüttgutplatte konnte der Winkel ermittelt werden (Abbildung 109).

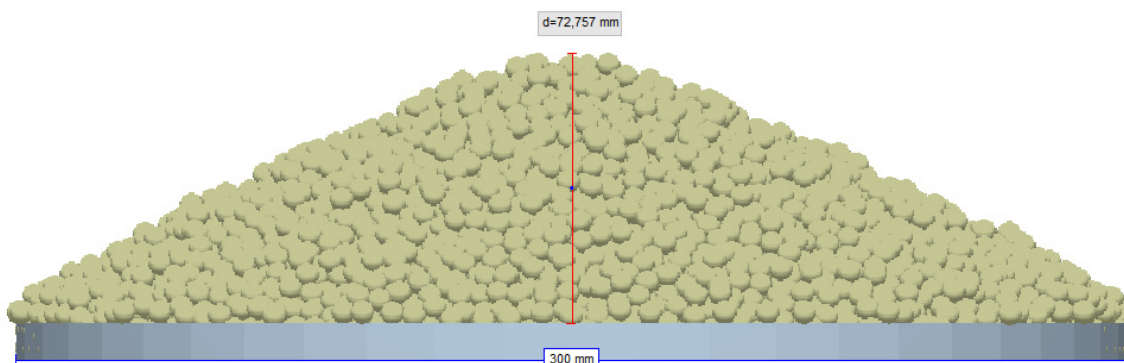


Abbildung 109: Ermittlung des Böschungswinkels im EDEM mit MB-Ruler

UREA

In der Tabelle 28 sind die Messergebnisse für Urea aufgelistet. Die erste Messung entspricht der Messung des statischen Böschungswinkels.

Rüttelzeit	Böschungswinkel (Durchschnitt)
0 s	26,1°
0,32 s	24°
0,64 s	22,5°
0,96 s	21,7°
1,28 s	21,3°
1,6 s	20,7°
1,92 s	20°
2,24 s	19,5°
3,2 s	18°
4,16 s	17,3°
5,44 s	16,5°
6,72 s	15,6°
8 s	15,2°
9,28 s	14,6°
10,56 s	14,3°
13,12 s	13,9°
16 s	13,3°

Tabelle 28: Dynamischer Böschungswinkel in EDEM (Urea)

Rüttelzeit	Böschungswinkel			Durchschnitt
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	
0 s	27,1°	29,5°	28,8°	28,5°
10 s	19,4°	19,4°	21,7°	20,2°
20 s	17,1°	18,4°	18,4°	18°

Tabelle 29: Realer dynamischer Böschungswinkel (Urea) [45]

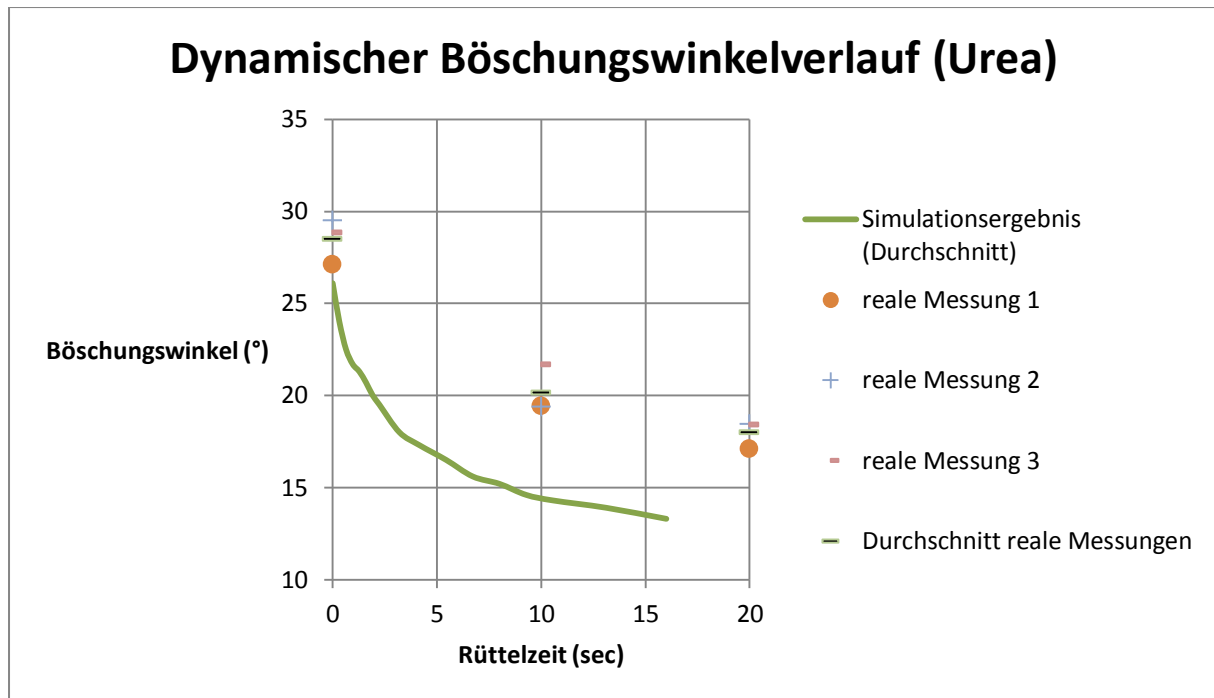


Abbildung 110: Dynamischer Böschungswinkelverlauf (Urea)

Die Kurve für den Böschungswinkel aus der Simulation ist der Durchschnitt aus drei Simulationsdurchläufen. Die Winkelabweichung zwischen den Simulationen betrug nicht mehr als ein Grad. Der Vergleich mit den realen Versuchen zeigt, dass der statische Böschungswinkel gut übereinstimmt. Allerdings stimmt der dynamische Böschungswinkel nach 10 bzw. 20 Sekunden nicht so gut. Die Abweichung beträgt maximal 5° zum Durchschnitt des realen Experiments. Den Böschungswinkel in der Simulation für den Zeitpunkt nach 20 Sekunden kann durch gedankliche Fortsetzung der Kurve grob mit 13° angenommen werden. Doch die Abweichung von 5° ist noch in der annehmbaren Grenze, da die Messungenauigkeit für das Simulationsmodell $\pm 1^\circ$ beträgt und zudem im realen Experiment teils grobe Abweichungen stattfanden, vor allem bei kugeligen Partikeln, sodass die Experimente neu gestartet werden musste [45].

Die folgenden Abbildungen zeigen Gegenüberstellungen des Experiments mit der Simulation. Zu erwähnen ist dass die Abbildung des realen Schüttguts in Abbildung 112 nach einer Schwingungszeit von 150 Sekunden gilt. In der Simulation wurden lediglich 16 Sekunden beobachtet. Deswegen soll diese Gegenüberstellung nur den Trend der Schüttkegelkontur (Erzeugenden des Schüttguthaufens) vergleichen. In der Simulation sind die Erzeugenden des dynamischen Schüttguthaufwerks konkav gekrümmt, so wie es im realen Experiment beobachtet wurde.

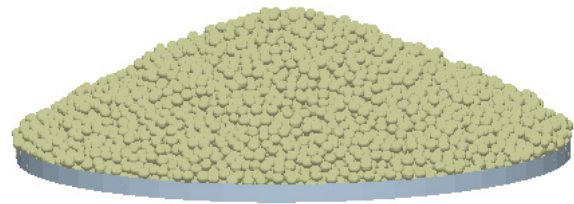


Abbildung 111: Statischer Schüttkegel (Urea)

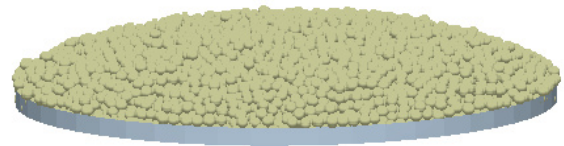


Abbildung 112: Dynamischer Schüttkegel (Urea); li. 150 s Rüttelzeit; re. 16 s Rüttelzeit

Kantkorn

Rüttelzeit	Böschungswinkel (Durchschnitt)
0 s	38,9°
0,32 s	38,2°
0,64 s	37,1°
0,96 s	36,3°
1,28 s	35,1°
1,6 s	34,7°
1,92 s	34,6°
2,24 s	34,4°
3,2 s	34°
4,16 s	33,6°
5,44 s	33,2°
6,72 s	32,6°
8 s	32,2°
9,28 s	31,6°
10,56 s	30,8°
13,12 s	28,7°
16 s	28°

Tabelle 30: Dynamischer Böschungswinkel in EDEM (Kantkorn)

Rüttelzeit	Böschungswinkel			Durchschnitt
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	
0 s	40,6°	41,3°	40,7°	40,9°
10 s	28,4°	31,7°	31,7°	30,6°
20 s	28,5°	30,2°	28,5°	29 °

Tabelle 31: Realer dynamischer Böschungswinkel (Kantkorn) [45]

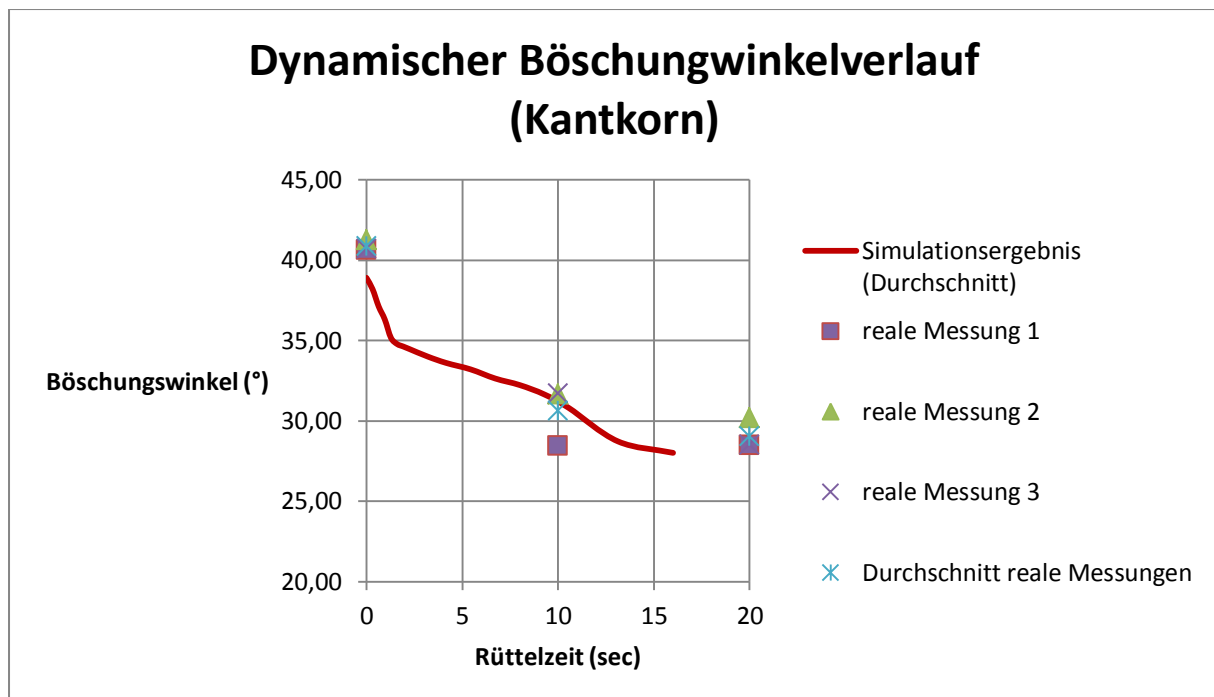


Abbildung 113: Dynamischer Böschungswinkelverlauf (Kantkorn)

Im Falle des Kantkorns stimmen die Simulationsergebnisse für den Böschungswinkel recht gut mit dem realen Experiment überein. Der statische Böschungswinkel stimmt um 2° nicht überein.

Die folgenden Abbildungen zeigen, analog wie beim Ureaschüttgut, Gegenüberstellungen zwischen Experiment und Simulation. Hierbei gilt wie vorhin, dass in der zweiten Gegenüberstellung nur der Trend des Schüttguthaufwerks betrachtet wird. Die Erzeugenden des dynamischen Schüttguthaufwerks in der Simulation bilden wie die Ureapartikel ebenfalls eine konkave Krümmung, welches im realen Experiment auch beobachtet wurde.

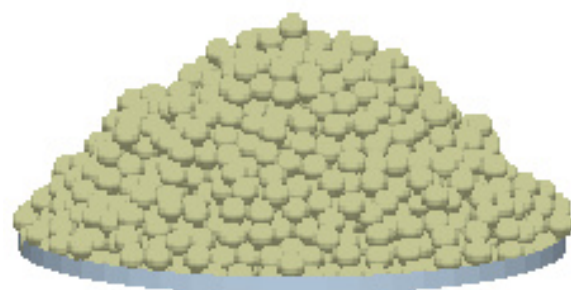


Abbildung 114: Statischer Schüttkegel (Kantkorn)



Abbildung 115: Dynamischer Schüttkegel (Kantkorn); li. 150 s Rüttelzeit; re. 16 s Rüttelzeit

8.2 Statischer Böschungswinkelversuch 2

Für das Ureaschüttgut wurde neben dem vorhin erwähnten Versuch ein weiterer Versuch zur Ermittlung und Vergleich des statischen Böschungswinkels herangezogen. Dieser Versuch ist sehr simpel aufgebaut. In dem Versuch wird die kleine obere Box auf einer Stahlplatte platziert und mit Ureapartikeln gefüllt. Anschließend wird die Box mit einer konstanten Geschwindigkeit angehoben, sodass die Partikel einen Schütthaufen bilden können (Abbildung 116). Mit Hilfe einer Kamera und einer Höhenskala konnte die Geschwindigkeit ermittelt. Die Höhe des Schütthaufens wurde mit Hilfe eines dünnen Kupferdrahtes, welches in der Mitte der Schüttung eingetaucht wurde, gemessen. Zusätzlich wurde die Ausbreitung des Haufens in zwei Richtungen mit einem Messschieber gemessen (Abbildung 117). Mit diesen Längen und der Schütthöhe konnte der Böschungswinkel errechnet werden. Der exakt gleiche Versuch wurde in EDEM durchgeführt und die Maße mit MB-Ruler gemessen. Die Geschwindigkeit zum Hochheben der Box betrug 0,03 m/s. Die Tabelle 32 zeigt die Ergebnisse aus diesem Versuch.

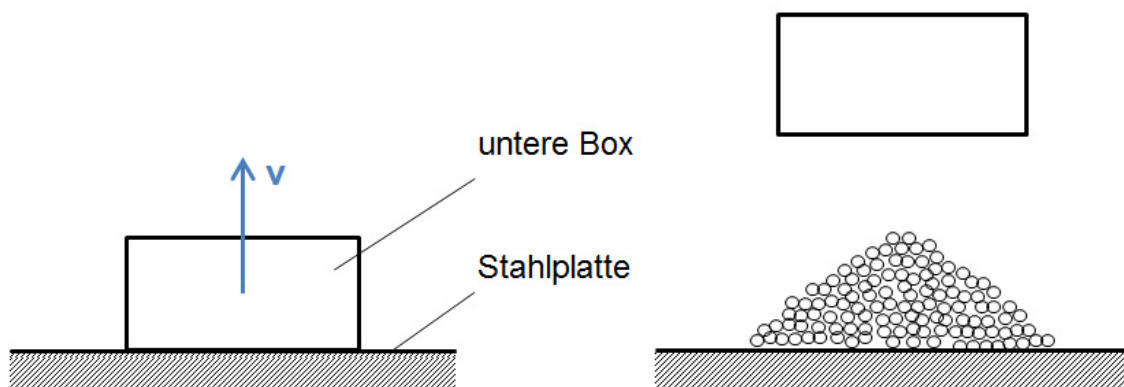


Abbildung 116: Statischer Böschungswinkelversuch 2

	Reales Experiment	Simulation
Schütthöhe	44 mm	45 mm
Länge 1	220 mm	215 mm
Länge 2	223 mm	216 mm
Böschungswinkel 1 ³	21,8°	22,7°
Böschungswinkel 2 ⁴	21,5°	22,6°

Tabelle 32: Ergebnisse des statischen Böschungswinkelversuchs 2

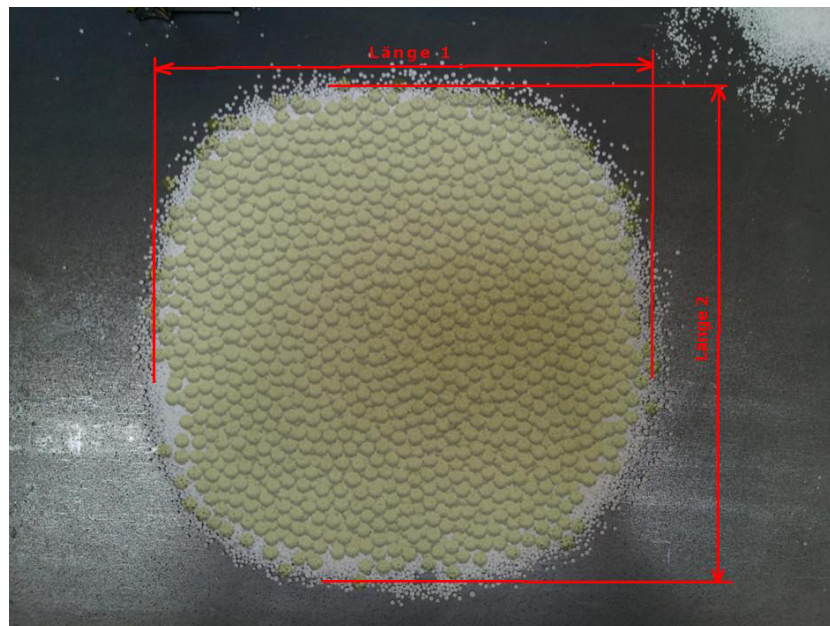


Abbildung 117: Vergleich Simulation mit realem Experiment (statischer Böschungswinkelversuch 2) – Grundriss



Abbildung 118: Vergleich Simulation mit realem Experiment (statischer Böschungswinkelversuch 2) – Seitenansicht

Aus Tabelle 32, Abbildung 117 und Abbildung 118 geht hervor, dass die Simulationsergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen des realen Versuchs übereinstimmen.

$$^3 \text{ Böschungswinkel 1} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Schütthöhe}}{\frac{\text{Länge 1}}{2}} \right)$$

$$^4 \text{ Böschungswinkel 2} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Schütthöhe}}{\frac{\text{Länge 2}}{2}} \right)$$

8.3 Schieben der Box mit Schüttgut auf einer Stahlplatte

Dieser Validationsversuch diente der Überprüfung der Aussagekraft einer mechanischen Größe (Schiebekraft) des Partikelmodells. Der Versuch bestand darin, dass die obere Box (klein) mitsamt dem Schüttgut auf einer Stahlplatte verschoben und die Schiebekraft für diese Verschiebung gemessen wird. Dieser Versuch wurde an der Versuchsanlage durchgeführt, um die Komponenten (Kraftmessdose, Motor, etc.) zu nutzen. Für die Versuchsdurchführung wurde die untere Box umgedreht, sodass die plane Seite oben lag. Auf diese wurde eine Stahlplatte und die obere Box platziert. Die obere Box musste an die Linearführungen leicht angeschraubt werden, damit die Pressung auf die Stahlplatte nicht so hoch wurde. Zuerst verschob man die obere Box ohne Schüttgut um die Reibkraft zwischen Box und Stahlplatte zu bestimmen. Anschließend füllte man die obere Box mit dem Schüttgut und verschob diese. Die daraus gemessenen Kraftverläufe Abzug der Reibkraft ist in der Abbildung 120 im Vergleich mit dem in der Simulation bestimmten Kraftverlauf dargestellt. Die Verläufe haben einen minimalen Unterschied, sodass aus diesem Versuch auch abgeleitet werden kann, dass das Partikelmodell die Realität gut widerspiegelt. Als Fazit aus den diversen Validationsversuchen und den Simulationsergebnissen aus dem Versuch mit der Versuchsanlage kann festgestellt werden, dass die Partikelmodelle mit den gewählten Parametern und somit die Parameterbestimmung im Gesamten genau genug ist, um eine Genauigkeit der Simulationsergebnissen mit den realen Versuchsergebnissen von $\pm 10\%$ zu erreichen.

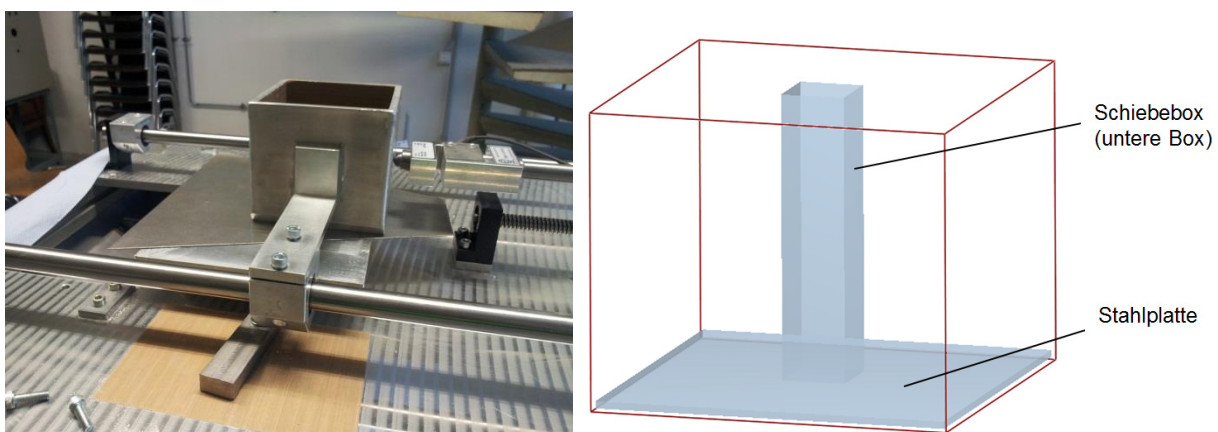


Abbildung 119: Schiebeversuch; li. real; re. EDEM-Modell

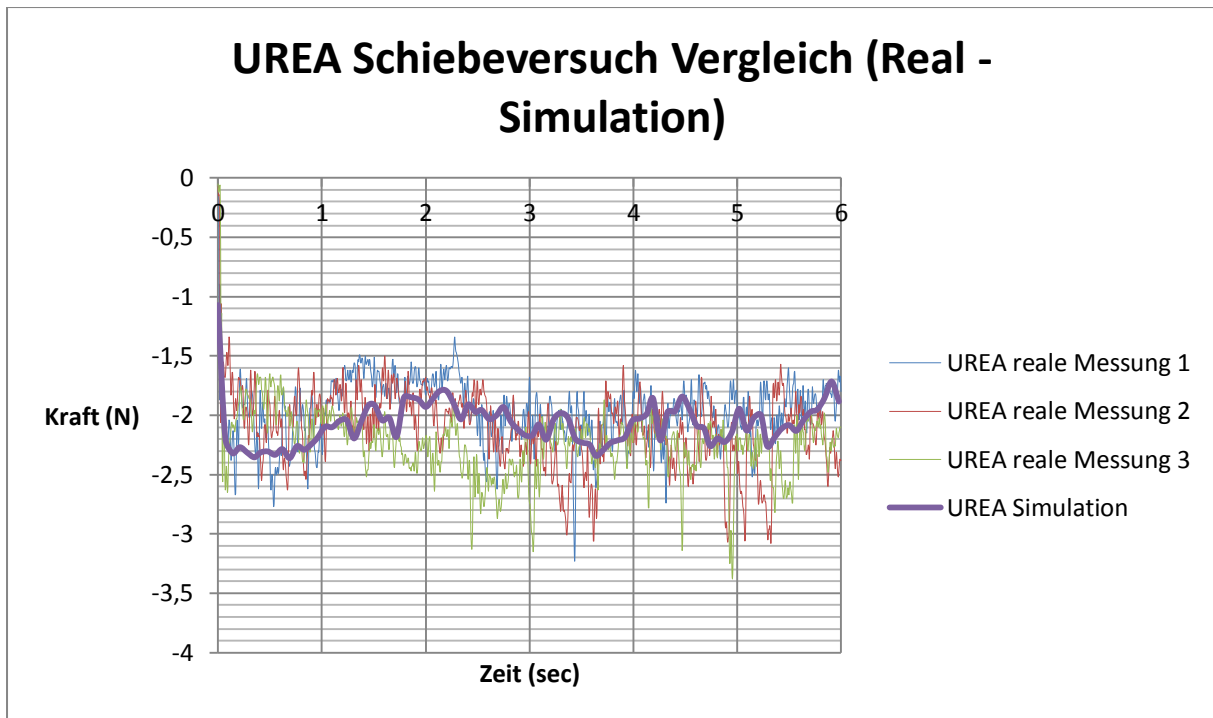


Abbildung 120: Reale und simulierte Kräfteverläufe aus dem Schiebeversuch

9 Weitere Erkenntnisse

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Feststoffdichte und des Restitutionskoeffizienten auf den Böschungswinkel und die Schiebekraft untersucht. Ausgehend von einem willkürlichen Simulationsmodell (siehe unten) wurden die genannten Parameter variiert und die Ergebnisse betrachtet.

Partikelradius = 8 mm; $\nu_{Pa} = 0,3$; $\nu_{St} = 0,3$; $G_{Pa} = 6 * 10^6 N/m^2$; $G_{St} = 7 * 10^{10} N/m^2$

$\rho_{Pa} = 1500 kg/m^3$; $\rho_{St} = 7800 kg/m^3$; $e_{Pa-Pa} = 0,1$; $e_{Pa-St} = 0,2$

$\mu_{st_Pa-Pa} = 0,5$; $\mu_{st_Pa-St} = 0,5$; $\mu_{R_Pa-Pa} = 0,25$; $\mu_{R_Pa-St} = 0,1$

Dichte

Das Simulationsmodell wurde mit Feststoffdichten 750, 1500, 3000 und 6000 kg/m³ eingestellt und untersucht. In den folgenden Abbildungen sollen die Böschungswinkel verglichen werden.

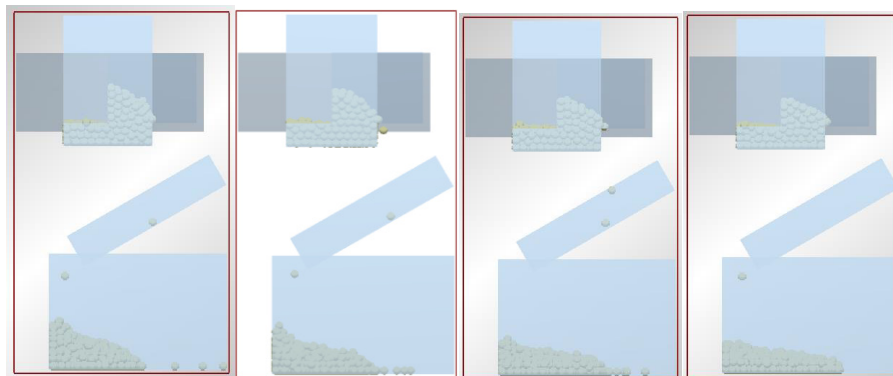


Abbildung 121: EDEM Screenshots zur Vergleich der Böschungswinkel

Aus dem Vergleich kann eine Tendenz festgestellt werden. Nämlich mit größeren Feststoffdichten werden flachere Böschungswinkel erzielt. Der Einfluss auf die Schiebekraft ist in der Abbildung 122 dargestellt.

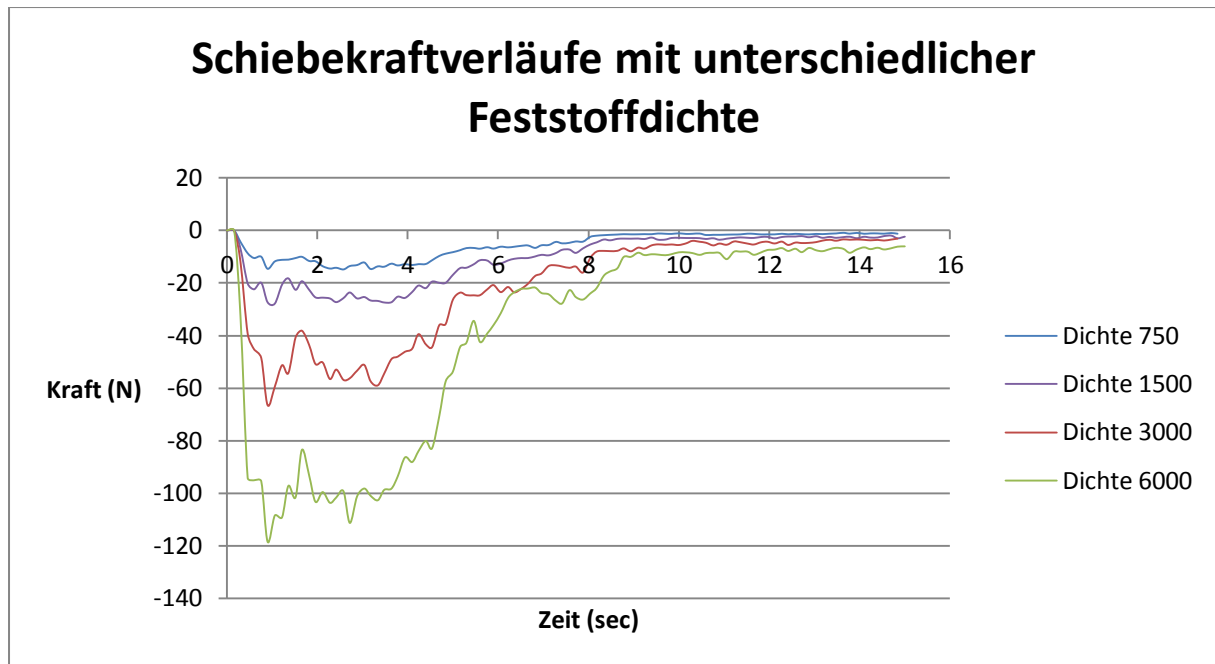


Abbildung 122: Schiebekraftverläufe (Feststoffdichte)

Wie schon zu erwarten war, steigt die Schiebekraft mit größer werdender Feststoffdichte. Die Abbildung 123 stellt eine gute Vergleichsmöglichkeit dar. Hierbei sind die Schiebekräfte mit den unterschiedlichen Feststoffdichten bezogen auf die Schiebekraft mit der Feststoffdichte 1500 kg/m³ dargestellt.

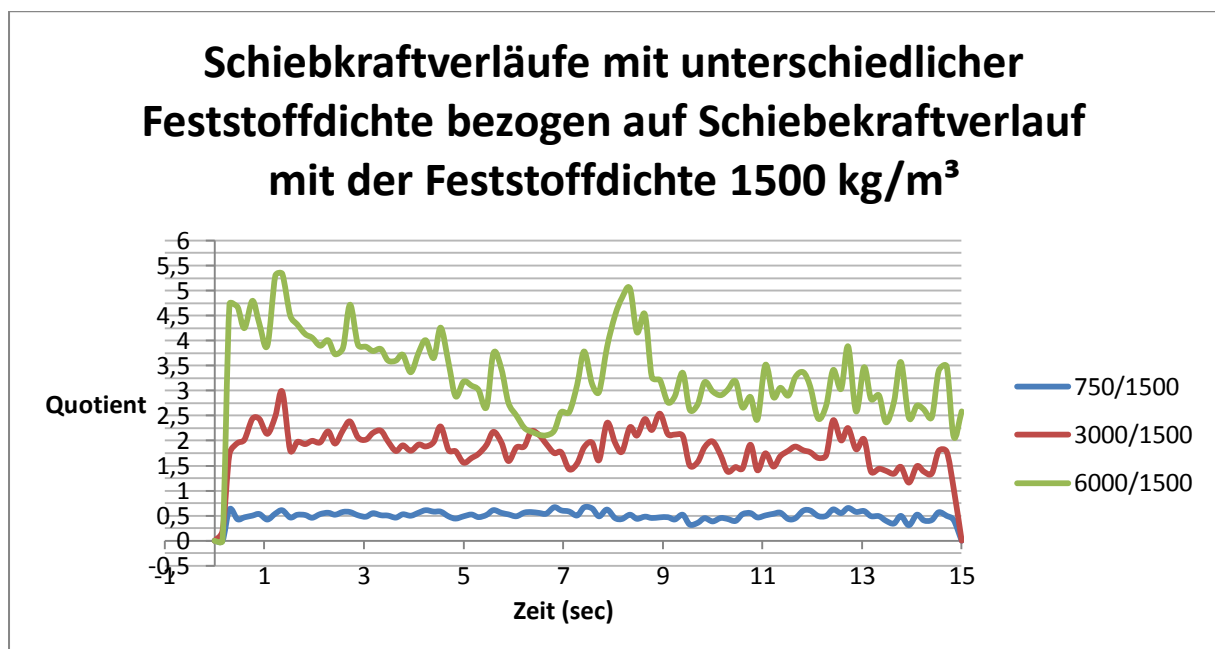


Abbildung 123: Schiebekraftverläufe (Feststoffdichte) bezogen auf Feststoffdichte von 1500 kg/m³

Man sieht, dass die Schiebekräfte um den gleichen Faktor erhöht bzw. erniedrigt werden, wie der Unterschied der Feststoffdichten zueinander. Z.B. bei Verdoppelung

der Feststoffdichte von 1500 kg/m^3 auf 3000 kg/m^3 wird die Schiebekraft um den Faktor 2 größer, also sie wird ebenfalls verdoppelt. Jedoch je größer die Kräfte werden desto mehr schwanken sie und die Aussage zuvor stimmt dann nicht mehr so ganz überein.

Restitutionskoeffizient

Beim Restitutionskoeffizient wurde festgestellt, dass diese keine Auswirkung auf die Schiebekraft besitzt, zumindest nicht bei den meisten Schüttgütern zu erwartenden Restitutionskoeffizienten. Die Abbildung 124 zeigt dazu einen Vergleich der Kräfte mit unterschiedlichen Restitutionskoeffizienten.

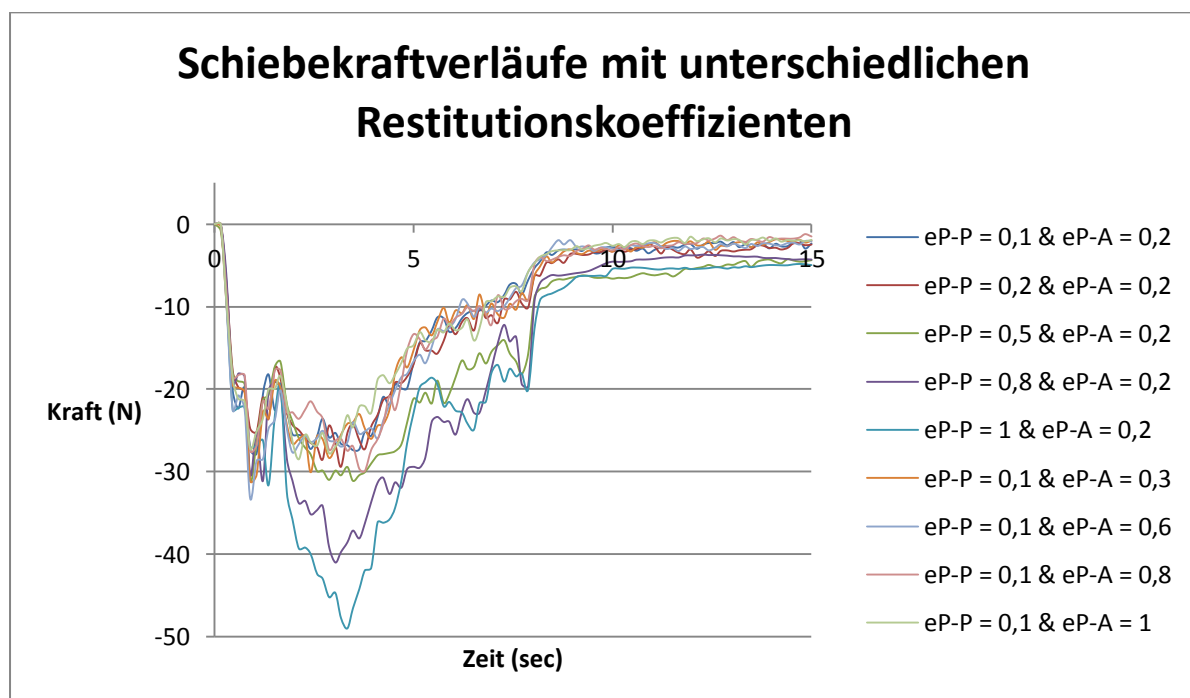


Abbildung 124: Schiebekraftverläufe (Restitutionskoeffizienten)

In den Simulationen wurde der Restitutionskoeffizient e_{P-A} zwischen Partikel und Aluminium konstant gehalten und der Restitutionskoeffizient e_{P-P} von der Partikel-Partikel Wechselwirkung variiert und umgekehrt. Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, dass der Wert für Partikel-Aluminium auf die Schiebekraft keine großen Auswirkungen hat. Dies war auch zu erwarten, da der Schiebewiderstand größtenteils durch die Interaktion der Partikel zueinander entsteht. Eine Veränderung der Kraft ist ab einem Restitutionskoeffizient e_{P-P} von 0,5 zu beobachten. Der Böschungswinkel hingegen wird bei größeren Restitutionskoeffizienten flacher, da die Partikel voneinander oder von der Wand wegprallen und dadurch sich im Raum gut verteilen.

10 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Diskreten Elemente Methode für Schüttgüter in der Fördertechnik. Die Entwicklung dieser Methode gelang Peter A. Cundall im Jahre 1979. Damals stellte er die DEM als numerische Berechnungsmethode für Partikelsysteme vor. Der grundlegende Gedanke ist dabei, dass für jedes diskrete Partikel abwechselnd die Newton'schen Bewegungsgleichungen und das Kraft-Bewegungs-Gesetz angewendet werden. Ursprünglich galt die bodenmechanische Berechnung als Antrieb für die Methode. Doch in den laufenden Jahren wurde ihr Anwendungsbereich stets erweitert, sodass auch Simulationen in der Fördertechnik durchgeführt werden. Der große Nachteil dabei ist allerdings die Festlegung der Materialparameter in der Simulation. Die Genauigkeit der DEM Modelle hängt wesentlich von der Wahl der Parametern ab. Doch diese sind in den meisten Fällen unbekannt, da für jede Anwendung ein individuelles Partikelmodell verwendet wird. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die unbekannt Parameterwerte des Schüttguts für die Simulation zu bestimmen. Dies soll mit Hilfe einer Versuchsanlage durch Beobachtung des Schüttgutverhaltens geschehen. Es sollen dabei mechanische sowie geometrische Eigenschaften in Betracht gezogen werden. Diese Ergebnisse dienen dann als Vergleich mit den Ergebnissen von DEM-Simulationen. Die Problematik der schon vorhandenen Kalibrieranlagen ist, dass eine Versuchsanordnung nicht ausreicht, um die Schüttgutparameter eindeutig zu bestimmen. Es können mehrere Parameterkombinationen möglich sein, um das beobachtete Verhalten in der Kalibrieranlage auch in der Simulation zu erreichen. Die Anforderung für die zu entwickelnde Versuchsanlage lautete somit, dass eine eindeutige Parameterbestimmung möglich sein soll. Um dies zu erlangen, mussten möglichst viele Größen, die das Schüttgutverhalten beschreiben, sogenannte Zielgrößen, in der Versuchsanlage betrachtet werden. Die Abweichung dieser Zielgrößen in der Simulation von den realen Ergebnissen sollte nicht mehr als $\pm 10\%$ betragen.

Am Anfang dieser Arbeit wird der grundsätzliche Aufbau der DEM beschrieben. Hierbei wird der Berechnungszyklus der DEM dargestellt. Ein wesentlicher Punkt der DEM ist die Länge eines Zeitschritts. Denn diese darf nicht zu kurz und nicht zu lang gewählt werden. Eine optimale Auswahl ist in Kapitel 2.1 gegeben.

Anschließend wird auf die Bestimmung der Materialparameter für die DEM Modelle eingegangen. Im Kapitel 3 werden vorerst die vorhandenen Methoden zur Bestimmung dieser Parameter vorgestellt. Im Folgenden wird dann, die für diese Arbeit entwickelte Versuchsanlage beschrieben. Es werden die wesentlichen Komponenten und Eigenschaften der Anlage sowie die zur Versuchsdurchführung verwendeten Computerprogramme erläutert. In den Kapiteln 4.3 und 4.4 werden die wesentlichen Punkte, die bei der Versuchsdurchführung zu beachten sind, und die Messergebnisse beschrieben. Als Schüttgut kamen dabei Urea und Kantkörner mit der Körnung 4/8 zum Einsatz.

Die Simulationen werden mit Hilfe des Softwares EDEM Academic 2.4 der Firma DEM Solutions durchgeführt. Die Besonderheit des EDEM Softwares ist die benutzerfreundliche Bedienung und der zahlreichen Möglichkeiten der visuellen und quantitativen Analyse eines Problems.

Im Kapitel 6 ist die Vorgehensweise für die Optimierung der Materialparameter in EDEM Schritt für Schritt erläutert. Ausgehend von den vorzugebenden Parametern für die Simulation werden diese in bekannte und unbekannte Parametern eingeteilt. Mit den unbekannt Parametern wird dann ein statistischer Versuchsplan erstellt (Kapitel 6.2), um eine mathematisch durchdachte Reihe von Simulationen mit möglichst wenigen Versuchen aufzustellen, mit denen das Gesamtverhalten des Systems analysiert und die Parameter optimiert werden können. Mit den optimierten Parametern werden nochmals Simulationen durchgeführt und mit den Ergebnissen des Laborversuches verglichen (Kapitel 7).

Zum Schluss sind drei Validationsversuche durchgeführt worden, um eine genaue Bewertung der Partikelmodelle zu bekommen. Als Fazit daraus kann abgeleitet werden, dass die Methode zur Bestimmung der Parameter die gewünschte Genauigkeit von $\pm 10\%$ erreicht. Im letzten Kapitel sind einige weitere Erkenntnisse aus der Simulation aufgelistet.

11 Ausblick

In künftigen Arbeiten ist eine Validation der Simulationsmodelle durch Großversuche an realen Schüttgutanlagen vorgesehen. Zum Beispiel kann die Antriebsleistung eines Schneckenförderers oder einer Bunkeraustragsschnecke mit Hilfe der Computersimulation bestimmt und mit einem Realversuch verglichen werden. Über dies hinaus sollen weitere Partikelmodelle für unterschiedliche Schüttgüter (Betonbruch, Quarzsand, Mischkies, etc.) mit Hilfe der Versuchsanlage bestimmt werden. Ein wesentlicher Punkt dabei ist die Betrachtung von kohäsiven Schüttgütern. Für diese werden in der Simulation k-Faktoren angegeben, um den Grad der Kohäsion festzulegen. Es stellt sich dabei die Frage, ob die Partikelmodelle solcher Schüttgüter mit der Versuchsanlage alleine bestimmt werden können oder, ob zusätzlich ein weiterer Kalibrierversuch durchgeführt werden muss?

V. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_element_method [Zugriff am 10.03.2013]
- [2] F. KRAUSE, A. KATTERFELD: *Einsatz der Diskreten Elemente Methode in der Schüttgut-Fördertechnik*.
Tagungsband „Interpartner 2003“; Polytechnische Universität Charkov, Alushta 2003
- [3] H. JESCHKE, A. KATTERFELD: *Computersimulation von Zerkleinerungsprozessen mit Hilfe der Diskreten Elemente Methode*.
In: Fachtagung Baumaschinentechnik 2009 . - Frankfurt am Main : FVB, S. 151-160;
Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen; 37 Kongress:
Fachtagung Baumaschinentechnik; 2009 (Dresden)
- [4] A. GRIMA, P. WYPYCH: *Discrete element simulation of a conveyor impact-plate transfer: calibration, validation and scale-up*.
Wollongong, University of Wollongong, Faculty of Engineering, Australian Bulk Handling Review: May/June 2010
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Harnstoff> [Zugriff am 22.06.2013]
- [6] T. GRÖGER, A. KATTERFELD: *Kalibrierung von DEM-Simulationsmodellen für die Schüttgutfördertechnik*.
Wissensportal baumaschinen.de, Ausgabe 04/2005
- [7] F. KRAUSE, A. KATTERFELD: *Einsatz der Diskreten Elemente Methode in der Schüttgut-Fördertechnik*.
Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Projektantrag, 2003
- [8] T. WEHRY: *3D-Simulationsmodell für bewegte Schüttgüter mit unregelmäßig geformten Partikeln*.
Schriftenreihe der Verfahrenstechnik, Paderborn, Universität Paderborn, Band 33,
Shaker Verlag, 2008
- [9] A. WONISCH: *Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationstechniken für die Modellierung von Unordnungseffekten und Anisotropieentwicklung in pulvertechnologischen Prozessen*.
Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Dissertation, Shaker Verlag, 2008
- [10] R. WEILER, M. RIPP, G. DAU, S. RIPPERGER: *Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode zur Simulation des Verhaltens von Schüttgütern*.
In: Chemie Ingenieur Technik, Vol. 81, Nr. 6, 2009, S. 749-757
- [11] <http://www.scribd.com/doc/45199035/2-DEM-I-II-basicTheory-algorithms>
[Zugriff am 02.03.2013]
- [12] http://www.ovgu.de/ivt/tvt/media/6a3a9decbbafe2b/dem_skript_englisch.pdf
[Zugriff am 02.03.2013]

- [13] F. V. DONZÉ, V. RICHEFEU, S.-A. MAGNIER: *Advances in Discrete Element Method applied to Soil, Rock and Concrete Mechanics*.
In: state of the art of geotechnical engineering. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009
- [14] L. LI, R. M. HOLT: *Particle Scale Reservoir Mechanics*.
In: Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 57 (2002), No. 5, S.525-538
- [15] N. DAS: *Modeling three-dimensional shape of sand grains using Discrete Element Method*.
Florida, University of South Florida, Dissertation, 2007
- [16] http://www.ovgu.de/ivt/tvt/media/6a3a9decbbafe2b/dem_skript_englisch.pdf
[Zugriff am 02.03.2013]
- [17] S. ANTONYUK: *Deformations- und Bruchverhalten von kugelförmigen Granulaten bei Druck- und Stoßbeanspruchung*.
Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 2006
- [18] Y. KALKAN: *Anwendungsmöglichkeiten der Diskreten Elemente Methode (DEM) für Schüttgüter in der Fördertechnik*.
Wien, Technische Universität Wien, Bachelorarbeit, 02/2012
- [19] A. GRIMA, P. WYPYCH: *Discrete element simulation of granular pile formation, Method for calibrating discrete element models*.
Wollongong, University of Wollongong, Faculty of Engineering,
International Journal for Computer-Aided Engineering and Software, Vol. 28, No. 3, 2011, pp.314-339
- [20] J. ROJEK, F. ZARATE, C.A. DE SARACIBAR, C. GILBOURNE, P. VERDOT: *Discrete element modelling and simulation of sand mould manufacture for the lost foam process*.
International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 62, No. 11, 2005, pp.1421-41
- [21] Y. Li, Y. XU, C. Thornton: *A comparison of discrete element simulations and experiments for sandpiles composed of spherical particles*.
Powder Technology, Vol. 160, No. 3, 2005, pp.219-28
- [22] H.T. CHOU, C.F. LEE, Y.C. CHUNG, S.S. HSIAU: *Discrete element modelling and experimental validation for the falling process of dry granular steps*.
Powder Technology 231, 2012, S.122-134
- [23] J.T. KALALA, M.M. BWALYA, M.H. MOYS: *Discrete element method (DEM) modelling of evolving mill liner profiles due to wear. Part I: DEM validation*.
Johannesburg, University of the Witwatersrand, School of Process and Materials Engineering,
Minerals Engineering 18, 2005, S.1386-1391

- [24] P. PANDEY, Y. SONG, F. KAYIHAN, R. TURTON: *Simulation of particle movement in a pan coating device using discrete element modeling and its comparison with video-imaging experiments.*
Powder Technology 161, 2006, S.79-88
- [25] <http://de.nanotec.com/products/228-redirect/?cHash=1> [Zugriff am 15.05.2013]
- [26] *Benutzerhandbuch NanoPro, Steuerungssoftware für Schrittmotorsteuerung und Plug & Drive Motoren.*
Nanotec Electronic GmbH & Co KG, 2011, Version 2.2
- [27] *Bedienungsanleitung für Kraftsensoren.*
Lorenz Messtechnik GmbH, 090272, 2007
- [28] *Bedienungsanleitung für Sensorinterface LCV-USB2.*
Lorenz Messtechnik GmbH, 090205h_LCV-USB2_de, 2011
- [29] *Bedienungsanleitung für Konfigurations- und Auswertesoftware VS2.*
Lorenz Messtechnik GmbH, 090312d, 2011
- [30] *EDEM Tutorial: Screw Auger Simulation.*
DEM Solutions, Revision 2.0/1
- [31] <http://de.wikipedia.org/wiki/Poissonzahl> [Zugriff am 20.09.2013]
- [32] <http://de.wikipedia.org/wiki/Schubmodul> [Zugriff am 20.09.2013]
- [33] <http://de.wikipedia.org/wiki/Stahl> [Zugriff am 20.09.2013]
- [34] <http://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium> [Zugriff am 20.09.2013]
- [35] <http://www.stanford.edu/~tyzhu/Documents/Some%20Useful%20Numbers.pdf>
[Zugriff am 21.09.2013]
- [36] C.J. COETZEE, D.N.J. ELS: *Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling.*
Computers and electronics in agriculture 65, 2009, S.198-212
- [37] D. MEINTRUP: *Statistischer Versuchsplanung mit JMP – von der Klassik zur Moderne.*
Ingolstadt, Hochschule Ingolstadt, Fakultät Maschinenbau
- [38] <http://www.crgraph.de/Mischungsplan.pdf> [Zugriff am 15.08.2013]
- [39] M. KAPITZA: *Design of experiments. Seminar „Robust Design“*
Köln, Universität zu Köln, WS 2008/09
- [40] <http://de.wikipedia.org/wiki/Konfidenzintervall> [Zugriff am 16.08.2013]
- [41] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3363.htm> [Zugriff am 16.08.2013]

- [42] <http://www.versuchsmethodik.de/plaene/box.htm> [Zugriff am 16.08.2013]
- [43] *Design of Experiments Guide*.
JMP, SAS Institute Inc., Version 10, 2012, ISBN 978-1-61290-196-1
- [44] <http://de.wikipedia.org/wiki/Bestimmtheitsma%C3%9F> [Zugriff am 20.08.2013]
- [45] C. KOGLER: *Prüfstandsentwicklung zur Messung des dynamischen Böschungswinkels*.
Wels, Fachhochschule Oberösterreich, Bachelorarbeit, 07/2012

VI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Berechnungszyklus [7].....	10
Abbildung 2: Rayleigh-Zeit über Überlappung δ [12].....	12
Abbildung 3: Partikelgeometrien.....	13
Abbildung 4: 2D-Modellierung eines Sandpartikels mittels überlappenden Kreisen (Klumpen) [15].....	14
Abbildung 5: Kontaktmodell [17].....	15
Abbildung 6: li. Schwungarmversuch; re. Hochziehen des Behälters [19].....	16
Abbildung 7: Trichterauslaufversuch [19].....	17
Abbildung 8: DEM-Modell des Schwungarmversuchs [19].....	18
Abbildung 9: Gemessene und in DEM angesetzte Reibwerte für die Partikel-Wand-Interaktion [19].....	19
Abbildung 10: Ermittlung der Rollreibung [4]	19
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Versuchs mit dem neigbaren Behälter [22].....	20
Abbildung 12: DEM-Parameter für Polystyrol Perlen [22].....	21
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Rieselverhaltens von Polystyrol Perlen [22].....	22
Abbildung 14: Aufnahme vom Laborversuch für: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 5^\circ$; (c) $\theta = 10^\circ$ [22]	22
Abbildung 15: Aufnahme von der DEM-Simulation für: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 5^\circ$; (c) $\theta = 10^\circ$ [22].....	22
Abbildung 16: DMS an einer Erhebung in der Mühle [23].....	23
Abbildung 17: Rotierende Trommel (oben Simulation; unten Laborversuch); Darstellung des dynamischen Schüttwinkels [24].....	24
Abbildung 18: Rutschversuch [22].....	26
Abbildung 19: Schüttwinkelversuch [22]	26
Abbildung 20: Fallversuch [22]	27
Abbildung 21: Prinzipskizze Versuchsanlage	28
Abbildung 22: Versuchsanlage; li. Schiebevorrichtung, re. untere und obere Box ...	29
Abbildung 23: Versuchsanlage; li. Schrittmotor, re. Kraftsensor	30
Abbildung 24: Versuchsanlage; li. Niederhalter und Anschläge; re. Anschlag für Rutsche	30

Abbildung 25: Versuchsanlage; li. & re. Rutsche und Auffangbehälter	30
Abbildung 26: Gesamtansicht der Versuchsanlage	31
Abbildung 27: Motorkennlinie PD ϕ -N5918L4204 [25]	34
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Motoransteuerung	34
Abbildung 29: NanoPro 1.7 Oberfläche	35
Abbildung 30: Motoreinstellungen	36
Abbildung 31: Anzeigeneinstellungen.....	36
Abbildung 32: Ausgänge.....	37
Abbildung 33: Modus.....	39
Abbildung 34: Typen von Kraftaufnehmern [27]	40
Abbildung 35: obere Box	40
Abbildung 36: Entstehung der Reibkraft bei Relativbewegung der Schiebestange ..	42
Abbildung 37: Darstellung des Winkelfehlers [27]	43
Abbildung 38: Druckstück.....	43
Abbildung 39: Messverstärker 1m-LCV/DMS-2m-USB [28].....	44
Abbildung 40: VS2 Oberfläche	45
Abbildung 41: Sensorverbindung.....	46
Abbildung 42: Sensorinformation.....	46
Abbildung 43: Messeinstellungen	47
Abbildung 44: Ablaufdiagramm Triggerung [29]	48
Abbildung 45: Dokumentation.....	49
Abbildung 46: Mess- und Diagrammmodus.....	50
Abbildung 47: Navigierleiste	50
Abbildung 48: Anlagenkonfiguration (Maße).....	51
Abbildung 49: Abmessungen für oberen Böschungswinkel (Urea).....	53
Abbildung 50: Auftreffpunkt (Urea)	53
Abbildung 51: Böschungswinkel im Auffangbehälter (Urea)	54
Abbildung 52: Schütthöhe im Auffangbehälter (Urea)	54
Abbildung 53: Reale Schiebekraftverläufe (Urea).....	55
Abbildung 54: Reale Schiebekraftverläufe ohne Schüttgut (kleine Box)	55
Abbildung 55: Schiebekraftverläufe vermindert um 0,3 N (Urea).....	56
Abbildung 56: Abmessungen für oberen Böschungswinkel (Kantkorn)	58
Abbildung 57: Auftreffpunkt (Kantkorn).....	58
Abbildung 58: Schütthöhe im Auffangbehälter (Kantkorn)	59

Abbildung 59: Ausbreitung im Auffangbehälter (Kantkorn)	59
Abbildung 60: Reale Schiebekraftverläufe (Kantkorn)	60
Abbildung 61: Reale Schiebekraftverläufe ohne Schüttgut (große Box)	60
Abbildung 62: Schiebekraftverläufe vermindert um 0,7 N (Kantkorn)	61
Abbildung 63: EDEM Geometrie der Versuchsanlage (kleine Ausführung)	63
Abbildung 64: Schütthaufen in der oberen Box	65
Abbildung 65: EDEM Geometrie der Versuchsanlage (große Ausführung)	65
Abbildung 66: reales Ureapartikel.....	66
Abbildung 67: Partikelmodelle für das Kantkorn	68
Abbildung 68: reale Kantkornpartikel.....	68
Abbildung 69: Eingabeparameter	72
Abbildung 70: Fallversuch	78
Abbildung 71: Prozessmodell	81
Abbildung 72: Zwei mögliche Versuchspläne für zwei Faktoren mit fünf Experimenten	82
Abbildung 73: li. lineare Funktion (low, high); re. quadratische Funktion	86
Abbildung 74: Central Composite Design [37]	86
Abbildung 75: Central Composite Face-Centered (zwei Faktoren) [39].....	87
Abbildung 76: Central Composite Circumscribed (zwei Faktoren) [39].....	88
Abbildung 77: Box-Behnken Versuchsplan [39].....	89
Abbildung 78: JMP Hauptfenster	92
Abbildung 79: li. Zielgrößen und Faktoreneinstellungen); re. Designauswahl in JMP (Urea)	93
Abbildung 80: Ausschnitt der erstellten Datentabelle für den Versuchsplan	93
Abbildung 81: Batch-File.....	94
Abbildung 82: dfg-Konfiguration	94
Abbildung 83: Messungen mit MB-Ruler	95
Abbildung 84: li. Ausführen der Berechnung; re. Modellspezifikation (Urea)	96
Abbildung 85: Beobachteter Schüttwinkel in der oberen Box über vorhergesagtem Wert.....	96
Abbildung 86: Übersicht der Anpassung.....	98
Abbildung 87: Parameterschätzer für Schüttwinkel in der oberen Box sortiert nach ihrer Signifikanz	98
Abbildung 88: Ausschnitt aus der Vorhersageformel	98

Abbildung 89: Modellübersicht (li. Schiebekraft, mi. Schüttwinkel im Auffangbehälter, re. Auftreffpunkt).....	99
Abbildung 90: Parameterschätzer für Schiebekraft sortiert nach ihrer Signifikanz ...	99
Abbildung 91: Parameterschätzer für Schüttwinkel im Auffangbehälter sortiert nach ihrer Signifikanz	100
Abbildung 92: Parameterschätzer für Auftreffpunkt sortiert nach ihrer Signifikanz ..	100
Abbildung 93: Prediction Profiler (Urea)	101
Abbildung 94: Optimierungseinstellungen (Urea)	102
Abbildung 95: Zielgrößen und Faktoreneinstellungen; li. oberer Bereich; re. unterer Bereich (Kantkorn).....	103
Abbildung 96: Modellübersicht (Kantkorn oberer Bereich).....	104
Abbildung 97: Optimierungseinstellungen (Kantkorn, oberer Bereich)	104
Abbildung 98: Modellübersicht (Kantkorn unterer Bereich).....	104
Abbildung 99: Optimierungseinstellungen (Kantkorn, unterer Bereich)	105
Abbildung 100: Schiebekräftevergleich zwischen realen und simulierten Ergebnissen (Urea)	108
Abbildung 101: Schiebekräftevergleich zwischen realen und simulierten Ergebnissen (Kantkorn).....	109
Abbildung 102: y-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Urea)	110
Abbildung 103: x-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Urea)	110
Abbildung 104: y-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Kantkorn)	111
Abbildung 105: x-z Ansicht des Böschungswinkels im Auffangbehälter (Kantkorn)	111
Abbildung 106: Schütthaufen in der oberen Box (Kantkorn).....	111
Abbildung 107: Prüfstand zur Ermittlung der dynamischen Böschungswinkel [45]..	112
Abbildung 108: EDEM-Geometrie des dynamischen Böschungswinkelversuchs....	113
Abbildung 109: Ermittlung des Böschungswinkels im EDEM mit MB-Ruler.....	114
Abbildung 110: Dynamischer Böschungswinkelverlauf (Urea)	116
Abbildung 111: Statischer Schüttkegel (Urea)	117
Abbildung 112: Dynamischer Schüttkegel (Urea); li. 150 s Rüttelzeit; re. 16 s Rüttelzeit.....	117
Abbildung 113: Dynamischer Böschungswinkelverlauf (Kantkorn).....	119
Abbildung 114: Statischer Schüttkegel (Kantkorn)	119
Abbildung 115: Dynamischer Schüttkegel (Kantkorn); li. 150 s Rüttelzeit; re. 16 s Rüttelzeit.....	120

Abbildung 116: Statischer Böschungswinkelversuch 2.....	120
Abbildung 117: Vergleich Simulation mit realem Experiment (statischer Böschungswinkelversuch 2) - Grundriss.....	121
Abbildung 118: Vergleich Simulation mit realem Experiment (statischer Böschungswinkelversuch 2) – Seitenansicht.....	121
Abbildung 119: Schiebeversuch; li. real; re. EDEM-Modell.....	122
Abbildung 120: Reale und simulierte Kräfteverläufe aus dem Schiebeversuch.....	123
Abbildung 121: EDEM Screenshots zur Vergleich der Böschungswinkel.....	124
Abbildung 122: Schiebekraftverläufe (Feststoffdichte)	125
Abbildung 123: Schiebekraftverläufe (Feststoffdichte) bezogen auf Feststoffdichte von 1500 kg/m ³	125
Abbildung 124: Schiebekraftverläufe (Restitutionskoeffizienten)	126

VII. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Aussagen der Leuchtenkombinationen [26]	37
Tabelle 2: Baudrate – Messrate [29].....	46
Tabelle 3: Anlagenkonfiguration	51
Tabelle 4: Messergebnisse obere Box (Urea)	52
Tabelle 5: Zusammengefasste Messergebnisse (Urea)	56
Tabelle 6: Messergebnisse obere Box (Kantkorn)	57
Tabelle 7: Zusammengefasste Messergebnisse (Kantkorn)	61
Tabelle 8: Dynamik der Geometrien in EDEM (kleine Ausführung)	63
Tabelle 9: Materialeigenschaften	64
Tabelle 10: Dynamik der Geometrien in EDEM (große Ausführung)	65
Tabelle 11: Größenbereich der Partikelradien für die beiden Ausführungen	67
Tabelle 12: Einstellungen für die Partikelgenerierung	70
Tabelle 13: Allgemeine Simulationseinstellungen.....	71
Tabelle 14: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	75
Tabelle 15: Querkontraktionszahl und Schubmodul der Schüttgüter	75
Tabelle 16: Gewichtsmessungen.....	76
Tabelle 17: Eingabeparameter im Überblick.....	80
Tabelle 18: Einige Versuchspläne für Optimierungsmodelle	86
Tabelle 19: Benötigte Einzelerperimente für Central Composite und Box-Behnken [41].....	89
Tabelle 20: Faktoren für den Versuchsplan	91
Tabelle 21: Zusammenfassung der optimalen Parameter (Urea)	102
Tabelle 22: Endgültige Materialkennwerte (Urea).....	102
Tabelle 23: Zusammenfassung der optimalen Parameter (Kantkorn)	105
Tabelle 24: Labormessergebnisse.....	106
Tabelle 25: Simulationsergebnisse	106
Tabelle 26: Prozentuale Abweichungen der Simulationsergebnisse von den realen Ergebnissen.....	107
Tabelle 27: Dynamikvorgaben für die Rüttelplatte in EDEM	114
Tabelle 28: Dynamischer Böschungswinkel in EDEM (Urea)	115
Tabelle 29: Realer dynamischer Böschungswinkel (Urea) [45]	115
Tabelle 30: Dynamischer Böschungswinkel in EDEM (Kantkorn).....	118

Tabelle 31: Realer dynamischer Böschungswinkel (Kantkorn) [45]118
Tabelle 32: Ergebnisse des statischen Böschungswinkelversuchs 2121

VIII. ANHANG

- Datenblatt Schrittmotor
- Datenblatt Zug-Druck-Kraftsensor
- Prüfzertifikat Zug-Druck-Kraftsensor
- Datenblatt USB-Isolator
- Excel-Makro (CD)

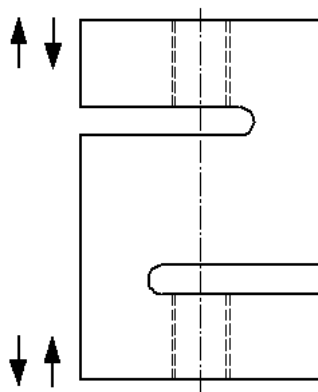
Zug - und Druckkraftsensor

K- 25

Tension and Compression Force Sensor

- Messbereich 0,02 ... 50 kN
- Für Zug- und Druckkraft
- Hohe Genauigkeit
- Preisgünstige Ausführung
- Schutzart IP67 (IP60)

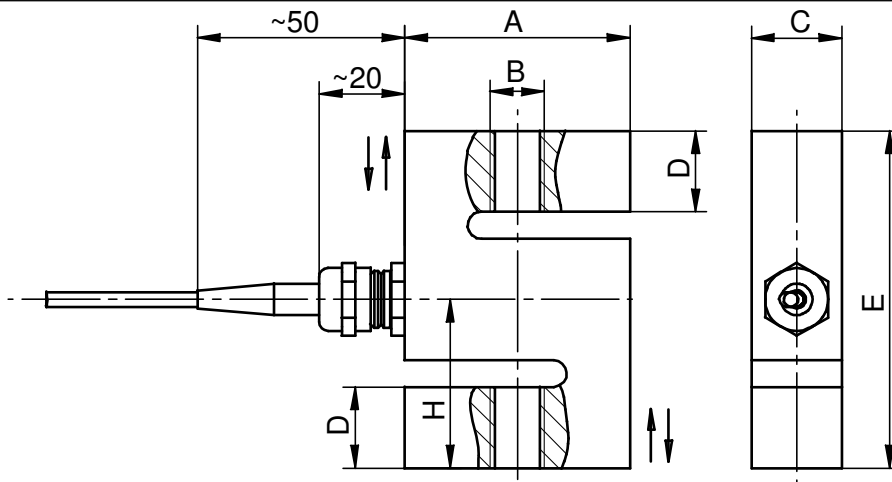
- Measuring range 0.02 ... 50 kN
- For tension force and compression force
- High accuracy
- Low cost type
- Level of protection IP67 (IP60)



Anschlussbelegung - Connection	
Versorgung (-) - Supply (-)	Grün - Green
Versorgung (+) - Supply (+)	Braun - Brown
Signal (+) - Signal (+)	Gelb - Yellow
Signal (-) - Signal (-)	Weiß - White
Kontrolle (Option) - Calibration control (option)	Grau - Grey
Schirm - Shield	Schirm - Shield

Mechanische Abmessungen - Dimensions

K-25



Alle Maße in mm – All dimensions in mm

Messbereich - Measuring range [kN]	A	B	C	D	E	H
0,02 / 0,05 / 0,1 / 0,2 / 0,5 / 1 / 2 / 5 / 10 ¹⁾	50	M12	20	18	75	37,5
20 / 50	65	M24 x 2	39,5	22	85	42,5

TECHNISCHE DATEN - SPECIFICATIONS

Typ - Type	K-25			
Messbereich - Measuring range	kN	0,02	0,05 ... 1	2 ... 50
	kg	2	5 ... 100	200 ... 5000
Nennkennwert (S) - Sensitivity (S)	mV/V	1,00	2,00	
Genauigkeitsklasse Zugkraft oder Druckkraft - Accuracy class tension force or compression force	S%	0,1		
Genauigkeitsklasse Zugkraft und Druckkraft - Accuracy class tension force and compression force	S%	0,2		
Gebrauchslast - Service load	S%	130		
Grenzlast - Limit load	S%	150		
Bruchlast - Ultimate load	S%	>300		
Max. dynam. Belastung - Max. dyn. load (DIN 50 100)	S%	70		
Unempfindlichkeit gegen Seitenkräfte - Lateral force resistance	S%	50		
Nennmessweg - Position feedback	mm	<0,25		
Brückenwiderstand - Bridge resistance	Ω	350		
Isolationswiderstand - Insulation resistance	Ω	>2*10 ⁹		
Speisespannung - Supply voltage	V	2 ... 12		
Max. Speisespannung - Max. supply voltage	V	15		
Kennwerttoleranz - Tolerance of sensitivity	S%	<±0,1		
Temp.koeff. des Kennwertes - Temp. coeff. of sensitivity	S%/10K	<±0,12		
Temp.koeff. des Nullsignals - Temp. coeff. of zero signal	S%/10K	<±0,04		
Referenztemperatur - Reference temperature	°C	+23		
Nenntemperaturbereich - Nominal temperature range	°C	0 ... +60	-10 ... +70	
Gebrauchstemperaturbereich - Service temperature range	°C	-10 ... +70	-30 ... +80	
Lagerungstemperaturbereich - Storage temperature range	°C	-30 ... +95	-50 ... +95	
Veränderlichkeit - Repeatability	S%	0,08		
Rel. Kriechen - Rel. creep	S%/30min	<±0,06		
Werkstoff - Material	Aluminium - Aluminum		Rostbeständiger Edelstahl - Stainless steel	
Schutzart - Level of protection (DIN EN 60529)	IP60		IP67	
Elektrischer Anschluss - Electrical connection	3 m, freien Lötenden - 3 m, free soldered ends			

Optionen/ Zubehör - Options/ Accessory

Kontrolle - Calibration control	S%	100
6-Leitertechnik - 6-wire connection		
¹⁾ Überlastschutz - Overload protection	Zugkraft und Druckkraft - Tension force and compression force	
Gelenköse Typ EM Datenblatt Nr. 080374 - Rod end type EM data sheet no. 080374		

Bitte den gewünschten Messbereich und die Genauigkeitsklasse angeben! Please specify the required meas. range and accuracy class!

Prüfzertifikat

Document of calibration

Typ / Type : K - 25
Ser. Nr./ Ser. No : 123935
Kunde / Customer : Gatterbauer Messtechnik e.U.
Lastrichtung / Load direction :..... Zug (+), Druck (-) / Tension (+), Compression (-)
Kalibrierrichtung / Calibration direction : Zug (+) / Tension (+)

Kalibrieraufbau / Testequipment

Kalibriereinrichtung / Calibration rig : Totlast / dead load Speisegerät / Power supply : E1185/ PC
Messgerät / Measuring device : E1185/ PC+Software Referenz / Reference :

Technische Daten / General specifications

Messbereich / Range : +/- 50 N
Genauigkeitsklasse für Zug oder Druck / Accuracy class for tension or compression: 0,1 %
Genauigkeitsklasse für Zug und Druck / Accuracy class for tension and compression: 0,2 %
Nennkennwert / Nominal signal : 20000 digits
Nullsignal / Zero signal : 0 digits
Brückenwiderstand / Bridge resistance : 350 Ω
Grenzlast / Limit load : 150 S%
Bruchlast / Ultimate load : >300 S%
Isolationswiderstand / Insulation resistance :..... > 2000 MΩ
Kabellänge / Length of cable : 1+LCV+2 m

Anschlussbelegung / connection

Anschluss USB 2

Option, Bemerkung / Option, Remarks

LCV-USB Firmware Rev.7

100% Kontrollsignal

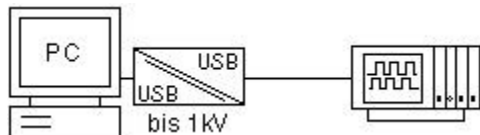
Prüfer / Inspector : 

Datum /Date: 02.Mai 2013

Die oben ausgewiesenen Messwerte wurden auf einer Prüfeinrichtung ermittelt, deren jedes einzelne Messmittel einer regelmäßigen Prüfung unterliegt. Es ist somit die Rückführbarkeit nach ISO 9000 ff gewährleistet.
All measuring values in this document are executed with a regular proofed calibration equipment. So that the lead back to ISO 9000 ff are guaranteed.

Datenblatt:

USB-Isolator 1kV



Applikation:
Potentialtrennung für USB



USB-Isolator mit
1kV Isolationsspannung, #33001

Produkt-Eigenschaften:

- Galvanisch getrennte Verbindung zweier Geräte mit USB-Schnittstellen
- Isolationsspannung min. 1000 Volt DC
- Unterstützt Low Speed- und Full Speed- USB-Geräte
- In USB-Kabel integrierte Lösung zum Zwischenstecken
- Netzteil im Lieferumfang enthalten
- Externe Spannungsversorgung für die Downstream-Seite ermöglicht den Anschluss leistungshungriger USB-Geräte
- Normen-Konform_sowohl in Büro- als auch in Industrieumgebungen:
 - erhöhte Störfestigkeit für industrielles Umfeld
 - strengere Störemission für Wohn- und Geschäftsbereiche
- 5 Jahre Garantie

Hintergrundwissen:

USB-Schnittstellen in stationären Rechnern weisen leider den grundsätzlichen Nachteil auf, über keine galvanische Trennung der Signalleitungen zu verfügen.

In vielen Applikationen der Consumer-Welt ist diese Einschränkung nicht relevant, da die an den PC angeschlossenen USB-Geräte in der Regel über den Bus versorgt werden und nicht über zusätzliche Anschlüsse Bezug zu einer zweiten Masse oder zum Schutzleiter aufweisen.

In den Bereichen Messwerterfassung, Steuerungstechnik oder z.B. Medizintechnik ist eine galvanische Entkopplung der verbundenen Geräte jedoch unerlässlich, um gegenseitige Beeinflussungen durch Ausgleichsströme über die USB-Leitung auszuschließen.

Zu diesem Zweck bietet W&T eine Familie von USB-Isolatoren an, die sich in der mechanischen Ausführung sowie in Spannungsversorgung und Höhe der Isolationsspannung unterscheiden.

Technische Daten:

Isolation: min. 1 KV DC
USB-Geschwindigkeit: Konfigurierbar: Low Speed (1,5 MBit/s), Full Speed (12 MBit/s)
Stromversorgung: 5V DC aus mitgeliefertem Netzteil
Stromaufnahme: Upstream-Port: max. 8 mA
USB-Anschlüsse: Eingang: USB A -Stecker mit 25 cm Kabel
Ausgang: USB A - Buchse in Gehäuse integriert
Umgebungstemperatur: Isolator: Lagerung: -40..+70°C, Betrieb: 0..+70°C
Netzteil: Lagerung: -40..+70°C, Betrieb: 0..+40°C
Zulässige Luftfeuchtigkeit: 0..90% relative Feuchte (nicht kondensierend)
Gehäuse: Kunststoff-Kleingehäuse, 55 x 30 x 16mm
Gewicht: ca. 35 g
Lieferumfang: 1x USB-Isolator 1 KV
1x USB-Netzteil 5V / 0,7A
1x Versorgungskabel USB-A / Mini-USB, 5-polig