



Diplomarbeit

Ermittlung des Schöpf- und Auswurfsverhaltens von Becherwerken mittels Diskreter-Elemente-Methode

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs bzw. Master of Science unter der Leitung von

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

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Alexander Haber, BSc

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät
für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Maximilian Diegles, BSc

1026048 (066445)

Justgasse 3/3

1210 Wien

Wien, im September 2017 _____

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, September, 2017

Maximilian Diegles

Kurzfassung

Der Schöpf- und Entleerungsvorgang sind zwei zentrale Abläufe, die bei der Auslegung von Becherwerken berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Größe realer Anlagen ist besonders die Ermittlung des Schöpfwiderstandes, der während der Füllung der Becher im Becherwerksfuß auftritt, nicht einfach. Zudem besteht das Problem, dass die Kenntnis des Schöpfwiderstandes bereits vor der Realisierung der Anlage notwendig ist, um die Größe des Antriebsmotors auslegen zu können. Gleiches gilt für das Design des Auswurfbereiches. Auch hier sind nach der Fertigstellung der Anlage nur noch geringe Anpassungen möglich. Diese Arbeit widmet sich daher der Simulation des Schöpf- und Entleerungsvorganges von Becherwerken mittels der Diskreten-Elemente-Methode. Zur Einordnung der Simulationsergebnisse werden diese mit den Ergebnissen realer Versuche verglichen beziehungsweise anhand von theoretischen Überlegungen überprüft.

Abstract

The processes of scooping and discharging are two essential operations, which must be considered during the design process of bucket elevators. Due to the dimensions of real bucket elevators, the measurement of the scooping resistance during the filling process of the buckets is especially difficult. Additionally, it is important to know the scooping resistance before building the plant in order to be able to choose the correct size of the prime motor. The same problem is encountered when designing the discharging area; after the completion of the elevator only small adjustments are possible. This work is therefore devoted to the simulation of the scooping and discharging process of bucket elevators and employs the tools of the Discrete Element Method. The accuracy of the results is proven by theoretical assumptions and by the comparison to results of real experiments.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Becherwerke	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Analyse der bisherigen Untersuchungen des Schöpfvorganges.....	5
2.1.1 Untersuchungen von Hanffstengel.....	5
2.1.2 Untersuchungen von Beumer und Wehmeier	9
2.1.3 Untersuchungen von Ellwanger	14
2.1.4 Untersuchungen von Dilefeld.....	18
2.1.5 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse.....	22
2.2 Analyse der Untersuchungen zur Becherentleerung	23
2.2.1 Einleitung.....	23
2.2.2 Entleerungsvorgang nach Beumer und Wehmeier.....	26
2.2.3 Entleerungsvorgang nach Beckert und Föll	28
2.2.4 Entleerungsvorgang nach Hellmuth.....	31
3 Die Diskrete Elemente Methode (DEM)	33
3.1 Allgemeines	33
3.2 Die Simulationssoftware LIGGGHTS.....	33
3.2.1 Einführung.....	33
3.2.2 Beschreibung des Rechenmodells.....	34
4 Kalibrierung der Schüttgutmaterialien	37
4.1 Einleitung	37
4.2 Urea.....	39
4.3 Getreide	40
4.4 Hackschnitzel.....	41
4.5 Reststoffe.....	44
5 Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS	48
5.1 Versuchsaufbau in LIGGGHTS	48
5.1.1 Einleitung.....	48
5.1.2 Abmessungen der Geometrie	49
5.1.3 Simulationsablauf	49

Einleitung

5.1.4	Simulationsauswertung.....	51
5.2	Validierung der Simulationsergebnisse	53
5.2.1	Allgemeine Validierung	53
5.2.2	Vergleich anhand von Messergebnissen	56
5.3	Auswertung der Simulationsergebnisse	59
5.3.1	Analyse der Schüttgutverteilung im Becherwerksfuß	59
5.3.2	Simulationsergebnisse zur spezifischen Schöpfarbeit	63
5.3.3	Vergleich der Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit und des Schöpfwiderstandes	66
5.3.4	Analyse der Belastungsverteilung eines Bechers	68
6	Untersuchungen zur Becherentleerung.....	72
6.1	Einleitung	72
6.2	Untersuchungen zur Einteilung der Entleerungstypen.....	73
6.3	Untersuchungen zur logarithmischen Spirale	76
6.4	Untersuchungen der Auswurfparabeln	77
6.5	Gegenüberstellung des Auswurfes der einzelnen Fördergüter	81
6.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse des Entleerungsvorganges	85
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
8	Verzeichnisse.....	89
8.1	Abbildungsverzeichnis	89
8.2	Tabellenverzeichnis	91
9	Literaturverzeichnis.....	92
A	LIGGGHTS-Quellcode.....	94
A.1	Input-Datei Getreide.....	94
A.2	Input-Datei Becherbewegung.....	100
B	Technische Zeichnungen.....	105
B.1	Fliehkraftbecher	105
B.2	Schwerkraftbecher	106
B.3	Becherwerksfuß	107
B.4	Becherwerkskopf.....	108

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit

Bei dem Entwurf von Becherwerken sind die Art der Beschickung und der Entleerung der Anlage von größtem Interesse. Vor allem die Analyse des Vorganges der schöpfenden Füllung der Becher kann durch weitere Untersuchungen vertieft werden. Der Schöpfwiderstand beziehungsweise die spezifische Schöpfarbeit ist eine zentrale Größe, die bei der Auslegung von schöpfenden Becherwerken dringend benötigt wird. Die Kenntnis der spezifischen Schöpfarbeit ist notwendig, um die Größe des Antriebsmotors eines schöpfenden Becherwerks bestimmen zu können. In der aktuellen VDI-Richtlinie ist die spezifische Schöpfarbeit lediglich für die Fördergüter Portland-Zement, Getreide, Sand, Zement-Klinker und Steinkohle angegeben [1].

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeit der Ermittlung der spezifischen Schöpfarbeit eines Becherwerks mittels der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) zu überprüfen und die spezifische Schöpfarbeit für weitere Fördergüter zu ermitteln. Außerdem sollen die üblichen Theorien der Becherentleerung mit Simulationsergebnissen verglichen werden. Dazu soll zu Beginn eine einschlägige Literaturstudie erfolgen. Anschließend wird das Modell eines Becherwerks erstellt und mittels der DEM untersucht. Zur Validierung der Ergebnisse müssen zumindest Vergleiche der Simulationsergebnisse und der realen Versuchsergebnisse eines Fördergutes erfolgen.

1.2 Becherwerke

Becherwerke werden im Rahmen der Fördertechnik vor allem als Stetigförderer zur Förderung von diversem Schüttgut eingesetzt. Die Förderung erfolgt mittels Bechern, die an einem endlosen Zugmittel, das zwischen zwei Trommeln umläuft, befestigt sind. Zurzeit findet die Realisierung von Anlagen mit einer maximalen Förderhöhe von 175 m , einer maximalen Fördermenge von $2500\text{ m}^3/\text{h}$ und einer maximalen Fördergutgeschwindigkeit von 4 m/s statt [1].

Becherwerke können grundsätzlich in Senkrecht-Becherwerke und Pendelbecherwerke eingeteilt werden. Während Senkrecht-Becherwerke das Fördergut lediglich vertikal fördern, werden mit Pendelbecherwerken sowohl vertikale als auch horizontale Förderstrecken überwunden. Die entsprechenden Gesamtansichten der Anlagen sind in Abbildung 1 dargestellt. Beim Pendelbecherwerk wird an der Position 1 das Fördergut eingeschüttet,

Einleitung

anschließend wird der Becherstrang an der Stelle 2 umgelenkt. Im Bereich 3 erfolgt die Entleerung der Becher. An dieser Stelle werden die pendelnd gelagerten Becher gekippt und somit das Fördergut ausgeworfen.

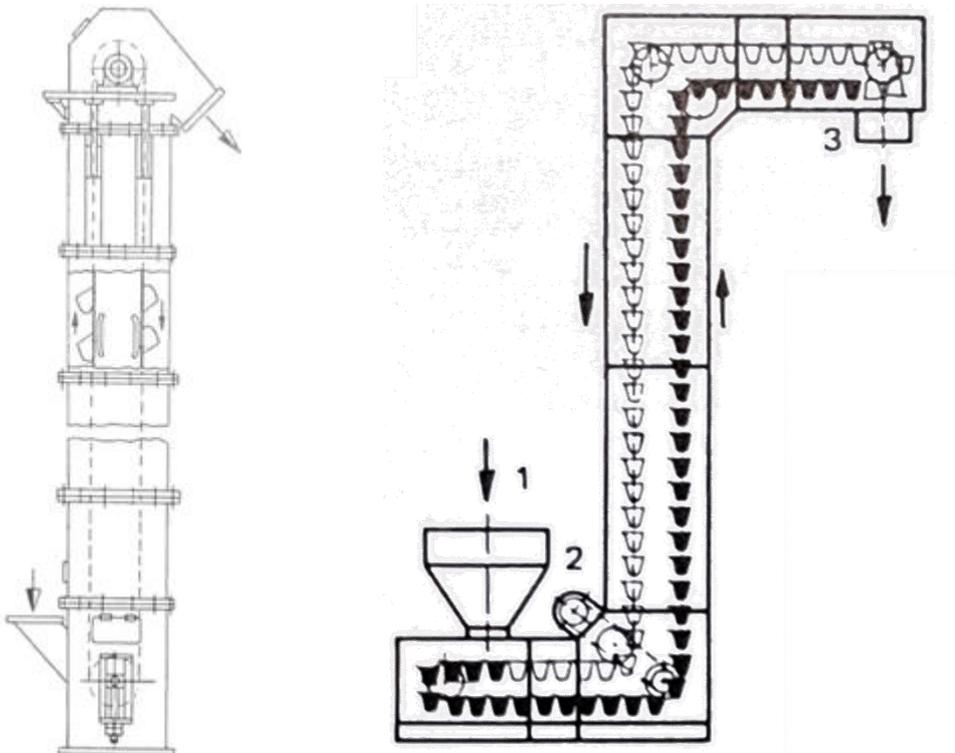


Abbildung 1: Senkrecht-Becherwerk (links), Pendelbecherwerk (rechts) [2]

Die wesentlichen Baugruppen eines Becherwerks bilden der Becherwerksschlot, die Antriebsstation im Becherwerkskopf und die Spannstation im Becherwerksfuß. Beim Becherwerksschlot werden die Kasten- und die Doppelschlotbauweise unterschieden. Bei der Kastenbauweise befinden sich beide Becherwerksstränge in einem gemeinsamen Schacht. Im Gegensatz dazu steht die Variante der Doppelschlotbauweise, bei der jeder Strang in einem eigenen Schacht geführt wird. Der Antrieb des Zugmittels im Becherwerkskopf erfolgt über die Antriebstrommel, die häufig über eine Flüssigkeitskupplung mit dem Getriebe gekoppelt ist. Die Spannung des Zugmittels im Becherwerksfuß erfolgt im Allgemeinen über eine gewichtsbelastete Spanneinrichtung.

Als Zugmitteln sind bei den Becherwerken Gurte oder Ketten im Einsatz. Das Zugmittel wird nach mechanischen und thermischen Beanspruchungen ausgelegt. Zudem werden die Art des Fördergutes, die gewünschte Förderhöhe, die erzielbaren Fördergeschwindigkeiten und der Anspruch an die Laufruhe der Anlage bei der Wahl des Zugmittels berücksichtigt [1].

Einleitung

Gurtbecherwerke zeichnen sich durch erreichbare Förderhöhen bis theoretisch 300 m Achsabstand und hohe Fördergeschwindigkeiten bis 4 m/s aus. Ein weiterer positiver Aspekt liegt in der großen Laufruhe der Gurtbecherwerke. Bei großen Achsabständen kommen Gurte mit Stahlseilen als Zugträger zum Einsatz. Bei kleineren Achsabständen werden meistens Gewebegurte mit einem Polyester/Polyamid Zugträger verwendet. Die Verbindung der Enden des Gurtes erfolgt nach dem Einziehen mit einer geeigneten Endlosverbindung. Als Endlosverbindungen kommen Klemmverbindungen und Klebverbindungen zum Einsatz. Die Becher werden nach dem Einziehen des Gurtes mit einer geeigneten Verbindungsart, bei Senkrecht-Becherwerken im Allgemeinen starr, mit dem Gurt verbunden.

Bei Kettenbecherwerken können theoretische Förderhöhen bis zu einem Achsabstand von 120 m und Fördergeschwindigkeiten bis zu 1,9 m/s erreicht werden. Einen großen Vorteil bei Kettenbecherwerken stellen die tolerierbaren Förderguttemperaturen von bis zu 350 °C dar. Im Vergleich dazu sind bei Gurten maximale Förderguttemperaturen von 140 °C erlaubt. Die Ketten sind entweder als Rundstahlketten oder als Laschenketten realisiert. Üblicherweise werden die Ketten als Zweistrang- oder als Einstrangkette ausgeführt. Die Verbindung der Becher erfolgt bei reinen Senkrechtbecherwerken starr mit den Ketten. Bei Pendelbecherwerken werden die Becher zwischen zwei Kettensträngen pendelnd aufgehängt.

Neben der Wahl des Zugmittels muss auch noch die Art der Beschickung der Anlage definiert werden. Bei der Beschickung kann grundsätzlich zwischen Einschütten, Schöpfen und einer gemischten Beschickung durch Schöpfen und Einschütten unterschieden werden. Gemäß der VDI-Richtlinie ist im Allgemeinen eine Beschickung durch mittiges Einschütten anzustreben. Bei gut fließenden Schüttgütern ist jedoch auch eine Beschickung durch reines Schöpfen üblich. Der Vorteil des Schöpfens liegt darin, dass höhere Füllungsgrade als beim Einschütten erzielt werden können.

Die Entleerung der Anlage ist abhängig von der Fördergeschwindigkeit, den eingesetzten Bechern und dem Antriebsstrommelrad-Durchmesser. Grundsätzlich wird anhand dieser Parameter der Auswurf in eine Entleerung durch Schwerkraft, eine Entleerung durch Fliehkraft und eine Mischentleerung eingeteilt.

Bei der Dimensionierung der Becher zur Aufnahme des Förderguts muss grundsätzlich nur die Befestigungsart am Zugmittel berücksichtigt werden. Die Form der Becher ist frei wählbar, wobei die Becher so gestaltet werden, dass ihre Form die Gutaufnahme und die Entleerung begünstigt. Die allgemeine Begriffsdefinition der Bechergeometrie erfolgt in Abbildung 2. In dieser Arbeit werden die eingesetzten Becher meistens anhand der Becherbreite b und des Becheröffnungswinkels γ charakterisiert. Zusätzlich zu den Bezeichnungen wurde in der

Einleitung

Grafik die Höhe einer Wasserfüllung durch eine blaue, strich-punktierte Linie eingezeichnet. Die Kenntnis der Wasserfüllung ist notwendig um den Füllungsgrad eines Bechers ermitteln zu können. Gemäß der Definition ist ein Becher vollgefüllt, sobald das Schüttgut das Volumen der Wasserfüllung einnimmt. Somit sind Becherfüllungsgrade über 100% möglich, da ein Becher mit realem Schüttgut bis über die Wasserstandslinie gefüllt werden kann. Da in den vorgestellten Arbeiten teilweise Becher mit gekrümmten Rückwänden untersucht wurden, ist in Abbildung 3 ein Becher mit gekrümmter Rückwand gemäß DIN 15235 dargestellt [3].

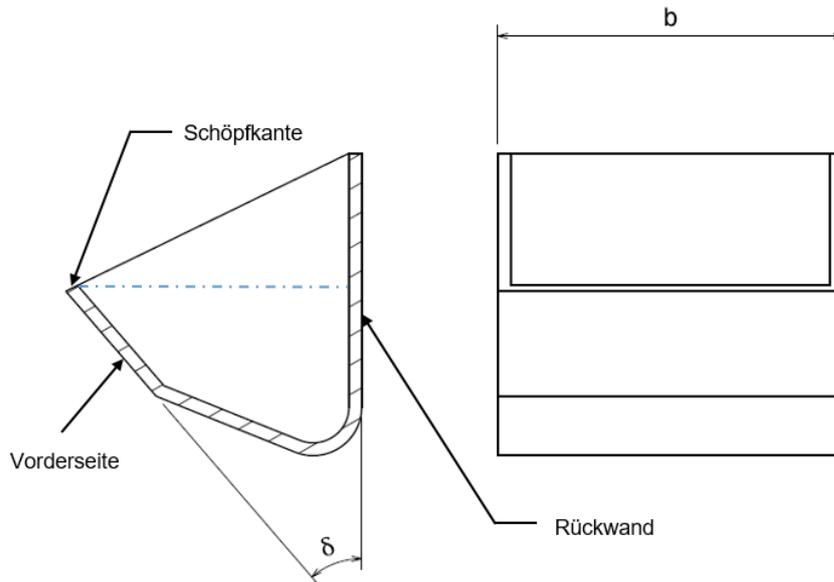


Abbildung 2: Definition der Bechergeometrie

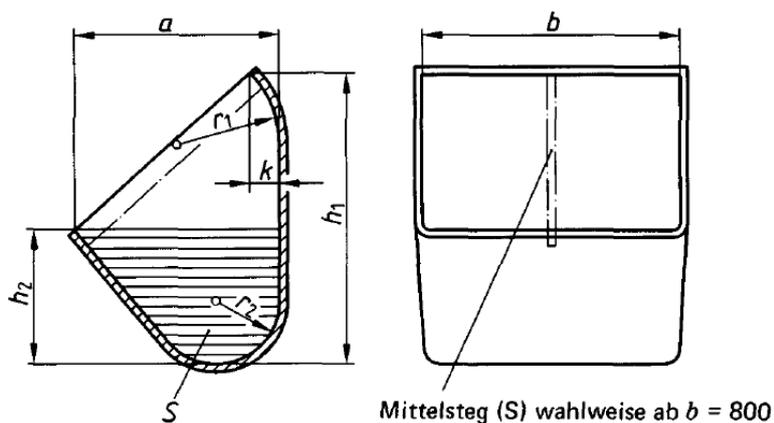


Abbildung 3: Tiefer Becher mit gekrümmter Rückwand

2 Stand der Technik

2.1 Analyse der bisherigen Untersuchungen des Schöpfvorganges

2.1.1 Untersuchungen von Hanffstengel

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden in Berlin von dem Zivilingenieur Georg von Hanffstengel diverse Versuche zum Thema des Kraftverbrauches von Fördermitteln durchgeführt [4]. Unter anderem untersuchte er den Schöpfvorgang von Becherwerken.

Hanffstengel ermittelte bei seinen Versuchen die Schöpfarbeit von Schwergetreide und Kohle mit unterschiedlichen Kantenlängen. Die Schöpfarbeit ist in den Versuchsergebnissen auf ein Kilogramm des geförderten Schüttgutes bezogen und als spezifische Schöpfarbeit ausgewiesen. Diese wurde in Abhängigkeit der Becherfüllung, der Umlaufgeschwindigkeit und des Becherabstandes untersucht. Außerdem variierte Hanffstengel bei den Versuchen die Becherform, die Art der Becherbefestigung und die Ausführungsform des Schöpftroges.

Zur Ermittlung der spezifischen Schöpfarbeit wurden von Hanffstengel zwei verschiedene Versuchsanordnungen aufgebaut. Einerseits befestigte er einen einzelnen Becher auf einer Holzriemenscheibe (Abbildung 4). Diese Anordnung hatte den Vorteil, dass keine Widerstände, die aus der Bewegung der Kette resultieren, in die Messungen der Schöpfarbeit einfließen. Außerdem konnte mit Hilfe eines Schiebers die Becherfüllung beliebig variiert werden. Bei der zweiten Versuchsanordnung wurde ein gesamtes Becherwerk analysiert (Abbildung 5). Bei diesem Becherwerk war die Becherteilung beliebig variierbar. Weiters führte Hanffstengel Versuche mit einem einzelnen Becher durch. Als Kraftmesser kam ein Zahndruck-Feder-Dynamometer mit selbsttätiger Schreibvorrichtung zum Einsatz. Bei dieser Messanordnung wurde die Umfangskraft des Schöpfrades über einen Hebelmechanismus auf das Dynamometer übertragen.

Bei den Schöpfradversuchen wurden die qualitativen Diagramme (Abbildung 6 und Abbildung 7) aufgenommen. Die einzelnen Streifen wurden hier mehrfach überschrieben. Anhand dieser Diagramme wird der komplexe Schöpfvorgang von Hanffstengel in vier Einzelvorgänge geteilt:

1. Die Becherkante dringt in den Strom des Schüttgutes ein.
2. Das Schüttgut läuft in den Becher, wird verdichtet und beschleunigt.
3. Das Schüttgut, das nicht mehr in den Becher einlaufen kann, wird vor dem Becher verdichtet und verschoben.

Stand der Technik

4. Überschüssiges Schüttgut wird fortgeschleudert und eine Einzelfüllung wird abgetrennt.

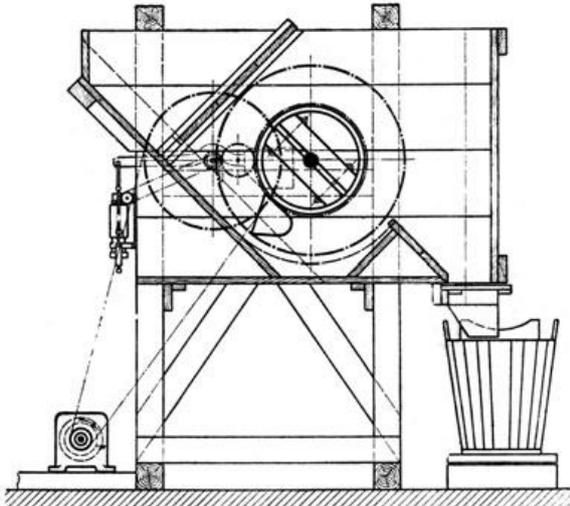


Abbildung 4: Versuchsanordnung mit Schöpfrad [4]

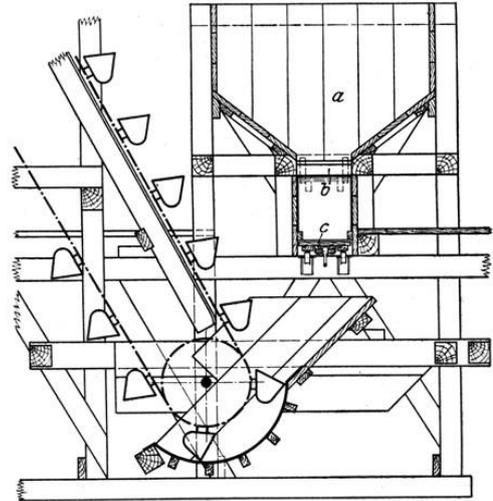


Abbildung 5: Versuchsanordnung bei größerer Becheranzahl [3]

Der Übergang zwischen diesen vier Phasen ist fließend, deshalb sollten sie nicht als fest getrennte Phasen verstanden werden. Diese Einteilung des Schöpfvorganges hat sich im Laufe der Zeit als sehr zweckmäßig herausgestellt und wurde in beinahe allen zukünftigen Untersuchungen übernommen.

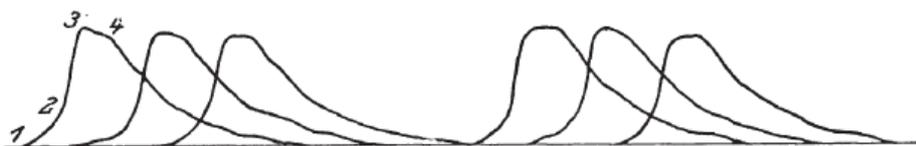


Abbildung 6: Schöpfraddiagramm für Getreide mit 200mm Becherbreite und 90% Füllung [4]

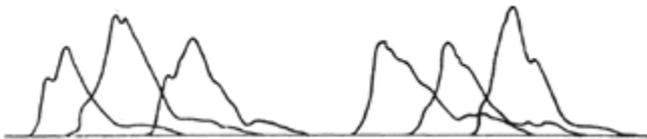


Abbildung 7: Schöpfraddiagramm für Würfelkohle mit 300mm Becherbreite und 89% Füllung [4]

Zu Beginn seiner Experimente untersuchte Hanffstengel am Schöpfrad die Auswirkungen der Becherfüllung auf die spezifische Schöpfarbeit. Kohle wurde bei allen Versuchen in folgende Klassen eingeteilt: Schmiedekohle (0,6 – 0,8 cm), Kesselkohle (2,5 – 4 cm), Würfelkohle (4 – 6 cm) und Koks (6 – 8 cm Kantenlänge). Die Umlaufgeschwindigkeit des Schöpfrades betrug sowohl bei Getreide als auch bei Kesselkohle 0,67 m/s und bei Kohlenstaub sowie

Stand der Technik

Würfelpohle 1 m/s . Bei der Analyse der Ergebnisse in Abbildung 8 fällt auf, dass die Zunahme der spezifischen Schöpfarbeit bis zu einem Becherfüllungsgrad von 100% relativ gering ist. Ab diesem Füllungsgrad kann mit zunehmender Beladung ein deutlicher Anstieg der spezifischen Schöpfarbeit festgestellt werden. Um eine Becherfüllung über 100% erhalten zu können, muss während des Schöpfvorganges deutlich mehr Fördergut vom Becher erfasst und bewegt werden. Die Zunahme der spezifischen Schöpfarbeit ist nun durch den Umstand erklärbar, dass nur ein geringer Anteil des zusätzlich bewegten Förderguts tatsächlich geschöpft wird.

In Abbildung 9 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe von Hanffstengel angegeben. In dieser Versuchsreihe wurde die Schöpfarbeit für zahlreiche Becherformen in Abhängigkeit der Umlaufgeschwindigkeit der Ketten bzw. des Einzelbeckers gemessen. Der Versuchsaufbau entsprach der Anordnung gemäß Abbildung 5, jedoch war an der Kette nur ein Becher montiert. Die Masse des Einzelbeckers wurde durch ein Gegengewicht an der Kette ausgeglichen.

Exemplarisch sind in dem Diagramm die Ergebnisse für einen Becher mit einer Becherbreite von 300 mm und einem Öffnungswinkel von 36° dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Umlaufgeschwindigkeit die spezifische Schöpfarbeit zunimmt. Durch seine Untersuchungen mit unterschiedlichen Bechern kommt Hanffstengel weiters zu dem Schluss, dass Becher mit einem größeren Öffnungswinkel eine höhere spezifische Schöpfarbeit hervorrufen als Becher mit einem kleineren Öffnungswinkel. Es ist zu beobachten, dass zu Beginn die spezifische Schöpfarbeit bei kleineren Zugmittelgeschwindigkeiten höher ist und sich ein Minimum im Verlauf der Graphen feststellen lässt. Dies wird von Hanffstengel durch die Annäherung der Reibungsverhältnisse in den Zustand der Ruhe zurückgeführt.

In der dritten Versuchsreihe untersuchte Hanffstengel die Auswirkung unterschiedlicher Abstände zwischen den Bechern auf der Förderkette (Abbildung 10). Wird die Becherteilung vergrößert, so nimmt die Schöpfarbeit so lange zu, bis sich ein konstanter Wert einstellt. Bei einer kleinen Becherteilung ist der Freiraum, der vom vorherlaufenden Becher geschaffen wurde, noch nicht ganz geschlossen und somit ist die Schöpfarbeit, die geleistet werden muss, geringer als bei einem größeren Becherabstand.

Hanffstengel untersuchte zudem die Ausführung des Schöpftroges und der Schöpftkantendicke. Qualitativ konnte er feststellen, dass mit zunehmender Schöpftkantendicke die Schöpfarbeit ansteigt. Ein Schöpftrog, der der Bahn des Beckers in einem geringen Abstand folgt, verringert die zu leistende Schöpfarbeit. Dabei soll der Abstand zwischen Becher und Schöpftrog jedoch nicht so gering werden, dass sich das Schüttgut zwischen Trog

Stand der Technik

und Becher verkanten kann. Ein solches Verkanten würde einen erhöhten Schöpfwiderstand verursachen.

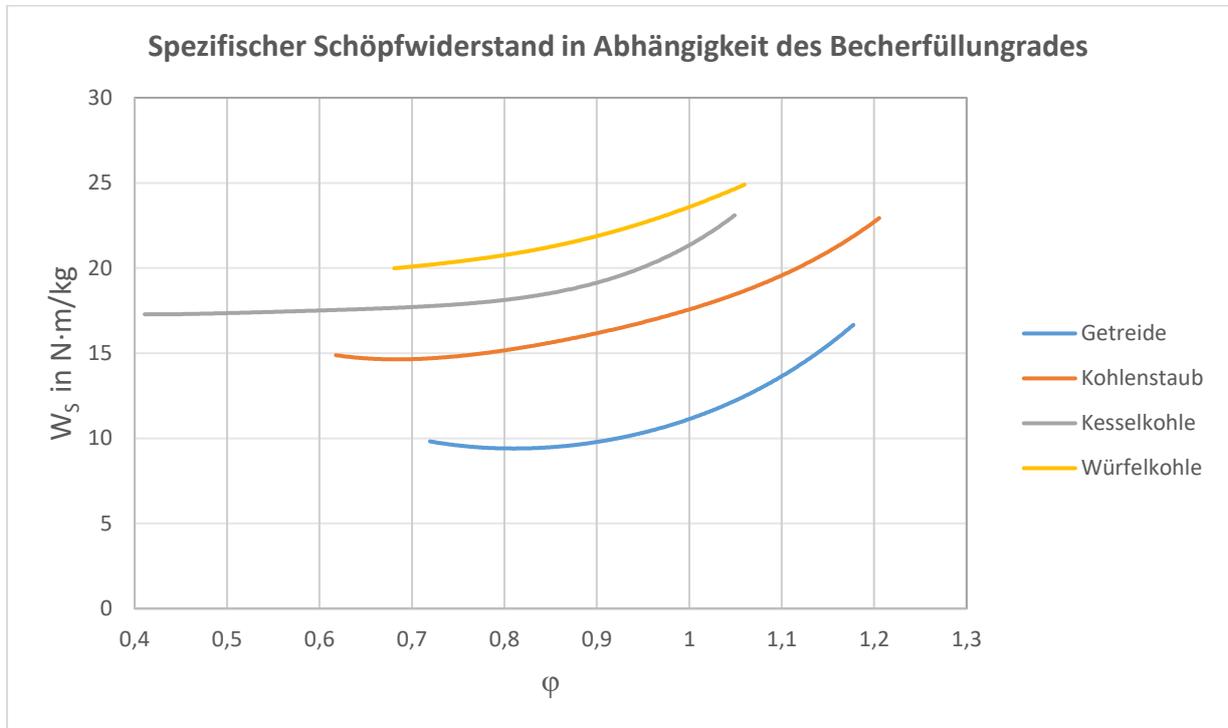


Abbildung 8: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit des Becherfüllungsgrades [1]

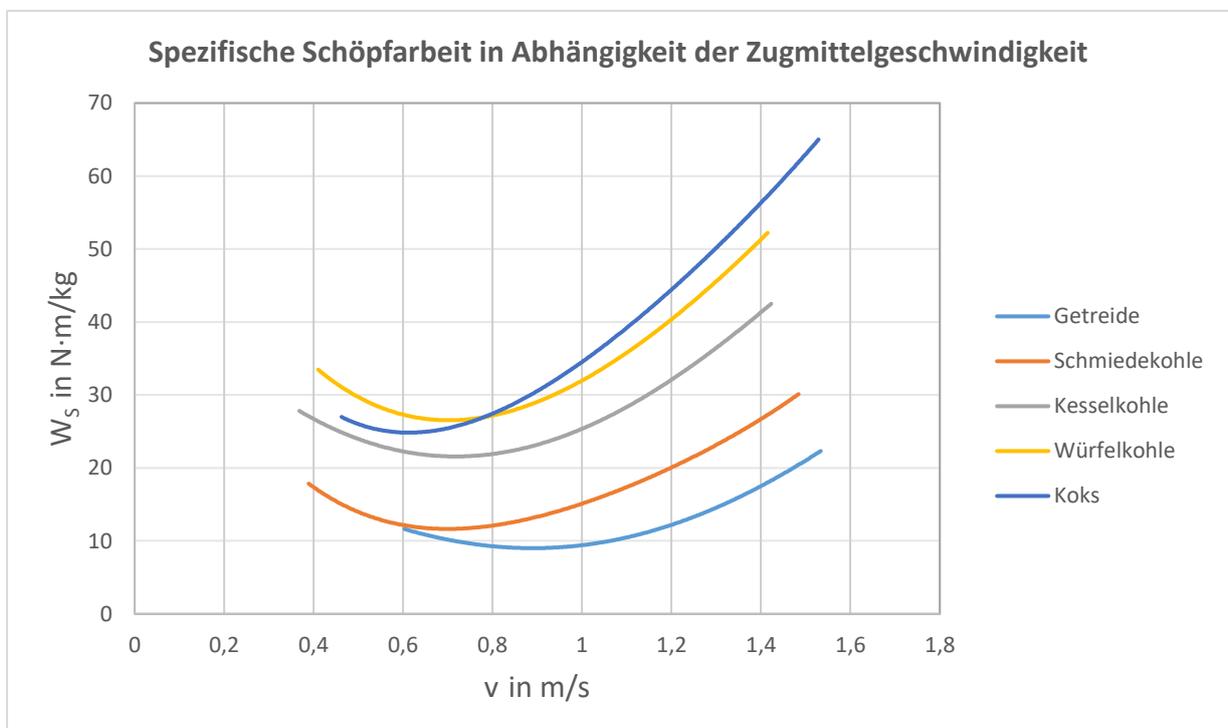


Abbildung 9: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit [4]

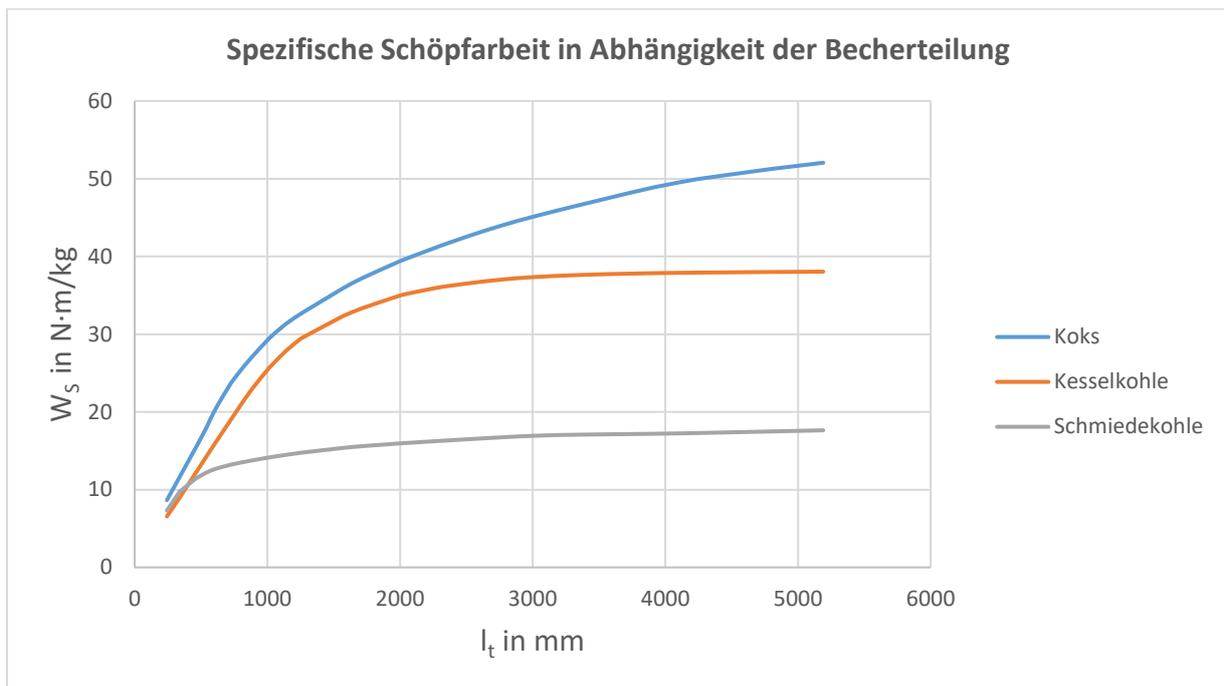


Abbildung 10: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Becherteilung [4]

2.1.2 Untersuchungen von Beumer und Wehmeier

Beumer und Wehmeier leisteten mit ihren Versuchen einen großen Beitrag zur Definition und Beschreibung des Schöpfwiderstandes. Die Versuche wurden im Rahmen einer Zusammenarbeit der Technischen Hochschule Hannover und der Maschinenfabrik B. Beumer durchgeführt. 1960 erfolgte die Veröffentlichung der Versuchsergebnisse in der Fachzeitschrift Fördern und Heben [5]. Der Entwurf der aktuellen VDI-Richtlinie (VDI 2324) zur Berechnung von Senkrecht-Becherwerken orientiert sich bei der Ermittlung des Schöpfwiderstandes an der Arbeit von Beumer und Wehmeier.

Der Schöpfwiderstand F_S nach Beumer und Wehmeier ist als Zunahme der Umfangskraft am Antriebsrad bezogen auf die Kettenmitte definiert. Nach dieser Definition sind alle während des Schöpfvorganges auftretenden Reibungsverluste in Ketten und Lagern ebenfalls im Schöpfwiderstand enthalten. Der Schöpfwiderstand ist ein zeitlich veränderlicher Widerstand, der von Beumer und Wehmeier in folgende Kräfte unterteilt wird:

1. Reibungskraft F_{R1} zufolge der Bewegung des Bechers durch das Schüttgut
2. Reibungskraft F_{R2} zufolge der Reibungsverluste in Ketten und Lagern
3. Beschleunigungskraft F_B zufolge der Kraft, die benötigt wird, um das geschöpfte und das beiseitegeschobene Gut zu beschleunigen
4. Hubkraft F_H und

Stand der Technik

5. Stoßkraft F_{St} , die beim Aufprallen des Förderbeckers auf das ruhende Schüttgut entsteht

Das Auftreffen des Beckers auf das ruhende Schüttgut kann als unelastischer Stoß zwischen der bewegten Masse m_1 (Becher und Kette) mit der Bechergeschwindigkeit v_B und der unbewegten Masse m_2 (Schüttgut, das gefördert beziehungsweise zur Seite geschoben wird) angenommen werden. Die Verlustarbeit ΔW_V des unelastischen Stoßes wird folgendermaßen ermittelt:

$$\Delta W_V = \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_B^2 \quad (2.1)$$

Mit diesen Kräften lässt sich die Schöpfarbeit W berechnen:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} (F_{R1} + F_{R2}) \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} (F_B) \cdot ds + \int_{s_1}^{s_2} (F_H) \cdot ds + \Delta W_V \quad (2.2)$$

Die Integralgrenzen s_1 und s_2 beschreiben hier den Weg des Beckers durch das Fördergut im Schöpftrog. Die spezifische Schöpfarbeit W_S ergibt sich, indem die Schöpfarbeit durch die Masse des Becherinhaltes dividiert wird. Mit der Einführung eines Teilungsfaktors K , der den Zusammenhang zwischen Becherteilung und Schöpfwiderstand berücksichtigt, und dem Fördermassenstrom I_G [kg/s] berechnet sich die benötigte Antriebsleistung für den Schöpfvorgang nach Beumer und Wehmeier wie folgt:

$$P_S = K \cdot W_S \cdot I_G \quad [W] \quad (2.3)$$

Beumer und Wehmeier weisen darauf hin, dass sich die Schöpfarbeit und die Antriebsleistung nur schwer rechnerisch ermitteln lassen, da die Größen der Reibungskraft F_{R1} und die Masse des beiseitegeschobenen Gutes unbekannt sind. Die Schöpfarbeit wurde daher von ihnen experimentell ermittelt.

Das von Beumer und Wehmeier zur Ermittlung des Schöpfwiderstandes eingesetzte Becherwerk hatte einen Achsabstand von 5120 mm und eine Becherbreite von 400 mm . Bei den Versuchsreihen war lediglich ein Becher am Kettenstrang montiert und sein Eigengewicht mittels eines Gegengewichts ausgeglichen. Durch diese Anordnung konnte verhindert werden, dass Einflüsse wie die gewählte Becherteilung oder der Vorgang des Hebens und des Auswerfens anderer Becher die Messergebnisse beeinflussen. Die Versuche wurden in zwei

Stand der Technik

Geschwindigkeitsbereiche unterteilt. Die Durchführung im langsamen Geschwindigkeitsbereich erfolgte bei Geschwindigkeiten von 0,162 bis 0,697 m/s. In diesem Geschwindigkeitsbereich kamen Becher mit einer gekrümmten Rückwand und seitlicher Becheraufhängung zum Einsatz. Im schnellen Geschwindigkeitsbereich wurden die Versuche mit rückseitiger Becheraufhängung bis zu einer Bechergeschwindigkeit von 2,3 m/s durchgeführt. Die Becher des schnellen Bereichs hatten keine gekrümmte Rückwand. Vorversuche von Beumer und Wehmeier ergaben, dass bereits eine geringe Änderung der Füllmenge des Schöpftroges zu einer Abweichung der Messergebnisse des Schöpfwiderstandes führen kann. Deshalb wurde während der Versuche darauf geachtet, dass die Füllmenge des Schöpftroges möglichst konstant ist. Der Füllstand im Becherwerksfuß war durch den Zustand, dass die Außenkante der gekrümmten Becherrückwand das Fördergut berührt, jedoch selbst nicht schöpft, gekennzeichnet. Dieser Füllstand soll anhand von Abbildung 11 verdeutlicht werden.

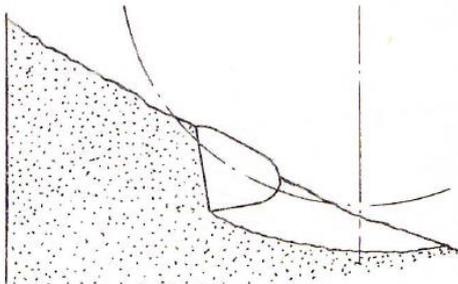


Abbildung 11: Bechereingriff nach Beumer und Wehmeier [5]

Während der Versuche zeichneten Beumer und Wehmeier das Drehmoment der Antriebswelle, die Drehzahl der Antriebswelle und den Füllungsgrad der Becher auf. Das Drehmoment an der Antriebswelle wurde zur Ermittlung des Schöpfwiderstandes mit Dehnmessstreifen in Vollbrückenschaltung gemessen. Die Drehzahl der Antriebswelle wurde mit einem Stichdrehzalmesser aufgezeichnet, um die aktuelle Bechergeschwindigkeit ermitteln zu können. Zur Ermittlung des Becherfüllungsgrades musste die Anlage nach jedem Schöpfvorgang vor dem Auswurf angehalten und der Becherinhalt von Hand mit einem Zentimetermaß gemessen werden.

Der Schöpfwiderstand wird gemäß der Definition aus der Differenz des maximal gemessenen Drehmoments M_{max} und des vor dem Schöpfvorgang gemessenen Leerlaufmoment M_0 bezogen auf den halben Teilkreisdurchmesser D_1 des Antriebsrades berechnet:

$$F_S = \frac{2 \cdot (M_{max} - M_0)}{D_1} \quad (2.4)$$

Die Schöpfarbeit wird als zeitliches Integral des während des Schöpfvorganges aufgenommenen Momentenverlaufes M abzüglich des Leerlaufmomentes M_0 berechnet:

$$W = \frac{2 \cdot v_B}{D_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (M - M_0) \cdot dt \quad (2.5)$$

Beumer und Wehmeier untersuchten mit dem zuvor beschriebenen Becherwerk den Schöpfwiderstand und die Schöpfarbeit für diverse Schüttgüter. Die Daten der untersuchten Güter inklusive ihrer Schüttdichte und ihrer Korngröße können aus Tabelle 1 entnommen werden. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen sind in den Diagrammen in Abbildung 12 und Abbildung 13 angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in den Diagrammen lediglich die spezifische Schöpfarbeit eingezeichnet und auf eine Darstellung des Schöpfwiderstandes verzichtet. Zudem kann auf eine Abbildung des Schöpfwiderstandes verzichtet werden, da die Diagramme des Schöpfwiderstandes und der spezifischen Schöpfarbeit qualitativ übereinstimmen. Auffällig ist, dass trotz ähnlicher Geschwindigkeitsverhältnisse bei Beumer und Wehmeier im Vergleich zu Hanffstengel kein Minimum in den Verläufen der spezifischen Schöpfarbeit erkannt werden kann. Dieses Minimum trat auch in den weiteren Untersuchungen, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden, und in den Simulationen nicht mehr auf. Deshalb ist davon auszugehen, dass das Minimum bei Hanffstengel durch den Versuchsaufbau beziehungsweise die Messvorrichtung entstanden ist.

Schlussendlich sollte noch erwähnt werden, dass sich durch den Versuchsaufbau mit einer konstanten Fußfüllung ein hoher Becherfüllungsgrad φ einstellt. Der gemessene Becherfüllungsgrad ist laut den Messergebnissen von Beumer und Wehmeier meistens größer eins. Ein Becherfüllungsgrad größer eins verursacht im Regelfall eine überproportionale Zunahme des Schöpfwiderstandes beziehungsweise der Schöpfarbeit. Dieser Umstand wurde bereits von Hanffstengel beschrieben. Zur Vergleichbarkeit und Bewertung der Ergebnisse wird daher in den Diagrammen der spezifischen Schöpfarbeit zusätzlich der gemessene Becherfüllungsgrad aufgetragen.

Fördergut	Schüttdichte [kg/m^3]	Korngröße [mm]
Portland-Zement	1240	0,05
Getreide (Weizen-Gerste-Gemenge)	740	2-6
Filterkohle (feucht)	670	Bis 0,6
Sand (feucht)	1270	Bis 1,0
Sand	1500	2-7
Kies	1500	Bis 30
Portland-Zementklinker	1250	5-15
Steinkohle Nuss III	750	18-30
Kalksteinschotter	1450	20-30

Tabelle 1: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Beumer und Wehmeier [6]

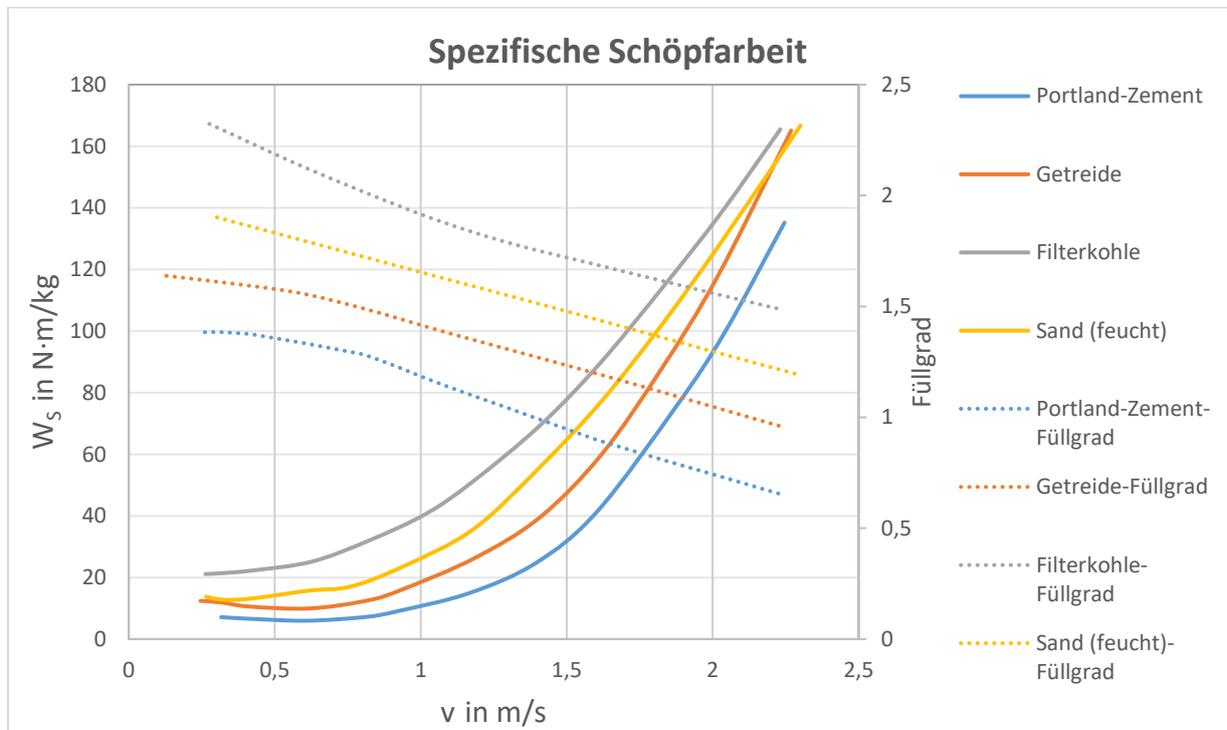


Abbildung 12: Spezifische Schöpfung nach Beumer und Wehmeier [5]

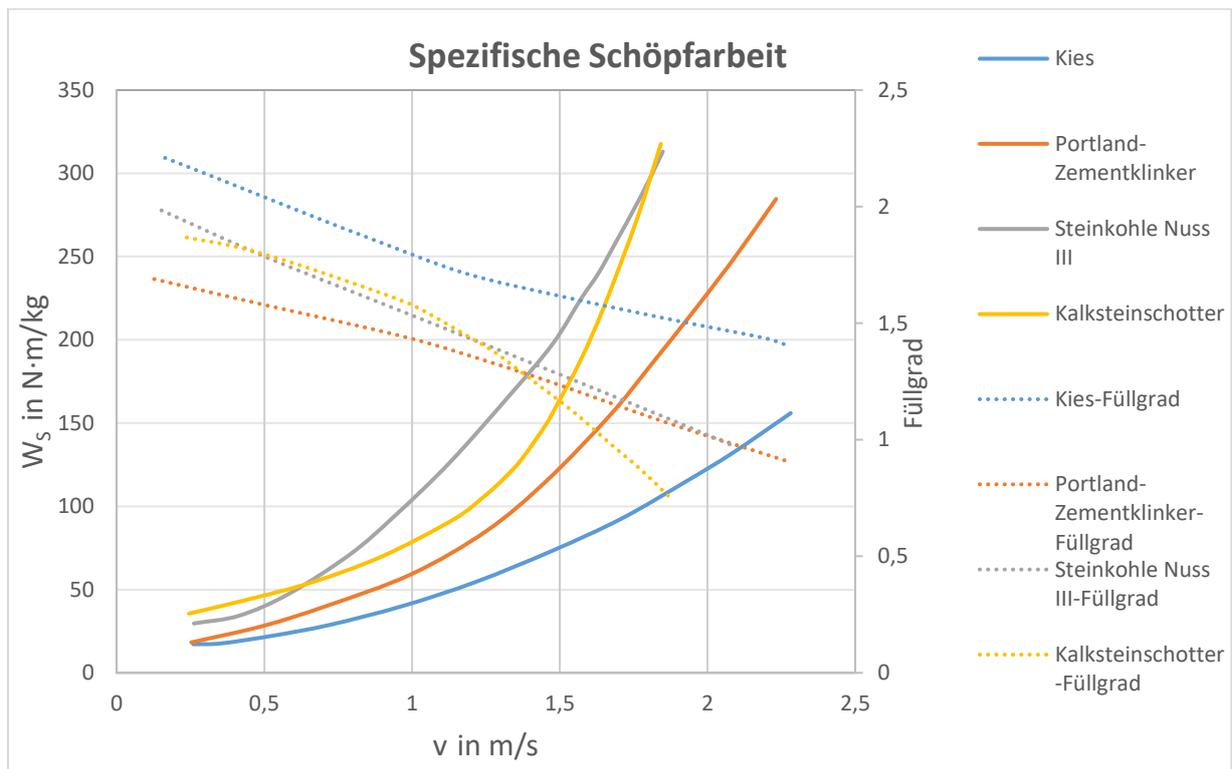


Abbildung 13: Spezifische Schöpfarbeit nach Beumer und Wehmeier [5]

2.1.3 Untersuchungen von Ellwanger

Im Rahmen einer Dissertation an der Technischen Universität Hannover untersuchte Klaus Dieter Ellwanger den Schöpfvorgang an schnelllaufenden Becherwerken [7]. Er formulierte in seiner Arbeit eine neue Definition des Schöpfwiderstandes und beschrieb mit dieser Definition eine neue Messanordnung zur Ermittlung des Schöpfwiderstandes und in weiterer Folge der Schöpfarbeit.

Gemäß der Definition nach Ellwanger entspricht der Schöpfwiderstand F_S jenem Widerstand, der von einem Becher während des Schöpfvorganges überwunden werden muss. Der Schöpfwiderstand wird nur vom Fördergut hervorgerufen. Anteile wie die Gewicht- und Beschleunigungskräfte des Bechers werden dem Schöpfwiderstand nicht zugerechnet. In Analogie zu den vorhergehenden Arbeiten teilt Ellwanger ebenfalls den Schöpfvorgang in Einzelvorgänge auf:

1. Eindringen der Becherkante in das Fördergut
2. Beschleunigen des Fördergutes
3. Reibung des Bechers während des Schöpfvorganges
4. Heben des vom Becher aufgenommenen Fördergutes.

Stand der Technik

Anhand dieser vier Phasen formuliert Ellwanger einen theoretischen Ansatz zur Ermittlung der für den Schöpfvorgang erforderlichen Schöpfleistung. Diese setzt sich aus einem Eindringanteil, einem Beschleunigungsanteil, einem Reibanteil und einem Hubanteil zusammen. Zur Berechnung des Beschleunigungs- und Hubanteils leitet Ellwanger Formeln her, die mit theoretischen Überlegungen begründet werden. Da der Reibanteil und der Eindringanteil theoretisch nur sehr schwer erfassbar sind, werden diese mit einem Zusatzanteil, der experimentell ermittelt wird, berücksichtigt. Die Schöpfleistung errechnet sich nun aus der Summe der spezifischen Anteile, multipliziert mit dem Massenstrom.

Ellwanger führte die Experimente auf zwei Versuchsanlagen durch. Bei der ersten Versuchsanlage handelte es sich um ein Modellschöpfwerk. Die Becher waren auf einem Trommelkörper mit einem Durchmesser von 48 cm fixiert und führten lediglich eine Kreisbewegung durch. Diese Anordnung ist mit dem Schöpfgrad von Hanffstengel vergleichbar. Mit diesem Versuchsaufbau untersuchte Ellwanger die grundlegenden Zusammenhänge unterschiedlicher Becherformen und Fördergüter. Zur Untersuchung unterschiedlicher Becherteilung konnten bis zu vier Becher auf dem Trommelkörper in beliebigem Abstand montiert werden.

Der zweite Versuchstand war ein Gurtbecherwerk mit einem Achsabstand von 7 m zwischen den Umlenkscheiben. Der Durchmesser der Umlenktrommel betrug $0,71\text{ m}$. Entlang des Umfangs waren 40 Becher mit einer Becherbreite von $0,4\text{ m}$ und einer Becherteilung von $0,4\text{ m}$ verteilt. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen von Hanffstengel und Beumer und Wehmeier wurde der Schöpfwiderstand somit für eine Reihe von schöpfenden Bechern untersucht und nicht für einen einzelnen Becher. Die Messung des Schöpfwiderstandes erfolgte sobald sich ein stationärer Betriebszustand eingestellt hatte. Der Vorteil dieses Aufbaus ist, dass Messungen im stationären Betriebszustand deutlich realitätsnäher sind als Messungen eines Einzelbeckers.

Bei beiden Versuchsanlagen konnte der Füllstand im Becherwerksfuß beliebig variiert werden. In den Versuchsreihen wurde der Einfluss der Bechergeschwindigkeit, des Becherabstandes, der Eindringtiefe, der Förderguteigenschaften und der Becherform auf den Schöpfwiderstand untersucht.

Eingangs wurde bereits erwähnt, dass Ellwanger den Schöpfwiderstand mit einem neuen Prinzip ermittelt hat. In vorangegangenen Arbeiten erfolgte die Ermittlung des Schöpfwiderstandes anhand einer Momentmessung an der Antriebswelle. Ellwanger maß die Lagerreaktionen des Beckers mit Messwertaufnehmer auf Basis der Dehungsmessstreifen-Technik. Gemäß Abbildung 14 wurden die Kräfte F_{1i} , F_{2i} und F_{3i} messtechnisch erfasst.

Stand der Technik

Anschließend errechnete Ellwanger den Schöpfwiderstand F_S in einem ebenen Modell unter Berücksichtigung der Gewichts- und der Beschleunigungskräfte mit den Newtonschen Bewegungsgleichungen. Zur Berechnung des Füllungsgrades und der spezifischen Kräfte war noch die Kenntnis der Becherfüllung notwendig. Diese wurde im Fall des Modellschöpfwerks mit sich selbst verschließenden Bechern ermittelt. Im Fall des Gurtbecherwerks wurde das Becherwerk angehalten und der Füllgrad durch die Mittelwertbildung des Becherinhaltes von mehreren Bechern bestimmt.

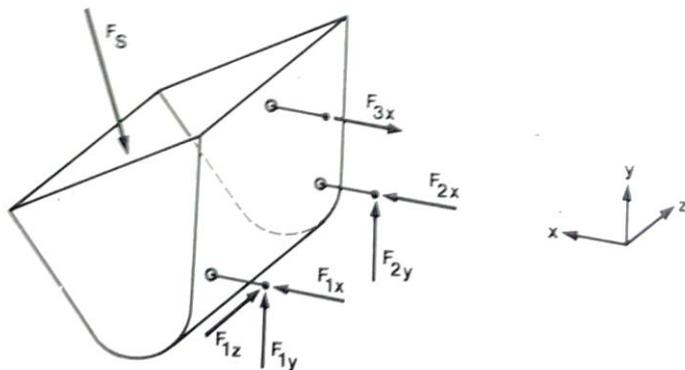


Abbildung 14: Lagerung des Messbechers [7]

Neben den quantitativen Ergebnissen sollen hier in aller Kürze die qualitativen Versuchsergebnisse von Ellwanger zusammengefasst werden. Der Schöpfwiderstand wird im Wesentlichen von der Bechergeschwindigkeit, der Eindringtiefe und der Becherform beeinflusst. Hinsichtlich der Bechergeschwindigkeit konnte der bereits bekannte Zusammenhang, dass der Schöpfwiderstand mit zunehmender Geschwindigkeit überproportional zunimmt, von Ellwanger bestätigt werden. Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt der Schöpfwiderstand ebenfalls zu, da bei einer größeren Eindringtiefe mehr Schüttgut bewegt werden muss. Eine größere Eindringtiefe kann bei erhöhten Bechergeschwindigkeiten erforderlich sein, um einen hohen Füllungsgrad der Becher zu gewährleisten. Der Füllungsgrad der Becher ist von den Förderguteigenschaften, im speziellen von der inneren Reibung des Schüttgutes, abhängig. Eine hohe innere Reibung führt vor allem bei hohen Bechergeschwindigkeiten und geringen Eindringtiefen zu besseren Füllungsgraden als eine niedrigere innere Reibung. Bei den Untersuchungen unterschiedlicher Becherformen stellte Ellwanger fest, dass der Schöpfwiderstand hauptsächlich vom Becheröffnungswinkel abhängig ist. Ein Becher mit einem kleinen Öffnungswinkel lässt sich besser füllen und verursacht einen geringeren Schöpfwiderstand, da nur geringe Massen an Fördergut unnötig bewegt werden müssen.

Stand der Technik

Die Ergebnisse der Schöpfversuche nach Ellwanger sind in Abbildung 15 abgebildet. Gemäß dem Versuchsaufbau von Ellwanger wurde die spezifische Schöpfarbeit bei einem konstantem Becherfüllungsgrad gemessen. Leider geht aus Ellwangers Arbeit nicht hervor wie groß der Becherfüllungsgrad während den Messungen war. In Tabelle 2 sind die untersuchten Fördergüter mit ihren wesentlichen Eigenschaften angeführt.

Fördergut	Schüttdichte [kg/m^3]	Korngröße [mm]	Schüttwinkel [$^\circ$]
PVC-Granulat	740	3,2	30
PE-Granulat	440	3,8	35
Weizen	800	6,2	20
Mais	800	9,3	25
Al-Scheibchen	1460	5,0	25
Zementklinker	1310	10,4	30
Kies 2/8	1440	5,7	30
Kies 8/16	1410	13,9	30
Edelsplit 2/5	1390	4,6	30
Edelsplit 8/11	1340	10,8	35

Tabelle 2: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Ellwanger [7]

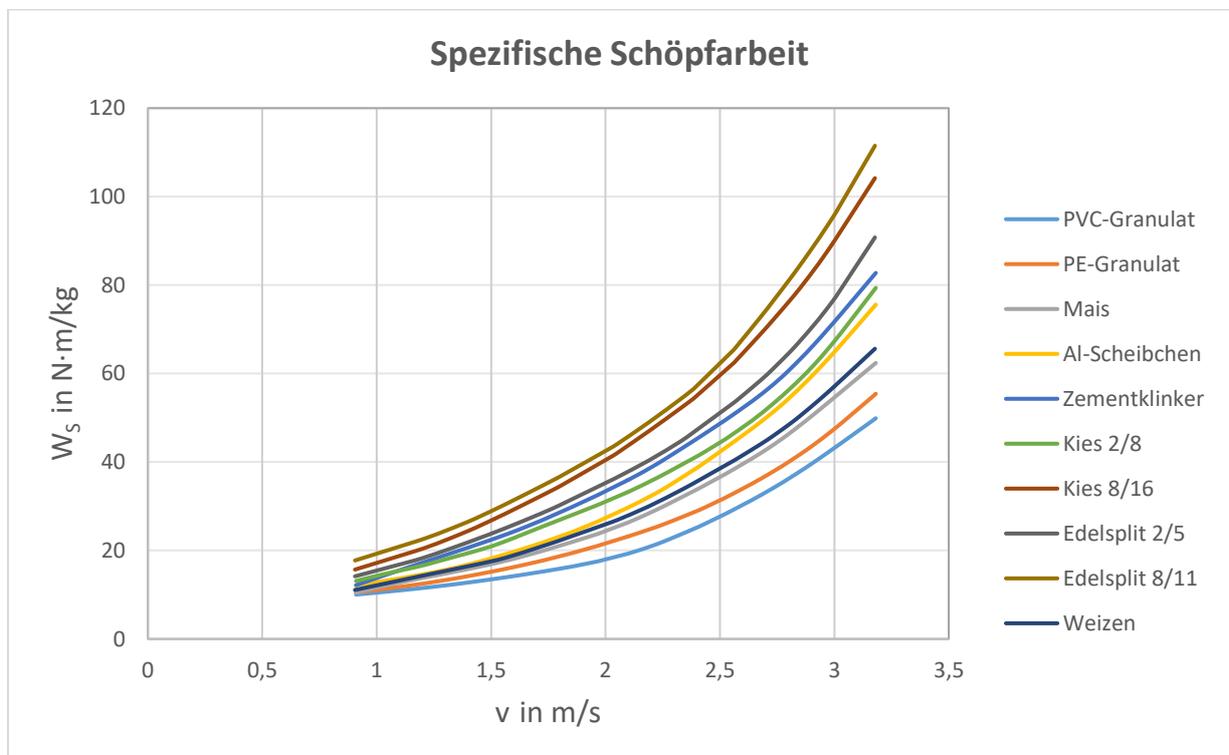


Abbildung 15: Spezifische Schöpfarbeit nach Ellwanger [7]

2.1.4 Untersuchungen von Dilefeld

Mario Dilefeld vertiefte die Forschungen bezüglich des Schöpfwiderstandes im Rahmen einer Dissertation an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg. Die Dissertation mit dem Titel „Zum Schöpfverhalten von Becherwerken“ wurde 1993 veröffentlicht [8]. Dilefeld führte die Messungen des Schöpfwiderstandes an einem Versuchsbecherförderer, bei dem das Fördergut in einem Kreislauf geführt wurde, durch. Der Becherförderer hatte einen Achsabstand von $5,5\text{ m}$ und der Trommeldurchmesser des Antriebsrades betrug $0,4\text{ m}$. Die Untersuchungen erfolgten mit Bechern, die eine Breite von 125 mm und je nach Geschwindigkeitsbereich eine Teilung von 130 mm beziehungsweise 180 mm hatten. Die Zugmittelgeschwindigkeit konnte bei der Anlage stufenlos zwischen $0,8\text{ m/s}$ und 4 m/s eingestellt werden. Somit war es möglich, den Schöpfwiderstand bei deutlich höheren Geschwindigkeiten als bisher zu untersuchen.

Der Schöpfwiderstand wurde von Dilefeld wie von Beumer und Wehmeier durch Messung des Drehmoments an der Antriebswelle gemessen. Die Messung erfolgte mittels Dehnmessstreifen in einer Vollbrückenschaltung. Während der Messung waren die Becher wie im normalen Betriebszustand verteilt, sprich Dilefeld maß wie Ellwanger eine Reihe von Bechern und verzichtete auf Messungen mit nur einem einzelnen Becher. Das Schöpfmoment wurde als Differenz zwischen dem Moment, das während des Schöpfvorganges gemessen wird, und dem Leerlaufmoment definiert. Anschließend errechnete Dilefeld aus dem Schöpfmoment den Schöpfwiderstand F_S . Die Becher konnten bei der Versuchsanlage in einen Messbunker entleert werden. Mit Hilfe des Messbunkers wurde die Masse des geförderten Schüttgutes ermittelt und daraus der Becherfüllungsgrad φ errechnet. Bedauerlicherweise ist in Dilefelds Arbeit nicht die exakte Gleichung zur Umrechnung des Schöpfmomentes in den Schöpfwiderstand angegeben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Schöpfwiderstand relativ analog zur Gleichung (2.4) aus den aufgezeichneten Daten ermittelt wurde. Mit der Becherteilung l_T , dem Becherinhalt V_B und der Schüttdichte ρ berechnete Dilefeld aus dem Schöpfwiderstand die spezifische Schöpfarbeit W_S folgendermaßen:

$$W_S = \frac{F_S}{m'} \quad \text{mit} \quad m' = \frac{V_B \varphi \rho}{l_T} \quad (2.6)$$

Aufgrund des großen Bereiches der Zugmittelgeschwindigkeit mussten Becher mit unterschiedlichen Geometrien eingesetzt werden, um eine vollständige Becherentleerung gewährleisten zu können. Da die Bechergeometrie einen großen Einfluss auf den Schöpfwiderstand hat, teilte Dilefeld seine Versuchsreihen in zwei Geschwindigkeitsbereiche

Stand der Technik

und setzte in den entsprechenden Bereichen Becher, mit denen eine vollständige Entleerung erreicht werden konnte, ein. Im Bereich der Zugmittelgeschwindigkeiten von $0,8 \text{ m/s} - 1,4 \text{ m/s}$ wurden Schwerkraftbecher (Abbildung 16, rechts) eingesetzt. Im Bereich von $1,5 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$ kamen Fliehkraftbecher (Abbildung 16, links) zum Einsatz. Bei den Schwerkraftbechern wurde ein Füllungsgrad von 0,8 und bei den Fliehkraftbechern von 0,5 angestrebt.

In den Versuchsreihen wurden neben den Bechergeometrien die Aufgabeart und die untersuchten Fördergüter variiert. Bei der Aufgabeart unterschied Dilefeld zwischen last- und leertrumseitiger Aufgabe. Während bei der lasttrumseitigen Aufgabe der Becher bereits 90° an der Umlenktrummel zurückgelegt hat, bevor der Schöpfvorgang startet, beginnt der Schöpfvorgang bei der leertrumseitigen Aufgabe bereits während der Abwärtsbewegung des Bechers an der Umlenktrummel. Die Untersuchungen der Aufgabeart sollten klären, welche Aufgabeart einen geringeren Schöpfwiderstand hervorruft.

Dilefeld untersuchte fünf verschiedene Fördergüter. Die Schüttgüter sind samt ihrer Schüttdichte in Tabelle 3 angeführt. Die Ergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit können aus Abbildung 17 und Abbildung 18 entnommen werden. Bei einem Vergleich der Abbildungen fällt auf, dass die spezifische Schöpfarbeit am Ende des Diagramms der Schwerkraftbecher von der spezifischen Schöpfarbeit zu Beginn des Diagramms der Fliehkraftbecher abweicht. Diese Abweichung kann einerseits durch die unterschiedlichen Becherfüllungsgrade und die unterschiedlichen Bechergeometrien erklärt werden. Jedoch hat auch Dilefelds exponentielle Regression der Messpunkte, die in Abschnitt 5.2.2 näher erläutert wird, einen Einfluss auf den Unterschied der Diagramme.

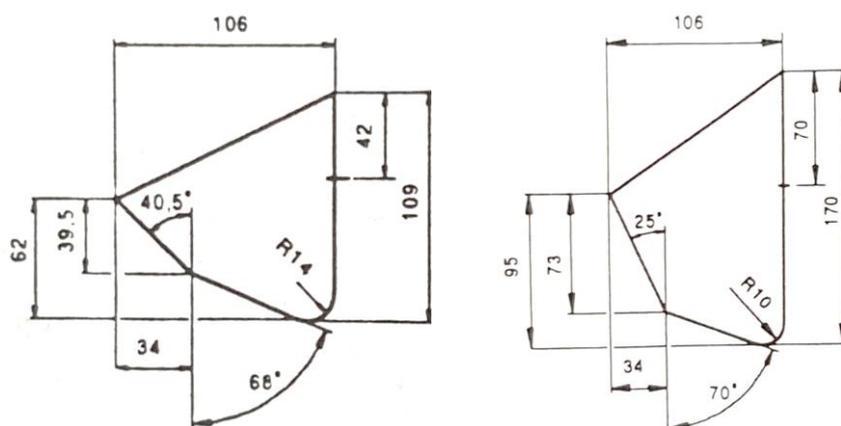


Abbildung 16: Fliehkraftbecher (links) und Schwerkraftbecher (rechts) nach Dilefeld [8]

Fördergut	Schüttdichte [kg/m^3]	Korngröße [mm]
PVC-Granulat	733,41	2-8
Futterpellets	566,25	8-50
Gummistücke	707,90	10-25
Sand	1537,5	-
Weizen	814	2-10

Tabelle 3: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Dilefeld [8]

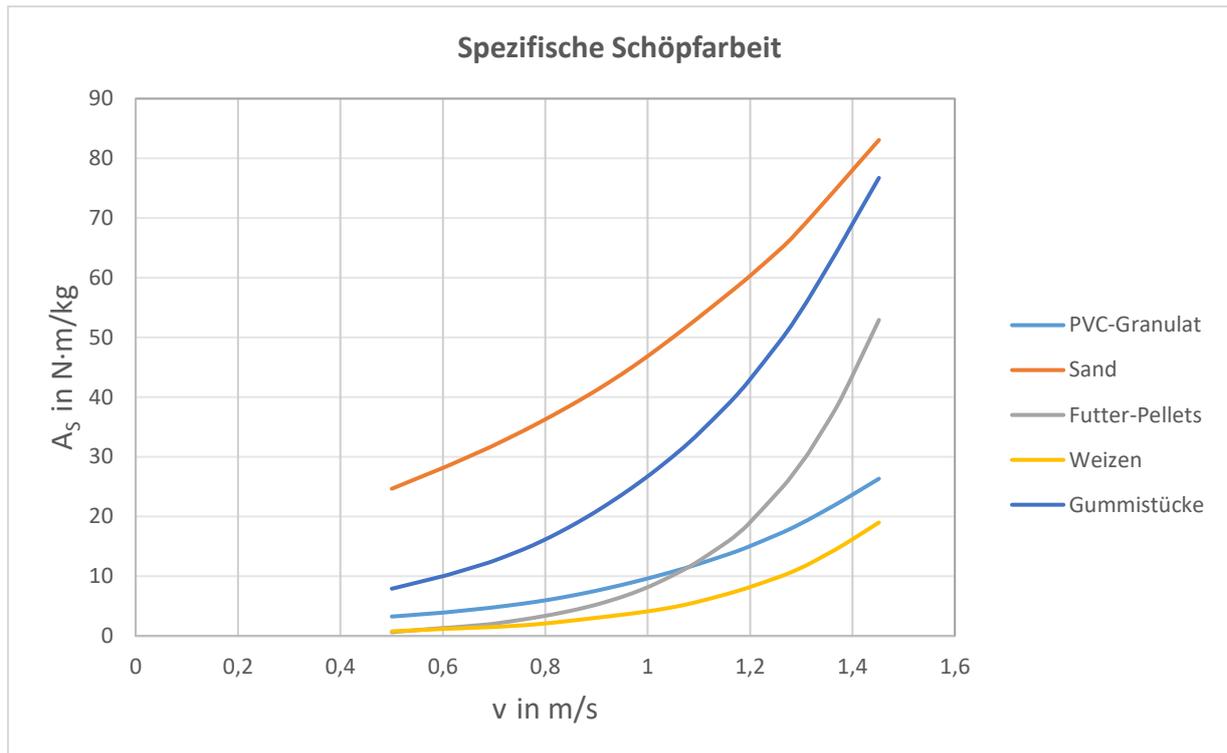


Abbildung 17: Spezifische Schöpfarbeit Schwerkraftbecher nach Dilefeld [8]

Qualitativ konnte Dilefeld die Abhängigkeit des Schöpfwiderstandes vom Becherfüllungsgrad bestätigen. So steigt der spezifische Schöpfwiderstand mit zunehmendem Becherfüllungsgrad überproportional an. Der Zusammenhang zwischen Schöpfwiderstand und Becherfüllungsgrad ist in Abbildung 19 für drei Fördergüter bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von $1,5 m/s$ dargestellt. In dem Diagramm ist zu erkennen, dass der spezifische Schöpfwiderstand bis zu einem Füllungsgrad von 0,8 relativ konstant zunimmt. Wird der Füllungsgrad weiter erhöht, steigt der Schöpfwiderstand deutlich an.

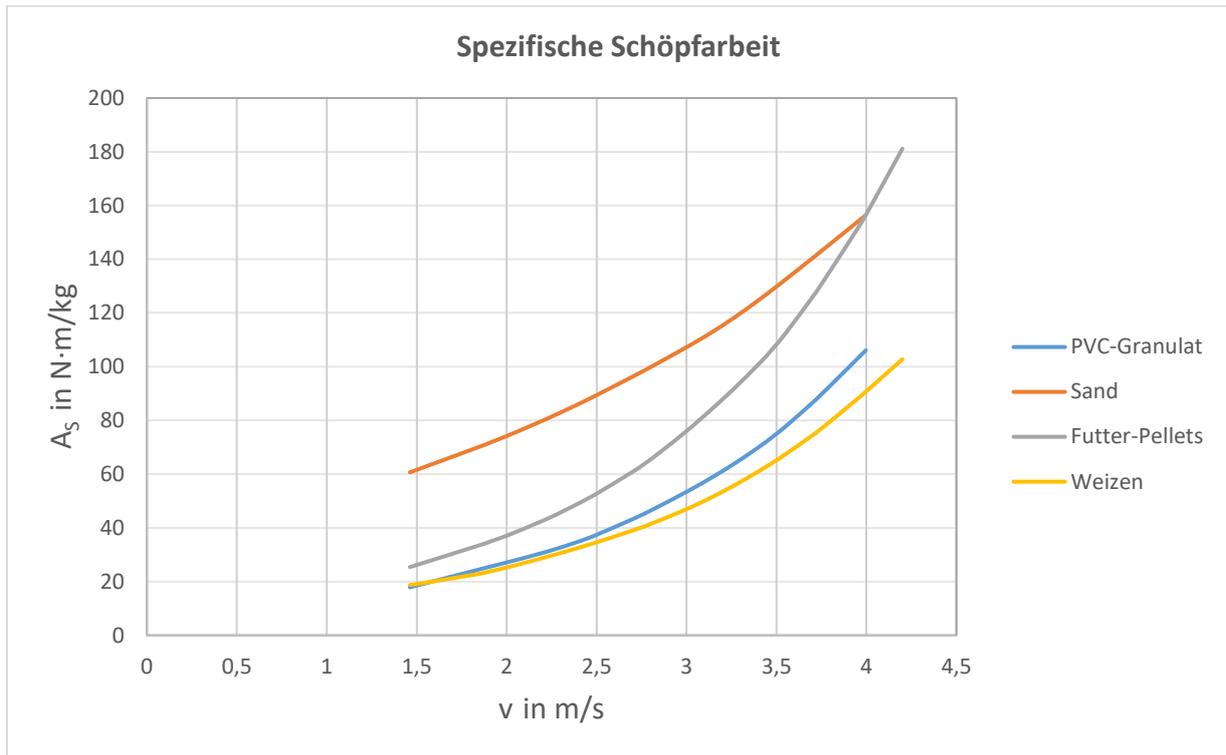


Abbildung 18: Spezifische Schöpfarbeit Fliehkraftbecher nach Dilefeld [8]

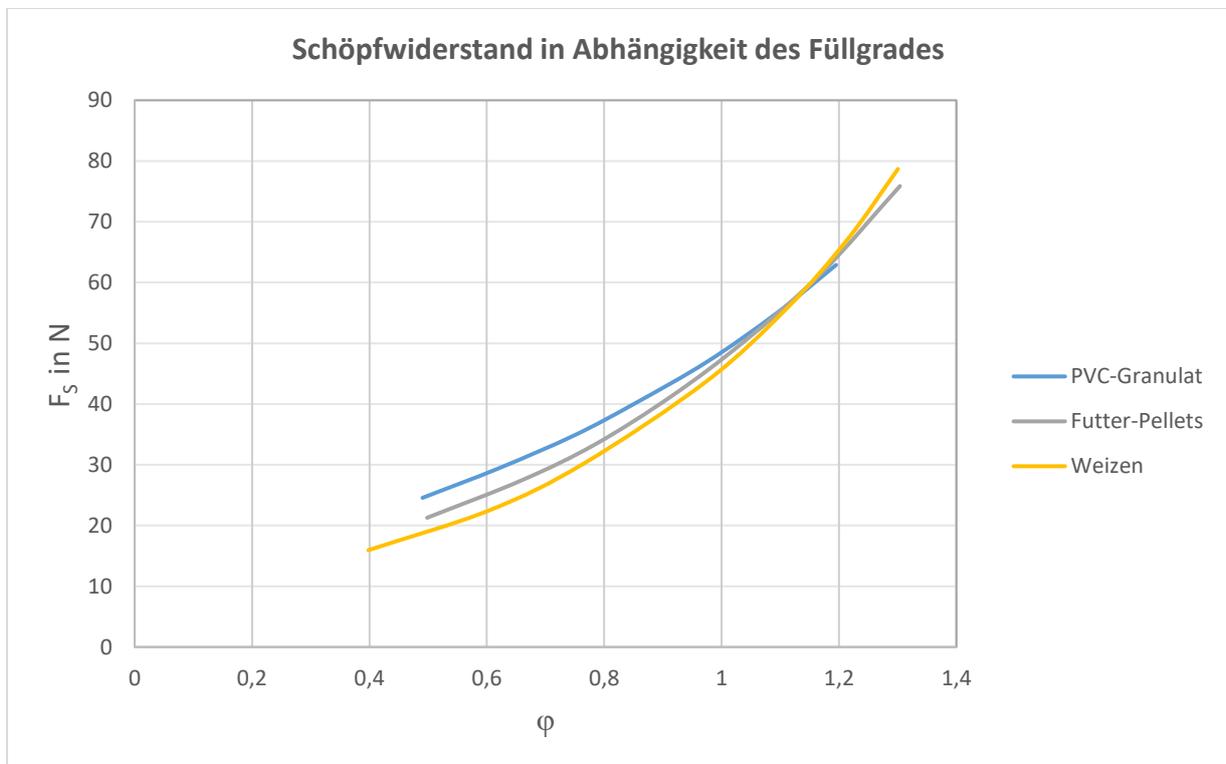


Abbildung 19: Schöpfwiderstand in Abhängigkeit des Füllgrades, Fliehkraftbecher $v = 1,5 \text{ m/s}$ [8]

2.1.5 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse

In den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.4 sind die einschlägigsten Untersuchungen zur Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit dargestellt worden. In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Erkenntnisse in aller Kürze zusammengefasst und die Ergebnisse quantitativ verglichen werden.

Grundsätzlich kommen alle Arbeiten zu dem Schluss, dass der Schöpfwiderstand von der Geometrie des Bechers, der Geometrie des Becherwerks, der Umlaufgeschwindigkeit des Zugmittels, dem Füllungsgrad der Becher und den Förderguteigenschaften beeinflusst wird. Bei der Bechergeometrie sind der Öffnungswinkel des Bechers und die Schöpfkantendicke jene Parameter, die den Schöpfwiderstand am meisten beeinflussen. Je dicker die Schöpfkante beziehungsweise je größer der Becherwinkel, desto größer ist der auftretende Schöpfwiderstand. Hinsichtlich der Geometrie des Becherwerks ist beim Schöpfen die Gestaltung des Becherwerkfußes von zentraler Bedeutung. Verschiedene Versuchsauswertungen kommen zu dem Ergebnis, dass ein Becherwerkfuß, der der Bahn des schöpfenden Bechers folgt, den Schöpfwiderstand verringern kann. Die Zugmittelgeschwindigkeit hat den größten Einfluss auf den Schöpfwiderstand. Je schneller die schöpfenden Becher bewegt werden, desto größer ist der auftretende Schöpfwiderstand. Der Füllungsgrad der Becher lässt sich über die eingebrachte Fördergutmenge beeinflussen. Mit steigendem Füllungsgrad der Becher nimmt der Schöpfwiderstand, vor allem bei einem Füllgrad größer als eins, deutlich zu. Werden die Förderguteigenschaften betrachtet, so scheint es, dass die innere Reibung eines Förderguts jene Schüttguteigenschaft ist, die den Schöpfwiderstand am meisten beeinflusst. Je größer die innere Reibung ist, desto größer ist der auftretende Schöpfwiderstand.

Um die verschiedenen Messergebnisse vergleichen zu können, werden die Ergebnisse des spezifischen Schöpfwiderstandes von Getreide in einem Diagramm dargestellt. Dieses Diagramm kann jedoch nur einen groben Vergleich der unterschiedlichen Untersuchungen liefern, da sich die Messmethoden, die Becherwerksgeometrien und die Becherfüllungsgrade teilweise deutlich unterscheiden. In Abbildung 20 ist schnell zu erkennen, dass die Ergebnisse nach Dilefeld, Hanffstengel und Ellwanger für Geschwindigkeiten bis 2 m/s annähernd ähnlich sind. Lediglich die Ergebnisse von Beumer und Wehmeier weichen deutlich ab. Dies liegt daran, dass das Ergebnis nicht mit dem entsprechenden K -Faktor nach Beumer und Wehmeier skaliert wurde. Die Skalierung mit dem Minderungsfaktor ist nicht möglich, da dieser für die kleinen Abmessungen des Modellschöpfwerkes nach Dilefeld nicht definiert ist. Der Unterschied der Ergebnisse von Ellwanger und Dilefeld für Geschwindigkeiten ab 2 m/s kann durch unterschiedliche Becherfüllungsgrade und unterschiedliche Messmethoden erklärt

Stand der Technik

werden. Außerdem ist davon auszugehen, dass die untersuchten Getreidearten nicht exakt die gleichen Schüttguteigenschaften aufweisen und somit ebenfalls zu geringen Abweichungen führen.

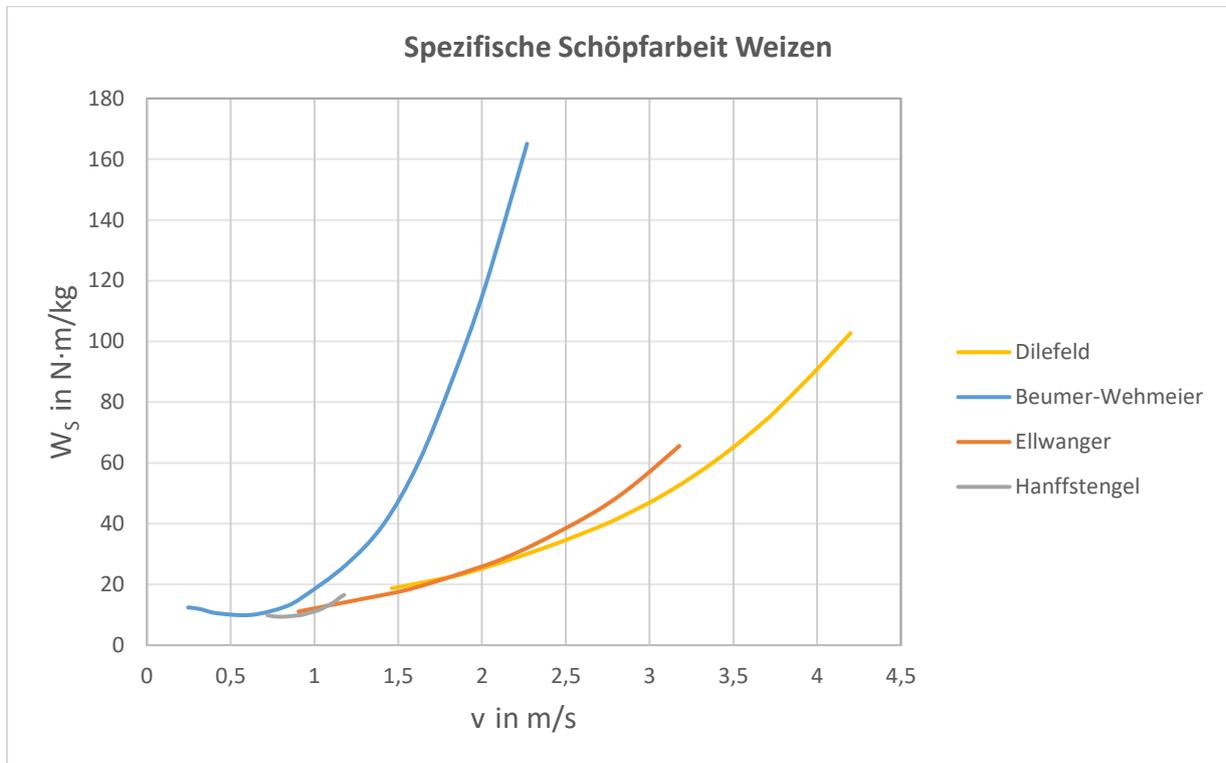


Abbildung 20: Vergleich der spezifischen Schöpfarbeit von Getreide

2.2 Analyse der Untersuchungen zur Becherentleerung

2.2.1 Einleitung

Die Entleerung der Becher erfolgt an der oberen Umlenkstelle des Becherwerks. Abhängig von der Zugmittelgeschwindigkeit und dem Radius der Umlenktrommel kann der Entleerungsvorgang in drei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Bei der Fliehkraftentleerung wird das Fördergut bereits im ersten Quadranten aufgrund der hohen Umlaufgeschwindigkeit über die Becheraußenkante aus dem Becher geschleudert. Im Gegensatz dazu steht die Schwerkraftentleerung, bei der das Fördergut im zweiten Quadranten über die Becherinnenkante aus dem Becher rutscht. Die Mischentleerung stellt eine Kombination aus Fliehkraft- und Schwerkraftentleerung dar.

Welche Entleerungsart vorliegt lässt sich graphisch über die Polhöhe und die geometrischen Abmessungen des Becherwerks ermitteln. In den Abbildungen 21 und 22 sind die Verhältnisse

Stand der Technik

bei Fliehkraft- und Schwerkraftentleerung dargestellt. Die Polhöhe h_p bezeichnet den Abstand zwischen der Rotationsachse und dem Pol P . Der Pol ergibt sich als Schnittpunkt der Wirkungslinie der Resultierenden F_R mit einer Vertikalebene, die durch die Achse der Antriebstrommel gelegt wird. Die Resultierende F_R setzt sich aus der vektoriellen Summe von Fliehkraft F_F und der Schwerkraft F_G des Förderguts im Becher zusammen. Bei der Fliehkraftentleerung ist die Polhöhe kleiner als der Radius der Becherrückwand um die Antriebstrommel r_i . Ist der Radius der Umlaufkurve der Becheraußenkante r_a kleiner als die Polhöhe wird von der Schwerkraftentleerung gesprochen. Falls sich die Polhöhe zwischen r_i und r_a befindet, liegt eine Mischentleerung vor [9].

Neben der Einteilung anhand der Polhöhe kann die Entleerungsart auch über die sogenannte Froudezahl bestimmt werden [10]. Das Froudesche Modellgesetz besagt, dass zwei Vorgänge hinsichtlich der Trägheitskräfte und Gewichtskräfte mechanisch ähnlich sind, wenn die Froudezahlen übereinstimmen [11]. Die Froudezahl Fr ist definiert als

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{lg}} \quad (2.7)$$

Aus Abbildung 21 lässt sich aus der Ähnlichkeit des Dreiecks AOP mit dem Kräftedreieck und der Annahme, dass die Becher mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω rotieren, folgender Zusammenhang ableiten:

$$\frac{h_p}{r} = \frac{F_G}{F_F} = \frac{mg}{m\omega^2 r} \quad \text{bzw.} \quad h_p = \frac{g}{\omega^2} \quad (2.8)$$

Aus der hergeleiteten Beziehung ist zu erkennen, dass der Polabstand für alle Punkte einer Kreisbahn bei einer konstanten Umlaufgeschwindigkeit immer gleich groß ist. Graphisch kann dieser Umstand bewiesen werden, indem für einen weiteren Becher ebenfalls die Wirkungslinie der Resultierenden aus Flieh- und Schwerkraft gebildet wird. Diese Wirkungslinie schneidet die Vertikalebene durch O wieder im Pol P . Für das Quadrat der Froudezahl mit der Zugmittelgeschwindigkeit v bezogen auf den Trommelradius r_T gilt:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{r_T g} = \frac{r_T \omega^2}{g} \quad (2.9)$$

Mit diesen Gleichungen können die Beziehungen für den Polabstand in Zusammenhänge mit der dimensionslosen Froudezahl umgeschrieben werden. Die Entleerungsbereiche in

Schwerkraftentleerung	Mischentleerung	Fliehkraftentleerung
$h_p > r_a$	$r_a \geq h_p \geq r_i$	$h_p < r_i$
$Fr^2 < \frac{r_T}{r_a}$	$\frac{r_T}{r_i} \geq Fr^2 \geq \frac{r_T}{r_a}$	$Fr^2 > \frac{r_T}{r_i}$

Tabelle 4: Entleerungsbereiche in Abhängigkeit des Polabstandes und der Froudezahl

Zuletzt sollen noch die spiralförmigen Linien in den Abbildungen 15 und 16 erläutert werden. Für ein ideales Schüttgut stellt sich bei ebener Betrachtung während der Drehbewegung eine zylindrische Oberfläche im Becher ein. Die Gleichung dieser Oberfläche stellt eine logarithmische Spirale dar [10]. Die Gleichung der rechtsdrehenden logarithmischen Spirale in Polarkoordinaten lautet:

$$r = ce^{\varphi}, \quad (2.10)$$

wobei c für eine beliebige Konstante steht. Um die Gleichung der linksdrehenden logarithmischen Spirale zu erhalten, muss die Gleichung der rechtsdrehenden Spirale invertiert werden. Werden die logarithmischen Spiralen durch den äußeren Bechereckpunkt bei der Fliehkraftentleerung beziehungsweise durch den inneren Bechereckpunkt bei der Schwerkraftentleerung gelegt, so schneiden die Spiralen teilweise die Becher. Die Ortlinien der Spiralen stellen hier, wie eingangs erwähnt, die Oberfläche des Fördergutes dar. Daraus folgt, dass jener Anteil des Fördergutes, das von den Becherkanten und der logarithmischen Spirale eingeschlossen wird, im Becher verbleibt und der Rest des Fördergutes ausgeworfen wird.

Nach der Bestimmung des Entleerungstyps kann anhand von analytischen Modellen der Auswurfbereich des Fördergutes bestimmt werden. Die analytischen Modelle treffen die Annahme, dass jedes Förderguteilchen nach dem Verlassen des Bechers der Bahn einer Wurfparabel folgt. Die Kenntnis dieser Bahnen ist erforderlich, um im Fall der Schwerkraftentleerung die Lage der Abgabeschurre zu ermitteln und somit zu verhindern, dass zu viel Fördergut zurück in den Förderschacht fällt. Bei der Fliehkraftentleerung würden die Wurfparabeln unzulässig hoch werden, daher wird das ausgeworfene Fördergut von Blechen zur Abwurfschurre geleitet. In den folgenden Kapiteln werden die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Auswurfparabeln beschrieben.

2.2.2 Entleerungsvorgang nach Beumer und Wehmeier

Beumer und Wehmeier ermitteln bei ihrer Methode jenen Punkt, bei dem die Auflagekraft eines Förderguteilchens gleich null wird [6]. In diesen Punkt wird eine Wurfparabel gelegt, die die

Stand der Technik

Bahn des Teilchens beschreibt. In ihrem Ansatz werden von Beumer und Wehmeier nur die Fliehkraft und der radiale Anteil der Schwerkraftkomponente berücksichtigt. Dieser Ansatz vernachlässigt somit die innere Reibung des Schüttgutes beziehungsweise die Wandreibung zwischen den Teilchen und der Becherwand. Die Kräfteverhältnisse und die theoretische Auswurfkurve sind in Abbildung 23 dargestellt.

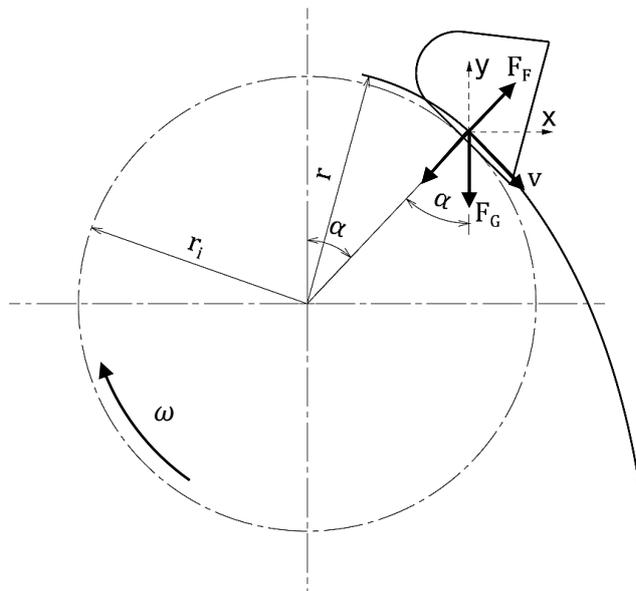


Abbildung 23: Abwurfverhältnisse nach Beumer und Wehmeier [6]

Die Gleichung zur Bestimmung des Ablöswinkels α ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht in radialer Richtung:

$$F_F - F_G \cdot \cos(\alpha) = 0 \quad (2.11)$$

Durch Einsetzen der entsprechenden Kräfte folgt:

$$m \cdot r \cdot \omega^2 - m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 0 \quad (2.12)$$

Wird die Luftreibung vernachlässigt, ergibt sich die Gleichung der allgemeinen Wurfparabel in x - und y -Richtung wie folgt:

$$x = r \cdot \omega \cdot \cos(\alpha) t \quad (2.13)$$

$$y = -r \cdot \omega \cdot \sin(\alpha) \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2 \quad (2.14)$$

Nachdem der Ablöswinkel ermittelt wurde, wird in dieser Position die Wurfparabel sowohl durch den Eckpunkt der Becherinnenkante als auch durch den Eckpunkt der

Stand der Technik

Becheraußenkante gelegt. Das ausgeworfene Fördergut sollte sich theoretisch nur in diesem begrenzten Bereich befinden. Anhand dieses Bereiches kann die minimal erforderliche Becherteilung ermittelt werden, um ein Aufprallen des Fördergutes auf den vorauseilenden Becher zu verhindern. Außerdem ist die Kenntnis des Auswurfbereiches notwendig, um die Lage der Ableitung optimal gestalten zu können.

2.2.3 Entleerungsvorgang nach Beckert und Föll

Im Gegensatz zu der Berechnungsmethode nach Beumer und Wehmeier wird bei dem Ansatz von Beckert und Föll sowohl die Reibungskraft als auch der tangentielle Anteil der Schwerkraft berücksichtigt [12]. Somit stellt das Modell von Beckert und Föll einen deutlich realistischeren Ansatz hinsichtlich jener Kräfte, die während der Umlaufbewegung auf das Fördergut wirken, dar.

Zu Beginn der Berechnung wird die Lage des Bechers ermittelt, bei dem sich das Fördergut relativ zum Becher gesehen, erstmals in Bewegung setzt. Eine Relativbewegung zwischen Fördergut und Becher tritt auf, sobald die Tangentialkomponente der Schwerkraft die Haftkraft überschreitet. Die Kräfteverhältnisse zum Start der Partikelbewegung können anhand von Abbildung 24 veranschaulicht werden.

Die Haftkraft R_H lässt sich mit dem Haftgrenzkoeffizienten μ_0 und der Summe der Kräfte in Normalrichtung bestimmen. Der Haftgrenzkoeffizient entspricht nach Beckert und Föll der Reibungszahl zwischen dem Fördergut und dem Becherwerkstoff, im Allgemeinen Stahl. Daraus ergibt sich zur Bestimmung des Rutschbeginns der Partikel folgende Gleichung:

$$F_G \cdot \sin(\alpha_0) = (F_G \cdot \cos(\alpha_0) - F_F) \cdot \mu_0 \quad (2.15)$$

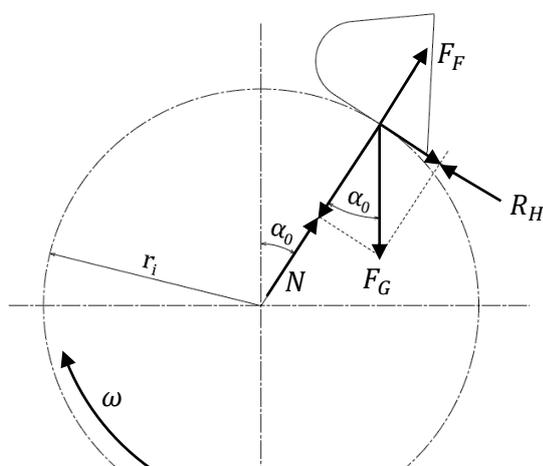


Abbildung 24: Verhältnisse zu Beginn der Rutschbewegung der Partikel nach Beckert und Föll [12]

Stand der Technik

Im nächsten Schritt wird der Startpunkt der Abwurfparabel ermittelt. Nach dem Beginn der Bewegung werden nach Beckert und Föll grundsätzlich zwei Möglichkeiten unterschieden. Entweder das Fördergut gleitet bis zur Außenkante des Bechers und folgt ab dort der Wurfparabel oder das Fördergut wird bereits vor dem Erreichen der Becheraußenkante entlang einer Wurfparabel abgeworfen. Die Berechnung des Startpunktes erfolgt über das dynamische Kräftegleichgewicht gemäß Abbildung 25.

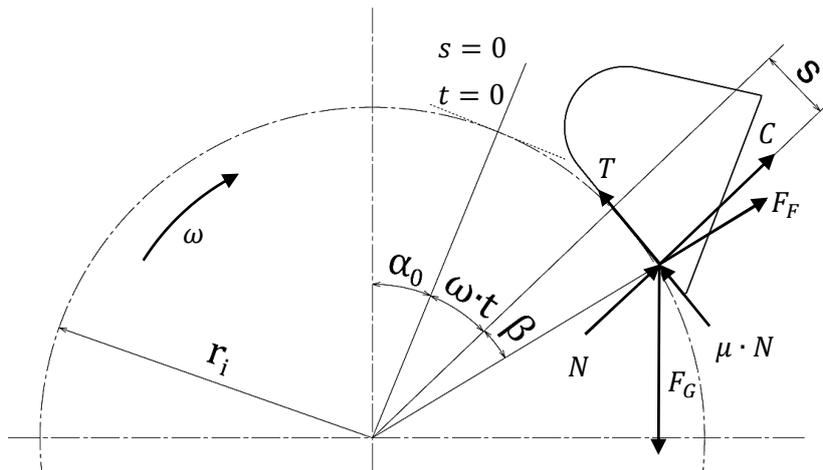


Abbildung 25: Dynamisches Kräftegleichgewicht nach Beckert und Föll [12]

Das Kräftegleichgewicht wird bezüglich eines einzelnen Teilchens, das sich relativ zur Umlaufbewegung entlang der inneren Becherwand bewegen kann, betrachtet. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird die Lage des Teilchens auf dem Kreis mit dem Radius r_i und dem Winkel α_0 beschrieben. Dieser Winkel wird nach Gleichung (3.6) ermittelt und kennzeichnet somit den Start der Relativbewegung des Teilchens. Nach einer gewissen Zeit t hat das Teilchen mit dem Becher die Bogenlänge entsprechend dem Winkel $\omega \cdot t$ und den Relativweg s zurückgelegt. Die Relativgeschwindigkeit und Relativbeschleunigung ergibt sich aus einmaliger beziehungsweise zweimaliger zeitlicher Ableitung von s . Gemäß dem dynamischen Kräftegleichgewicht müssen die Corioliskraft C , die Trägheitskraft T , die Fliehkraft F_F , die Normalkraft N , die Gewichtskraft F_G und die Reibkraft $\mu \cdot N$ im Gleichgewicht sein. Es sei darauf hingewiesen, dass der Gleitreibungskoeffizient μ nicht dem Haftreibungskoeffizienten μ_0 entspricht. Beckert und Föll errechnen den Gleitreibungskoeffizienten mit der Annahme, dass er 80% des Haftreibungskoeffizienten beträgt. Somit lassen sich folgende Gleichgewichtsbedingungen in radialer und tangentialer Richtung aufstellen:

$$\text{radial:} \quad F_F \cdot \cos(\beta) + C + N - F_G \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) = 0 \quad (2.16)$$

$$\text{tangential:} \quad F_F \cdot \sin(\beta) - T - \mu \cdot N + F_G \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) = 0 \quad (2.17)$$

Stand der Technik

$$\text{oder: } m\omega^2 r_i \cdot \cos(\beta) + 2m\omega s' + N - mg \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) = 0 \quad (2.18)$$

$$m\omega^2 r_i \cdot \sin(\beta) - ms'' - \mu N + mg \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) = 0 \quad (2.19)$$

Werden die Gleichungen (2.18) und (2.19) durch die Masse dividiert und die Normalkraft eliminiert, ergibt sich folgende Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$s'' - 2\mu\omega s' - \omega^2 s = \mu\omega^2 r_i + g[\sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \mu \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t)] \quad (2.20)$$

Aus der Lösung dieser Differentialgleichung ergeben sich der Relativweg, die Relativgeschwindigkeit und die Relativbeschleunigung zu einem beliebigen Zeitpunkt. Diese Ergebnisse werden in Gleichung (2.16) eingesetzt. Das Fördergutteilchen löst sich vom Becher, sobald die Normalkraft den Wert 0 erreicht. Somit kann der Ablösepunkt P_1 zur Zeit t_1 in Abbildung 26 berechnet werden.

Die Wurfparabel wird in einem Koordinatensystem mit dem Ursprung P_1 beschrieben. Falls s_1 größer ist als die Länge der Becherwand, wird als Ursprung die Becherkante angenommen. Die Anfangsgeschwindigkeit ergibt sich durch Addition der Relativgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit der Kreisbewegung. In x und y Richtung wird die Bahn der Wurfparabeln folgendermaßen berechnet:

$$x = [(r_i \cdot \omega + s_1') \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t_1) - s_1 \cdot \omega \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t_1)] \cdot t \quad (2.21)$$

$$y = [-(r_i \cdot \omega + s_1') \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t_1) - s_1 \cdot \omega \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t_1)] \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2 \quad (2.22)$$

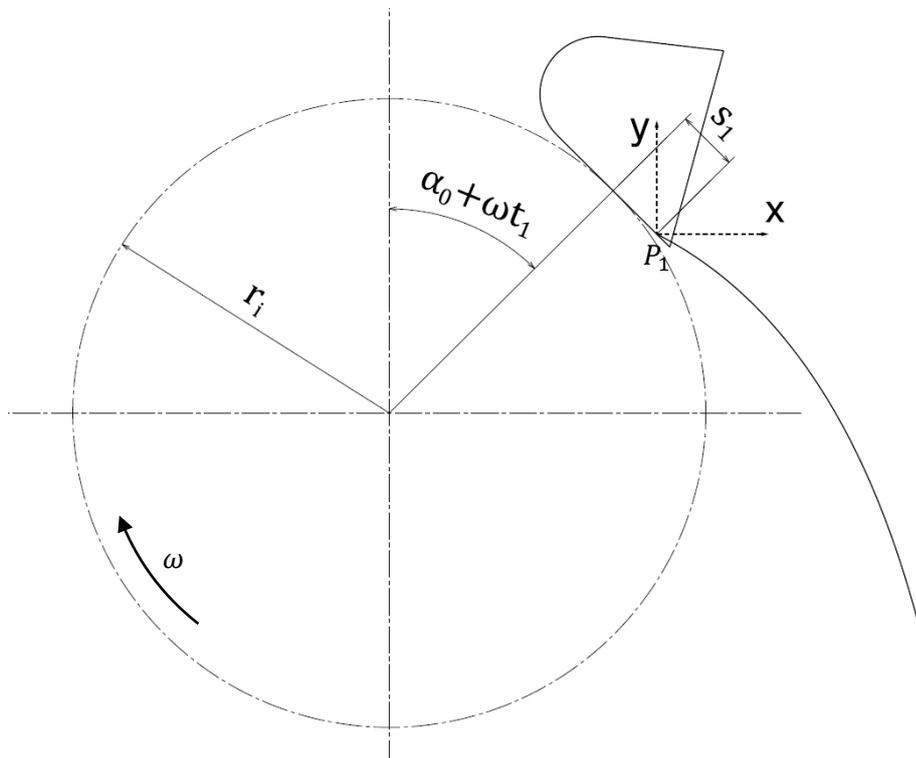


Abbildung 26: Abwurfparabel nach Beckert und Föll [12]

2.2.4 Entleerungsvorgang nach Hellmuth

Mit den bisher vorgestellten Modellen zur Becherentleerung können lediglich die Wurfparabeln der Fördergutteilchen, die entlang einer Becherwand gleiten, beschrieben werden. Im Allgemeinen sind diese Modelle ausreichend, damit der Auswurfbereich entsprechend geplant und konstruiert werden kann. Rademacher entwickelte in seiner Arbeit 1979 einen Satz von Gleichungen, um die Entleerung des gesamten Becherinhaltes von kohäsivem Material beschreiben zu können [13]. Der Becherinhalt wurde von Rademacher durch feste Scheiben, die im Becher gleiten, approximiert. Im Jahr 1993 wurde von Hellmuth im Rahmen einer Dissertation ein weiteres analytisches Modell, das den Entleerungsvorgang des gesamten Becherinhaltes beschreibt, vorgestellt [9].

Das Modell von Hellmuth ermöglicht es, die Auswurfparabel eines beliebigen Schüttgutteilchens der gesamten Becherfüllung zu ermitteln. Um die Lage und die Bewegung der Schüttgutteilchen im Becher beschreiben zu können, trifft Hellmuth die Annahme, dass sich die Schüttgutteilchen entlang geradliniger Gleitbahnen, die mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um einen Drehpunkt rotieren, bewegen. Die Gleitbahnen verlaufen je nach Entleerungstyp durch den Eckpunkt der Becherinnen- beziehungsweise der Becheraußenkante.

Stand der Technik

Da die Gleichungen zur Beschreibung der Bewegung entlang der Gleitbahnen sehr umfangreich sind und ihre Angabe keinen Mehrwert für diese Arbeit liefert, wird auf diese verzichtet. Die Ermittlung der Bewegungsgleichung eines Teilchens entlang der Gleitbahn erfolgt ähnlich zur Ermittlung der Bewegungsgleichung nach Beumer und Wehmeier. Es wird für ein beliebiges Masseteilchen auf einer Gleitbahn das dynamische Kräftegleichgewicht aufgestellt. Aus diesen Gleichgewichtsbedingungen lässt sich eine inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung ableiten, die bis auf die Lage der Gleitbahn, der Differentialgleichung (2.20) entspricht. Aus der Lösung der Bewegungsgleichung lässt sich auch hier die Relativgeschwindigkeit und die Relativbeschleunigung des Teilchens entlang der Gleitbahn ermitteln. Die Ausgangslage des betrachteten Teilchens auf der Gleitbahn wird dabei über die Anfangsbedingungen zur Lösung der Bewegungsgleichung berücksichtigt. Der Abwurfpunkt wird wieder durch ein Verschwinden der Normalkraft gekennzeichnet. Die Ermittlung der Abwurfgeschwindigkeit und der Wurfbahn ergibt sich aus den Lösungen der Bewegungsgleichung beziehungsweise den Gleichungen des schiefen Wurfes.

Mit Hilfe des Gleichungssatzes für ein beliebiges Teilchen auf einer beliebigen Gleitbahn wurde ein Computermodell erstellt, um den Entleerungsvorgang für beliebig viele Teilchen simulieren zu können. Werden die Auswurfbahnen der Teilchen in einem Bild überlagert, so ergibt sich der Auswurfbereich des gesamten Becherinhaltes. Da in Hellmuths Gleichungen die Becherform, die Geometrien des Becherwerks und die Förderguteigenschaften in Form der inneren Reibung eingehen, kann mit den Gleichungen der Auswurf präzise dargestellt werden.

3 Die Diskrete Elemente Methode (DEM)

3.1 Allgemeines

Die Diskrete Elemente Methode (DEM) ist eine numerische Berechnungsmethode, bei der im Gegensatz zur klassischen kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise von Partikelsystemen ausgegangen wird. Die DEM wurde erstmals 1979 von Cundall und Strack vorgestellt [14].

Die Berechnung dieser Partikelsysteme erfolgt in Zeitschritten. Für jeden Zeitschritt wird nach [15] folgender Berechnungszyklus durchlaufen:

- Zu Beginn werden die Newtonschen Bewegungsgleichungen für jeden möglichen Freiheitsgrad gelöst und somit die resultierenden Kräfte und Momente bestimmt.
- Anschließend wird das Kraft-Verformungs-Gesetz für das gewählte Kontaktmodell angewendet, woraus sich wiederum eine Relativbewegung ergibt. Mit der erhaltenen Relativbewegung startet der Zyklus mit der Lösung der Bewegungsgleichungen neu.

Der Vorteil der DEM liegt in ihrer geringen Komplexität. Es müssen für jeden Partikelkontakt nur wenige Gleichungen gelöst werden, wodurch sich der Rechenaufwand für kleine Simulationen in Grenzen hält. Die Berechnung von realen Problemstellungen mit bis zu einer Million Partikeln lässt sich heutzutage bereits auf normalen Desktop-Computern durchführen. Größere Simulationen können auf entsprechenden Clustern berechnet werden. Da die Rechenleistung kontinuierlich zunimmt, wird die DEM immer öfters zur Lösung von Konstruktionsfragen realer Schüttgutanlagen angewandt. Ein weiterer Vorteil der DEM liegt in der Informationsfülle der Ergebnisse. So kann beispielsweise nach erfolgter Berechnung die Belastung aller Bauteile dargestellt werden. Diese Belastungen sind in der Realität häufig nur schwer beziehungsweise gar nicht zu messen.

3.2 Die Simulationssoftware LIGGGHTS

3.2.1 Einführung

Alle im Rahmen dieser Arbeit erstellten DEM Simulationen werden mit der Open Source Software LIGGGHTS durchgeführt [16]. Die Abkürzung LIGGGHTS steht für „LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations“, wobei LAMMPS ein klassischer Simulator für Molekulardynamik ist.

Die Diskrete Elemente Methode (DEM)

Die Software kommt ohne eine graphische Benutzeroberfläche aus. Alle Start- und Simulationsparameter werden in Form einer Textdatei an die Simulationssoftware übergeben. Diese führt anschließend die Simulation durch. Die Ergebnisse können in VTK-Files gespeichert werden und mit einer beliebigen Post-Processing Software analysiert werden.

3.2.2 Beschreibung des Rechenmodells

In diesem Abschnitt soll das in LIGGGHTS angewandte Rechenmodell kurz zusammengefasst und die wichtigsten Gleichungen beschrieben werden. Das Rechenmodell lässt sich in die Bewegungsgleichungen, ein Kontaktmodell und einen Algorithmus zur Erkennung von Partikelkontakten einteilen [16].

Da LIGGGHTS ein Partikelmodell ist, werden die Bahnen jedes Teilchens während der gesamten Simulation berechnet. Die Ausgangsgleichungen zur Ermittlung der Bahn eines beliebigen Teilchens i werden vom Schwerpunktsatz und Drehimpulssatz gebildet:

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{F}_{i,n} + \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{F}_{i,f} + \mathbf{F}_{i,b} \quad (3.1)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \mathbf{r}_{i,c} \times \mathbf{F}_{i,t} + \mathbf{T}_{i,r} \quad (3.2)$$

Die Normalkraft $F_{i,n}$ und die Tangentialkraft $F_{i,t}$ werden gemäß dem gewählten Kontaktmodell berechnet. Optional kann mit dem Moment $T_{i,r}$ noch ein zusätzliches Torsionsmoment berücksichtigt werden. Dieses stellt einen Rollwiderstand dar. Mit dem Rollwiderstand wird meist der Umstand ausgeglichen, dass Schüttgutpartikel kugelförmig modelliert werden, jedoch in der Realität teilweise deutlich von dieser Form abweichen. Falls ein Fluid eine Kraft auf das Teilchen ausübt, wird diese Kraft durch den Ausdruck $F_{i,f}$ berücksichtigt. Die Kraft $F_{i,b}$ ist ein Sammelbegriff für alle anderen Kräfte wie beispielsweise Masse- und Magnetkräfte.

Als Kontaktmodell wird im Rahmen dieser Arbeit für alle Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Interaktionen das Hertz-Mindlin-Kontaktmodell gewählt. Bei diesem Kontaktmodell werden die Normalkräfte nach der Theorie von Hertz und die Tangentialkräfte nach dem Modell von Mindlin und Deresiewicz berechnet [17]. Die exakte Bezeichnung des Kontaktmodells lautet „Hertz-Mindlin no slip“. Der Zusatz „no slip“ wird hinzugefügt, da das Phänomen des Mikroschlupfs bei der Berechnung der Tangentialkräfte nicht berücksichtigt wird. Im Allgemeinen kann das Hertz-Mindlin-Kontaktmodell als ein Feder-Dämpfermodell gemäß Abbildung 27 verstanden werden.

Die Diskrete Elemente Methode (DEM)

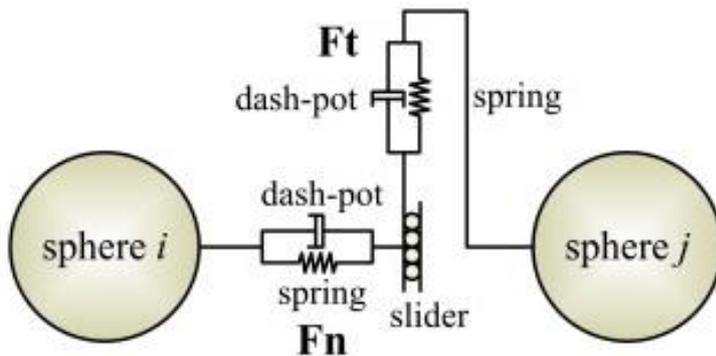


Abbildung 27: Darstellung des Hertz-Mindlin-Kontaktmodells [18]

Die Gleichung zur Berechnung der Normal- und Tangentialkräfte sind in der Dokumentation von LIGGGHTS angegeben. Sie lauten:

$$F = \underbrace{(k_n \delta n_{ij} - \gamma_n v n_{ij})}_{\text{Normalkraft}} + \underbrace{(k_t \delta t_{ij} - \gamma_t v t_{ij})}_{\text{Tangentialkraft}} \quad (3.3)$$

Der Maximalwert der Tangentialkraft wird durch folgende Beziehung beschränkt:

$$F_t \leq x_\mu F_n \quad (3.4)$$

In Gleichung (3.3) stellt der erste Term der Normalkraft eine Federkraft und der zweite Term eine Dämpfungskraft dar. Der erste Term der Tangentialkraft kann als Schubkraft und der zweite Term als Dämpfungskraft verstanden werden. Die ersten Terme bei der Normalkraft beziehungsweise der Tangentialkraft werden zufolge der Überlappung δn_{ij} in Normal- beziehungsweise δt_{ij} in Tangentialrichtung berechnet. Die Konstanten k_n , γ_n , k_t und γ_t sind Materialkonstanten. Diese werden aus dem Elastizitätsmodul, der Poissonzahl und dem Restitutionskoeffizienten der entsprechenden Materialien berechnet. Die Dämpfungskräfte sind beide proportional zur Relativgeschwindigkeit in Normal- beziehungsweise Tangentialrichtung.

Zusätzlich zum Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin wird beim Kontakt noch das Moment $T_{i,r}$ in Gleichung (3.2) berücksichtigt. Wie bereits besprochen, stellt dieses Moment einen Rollwiderstand dar. Das gewählte Modell wird der Kategorie der „Directional constant torque models“ zugeordnet [19]. Bei diesem Modell ist die Richtung des aufgebracht Moments immer der Relativgeschwindigkeit der Rotationsbewegung der beiden Kontaktpartner entgegengesetzt. Das Moment wirkt auf alle Partikel, die in Kontakt stehen. Es wird folgendermaßen berechnet:

Die Diskrete Elemente Methode (DEM)

$$T_r = \mu_r \cdot k_n \cdot \delta_n \cdot \frac{\omega_r}{|\omega_r|} \cdot R^* \quad (3.5)$$

LIGGGHTS ermittelt alle Kontakte zwischen Partikeln beziehungsweise Partikeln und Wänden anhand der sogenannten „neighbour lists“. In diesen Listen werden alle möglichen Kontakte aufgelistet. Somit werden alle Partikelpaarungen ausgeschlossen, die zu weit voneinander entfernt sind, um sich zu berühren. Der Grundgedanke ist, dass das Kontaktmodell nur für Kontakte angewendet wird, die tatsächlich stattfinden. Eine Partikelpaarung von kugelförmigen Teilchen wird in der Liste inkludiert, falls der Abstand der Mittelpunkte eine bestimmte Grenze unterschreitet. Die exakte Gleichung lautet:

$$\|x_i - x_j\| < r_i + r_j + s \quad (3.6)$$

Der Parameter s wird als „skin“ Parameter bezeichnet. Dieser Parameter kann im Rahmen von bestimmten Grenzen frei gewählt werden. Er regelt, für wie viele Zeitschritte die „neighbour“ Liste Gültigkeit besitzt.

4 Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

4.1 Einleitung

Eine gewissenhafte und ausführliche Kalibrierung der Materialparameter ist bei dem Einsatz der DEM unerlässlich. Die Ergebnisse der Simulationen sind immer nur so exakt, wie es die Güte der Kalibrierung und des gewählten Kontaktmodells zulässt.

Vor der Auswahl der Kalibrierungsversuche müssen zunächst die benötigten Materialparameter definiert werden. Wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt wurde, werden alle Simulationen im Rahmen dieser Arbeit mit dem „Hertz-Mindlin no slip“ Kontaktmodell durchgeführt. Die benötigten Materialparameter sind in Abbildung 28 dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden sie in Material-, Dämpfungs- und Reibungsparameter unterteilt.

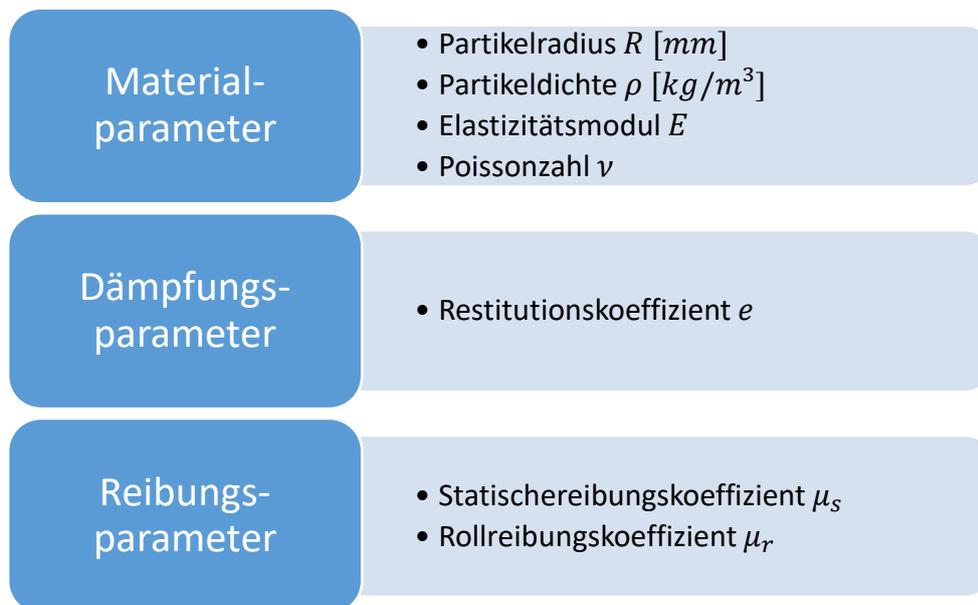


Abbildung 28: Zu kalibrierende Materialparameter

Die Materialparameter müssen pro Materialtyp nur einmal angegeben werden. Die Dämpfungs- und Reibungsparameter sind für jede mögliche Kontaktpaarung anzugeben. Bei der Simulation des Becherwerks wird lediglich ein Schüttgutmaterial in das Becherwerk eingebracht. Somit müssen die Parameter des Schüttgutes und der Wände des Becherwerks beziehungsweise der Becher kalibriert werden. Selbst für den einfachen Aufbau eines Schüttgutes und einer Wand, beispielsweise Getreide und Stahl müssen bereits 15 Parameter kalibriert werden. Wird der Umstand berücksichtigt, dass die Materialparameter für Stahl bekannt sind, für eine Wand kein Partikelradius und keine Partikeldichte benötigt wird und ein

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

Kontakt zwischen Stahl und Stahl nicht stattfindet, reduziert sich die Zahl der unbekannt Parameter auf zehn.

Es stellt sich nun die Frage, wie diese Parameter effizient ermittelt werden können. Im Allgemeinen wird von einer genauen Kalibrierung gefordert, dass die Fließeigenschaften und die mechanischen Eigenschaften des Schüttgutes in den Simulationen möglichst der Realität entsprechen. Anhand dieser Forderung ergeben sich viele denkbare Versuchsanordnungen zur Kalibrierung der Eingabeparameter. Die Fließeigenschaften werden meistens anhand von Böschungswinkel- und Rutschversuchen ermittelt. Diese Versuche zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau und ihre einfache Auswertung aus. Die Kalibrierung der mechanischen Eigenschaften erfolgt im Normalfall anhand von Scherversuchen, bei denen der Aufbau meist komplexer ist. Zudem können die Ergebnisse bei den Scherversuchen nicht mehr mit freiem Auge ermittelt werden, sondern es werden entsprechende Kraftaufnehmer beziehungsweise vergleichbare Messeinrichtungen benötigt.

Eine mögliche Versuchsanlage um die Eingabeparameter zu kalibrieren, wurde im Rahmen der Diplomarbeit „Entwicklung einer Versuchsanlage zur Kalibrierung von DEM-Modellen für Schüttgüter in der Fördertechnik“ entwickelt [20]. Die Parameter, die in dieser Arbeit Anwendung gefunden haben, wurden, wenn sie nicht aus der Literatur stammen, mit dieser Versuchsanlage kalibriert. Der Aufbau der Versuchsanlage ist in Abbildung 29 dargestellt. Zu Versuchsbeginn wird das Schüttgut in den oberen Behälter eingebracht. Der Behälter besteht aus zwei „Boxen“, wobei der obere Teil gegenüber dem unteren Teil verschoben werden kann. Die Verschiebung erfolgt mittels eines Schrittmotors. Während der Verschiebung wird die Kraft, die auf die obere Box aufgebracht wird, mit einem Kraftaufnehmer gemessen und aufgezeichnet. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften des Schüttgutes kalibriert werden. In weiterer Folge fällt das Schüttgut, wie in der Skizze dargestellt, aus der Box und rutscht über eine beliebig neigbare Rutsche nach unten. Anhand des Fließverhaltens des Schüttgutes auf der Rutsche, der Höhe des Auftreffpunktes an der Prallwand und der Form des Schüttguthaufens im Auffangbehälter können die Fließeigenschaften kalibriert werden.

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

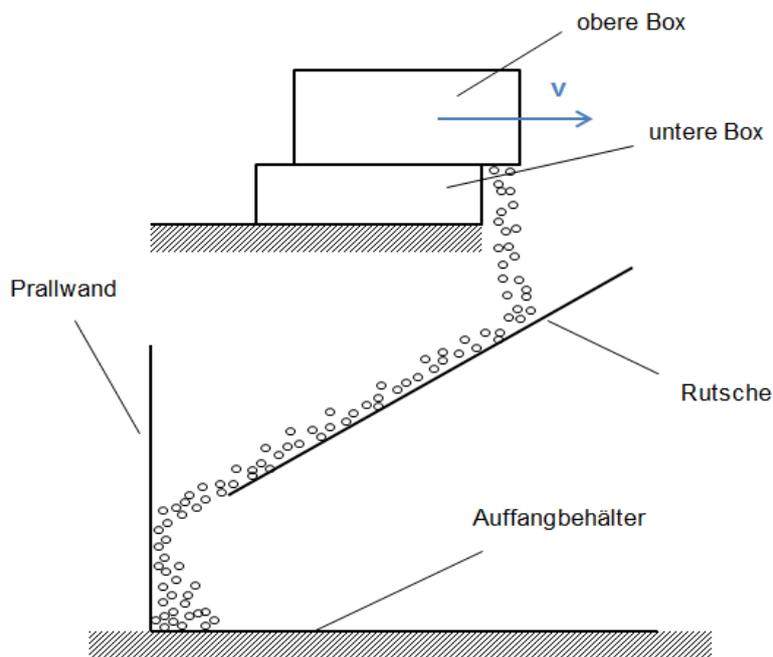


Abbildung 29: Prinzipieller Aufbau der Versuchsanlage [20]

4.2 Urea

Urea, lateinisch für Harnstoff, wird in der Industrie vor allem als Stickstoffdünger und als Zusatzstoff in der Ernährung von Wiederkäuern eingesetzt. Reines Urea ist ein weißer, kristalliner, rieselnder Stoff. Aufgrund seiner beinahe sphärischen Form eignet er sich sehr gut zur Untersuchung mittels der DEM. In Abbildung 30 ist ein reales Ureapartikel dargestellt.

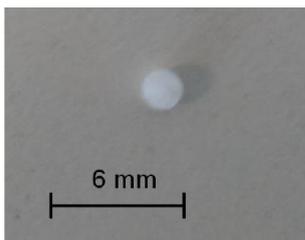


Abbildung 30: Reales Ureapartikel [20]

Urea wurde bereits im Rahmen der Diplomarbeit von Kalkan kalibriert [20]. Die Darstellung der Ureapartikel erfolgt durch kugelförmige Partikel mit einem Radius von 3 mm . Der Radius wurde im Vergleich zu den realen Partikeln ungefähr auf das Dreifache vergrößert. Die Vergrößerung ist notwendig, um die Partikelanzahl klein halten zu können. Ansonsten würde die Rechenzeit bei der Simulation von großen Fördertechnikanlagen beispielsweise eines längeren Schneckenförderers deutlich ansteigen und den Rahmen sprengen. Durch eine sorgfältige Wahl der Reibungs- und Dämpfungsparameter konnte die Erhöhung des

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

Partikelradius kompensiert werden und die Ergebnisse des Scherversuchs und des Böschungswinkels der Simulationen entsprachen den Ergebnissen der realen Versuche. In Tabelle 5 sind die Eingabeparameter der Ureapartikel in Kombination mit Stahl angegeben.

			Urea
Partikelradius	R	mm	3
Restitutionskoeff. P-P	$e_{part-part}$	-	0,25
stat. Reibung P-P	$\mu_{s,part-part}$	-	0,4
Rollreibung P-P	$\mu_{r,part-part}$	-	0,01
Restitutionskoeff. P-S	$e_{part-stahl}$	-	0,27
stat. Reibung P-S	$\mu_{s,part-stahl}$	-	0,788
Rollreibung P-S	$\mu_{r,part-stahl}^l$	-	0,382
Poissonzahl Partikel	ν_{part}	-	0,3
E-Modul Partikel	E_{part}	Pa	$8 \cdot 10^6$
Partikeldichte	ρ_{part}	kg/m^3	1363

Tabelle 5: Eingabeparameter Urea [20]

4.3 Getreide

Getreide, im speziellen Weizen, tritt in der Fördertechnik sehr häufig auf. Da Getreide auch in allen vorausgegangenen Untersuchungen des Schöpfwiderstandes analysiert wurde, soll es auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Aufgrund ihrer eher länglichen Form wird bei den Getreidekörnern auf eine rein sphärische Partikelform in den Simulationen verzichtet. Komplexere Partikelgeometrien lassen sich im Rahmen der DEM durch sogenannte „Multisphere-Partikel“ darstellen. Bei diesem Partikeltyp wird versucht, die reale Partikelform des Schüttgutes durch die beliebige Kombination von kugelförmigen Partikel zu erreichen. Dabei werden für die einzelnen Kugeln jeweils ihr Mittelpunkt und ihr Radius vorgegeben. Anschließend wird von der Software ein Partikel aus diesen Kugeln erzeugt. Die einzelnen Kugeln bei diesen neu erzeugten Partikeln dürfen sich auch überlappen. In Abbildung 31 ist die Partikelform eines Weizenpartikels dargestellt.

Sowohl die Partikelform als auch die Materialparameter stammen aus der Literatur [21]. In dieser Arbeit wurde das Ausflussverhalten von Getreide aus einem Silo an der Universität von Belgrad untersucht. Bei den Materialparametern wurde lediglich der Elastizitätsmodul modifiziert. Dieser wurde um zwei Zehnerpotenzen geringer gewählt als in [21] angegeben. Durch eine Verminderung des Elastizitätsmoduls, die bei DEM-Simulationen üblich ist, wird eine Reduzierung der Rechenzeit erreicht, da der entsprechende Simulationszeitschritt größer

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

gewählt werden kann. Die Eingabeparameter inklusive des modifizierten Elastizitätsmoduls sind in Tabelle 6 dargestellt.

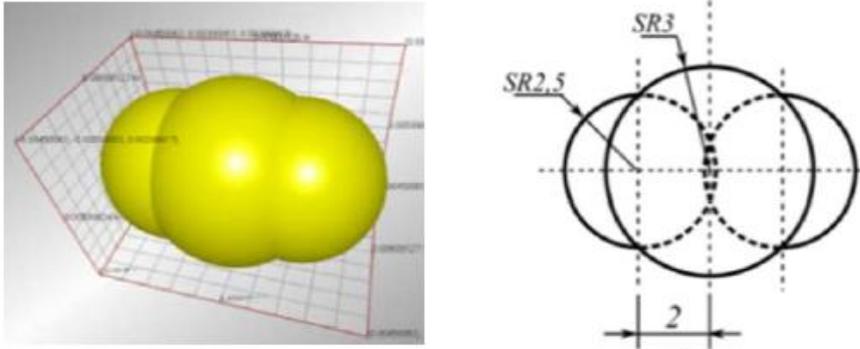


Abbildung 31: Partikelgeometrie eines Weizenpartikels [21]

			Getreide
Partikelradius	R	mm	2,5-3-2,5
Restitutionskoeff. P-P	$e_{part-part}$	-	0,5
stat. Reibung P-P	$\mu_{s,part-part}$	-	0,3
Rollreibung P-P	$\mu_{r,part-part}$	-	0,01
Restitutionskoeff. P-S	$e_{part-stahl}$	-	0,6
stat. Reibung P-S	$\mu_{s,part-stahl}$	-	0,25
Rollreibung P-S	$\mu_{r,part-stahl}^I$	-	0,01
Poissonzahl Partikel	ν_{part}	-	0,4
E-Modul Partikel	E_{part}	Pa	$1,0024 \cdot 10^7$
Partikeldichte	ρ_{part}	kg/m^3	1460

Tabelle 6: Eingabeparameter Weizen [21]

4.4 Hackschnitzel

Als drittes Schüttgut sollen Buchenhackschnitzel gefördert werden. Die Hackschnitzel haben eine Größe von 0 – 60 mm und ihre ungefähre Schüttdichte beträgt $350 kg/m^3$. Die Kalibrierung der Hackschnitzel erfolgte anhand der am Institut vorhandenen Versuchsanlage, die in Abschnitt 4.1 vorgestellt wurde. Eine Fotografie der Hackschnitzel ist in Abbildung 32 abgebildet. Es ist augenscheinlich, dass die Form der Hackschnitzelpartikel deutlich von einer sphärischen Form abweicht. Deshalb wurden die Partikel wieder in Form von „Multisphere-Partikel“ angenähert. Charakteristisch an der Form eines Hackschnitzelteilchens ist, dass die Dicke des Teilchens im Vergleich zu den Längen- und Breitenabmessungen eher gering ist. Somit bot sich die Annäherung der Teilchen gemäß Abbildung 33 an. Schlussendlich besteht

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

ein Hackschnitzelteilchen aus 6×3 Kugeln. Jede dieser Kugeln hat einen Radius von 3 mm . Die Gesamtabmessungen eines Teilchens betragen nun $36 \times 18 \times 6 \text{ mm}$.



Abbildung 32: Hackschnitzelpartikel

Nachdem die Form der Teilchen festgelegt wurde, kann die Kalibrierung starten. Zu Beginn mussten die Parameter des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl ermittelt werden. Diese beiden Parameter stammen aus der Literatur [22]. Der E-Modul von Buche beträgt $1,4 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Dieser wurde um zwei Zehnerpotenzen auf $1,4 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ abgemindert. Die Querkontraktionszahl beträgt gemäß der Literatur ungefähr 0,4. Die Restitutionskoeffizienten für die Materialpaarungen Hackschnitzel-Stahl und Hackschnitzel-Hackschnitzel wurden mit 0,2 beziehungsweise 0,35 angenommen.

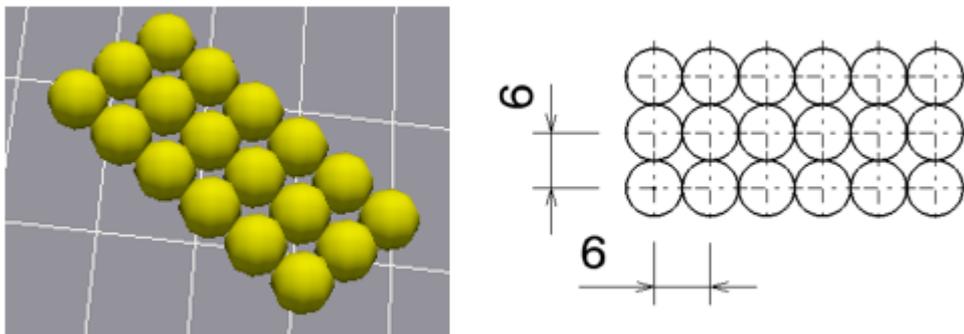


Abbildung 33: LIGGGHTS-Modell der Hackschnitzelpartikel

Die Feststoffdichte der Partikel wurde nicht aus der Literatur entnommen, sondern anhand der Füllhöhe des oberen und unteren Behälters der Versuchsanlage (Abbildung 29) ermittelt. Die Masse der Hackschnitzel im Behälter betrug $1,040 \text{ kg}$ bei einer Füllhöhe von $13,4 \text{ cm}$. Anhand dieser Daten wurde die Feststoffdichte der Partikel solange variiert, bis sich in der LIGGGHTS-Simulation bei derselben Masse dieselbe Füllhöhe ergab. Durch diesen Vorgang ergab sich

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

eine Dichte von 800 kg/m^3 . Dieser Wert erscheint plausibel. Gemäß Literatur beträgt die Rohdichte von Buche 780 kg/m^3 [22].

Abschließend waren noch die Reibungsparameter für die Kontaktpaarungen Partikel-Partikel und Partikel-Stahl zu bestimmen. Diese wurden solange variiert, bis die Kraftverläufe der Simulationen und der realen Versuche beim Abscheren möglichst ähnlich waren. Die Ergebnisse des Scherversuches für zwei reale Messungen und drei Simulationen sind in Abbildung 34 dargestellt. Der Graph der realen Funktionen ist ab 57 N konstant, da hier der Messbereichsendwert des Kraftaufnehmers erreicht wurde. Durch diesen Fehler im Messaufbau ist der weitere Kraftverlauf nicht ersichtlich. Die Messergebnisse wurden trotz dieses Fehlers übernommen, da sie sich die Verläufe gut mit den Simulationen vergleichen lassen. Die Kraftverläufe sind bis zu einer Verschiebung von 30 mm relativ ähnlich. Danach unterscheiden sich die Kraftverläufe, da sich die Partikel zufällig während des Abscherens verkanten. Das Phänomen des Verkantens kann sowohl in den Simulationen (Simulation 1, 54 mm) als auch bei den realen Versuchen (Realer Versuch 2, 32 mm) beobachtet werden.

Da die Kraftverläufe der Scherversuche relativ ähnlich sind und auch das Verkanten in den Simulationen beobachtet werden kann, ist davon auszugehen, dass die Hackschnitzel durch die gewählte Partikelform in Zusammenspiel mit den Reibungs- und Dämpfungsparametern ausreichend genau beschrieben werden. In Tabelle 7 sind die Eingabeparameter kompakt zusammengefasst.

			Hackschnitzel
Partikelradius	R	mm	3, [Partikel im Gitter 6x3]
Restitutionskoeff. P-P	$e_{Part-Part}$	-	0,35
stat. Reibung P-P	$\mu_{s,Part-Part}$	-	0,7
Rollreibung P-P	$\mu_{r,Part-Part}$	-	0,3
Restitutionskoeff. P-S	$e_{Part-Stahl}$	-	0,2
stat. Reibung P-S	$\mu_{s,Part-Stahl}$	-	0,3
Rollreibung P-S	$\mu_{r,Part-Stahl}^I$	-	0,1
Poissonzahl Partikel	ν_{Part}	-	0,4
E-Modul Partikel	E_{Part}	Pa	$1,4 \cdot 10^7$
Partikeldichte	ρ_{Part}	kg/m^3	800

Tabelle 7: Eingabeparameter Hackschnitzel

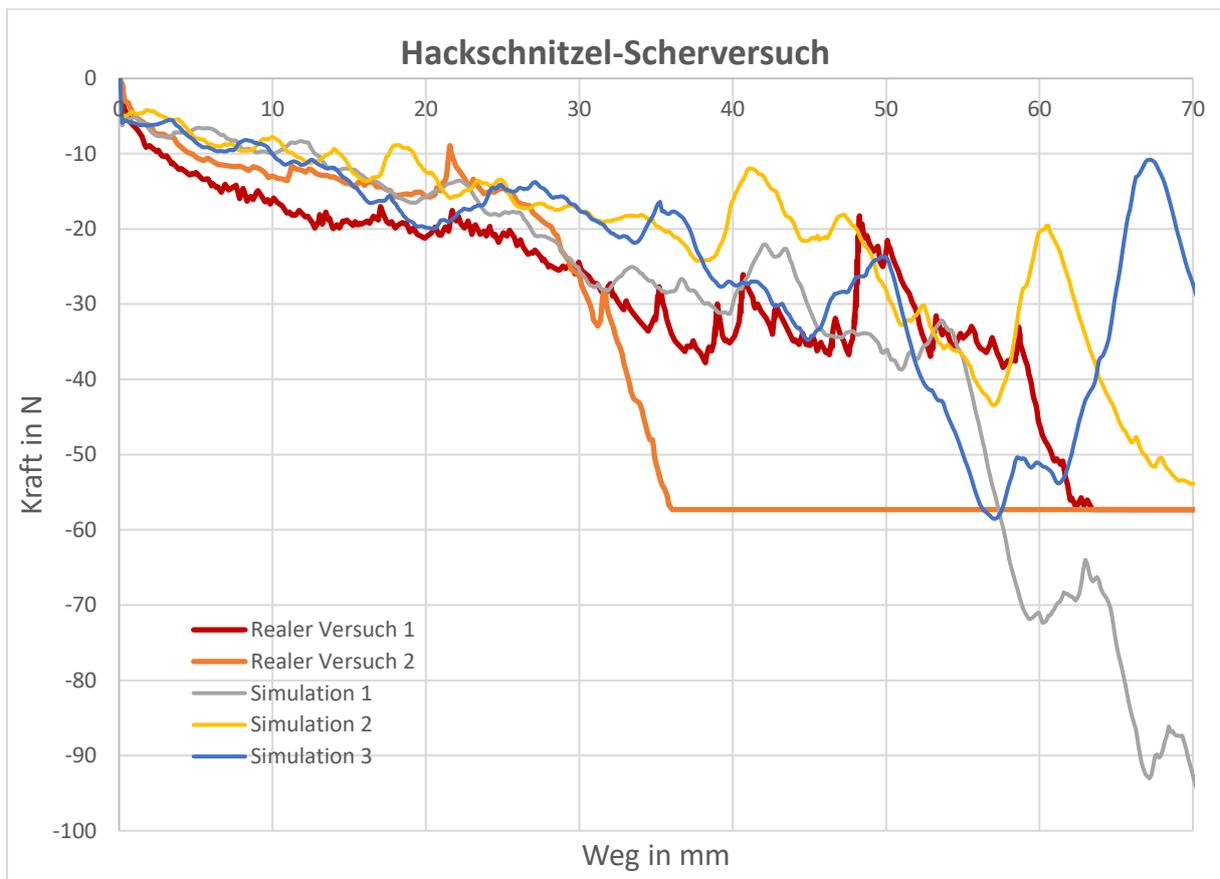


Abbildung 34: Hackschnitzel-Scherversuch

4.5 Reststoffe

Reststoffe werden in der Industrie häufig als Sekundärbrennstoff bei Verbrennungsprozessen verwendet. Beispielsweise kommen sie bei der Erzeugung von Zementklinker zum Einsatz. Die Zusammensetzung und die Größe der einzelnen Reststoffpartikel kann je nach Herkunft der Reststoffe stark variieren. In Abbildung 35 ist eine Fotografie der Reststoffe, die im Rahmen dieser Arbeit kalibriert wurden, abgebildet. Das Material wurde anhand der Versuchsanlage und eines Kompressionsversuchs kalibriert.

Im ersten Schritt wurde analog zur Kalibrierung der anderen Schüttgüter die Partikelform festgelegt. In Abbildung 35 sind die Reststoffpartikel auf einer Rutsche mit einer Neigung von 38° abgebildet. Da die Partikel bei dieser Neigung auf der Rutsche verharren, schied die Verwendung von sphärischen Partikeln in der Simulation aus. Ein Reststoffteilchen wird in der Simulation durch ein ebenes 2×1 „Multisphere-Partikel“ gemäß Abbildung 36 dargestellt. Eine Kugel hat dabei einen Radius von 3 mm .

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien



Abbildung 35: Reststoffpartikel auf der Rutsche

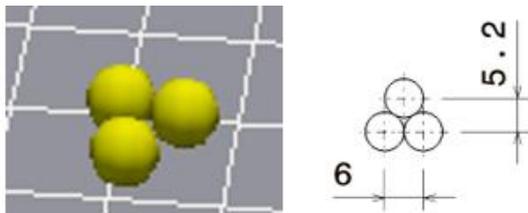


Abbildung 36: Reststoff-Partikel

Der Kompressionsversuch wurde zusätzlich zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls der Partikeln durchgeführt. Beim Versuch wurde eine Masse von $0,3 \text{ kg}$ der Reststoffe in einen Zylinder mit einem Durchmesser von $88,5 \text{ mm}$ eingebracht und anschließend mit Massen zwischen $0,36 \text{ kg}$ und $5,5 \text{ kg}$ belastet. Der Versuch lieferte das Resultat, dass die Reststoffe sehr leicht komprimierbar sind. Bei der Belastung von $5,5 \text{ kg}$ verringerte sich die Füllhöhe im Zylinder von 155 mm auf 78 mm . In Abbildung 37 sind die Versuchsergebnisse der Simulation abgebildet. Um dieselbe Kompression der Reststoffpartikeln in der Simulation zu erhalten, ist ein Elastizitätsmodul von $5,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ notwendig. Dieser Elastizitätsmodul ist jedoch zu gering, um aussagekräftige Simulationen durchführen zu können. Ein Problem eines solch geringen Elastizitätsmoduls ist bereits in den visualisierten Versuchsergebnissen erkennbar. Im komprimierten Zustand befinden sich ein paar Partikel in der Geometrie des Deckels. Dieser Zustand wird sich in der Realität niemals einstellen. Der Elastizitätsmodul wurde daher auf einen Wert von $5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ erhöht.

Die Ermittlung der Feststoffdichte der Reststoffpartikel erfolgte analog zur Kalibrierung bei den Hackschnitzeln. Im realen Versuch stellte sich bei einer Masse von $0,839 \text{ kg}$ im Behälter eine

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

Füllhöhe von $7,4\text{ cm}$ ein. Um eine ähnliche Füllhöhe mit der gewählten Partikelform zu erreichen, musste eine Feststoffdichte von 700 kg/m^3 gewählt werden.

Nach der Definition des Elastizitätsmoduls und der Feststoffdichte, waren noch die Reibungsparameter, die Dämpfungsparameter und die Querkontraktionszahl zu ermitteln. In Summe verblieben daher sieben unbekannte Parameter. Bei solch einer Anzahl an unbekanntem Parametern empfiehlt sich die statistische Versuchsplanung. Es wurde analog zur Arbeit von Kalkan [20] ein Box-Benken-Versuchsplan mit 62 Einzelversuchen erstellt. Eingangs wurde bereits erwähnt, dass die Reststoffpartikel während des realen Versuches auf der Rutsche verharren und nicht abrutschen. Deshalb mussten sie mit einer Metallplatte von der Rutsche in den Auffangbehälter geschoben werden. Die Zielgrößen für den Versuchsplan waren die mittlere Kraft beim Abscheren, die Bedingung, dass eine möglichst große Masse der Reststoffe auf der Rutsche verharret, und die Höhe des Partikelhaufens im Auffangbehälter. Anschließend wurden die Ergebnisse mittels der JMP Software der SAS Institute ausgewertet und die optimale Kombination der Eingabeparameter ermittelt. Die Ergebnisse der realen und simulierten Scherversuche sind in Abbildung 38 dargestellt.

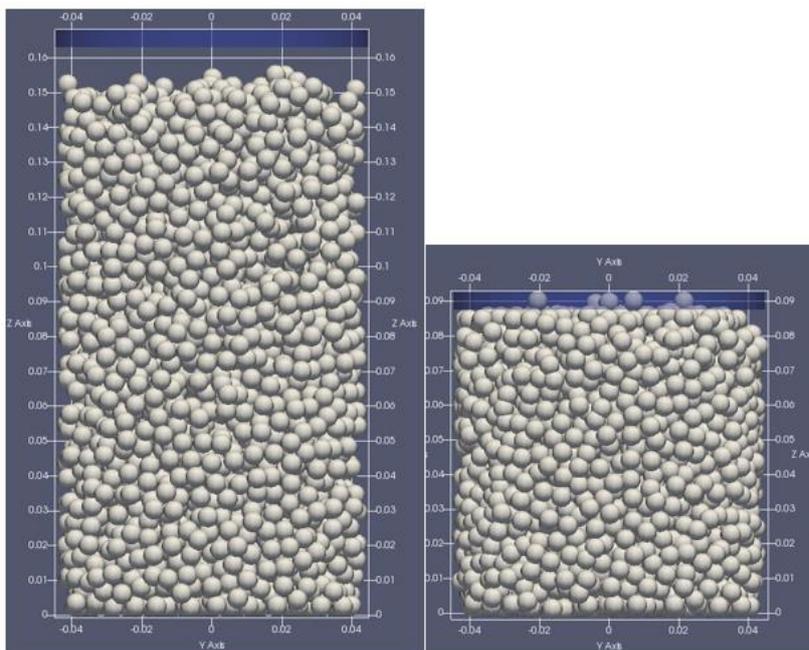


Abbildung 37: Kompressionsversuch Reststoffe

Der Mittelwert, der in der Simulation auftretenden Kraft im Bereich von $50 - 100\text{ mm}$, liegt mit einem Wert von $5,6\text{ N}$ zwischen den Werten der realen Versuche mit $5,3\text{ N}$ und 6 N . Bezüglich der Fließeigenschaften kann erwähnt werden, dass in den Simulationen 76% des Schüttgutes, das auf die Rutsche fällt, auf dieser verharret. Somit werden sowohl die

Kalibrierung der Schüttgutmaterialien

Fließeigenschaften als auch die mechanischen Eigenschaften des Schüttgutes in den Simulationen gut abgebildet. Aus Tabelle 8 können die Eingabeparameter der Reststoffpartikel entnommen werden.



Abbildung 38: Reststoffe-Scherversuch

			Reststoffe
Partikelradius	R	mm	3, [Partikel im Gitter 2x1]
Restitutionskoeff. P-P	$e_{part-part}$	-	0,25
stat. Reibung P-P	$\mu_{s,part-part}$	-	0,6
Rollreibung P-P	$\mu_{r,part-part}$	-	0,1
Restitutionskoeff. P-S	$e_{part-stahl}$	-	0,1
stat. Reibung P-S	$\mu_{s,part-stahl}$	-	0,889
Rollreibung P-S	$\mu_{r,part-stahl}^I$	-	0,9
Poissonzahl Partikel	ν_{part}	-	0,35
E-Modul Partikel	E_{part}	Pa	$5 \cdot 10^5$
Partikeldichte	ρ_{part}	kg/m ³	700

Tabelle 8: Eingabeparameter Reststoffe

5 Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

5.1 Versuchsaufbau in LIGGGHTS

5.1.1 Einleitung

Die Abmessungen des Becherwerks zur Bestimmung des Schöpfwiderstandes in den Simulationen entsprechen den Abmessungen des Versuchsbecherförderers nach Dilefeld. Es wurde dieselbe Geometrie gewählt, da die Messergebnisse und die Versuchsdurchführung bei Dilefeld sehr ausführlich dokumentiert sind. Dadurch sind die Ergebnisse der Simulationen direkt mit den Ergebnissen von Dilefeld vergleichbar.

Der Schöpfwiderstand des Becherwerks wird während des normalen Betriebs gemessen, sobald sich ein konstanter Becherfüllgrad von 0,5 eingestellt hat. Bei den Schöpfversuchen wird ein Zugmittelgeschwindigkeitsbereich von $1,5 \text{ m/s}$ bis 4 m/s untersucht. Dies entspricht dem Geschwindigkeitsbereich der Fliehkraftentleerung.

Die Definition des Schöpfwiderstandes erfolgt analog zur Definition von Dilefeld sowie Beumer und Wehmeier. Als Schöpfwiderstand wird die Zunahme der Umfangskraft am Antriebsrad während des Schöpfvorganges verstanden. Die Umfangskraft lässt sich im realen Betrieb in mehrere Anteile aufteilen. In ihr sind ein Schöpfanteil, ein Auswurfanteil, ein Hubanteil und ein Reibungsanteil zufolge der Reibung in Ketten und Lagern enthalten. In den Messungen von Dilefeld wurde der Reibungsanteil durch Leerfahrten des Becherwerks und der Hubanteil rechnerisch eliminiert. Der ausgewiesene Schöpfwiderstand setzt sich deshalb nur aus dem Schöpfanteil und dem Auswurfanteil zusammen. Deshalb muss in den Simulationen neben dem Schöpfanteil ebenfalls der Auswurfanteil ermittelt werden, um die Simulationsergebnisse mit den realen Versuchsergebnissen vergleichen zu können.

Der Schöpfanteil und der Auswurfanteil wurden in zwei getrennten Simulationen ermittelt. Eine Simulation des gesamten Becherwerks ist aus mehreren Gründen nicht zweckmäßig. Einerseits würde bei einer Simulation des gesamten Becherwerks die Partikelanzahl und somit die Rechenzeit deutlich ansteigen. Andererseits würde sich die Becheranzahl erhöhen, was ebenfalls zu einem Anstieg der Rechenzeit führen würde.

5.1.2 Abmessungen der Geometrie

Der untere Teil des Becherwerks ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Durchmesser der Fuß- und Antriebstrommel betragen $0,4\text{ m}$. Die Höhe des Becherwerkschlots beträgt 2 m . Die Höhe wurde so groß gewählt, da das Schüttgut erst nach einer größeren Strecke ruhig im Becher verharrt. Mit dieser Schlothöhe wird gewährleistet, dass im Schöpfwiderstand auch jene Kräfte berücksichtigt werden, die durch die Relativbewegung des Schüttgutes zur Becherbewegung entstehen. Die Becher haben eine Breite von 125 mm und eine Ausladung von 106 mm . Die Becherteilung beträgt 130 mm . Der Abstand zwischen Becherrückwand und der Wand des Becherwerks beträgt 10 mm . Dieser Abstand ist notwendig, da während der Simulation Partikel zwischen die Becherrückwand und die Wand des Becherwerks gelangen. Bei einem zu geringeren Abstand würden die Partikel zwischen den Wänden eingequetscht werden. Eine Quetschung zwischen zwei Wänden führt in LIGGGHTS meistens zu unrealistisch hohen Partikelbeschleunigungen und -geschwindigkeiten. Der Kasten links des Becherwerkschlots dient zur Generierung der nachströmenden Partikel.

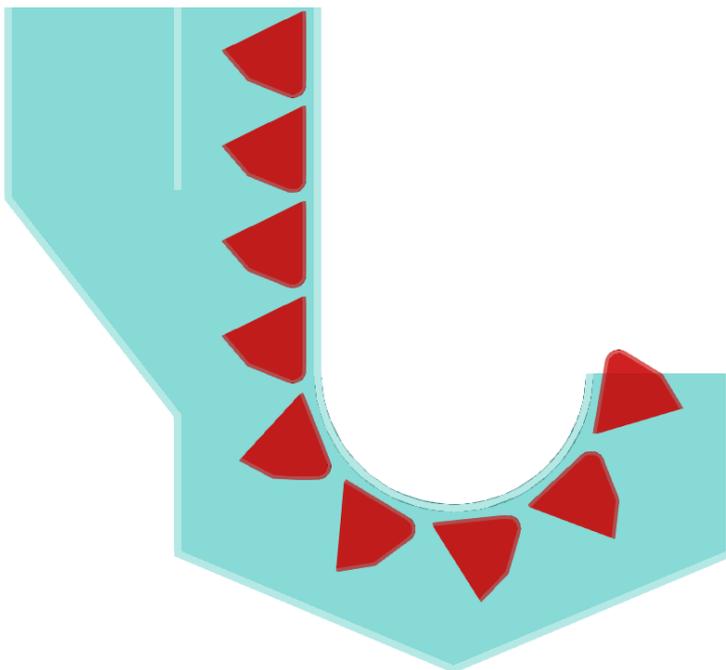


Abbildung 39: Becherwerksfuß

5.1.3 Simulationsablauf

Zum Starten einer Simulation sind nach der Definition der Geometrien und der Kalibrierung der Eingabeparameter noch die Wahl eines entsprechenden Zeitschrittes und die Wahl der Schüttgutmenge, die in die Simulation eingebracht werden soll, nötig. Bei der DEM wird häufig

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

die Rayleigh-Zeit als Basis für den Zeitschritt herangezogen. Die Rayleigh-Zeit entspricht der Zeit, die eine Stoßwelle benötigt, um die Energie von einem Partikel auf das nächste Partikel zu übertragen. Die Größe des Zeitschrittes wird folgendermaßen berechnet:

$$T = \eta \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0.1631\nu + 0.8766} \quad (5.1)$$

Für sphärische Partikel ist für einen stabilen Simulationsablauf im Normalfall η zwischen 20% und 40% anzusetzen. Im Laufe der Simulationen mit „Multisphere-Partikeln“ wurde jedoch festgestellt, dass bei diesem Partikeltyp η deutlich geringer gewählt werden muss. Die entsprechenden η -Werte für die unterschiedlichen Schüttgüter sind in Tabelle 9 angeführt.

Die Schüttgutmenge, die pro Sekunde erzeugt werden soll, wird über den angestrebten Becherfüllungsgrad φ ermittelt. Falls es im Schöpfbereich zu keinem Stau des Schüttgutes kommt, ist aufgrund der Massenerhaltung dem Becherwerk gleichviel Schüttgut pro Sekunde zuzuführen, wie vom Becherwerk gefördert werden soll. Mit der vorhandenen Zugmittelgeschwindigkeit v , der Becherteilung l_t und der Masse m_i eines vollen Bechers ist der zuzuführende Massenstrom folgendermaßen zu berechnen:

$$\dot{m} = \varphi \frac{m_i v}{l_t} \quad (5.2)$$

Ein Becher ist per Definition voll, sobald das Schüttgut dieselbe Füllhöhe erreicht, die einer Wasserfüllung des Bechers entspricht. Die Masse eines vollen Bechers wurde anhand von Simulationen in LIGGGHTS ermittelt. Ein Becher wurde überfüllt und anschließend wurde alle Partikel, die sich über dem Füllstand der Wasserfüllung befanden, gelöscht. Aus der verbleibenden Anzahl an Partikeln ergab sich die Masse eines vollen Bechers. Die Massen der vollen Becher sind ebenfalls in Tabelle 9 dargestellt.

	η	m_i
Urea	0,3	0,406 kg
Getreide	0,1	0,407 kg
Hackschnitzel	0,1	0,230 kg [doppelte Breite]
Reststoffe	0,05	0,154 kg

Tabelle 9: Gewählte Rayleighfaktoren und Masse der vollen Becher

Nach der Definition dieser letzten Parameter kann die Simulation gestartet werden. Im Anhang dieser Arbeit ist eine entsprechende LIGGGHTS-Input-Datei angefügt. In ihr werden zuerst

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

das Simulationsgebiet und die Partikelparameter definiert. Anschließend folgen die Berechnung des Zeitschrittes und die Definition des Kontaktmodells. Im nächsten Abschnitt der Eingabedatei werden die Geometrien importiert, die Partikelgenerierung definiert und die Bewegung der Becher vorgegeben.

5.1.4 Simulationsauswertung

Die Messwertauswertung erfolgt in Anlehnung an die Auswertung der realen Versuche. Der Schöpfanteil inklusive des Hubanteils soll durch die Summe aller Kräfte und Momente um die Drehachse der Umlauftrommel bestimmt werden. Die Ausgabe der Kräfte und Momente kann in LIGGGHTS in vielen Formen erfolgen.

Im Fall des Schöpfanteils erfolgt die Versuchsauswertung durch die Erstellung einer eigenen CSV-Datei pro Becher. Die Kräfte und Momente auf eine Geometrie ergeben sich in LIGGGHTS als Summe aller vom Schüttgut auf die Geometrie wirkenden Kräfte und Momente. Zur Bestimmung des Moments kann ein beliebiger Bezugspunkt angegeben werden. Im Fall des Schöpfanteils wird als Bezugspunkt der Drehpunkt M in Abbildung 40 angegeben. Die Ausgabe der aktuellen Belastungen des Bechers erfolgt alle 100 Zeitschritte, wobei die ausgegebenen Werte durch eine Mittelwertbildung im Intervall von 20 Zeitschritten errechnet werden. Gemäß der Definition der Achsen wird das Schöpfmoment M_S um die x -Achse ermittelt. In LIGGGHTS wird der Bezugspunkt zur Momentenberechnung bei einer translatorischen Bewegung der Geometrie ebenfalls bewegt. Folglich entspricht M_S ab $\alpha = \pi$ immer dem Moment, das vom Becher auf das Zugmittel übertragen werden würde. Die Ermittlung des mittleren Schöpfmoments $\overline{M_S}$ erfolgt, sobald sich der gewünschte Becherfüllungsgrad eingestellt hat. Ab diesem Zeitpunkt wird das mittlere Schöpfmoment für z -Becher im Einsatz und N -Zeitschritte folgendermaßen berechnet:

$$\overline{M_S} = \frac{\sum_{i=1}^N [\sum_{j=1}^z (M_{S,j})]}{N} \quad (5.3)$$

Die Ermittlung des Auswurfmoments erfolgt analog zur Berechnung des Schöpfmoments. Das mittlere Auswurfmoment ergibt sich gemäß der Formel:

$$\overline{M_A} = \frac{\sum_{i=1}^N [\sum_{j=1}^z (M_{A,j})]}{N} \quad (5.4)$$

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

In \overline{M}_S ist gemäß Gleichung (5.3) neben dem Schöpfanteil auch noch der Hubanteil H_S enthalten. Dieser Hubanteil hängt von der Höhe h des Becherwerkschlotes ab. Der Hubanteil ergibt sich mit:

$$H_S = \frac{h}{l_t} m_i \varphi g \quad (5.5)$$

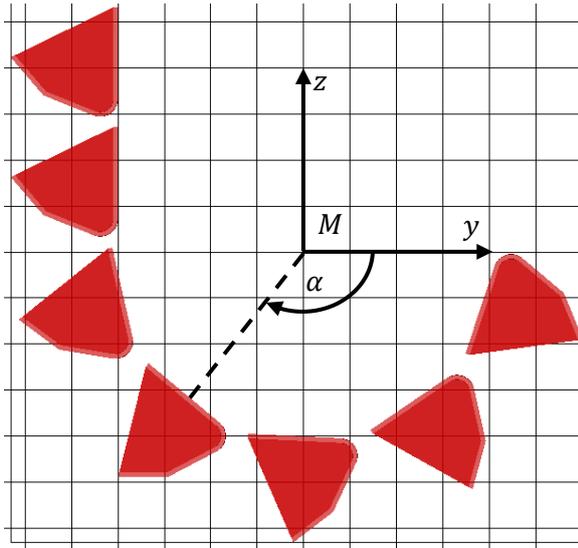


Abbildung 40: Achsendefinition beim Schöpfvorgang

Der Schöpfwiderstand F_S ergibt sich durch Kombination der zuvor definierten Anteile:

$$F_S = \frac{2(\overline{M}_S + \overline{M}_A)}{D_1} - H_S \quad (5.6)$$

Die Schöpfarbeit wird per Definition als Wegintegral über den Schöpfwiderstand verstanden. Der Schöpfvorgang eines Bechers im Becherwerksfuß kann in zwei Bewegungsabläufe geteilt werden. Der erste Teil entspricht der Rotation des Bechers um die Drehachse der Umlenktrummel. Der zweite Teil des Bewegungsablaufs ist durch die translatorische Bewegung des Bechers in z -Richtung gegeben. Die Schöpfarbeit des ersten Bewegungsteils wird als Integral des Momentes um die x -Achse definiert.

$$W_1 = \int_{\alpha=0}^{\alpha=\pi} M_S d\alpha \quad (5.7)$$

Der zweite Anteil der Schöpfarbeit kann als Wegintegral der Summe aller Kräfte in z -Richtung ermittelt werden, wobei h wieder der Höhe des Becherwerkschlotes entspricht.

$$W_2 = \int_0^h F_z dz \quad (5.8)$$

Die Auswurfsarbeit W_A kann äquivalent zu Gleichung (5.7) berechnet werden. Zuletzt wird aufgrund der Definition des Schöpfwiderstandes die Schöpfarbeit um den Anteil der reinen Hubarbeit W_H vermindert. Der Hubanteil eines Bechers ergibt sich zu:

$$W_H = hm_i \varphi g \quad (5.9)$$

Die Schöpfarbeit eines Bechers j ist mit diesen Anteilen:

$$W_j = W_1 + |W_2| + W_A - W_H \quad (5.10)$$

Die Schöpfarbeit des gesamten Becherwerks wird als Summe der Schöpfarbeit über die einzelnen Becher berechnet. Die spezifische Schöpfarbeit W_S eines Becherwerks mit z Bechern ergibt sich durch den Bezug auf die Gesamtmasse m_G , die im betrachteten Zeitraum gefördert wurde.

$$W_S = \frac{\sum_{j=1}^z W_j}{m_G} \quad (5.11)$$

Zum Abschluss soll noch auf einen zentralen Punkt bei der Messwertauswertung eingegangen werden. Bei erstmaliger Betrachtung der Gleichungen in diesem Abschnitt scheint es eventuell unnötig, dass die Hubarbeit anfangs in die Gleichungen miteinbezogen und anschließend rechnerisch eliminiert wird. Dies ist jedoch dringend erforderlich, da im Bereich höherer Zugmittelgeschwindigkeiten die Becher noch nach Abschluss der Rotation Schüttgut schöpfen. Würde in diesem Fall nur der Bereich der Rotation zur Ermittlung der Kräfte betrachtet werden, so wären die ermittelten Schöpfwiderstände und Schöpfarbeiten geringer, als sie es tatsächlich sind.

5.2 Validierung der Simulationsergebnisse

5.2.1 Allgemeine Validierung

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität untersucht werden. Vor dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen realer Versuche, können unterschiedliche Kontrollen der Simulationsergebnisse erfolgen.

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Eine erste Möglichkeit zur Ermittlung von Simulationen mit unrealistischem Verhalten liefert eine Kontrolle der Logfiles der LIGGGHTS-Simulationen. In diesen Logfiles werden verschiedene Informationen hinsichtlich des Simulationsablaufs gespeichert. Der wichtigste Parameter in den Logfiles ist die Anzahl der sogenannten „Dangerous Builds“. Ein „Dangerous Build“ tritt auf, wenn sich das Partikelsystem anders verhält, als es von LIGGGHTS vorausberechnet wurde. Die Ermittlung der „Dangerous Builds“ erfolgt in LIGGGHTS anhand der „Neighbour-Listen“. In diesen Listen werden für eine bestimmte Anzahl von Simulationsschritten alle möglichen Kontaktpartner gespeichert. Befindet sich nun ein Partikel nicht mehr in jenem Bereich, in dem es sich laut der „Neighbour-Liste“ befinden sollte, so handelt es sich um einen „Dangerous Build“. Vereinfacht ausgedrückt, ist ein „Dangerous Build“ dadurch gekennzeichnet, dass sich die Partikel zu schnell bewegen. Folglich wurde im Zuge der Messauswertung immer darauf geachtet, dass die Anzahl der „Dangerous Builds“ gleich null ist.

In einem zweiten Schritt wurden die maximalen Geschwindigkeiten der einzelnen Partikel in den Simulationen analysiert. Der kritischste Fall in den Simulationen tritt bei den größten Zugmittelgeschwindigkeiten von 4 m/s auf. In diesem Fall erfahren die Schüttgutpartikel die größte dynamische Belastung. Die größte Geschwindigkeit tritt an der Bechervorderkante während der Rotation auf. Die Becherrückwand rotiert mit einer Winkelgeschwindigkeit von $\omega = 20 \text{ rad/s}$. Die Tangentialgeschwindigkeit v_{max} der Bechervorderkante wird mit der Ausladung e eines Bechers und des Durchmessers D_1 der Umlenktrummel berechnet.

$$v_{max} = \left(\frac{D_1}{2} + e \right) \omega = 6,12 \text{ m/s} \quad (5.12)$$

Der Stoß zwischen den Partikeln und der Vorderkante des Bechers soll vereinfacht mit der Gleichung des ebenen zentrischen Stoßes beschrieben werden. Die Geschwindigkeit eines Partikels nach dem Stoß ergibt sich dann gemäß folgender Gleichung:

$$v_2' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 (v_2 - v_1) k}{m_1 + m_2} \quad (5.13)$$

Mit der Annahme, dass die Masse m_1 des Bechers sehr groß im Vergleich zur Masse eines Partikels ist und der Vereinfachung, dass die Geschwindigkeit v_2 des Partikels vor dem Stoß gleich null ist, kann die maximale Geschwindigkeit eines Partikels nach dem Stoß gemäß Gleichung (5.14) berechnet werden.

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

$$v'_{2,max} = v_{max}(1 + k) \quad (5.14)$$

Die Stoßziffer k entspricht dem Restitutionskoeffizienten für die Kontaktpaarung Partikel-Stahl. Dieser Koeffizient wurde bereits im Rahmen der Kalibrierung für alle Schüttgüter ermittelt. Für den Kontakt zwischen Getreide und Stahl nimmt er einen Wert von 0,6 an. Somit sollte die Geschwindigkeit eines Getreidepartikels in der Simulation bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von 4 m/s gemäß den Gleichungen (5.12) und (5.14) einen Wert von $9,79 \text{ m/s}$ nicht überschreiten. In Abbildung 41 ist beispielhaft der Geschwindigkeitsbereich aller Getreidepartikel der Simulation während des Schöpfens von 46 Bechern dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die maximale Geschwindigkeit im berechneten Bereich befindet. Demzufolge treten keine Partikelgeschwindigkeiten, die nicht mit den allgemeinen Stoß- und Bewegungsgleichungen erklärbar sind, auf.

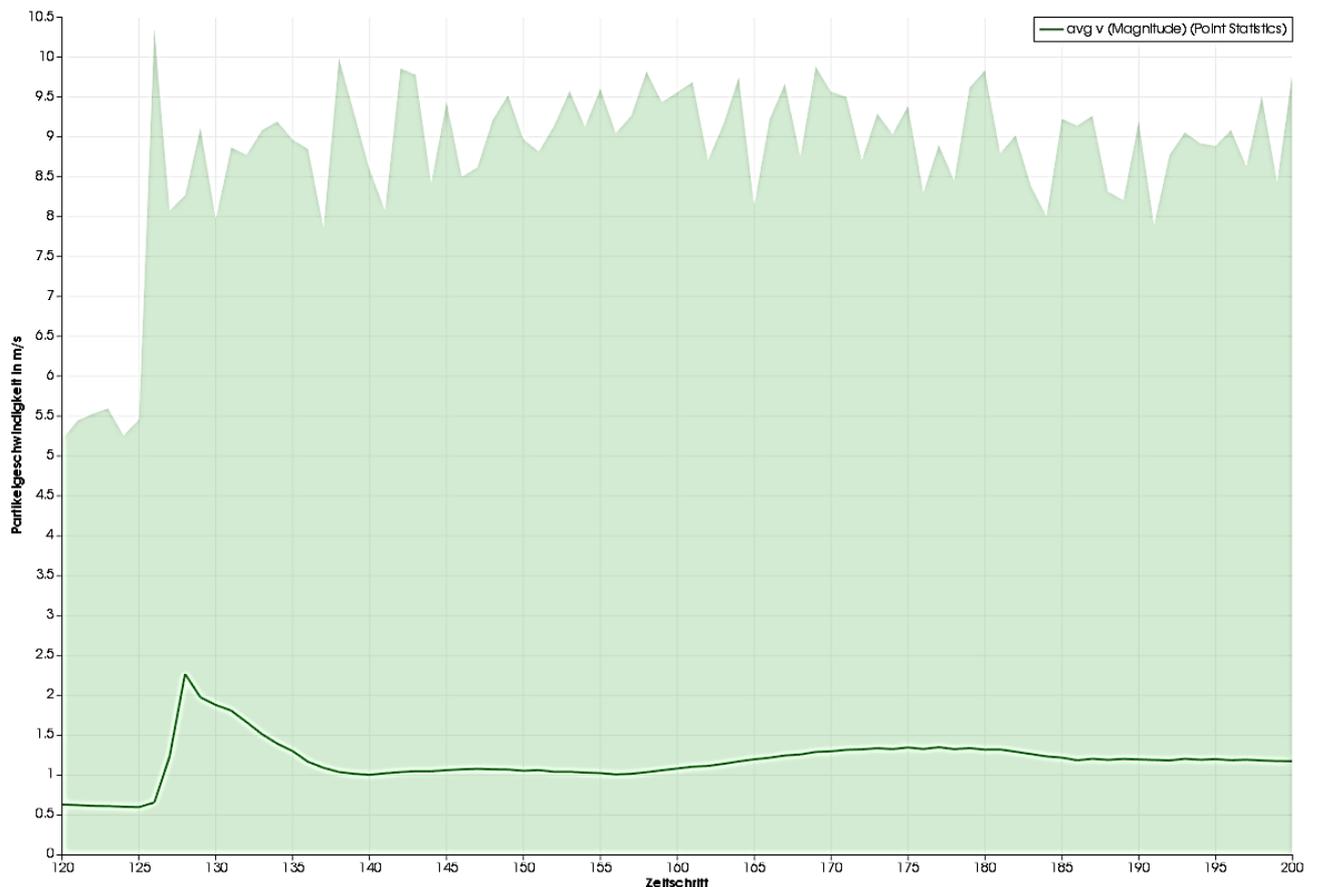


Abbildung 41: Geschwindigkeitsbereich Weizenpartikel bei 4 m/s

5.2.2 Vergleich anhand von Messergebnissen

Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt in erster Linie durch den Vergleich mit den Versuchsergebnissen von Dilefeld. Deshalb sollen die Diagramme, die Dilefeld im Rahmen seiner Arbeit veröffentlicht hat, an dieser Stelle kritisch betrachtet werden.

Dilefeld hat alle Diagramme in seiner Arbeit mit Microsoft-Excel erstellt. In Abbildung 42 sind die Messpunkte des Schöpfwiderstandes von PVC-Granulat nach Dilefeld eingetragen. Die rote Linie entspricht dem Graphen, den Dilefeld schlussendlich in seinen Ergebnissen angegeben hat. Allem Anschein nach dürfte Dilefeld die Messpunkte mit einer exponentiellen Regression angenähert haben. Im Diagramm ist zusätzlich eine polynomische Regression aufgetragen. Diese würde im Fall des PVC-Granulats die Messpunkte deutlich besser beschreiben als die Exponentialfunktion. Die Annäherung aller Messdaten mit einer exponentiellen Regression kann somit durchaus unvorteilhaft sein. Für die Vergleiche im Rahmen der Validierung wurden die Messpunkte aus den Diagrammen von Dilefeld entnommen und mit einer polynomischen Regression angenähert. Demzufolge können die Ergebnisse nach Dilefeld in diesem Abschnitt von den Diagrammen in Abschnitt 2.1 geringfügig abweichen.

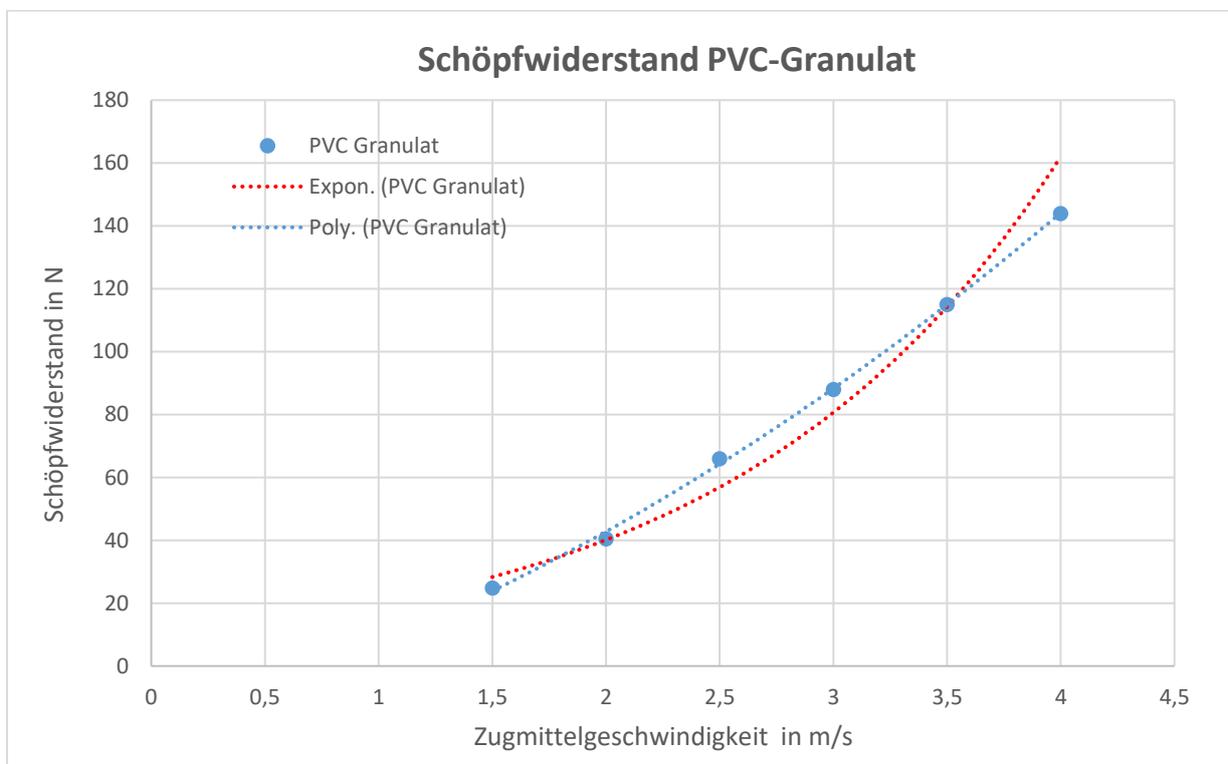


Abbildung 42: Schöpfwiderstand PVC-Granulat Dilefeld

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Der Vergleich der Ergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit für Getreide erfolgt in Abbildung 43. Die Messpunkte wurden durch polynomische Graphen zweiten Grades angenähert. Quantitativ liegen die Werte nahe beisammen. Die Unterschiede in der Größe der Werte kann durchaus mit dem Umstand begründet werden, dass die Eingabeparameter von Getreide nicht exakt für jenes Getreide bestimmt wurden, mit dem Dilefeld seine Versuche durchgeführt hat. Bezüglich des qualitativen Verlaufs der Graphen lässt sich ein Unterschied feststellen. Der Schöpfwiderstand nimmt in den realen Versuchen mit steigender Geschwindigkeit stärker zu als in den Simulationen. Diese Abweichung hält sich jedoch im Rahmen. Die Dimensionierung eines Becherförderers kann somit im Fall von Getreide in den betrachteten Geschwindigkeitsbereichen anhand der Werte, die mittels der LIGGGHTS-Simulation ermittelt wurden, problemlos erfolgen.

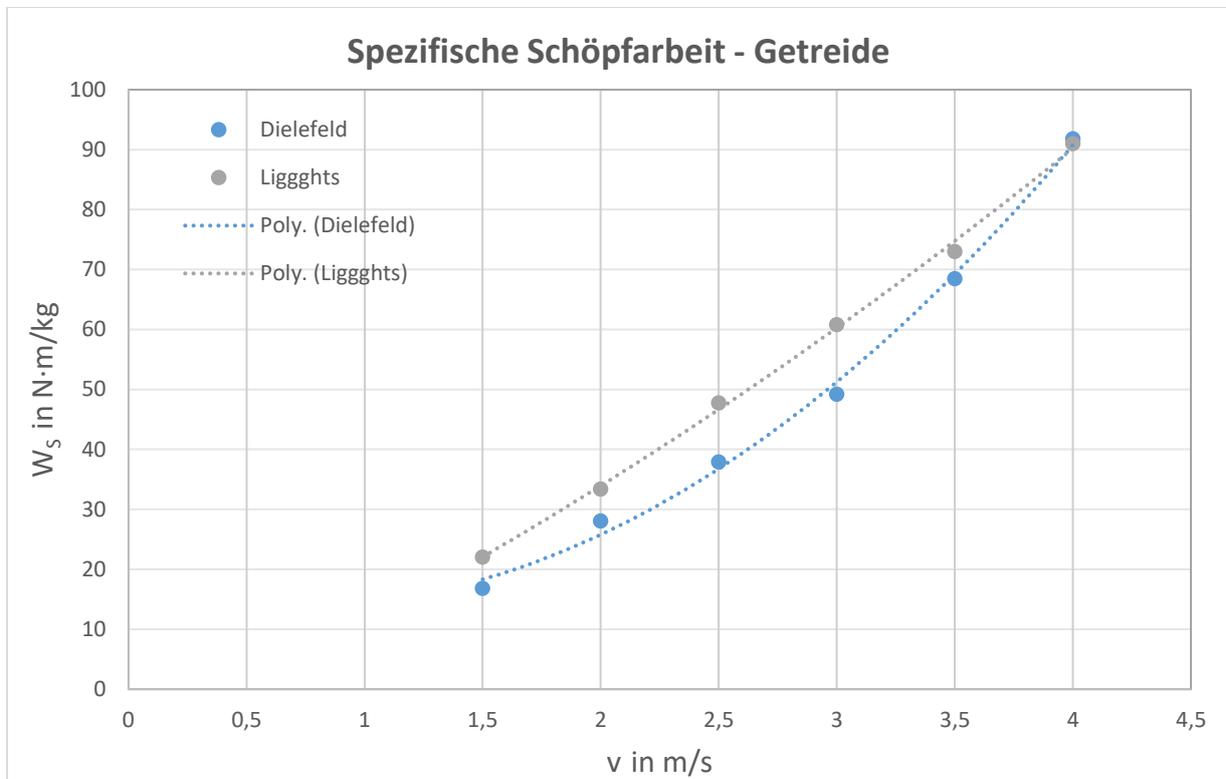


Abbildung 43: Getreide Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse

Zur Validierung soll neben den Versuchen von Dilefeld zusätzlich der Versuchsaufbau nach Beumer und Wehmeier anhand von Simulationen untersucht werden. Das generelle Ziel dieses Validierungsschrittes ist die Überprüfung, ob die Messergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit eines Einzelbechers in den Simulationen reproduzierbar sind. Die Simulationen werden mit den Becherwerks- und Becherabmessungen nach Dilefeld durchgeführt. Deshalb sollen nur der qualitative Verlauf des spezifischen Schöpfwiderstandes und der Verlauf des Becherfüllgrades verglichen werden. Der Versuchsaufbau ist ident zu dem Aufbau nach

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Beumer und Wehmeier. Es wurde eine für alle Zugmittelgeschwindigkeiten konstante Schüttgutmenge in das Becherwerk eingebracht. Nachdem sich das Schüttgut im Becherwerksfuß beruhigt hatte, wurde mit einem einzelnen Becher ein Schöpfversuch durchgeführt. In Abbildung 44 ist die Füllung des Becherwerksfußes mit Getreide vor dem Schöpfen dargestellt. Diese entspricht einer ähnlichen Füllung, wie sie von Beumer und Wehmeier gemäß Abbildung 11 angegeben wurde. Der Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse erfolgt in Abbildung 45. Qualitativ sind die Ergebnisse sehr ähnlich. Die spezifische Schöpfarbeit nimmt sowohl in den realen Versuchen als auch in den Simulationen mit steigender Zugmittelgeschwindigkeit überproportional zu. Die Differenz der quantitativen Ergebnisse kann mit den unterschiedlichen Abmessungen der Versuchsförderer, den unterschiedlichen Bechergeometrien und den unterschiedlichen Becherfüllungsgraden begründet werden.

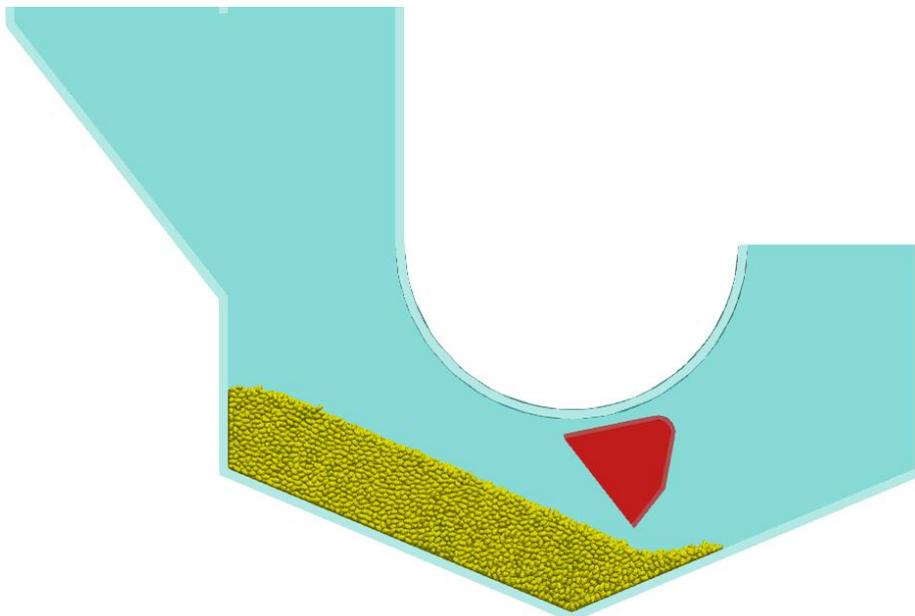


Abbildung 44: Füllung des Becherwerksfußes äquivalent zu Beumer und Wehmeier

Anhand des Vergleichs der unterschiedlichen Versuchsaufbauten und der qualitativ guten Übereinstimmungen der Simulationsergebnisse mit den realen Versuchsergebnissen für Getreide lässt sich die Aussage treffen, dass der Schöpfwiderstand ausreichend genau mittels der DEM bestimmt werden kann. Auf eine Validierung der einzelnen Partikelmodelle wird verzichtet, da in der Arbeit von Kalkan bereits gezeigt wurde, dass die Kalibrierung anhand der vorgestellten Versuchsanlage im Allgemeinen sehr zuverlässig ist [20]. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, muss jedoch wie bei allen DEM-Simulationen die Kalibrierung sehr gewissenhaft durchgeführt werden.

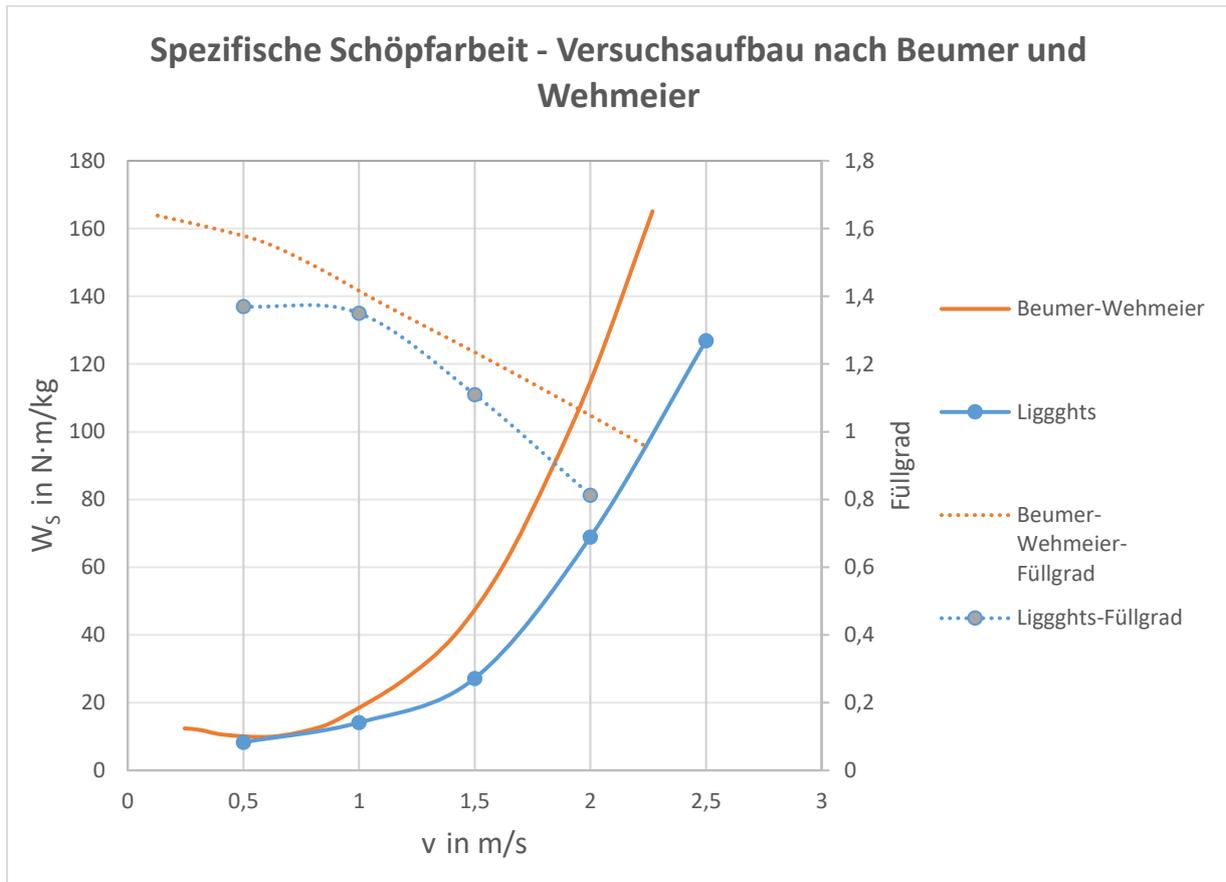


Abbildung 45: Vergleich der spezifischen Schöpfarbeit von Getreide für den Versuchsaufbau nach Beumer und Wehmeier

5.3 Auswertung der Simulationsergebnisse

5.3.1 Analyse der Schüttgutverteilung im Becherwerksfuß

Mittels der Simulationen der DEM lässt sich der Schöpfvorgang im Anschluss an die Berechnung der Partikelbewegungen deutlich besser darstellen, als dies mit Fotografien der realen Versuche möglich wäre. Zur Visualisierung der Partikelbewegungen wurde die Postprocessingsoftware Paraview eingesetzt.

Zur visuellen Darstellung der Ergebnisse im Becherwerksfuß bieten sich zwei Formen an. Beide Formen sind für die Schüttgutverteilung von Weizen in Abbildung 46 bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m/s}$ dargestellt. Der linke Ausschnitt stellt eine Visualisierung des gesamten Schüttgutes während des Schöpfvorganges dar. Im Gegensatz dazu wird im rechten Ausschnitt lediglich jener Schüttgutanteil dargestellt, welcher sich zwischen den Ebenen der Seitenwände der Becher befindet. Demzufolge befindet sich im

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

rechten Ausschnitt kein Schüttgut vor dem Becher und somit ist das Schöpfen über die Bechervorderkante deutlich zu erkennen.

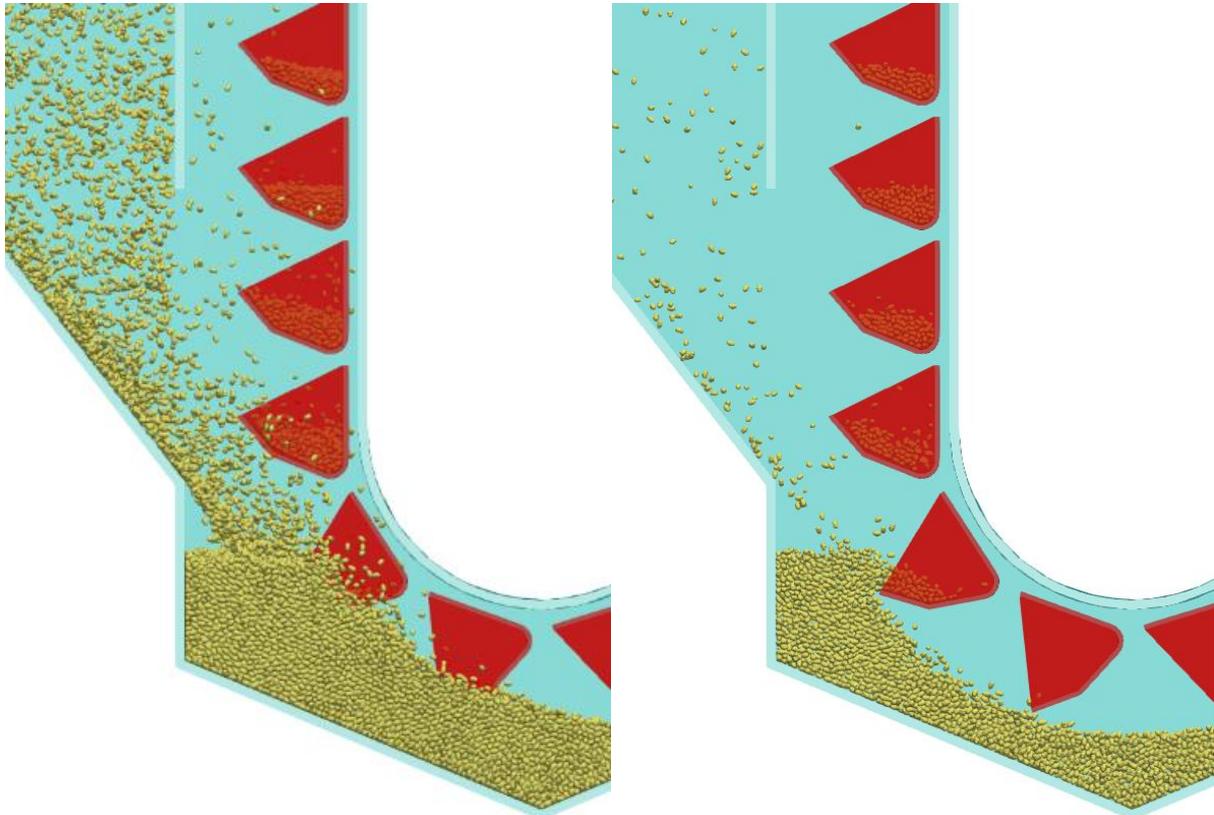


Abbildung 46: Schüttgutverteilung Weizen $v = 1,5 \text{ m/s}$

Im rechten Ausschnitt der Partikelverteilung ist ebenfalls bereits der Hohlraum im Schüttgut zu erkennen, der von den Bechern während des Schöpfens geschaffen wird. Wird ein konstanter Becherfüllungsgrad bei steigender Zugmittelgeschwindigkeit vorausgesetzt, so vergrößert sich die Menge des Schüttgutes im Becherwerksfuß. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhanges sind in Abbildung 47 die unterschiedlichen Füllstände im stationären Betrieb des Becherwerks von Weizen bei Zugmittelgeschwindigkeiten von 2 m/s (gelb), 3 m/s (blau) und 4 m/s (rot) dargestellt. Die Aufnahme beschränkt sich auf die Darstellung der Weizenpartikel zwischen den Ebenen der Becherwände. Die Darstellung ist so gewählt, dass die Füllstände niedrigerer Zugmittelgeschwindigkeiten die Füllstände höherer Geschwindigkeiten überdecken. Es ist deutlich die erforderliche Zunahme des Füllstandes bei höheren Zugmittelgeschwindigkeiten zur Gewährleistung eines konstanten Becherfüllgrades zu erkennen. Weiters kann bereits anhand dieser Grafik davon ausgegangen werden, dass mit steigender Zugmittelgeschwindigkeit die Schöpfarbeit zunehmen muss, da die Becher bei größeren Geschwindigkeiten länger mit dem Schöpfvorgang beschäftigt sind.

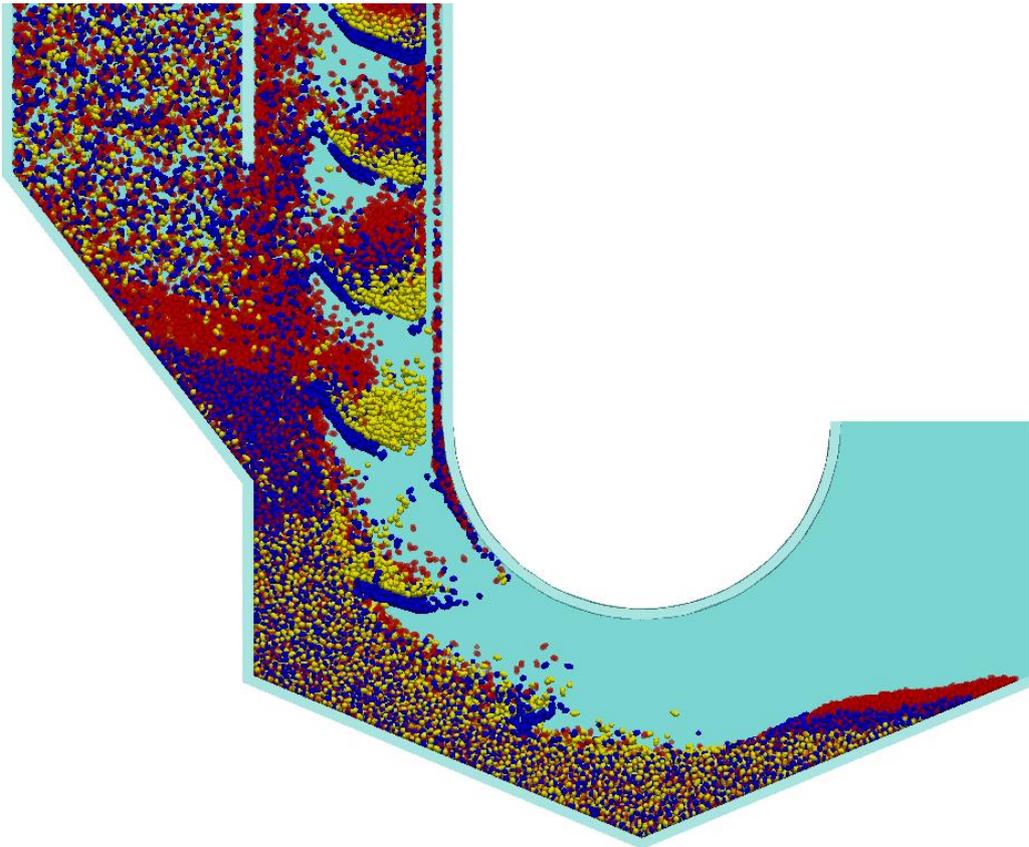


Abbildung 47: Unterschiedliche Füllstände während des Schöpfvorganges von Weizen

In Anlehnung an die Darstellung der Füllstände eines Fördergutes werden in Abbildung 48 die Füllstände von Urea (gelb), Reststoffe (blau) und Hackschnitzel (rot) bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von 3 m/s dargestellt. Auffallend ist, dass die Füllstände der Reststoffe und der Hackschnitzel deutlich über den Füllständen von Weizen und Urea liegen. Aufgrund dieser hohen Füllstände musste ein Teil der Trennwand zwischen dem Füllbereich und dem Schlot entfernt werden, da ansonsten in den Versuchen der Reststoffe und der Hackschnitzel nicht der gewünschte Becherfüllungsgrad erreicht werden hätte können. Weiters weicht die Verteilung der Hackschnitzel im Becherwerksfuß von der Verteilung der anderen Schüttgüter ab. Die Ursache dafür liegt möglicherweise in der Größe der einzelnen Partikel. Dies könnte ein Hinweis sein, dass die Abmessungen der „Multisphere-Partikel“ für die Geometrie des Förderers nach Dilefeld zu groß sind. Die Simulationsergebnisse des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit erscheinen jedoch plausibel, weshalb auf die Auswertung der Ergebnisse der Hackschnitzelpartikel nicht verzichtet wurde.

Zum Abschluss der visuellen Auswertung des Schöpfvorganges folgt noch die Darstellung der Geschwindigkeitsverhältnisse während des Schöpfens. In Abbildung 49 sind die Partikel entsprechend dem Betrag ihrer Geschwindigkeit eingefärbt.

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Die Auswertung ist für den stationären Betrieb des Schöpfvorganges von Urea bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von 4 m/s erstellt worden. Die meisten Partikel im Becherwerksfuß befinden sich während des Schöpfvorganges in Ruhe. Der Betrag der Geschwindigkeit ist nur für jene Partikel, die mit der Bechervorderkante zusammenstoßen beziehungsweise die vom Becher erfasst werden, größer als $2,5 \text{ m/s}$.

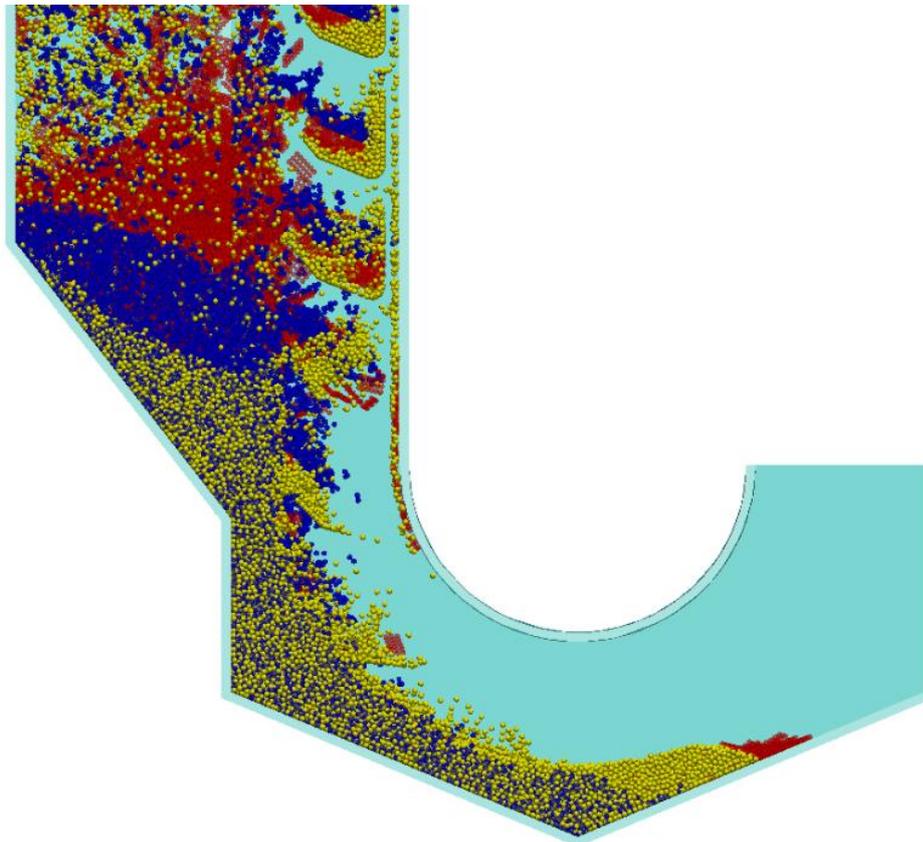


Abbildung 48: Füllstände Urea-Hackschnitzel-Reststoffe bei $v = 3 \text{ m/s}$

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

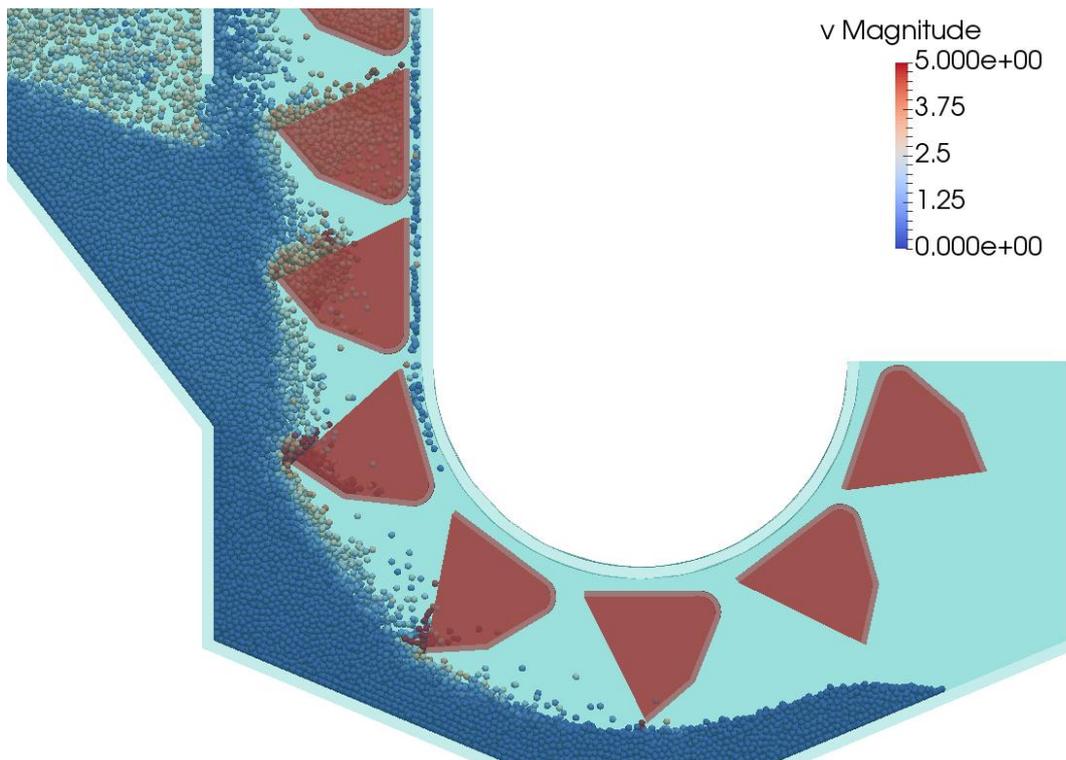


Abbildung 49: Geschwindigkeitsverteilung Urea $v = 4m/s$

5.3.2 Simulationsergebnisse zur spezifischen Schöpfarbeit

Die Simulationsergebnisse der Fördergüter Getreide, Urea, Reststoffe und Hackschnitzel sind in den Abbildungen 50 bis 53 dargestellt. In den Diagrammen ist jeweils die spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit aufgezeichnet. Der durchschnittliche Becherfüllungsgrad lag bei allen Versuchen zwischen 0,45 und 0,55. Wie bereits erwähnt wurde, ist im stationären Betriebszustand bei der Ermittlung der Schöpfarbeit über die Messung des Drehmoments an der Antriebswelle auch die Auswurfarbeit in den Ergebnissen der Schöpfarbeit enthalten. Die Gesamtergebnisse wurden daher zusätzlich in einen Schöpfanteil und einen Auswurfanteil geteilt. Die Anteile wurden aus den Simulationsdaten anhand der Gleichungen in Abschnitt 5.1.4 ermittelt. In den einzelnen Diagrammen sind jeweils die Messpunkte angegeben. Diese wurden zusätzlich durch Graphen einer polynomischen Regression zweiten Grades angenähert.

Das Schüttgut Hackschnitzel konnte nur durch eine Modifikation der Becherwerksabmessungen untersucht werden. Die Abmessungen eines Hackschnitzelteilchens betragen gemäß der Kalibrierung $36 \times 18 \times 6 \text{ mm}$. Die Becher nach Dilefeld sind nur 125 mm breit. Während der Simulationen konnte beobachtet werden, dass die im Vergleich zu den Becherabmessungen großen Partikel, nicht in ausreichender Zahl

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

geschöpft werden konnten. Mit der originalen Becherbreite wurden pro Becher nur fünf bis zehn Partikeln geschöpft. Mit dieser geringen Partikelanzahl konnte der geforderte Becherfüllungsgrad von 0,5 nicht erreicht werden. Als Konsequenz dieser Beobachtungen musste die Becherbreite verdoppelt werden. Eine Anpassung der restlichen Abmessungen der Versuchsanlage war nicht nötig.

Grundsätzlich ist in den Diagrammen zu erkennen, dass der Auswurfanteil im Vergleich zum Schöpfanteil eher klein ist. Der Einfluss des Auswurfsanteils nimmt mit zunehmender Zugmittelgeschwindigkeit überproportional zu. Der Auswurfanteil hängt primär von der Fliehkraft bei der Umlenkung des Bechers ab. Da die Fliehkraft proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, deckt sich der zunehmende Einfluss des Auswurfsanteils bei höheren Geschwindigkeiten mit den Erwartungen. Am Beispiel von Urea kann der Auswurfanteil in Zahlen ausgedrückt werden. Bei einer Geschwindigkeit von $1,5 \text{ m/s}$ macht der Auswurfanteil lediglich 5% der spezifischen Schöpfarbeit aus. Wird die Geschwindigkeit auf 4 m/s erhöht, macht er bereits 24% der zu leistenden spezifischen Schöpfarbeit aus. Damit ist dargelegt, dass der Auswurfanteil bei der Auslegung von Becherwerken eine Größe darstellt, die nicht vernachlässigt werden darf.

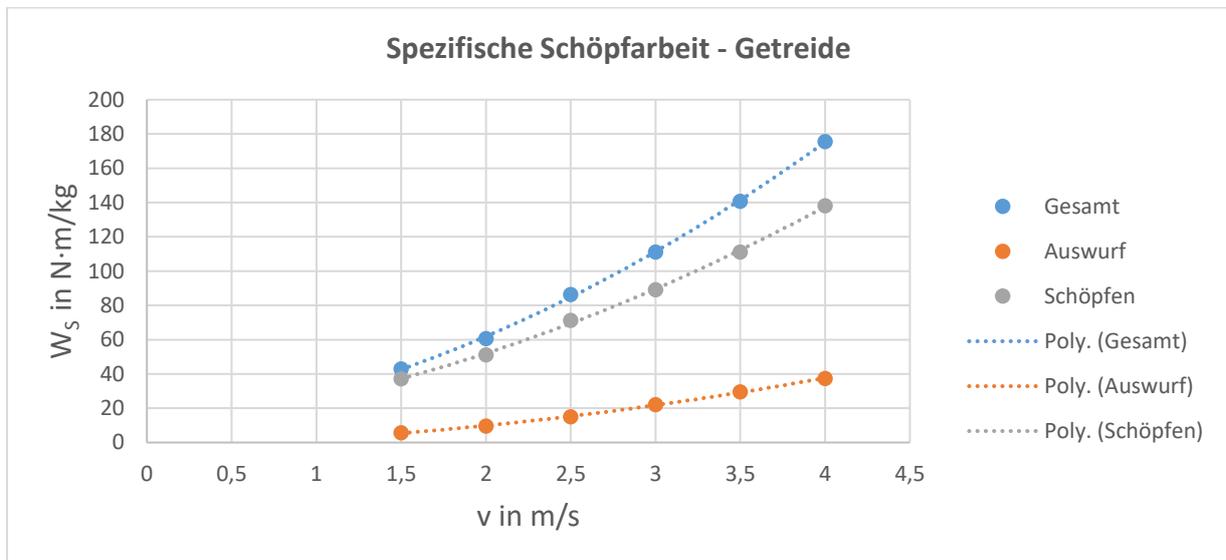


Abbildung 50: Spezifische Schöpfarbeit Getreide

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

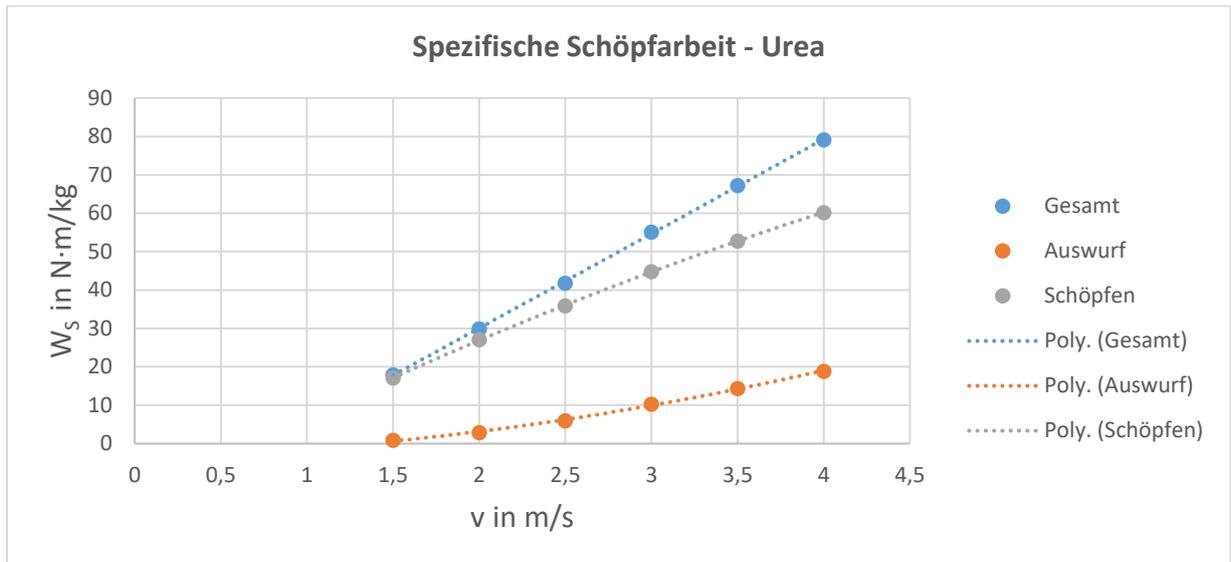


Abbildung 51: Spezifische Schöpfarbeit Urea

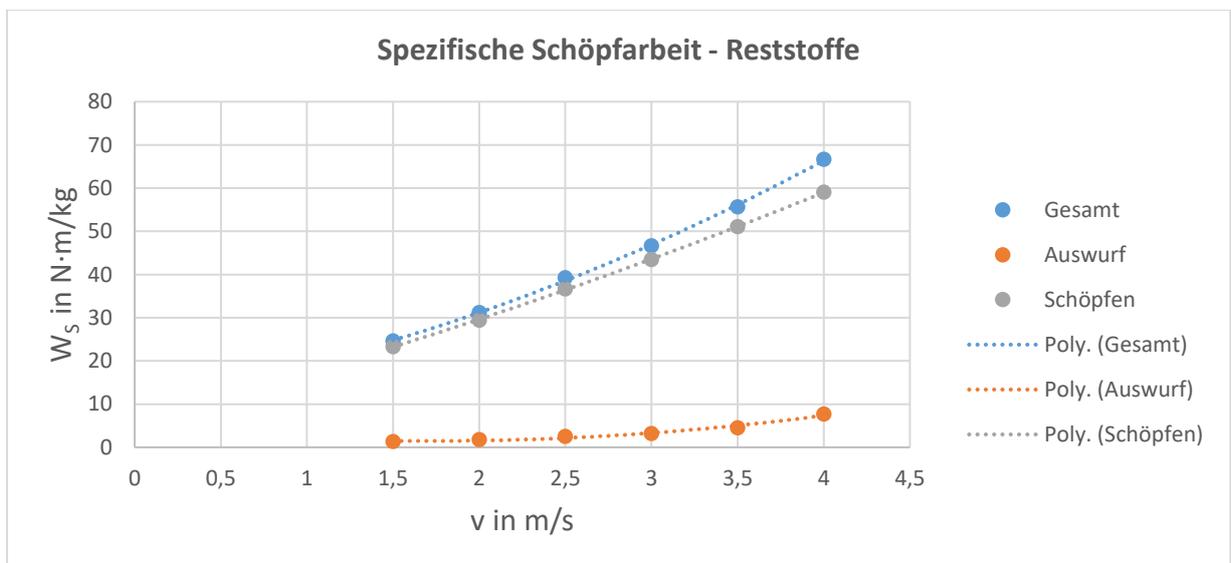


Abbildung 52: Spezifische Schöpfarbeit Reststoffe

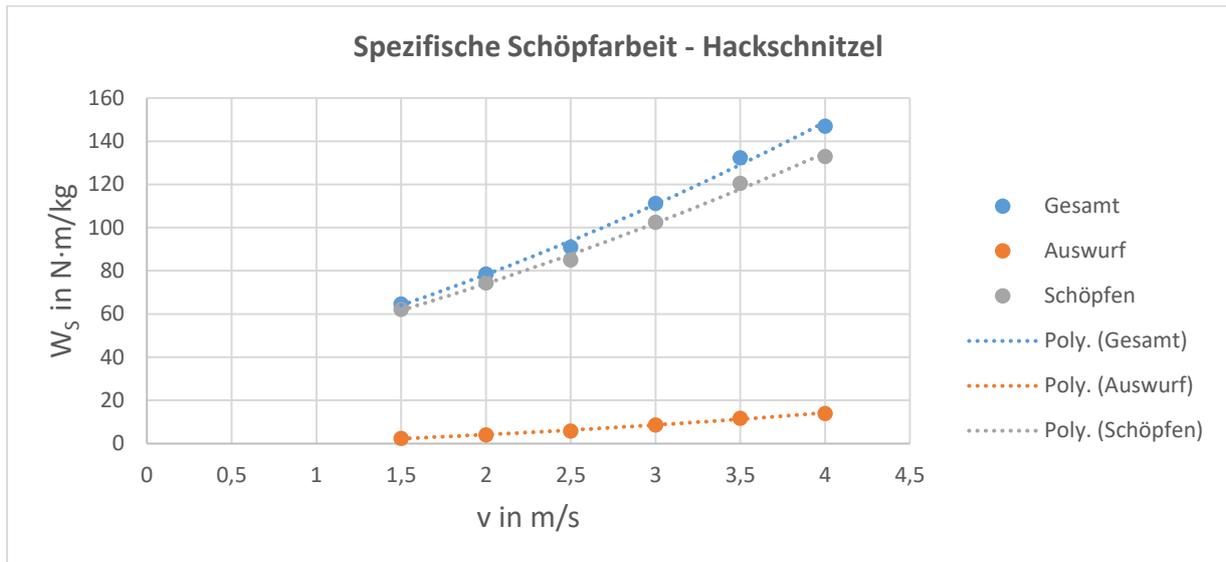


Abbildung 53: Spezifische Schöpfarbeit Hackschnitzel

5.3.3 Vergleich der Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit und des Schöpfwiderstandes

Analog zu den vorgestellten Arbeiten sollen abschließend die Ergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit beziehungsweise des spezifischen Schöpfwiderstandes in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit in einem Diagramm dargestellt werden. Schöpfversuche eines Becherwerks werden grundsätzlich zur Ermittlung dieser Ergebnisse durchgeführt, da sie von zentraler Bedeutung bei der Auslegung von Becherwerken sind.

Der Schöpfwiderstand ist in Abbildung 54 für alle Fördergüter dargestellt. Die Simulationsergebnisse decken sich bis auf das Ergebnis der Hackschnitzel mit den Erwartungen. Grundsätzlich wäre zu erwarten gewesen, dass die Hackschnitzel den größten Schöpfwiderstand hervorrufen. Diese Annahme wird von den hohen Scherkräften unterstützt, die im Zuge der Kalibrierung gemessen wurden. Der Schöpfwiderstand der Hackschnitzelpartikel dürfte in den Simulationen geringer als bei Getreide sein, da bedingt durch die Bechergeometrie und die Partikelform nur eine geringe Masse an Hackschnitzel gefördert werden kann. Trotz der doppelten Becherbreite beträgt gemäß Tabelle 9 die Masse eines mit Hackschnitzel gefüllten Bechers nur ungefähr die Hälfte eines mit Getreide gefüllten Bechers.

Die Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit können aus Abbildung 55 entnommen werden. Beim Vergleich der Ergebnisse fällt auf, dass die Partikelform in Kombination mit den Reibungsparametern den größten Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Dadurch sind die Abweichungen des spezifischen Schöpfwiderstandes zwischen den

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Hackschnitzeln und den anderen Fördergütern zu erklären. Die Hackschnitzelteilchen sind sowohl in der Realität als auch in den Simulationen deutlich größer als die Teilchen der anderen Fördergüter und verursachen somit einen höheren Schöpfwiderstand. Bezüglich der spezifischen Schöpfarbeit decken sich nun auch die Simulationsergebnisse der Hackschnitzel mit den Erwartungen, da der spezifische Schöpfwiderstand der Hackschnitzel am größten ist.

Eine detailliertere Aussage bezüglich der Auswirkungen der einzelnen Eingabeparameter auf die Simulationsergebnisse kann aufgrund der durchgeführten Simulationen und ihrer Ergebnisse nicht getroffen werden. Dafür wäre eine eingehende Parameterstudie notwendig. Bei solch einer Studie würden für eine Partikelform die Eingabeparameter variiert und die Auswirkungen analysiert werden. Dies ist jedoch nicht Ziel dieser Arbeit, da die Möglichkeit der Ermittlung der Schöpfarbeit anhand von Simulationen überprüft werden sollte.

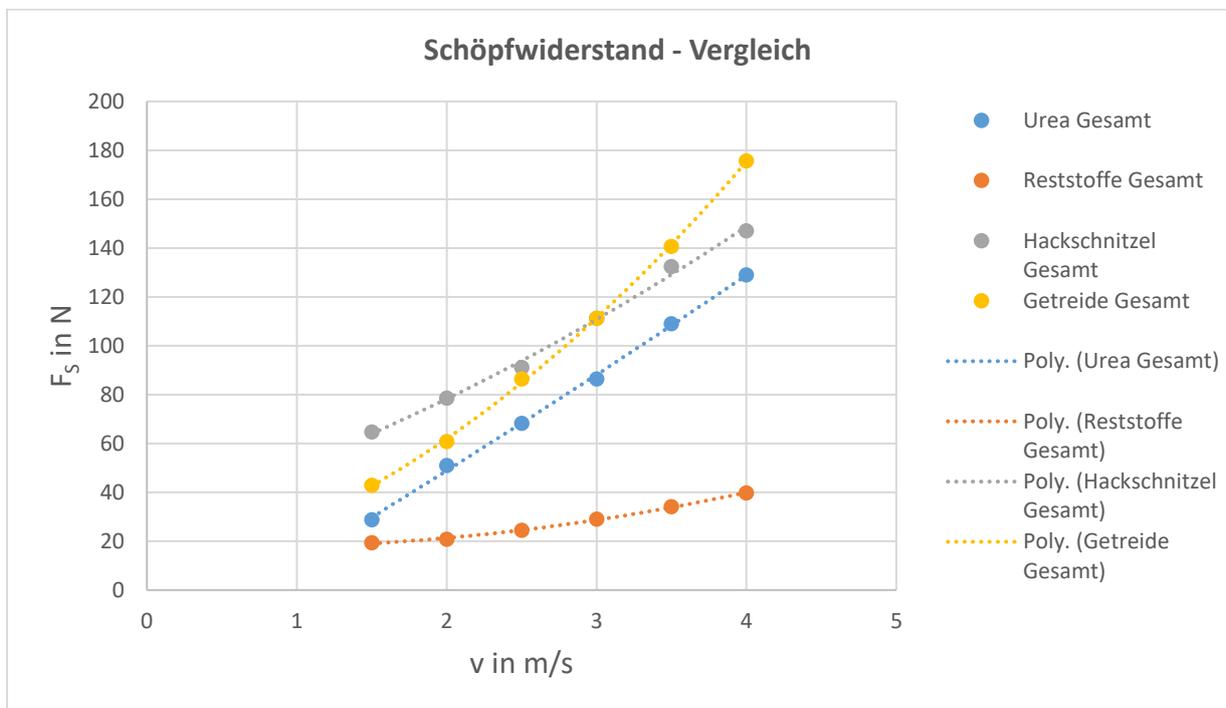


Abbildung 54: Vergleich der Simulationsergebnisse des Schöpfwiderstandes

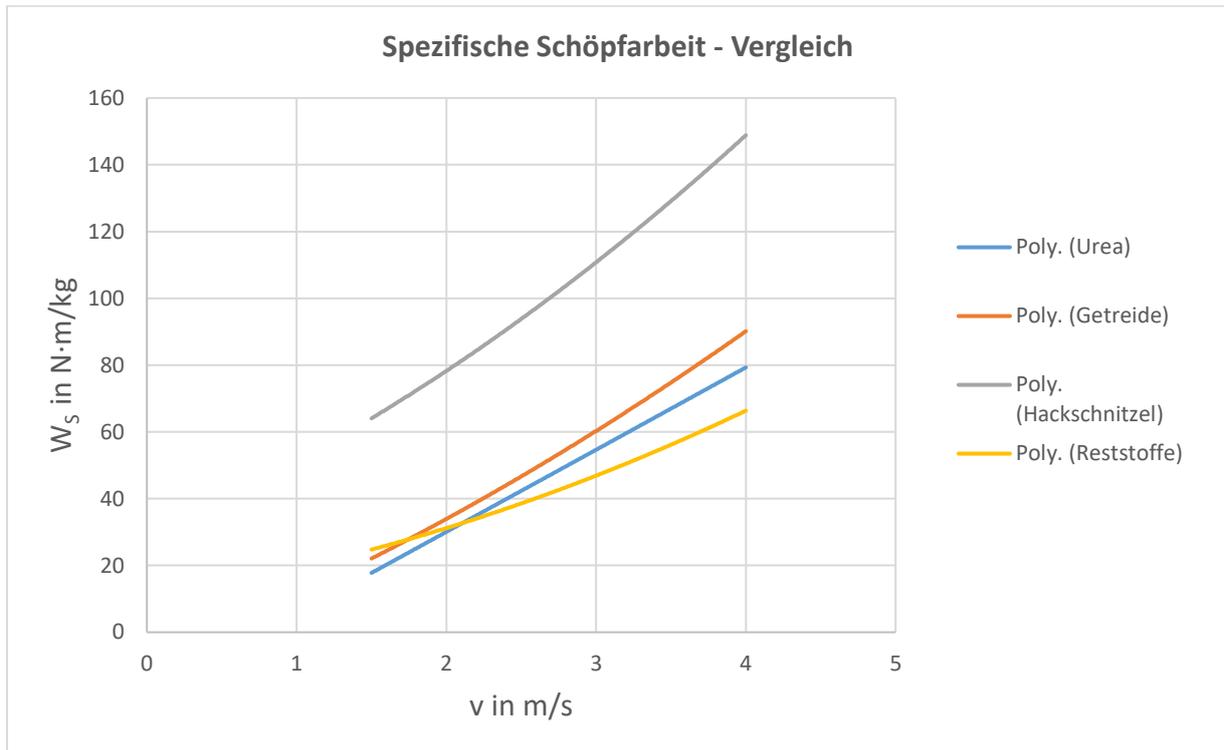


Abbildung 55: Vergleich der Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit

5.3.4 Analyse der Belastungsverteilung eines Bechers

Bei der Anwendung der DEM ist eine deutlich detailliertere Analyse der Belastungsverteilung der Becher möglich. Während bei den realen Versuchen nur ein Messwert in Form des Drehmomentes der Antriebswelle zur Verfügung steht, können bei den Simulationen beliebig viele Messpunkte gesetzt werden. Die Simulationssoftware gibt die Ergebnisse pro erzeugter Geometrie aus. Somit bietet sich die Aufteilung eines Bechers in mehrere Einzelteile an. Anschließend werden analog zu Abschnitt 5.1.4 die Ergebnisse der einzelnen Teile ermittelt.

Die Becher wurden in vier verschiedene Einzelteile aufgeteilt. Ihre Aufteilung ist in Abbildung 56 dargestellt. Aufgrund folgender Überlegungen erfolgte die Einteilung. Die Schöpfkante, in der Grafik blau, sollte während des Schöpfvorganges die größten Belastungen erfahren, da sie direkt mit dem Fördergut zusammenstößt. Die Belastungen der Seitenwände, hier orange eingefärbt, sollten ebenfalls messbar sein, da während des Schöpfvorganges im Becherwerksfuß das Fördergut auf die Wände drückt und somit einen Schöpfwiderstand in Form von Reibung verursacht. Theoretisch müssten die Belastungen der grauen Rückwand und des gelben Mittelteils während der Rotation des Bechers um die Umlenktrummel im Vergleich zu den Belastungen der Seitenwände und der Schöpfkante deutlich geringer sein.

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

Anhand dieser Definition bieten sich zwei verschiedene Diagramme zur Untersuchung der Schöpfarbeit an. Einerseits erfolgt in Abbildung 58 die gewohnte Darstellung der spezifischen Schöpfarbeit der einzelnen Teile in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit. Andererseits ist bei der Betrachtung der Belastungen der Einzelteile der zeitliche Verlauf der Schöpfarbeit der Einzelteile von großem Interesse. Dieser zeitliche Verlauf ist in Abbildung 57 dargestellt.

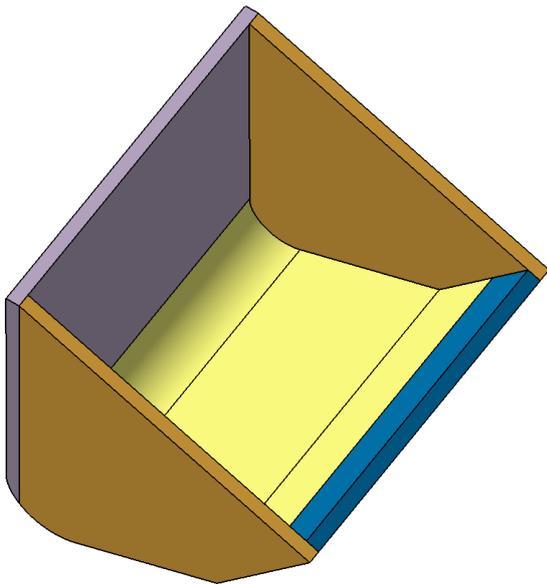


Abbildung 56: Einzelteile des Bechers

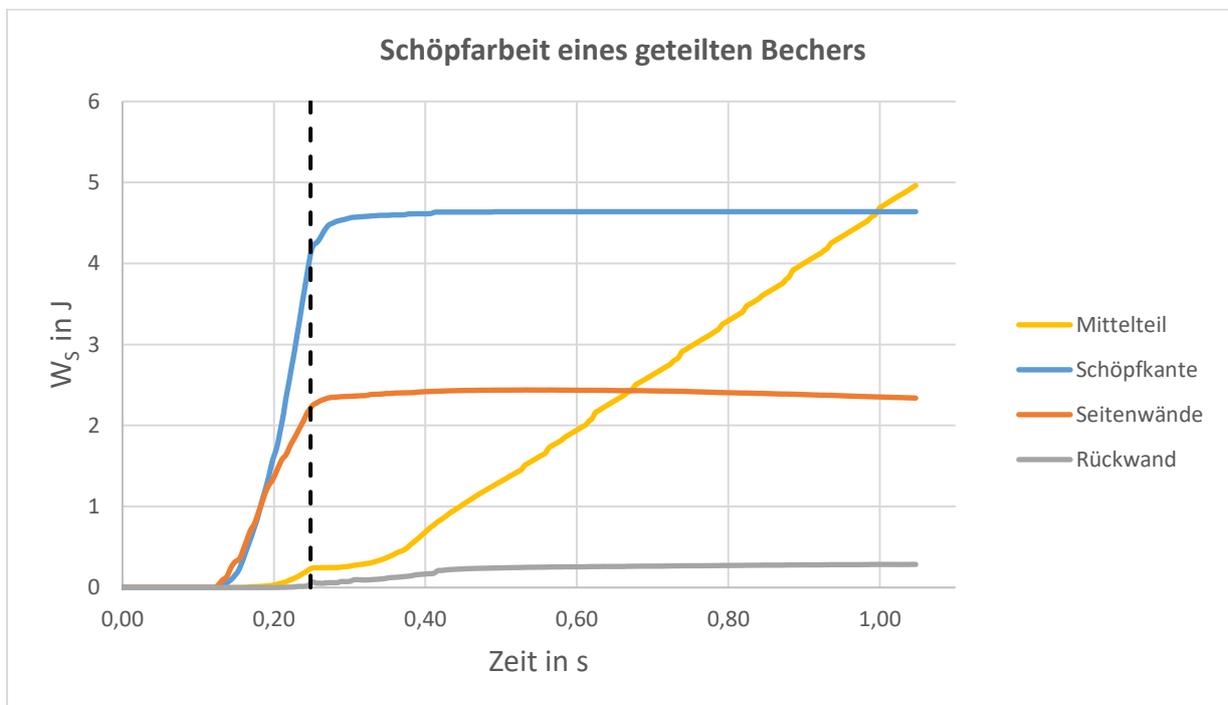


Abbildung 57: Schöpfarbeit eines geteilten Bechers – Urea, $v = 2,5 \text{ m/s}$

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpffarbeit mit LIGGGHTS

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich in Abbildung 57 nicht um spezifische, sondern um absolute Werte handelt. Die Grafik stellt den Schöpf- und Hubvorgang eines geteilten Bechers beim Schöpfen von Urea bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von $2,5 \text{ m/s}$ dar. Bei der Zeit von ungefähr $0,25$ Sekunden findet der Übergang der Rotationsbewegung in die Translationsbewegung statt. Anschließend ist der Hubvorgang des Bechers bis zu einer Höhe von zwei Metern dargestellt. Die Ergebnisse decken sich durchwegs mit den Erwartungen. Die Schöpffarbeit der Schöpfkante und der Seitenwände nimmt während der Rotationsbewegung zu und bleibt kurz nach dem Ende dieser konstant. Im Gegensatz dazu steht der Verlauf der Schöpffarbeit des Mittelteils. Diese ist während der Rotationsbewegung sehr gering. Sobald sich das Fördergut im Becher gesetzt hat, nimmt die gemessene Arbeit des Mittelteils konstant zu. Diese konstante Zunahme deckt sich mit der theoretisch zu leistenden Hubarbeit. Auch der geringe Anteil der Rückwand an der zu leistenden Schöpffarbeit entspricht den Erwartungen, da die Rückwand sowohl während des Schöpfvorganges als auch während des Hubvorganges nur mit einem geringen Fördergutanteil in Kontakt steht.

Abschließend ist in der Grafik noch der Umstand zu erkennen, dass ein Teil des Hubvorganges bei der Auswertung der Schöpffarbeit berücksichtigt werden muss. Auf diesen zentralen Punkt wurde bereits im Rahmen der Messwertauswertung hingewiesen. Alle Verläufe der Anteile der Schöpffarbeit sind nach dem Ende der Rotationsbewegung noch nicht konstant beziehungsweise nehmen im Fall des Mittelteils noch nicht konstant zu. Deshalb darf der Hubvorgang bei der Messwertauswertung nicht vernachlässigt werden.

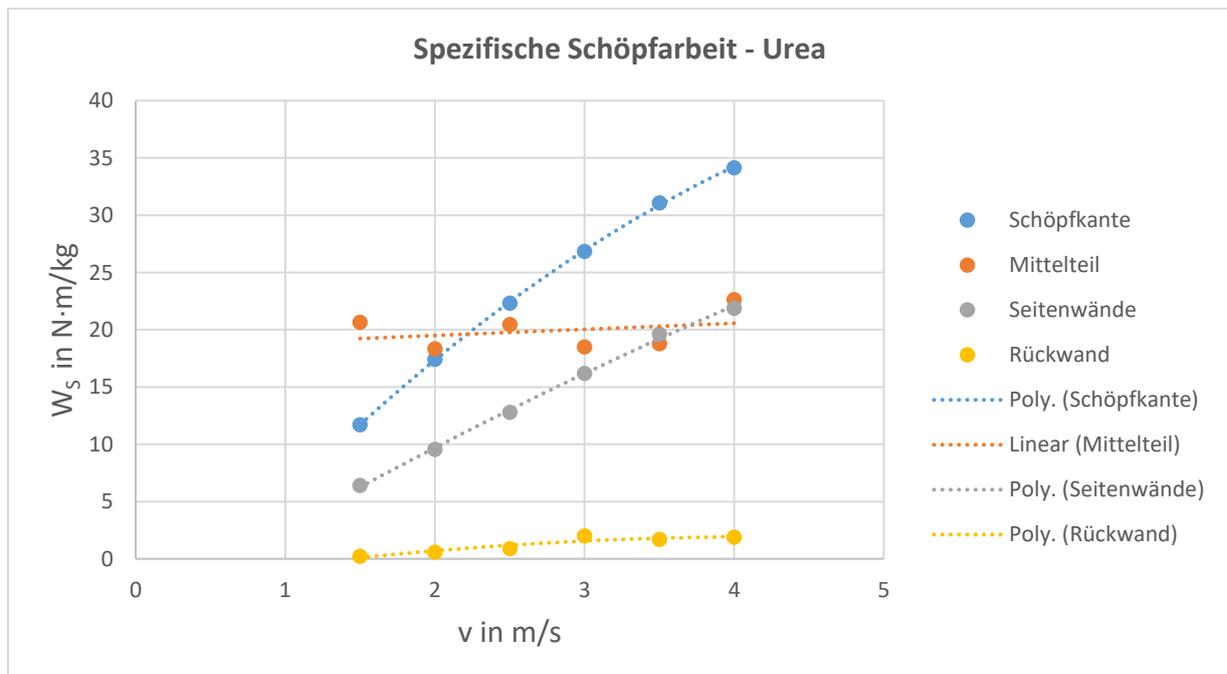


Abbildung 58: Spezifische Schöpffarbeit geteilter Becher, Urea

Ermittlung des Schöpfwiderstandes und der Schöpfarbeit mit LIGGGHTS

In Abbildung 58 ist zu erkennen, bei welchen Anteilen eine Abhängigkeit von der Zugmittelgeschwindigkeit vorliegt und bei welchen eher nicht. Die Anteile der Schöpfkante, der Seitenwände und der Rückwand scheinen deutlich von der Zugmittelgeschwindigkeit abzuhängen. Im Gegensatz dazu ist beim Mittelteil nur eine geringfügige Zunahme der spezifischen Schöpfarbeit mit steigender Zugmittelgeschwindigkeit festzustellen. Da sich der Mittelteil hauptsächlich aus der Hubarbeit des Förderguts im Becher ergibt, ist die geringe Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht überraschend. Die Streuung der einzelnen Punkte des Mittelteils ist dem Umstand geschuldet, dass die geschöpften Massen je nach Versuchsreihe geringfügige Unterschiede aufweisen.

6 Untersuchungen zur Becherentleerung

6.1 Einleitung

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Becherentleerung ist sehr einfach. Zur Beschreibung der Auswurfkurven muss lediglich der Auswurf eines Bechers untersucht werden. Eine Analyse mit mehreren gefüllten Bechern ist hauptsächlich aus zwei Gründen nicht zweckhaft. Erstens werden bei der Schwerkraftentleerung die Auswurfparabeln bei einem zu geringen Becherabstand vom vorseilenden Becher behindert, da in diesem Fall das Fördergut auf die Becherrückwand des vorderen Bechers fällt. Zweitens ist die Analyse der Becherentleerung für mehrere Becher komplexer, da sich die Bereiche des ausgeworfenen Förderguts teilweise überlagern und das Schüttgut in den visualisierten Ergebnissen anschließend nicht mehr einem Becher zugeordnet werden kann.

Im ersten Schritt sind die Geschwindigkeitsbereiche der Schwerkraft- und Fliehkraftentleerung festzulegen. Diese Einteilung der Bereiche erfolgt aufgrund der Geometrie des Auswurfbereichs des Becherwerks. Die Abmessungen des Auswurfbereichs wurden zur Untersuchung der Entleerung ebenfalls äquivalent zu den Abmessungen des Versuchsförderers von Dilefeld gewählt. Gemäß den Gleichungen aus Abschnitt 2.2 ist der Bereich der Schwerkraftentleerung durch folgende Bedingung gekennzeichnet:

$$v < \sqrt{\frac{gr_i}{r_a}} = 1,13 \text{ m/s.} \quad (6.1)$$

Die Bedingung zur Ermittlung des Bereichs der Fliehkraftentleerung lautet:

$$v > \sqrt{gr_i} = 1,4 \text{ m/s,} \quad (6.2)$$

wobei r_a dem Radius der Becheraußenkante und r_i dem Radius der Becherrückwand entsprechen. Mit der Kenntnis der Bereiche erfolgt die Festlegung der Geschwindigkeiten zur Untersuchung des Auswurfsverhaltens der diversen Fördergüter. Die Untersuchungen im Bereich der Schwerkraftentleerung werden bei Zugmittelgeschwindigkeiten von 0,6, 0,8, 1,0 und 1,1 m/s durchgeführt. Die Untersuchungen des Fliehkraftbereiches erfolgen bei den Geschwindigkeiten 1,4, 1,5, 1,7 und 1,9 m/s.

Bei den Versuchen von Dilefeld wurden in den zwei Bereichen unterschiedliche Becher eingesetzt. Gemäß zahlreicher Untersuchungen ist im Bereich niedrigerer

Untersuchungen zur Becherentleerung

Zugmittelgeschwindigkeiten der Einsatz von tiefen Bechern möglich. Mit diesen Bechern kann mehr Schüttgut pro Becher gefördert werden. Bei höheren Zugmittelgeschwindigkeiten ist der Einsatz von flacheren Bechern erforderlich, da sich tiefe Becher nicht mehr vollständig entleeren lassen. Die tiefen Becher werden als Schwerkraftbecher und die flachen Becher als Fliehkraftbecher bezeichnet. Die untersuchten Becher sind äquivalent zu den Bechern von Dilefeld (Abbildung 16). Im Rahmen der Auswurfversuche betrug der Füllgrad der Schwerkraftbecher 0,8 und der Füllgrad der Fliehkraftbecher 0,5.

Mit Hilfe der LIGGGHTS-Simulationen soll nun untersucht werden, ob die Einteilung in Schwerkraft- und Fliehkraftentleerung korrekt ist. Weiters wird die Theorie der logarithmischen Spirale untersucht und überprüft wie gut die Auswurfparabeln nach Beumer/Wehmeier und Beckert/Föll mit den Simulationsergebnissen übereinstimmen. Abschließend sollen die Unterschiede des Auswurfes der einzelnen Fördergüter gegenübergestellt werden.

6.2 Untersuchungen zur Einteilung der Entleerungstypen

In diesem Abschnitt wird die Güte der Einteilung der Entleerungstypen anhand von Urea untersucht. Die Einteilung erfolgt gemäß der Theorie lediglich aufgrund der geometrischen Verhältnisse des Becherwerks und der Zugmittelgeschwindigkeiten. Auf die Einbeziehung von Förderguteigenschaften beispielsweise der inneren Reibung wird in der Theorie gänzlich verzichtet. Somit ist es durchaus interessant, ob diese einfache Einteilung anhand der LIGGGHTS-Simulationen bestätigt werden kann.

In Abbildung 59 ist der Auswurf von Urea bei einer Geschwindigkeit von $0,6 \text{ m/s}$ dargestellt. Die pink aufgetragenen Linien kennzeichnen jeweils die inneren Becherwände und somit jenen Bereich, in dem sich das Fördergut theoretisch befinden kann. Die anderen Linien kennzeichnen die Bahn der einzelnen Teilchen, wobei der Farbverlauf die Geschwindigkeit der Teilchen entsprechend der angegebenen Skala beschreibt. In der Grafik ist die Schwerkraftentleerung sehr deutlich zu erkennen, da die einzelnen Partikel über die Becherinnenkante aus dem Becher rutschen.

Der Ablauf des Auswurfs bei einer Geschwindigkeit von $1,1 \text{ m/s}$ kann aus Abbildung 60 entnommen werden. Der Auswurf bei höheren Geschwindigkeiten führt sichtlich zu einer größeren Streuung des Förderguts. Weiters ist deutlich zu erkennen, dass die Becherentleerung an der Grenze zur Mischentleerung stattfindet. Das Fördergut, welches sich nahe der Becheraußenkante befindet, wird noch im zweiten Quadranten ausgeworfen, jedoch erfolgt der Auswurf beinahe schon über die Außenkante des Bechers. Per Definition ist die

Untersuchungen zur Becherentleerung

Fliehkraftentleerung durch das Abschleudern des Fördergutes über die Becheraußenkante im ersten Quadranten gekennzeichnet.

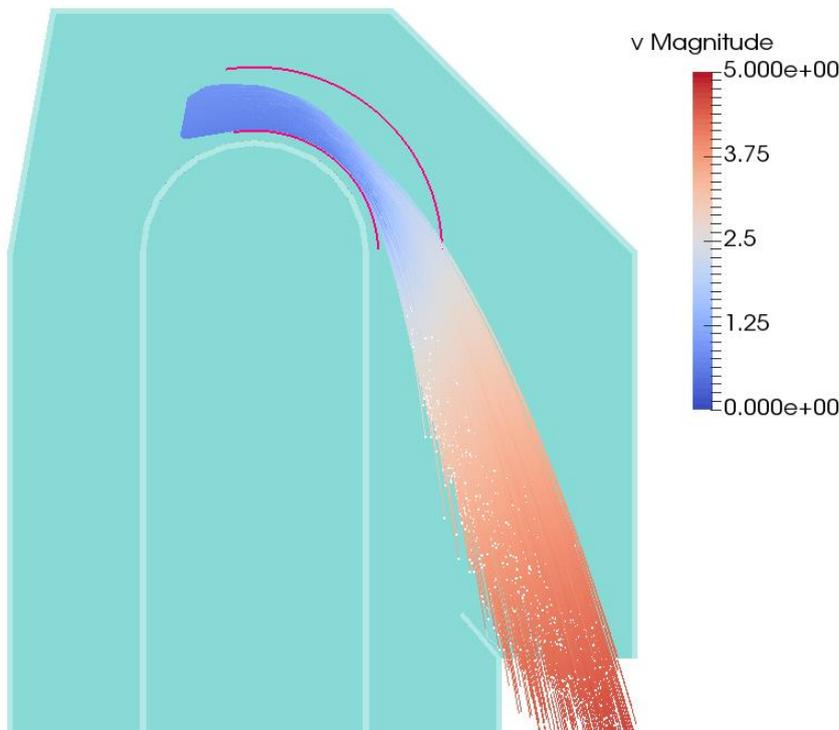


Abbildung 59: Urea $v = 0,6 \text{ m/s}$

In Abbildung 61 sind die Auswurfverhältnisse für Urea bei den Geschwindigkeiten von $1,5 \text{ m/s}$ bis $1,9 \text{ m/s}$ dargestellt. Laut den theoretischen Ergebnissen sollte ab einer Geschwindigkeit von $1,4 \text{ m/s}$ der Übergang vom Zustand der Mischentleerung zur Fliehkraftentleerung stattfinden. In den Diagrammen ist jedoch deutlich zu erkennen, dass bei einer Geschwindigkeit von $1,5 \text{ m/s}$ noch die Mischentleerung vorliegt. Selbst bei einer Geschwindigkeit von $1,7 \text{ m/s}$ hat es noch den Anschein, dass ein Teil des Fördergutes eher über die Becherinnenkante rutscht, als über die Becheraußenkante ausgeworfen zu werden. Ab einer Geschwindigkeit von $1,9 \text{ m/s}$ lässt sich aufgrund der Simulationsergebnisse vom Zustand der Fliehkraftentleerung sprechen. Bei dieser Geschwindigkeit wird bereits ein großer Anteil im ersten Quadranten ausgeworfen und gegen das obere Leitblech des Becherwerkkopfes geschleudert. Desweiteren liegt bereits zum Start der Umlaufbewegung kein Fördergut auf der inneren Becherwand auf, sodann der gesamte Teil über die äußere Becherkante abgeschleudert wird.

Zusammenfassend ist feststellbar, dass die Theorie zur Bestimmung des Auswurftyps zwar vorab eine gute Näherung darstellt, jedoch den Geschwindigkeitsbereich nicht zur Gänze abstecken kann. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da eingangs bereits erwähnt wurde, dass

Untersuchungen zur Becherentleerung

bei dieser Theorie keine fördergutspezifischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass die innere Reibung des Schüttgutes und der Reibungskoeffizient der Kontaktpaarung Fördergut-Becherwerkstoff einen Einfluss auf die Entleerungsverhältnisse haben. Dieser Einfluss wird in den Übergangsbereichen zwischen den Entleerungstypen eher groß sein und bei zunehmender Zugmittelgeschwindigkeit abnehmen.

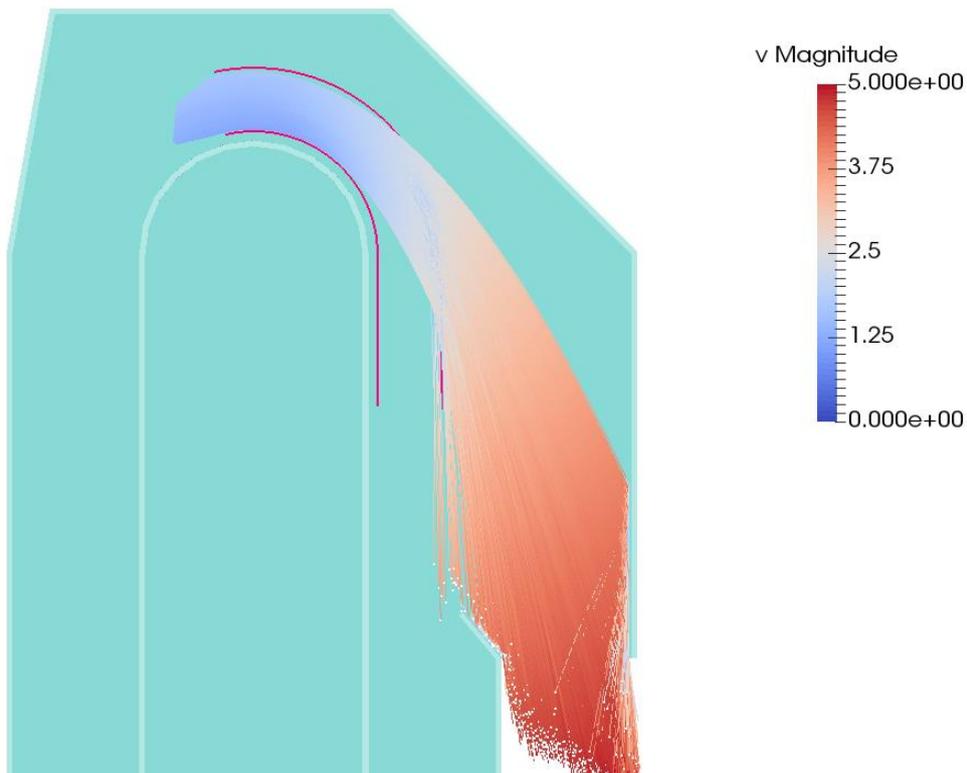


Abbildung 60: Urea $v = 1,1 \text{ m/s}$

Untersuchungen zur Becherentleerung

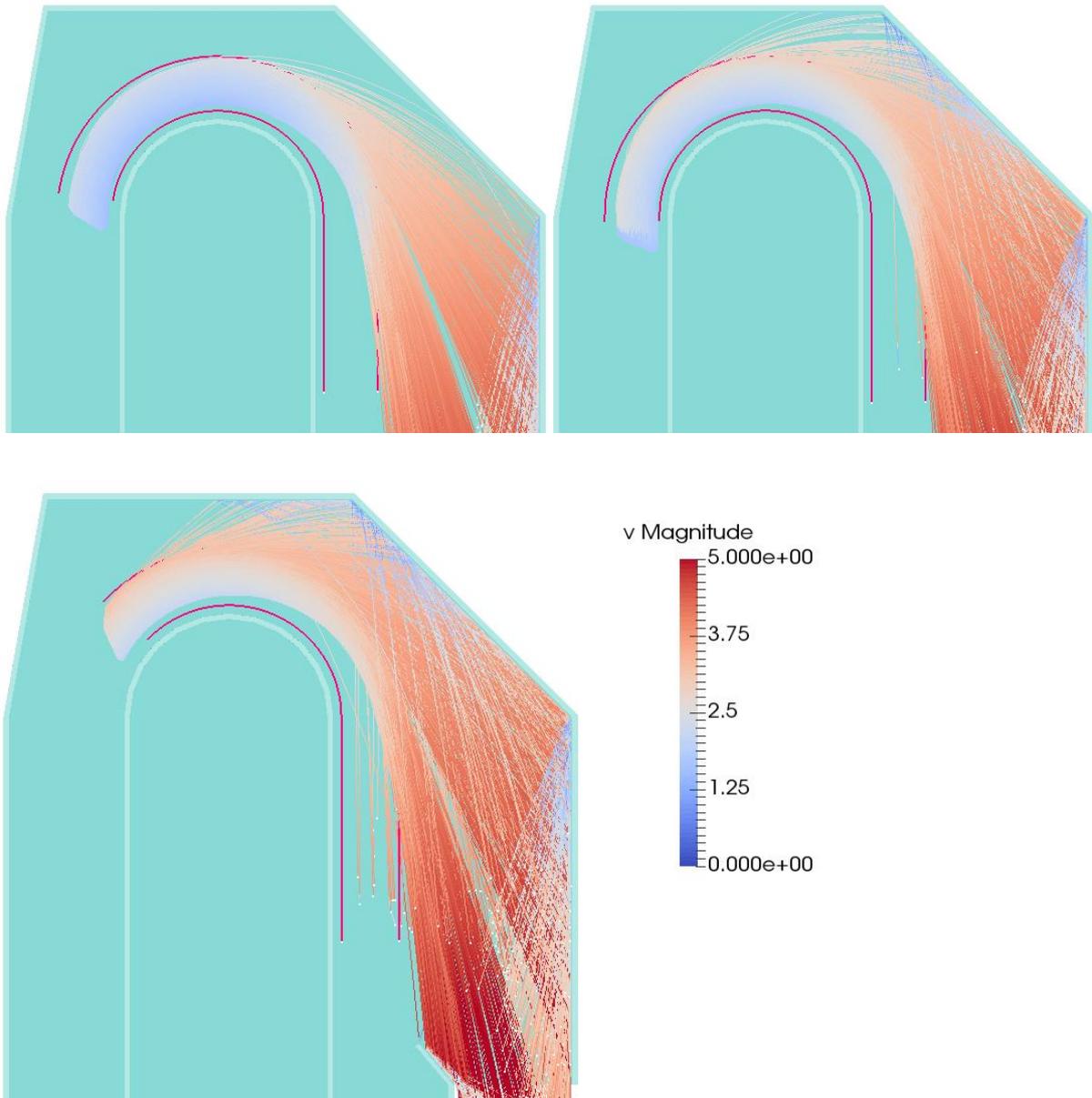


Abbildung 61: Urea-Auswurf; oben-links: 1,5 m/s, oben-rechts: 1,7 m/s, unten: 1,9 m/s

6.3 Untersuchungen zur logarithmischen Spirale

Die Theorie der logarithmischen Spirale besagt, dass der Becherinhalt bei der Füllung mit einem idealen Schüttgut von einer logarithmischen Spirale mit dem Ursprung im Pol in zwei Bereiche geteilt wird. Das ideale Fördergut, das sich zwischen der logarithmischen Spirale und den Becherwänden befindet, wird laut der Theorie nicht ausgeworfen. Die untersuchten Becher wurden so ausgelegt, dass sie beim Einsatz in ihren vorgesehenen Geschwindigkeitsbereichen vollständig entleert werden. Daher sind die Versuche zur Überprüfung der Theorie der logarithmischen Spirale anzupassen. Eine unvollständige

Untersuchungen zur Becherentleerung

Entleerung ist durch den Einsatz von Schwerkraftbechern beim Auswurf von Urea bei Zugmittelgeschwindigkeiten von $1,5 \text{ m/s}$ und 2 m/s erreichbar.

In Abbildung 62 ist der Auswurf bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s zu drei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die Partikel zum letzten Zeitpunkt sind zur besseren Übersicht grün eingefärbt. Zusätzlich sind ausgehend vom Pol die logarithmischen Spiralen durch die Becheraußenkante aufgetragen. Es ist deutlich ersichtlich, dass sich diese nicht zur Beschreibung des Auswurfs von realen Schüttgut eignen. Es wird weder die Oberfläche des Schüttgutes durch die Spiralen gut beschrieben, noch kann mit den Spiralen der Zeitpunkt der vollständigen Becherentleerung festgestellt werden. Laut der Spirale des mit grünen Partikeln gefüllten Bechers müsste dieser im Falle eines idealen Schüttgutes beinahe vollständig entleert sein. Dies ist jedoch augenscheinlich nicht der Fall. Abschließend lässt sich feststellen, dass sich zwar, wie in der Theorie angenommen wurde, eine zylindrische Oberfläche des Schüttgutes im Becher einstellt, diese jedoch nicht von den Spiralen beschrieben wird. Folglich sollte die Theorie der logarithmischen Spiralen bei der Auslegung des Entleerungsbereiches gemieden und eher auf Erfahrungswerte beziehungsweise Simulationen zurückgegriffen werden.

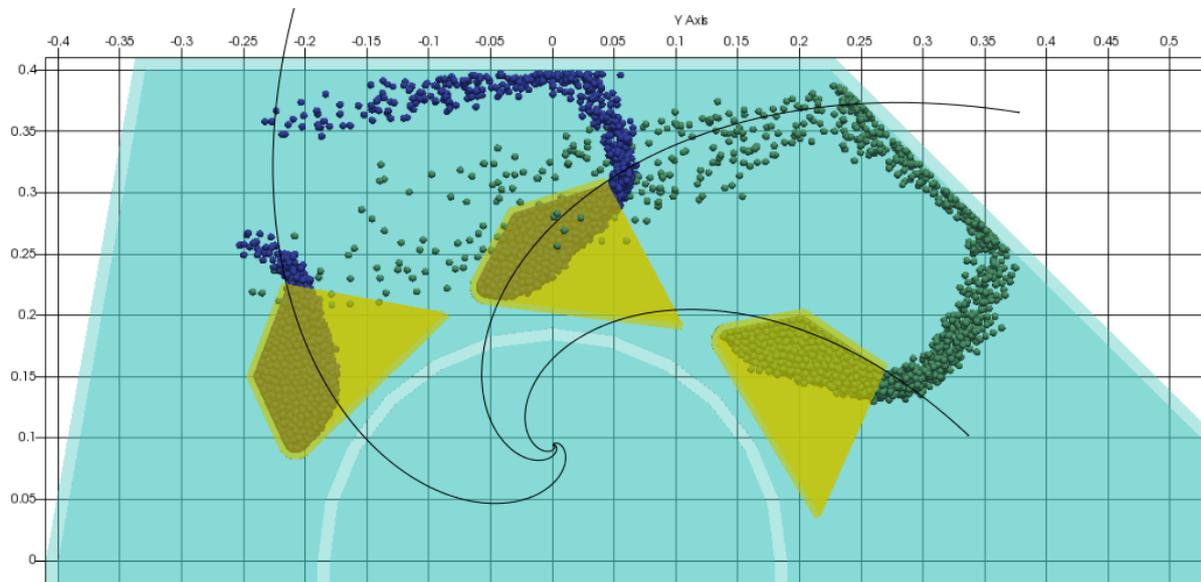


Abbildung 62: Urea $v = 2 \text{ m/s}$ - Darstellung der logarithmischen Spiralen

6.4 Untersuchungen der Auswurfparabeln

In Abschnitt 2.2 sind die Theorien zur Ermittlung der Auswurfparabeln nach Beumer/Wehmeier und Beckert/Föll angegeben. Die Theorie von Beumer und Wehmeier ist simpel, da die Auswurfparabeln lediglich anhand der Abmessungen des Becherwerks und der

Untersuchungen zur Becherentleerung

Zugmittelgeschwindigkeit ermittelt werden. Im Gegensatz dazu ist die Bestimmung der Auswurfparabeln nach Beckert und Föll deutlich aufwändiger. Es ist eine Differentialgleichung, die die Relativbewegung eines Fördergutteilchens zur Becherwand beschreibt, zu lösen. Zur Beschreibung der Relativbewegung wird bei Beckert und Föll als zusätzlicher Parameter der Reibungskoeffizient zwischen dem Becherwerkstoff und dem Schüttgut benötigt.

Die Ermittlung der Auswurfparabeln erfolgt im Zuge der Auslegung des Entleerungsbereiches eines Becherwerks. Mit Hilfe der Parabeln soll sichergestellt werden, dass nicht zu viel gefördert Schüttgut zurück in den Becherwerksschacht fällt. Somit finden die Auswurfparabeln vor allem im Geschwindigkeitsbereich der Schwerkraftentleerung Anwendung. Zum Vergleich der Theorie und der Simulationsergebnisse wurden die Fördergüter Getreide und Reststoffe gewählt. Die Wahl fiel auf diese beiden Fördergüter, da Getreide gemäß der Kalibrierung für die Kontaktpaarung Partikel-Stahl mit einem Wert von 0,25 den kleinsten und Reststoffe mit 0,889 den größten Reibungskoeffizienten aufweisen. Alle Versuche wurden mit Schwerkraftbechern bei einem Füllgrad von 0,8 bei drei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 63-68 dargestellt. Das Schüttgut wird analog zu den Untersuchungen der Entleerungstypen durch die Partikelbahnen gekennzeichnet, wobei der Farbverlauf Aufschluss über den Betrag der momentanen Teilchengeschwindigkeit gibt. Überlagert werden die Grafiken mit den Auswurfparabeln nach Beumer und Wehmeier beziehungsweise nach Beckert und Föll. Die Parabeln nach Beumer und Wehmeier sind in den Gegenüberstellungen bei gleichen Zugmittelgeschwindigkeiten jeweils ident, da sie unabhängig vom geförderten Schüttgut bestimmt werden. Die Parabeln nach Beckert und Föll wurden für ein Schüttgutteilchen, das sich zu Beginn auf dem Berührungspunkt des Teilkreises mit der Becherinnenwand befindet, erstellt. Der Startpunkt der Parabeln wurde jeweils nach den entsprechenden Theorien bestimmt. Im Fall der Theorie nach Beckert und Föll ist der Startpunkt der Parabeln stark vom Reibungskoeffizienten abhängig, da es bei einem hohen Reibungskoeffizienten deutlich länger dauert, bis sich die entsprechende Relativbewegung einstellt. Das gelbe Netz des Bechers in den Abbildungen dient lediglich zur besseren Übersicht. Es kennzeichnet keinesfalls den Start der Abwurfbewegung in den Simulationen.

Grundsätzlich fällt auf, dass die komplexere Theorie von Beckert und Föll den Auswurf besser beschreibt als die simple Theorie von Beumer und Wehmeier. Vor allem bei niedrigeren Geschwindigkeiten scheint sich die Berücksichtigung der Reibungsparameter von Beckert und Föll auszuzahlen. Mit zunehmender Zugmittelgeschwindigkeit beschreibt jedoch auch die Theorie von Beumer und Wehmeier den simulierten Auswurf immer besser.

Untersuchungen zur Becherentleerung

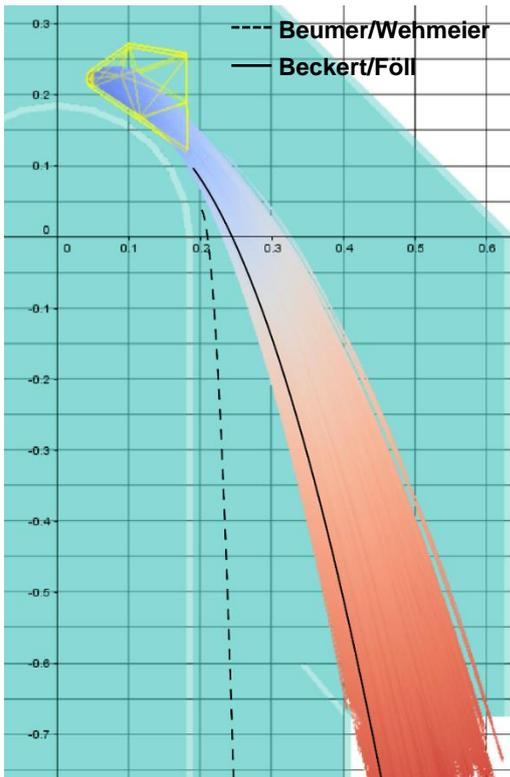


Abbildung 63: Getreide $v = 0,6 \text{ m/s}$

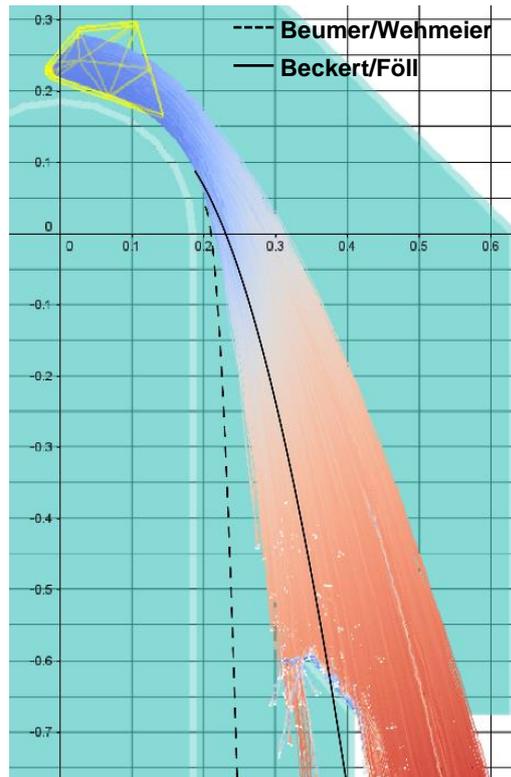


Abbildung 64: Reststoffe $v = 0,6 \text{ m/s}$

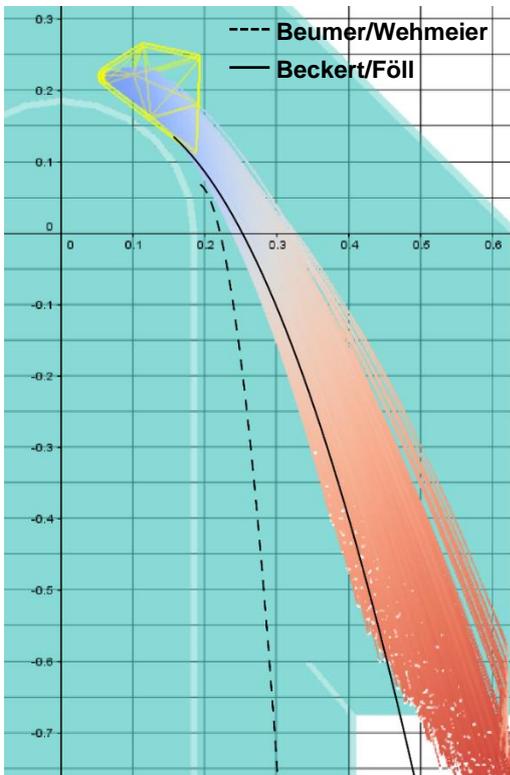


Abbildung 65: Getreide $v = 0,8 \text{ m/s}$

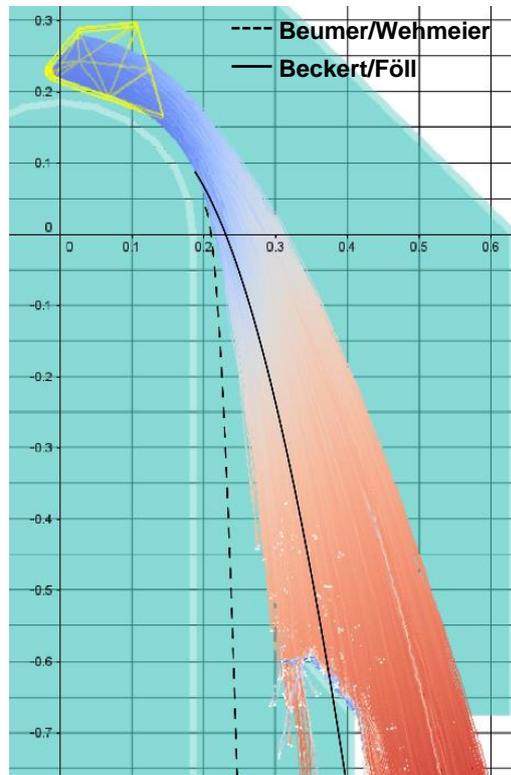


Abbildung 66: Reststoffe $v = 0,8 \text{ m/s}$

Untersuchungen zur Becherentleerung

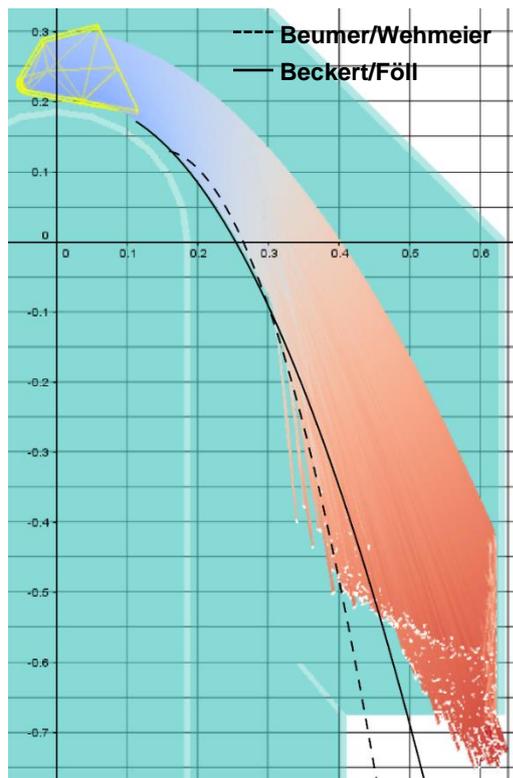


Abbildung 67: Getreide $v = 1,1 \text{ m/s}$

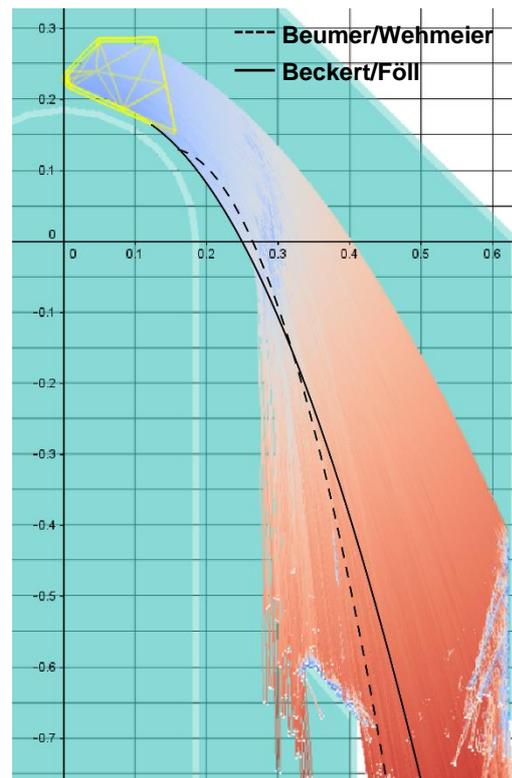


Abbildung 68: Reststoffe $v = 1,1 \text{ m/s}$

Bei der Analyse der Parabeln von Beckert und Föll fällt auf, dass sich immer ein geringer Teil des Förderguts unterhalb der Auswurfparabel befindet. Dieser Umstand kann korrigiert werden, indem ein anderes Startteilchen zur Berechnung der Parabel gewählt wird. Theoretisch sollte sich für ein Teilchen, das sich zu Beginn nahe der Becherrückwand befindet, eine Abwurfparabel mit einem engeren Scheitel ergeben. Die Gleichungen zur Ermittlung der Auswurfparabel von Teilchen mit einer Vor- oder Rücklage sind in der Arbeit von Beckert und Föll angegeben [12]. Da die ursprüngliche Gleichung bereits gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmt, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Angabe der modifizierten Auswurfparabeln verzichtet.

Beim Vergleich der Simulationsbilder der Zugmittelgeschwindigkeiten $0,8 \text{ m/s}$ und $1,1 \text{ m/s}$ lässt sich sowohl bei Getreide als auch bei Urea ein interessantes Phänomen feststellen. Bei beiden Fördergütern liegen die Bahnen weniger Partikel bei der höheren Umlaufgeschwindigkeit näher bei der Mittelebene als bei der geringeren Umlaufgeschwindigkeit. Dieses Phänomen entsteht dadurch, dass der Becher die ausgeworfenen Partikel einholt und diese anschließend ablenkt. Die Bahn der abgelenkten Teilchen ist in diesem Falle nicht mehr parabelförmig. Die abgelenkten Partikelbahnen sind in Abbildung 67 und Abbildung 68 ersichtlich.

6.5 Gegenüberstellung des Auswurfes der einzelnen Fördergüter

Zum Abschluss der Untersuchungen des Auswurfvorganges sollen die Simulationsergebnisse der vier analysierten Fördergüter verglichen werden. Da die auftretenden Belastungen schon im Rahmen der Berechnung des Schöpfwiderstandes beziehungsweise der Schöpfarbeit ermittelt wurden, erfolgt in diesem Abschnitt nur der visuelle Vergleich der Simulationsergebnisse.

In den Abbildungen 69-80 sind Ausschnitte des Entleerungsvorganges der vier untersuchten Fördergüter bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen dargestellt. Die eingesetzten Becher wurden entsprechend der theoretischen Ergebnisse gewählt. Somit kamen bei Zugmittelgeschwindigkeiten von $0,6\text{ m/s}$ sowie $0,8\text{ m/s}$ Schwerkraftbecher und bei der Geschwindigkeit von $1,9\text{ m/s}$ Fliehkraftbecher zum Einsatz. Um einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde in den Grafiken darauf geachtet, dass die Becherpositionen inklusive der Partikelpositionen je Geschwindigkeitsstufe zum selben Zeitpunkt dargestellt sind. Da sich vor allem bei höheren Geschwindigkeitsverhältnissen die Partikel bei der Darstellung mehrerer Zeitpunkte in einer Grafik überlappen, mussten die Partikel zur besseren Übersicht in unterschiedlichen Farben dargestellt werden. Da die Überlappung nur bei den beiden letzten Zeitschritt stattfindet, sind die ausgeworfenen Partikel des letzten Zeitpunktes rot und des vorletzten Zeitpunktes grün eingefärbt.

Beim Vergleich der Abbildungen fällt auf, dass die Fördergutwolken von Urea und Getreide bei allen drei Geschwindigkeitsstufen ähnlich sind. Bei Urea und Getreide sind die Größenordnungen der Eingabeparameter zur Beschreibung des Partikelkontaktes sehr ähnlich, während die Parameter der Kontaktpaarung Becher-Partikel größere Unterschiede aufweisen. Zudem ähneln sich die in den Simulationen angenommen Partikelformen von Urea und Getreide. Daraus folgt, dass die Form der Schüttgutwolken im Bereich der Schwerkraftentleerung eher von den Eingabeparametern zur Beschreibung des Partikelkontaktes und der Partikelform als von den Eingabeparametern des Kontaktes zwischen Becherwerkstoff und Partikel abhängt.

Mit zunehmender Zugmittelgeschwindigkeit dürfte die Relevanz der Eingabeparameter und der Partikelform zunehmen. Während bei der geringsten dargestellten Geschwindigkeitsstufe der Auswurf aller Fördergüter ähnlich aussieht, sind bei der höchsten Geschwindigkeitsstufe deutliche Unterschiede feststellbar. So sind bei den Simulationen bei einer Zugmittelgeschwindigkeit von $1,9\text{ m/s}$ bereits geringe Unterschiede im Auswurf von Urea und

Untersuchungen zur Becherentleerung

Getreide erkennbar, da der Auswurf von Urea etwas später beendet ist als der Auswurf von Getreide. Die Ursache für den längeren Auswurfvorgang bei Urea kann mit den höheren Reibungsparametern für die Kontaktpaarung Partikel-Stahl begründet werden. Diese These kann ebenfalls mit der Grafik von Reststoffen (Abbildung 79) bestätigt werden, da die Reststoffpartikel gemäß der Kalibrierung die höchsten Reibungsparameter für den Kontakt mit dem Becherwerkstoff aufweisen.

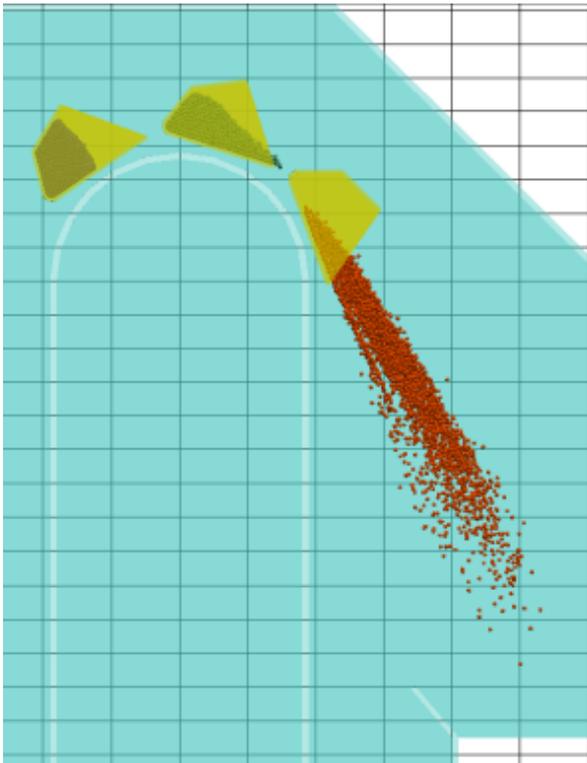


Abbildung 69: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

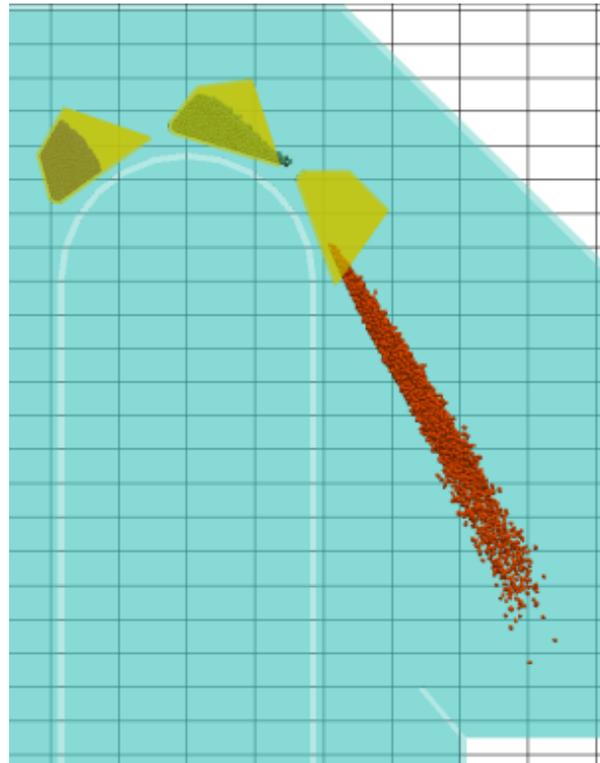


Abbildung 70: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

Untersuchungen zur Becherentleerung

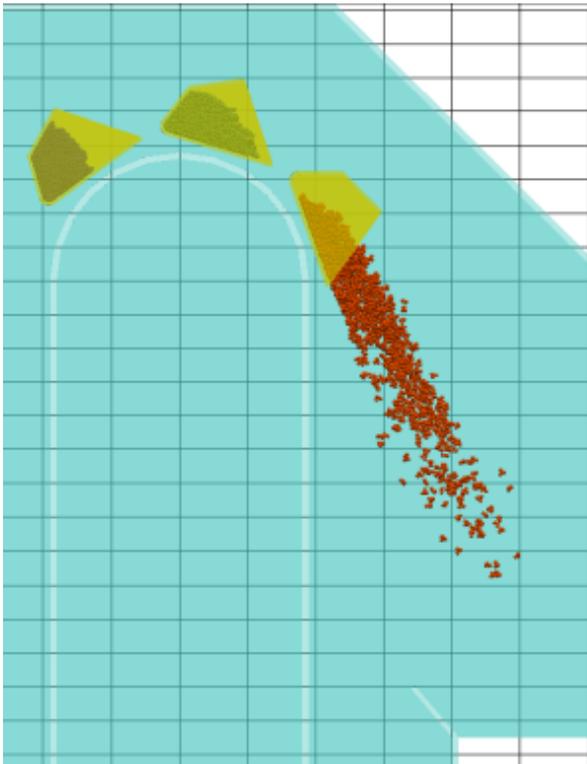


Abbildung 71: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

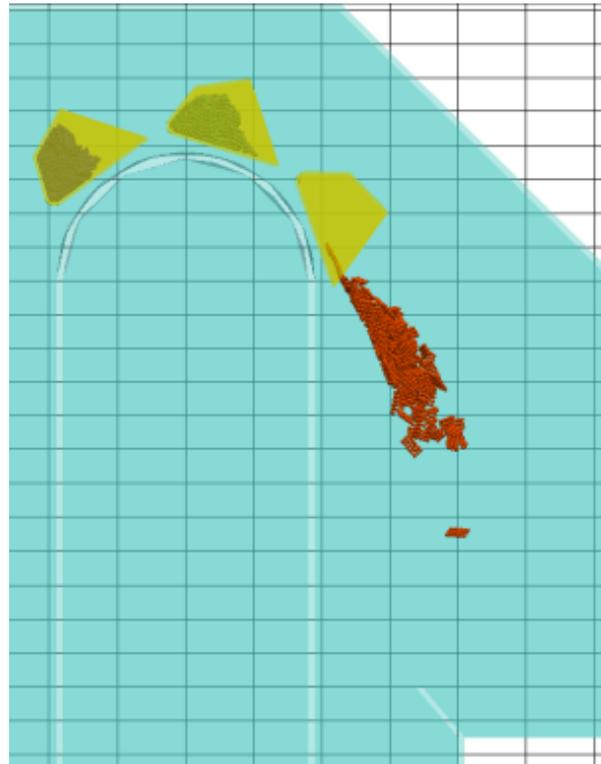


Abbildung 72: Auswurf der Hackschnitzel-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$

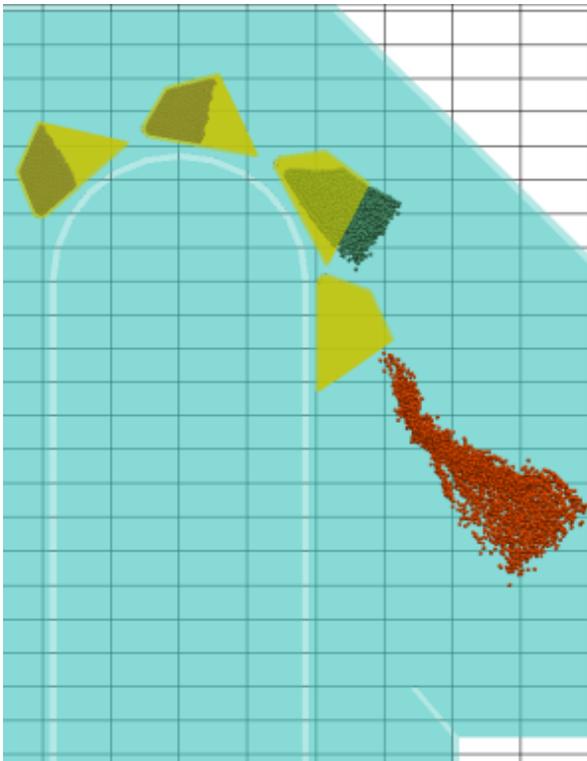


Abbildung 73: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$

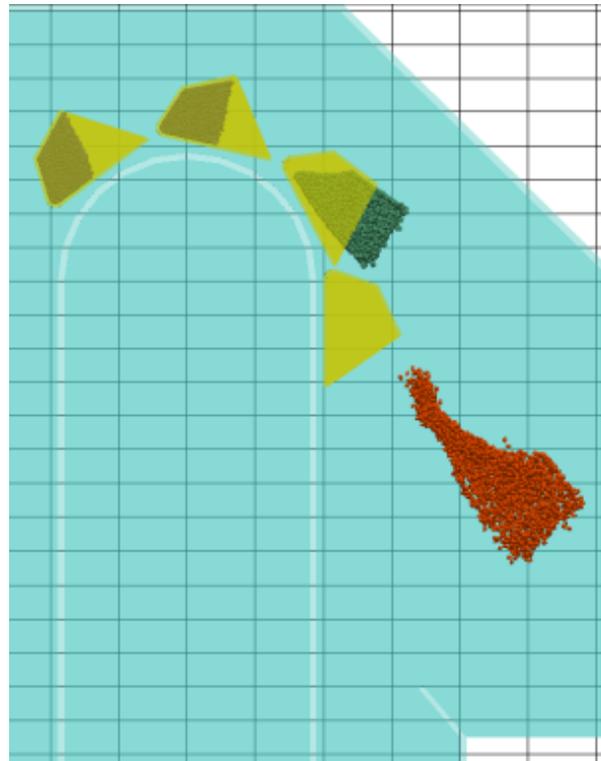


Abbildung 74: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$

Untersuchungen zur Becherentleerung

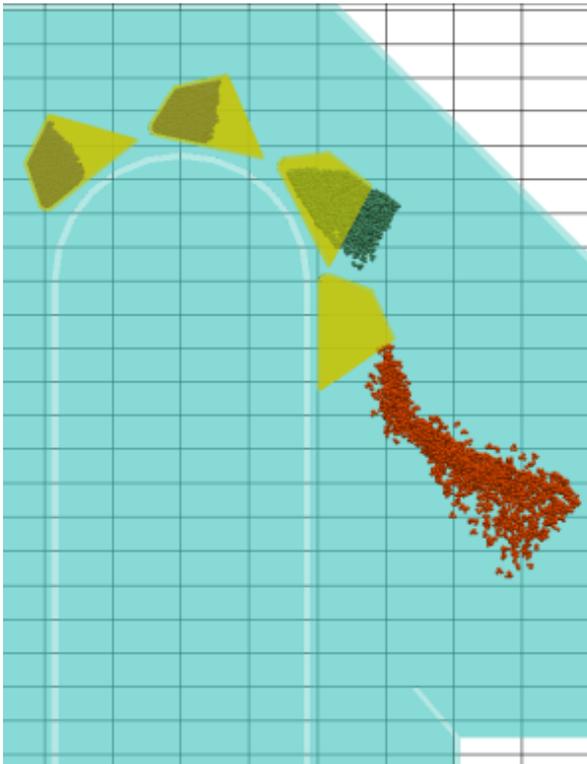


Abbildung 75: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$

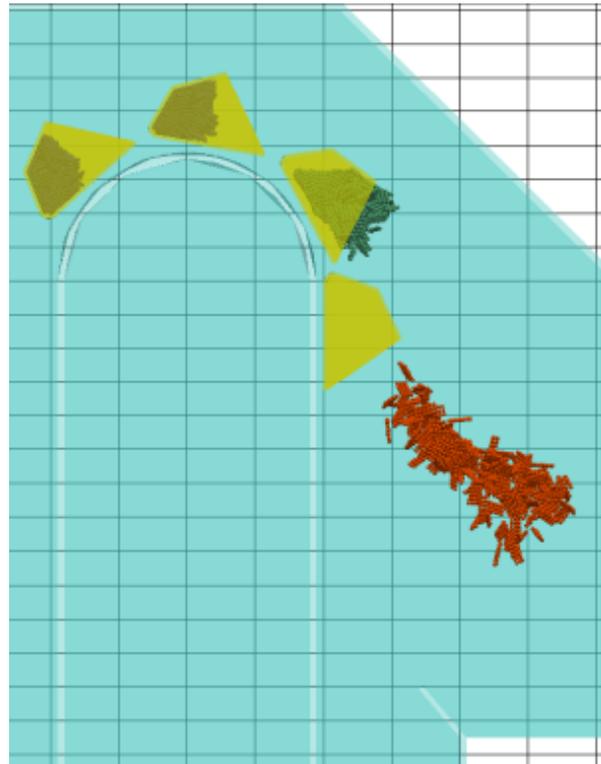


Abbildung 76: Auswurf der Hackschnitzel-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$

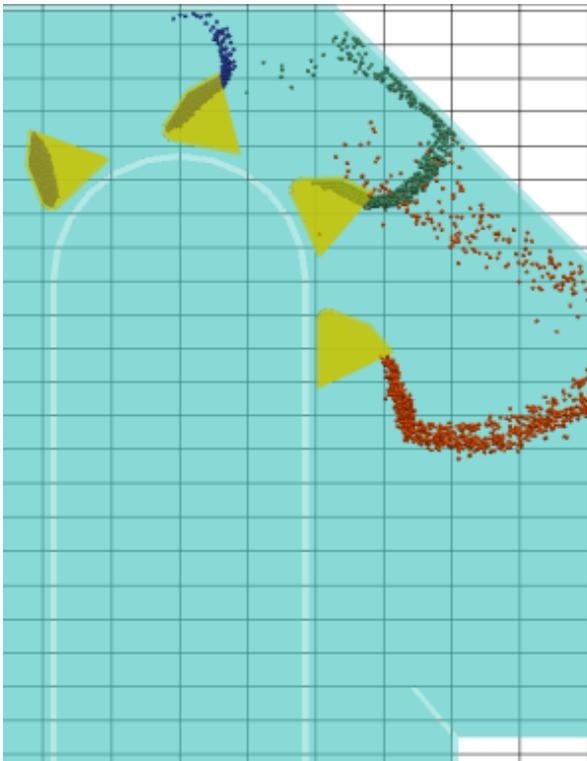


Abbildung 77: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$

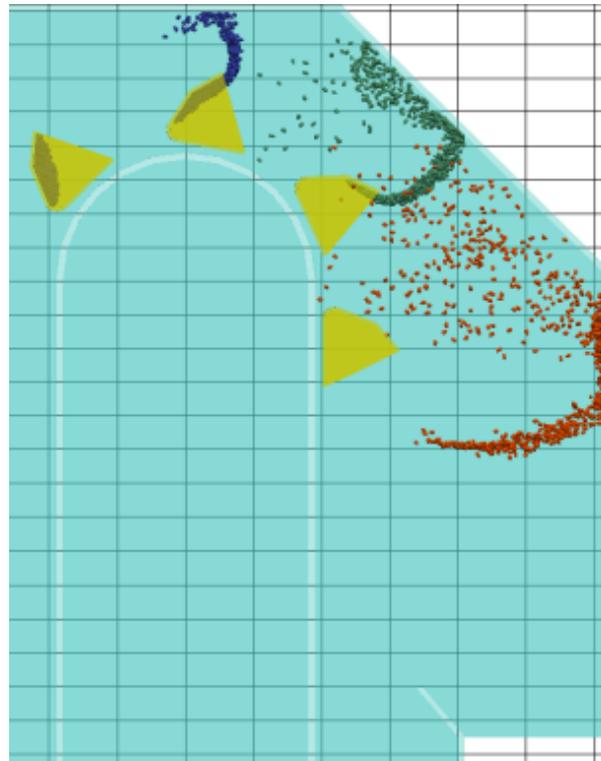


Abbildung 78: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$

Untersuchungen zur Becherentleerung

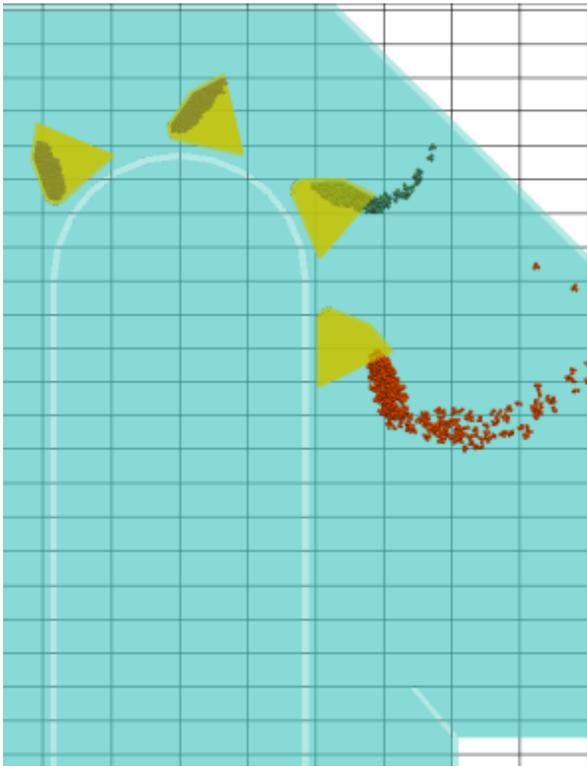


Abbildung 79: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$

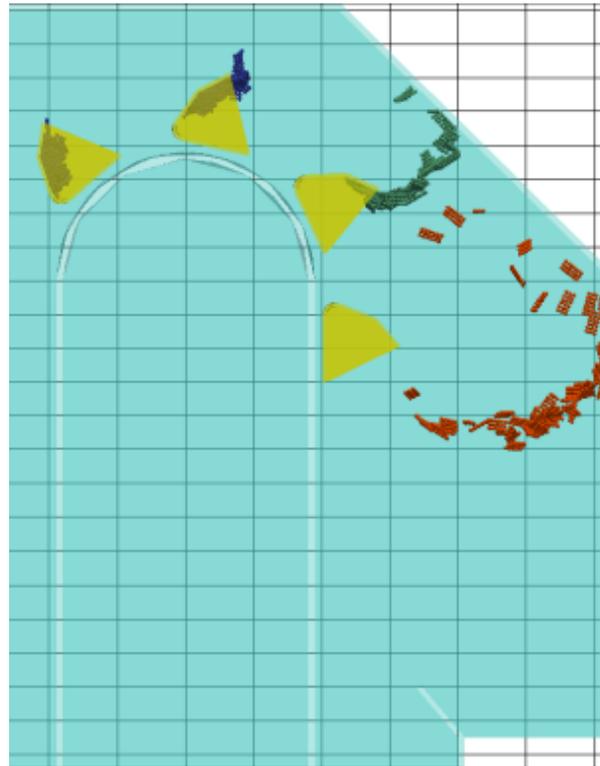


Abbildung 80: Auswurf der Hackschnittel-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$

6.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse des Entleerungsvorganges

Zusammenfassend zur Untersuchung des Entleerungsvorganges von Becherwerken lässt sich festhalten, dass DEM-Simulationen jedenfalls eine große Unterstützung bei der Auslegung des Auswurfbereiches sein können. Diese setzen jedoch wie bei allen Simulationen eine möglichst exakte Kalibrierung voraus. Der Vorteil bei der Analyse des Entleerungsvorganges mittels Simulationen ist, dass sehr schnell unterschiedliche Anordnungen untersucht werden können. Beispielsweise kann die Anordnung der Leitbleche bei der Fliehkraftentleerung in einer entsprechenden CAD-Software innerhalb weniger Minuten angepasst und die Auswirkungen der Änderungen anschließend in den Simulationen betrachtet werden. Neben der schnellen Änderung des Versuchsaufbaus in den Simulationen gestaltet sich die Versuchsauswertung der Simulationen deutlich einfacher als die Versuchsauswertung realer Versuche. Soll zum Beispiel mittels eines realen Versuches der Auswurf visualisiert werden, so müssten im Becherwerk entsprechende Hochgeschwindigkeitskameras angebracht werden. Zudem müsste der Becher mit einer Glas- beziehungsweise Plexiglaswand ausgeführt werden, falls die Bewegung des Förderguts im Becher dargestellt werden soll.

Untersuchungen zur Becherentleerung

Hinsichtlich der untersuchten Theorien wurde festgestellt, dass die theoretische Einteilung der unterschiedlichen Entleerungsbereiche nicht zur Gänze anhand der Simulationen bestätigt werden konnte. Dies ist aus offensichtlichen Gründen nicht überraschend, da in die Einteilung keine Förderguteigenschaften einfließen. Die Einteilung kann als erste Näherung verwendet werden und trifft jedenfalls bei einem entsprechenden Abstand von den definierten Grenzen zu. Während die Theorien der Auswurfparabeln vor allem im Bereich von größeren Zugmittelgeschwindigkeiten verifiziert wurden, konnte die Theorie der logarithmischen Spirale nicht bestätigt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Schöpf- und der Entleerungsvorgang von Becherwerken mit Hilfe der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) analysiert. Als Simulationssoftware kam dabei die Open-Source Software LIGGGHTS in der Version 3.6 von der CFDEMresearch GmbH zum Einsatz. Nach einer kurzen Einleitung und Beschreibung der grundsätzlichen Bauformen moderner Becherwerke werden in Abschnitt 2 die einschlägigsten Arbeiten und Theorien zum Schöpf- und Entleerungsvorgang vorgestellt.

In Abschnitt 3 erfolgen eine kurze Analyse des grundsätzlichen Aufbaus eines DEM-Programms und des „Hertz-Mindlin no slip“ Kontaktmodells. Dieses Kontaktmodell wird zur Berechnung aller Partikel-Partikel beziehungsweise Partikel-Wand Interaktionen in den Simulationen eingesetzt. Der folgende Abschnitt (Kapitel 4) beschäftigt sich mit der Kalibrierung der Schüttgutmaterialien. Zunächst wird darauf eingegangen, welche Eingabeparameter zum Starten der Simulationen benötigt werden. Anschließend wird der Kalibrierungsablauf der Hackschnitzel und Reststoffe dargestellt. Da Getreide und Urea nicht im Rahmen dieser Arbeit kalibriert wurden, ist für diese Fördergüter eine kurze Beschreibung und die Quelle der Eingabeparameter angegeben.

Abschnitt 5 widmet sich der Ermittlung des Schöpfwiderstandes. In diesem Kapitel werden das mathematische Modell und der Simulationsaufbau zur Ermittlung des Schöpfwiderstandes erarbeitet. Die Becherwerksgeometrie wurde analog zur Geometrie des Becherwerks nach Dilefeld gewählt. Im Zuge der Validierung der Simulationsergebnisse wurde nachgewiesen, dass bei entsprechender Kalibrierung der Materialparameter die ermittelte spezifische Schöpfarbeit im Rahmen der Vergleichswerte der Literatur liegt. Lediglich beim Vergleich der qualitativen Verläufe fällt auf, dass die Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit eine geringere überproportionale Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweisen als die Vergleichsergebnisse der Literatur. Da sich diese Abweichungen jedoch im Rahmen halten, sollte eine Auslegung von Becherwerken anhand der Simulationsergebnisse möglich sein.

In Abschnitt 6 werden die Simulationsergebnisse der Entleerungsvorganges beschrieben. Dabei wurde festgestellt, dass die Einteilung in Schwerkraft-, Misch- und Fliehkraftentleerung grundsätzlich nach der Theorie erfolgen kann. Jedoch dürfen die laut der Theorie ermittelten Grenzwerte nicht als strikte Übergangswerte betrachtet werden. Vielmehr ist eine fließende Betrachtung des Übergangsbereiches notwendig. Weiters wurde dargelegt, dass sich der Auswurf gemäß den Simulationsergebnissen im Bereich der Schwerkraftentleerung am besten mit den Auswurfparabeln nach Beckert und Föll beschreiben lässt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationsergebnisse legen die Untersuchung weiterer Aspekte in künftigen Arbeiten nahe. Es könnte anhand realer Versuche überprüft werden, ob die überproportionale Geschwindigkeitsabhängigkeit tatsächlich in dem Maße vorliegt, wie sie in der Literatur angegeben wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits gezeigt, dass sich dieser überproportionale Zusammenhang bei Beumer und Wehmeier durch den Versuchsaufbau beziehungsweise bei Dilefeld teilweise durch eine exponentielle Regression der Messpunkte erklären lässt.

Falls sich die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen lassen, dass die überproportionale Geschwindigkeitsabhängigkeit geringer ist, als in der Literatur angegeben, könnten Untersuchungen zur Ermittlung eines mathematischen Modells des Schöpfwiderstandes durchgeführt werden. Bisher war der Schöpfvorgang zu komplex, um ihn nur mit theoretischen Modellen ausreichend genau zu beschreiben. Mittels der DEM könnten die Belastungen eines Bechers in mehrere Einzelbelastungen aufgeteilt werden. Diese Aufteilung ist in groben Zügen bereits in dieser Arbeit durchgeführt worden. Jede dieser Einzelbelastungen könnte anschließend mit einem mathematischen Modell beschrieben und anhand der DEM überprüft werden. Anschließend könnte aus der Summe dieser Einzelbelastungen ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Schöpfwiderstandes hervorgehen.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Senkrecht-Becherwerk (links), Pendelbecherwerk (rechts) [2].....	2
Abbildung 2: Definition der Bechergeometrie	4
Abbildung 3: Tiefer Becher mit gekrümmter Rückwand.....	4
Abbildung 4: Versuchsanordnung mit Schöpfrad [4]	6
Abbildung 5: Versuchsanordnung bei größerer Becheranzahl [3]	6
Abbildung 6: Schöpfraddiagramm für Getreide mit 200mm Becherbreite und 90% Füllung [4]6	
Abbildung 7: Schöpfraddiagramm für Würfelkohle mit 300mm Becherbreite und 89% Füllung [4]	6
Abbildung 8: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit des Becherfüllungsgrades [1]	8
Abbildung 9: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Zugmittelgeschwindigkeit [4]	8
Abbildung 10: Spezifische Schöpfarbeit in Abhängigkeit der Becherteilung [4]	9
Abbildung 11: Bechereingriff nach Beumer und Wehmeier [5]	11
Abbildung 12: Spezifische Schöpfarbeit nach Beumer und Wehmeier [5]	13
Abbildung 13: Spezifische Schöpfarbeit nach Beumer und Wehmeier [5]	14
Abbildung 14: Lagerung des Messbechers [7]	16
Abbildung 15: Spezifische Schöpfarbeit nach Ellwanger [7].....	17
Abbildung 16: Fliehkraftbecher (links) und Schwerkraftbecher (rechts) nach Dilefeld [8].....	19
Abbildung 17: Spezifische Schöpfarbeit Schwerkraftbecher nach Dilefeld [8]	20
Abbildung 18: Spezifische Schöpfarbeit Fliehkraftbecher nach Dilefeld [8]	21
Abbildung 19: Schöpfwiderstand in Abhängigkeit des Füllgrades, Fliehkraftbecher $v = 1,5 \text{ m/s}$ [8]	21
Abbildung 20: Vergleich der spezifischen Schöpfarbeit von Getreide.....	23
Abbildung 21: Ermittlung der Entleerungsart (Fliehkraftentleerung)	25
Abbildung 22: Ermittlung der Entleerungsart (Schwerkraftentleerung)	25
Abbildung 23: Abwurfverhältnisse nach Beumer und Wehmeier [6]	27
Abbildung 24: Verhältnisse zu Beginn der Rutschbewegung der Partikel nach Beckert und Föll [12]	28
Abbildung 25: Dynamisches Kräftegleichgewicht nach Beckert und Föll [12]	29
Abbildung 26: Abwurfparabel nach Beckert und Föll [12].....	31
Abbildung 27: Darstellung des Hertz-Mindlin-Kontaktmodells [18]	35
Abbildung 28: Zu kalibrierende Materialparameter.....	37
Abbildung 29: Prinzipieller Aufbau der Versuchsanlage [20]	39
Abbildung 30: Reales Ureapartikel [20].....	39

Verzeichnisse

Abbildung 31: Partikelgeometrie eines Weizenpartikels [21]	41
Abbildung 32: Hackschnitzelpartikel.....	42
Abbildung 33: LIGGGHTS-Modell der Hackschnitzelpartikel.....	42
Abbildung 34: Hackschnitzel-Scherversuch	44
Abbildung 35: Reststoffpartikel auf der Rutsche	45
Abbildung 36: Reststoff-Partikel.....	45
Abbildung 37: Kompressionsversuch Reststoffe	46
Abbildung 38: Reststoffe-Scherversuch.....	47
Abbildung 39: Becherwerksfuß	49
Abbildung 40: Achsendefinition beim Schöpfvorgang	52
Abbildung 41: Geschwindigkeitsbereich Weizenpartikel bei 4 m/s	55
Abbildung 42: Schöpfwiderstand PVC-Granulat Dilefeld.....	56
Abbildung 43: Getreide Vergleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse	57
Abbildung 44: Füllung des Becherwerkfußes äquivalent zu Beumer und Wehmeier	58
Abbildung 45: Vergleich der spezifischen Schöpfarbeit von Getreide für den Versuchsaufbau nach Beumer und Wehmeier	59
Abbildung 46: Schüttgutverteilung Weizen $v = 1,5 \text{ m/s}$	60
Abbildung 47: Unterschiedliche Füllstände während des Schöpfvorganges von Weizen	61
Abbildung 48: Füllstände Urea-Hackschnitzel-Reststoffe bei $v = 3 \text{ m/s}$	62
Abbildung 49: Geschwindigkeitsverteilung Urea $v = 4 \text{ m/s}$	63
Abbildung 50: Spezifische Schöpfarbeit Getreide	64
Abbildung 51: Spezifische Schöpfarbeit Urea	65
Abbildung 52: Spezifische Schöpfarbeit Reststoffe	65
Abbildung 53: Spezifische Schöpfarbeit Hackschnitzel	66
Abbildung 54: Vergleich der Simulationsergebnisse des Schöpfwiderstandes	67
Abbildung 55: Vergleich der Simulationsergebnisse der spezifischen Schöpfarbeit	68
Abbildung 56: Einzelteile des Bechers	69
Abbildung 57: Schöpfarbeit eines geteilten Bechers – Urea, $v = 2,5 \text{ m/s}$	69
Abbildung 58: Spezifische Schöpfarbeit geteilter Becher, Urea.....	70
Abbildung 59: Urea $v = 0,6 \text{ m/s}$	74
Abbildung 60: Urea $v = 1,1 \text{ m/s}$	75
Abbildung 61: Urea-Auswurf; oben-links: $1,5 \text{ m/s}$, oben-rechts: $1,7 \text{ m/s}$, unten: $1,9 \text{ m/s}$	76
Abbildung 62: Urea $v = 2 \text{ m/s}$ - Darstellung der logarithmischen Spiralen.....	77
Abbildung 63: Getreide $v = 0,6 \text{ m/s}$	79
Abbildung 64: Reststoffe $v = 0,6 \text{ m/s}$	79
Abbildung 65: Getreide $v = 0,8 \text{ m/s}$	79
Abbildung 66: Reststoffe $v = 0,8 \text{ m/s}$	79

Verzeichnisse

Abbildung 67: Getreide $v = 1,1 \text{ m/s}$	80
Abbildung 68: Reststoffe $v = 1,1 \text{ m/s}$	80
Abbildung 69: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$	82
Abbildung 70: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$	82
Abbildung 71: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$	83
Abbildung 72: Auswurf der Hackschnitzel-Partikel bei $v = 0,6 \text{ m/s}$	83
Abbildung 73: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$	83
Abbildung 74: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$	83
Abbildung 75: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$	84
Abbildung 76: Auswurf der Hackschnitzel-Partikel bei $v = 1,1 \text{ m/s}$	84
Abbildung 77: Auswurf der Urea-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$	84
Abbildung 78: Auswurf der Getreide-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$	84
Abbildung 79: Auswurf der Reststoff-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$	85
Abbildung 80: Auswurf der Hackschnitzel-Partikel bei $v = 1,9 \text{ m/s}$	85

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Beumer und Wehmeier [6]	13
Tabelle 2: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Ellwanger [7]	17
Tabelle 3: Förderguteigenschaften der Schöpfversuche nach Dilefeld [8]	20
Tabelle 4: Entleerungsbereiche in Abhängigkeit des Polabstandes und der Froudezahl.....	26
Tabelle 5: Eingabeparameter Urea [20]	40
Tabelle 6: Eingabeparameter Weizen [21]	41
Tabelle 7: Eingabeparameter Hackschnitzel	43
Tabelle 8: Eingabeparameter Reststoffe	47
Tabelle 9: Gewählte Rayleighfaktoren und Masse der vollen Becher	50

9 Literaturverzeichnis

- [1] *Senkrecht-Becherwerke*, VDI 2324, 2015-06-00.
- [2] P. Römisch, *Materialflusstechnik: Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik*, 10. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [3] *Stetigförderer - Becherwerke - Tiefe Becher mit gekrümmter Rückwand*, 15235.
- [4] G. Hanffstengel, *Kraftverbrauch von Fördermitteln*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1913.
- [5] B. Beumer und K. H. Wehmeier, "Zur Frage des Schöpfwiderstandes und der Auswurfverhältnisse bei Becherwerken 1. Teil," *Fördern und Heben*, Nr. 11, S. 803–808, 1960.
- [6] _____, "Zur Frage des Schöpfwiderstandes und der Auswurfverhältnisse bei Becherwerken 2. Teil," *Fördern und Heben*, Nr. 1, S. 30–37, 1961.
- [7] K.-D. Ellwanger, *Einflussgrößen auf den Schöpfvorgang bei schnelllaufenden Becherwerken*. Hannover, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss., 1978
- [8] M. Dilefeld, *Zum Schöpfverhalten von Becherförderern*. Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 1993
- [9] T. Hellmuth, *Einfluss des Entleerungsverhaltens auf Becherform und Becherteilung zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Becherförderern*. Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 1993
- [10] G. Pajer, H. Kuhnt und F. Kurth, Hg., *Stetigförderer*, 5. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1988.
- [11] K.-H. Grote und J. Feldhusen, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2007.
- [12] R. Beckert und R. Föll, "Untersuchungen der Abwurfverhältnisse an Kettenbecherwerken," *Fördern und Heben*, Nr. 10, S. 833–836, 1966.
- [13] F.J.C. Rademacher, "Non-spill discharge characteristics of bucket elevators," *Powder Technology*, Nr. 2, S. 215–241, 1979.
- [14] P. A. Cundall und O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, 29. Jg., Nr. 1, S. 47–65, 1979.
- [15] A. Katterfeld und F. Krause, "Einsatz der Diskreten Elemente Methode in der Schüttgut-Fördertechnik," *Tagungsband zur Fachtagung "Schüttgutfördertechnik 2003"*, 2003.
- [16] C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger und S. Pirker, "Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM," *PCFD*, 12. Jg., 2/3, S. 140, 2012.
- [17] A. Di Renzo und F. P. Di Maio, "Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes," *Chemical Engineering Science*, 59. Jg., Nr. 3, S. 525–541, 2004.
- [18] Y.-C. Chung und J. Y. Ooi, "A study of influence of gravity on bulk behaviour of particulate solid," *Particuology*, 6. Jg., Nr. 6, S. 467–474, 2008.

Verzeichnisse

- [19] J. Ai, J.-F. Chen, J. M. Rotter und J. Y. Ooi, "Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations," *Powder Technology*, 206. Jg., Nr. 3, S. 269–282, 2011.
- [20] Y. Kalkan, "Entwicklung einer Versuchsanlage zur Kalibrierung von DEM-Modellen für Schüttgüter in der Fördertechnik," Technische Universität Wien, Wien, 2013.
- [21] I. O. Ferenc Safranyik, "3D DISCRETE ELEMENT MODEL OF SILO DISCHARGE," Institute of Agricultural Engineering, University of Belgrade, Belgrade, 2013.
- [22] P. Niemz, "Physik des Holzes," 2005.

A LIGGGHTS-Quellcode

A.1 Input-Datei Getreide

```

1 #####Schöpfversuch Getreide Zugmittelgeschwindigkeit 4m/s
2 #####Definition der Partikelparameter und des
  Simulationsgebiets
3
4 atom_style granular
5 atom_modify map array
6 boundary f f f
7 newton off
8
9 communicate single vel yes
10
11 units si
12 processors * 1 1
13
14 region reg block -0.115 0.115 -0.620 0.420 0.0 2.7
  units box
15 create_box 2 reg
16
17 neighbor 0.007 bin
18 neigh_modify delay 0
19
20 variable path string 60Becher_v4.0_2m
  #Pfad zum Speicherort
21 log ${path}/log.liggghts
22 variable sim_time equal 0 #Zeit zum Fuellen des Bodens 2.5
23 variable vell equal 40.0 #Zugmittelgeschwindigkeit
24 variable rad_trommel equal 0.2
25 variable sim_time2 equal PI*${rad_trommel}/${vell}
26 variable h_trans equal 2 #Höhe der
  translatorischen Bewegung
27 variable sim_time3 equal ${h_trans}/${vell}
28 variable period_becher equal -2*PI*${rad_trommel}/${vell}
29 variable becheranzahl equal 60
30 variable mass_becher equal 0.447 #Masse eines voll
  gefüllten Bechers
31 variable becherteilung equal 0.130 #Becherteilung
32 variable Fuellgrad equal 0.00001 #Gewünschter
  Becherfuellgrad [Dielefeld: 0.5 Fliehkraftbecher/ 0.8
  Schwerkraftbecher]
33
34 variable massrate1 equal
  ${vell}/${becherteilung}*${mass_becher}*${Fuellgrad}
35
36 #Partikelparameter Getreide und Stahl
37 variable r1 equal 0.003 #Radius der Partikel
38 variable density1 equal 1460 #Dichte Partikel
39 variable poissonsRatio1 equal 0.3 #Poissonfaktor Wand
40 variable poissonsRatio2 equal 0.4 #Poissonfaktor
  Partikel

```

LIGGGHTS-Quellcode

```
41 variable youngsModulus1 equal 2.1e9 #E-Modul-Wand
42 variable youngsModulus2 equal 1.0024e7 #E-Modul-Partikel
43 variable rayleighfactor equal 0.1
44 variable restitution11 equal 0.3
   #Restitutionskoeffizient Wand Wand
45 variable restitution12 equal 0.6
   #Restitutionskoeffizient Wand Partikel
46 variable restitution22 equal 0.5
   #Restitutionskoeffizient Partikel Partikel
47 variable friction11 equal 0.1
   #Reibungskoeffizient Wand Wand
48 variable friction12 equal 0.25
   #Reibungskoeffizient Wand Partikel
49 variable friction22 equal 0.3
   #Reibungskoeffizient Partikel Partikel
50 variable rollingfriction11 equal 0.3
   #Rollreibungskoeffizient Wand Wand
51 variable rollingfriction12 equal 0.01
   #Rollreibungskoeffizient Wand Partikel
52 variable rollingfriction22 equal 0.01
   #Rollreibungskoeffizient Partikel Partikel
53
54 #####Berechnung des Zeitschrittes und Definition des
   Kontaktmodells
55
56 variable G_Modul equal
   ${youngsModulus2}/(2*(1+${poissonsRatio2}))
57 variable timestep_calc equal
   ${rayleighfactor}*PI*${r1}*(${density1}/${G_Modul})^0.5/(0.16
   3*${poissonsRatio2}+0.8766)
58 timestep ${timestep_calc}
59
60 variable steps equal round(${sim_time}/${timestep_calc})
61 variable steps_umlauf equal
   round(${sim_time2}/${timestep_calc})
62 variable steps_trans equal
   round(${sim_time3}/${timestep_calc})
63
64 #Material properties required for new pair styles
65 ## Atomtype 1 Stahl / Atomtype 2 Partikel
66 hard_particles yes
67 fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype
   ${youngsModulus1} ${youngsModulus2}
68 fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype
   ${poissonsRatio1} ${poissonsRatio2}
69 fix m3 all property/global coefficientRestitution
   peratomtypepair 2 ${restitution11} ${restitution12}
   ${restitution12} ${restitution22}
70 fix m4 all property/global coefficientFriction
   peratomtypepair 2 ${friction11} ${friction12} ${friction12}
   ${friction22}
71 fix m5 all property/global
   coefficientRollingFriction peratomtypepair 2
   ${rollingfriction11} ${rollingfriction12}
   ${rollingfriction12} ${rollingfriction22}
72 #New pair style
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
73 pair_style gran model hertz tangential history
   rolling_friction cdt
74 pair_coeff * *
75
76 fix gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
77
78
79 #####Import der Geometrien
80
81 fix cad1 all mesh/surface/stress file
   meshes/Becherwerk_unten_dielefeld_vers4.stl type 1 scale
   0.001
82 fix cad3 all mesh/surface/stress file
   meshes/Kasten_Dielefeld_vers5_2m.stl type 1 scale 0.001 move
   -0.11 -0.61 0.9
83 fix mass5 all mesh/surface file
   meshes/face_mass_dielefeld.stl type 1 scale 0.001 move 0 -.3
   2.43
84 fix mass6 all mesh/surface file
   meshes/face_mass_becherbreite_dielefeld.stl type 1 scale
   0.001 move 0 -.257 2.43
85 #Use the imported mesh as granular wall
86 fix wall1 all wall/gran model hertz tangential history
   rolling_friction cdt mesh n_meshes 2 meshes cad1 cad3
87
88 #####Festlegen der Partikelgenerierung
89
90 #distributions for insertion
91 fix pts1 all particletemplate/multisphere 15485863
   atom_type 2 density constant ${density1} nspheres 3 ntry
   1000000 spheres file meshes/multi_Getreide.multi scale 1
   type 1
92 fix pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1
   pts1 1
93
94 #region and insertion
95 group nve_group region reg
96 region delete block -0.115 0.115 -0.315 -0.19 2.38 2.59
   units box
97 region count block -0.0675 0.0675 -0.315 -0.2 2.43 2.59
   units box
98 region bc block -0.08 0.08 -0.58 -0.40 0.75 2.5 units box
99
100 region bc2 block -0.1 0.1 -0.23 0.23 0.2 0.29 units box
101
102 #particle insertion
103 fix ins nve_group insert/rate/region seed 100000081
   distributiontemplate pdd1 &
104 mass INF massrate ${massrate1} insert_every
   2000 overlapcheck yes vel constant 0.0 0.0
   -0.2 orientation random region bc ntry_mc 1000
105
106 #apply nve integration to all particles that are inserted
   as single particles
107 fix integr all multisphere allow_group_and_set yes
108
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
109 #output settings, include total thermal energy
110 thermo_style custom step atoms time cpu
111 thermo 1000
112 thermo_modify lost ignore norm no
113 compute_modify thermo_temp dynamic yes
114
115 #insert the first particles so that dump is not empty
116 run 101
117 dump dmpvtk all custom/vtk 1000
    ${path}/particle.dump*.vtk id type x y z ix iy iz vx vy vz
    radius
118 dump dumpstress all mesh/gran/VTK 1
    ${path}/chute.dump*.vtk stress cad1 cad3
119 dump dumpmesh5 all mesh/gran/VTK 1
    ${path}/massface.dump*.vtk id mass5
120 dump dumpmesh6 all mesh/gran/VTK 1
    ${path}/massface_becherbreite.dump*.vtk id mass6
121
122 run 1
123 undump dumpstress
124 undump dumpmesh5
125 undump dumpmesh6
126
127 #Zeit um Bunker zu fuellen
128 run ${steps}
129
130 variable becher_im_umlauf_ceil equal
    ceil((${h_trans}+${rad_trommell}*PI)/${becherteilung})
131 variable becher_im_umlauf_floor equal
    floor((${h_trans}+${rad_trommell}*PI)/${becherteilung})
132 ##### Becher importieren #####
133 label loop_insert
134 variable insert_mesh loop ${becheranzahl}
135 fix becher${insert_mesh} all mesh/surface/stress file
    meshes/Fliehkraftbecher_Dielefeld_vers4.stl type 1 scale
    0.001 rotate axis 0 0 1 angle 180 rotate axis 1 0 0 angle
180 move 0 0.2 0.450 reference_point 0 0 0.5
136 next insert_mesh
137 jump SELF loop_insert
138
139 run 101
140
141 ##### Becherbewegung berechnen#####
142 variable sim_time_teilung equal ${becherteilung}/${vell}
143 variable steps_teilung equal
    round(${sim_time_teilung}/${timestep_calc})
144
145 ##### Definition Zeitschritt und aktueller
    Simulationszeitpunkt#####
146 variable st equal step
147 variable t equal step*dt
148
149 variable n_meshes_1 equal 2+${becheranzahl}
150
151 #####wall/gran mit if entsprechend der becheranzahl
152 unfix wall1
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
153 if "${becheranzahl} == 4" then &
154 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4" &
155 elif "${becheranzahl} == 6" &
156 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6" &
157 elif "${becheranzahl} == 7" &
158 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6 becher7" &
159 elif "${becheranzahl} == 10" &
160 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6 becher7 becher8 becher9 becher10" &
161 elif "${becheranzahl} == 20" &
162 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
    becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
    becher17 becher18 becher19 becher20" &
163 elif "${becheranzahl} == 60" &
164 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
    becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
    becher17 becher18 becher19 becher20 becher21
    becher22 becher23 becher24 becher25 becher26
    becher27 becher28 becher29 becher30 becher31
    becher32 becher33 becher34 becher35 becher36
    becher37 becher38 becher39 becher40 becher41
    becher42 becher43 becher44 becher45 becher46
    becher47 becher48 becher49 becher50 becher51
    becher52 becher53 becher54 becher55 becher56
    becher57 becher58 becher59 becher60" &
165 elif "${becheranzahl} == 50" &
166 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
    history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
    meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
    becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
    becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
    becher17 becher18 becher19 becher20 becher21
    becher22 becher23 becher24 becher25 becher26
    becher27 becher28 becher29 becher30 becher31
    becher32 becher33 becher34 becher35 becher36
    becher37 becher38 becher39 becher40 becher41
    becher42 becher43 becher44 becher45 becher46
    becher47 becher48 becher49 becher50" &
167 elif "${becheranzahl} == 100" &
168 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
becher17 becher18 becher19 becher20 becher21
becher22 becher23 becher24 becher25 becher26
becher27 becher28 becher29 becher30 becher31
becher32 becher33 becher34 becher35 becher36
becher37 becher38 becher39 becher40 becher41
becher42 becher43 becher44 becher45 becher46
becher47 becher48 becher49 becher50 becher51
becher52 becher53 becher54 becher55 becher56
becher57 becher58 becher59 becher60 becher61
becher62 becher63 becher64 becher65 becher66
becher67 becher68 becher69 becher70 becher71
becher72 becher73 becher74 becher75 becher76
becher77 becher78 becher79 becher80 becher81
becher82 becher83 becher84 becher85 becher86
becher87 becher88 becher89 becher90 becher91
becher92 becher93 becher94 becher95 becher96
becher97 becher98 becher99 becher100" &
169 elif "${becheranzahl} == 120" &
170 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
becher17 becher18 becher19 becher20 becher21
becher22 becher23 becher24 becher25 becher26
becher27 becher28 becher29 becher30 becher31
becher32 becher33 becher34 becher35 becher36
becher37 becher38 becher39 becher40 becher41
becher42 becher43 becher44 becher45 becher46
becher47 becher48 becher49 becher50 becher51
becher52 becher53 becher54 becher55 becher56
becher57 becher58 becher59 becher60 becher61
becher62 becher63 becher64 becher65 becher66
becher67 becher68 becher69 becher70 becher71
becher72 becher73 becher74 becher75 becher76
becher77 becher78 becher79 becher80 becher81
becher82 becher83 becher84 becher85 becher86
becher87 becher88 becher89 becher90 becher91
becher92 becher93 becher94 becher95 becher96
becher97 becher98 becher99 becher100 becher101
becher102 becher103 becher104 becher105 becher106
becher107 becher108 becher109 becher110 becher111
becher112 becher113 becher114 becher115 becher116
becher117 becher118 becher119 becher120" &
171 elif "${becheranzahl} <= 200" &
172 "fix wall1 all wall/gran model hertz tangential
history rolling_friction cdt mesh n_meshes ${n_meshes_1}
meshes cad1 cad3 becher1 becher2 becher3 becher4 becher5
becher6 becher7 becher8 becher9 becher10 becher11
becher12 becher13 becher14 becher15 becher16
becher17 becher18 becher19 becher20 becher21
becher22 becher23 becher24 becher25 becher26 becher27
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
    becher28 becher29 becher30 becher31 becher32 becher33
    becher34 becher35" &
173 else 'print "Error: wall1 command"' "quit"
174
175 include in.schoepf_Dielefeld_mehrals7
176
177 unfix mass
178 unfix mass2
179 run 1
```

A.2 Input-Datei Becherbewegung

```
1 #####Definition der Becherbewegung
2 #Bedingung für Becherzahl kleiner gleich der max. im Umlauf
  möglichen
3 variable becher_in_rotation_ceil equal
  ceil((${rad_trommel1}*PI)/${becherteilung})
4 variable becher_in_rotation_floor equal
  floor((${rad_trommel1}*PI)/${becherteilung})
5
6 label loop_move_if1
7 variable move_becher_rot loop ${becher_in_rotation_ceil}
8 fix move_rot${move_becher_rot} all move/mesh mesh
  becher${move_becher_rot} rotate origin 0 0 0.5 axis 1 0 0
  period ${period_becher}
9 dump dumpbecher${move_becher_rot} all mesh/gran/VTK 1000
  ${path}/becher${move_becher_rot}.dump*.vtk stress
  becher${move_becher_rot}
10 dump_modify dumpbecher${move_becher_rot} pad 6
11 fix torque${move_becher_rot} all ave/time 20 5 100
  f_becher${move_becher_rot}[1] f_becher${move_becher_rot}[2]
  f_becher${move_becher_rot}[3] f_becher${move_becher_rot}[4]
  f_becher${move_becher_rot}[5] f_becher${move_becher_rot}[6]
  file ${path}/data_becher${move_becher_rot}.csv title2 "step
  Fx Fy Fz Mx My Mz"
12
13 if "${move_becher_rot} < ${becher_in_rotation_ceil}" then &
14 "run ${steps_teilung}" &
15 else 'print "Loop finished"'
16 next move_becher_rot
17 jump SELF loop_move_if1
18 variable move_becher_rot equal ${becher_in_rotation_ceil}
19
20 variable steps_calc1 equal
  ${steps_umlaufl}-${becher_in_rotation_floor}*${steps_teilung}
  ### Steps zwischen Rotationsstart und Translationsstart
21 variable steps_calc2 equal
  ${becher_in_rotation_ceil}*${steps_teilung}-${steps_umlaufl}
  ### Steps zwischen Translationsstart und Rotationsstart des
  nächsten Bechers
22 run ${steps_calc1}
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
23
24 ##### Beginn der translatorischen Bewegung und starten der
    Rotation der Becher 5 bis XXX (Abhaengig von der Hubhoehe
    h_trans)
25
26 label loop_move_if1_trans
27 variable anzahl_diff1 equal
    ${becher_im_umlauf_ceil}-${becher_in_rotation_ceil}
28 variable move_becher_trans loop ${anzahl_diff1}
29 unfix move_rot${move_becher_trans}
30 fix move_trans${move_becher_trans} all move/mesh
    mesh becher${move_becher_trans} linear 0 0 ${vel1}
31 variable save_move_trans equal ${move_becher_trans}
    #Speichern der Variable für Schleife 3
32 run ${steps_calc2}
33 variable move_rot2 equal
    ${move_becher_rot}+${move_becher_trans}
34 if "${move_rot2} < ${becher_im_umlauf_ceil}" then &
35 "fix move_rot${move_rot2} all move/mesh mesh
    becher${move_rot2} rotate origin 0 0 0.5 axis 1 0 0 period
    ${period_becher}" &
36 'fix torque${move_rot2} all ave/time 20 5 100
    f_becher${move_rot2}[1] f_becher${move_rot2}[2]
    f_becher${move_rot2}[3] f_becher${move_rot2}[4]
    f_becher${move_rot2}[5] f_becher${move_rot2}[6] file
    ${path}/data_becher${move_rot2}.csv title2 "step Fx Fy Fz Mx
    My Mz"' &
37 "dump dumpbecher${move_rot2} all mesh/gran/VTK 1000
    ${path}/becher${move_rot2}.dump*.vtk stress
    becher${move_rot2}" &
38 "dump_modify dumpbecher${move_rot2} pad 6" &
39 "run ${steps_calc1}" &
40 else 'print "Loop finished"'
41 next move_becher_trans
42 jump SELF loop_move_if1_trans
43
44 ##### Ende der translatorischen Bewegung & starten neuer
    Rotationen & Übergang
45 #####Zeitschritte falls der Übergang Rot/Trans vor dem
    Delete-Befehl stattfindet
46 variable steps_calc3 equal
    ${steps_trans}+${steps_umlauf}-${becher_im_umlauf_floor})*${s
    teps_teilung} #Zeitschritte in Schleife 3 zwischen
    Rotationsstart eines BEchers und Delete-Befehl
47 variable steps_calc4 equal
    ${steps_umlauf}-${becher_in_rotation_floor}*${steps_teilung}-${
    steps_calc3} #Zeitschritte in Schleife 3 zwischen
    Delete-Befehl und Translationsstart
48 variable steps_calc5 equal
    ${steps_teilung}-${steps_calc3}+${steps_calc4})
    #Zeitschritte in Schleife 3 nach Translationsstart und vor
    dem neuen Start von Schleife3
49 variable vel2 equal
    ${rad_trommel1}/(${steps_calc4}*${timestep_calc})
    #Geschwindigkeit um Becher während calc4 in die Mitte
    zu Bewegen
```

LIGGGHTS-Quellcode

```
50
51 #####Zeitschritte falls der Übergang Rot/Trans nach dem
Delete-Befehl stattfindet
52 variable steps_calc6 equal
${steps_umlaufl}-(${becher_in_rotation_floor})*${steps_teilung}
#Zeitschritte in Schleife 3 zwischen Rotationsstart und
dem Translationsstart
53 variable steps_calc7 equal
${steps_trans}+${steps_umlaufl}-(${becher_im_umlaufl_floor})*${s
taps_teilung}-${steps_calc6} # Zeitschritte in
Schleife 3 zwischen Translationsstart und Delete-Befehl
54 variable steps_calc8 equal
${steps_teilung}-(${steps_calc6}+${steps_calc7})
#Zeitschritte in Schleife 3 nach Delete-Befehl und vor dem
neuen Start von Schleife3
55 variable vel3 equal
${rad_trommell1}/(${steps_calc8}*${timestep_calc})
56 variable delta2 equal
${steps_trans}+${steps_umlaufl}-(${becher_im_umlaufl_floor})*${s
taps_teilung}
57
58 variable end_loop3 equal
${becher_im_umlaufl_floor}+${becheranzahl} #Ende von Schleife
3 Berechnen [letzter Becher erreicht die Höhe von 2m]
59
60 ##Springen zu Version 2 der Schleife 3 falls erforderlich
[Version 2 Schleife 3 wird für die Untersuchung von
Schwerkraftbechern angewendet]
61 if "${steps_calc6} < ${delta2}" then &
62 'print "Jump to loop3_vers2"' &
63 "jump SELF loop_number3_vers2" &
64 else 'print "No jump necessary"'
65
66 #####Version
1 Schleife3
67 label loop_number3
68 variable loop3 loop ${becher_im_umlaufl_ceil} ${end_loop3}
69 variable delete_transz equal
${loop3}-(${becher_im_umlaufl_floor})
70
71
72 if "${loop3} <= ${becheranzahl}" then &
73 "dump dumpbecher${loop3} all mesh/gran/VTK 1000
${path}/becher${loop3}.dump*.vtk stress becher${loop3}" &
74 "dump_modify dumpbecher${loop3} pad 6" &
75 "fix move_rot${loop3} all move/mesh mesh
becher${loop3} rotate origin 0 0 0.5 axis 1 0 0 period
${period_becher}" &
76 'fix torque${loop3} all ave/time 20 5 100
f_becher${loop3}[1] f_becher${loop3}[2] f_becher${loop3}[3]
f_becher${loop3}[4] f_becher${loop3}[5] f_becher${loop3}[6]
file ${path}/data_becher${loop3}.csv title2 "step Fx Fy Fz
Mx My Mz"' &
77 else 'print "No more rotations to start"'
78
79 ##Masse messen
```

LIGGGHTS-Quellcode

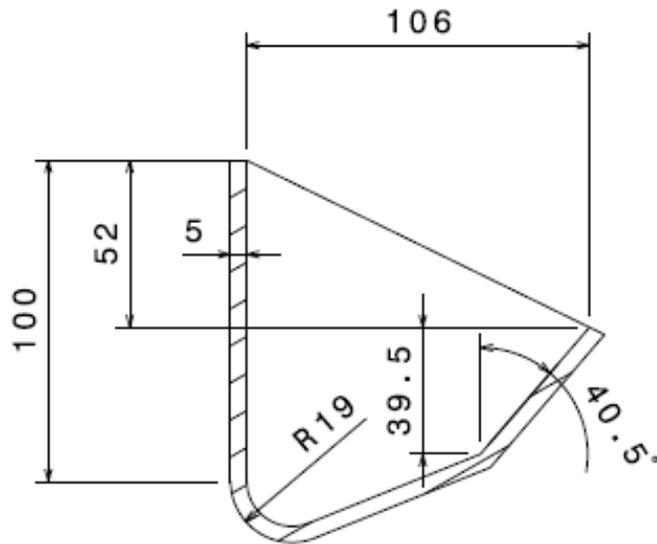
```
80 variable mass_count2 equal count(all,count)
81 variable mass_count3 equal mass(all,count)
82 fix extra_mass2 all print 100 "${st} ${delete_transz}
   ${mass_count2} ${mass_count3}" append ${path}/data_mass2.csv
   screen no title none
83
84 run ${steps_calc3}
85 delete_atoms region delete
86 undump dumpbecher${delete_transz}
87 unfix torque${delete_transz}
88 unfix move_trans${delete_transz}
89 #unfix becher${delete_transz}
90 fix move_trans_y${delete_transz} all move/mesh
   mesh becher${delete_transz} linear 0 ${vel2} 0
91 run ${steps_calc4}
92 unfix move_trans_y${delete_transz}
93
94 variable move_trans_loop3 equal
   ${save_move_trans}+${loop3}-${becher_im_umlauf_floor})
95 variable stop_insert equal ${move_trans_loop3}+1
96
97 if "${move_trans_loop3} <= ${becheranzahl}" then &
98 "unfix move_rot${move_trans_loop3}" &
99 "fix move_trans${move_trans_loop3} all move/mesh
   mesh becher${move_trans_loop3} linear 0 0 ${vel1}" &
100 elif "${move_trans_loop3} == ${stop_insert}" &
101 "unfix ins" &
102 else 'print "No more rotations to stop"'
103 run ${steps_calc5}
104
105 next loop3
106 jump SELF loop_number3
107
108 jump SELF end_sim
109
110 #####Version
   2 Schleife3
111 label loop_number3_vers2
112 variable loop3 loop ${becher_im_umlauf_ceil} ${end_loop3}
113 variable delete_transz equal
   ${loop3}-${becher_im_umlauf_floor})
114
115 if "${loop3} <= ${becheranzahl}" then &
116 "dump dumpbecher${loop3} all mesh/gran/VTK 1000
   ${path}/becher${loop3}.dump*.vtk stress becher${loop3}" &
117 "dump_modify dumpbecher${loop3} pad 6" &
118 "fix move_rot${loop3} all move/mesh mesh
   becher${loop3} rotate origin 0 0 0.5 axis 1 0 0 period
   ${period_becher}" &
119 'fix torque${loop3} all ave/time 20 5 100
   f_becher${loop3}[1] f_becher${loop3}[2] f_becher${loop3}[3]
   f_becher${loop3}[4] f_becher${loop3}[5] f_becher${loop3}[6]
   file ${path}/data_becher${loop3}.csv title2 "step Fx Fy Fz
   Mx My Mz"' &
120 else 'print "No more rotations to start"'
121
```

LIGGGHTS-Quellcode

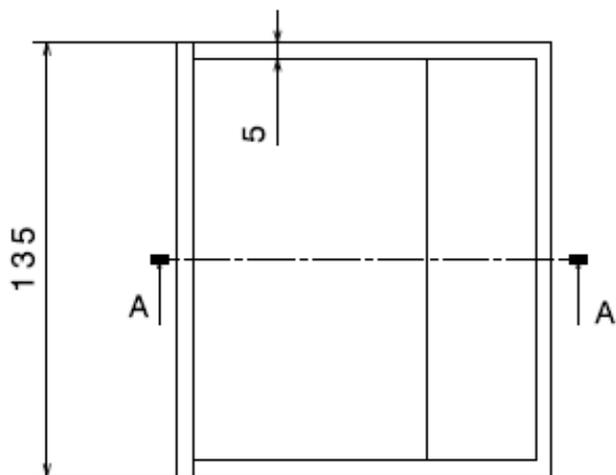
```
122 run ${steps_calc6}
123
124 variable move_trans_loop3 equal
    ${save_move_trans}+${loop3}-${becher_im_umlaufl_floer})
125 variable stop_insert equal ${move_trans_loop3}+1
126 if "${move_trans_loop3} <= ${becheranzahl}" then &
127 "unfix move_rot${move_trans_loop3}" &
128 "fix move_trans${move_trans_loop3} all move/mesh
    mesh becher${move_trans_loop3} linear 0 0 ${vel1}" &
129 elif "${move_trans_loop3} == ${stop_insert}" &
130 "unfix ins" &
131 else 'print "No more rotations to stop"'
132
133 run ${steps_calc7}
134 ##Masse messen
135 group count_mass_${delete_transz} region count
136 compute mass_becher_${delete_transz}
    count_mass_${delete_transz} property/atom mass
137 compute mass_out_${delete_transz}
    count_mass_${delete_transz} atome/molecule
    c_mass_becher_${delete_transz}
138 variable print1 equal c_mass_out_${delete_transz}
139 print "${print1}" append ${path}/data_mass2.csv
140
141 delete_atoms region delete
142 undump dumpbecher${delete_transz}
143 unfix torque${delete_transz}
144 unfix move_trans${delete_transz}
145 fix move_trans_y${delete_transz} all move/mesh
    mesh becher${delete_transz} linear 0 ${vel3} 0
146
147
148 run ${steps_calc8}
149 unfix move_trans_y${delete_transz}
150 #unfix extra_mass${delete_transz}
151 next loop3
152 jump SELF loop_number3_vers2
153 #####
154 label end_sim
155 run 500
156
```

B Technische Zeichnungen

B.1 Fliehkraftbecher

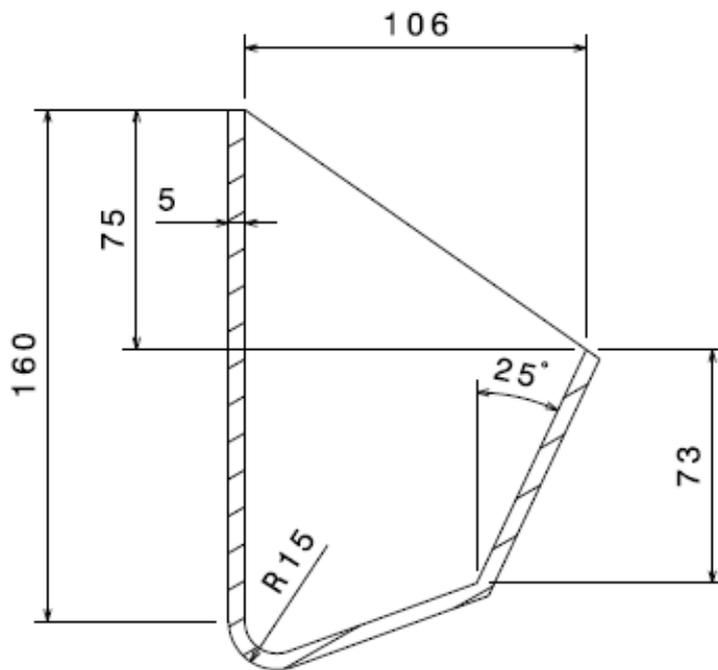


Schnittansicht A-A
Maßstab: 1:2

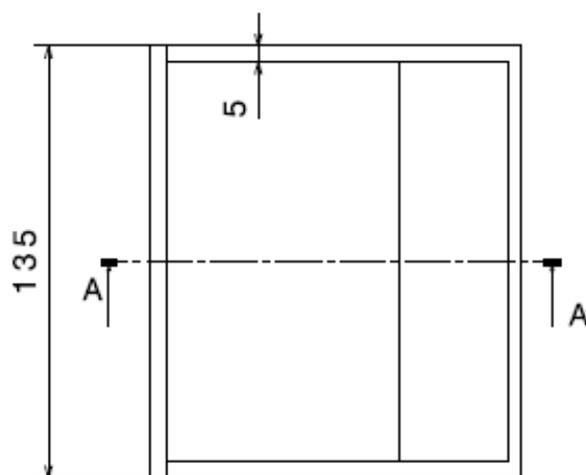


Draufsicht
Maßstab: 1:2

B.2 Schwerkraftbecher

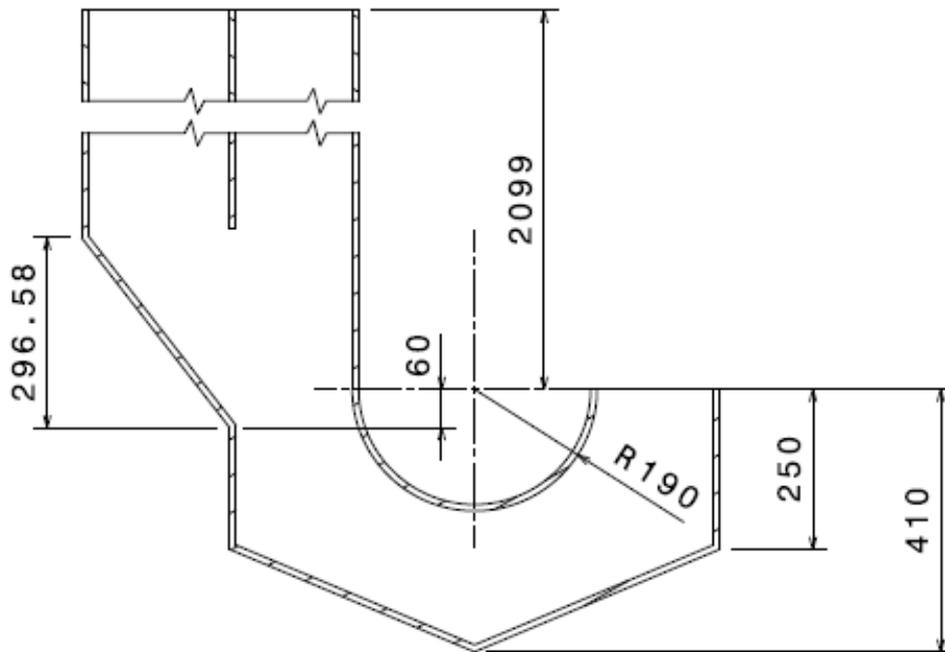


Schnittansicht A-A
Maßstab: 1:2

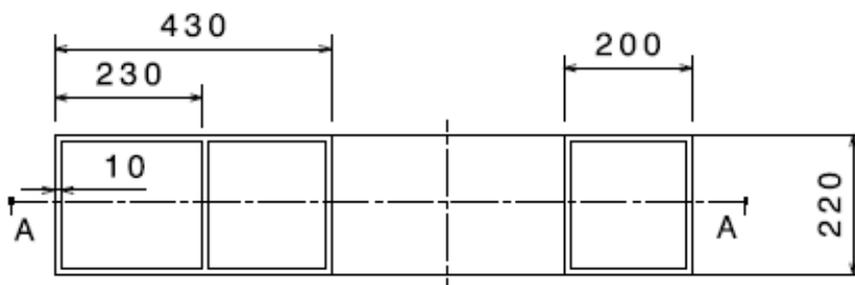


Vorderansicht
Maßstab: 1:2

B.3 Becherwerksfuß

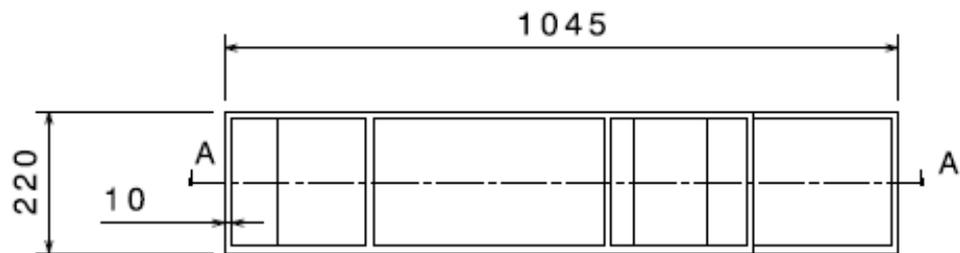


Schnittansicht A-A
Maßstab: 1:10

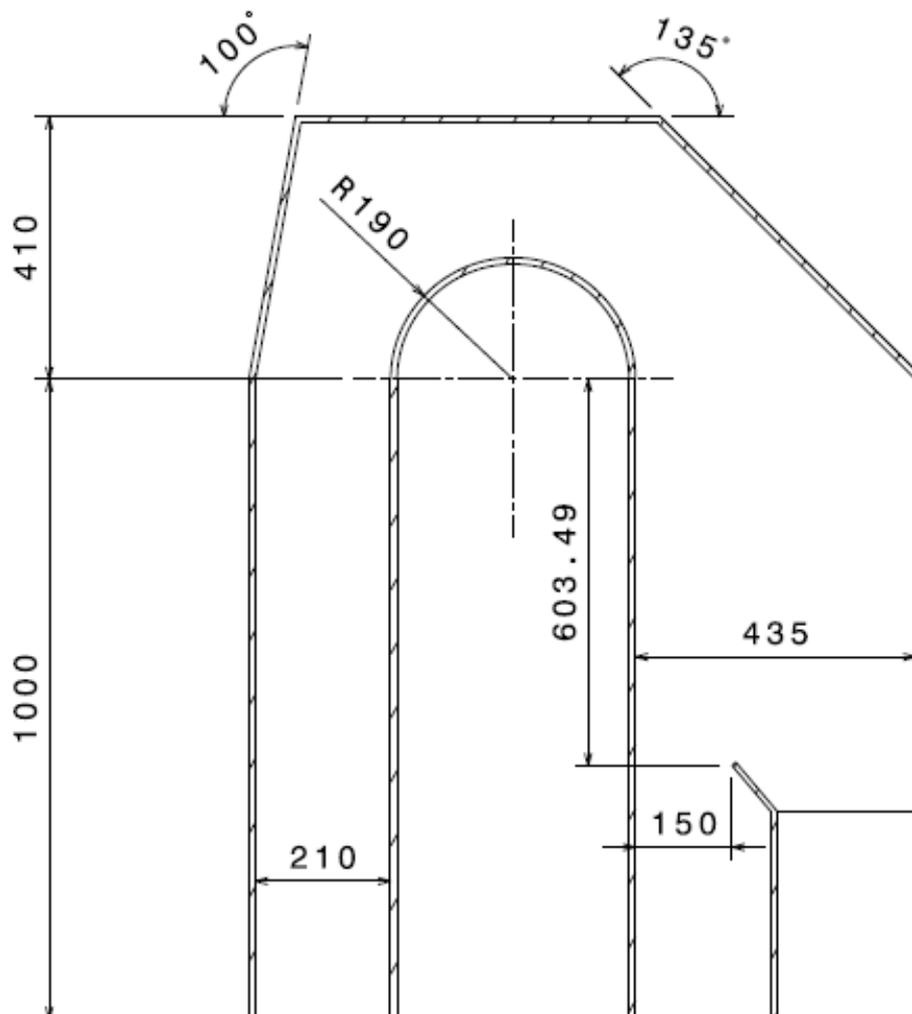


Vorderansicht
Maßstab: 1:10

B.4 Becherwerkskopf



Vorderansicht
Maßstab: 1:10



Schnittansicht A-A
Maßstab: 1:10