



Hochschule Anhalt

Anhalt University of Applied Sciences

Fachbereich Angewandte Biowissenschaften
und Prozesstechnik

Thema

**Experimentelle Untersuchungen verschiedener Stoffsysteme zur
Charakterisierung des Trennverhaltens eines nicht-konventionellen
Windsichters zur Getreidereinigung**

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

(B.Sc.)

von: Verena Gabriele Majocco
geboren am: 16.11.1989
Studiengang: Lebensmitteltechnologie

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Kleinschmidt
Prof. Dr. Christof Hamel

Köthen: 26.01.2015

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig und unter Anleitung des angegebenen Betreuers verfasst wurde, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen oder beschriebenen Software, verwendet wurden. Die vorliegende Arbeit ist weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht und stimmt mit dem elektronischen Exemplar überein.

Ort, Datum, Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Arbeit zur Erlangung des Bachelor of Science Lebensmitteltechnologie entstand im Jahr 2014 am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Kleinschmidt für die Betretung meiner Bachelorarbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Piesche für die Überlassung des Themas und die freundliche Aufnahme am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik. Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Sebastian Hiel, für seine hilfreichen Anregungen, seine Geduld und sein außerordentliches Engagement. An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meinen Eltern für Ihre Unterstützung während des Studiums und im Besonderen bei dieser Arbeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Formelverzeichnis	IV
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Kennzeichnung von Einzelpartikeln.....	3
2.1.1 Bestimmung der Partikelgröße	3
2.1.2 Widerstandsverhalten	4
2.2 Disperse Stoffsysteme	6
2.2.1 Partikelgrößenverteilung	7
2.2.2 Feststoffschüttung.....	8
2.2.3 Fließbetteigenschaften.....	9
2.3 Trennprozess	10
3 Stoffsysteme	13
3.1 Natürliches Stoffsystem.....	13
3.2 Modellpartikel	14
3.3 Partikelform.....	17
3.4 Partikelgrößenverteilung	20
3.5 Feststoffdichte	21
3.6 Aerodynamische Eigenschaften	24
3.6.1 Versuchsstand.....	24
3.6.2 Schwebekennlinien.....	25
3.6.3 Einfluss der Beladung.....	29
3.6.4 Einfluss der Zusammensetzung	30
3.7 Zusammenfassung der Messergebnisse.....	31
4 Stand der Technik	33
4.1 Standard Vorreiniger WR20.....	33
4.2 Bisherige Untersuchungen.....	33
5 Trennapparat und Prüfstand	36
5.1 Windsichter nicht-konventioneller Bauart	36
5.2 Versuchsdurchführung am Versuchsstand	39
6 Ergebnisse der Trennversuche.....	42

6.1	Einfluss des Bruchkornanteils auf den Abscheidegrad	43
6.2	Einfluss des Sekundärvolumenstroms auf den Abscheidegrad	45
6.3	Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad	50
6.4	Trenngrad	52
7	Zusammenfassung und Ausblick	54
	Literaturverzeichnis	56

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Statistische Länge (3 S. 13).....	3
Abb. 2: Sinkgeschwindigkeit im Schwerfeld	5
Abb. 3: Darstellung der Verteilungssumme (a) und Verteilungsdichte (b) (3 S. 28).....	8
Abb. 4: Feststoffschüttung	9
Abb. 5: Druckverlust eines durchströmten Fließbetts (6).....	10
Abb. 6: Grafische Darstellung der Fraktionsbilanz (3 S. 267)	11
Abb. 7: Trenngradkurve (3 S. 267)	11
Abb. 8: Natürliches Stoffsystem.....	14
Abb. 9: Modellpartikel P17	15
Abb. 10: Modellpartikel P18	15
Abb. 11: Modellpartikel P1	15
Abb. 12: Modellpartikel P2.....	15
Abb. 13: Modellpartikel P3.....	16
Abb. 14: Modellpartikel P4.....	16
Abb. 15: Modellpartikel P15	16
Abb. 16: Modellpartikel P16	16
Abb. 17: Modellpartikel P5	17
Abb. 18: Modellpartikel P13	17
Abb. 19: Modellpartikel P6.....	17
Abb. 20: Modellpartikel P8.....	17
Abb. 21: Modellpartikel P17	18
Abb. 22: Modellpartikel P2.....	18
Abb. 23: Mikroskopiebilder von P6.....	18
Abb. 24: Modellpartikel P18	18
Abb. 25: Mikroskopiebild von P5	18
Abb. 26: Mikroskopiebild von P13	18
Abb. 27: Bruchkorn.....	19
Abb. 28: Modellpartikel P2.....	19
Abb. 29: Siebanalysen der Bims-Modellpartikel	20
Abb. 30: Siebanalysen der Aluminium-, Keramik-, Kunststoff-Modellpartikel	21
Abb. 31: Fließbild des Gaspyknometers	22
Abb. 32: Aufbau des Schwebekennlinienprüfstandes mit Versuchsbehälter (a), Steigrohr (b), Zyklon (c), Auffangbehälter (d), Messdüse (e), Ventilator (f)	24
Abb. 33: Schwebekennlinien des natürlichen Partikelsystems	26
Abb. 34: Schwebekennlinien Bims-Modellpartikel im Vergleich zum Bruchkorn	27
Abb. 35: Schwebekennlinien der Modellpartikel im Vergleich zu den natürlichen Partikeln	28

Abb. 36: Schwebekennlinien des 3-Modellpartikel-System im Vergleich zum natürlichen Partikelsystem	29
Abb. 37: Einfluss der Zusammensetzung auf die Schwebekennlinien.....	31
Abb. 38: Natürliche Partikel.....	31
Abb. 39: 3-Modellpartikel-System.....	31
Abb. 40: Standard Vorreiniger WR20 der Firma Schmelzer	33
Abb. 41: Zick-Zack-Sichter mit Verteilerscheibe (9 S. 40)	34
Abb. 42: Darstellung eines Zick-Zack-Windsichters mit Guteinlass (a) und Innenkonus (b) (8 S. 14)	35
Abb. 43: Windsichter-Fließbett-Reiniger mit Gutzulaufrohr (a); Außenrohr (b); Trennzonenbegrenzung (c); Fließbettkegel (d); obere Fließbettberandung (e); Auffangtrichter (f); Fließbettteilung (g) (8 S. 19)	37
Abb. 44: Schematische Darstellung des Windsichter-Fließbett-Reinigers (8 S. 18).....	38
Abb. 45: Versuchstand im IMVT.....	39
Abb. 46: Skizze des Prüfstandes (vgl. (10)).....	40
Abb. 47: Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel	43
Abb. 48: Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel....	45
Abb. 49: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel .	46
Abb. 50: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel .	47
Abb. 51: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Bruchkorn-Modellpartikel	48
Abb. 52: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel	49
Abb. 53: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel	49
Abb. 54: Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel	50
Abb. 55: Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel	51
Abb. 56: Trenngrad der Bruchkorn-Modellpartikel	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Statistische Länge (3 S. 13).....	4
Tabelle 2: Definitionen des Äquivalentdurchmessers (2 S. 18)	4
Tabelle 3: Indizierung der Mengenangabe (3 S. 29)	8
Tabelle 4: Partikelbezeichnung	14
Tabelle 5: Feretdurchmesser der Partikel	19
Tabelle 6: Feststoffdichten der Weizenpartikel.....	23
Tabelle 7: Feststoffdichten der Modellpartikel	23
Tabelle 8: Schwebegeschwindigkeit des natürlichen Partikelsystems	26
Tabelle 9: Zusammensetzung der Mischung.....	30
Tabelle 10: Zusammenfassung der Modellpartikel	32
Tabelle 11: Massenanteile des Labor- und Feldversuchs	35
Tabelle 12: Versuchsparameter	38
Tabelle 13: Versuchsreihen	42
Tabelle 14: Versuchsparameter	42
Tabelle 15: Versuchsparameter der Trenngradbestimmung.....	52
Tabelle 16: Grenzkorndurchmesser.....	53

Formelverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
C	-	Durchflusskoeffizient
c _w	-	Widerstandsbeiwert
d	m	Düsendurchmesser
d _p	µm	Partikeldurchmesser
D	m	Rohrinnendurchmesser
f	-	Massenanteil des Feinguts
F	N	Kraft
g	-	Massenanteil des Grobguts
h	m	Höhe, Länge
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massestrom
M	m ²	Mantelfläche
p	Pa	Druck
q	-	Verteilungsdichte
Q	-	Verteilungssumme
r	m	Radius
Re	-	Reynoldszahl
T	-	Trenngrad
t	s	Zeit
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
w	m/s	Geschwindigkeit
X	-	Massenanteil
x	µm	Durchmesser

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
β	-	Durchmesser Verhältnis
ε	-	Porosität
η	-	Abscheidegrad
ϑ	m/s	rel. Geschwindigkeit
κ	-	Trennschärfe
μ	-	Beladung
ρ	kg/m ³	Dichte
ψ	-	Sphärizität

Konstanten

Symbol	Wert	Einheit	Bedeutung
g	9,81	m/s ²	Erdbeschleunigung
R _{S, Luft}	278	J/kg K	spezifische Gaskonstante der Luft

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
IMVT	Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
MP	Modellpartikel
NKB	Nichtkornbestandteile

Indizes

Symbol	Bedeutung
25	Wert bei 25%
50	Wert bei 50%
75	Wert bei 75%
A	Aufgabegut
Br	Bruchkorn
Exp.	Expansionszelle
f	Fluid
F	Feingut
G	Grobgut
H	Hohlraum
K	Korn
L	Luft
Max	Maximum
Min	Minimum
N	Newton
P	Partikel
Pr	Probe
Pri	Primär
rel.	Relativ
s	Sinkgeschwindigkeit
S	Stoke
sch	Schwebegeschwindigkeit
Sek	Sekundär
Sp	Spelzen
V	Volumen
Wa	Wadell
Zell	Zelle

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Getreide ist weltweit einer der wichtigsten Rohstoffe für die Nahrungs- und Futtermittelindustrie und bei der Verarbeitung gelten differenzierte Hygieneverordnungen und höchste Qualitätsansprüche. Laut Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft wurden 2013 mehr als 43 Millionen Tonnen Getreide geerntet. Um trotz der enormen Mengen die hygienischen Anforderungen an das Lebensmittel zu erfüllen, gilt die Basisverordnung des EU-Rechts. Die nationalen Hygienevorschriften des Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuchs (LFBG) ergänzen das EU-Recht; sie enthalten Ordnungs- und Strafvorschriften. Der Erzeuger des Getreides ist für die Umsetzung dieser Verordnungen zur Sicherung der hygienischen Unbedenklichkeit und der Qualität verantwortlich. Das Getreide durchläuft daher mehrere Reinigungsstufen von der Ernte bis zum Verkauf oder bis zur Weiterverarbeitung.

Die erste Vorreinigung findet durch das Dreschen während der Ernte im Mähdrescher statt. Durch das Dreschen mit Metallwalzen werden Korn und Spelzen vom Strohalm getrennt und fallen auf Schwing- und Wurfsiebe, während das Stroh durch Förderwalzen zurück auf das Feld gefördert wird. Die Schwing- und Wurfsiebe fördern das Korn in einen Auffangbehälter. Um nicht auch Verunreinigungen wie Staub, Spelzen oder Insekten in den Auffangbehälter zu fördern, wird vor den Sieben ein Gebläse angebracht, das die leichten Nichtkornbestandteile (NKB) abtrennt. Trotz der Vorreinigung sind 1-2 % des Korns (1 S. 1) durch Nichtkornbestandteile (NKB) verunreinigt.

Nichtkornbestandteile (NKB) setzen sich zusammen aus Bruchkorn, Insekten, Kies, Schmachtkorn, Spelzen, Staub und Stroh. Durch die deutlichen Unterschiede von Dichte, Form und Größe der Partikel ist die Trennung ausschließlich durch Siebe unzureichend. Daher werden Windsichter eingesetzt, die die Partikel nach ihren aerodynamischen Eigenschaften trennen. Die aerodynamischen Eigenschaften wie die Schweb- oder Sinkgeschwindigkeit (Kapitel 2.1.2) werden durch die Dichte und Größe der Partikel beeinflusst. Werden die Nichtkornbestandteile (NKB) nicht oder nur in geringen Mengen vom Korn getrennt, gelangen diese ins Getreidelager und verringern die Lagerfähigkeit deutlich. Durch die erhöhte Packungsdichte (Kapitel 2.2.2) ist die Belüftung nur eingeschränkt möglich, weshalb die Feuchtigkeit zunimmt und vermehrt Schimmel- und Pilzbefall entsteht oder einen erhöhten Energiebedarf benötigt. Die Bruchkörner ziehen zusätzlich zur Feuchtigkeit auch Schädlinge an, deshalb ist eine möglichst hohe Abscheidung der Nichtkornbestandteile (NKB) zwingend erforderlich.

Der Abscheidegrad η der Windsichter konventioneller Bauart liegt für Masseströme von 10-20 t/h im optimalen Bereich. Da sich die Erntemenge allein in den letzten 10 Jahren um 8 % erhöht hat, ist eine zuverlässige Auslegung der Windsichter im Bereich zwischen 40-150 t/h notwendig. Durch ein Scale-up des Windsichters konventioneller Bauart verschlechtert sich jedoch der Abscheidegrad η .

Durch die experimentellen Versuche an einem weiterentwickelten, modifizierten Windsichter konventioneller Bauart (Kapitel 4.2) wurde eine weitere Einflussgröße ermittelt, die zur Verringerung der Trennleistung führt. Eine signifikante Verringerung der Trennleistung des modifizierten Windsichters wurde vor allem durch die Erhöhung des Bruchkornanteils verursacht.

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung des Windsichters nicht-konventioneller Bauart (Kapitel 5) zu ermitteln. Die experimentellen Untersuchungen am Windsichter nicht-konventioneller Bauart werden mit einem 3-Modellpartikel-System durchgeführt, um aufgrund der idealen und konstanten Partikeleigenschaften reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Das bisherige Modellpartikel-System besteht aus einem 2-Modellpartikel-System, das die gleichen aerodynamischen Eigenschaften wie das Getreidekorn und die leichten Nichtkornbestandteile wie die Spelzen hat.

Um den Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung zu untersuchen, müssen Modellpartikel mit den gleichen aerodynamischen Eigenschaften gefunden werden. Dazu wurden die Dichte, die Größenverteilung, der Äquivalentdurchmesser und die aerodynamischen Eigenschaften von 10 Modellpartikeln aus unterschiedlichen Materialien experimentell untersucht (Kapitel 3).

Mit dem 3-Modellpartikel-System wurde anschließend in experimentellen Versuchen das Trennverhalten des Windsichters nicht-konventioneller Bauart bestimmt. Die Experimente wurden mit drei verschiedenen Zusammensetzungen der Modellpartikel durchgeführt. Dabei blieben die Massenanteile der Spelzen-Modellpartikel konstant, während der Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel und der Korn-Modellpartikel variiert wurden. Ziel ist es zu ermitteln, welchen Einfluss der Massenanteil des Bruchkorns auf die Trennleistung hat. Des Weiteren sollen mögliche Unterschiede in den Ergebnissen der 2- und 3-Modellpartikel-Systeme untersucht werden.

Um die Trennleistung durch den Einfluss des Sekundärvolumenstroms zu optimieren, wurden Versuche mit einer geänderten Geometrie des nicht-konventionellen Windsichters durchgeführt (Kapitel 5). Nach Änderung der Geometrie wurde deren Einfluss auf die Trennleistung zwischen dem neu entwickelten 3-Modellpartikel-System und dem bisherigen 2-Modellpartikel-System untersucht.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird auf die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit eingegangen. Dabei wird die Bestimmung der Partikelgröße und das Widerstandsverhalten des einzelnen Partikels im Gasstrom erläutert, das disperse Partikelsystem charakterisiert und der Trennprozess näher beschrieben.

2.1 Kennzeichnung von Einzelpartikeln

Zum näheren Verständnis von dispersen Stoffsystemen und Trennprozessen werden in diesem Kapitel die Eigenschaften und die Merkmale des einzelnen Partikels aufgezeigt. „Die beiden wichtigsten Unterscheidungsmerkmale in der mechanischen Verfahrenstechnik sind die Größe sowie die Form des Partikels“ (2 S. 5). Sowohl die Größe als auch die Form haben Einfluss auf die Schütt- und Fließeigenschaften der Partikel. Mittels dieser Merkmale werden die Porosität und die räumliche Verteilung der Partikel im dispersen System berechnet.

2.1.1 Bestimmung der Partikelgröße

Bei regelmäßiger Partikelform können die geometrischen Maße durch Messungen der Länge oder des Durchmessers bestimmt werden. Da die Partikelform in der Praxis häufig unregelmäßig ist, müssen andere Methoden zur Bestimmung der Partikelgröße verwendet werden.

Eine Möglichkeit, die hauptsächlich bei Bildauswertungsverfahren angewendet wird, ist die Bestimmung der statistischen Länge. Da die Partikel z.B. bei Mikroskopiebildern in der Regel zufällig verteilt liegen, wird eine Messrichtung festgelegt.

In Abbildung 1 und Tabelle 1 sind drei statistische Längen in Bezug auf die Messrichtung aufgeführt:

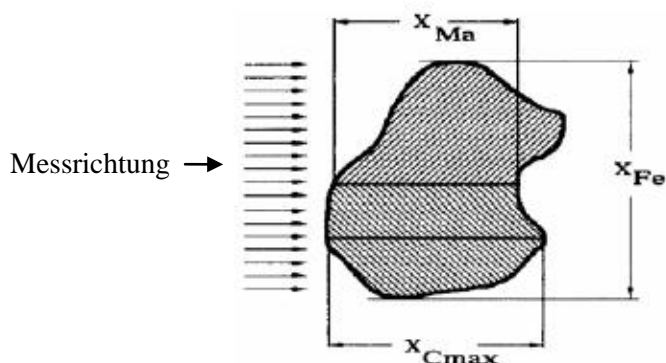


Abb. 1: Statistische Länge (3 S. 13)

Tabelle 1: Statistische Länge (3 S. 13)

- x_{Fe} : Feret-Durchmesser: Die Länge des Partikels wird senkrecht zur Messrichtung bestimmt.
- x_{Ma} : Martin-Durchmesser: Die Breite des Partikels wird bei der Hälfte des Feret-Durchmessers gemessen.
- x_{Cmax} : Die breiteste Stelle des Partikels wird parallel zur Messrichtung bestimmt.

Um das Widerstandsverhalten eines Partikels im Gasstrom vereinfacht berechnen zu können, nimmt man an, dass das Partikel kugelförmig ist. Man verwendet Eigenschaften wie das Volumen, die Oberfläche, die Projektionsfläche oder den Umfang des unregelmäßigen Partikels, um den Äquivalentdurchmesser zu berechnen (Tabelle 2). Der Äquivalentdurchmesser ist der Durchmesser der Kugel oder des Kreises mit den gleichen Eigenschaften wie das unregelmäßige Partikel. (2 S. 16)

Tabelle 2: Definitionen des Äquivalentdurchmessers (2 S. 18)

d_v :	Durchmesser der volumengleichen Kugel	$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$	(2.1)
d_s :	Durchmesser der oberflächengleichen Kugel	$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$	(2.2)
d_p :	Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises	$d_p = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}}$	(2.3)
d_{pe} :	Durchmesser des umfangsgleichen Kreises von einem Partikelbild, wobei die Partikel sich wieder in mittlerer oder stabiler Lage befinden können.	$d_{pe} = \frac{U}{\pi}$	(2.4)

2.1.2 Widerstandsverhalten

Um das Verhalten einer Festbetschüttung im Gasstrom (s. Kapitel 2.2.3) und später die Trennung im Windsichter nicht-konventioneller Bauart (s. Kapitel 6) besser nachvollziehen zu können, betrachtet man das Strömungsverhalten eines Feststoffpartikels im umgebenden Fluid, in diesem Fall in Gas. Durch die im Gasstrom wirkenden Kräfte sinkt der Feststoffpartikel nach unten oder beginnt zu schweben. Die Sink w_s - oder Schwebegeschwindigkeit w_{schw} des Feststoffpartikels ist über die Relativgeschwindigkeit v_{rel} definiert. Diese ergibt sich aus der Differenz der Fluidgeschwindigkeit v_f und der Partikelgeschwindigkeit v_p .

$$v_{rel} = v_f - v_p \quad (2.5)$$

Wie in Abb. 2 grafisch dargestellt wirken im Gasstrom die statische Auftriebskraft F_A , die Gewichtskraft F_G und die Widerstandskraft F_W auf den Feststoffpartikel. Ist die Fluidgeschwindigkeit v_f Null, wirkt hauptsächlich die Gewichtskraft F_G , weshalb der Feststoffpartikel nach unten fällt. Die Geschwindigkeit des fallenden Feststoffpartikels wird als Sinkgeschwindigkeit w_s bezeichnet. Ist die Fluidgeschwindigkeit v_f größer als Null, nimmt die Widerstandskraft F_W bedingt durch die Relativgeschwindigkeit v_{rel} zu und bremst den Feststoffpartikel ab, bis dieser schwebt. In diesem Zustand sind die Fluidgeschwindigkeit v_f und die Relativgeschwindigkeit v_{rel} gleich; die Fluidgeschwindigkeit v_f wird als Schwebegeschwindigkeit w_{sch} bezeichnet. Die Auftriebskraft F_A , die Gewichtskraft F_G und die Widerstandskraft F_W bilden bei den oben genannten Betrachtungen ein Kräftegleichgewicht.

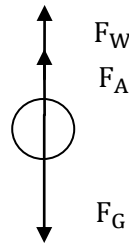


Abb. 2: Sinkgeschwindigkeit im Schwerfeld

Das Kräftegleichgewicht lässt sich durch folgende Formel beschreiben:

$$F_G = F_W + F_A \quad (2.6)$$

$$F_W = F_G - F_A \quad (2.7)$$

Für kugelförmige Partikel mit $v_f = 0$ gilt:

$$F_G = m_p * g = \rho_p * g * \frac{6}{\pi} d_p^3 \quad (2.8)$$

$$F_A = \rho_f * V_p * g \quad (2.9)$$

$$F_W = \frac{\rho_f}{2} * w_s^2 * \frac{\pi}{4} d_p^2 * c_W(Re_d) \quad (2.10)$$

Setzt man die Gleichungen (2.8) bis (2.10) in Gleichung (2.6) ein, gilt:

$$\frac{\rho_f}{2} * w_s^2 * \frac{\pi}{4} d_p^2 * c_W(Re_d) = (\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi}{6} d_p^3 * g \quad (2.11)$$

Stellt man die Gleichung (2.11) nach der Sinkgeschwindigkeit w_s um, erhält man den allgemeinen Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit w_s einer Kugel und dem Durchmesser d_p (2 S. 12).

$$w_s^2 = \frac{4}{3} * \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} * \frac{g * d_p}{c_w(Re_d)} \quad (2.12)$$

$$Re_d = \frac{w_s * \rho_f * d_p}{\eta} \quad (2.13)$$

Der c_w -Wert ist abhängig von der Reynoldszahl, die man in drei Bereiche der Partikelumströmung einteilen kann:

Stokes-Bereich	$Re \leq 0,5$	$c_w = \frac{24}{Re}$	(2.14)
----------------	---------------	-----------------------	---------

Übergangsbereich	$0,5 \leq Re \leq 10^3$	$c_w = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4$	(2.15)
------------------	-------------------------	---	---------

Newton-Bereich	$10^3 \leq Re \leq Re_{krit}$	$c_w = 0,44$	(2.16)
----------------	-------------------------------	--------------	---------

Der Stokes'sche Bereich wird bei geringen Sinkgeschwindigkeiten angewendet, bei denen die Strömung laminar ist.

$$w_{sst} = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{18\eta} * g * d_p^2 \quad (2.17)$$

Im Newton'schen-Bereich ist die Strömung turbulent, daher gilt die Gleichung (2.18).

$$w_{sN} = 1,74 * \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} * g * d_p} \quad (2.18)$$

Da der c_w -Wert neben der Reynoldszahl auch von der Partikelform abhängt, wird diese durch die Sphärizität nach Wadell definiert. Dabei wird der Durchmesser der volumengleichen Kugel d_v durch den Durchmesser der oberflächengleichen Kugel d_s dividiert.

$$\psi_{WA}^2 = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (2.19)$$

Ist der Feststoffpartikel eine Kugel, gilt $\psi_{WA} = 1$, andernfalls ist $\psi_{WA}^2 < 1$. Je kleiner der ψ_{WA} desto größer ist der c_w -Wert und damit die Widerstandskraft F_W und die Sinkgeschwindigkeit w_s .

2.2 Disperse Stoffsysteme

Disperse Stoffsysteme setzen sich aus einer kontinuierlichen und einer dispersen Phase zusammen. Bei der Windsichtung umströmt die aus Luft bestehende kontinuierliche Phase die Feststoffpartikel,

um diese voneinander trennen zu können. Die disperse Phase besteht aus Feststoffpartikeln. Im realen Stoffsystem sind die Feststoffpartikel Getreidekörner, die bei den experimentellen Untersuchungen im Windsichter nicht-konventioneller Bauart durch unterschiedliche Modellpartikel ersetzt werden. Die kontinuierliche Phase setzt sich aus zwei Volumenströmen zusammen, die durch zwei Ventilatoren aus der Umgebungsluft erzeugt werden. Um die Eigenschaften der dispersen Phase charakterisieren zu können, werden nachfolgend einige Grundbegriffe näher erläutert.

2.2.1 Partikelgrößenverteilung

Die Feststoffpartikel sind sowohl im realen als auch im Modellpartikel- System nicht monodispers und werden deshalb durch die Partikelgrößenverteilung näher beschrieben. Dabei wird der Mengenanteil an Feststoffpartikeln mit einer bestimmten Dispersitätsgröße x_i z.B. des Partikeläquivalentdurchmessers einer volumengleichen Kugel auf die Gesamtmenge des dispersen Systems bezogen. Dieses Verhältnis wird durch die Verteilungssumme $Q_r(x_i)$ beschrieben. Die Verteilungsdichte $q_r(x_i)$ beschreibt das Verhältnis zwischen einer Teilmenge einer Fraktion bezogen auf die Klassen- bzw. Fraktionsbreite Δx_i und gibt die Wahrscheinlichkeit einer Dispersitätsgröße der Feststoffpartikel an.

$$Q_r(x_i) = \frac{\text{Teilmenge } x_{\min} \text{ bis } x_i}{\text{Gesamtmenge } x_{\min} \text{ bis } x_{\max}} \quad (2.20)$$

$$q_r(x_i) = \frac{\text{Teilmenge } x_{i-1} \text{ bis } x_i}{\text{Gesamtmenge } x_{\min} \text{ bis } x_{\max} * \text{Intervallbreite } x_{i-1} \text{ bis } x_i} \quad (2.21)$$

$$q_r(x_i) = \frac{(\text{Mengen -})\text{Anteil der Fraktion } i}{\text{Klassenbreite } \Delta x_i} \quad (2.22)$$

Es besteht der Zusammenhang:

$$q_r(x_i) = \frac{dQ_r}{dx} \quad (2.23)$$

der in Abbildung 1 graphisch veranschaulicht wird.

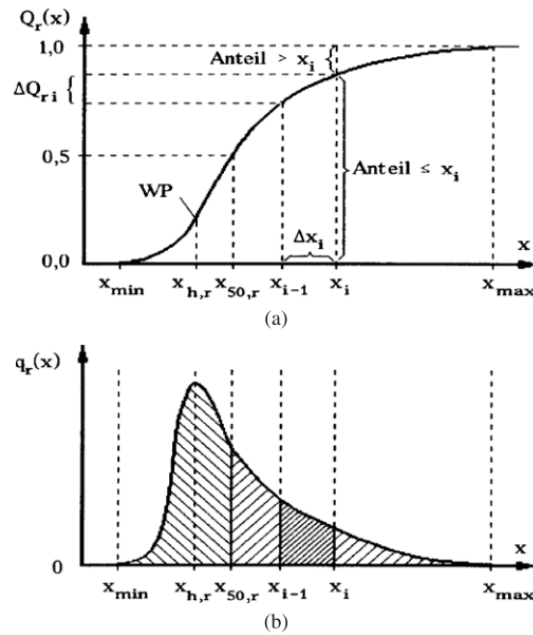


Abb. 3: Darstellung der Verteilungssumme (a) und Verteilungsdichte (b) (3 S. 28)

Für die Partikelgröße wird die Variable x verwendet, der Index r gibt die Mengenart an, die in der nachfolgenden Tabelle näher bezeichnet ist.

Tabelle 3: Indizierung der Mengenart (3 S. 29)

Index	Mengenart
$r = 0$	Anzahl
$r = 1$	Länge
$r = 2$	Fläche
$r = 3$	Volumen/Gewicht

2.2.2 Feststoffschüttung

Eine Feststoffschüttung bzw. Packung ist eine Form des dispersen Systems, bei der Hohlräume zwischen den Feststoffpartikeln sind. Die zwei wichtigsten Größen zur Beschreibung einer Feststoffschüttung sind die Porosität ε und die Schüttdichte ρ_{Sch} , da diese Größen die Durchströmungseigenschaften einer Feststoffschüttung bestimmen (s. Kapitel 2.2.3).

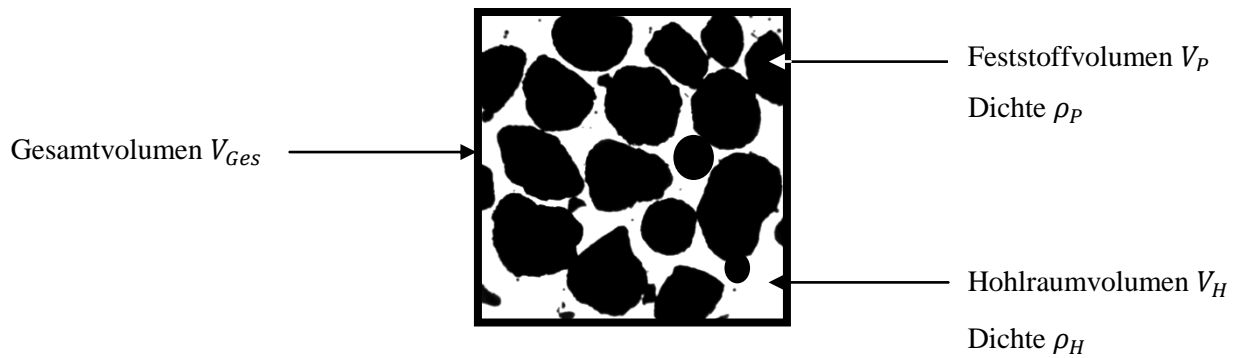


Abb. 4: Feststoffschüttung

Die Porosität ε gibt den Hohlraumanteil der Feststoffschüttung an.

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V_{Ges}} = 1 - \frac{V_P}{V_{Ges}} \quad (2.24)$$

Die Schüttdichte gibt den Feststoffanteil der Feststoffschüttung an.

$$\rho_{Sch} = \frac{m_P}{V_{Ges}} = \rho_P * (1 - \varepsilon) + \rho_f * \varepsilon \quad (2.25)$$

2.2.3 Fließbetteigenschaften

Als Fließbett oder Wirbelschicht bezeichnet man eine Feststoffschüttung, die durch einen gleichmäßigen Luftvolumenstrom von unten aufgelockert bzw. fluidisiert wird. Dabei verhält sich das disperse Feststoffsystem aus strömungsmechanischer und thermodynamischer Sicht wie eine Flüssigkeit (4). Zur Charakterisierung der Wirbelschicht bestimmt man den Druckverlust, die Strömungsgeschwindigkeit und das Expansionsverhalten (5).

Der Luftvolumenstrom strömt mit der Fluidgeschwindigkeit v_f die Feststoffschüttung an, dabei steigt der Druckverlust Δp stetig an, während die Porosität ε der Feststoffschüttung konstant bei ε_0 bleibt (Bereich I Abb. 5). ε_0 ist die Porosität der ruhenden Schüttung, wenn diese nicht von einem Fluid durchströmt wird. Mit stetiger Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit steigt auch der Druckverlust bis der Lockerungspunkt erreicht wird. An diesem Punkt ist die Feststoffschüttung fluidisiert und die Wirbelschicht bildet sich aus. In der Wirbelschicht bleibt der Druckverlust des Lockerungspunkts Δp_{Lo} konstant. Durch die steigende Luftgeschwindigkeit verringert sich der Luftwiderstand bei konstantem Druckverlust und die Porosität ε wird größer ε_0 (Bereich II Abb. 5). Mit steigender Porosität ε , erhöhen sich auch die Partikel-Partikel Wechselwirkungen. Erreicht die Porosität ε den Wert $> 0,9$ und geht gegen 1, hat die pneumatische Förderung durch die Strömungsgeschwindigkeit $v > v_F$ eingesetzt (Bereich III Abb. 5) und die Partikel werden ausgetragen. Durch den erhöhten

Hohlraumanteil und den stetigen Luftvolumenstrom findet in der Wirbelschicht eine Entmischung statt. Die leichten Feststoffpartikel steigen nach oben, während die schweren nach unten fallen.

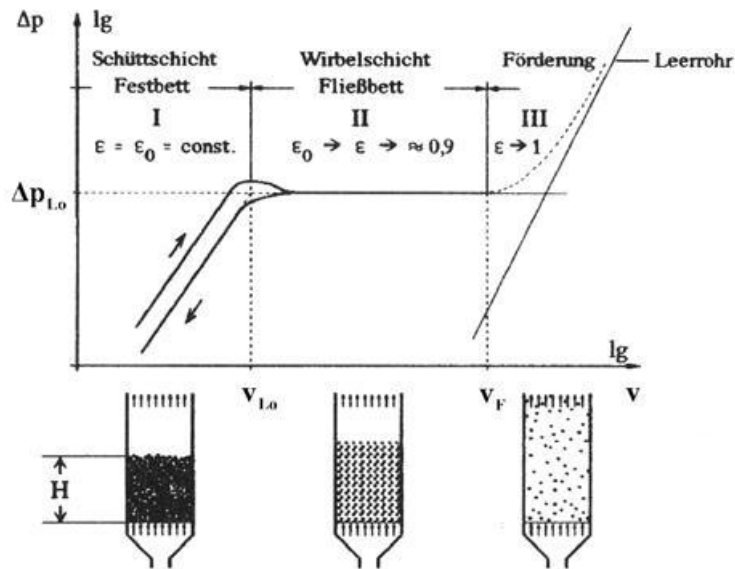


Abb. 5: Druckverlust eines durchströmten Fließbetts (6)

2.3 Trennprozess

Mit der Entmischung des Aufgabeguts m_A in der Wirbelschicht erfolgt die Trennung durch den Luftvolumenstrom in Grobgut m_G und Feingut m_F . Ziel ist es, möglichst genau nach einer Dispersitätsgröße z.B. dem Partikeläquivalentdurchmesser zu trennen. Der Feststoffpartikel mit der gesuchten Dispersitätsgröße x_i wird als Trennkorn x_t bezeichnet. Bei einer idealen Trennung sind alle Feststoffpartikel, die größer sind als das Trennkorn, im Grobgut $x_i > x_t$ und diejenigen, die kleiner sind als das Trennkorn, im Feingut $x_i < x_t$.

Für den Trennprozess gilt die Gesamtbilanz:

$$m_A = m_G + m_F \quad (2.26)$$

$$g = \frac{m_G}{m_A} \quad (2.27)$$

$$f = \frac{m_F}{m_A} \quad (2.28)$$

Beim idealen Trennprozess gibt es im Grobgut m_G und im Feingut m_F keine gemeinsamen Korngrößen (2 S. 279). Alle Feststoffpartikel des Grobguts sind größer als x_t und alle Feingutpartikel

kleiner als x_t . In realen Trennprozessen ist dies nicht möglich, daher sind im Grobgut Feststoffpartikel, die kleiner als x_t sind, und im Feingut Feststoffpartikel, die größer als x_t sind.

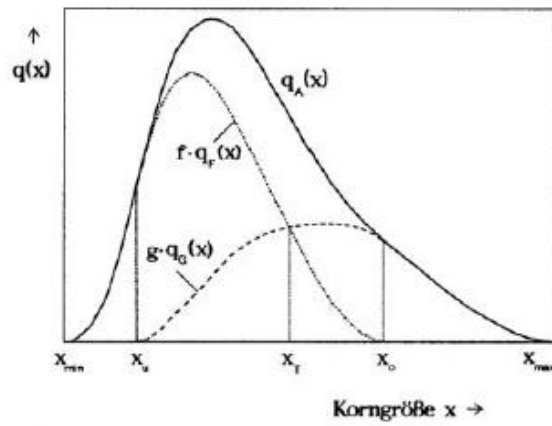


Abb. 6: Grafische Darstellung der Fraktionsbilanz (3 S. 267)

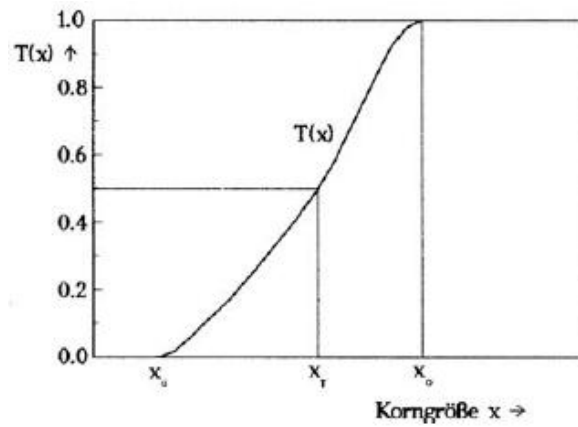


Abb. 7: Trenngradkurve (3 S. 267)

Die Bilanz für den realen Trennprozess lautet (vgl. Abb. 6):

$$q_A(x) = g * q_G(x) + f * q_F(x) \quad (2.29)$$

Der Trenngrad ist definiert als:

$$T(x) = \frac{g * q_G(x)}{q_A(x)} \quad (2.30)$$

Bei bekanntem Grobgutanteil g und den Partikelverteilungen $q_G(x)$ und $q_A(x)$ kann mit den Gleichungen (2.26) bis (2.31) die Feingutpartikelverteilung $q_F(x)$ berechnet werden. Um die reale Trennung mit einer idealen Trennung zu vergleichen wird die Trennschärf berechnet. Dabei werden die zu $T(x_{25}) = 0,25$ und zu $T(x_{75}) = 0,75$ abgeschiedenen Partikelgrößen x_{25} und x_{75} dividiert (7).

$$\kappa = x_{25}/x_{75} \quad (2.32)$$

Bei einer idealen Trennung ist $\kappa = 1$, bei realen Trennprozessen ist $\kappa < 1$.

3 Stoffsysteme

Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung eines Windsichters nicht-konventioneller Bauart zu ermitteln. Bei den bisherigen Untersuchungen wurde ein 2-Modellpartikel-System verwendet. Die Untersuchungen wurden mit Modellpartikeln durchgeführt, um natürliche Schwankungen in Größe, Form und Dichte zu reduzieren und um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Mit den bisher verwendeten Modellpartikeln wurden das Korn und die Spelzen abgebildet. Um den Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung des Windsichters nicht konventioneller Bauart zu ermitteln, müssen Modellpartikel mit den Eigenschaften von Bruchkorn bestimmt werden. Durch geeignete Bruchkorn-Modellpartikel wird das 2-Partikel-System zum 3-Partikel-System erweitert. Um die idealen Bruchkorn-Modellpartikel zu bestimmen werden in der vorliegenden Arbeit der Durchmesser, die Größenverteilung, die Dichte sowie die aerodynamischen Eigenschaften von 10 Modellpartikeln untersucht.

3.1 Natürliches Stoffsystem

Das natürliche Stoffsystem setzt sich aus dem Getreidekorn und den Nichtkornbestandteilen (NKB) zusammen. Nichtkornbestandteile sind Bruchkorn, Insekten, Kies, Schmachtkorn, Spelzen, Staub und Stroh. Bei den NKB werden zwischen den leichten NKB und den schweren NKB unterschieden. Die leichten NKB setzen sich aus Spelzen, Staub, Stroh und kleinen tierischen Bestandteilen zusammen und werden in dieser Arbeit als NKB1 bezeichnet. Die Modellpartikel, die die NKB1 darstellen, haben die Schwebbeeigenschaften der Spelzen, da Spelzen der Hauptbestandteil der NKB1 sind. Spelzen und Stroh werden bei ähnlichen Luftgeschwindigkeiten ausgetragen, die anderen Bestandteile der NKB1 werden bei geringeren Luftgeschwindigkeiten ausgetragen und sind deshalb zu vernachlässigen. Bruch- und Schmachtkorn sind die schweren Bestandteile der NKB, sie werden als NKB2 bezeichnet. Schmachtkörner sind Getreidekörner < 2 mm, beim Bruchkorn handelt es sich um halbierte oder zerkleinerte Körner, deren Mehlkern offen liegt. Die drei Hauptbestandteile des natürlichen Stoffsystems sind Korn, Bruchkorn und Spelzen. Daher besteht auch das Modellpartikelsystem aus drei Komponenten (Abb. 8).



Abb. 8: Natürliches Stoffsystem

3.2 Modellpartikel

Um das natürliche Stoffsystem mit Korn, Bruchkorn und Spelzen abzubilden wurden 10 unterschiedliche Modellpartikel-Systeme untersucht. Es wurde von jedem der 10 Modellpartikel eine Dichtebestimmung mittels eines Gaspyknometers, eine Größenverteilung durch die Siebanalyse und die Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften mit Hilfe von Schwebekennlinien durchgeführt. Zur Bestimmung der Form wurden Mikroskopiebilder aller Partikel erstellt. Um reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen wurden durch den Probenteiler (Riffelteiler RT) der Firma Retsch repräsentative Teilproben erstellt. Die untersuchten Systeme werden in vier Materialgruppen unterteilt: a) Aluminium, b) Bims, c) Keramik und d) Kunststoff und sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Partikelbezeichnung

Partikelbezeichnung	Materialgruppe
P17	Aluminium
P18	Aluminium
P1	Bims
P2	Bims
P3	Bims
P4	Bims
P15	Keramik
P16	Keramik
P5	Kunststoff
P13	Kunststoff

a) Aluminium:

Die Modellpartikel P17 und P18 (Abb. 9, Abb. 10) der Firma Nimex NE-Metall GmbH bestehen aus 90-99% Aluminium. Die Aluminiumpartikel P17 sind das Ergebnis der Pyrolyse von Aluminiumabfällen, die Aluminiumpartikel P18 werden hingegen mechanisch hergestellt. Die Modellpartikel P18 haben eine regelmäßige, runde Form, während P17 aus unregelmäßig geformten Blättchen und Zylindern besteht.

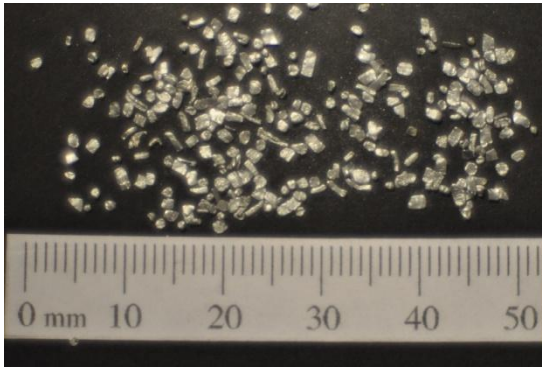


Abb. 9: Modellpartikel P17

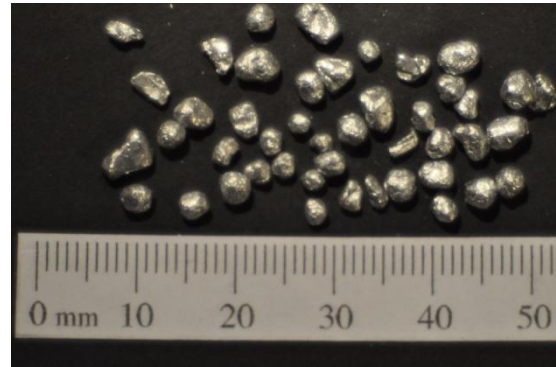


Abb. 10: Modellpartikel P18

b) Bims:

Die Modellpartikel P1-P4 (Abb. 11-Abb. 14) sind aus vulkanischem Glas und werden als Bims bezeichnet. Dieser wird durch die Firma VulkaTec Riebensahm GmbH gefördert, bearbeitet und vertrieben. Durch Mahl-, Trocknungs- und Siebverfahren wird der Bims in verschiedene Größen klassiert. Die Modellpartikel P1-P2 sind aus deutschem Bims. Die Modellpartikel P3-P4 sind aus griechischem Bims.

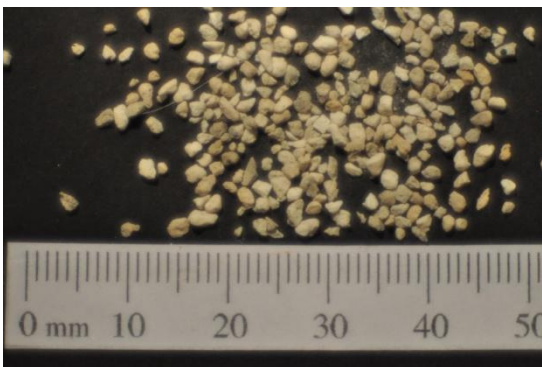


Abb. 11: Modellpartikel P1

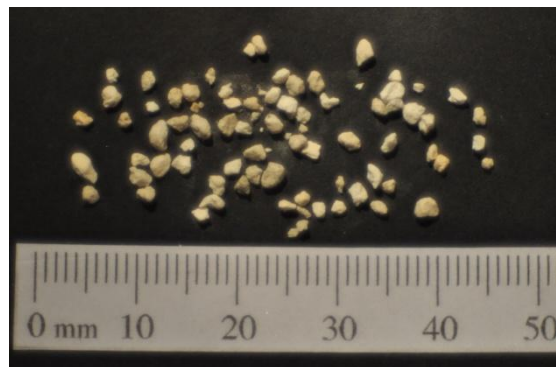


Abb. 12: Modellpartikel P2

- SiO ₂	56,0%
- Al ₂ O ₃	22,0%
- MnO	0,75%
- TiO ₂	0,5%
- CaO	2,0%

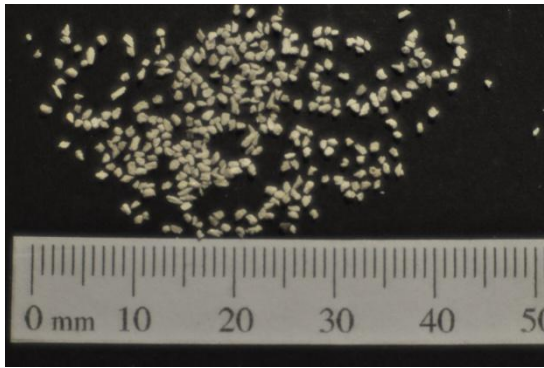


Abb. 13: Modellpartikel P3

- SiO ₂	70,0%
- Al ₂ O ₃	12,5%
- sonst Bestandteile	17,5%

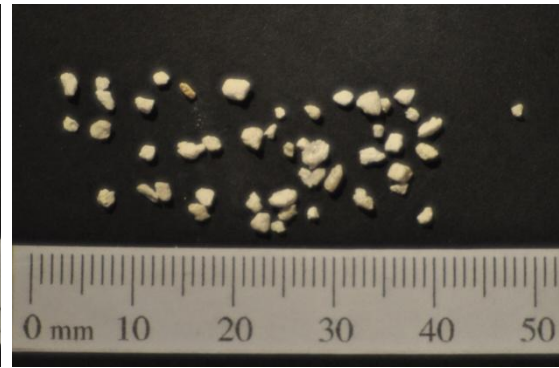


Abb. 14: Modellpartikel P4

c) Keramik:

Die Modellpartikel P15 und P16 der OMEGA MINERALS Germany GmbH, Mitglied der Osthoff OMEGA GROUP, sind keramische Mikrohohlkugeln (Abb. 15, Abb. 16).

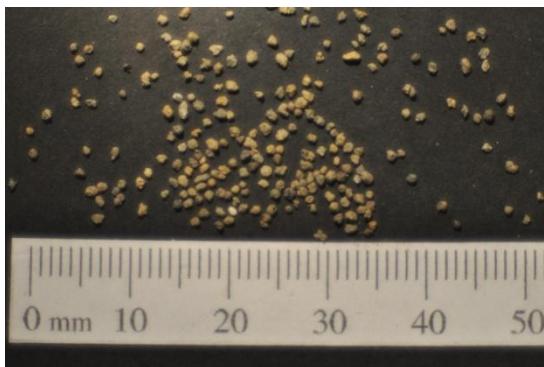


Abb. 15: Modellpartikel P15

- SiO ₂	54-60%
- Al ₂ O ₃	17-21%
- Fe ₂ O ₃	10-14%
- CaO	2,5-5,0%
- MgO	2,5-5,0%

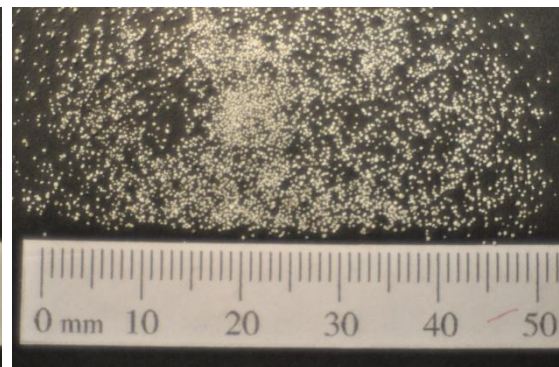


Abb. 16: Modellpartikel P16

- SiO ₂	61 ± 5,0%
- Al ₂ O ₃	35 ± 2,0%
- Fe ₂ O ₃	< 2,0%
- TiO ₂	< 1,5%

d) Kunststoff:

Die Modellpartikel P5 sind Masterbatches der Firma Deifel GmbH & Co. Kg Buntfarbenfabrik. Masterbatches werden zum Einfärben von Kunststoffen genutzt (Abb. 17). Die Modellpartikel P 13 der Firma Nilit Plastics Europe GmbH sind aus dem Kunststoff Polynil® (Abb. 18).



Abb. 17: Modellpartikel P5

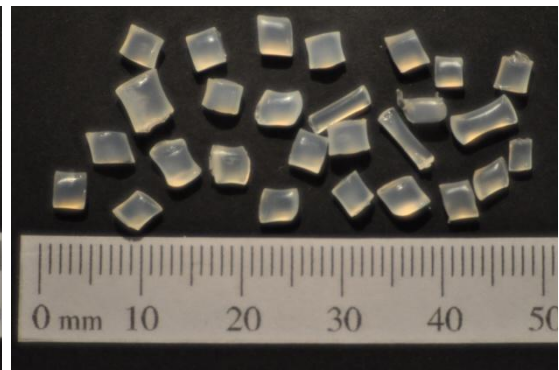


Abb. 18: Modellpartikel P13

Die bisherigen Untersuchungen wurden mit einem 2-Modellpartikel-System durchgeführt. Als Modellpartikel für die Spelzen wird expandiertes Polystyrol (EPS) der Firma Storopack Hans Reichenecker GmbH (Abb. 19) und als Modellpartikel für das Korn Polypropylen (PP) der Firma LyondellBasell Industries Basell Polyolefine GmbH (Abb. 20) verwendet.

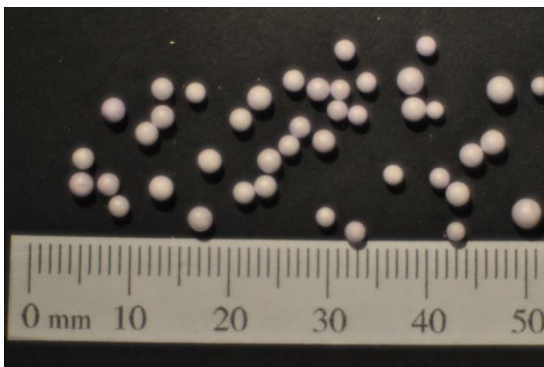


Abb. 19: Modellpartikel P6

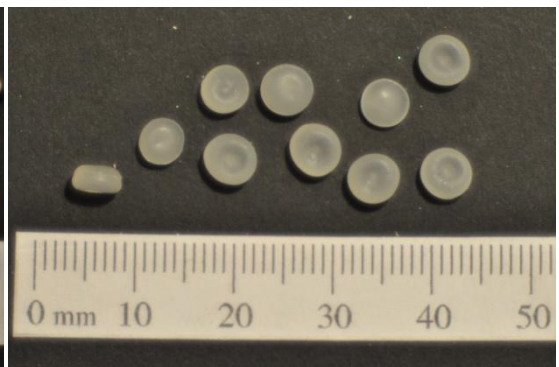


Abb. 20: Modellpartikel P8

3.3 Partikelform

Die Form, die Partikelgröße und der Partikeldurchmesser werden mit Hilfe des Lichtmikroskops Axioplan2 der Firma Zeiss fotografisch ausgewertet. Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben werden die Modellpartikel anhand der Bilder des Lichtmikroskops vermessen, um mit diesen Messwerten den Feretdurchmesser berechnen zu können. Der Durchmesser ist bei gleichmäßigen, runden Partikeln wie den Modellpartikeln P6, P15, und P16 (s. P6 in Abb. 23) anhand der Bilder des Lichtmikroskops exakt zu bestimmen. Bei runden, aber unregelmäßigen Partikeln wie P1-P4, (s. P2 in Abb. 22), P18 sowie

bei zylindrischen Partikeln wie den Modellpartikeln P5 und P13 (Abb. 25, Abb. 26) wird der Feretdurchmesser aus verschiedenen Stichproben berechnet. Am ungenauesten ist es bei unterschiedlich geformten Partikeln wie P17 (zylindrische und flache Partikelform (Abb. 21)) einen Durchmesser zu ermitteln, mit dem man realistische Ergebnisse z.B. bei der Berechnung des Strömungswiderstands bestimmen kann.

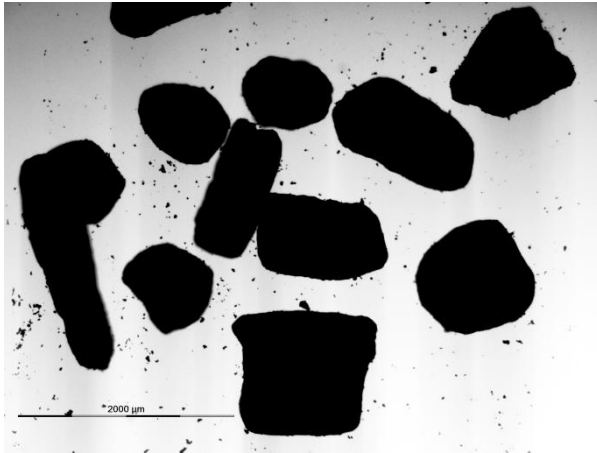


Abb. 21: Modellpartikel P17

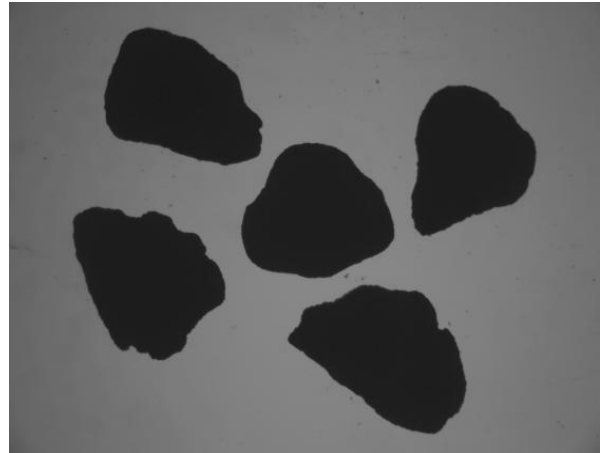


Abb. 22: Modellpartikel P2

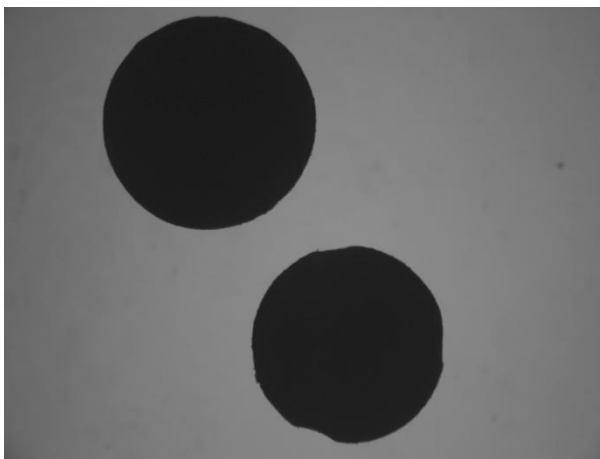


Abb. 23: Mikroskopiebilder von P6

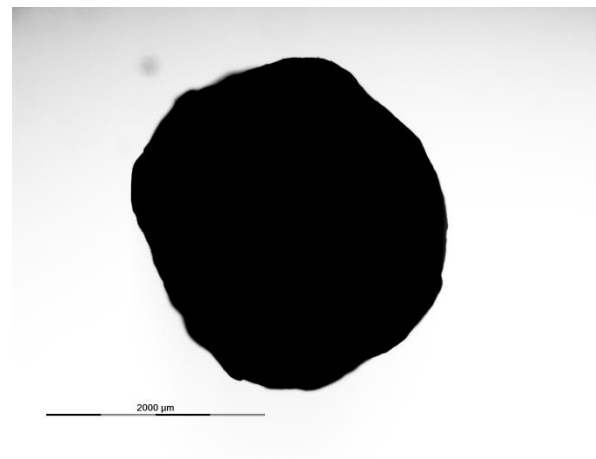


Abb. 24: Modellpartikel P18

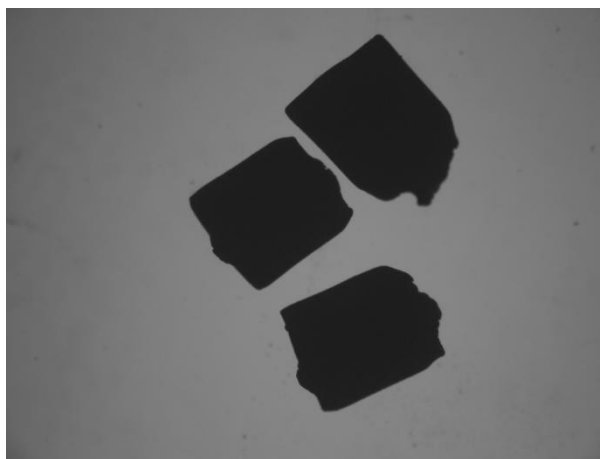


Abb. 25: Mikroskopiebild von P5

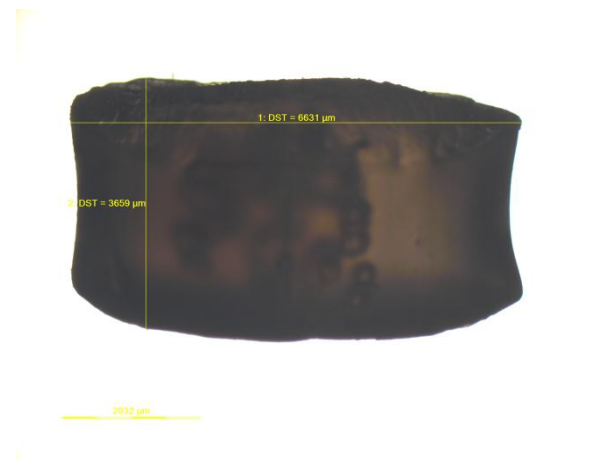


Abb. 26: Mikroskopiebild von P13

Anhand der Mikroskopieaufnahmen ist die Ähnlichkeit der Modellpartikel P2 zum Bruch zu erkennen. Daraus resultieren bei gleicher Dichte ähnliche Schwebeseigenschaften. Die Bims-Modellpartikel P2 stellen auch ein natürliches System dar, haben aber deutliche Vorteile gegenüber dem Getreide. Die Lagerung der Modellpartikel P2 ist aus hygienischer und technischer Sicht leichter zu realisieren. Außerdem variiert die Größe des Bruchkorns durch den schwankenden Feuchtegehalt, während P2 eine konstante Größe hat.

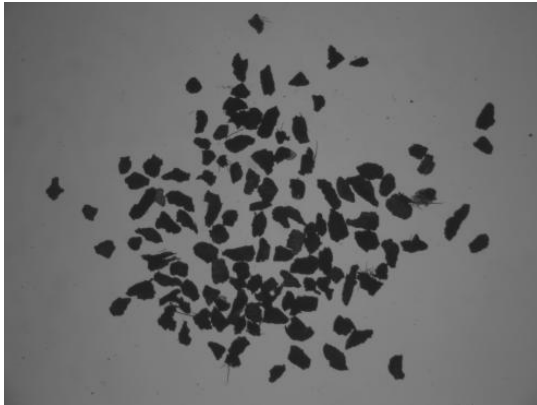


Abb. 27: Bruchkorn

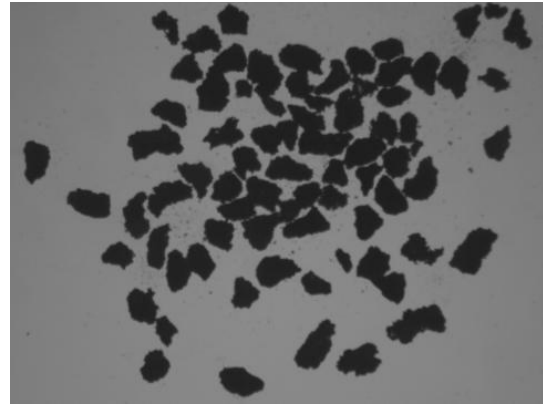


Abb. 28: Modellpartikel P2

Tabelle 5: Feretdurchmesser der Partikel

Partikelbezeichnung	Feretdurchmesser [μm]	Materialgruppe
P17	412-1221	Aluminium
P18	2699	Aluminium
P1	476-1643	Bims
P2	349-2355	Bims
P3	325-1764	Bims
P4	829-2328	Bims
P15	400-1398	Keramik
P16	221-500	Keramik
P5	2181	Kunststoff
P13	2037	Kunststoff

Bei der Bestimmung des Feretdurchmessers mittels der Bildanalyse tritt der systematische Fehler auf, dass ein zu großer Durchmesser bestimmt wird. Je stärker die Partikelform von der Kugelform abweicht desto größer ist der systematische Fehler. Im folgenden Kapitel wird der

Äquivalentdurchmesser durch die Siebanalyse ermittelt, um diesen systematischen Fehler zu vermeiden.

3.4 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung (s. Kapitel 2.2.1) wurde mittels Siebanalyse nach DIN 66165 bestimmt. Dazu wurde eine bestimmte Menge der Probe auf einen Siebturm aus mindestens zehn Sieben gegeben. Bei der Siebung kamen Analysesiebe mit Drahtsiebböden nach DIN ISO 3310 mit den Nennmaschenweiten 200, 315, 355, 400, 500, 630, 710, 800, 1000, 1400 und 2000 sowie 3150 μm zum Einsatz. Die Proben wurden durch eine Vibrationssiebmaschine der Firma Retsch klassiert. Die Siebdauer betrug 10 min bei der Amplitude 1 mm. Die Bims Partikel P1 bis P4 in Abb. 29 haben ein relatives breites Spektrum an Partikelgrößen je nach Klassierung des Herstellers. Beim Partikel P2 haben ca. 78 % der Partikel eine Größe zwischen 1-2 mm und liegen damit im Größenbereich von Bruchkorn. Die Partikel P5, P13, P15-P17 in Abb. 30 liegen alle unter- oder oberhalb des Bruchkorns mit einer Größe von 1-2 mm.

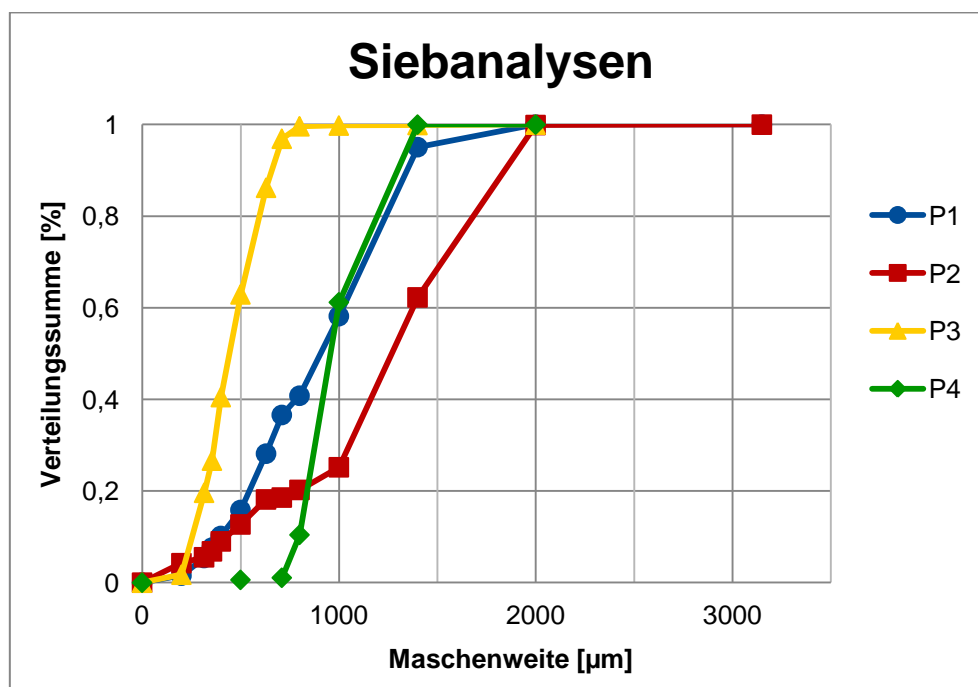


Abb. 29: Siebanalysen der Bims-Modellpartikel

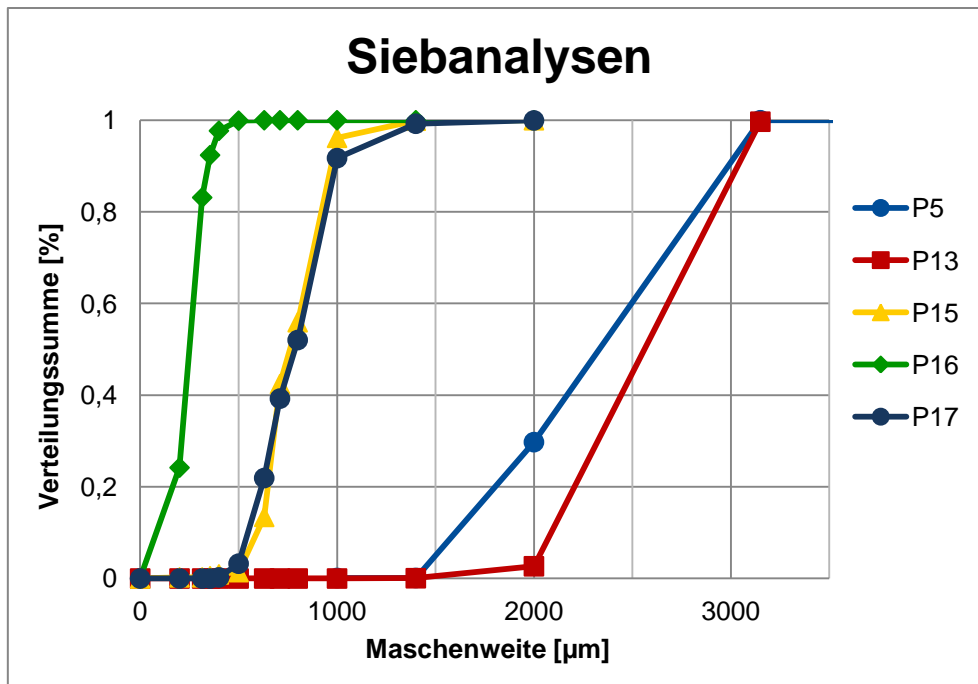


Abb. 30: Siebanalysen der Aluminium-, Keramik-, Kunststoff-Modellpartikel

Neben der Beschreibung des Partikelsystems kann durch die Siebanalyse der Äquivalentdurchmesser x_p anhand der Maschenweite x_w bestimmt werden. Die verwendeten Siebe bestehen aus Quadratmaschen, die so hoch wie breit sind, so dass der Äquivalentdurchmesser der Maschenweite entspricht $x_w = x_p$. Durch die Schwingbewegung der Siebe gelangen die Partikel mit der breitesten Stelle x_{CMax} durch das Sieb. Daher berechnet sich der Äquivalentdurchmesser anhand der breitesten Stelle x_{CMax} (s. Abb. 1). Bei der Berechnung des Feretdurchmesser wird die Länge der Partikel x_{Fe} (s. Abb. 1). berücksichtigt, so dass die Äquivalentdurchmesser tendenziell kleiner sind als die Feretdurchmesser.

Die Modellpartikel werden durch den Partikeldurchmesser und die Partikelgrößenverteilung charakterisiert, um diese anhand der Messwerte mit dem Bruchkorn vergleichen zu können. Da die Partikel im Windsichter anhand ihrer aerodynamischen Eigenschaften getrennt werden, stehen die aerodynamischen Eigenschaften der Partikel im Vordergrund.

3.5 Feststoffdichte

Die Feststoffdichten sowohl der natürlichen Partikel als auch der Modellpartikel wurden durch ein Gaspyknometer bestimmt. Das Gaspyknometer besteht aus der Probezelle und der Expansionszelle, in die durch die Ventile das Inertgas gelangt. Als Inertgas wird Helium verwendet, da die Heliummoleküle aufgrund ihrer geringen Größe auch in sehr kleine Partikelhohlräume gelangen, wodurch ein exaktes Messergebnis erzielt wird.

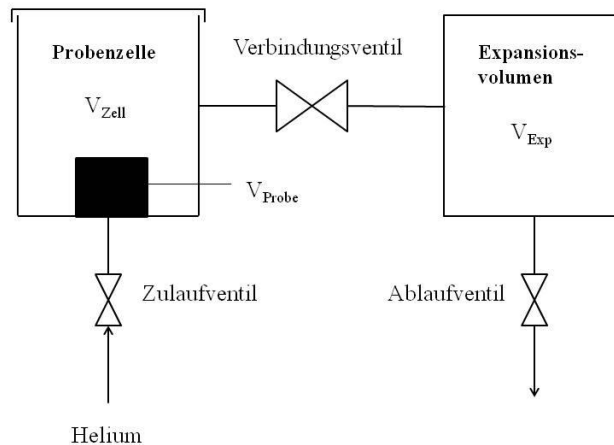


Abb. 31: Fließbild des Gaspyknometers

Die Probe wird in die Probenzelle V_{Zelle} gegeben, diese wird druckdicht verschlossen. Das Volumen der Probenzelle, der Expansionszelle V_{Exp} sowie des Gewichts der Probe m_{Pr} sind bekannt. Die in den Poren der Probe enthaltene Luft würde das Messergebnis verfälschen, weshalb die Probe 10 Mal bei einem Druck von 1,5 bar mit Helium gespült wird. Nachdem das Helium die Luft aus den Poren der Partikel verdrängt hat, werden das Verbindungs- und Ablaufventil geschlossen. So strömt das Helium allein durch das Zulaufventil in die Probenzelle bis der vorgegebene Druck p_1 in der Probenzelle erreicht ist. Um den exakten Druck in der Probenzelle zu messen wird das Zulaufventil geschlossen. Anschließend wird der Druck p_2 ermittelt. Dazu wird das Verbindungsventil zum Expansionsraum mit dem bekannten Volumen V_{Exp} geöffnet. Dieser Vorgang wird drei Mal wiederholt. Die Mittelwerte der Drücke p_1 und p_2 bilden die Berechnungsgrundlage für das Volumen der Probe.

Da Helium bei geringen Drücken als ideales Gas angesehen werden kann, gilt die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase:

$$p \cdot V = N \cdot R \cdot T \quad (3.1)$$

Für die Probenzelle und die Expansionszelle gilt demzufolge:

$$\text{Probenzelle} \quad p_1 \cdot V_{Zelle} - V_{Pr} = N_{Zelle} \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

$$\text{Expansionszelle} \quad p_{amb} \cdot V_{Exp} = N_{Exp} \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

Beim Öffnen des Verbindungsventils gilt:

$$p_2 * (V_{\text{Zelle}} - V_{\text{Pr}} + V_{\text{Exp}}) = N_{\text{Zelle}} * R * T + N_{\text{Exp}} * R * T \quad (3.4)$$

Stellt man die Gleichung (3.4) um und setzt (3.2) und (3.3) ein, erhält man das Probenvolumen V_{Pr} :

$$V_{\text{Pr}} = V_{\text{Zelle}} - \frac{V_{\text{Exp}}}{\left(\frac{p_1}{p_2} - 1\right)} \quad (3.5)$$

Die Proben- bzw. Feststoffdichte ergibt sich aus:

$$\rho_{\text{Pr}} = \frac{m_{\text{Pr}}}{V_{\text{Pr}}} \quad (3.6)$$

Die Ergebnisse der Dichtemessung sind in Tabelle 6 und

Tabelle 7 dokumentiert. Da Bruchkorn aus ganzen Weizenkörnern besteht ist die Dichte gleich.

Tabelle 6: Feststoffdichten der Weizenpartikel

Natürliche Partikel:	Feststoffdichte [kg/m ³]
Weizenkorn	1398 (7 S. 18)
Spelzen	824 (7 S. 18)
Stroh	1097 (7)

Tabelle 7: Feststoffdichten der Modellpartikel

Modellpartikel:	Feststoffdichte [kg/m ³]
P17/P18	2725
P1/P2	1938
P3/P4	2069
P15	1607
P16	(Herstellerangaben) 700
P5	1455
P13	1140

Die Dichte von P2 ist um ca. 40 % höher als die Bruchkörner von Weizen. P5 hat den geringsten Fehler, hat allerdings zu große Partikelgrößen x_w (vgl. Abb. 30). Die Dichte der Modellpartikel P16 konnte aufgrund zu hoher Schwankungen nicht exakt bestimmt werden.

3.6 Aerodynamische Eigenschaften

Die aerodynamischen Eigenschaften der Partikel werden anhand von Schwebekennlinien analysiert. Als Schwebekennlinie bezeichnet man die grafische Darstellung der Verteilungssumme Q_3 über der Schwebegeschwindigkeit w_{sch} (s. Kapitel 2.1.2). Anhand der Schwebekennlinien werden die Modellpartikel validiert.

3.6.1 Versuchsstand

Der in Abb. 32 skizzierte Prüfstand zur Ermittlung der Schwebekennlinien setzt sich zusammen aus einem Versuchsgutbehälter (Abb. 32, a), dessen Boden mit einem Filtermittel aus Metallschaum ausgelegt ist, so dass die Luft die Partikel von unten anströmen kann, diese aber nicht aus dem Behälter fallen können. Der Ventilator (Abb. 32, f), der die Luft ansaugt, wird durch einen Frequenzumrichter gesteuert. Der Luftvolumenstrom trägt die Partikel mit $w_{sch} < v_f$ durch das Steigrohr (Abb. 32, b) über den Zyklon (Abb. 32, c), in einen Auffangbehälter (Abb. 32, d) aus. Die Partikel $w_{sch} \approx v_f$ allen, nachdem der Luftvolumenstrom ausgeschaltet wurde, zurück in den Versuchsbehälter zu den schweren Partikeln $w_{sch} > v_f$.

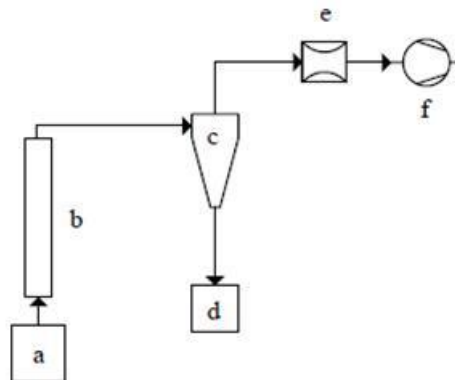


Abb. 32: Aufbau des Schwebekennlinienprüfstandes mit Versuchsbehälter (a), Steigrohr (b), Zyklon (c), Auffangbehälter (d), Messdüse (e), Ventilator (f)

Um eine Schwebekennlinie zu erstellen werden 20 Messpunkte bestimmt. Die Verteilungssumme Q_3 wird durch die ausgetragene Masse aus dem Auffangbehälter ermittelt (s. Kapitel 2.2.1). Die Fluidgeschwindigkeit v_f wird durch die Messdüse (Abb. 32, e) anhand der DIN EN ISO 5167-1-4 berechnet (7 S. 24).

$$\dot{m}_F = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_F} \quad (3.7)$$

Zur Berechnung der Fluidgeschwindigkeit v_f setzt man das Durchmesser Verhältnis $\beta = \frac{d}{D}$ von Düsendurchmesser d zu Rohrrinnendurchmesser D , den Durchflusskoeffizient C und die Expansionszahl ϵ und die gemessene Druckdifferenz Δp in die Gleichung (3.7) ein.

$$\dot{V}_F = \frac{\dot{m}_F}{\rho_f} = A v_f \quad (3.8)$$

Stellt man die Gleichung (3.8) um, erhält man die mittlere Fluidgeschwindigkeit v_f .

Bei der Ermittlung der Schwebekennlinien gibt es unterschiedliche Ursachen, die zu Messfehlern führen können. Durch statische Aufladung bleiben Partikel am Rohr haften, werden diese später ausgetragen, gelangen in die falsche Klasse. Durch die Erdung aller Bauteile wird die statische Aufladung weitgehend verhindert, so dass der elektrostatische Einfluss zu vernachlässigen ist. Da leichte Partikel bei geringen Volumenströmen \dot{V}_F im Krümmer liegen bleiben und Messfehler verursachen können, wird der Auffangbehälter nach jedem Messpunkt abgenommen und der Volumenstrom kurz erhöht, so dass die Partikel ausgetragen werden. In Vorversuchen wurde die Messdauer von 40 Sekunden für jeden der 20 Messpunkte festgelegt. Die im folgenden Kapitel abgebildeten Schwebekennlinien sind der Mittelwert aus 3 Messungen der gleichen Probe, um den statistischen Fehler zu eliminieren.

3.6.2 Schwebekennlinien

Das natürliche Partikelsystem besteht wie in Kapitel 3.1 beschrieben aus drei Komponenten, dem Korn, den NKB1, zu denen Spelzen gehören, und den NKB2, die aus Bruchkörnern von 1-2 mm bestehen. Die Schwebekennlinien des Kornes, der Spelzen und des Bruchkorns überschneiden sich nicht (Abb. 33 und Tabelle 8), so dass eine vollständige Trennung möglich ist. Die Messungen (Abb. 33) der Weizenkörner wurden von Schmid (1), die des Bruchs von Radkowitzsch (8) und die der Spelzen von Scheel (7) durchgeführt. Die Kennlinien von Bruch und Stroh wurden bei internen Messungen ermittelt.

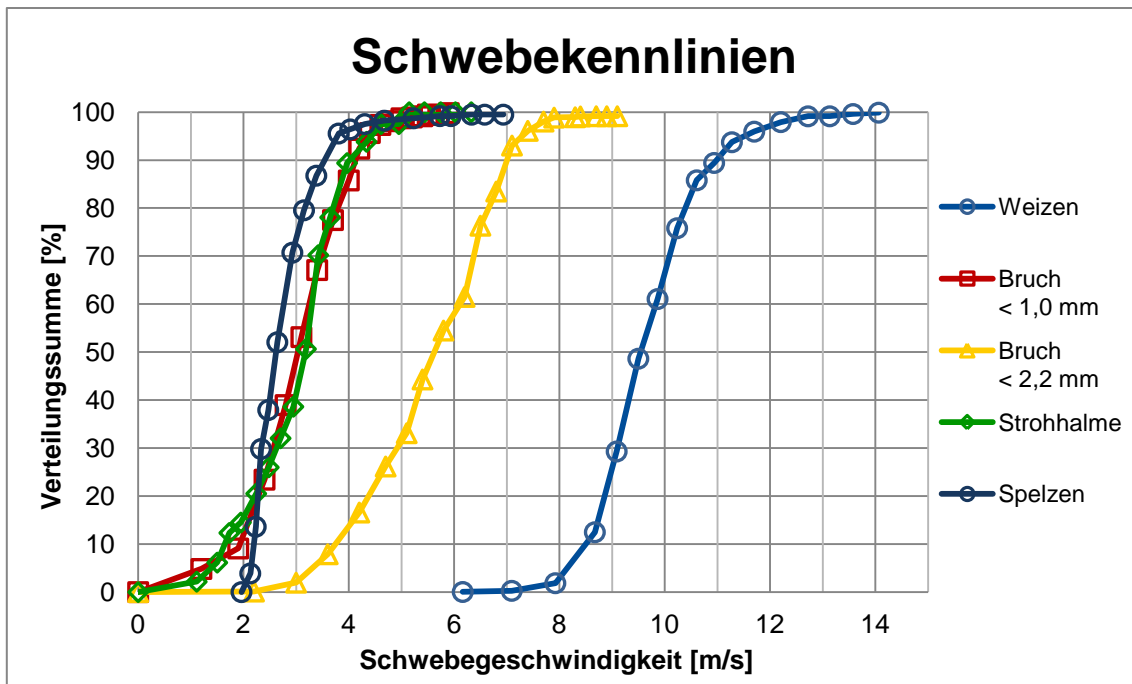


Abb. 33: Schwebekennlinien des natürlichen Partikelsystems

Tabelle 8: Schwebegeschwindigkeit des natürlichen Partikelsystems

	Minimale Schwebegeschwindigkeit w_{sch} [m/s]	Median der Schwebegeschwindigkeit w_{sch} [m/s]	Maximale Schwebegeschwindigkeit w_{sch} [m/s]
Korn	6,2	9,53	16,41
Bruchkorn < 2,2 mm	2,2	5,62	9,1
Spelzen	0,55	1,55	6,83

In den Grafiken (Abb. 34, Abb. 35) sind die Schwebekennlinien aller Modellpartikel grafisch dargestellt. Die Modellpartikel P5 und P18 sind nicht berücksichtigt, da sie auch bei maximaler Ventilatorleistung die Schwebegeschwindigkeit $w_{sch} \approx v_f$ nicht erreichen. Aus den Bims-Modellpartikeln P1-P4 wurde die Probe P2 näher mit den weiteren Modellpartikeln und den Bruchkorn-Partikeln verglichen (Abb. 35), da der Median von P2 dem des Bruchkorns am nächsten kommt. P1, P3-P4 haben zu große oder zu kleine Schwebegeschwindigkeiten (Abb. 34).

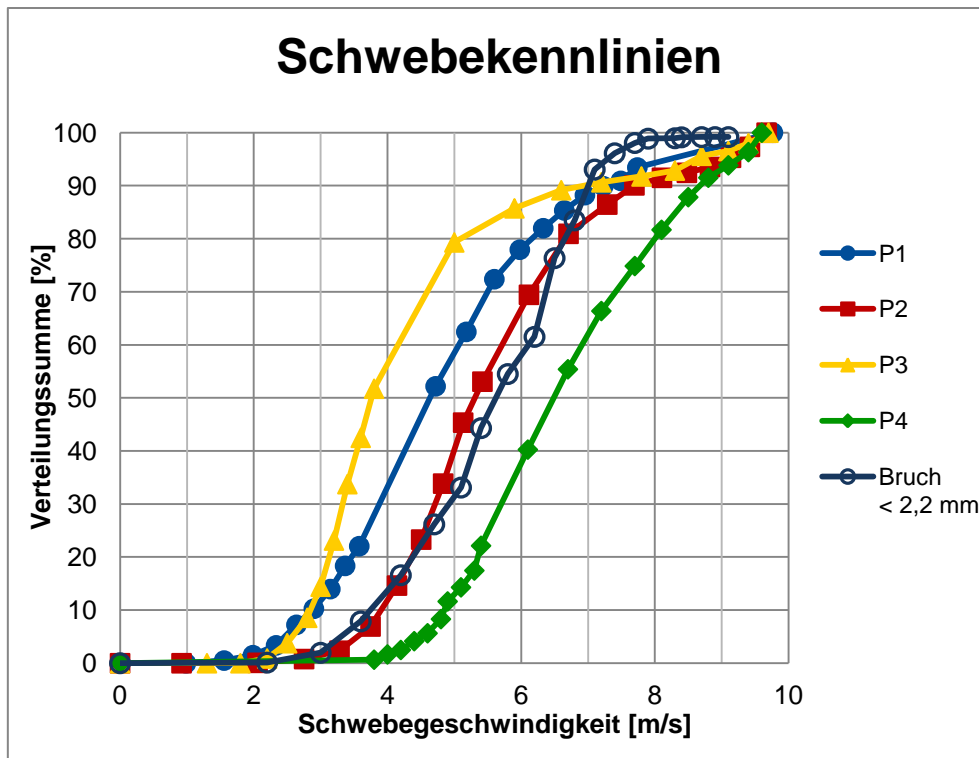


Abb. 34: Schwebekennlinien Bims-Modellpartikel im Vergleich zum Bruchkorn

In Abb. 35 werden die Modellpartikel mit dem realen Stoffsystem verglichen. Wie auch im natürlichen Partikelsystem überschneiden sich die Schwebekennlinien nicht, so dass eine vollständige Trennung möglich ist. Anhand der Grafik (Abb. 35) erkennt man, dass auch die Modellpartikel aus Aluminium P17 die Eigenschaften des Bruchkorns haben. Der Nachteil der Aluminiumpartikel P17 ist jedoch, dass sie unregelmäßig geformt sind (s. Kapitel 3.3). Während die Form von Bims P2 eher rund ist, sind die Modellpartikel P17 von 400-2000 μm Blättchen und von 200-355 μm zylindrisch. Die Form der Modellpartikel P2 entspricht der der Bruchkorn-Partikel. Des Weiteren erkennt man in Abb. 35, dass P15 als Modellpartikel für die Spelzen (NKB1) validierbar ist. Der Nachteil dieser Modellpartikel ist jedoch ihre Größe. Die Modellpartikel P15 sind pulvrig mit Mikrohohlkugeln der Größe 700-1100 μm . Die Spelzen haben jedoch eine Länge von 1000-3000 μm . Durch die P15 ergeben sich ganz andere Partikel-Partikel Wechselwirkungen sowie einen anderen Einfluss auf die Porosität und damit auf die Schwebeeigenschaften der Mischung. Da die Leistung des Ventilators nicht ausreichte, konnten nur 88% der Modellpartikel P13 ausgetragen werden. Die Kornpartikel wurden von Schmid (1) an einem Versuchsstand in Hohenheim getestet.

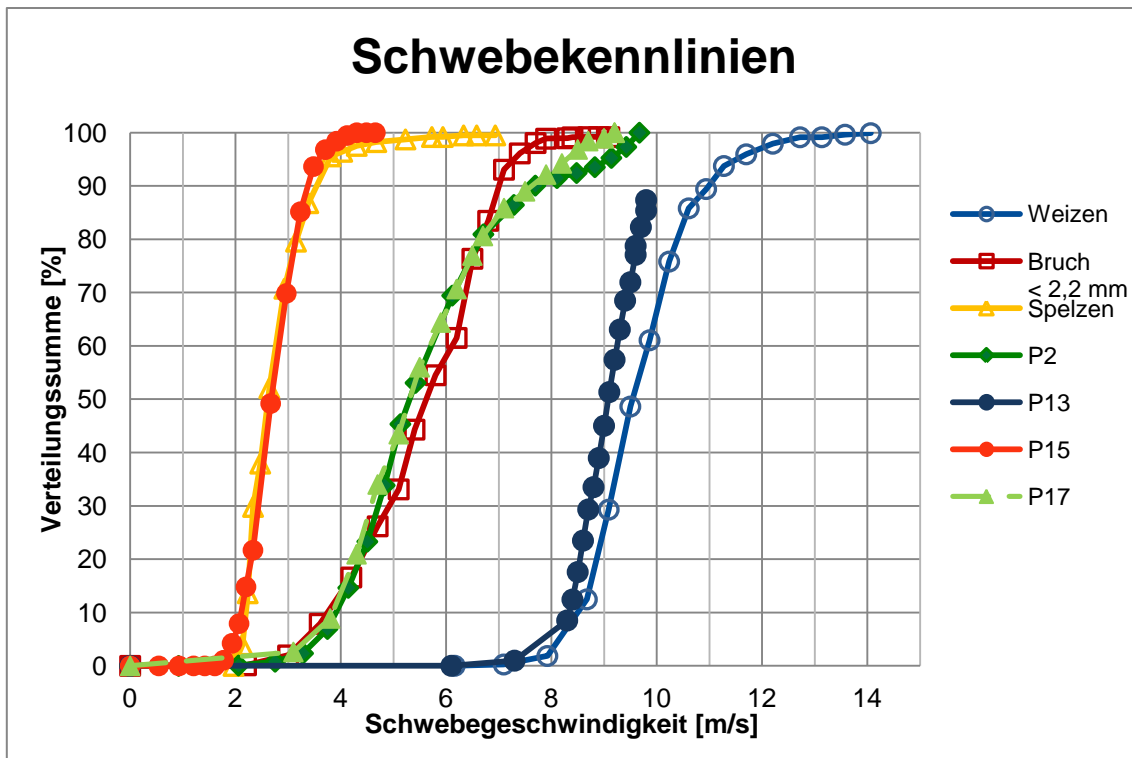


Abb. 35: Schwebekennlinien der Modellpartikel im Vergleich zu den natürlichen Partikeln

In Abb. 35 sind die Schwebekennlinien der verwendeten Modellpartikel-Systeme im Vergleich zum natürlichen Partikelsystem dargestellt. Um die aus dieser Arbeit resultierenden Ergebnisse mit den Ergebnissen der bisherigen Arbeiten vergleichen zu können, wurde für die Darstellung der Spelzen die Modellpartikel P6 und für Korn die Modellpartikel P8 verwendet. Das 2-Modellpartikel-System wird nun zum 3-Modellpartikel-System erweitert. Im 3-Modellpartikel-System wird der Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung untersucht. Der Einfluss des Bruchkorns wird durch den Einsatz von Modellpartikeln P2 als Bruchkorn näher untersucht.

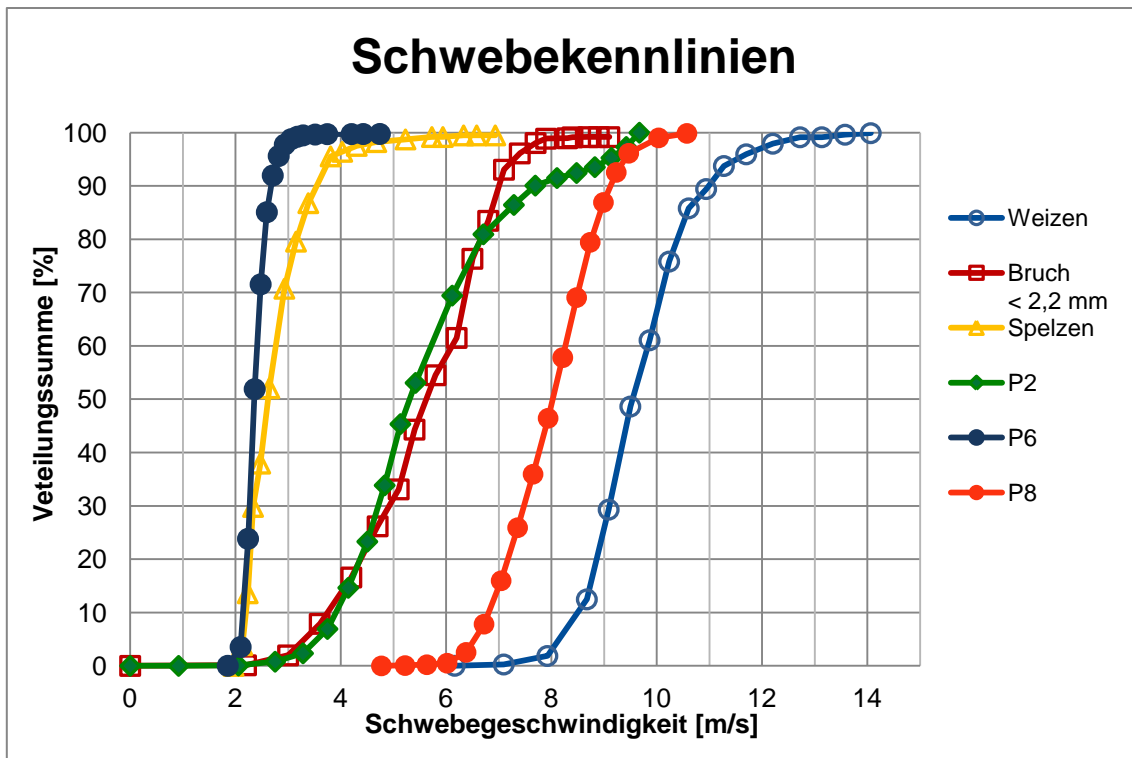


Abb. 36: Schwebekennlinien des 3-Modellpartikel-System im Vergleich zum natürlichen Partikelsystem

3.6.3 Einfluss der Beladung

Bei den Schwebekennlinien in Abb. 33 bis Abb. 36 wurden die jeweiligen Partikel einzeln vermessen. Da nicht nur das einzelne Partikelsystem Einfluss auf die Trennleistung des Windsichter hat, sondern die Mischung beim 3-Modellpartikel-System, wird der Einfluss der Beladung und der Zusammensetzung der Mischung untersucht. Zu diesem Zweck wurde der Prüfstand derart modifiziert, dass der Versuchsbehälter (Abb. 32 a) um 10-20 mm nach unten versetzt wurde und die Luft über den dadurch entstandenen Ringspalt zwischen Versuchsbehälter (Abb. 32 a) und Steigrohr (Abb. 32 b) angesaugt wurde; die schweren Partikel fallen in den nicht durchströmten Versuchsbehälter (Abb. 32 a). Die Partikel werden dabei über ein Zugaberohr im unteren 1/6 des Steigrohrs (Abb. 32 b) seitlich aufgegeben.

Die Beladung ist das Verhältnis vom Massestrom des Aufgabeguts zu dem des Fluides (s. Formel (3.9) bis (3.11)). Durch die Höhe der Beladung wird der Massenaustrag beeinflusst. Bei steigender Beladung bis 3 sinkt der Kornverlust durch die zunehmenden Partikel-Partikel Wechselwirkungen. In Vorversuchen wurde die Beladung auf 4,5 festgelegt (7). Die Erhöhung der Beladung hat aber neben dem Vorteil des geringen Kornverlusts den Nachteil, dass durch Impulskräfte auch leichte Partikel ins Grobgut gelangen. Bei einer Zusammensetzung von > 11 % Spelzen und < 89 % Bruch 1-2 mm sind die Schwebekennlinien unabhängig von der Beladung.

$$\mu = \frac{\dot{m}_K + \dot{m}_{Br} + \dot{m}_{Sp}}{\rho_f * \dot{V}_F} \quad (3.9)$$

$$\mu = \frac{\dot{m}_K + \dot{m}_{Br} + \dot{m}_{Sp}}{\dot{m}_F} \quad (3.10)$$

$$\mu = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_F} \quad (3.11)$$

3.6.4 Einfluss der Zusammensetzung

Um den Einfluss des Bruchkornanteils in einer Mischung zu untersuchen, wurden Schwebekennlinien einer Mischung aus Spelzen und Bruchkorn erstellt. Die Zusammensetzung der Mischung berechnet sich wie folgt:

$$X_{Sp} = \frac{\dot{m}_{Sp}}{\dot{m}_A} \quad (3.12)$$

Die Verteilungssumme berechnet sich über das Massenverhältnis der Spelzen ohne Bruch abhängig von der Schwebegeschwindigkeit (Abb. 37). Die Ermittlung der Schwebekennlinien wurde bei einer Beladung von 5 durchgeführt. In Tabelle 9 sind die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Mischung aufgeführt.

Tabelle 9: Zusammensetzung der Mischung

Massenanteil Spelzen [%]	Massenanteil Bruch [%]
100	0
11	89
2	98

Ab einem Massenanteil der Spelzen von 11% hat das Bruchkorn einen Einfluss auf die Schwebekennlinie der Spelzen. Durch den erhöhten Bruchkornanteil verdichtet sich die Mischung und die Porosität sinkt. Das hat zur Folge, dass die Partikel nicht mehr einzeln umströmt werden, und die Partikel-Partikel Wechselwirkungen zunehmen. Durch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Partikeln wird ein geringerer Massenanteil der Spelzen ausgetragen. Anhand der Grafik (Abb. 37) erkennt man deutlich, dass sich ein hoher Bruchkornanteil negativ auf die Trennleistung auswirkt; die Kurve verschiebt sich nach rechts.

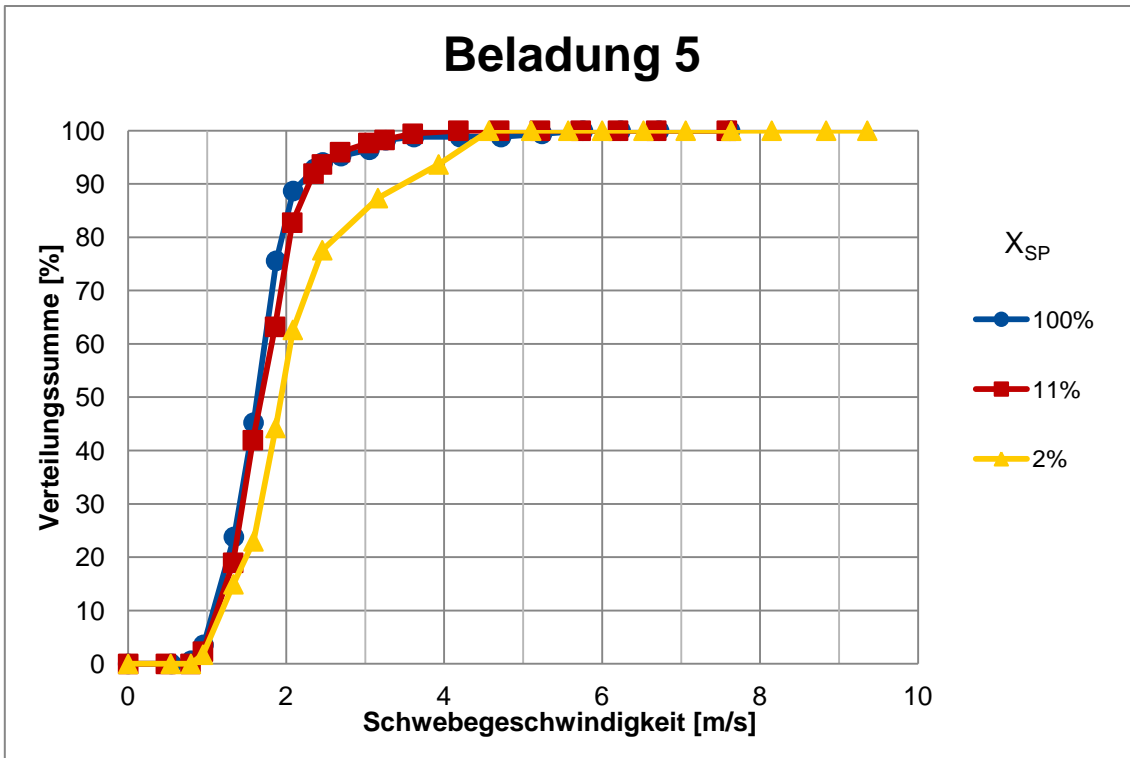


Abb. 37: Einfluss der Zusammensetzung auf die Schwebekennlinien

3.7 Zusammenfassung der Messergebnisse

Aufgrund der Messergebnisse von Dichte, Größe, Schwebeeigenschaften und nach Bestimmung der Form kann ein 3-Modellpartikel-System erstellt werden. Das 2-Modellpartikel-System setzt sich aus den Modellpartikeln P8 und P6 zusammen. Aufgrund der Form, der Dichte und der Schwebeeigenschaften werden beim 3-Modellpartikel-System die Modellpartikel P2 eingesetzt, um das Bruchkorn darzustellen. Obwohl Korn und Spelzen in den aerodynamischen Eigenschaften durch die Modellpartikel P15 und P13 dargestellt werden können, werden die Modellpartikel P6 und P8 des bisherigen Systems verwendet, um die erzielten Ergebnisse mit den bisherigen Ergebnissen vergleichen zu können.



Abb. 38: Natürliche Partikel



Abb. 39: 3-Modellpartikel-System

Tabelle 10: Zusammenfassung der Modellpartikel

Partikel- bezeichnung	Material	Dichte [kg/m³]	Größe [µm]	SKL w_{min} [m/s]	SKL w₅₀ [m/s]	SKL w_{max} [m/s]
P17	Aluminium	s P18	100-1400	1,18	5,33	9,20
P18	Aluminium	2725	2000	-	-	-
P1	Bims	1938	300-1600	1,33	4,67	9,77
P2	Bims	1938	500-1500	2,17	5,31	9,67
P3	Bims	2069	300-800	1,59	3,83	9,70
P4	Bims	2069	1000-2000	3,10	6,49	9,60
P15	Keramik	1607	bis 500	1,77	2,70	4,66
P16	Keramik	700	700-1100	-	-	-
P5	Kunststoff	-	2203	-	-	-
P13	Kunststoff	1455	100-1400	-	-	-

4 Stand der Technik

Die Grundlage der in Kapitel 4.2 und Kapitel 5.1 erläuterten Windsichter ist der Vorreiniger WR20 der Firma Ambros Schmelzer & Sohn GmbH & Co. KG.

4.1 Standard Vorreiniger WR20

Die in Kapitel 2.3 beschriebene Trennung des Aufgabeguts in Grob- und Feingut erfolgt in der Landwirtschaft mit Hilfe eines Schwerkraftwindsichters mit rotierender Verteilerscheibe wie z.B. beim WR20 der Firma Schmelzer, der die Grundlage dieser Arbeit bildet.

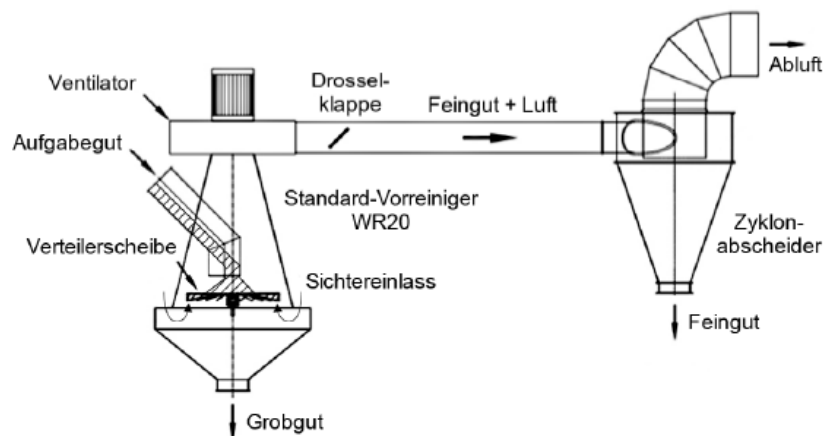


Abb. 40: Standard Vorreiniger WR20 der Firma Schmelzer

Der WR20 besteht aus einem Sichtertrichter mit rotierender Verteilerscheibe, einem Auffangtrichter, einem Radialventilator und einem Zyklonabscheider zur Abluftreinigung. Das Aufgabegut wird über ein Einlassrohr in den Sichtertrichter gegeben und fällt durch das Rohr direkt auf die Verteilerscheibe. Der zur Trennung benötigte Luftvolumenstrom wird mittels Radialventilator durch den Ringspalt angesaugt. Durch die vertikal nach oben strömende Luft rotiert die Verteilerscheibe und dispergiert das darauf fallende Aufgabegut. Durch die Rotation der Verteilerscheibe wirken Zentrifugalkräfte auf das Aufgabegut, weshalb die schwereren Bestandteile wie Körner nach außen geschleudert werden und leichten Bestandteile wie die Spelzen länger im Luftvolumenstrom bleiben. Die dispergierten Partikel des Aufgabeguts können so besser nach ihrer Schwebegeschwindigkeit w_{sch} in Grob- und Feingut getrennt werden. Da die leichten NKB auch Staub im Feingutstrom enthalten, wurde nach dem Zyklonabscheider ein Gewebefilter eingebaut.

4.2 Bisherige Untersuchungen

Um die Trennleistung zu verbessern wurde der Sicherterraum vergrößert und ein Verteilerkegel sowie mehrere Verteilerringe über der Verteilerscheibe eingebaut (Abb. 40). Durch die Einbauten wird das Aufgabegut umverteilt und besser dispergiert. Zusätzlich wurde der Luftvolumenstrom durch einen

leistungsstärkeren Ventilator erhöht. Durch die Neuerungen steigt der Abscheidegrad η_{NKB1} der Spelzen von 71% auf 97% (9 S. 63). Der Abscheidegrad η_K des Kornes liegt jedoch bei 0,4%. Um diesen auf 0,1% zu senken wird die Einbauhöhe des Verteilerkegels gesenkt, so dass sich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft verringert. Des Weiteren ergaben die Untersuchungen von Schopfer (9), dass die Verteilerscheibe keinen positiven Einfluss auf die Trennleistung des Windsichters hat, weshalb ein Windsichter-Konzept ohne Verteilerscheibe (rotierende Bauteile) entwickelt wurde.

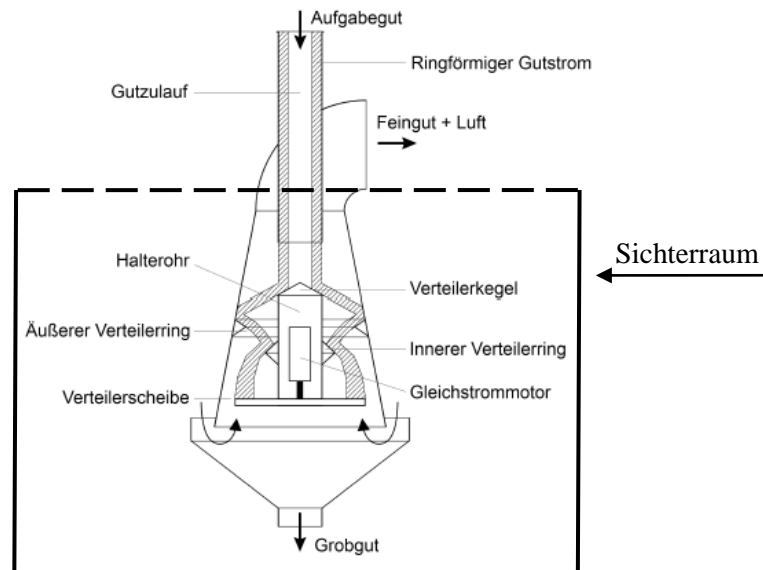


Abb. 41: Zick-Zack-Sichter mit Verteilerscheibe (9 S. 40)

Anstelle der Verteilerscheibe wurden ein Verteilerkegel und ein Verteilerring eingebaut, durch die das Gut in einem Zick-Zack Strom durch den Sichter geleitet wird (Abb. 41). Dieser Zick-Zack-Windsichter bildet die Grundlage für den in Abb. 42 abgebildeten modifizierten Zick-Zack-Windsichter. Im modifizierten Zick-Zack-Windsichter ist das Halterrohr durch den Verteilerkegel ersetzt worden, so dass der Luftvolumenstrom im unteren Sichterraum konstant ist. Die Funktion der inneren Verteilerringe erfüllt nun der Innenkonus (Abb. 42).

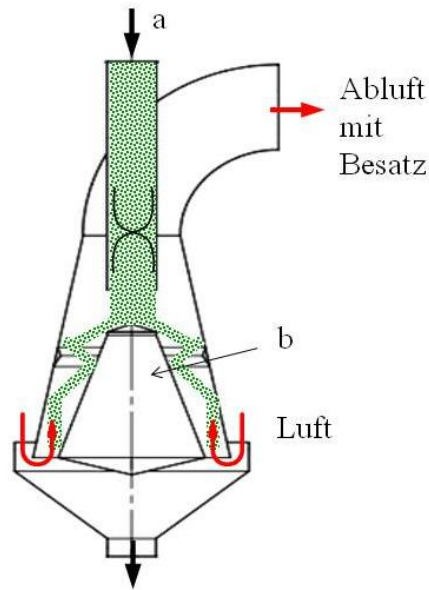


Abb. 42: Darstellung eines Zick-Zack-Windsichters mit Guteinlass (a) und Innenkonus (b) (8 S. 14)

Durch die Modifizierung des Zick-Zack-Sichters wird der Abscheidegrad η_{NKB1} der Spelzen auf 92% und der Abscheidegrad η_{NKB2} des Bruchkorn auf 20% sowie der Kornverlust auf 0,07% reduziert. Diese Ergebnisse gelten für die Bedingungen der Laborversuche. Die Zusammensetzungen sind in Tabelle 11 genannt.

Tabelle 11: Massenanteile des Labor- und Feldversuchs

		Laborversuch	Feldversuch
Gesamtmasse in kg		175	1390
Massenanteil	Korn in %	99,00	94,5000
	Bruch in %	0,85	5,4000
	Stroh in %	0,05	0,0015
	Spreu in %	0,10	0,1000

Die anschließend durchgeführten Feldversuche beim Landwirt ergaben eine deutlich geringere Trennleistung als die Laborversuche. Durch eine Erhöhung des Bruchkornanteils auf 5,4% (s. Tabelle 11) verschlechterte sich die Trennleistung deutlich. Dieser Sachverhalt wurde in Kapitel 3.6.4 nachgewiesen. Da sich eine Schwankung des Bruchkornanteils in der Zusammensetzung signifikant auf die Trennleistung des Zick-Zack-Sichter auswirkt, wurde ein neues Konzept zur Windsichtung entwickelt (Kapitel 5), bei dem der Einfluss des Bruchkorns untersucht wurde.

5 Trennapparat und Prüfstand

Um hygienisch einwandfreie Produkte herzustellen sollen über 90% der NKB1 und über 30% der NKB2 abgeschieden werden. Der Kornverlust soll dabei unter 0,1% sein. Die von Schmid (1) ermittelten Abscheidegrade η des WR20 von 70,6% für NKB1 und von 3,8% für NKB2 weichen erheblich von den Zielvorgaben ab, weshalb neue Konzepte zur Optimierung der Trennleistung entwickelt wurden.

5.1 Windsichter nicht-konventioneller Bauart

Bei dem von Scheel (7) und Radkowitsch (8) untersuchten Konzept des Windsichter-Fließbett-Reinigers soll das Aufgabegut durch ein Fließbett dispergiert werden. Da der Verteilerkegel wesentlich effektiver zur Dispergierung des Aufgabeguts ist als die Verteilerscheibe, wird dieser auch im neuen Konzept eingesetzt. Dazu wird im nicht-konventionellen Windsichter ein Fließbettkegel (Abb. 43 (d)) aus Drahtgewebe eingebaut, der von unten mit Luft durchströmt wird. Die Abb. 43 und Abb. 44 veranschaulichen den Aufbau und die Funktion des Windsichter-Fließbett-Reinigers nicht-konventioneller Bauart.

Im Windsichter nicht-konventioneller Bauart befindet sich wie auch im Zick-Zack-Sichter das Gutzulaufrohr (a) im Außenrohr (b). Das Gutzulaufrohr (a) führt die Partikel auf den Fließbettkegel (d). Der Fließbettkegel (d) besteht aus Drahtgewebe und einem Zylinder (g) aus Metall. Der Luftvolumenstrom gelangt am Zylinder (g) vorbei durch das Drahtgewebe (Abb. 44 zwischen 1 und 2) in den Sichterraum (Abb. 44 zwischen 0 und 2). Ein weiterer Luftvolumenstrom (Primärluftstrom) gelangt durch den Ringspalt in den Sichterraum (Abb. 44 zwischen 0 und 2). Der Ringspalt befindet sich zwischen der Fließbettberandung (e) und dem Grobgutauffangtrichter (f).

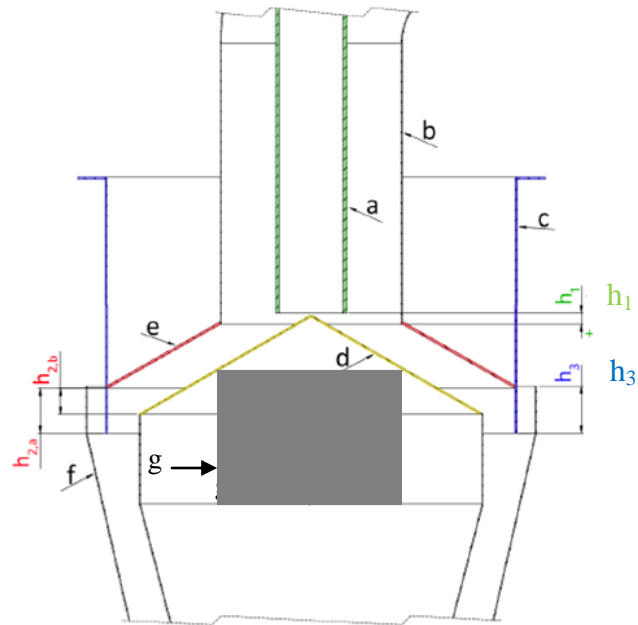


Abb. 43: Windsichter-Fließbett-Reiniger mit Gutzulaufrohr (a); Außenrohr (b); Trennzonenbegrenzung (c); Fließbettkegel (d); obere Fließbettberandung (e); Auffangtrichter (f); Fließbetteilung (g) (8 S. 19)

Wie in Abb. 44 grafisch dargestellt gelangt das Aufgabegut \dot{m}_A durch das Gutzulaufrohr in die Aufgabebzone (Abb. 44 zwischen 0 und 1), wo es durch den Fließbettkegel dispergiert wird. Durch den Sekundärluftvolumenstrom \dot{V}_{Sek} , der durch den Fließbettkegel am Zylinder vorbeiströmt, wird das Aufgabegut fluidisiert und entmischt. Die Entmischung und Trennung findet in der Trennzone statt (Abb. 44 zwischen 1 und 2). Während der Fluidisierung des Aufgabeguts schwimmen die leichten Partikel auf (s. Kapitel 2.2.3) und werden so durch den Primärluftvolumenstrom \dot{V}_{Pri} als Feingut \dot{m}_F nach oben ausgetragen. Die schweren Partikel fallen durch den Auffangtrichter nach unten und werden als Grobgut \dot{m}_G bezeichnet. Der Primär- und Sekundärluftvolumenstrom addiert sich in der Trennzone (Abb. 44 zwischen 1 und 2) und verlässt als Hauptvolumenstrom \dot{V}_H den Sichterraum (Abb. 44 zwischen 0 und 2) durch das Außenrohr.

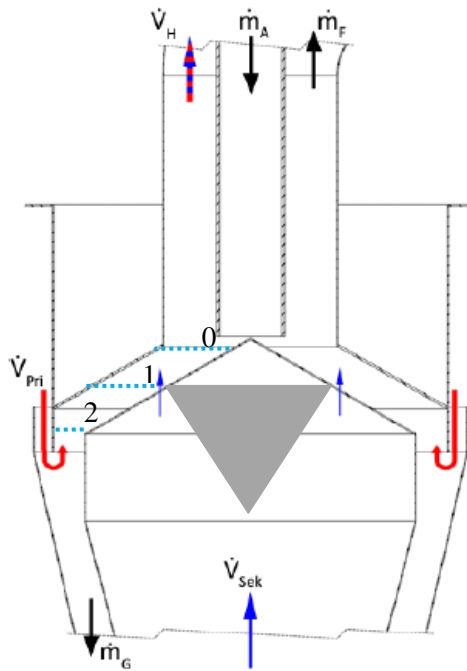


Abb. 44: Schematische Darstellung des Windsichter-Fließbett-Reinigers (8 S. 18)

Mit der von Radkowitsch (8) ermittelten Geometrie (Tabelle 12) wurden alle Trennversuche dieser Arbeit durchgeführt. Diese lässt sich über drei unterschiedliche Höhen einstellen. Die Gutzulagehöhe (Abb. 44; h_1), die Fließbetthöhe (Abb. 44; $h_{2,b}$) und die Trennzonenlänge (Abb. 44; h_3). Da das Gutzulaufrohr in den Sichterraum ragt, wird die Höhe h_1 per Definition negativ. Die von Radkowitsch verwendete Geometrie wurde in einem Punkt verändert. Der von Radkowitsch verwendete Kegel (Abb. 44) zur Fließbettteilung wurde durch einen Zylinder (Abb. 43 (g)) ersetzt, um ein gleichmäßiges Strömungsprofil zu erhalten.

Für alle Versuche gilt:

Tabelle 12: Versuchsparameter

h_1 mm	$h_{2,b}$ mm	h_3 mm	μ Gew.-%	X_{SP} Gew.-%
-30	23	40	4,5	0,1

Der Fließbettkegel des Windsichter besteht aus Drahtgewebe mit einer Maschenweite von $365 \mu\text{m}$ und einem Kegelwinkel von 30° . Bei einer Maschenweite von $365 \mu\text{m}$ kann der Sekundärstrom \dot{V}_{Sek} mit geringem Druckverlust durch das Gitter in den Sichterraum strömen und die Partikel können nicht hindurch fallen. Der Innenkegel lenkt den Sekundärstrom \dot{V}_{Sek} um, so dass in der Aufgabezone kein Sekundärstrom \dot{V}_{Sek} die Schüttung verdichtet. Dadurch wird die

Fallgeschwindigkeit des Aufgabeguts nicht abgebremst und dieses wird erst dispergiert und anschließend fluidisiert.

5.2 Versuchsdurchführung am Versuchsstand

Der Versuchsstand (s. Abb. 45) besteht aus Dosiereinheiten (a, b, c) zur Gutaufgabe der 3 Partikel, dem Windsichter (d), den Messdüsen (e, f), dem Zyklon (g), den Auffangbehältern (h, i) und den Ventilatoren (j, k).

Das Aufgabegut gelangt über eine Dosierschnecke (Abb. 45 a) und zwei Schüttelrinnen (Abb. 45 b, c) in den Windsichter (s. Kapitel 5.1). Die Dosierschnecke fördert die Partikel mit Masseströmen von $\dot{m}_A \approx 300-3500 \frac{kg}{h}$, die Masseströme der Schüttelrinne (c) liegen zwischen $\dot{m}_A \approx 0,8 - 2,1 \frac{kg}{h}$ und die der Schüttelrinne (b) zwischen $\dot{m}_A \approx 6,7-22,2 \frac{kg}{h}$. Die Dosierschnecke wird über die Systemdesingsoftware LabVIEW gesteuert, die Schüttelrinnen werden jedoch am Gerät eingestellt.

Die Luftvolumenströme werden über die Frequenzumrichter der Ventilatoren (j, k) eingestellt und über die Messdüsen (e, f) ermittelt.

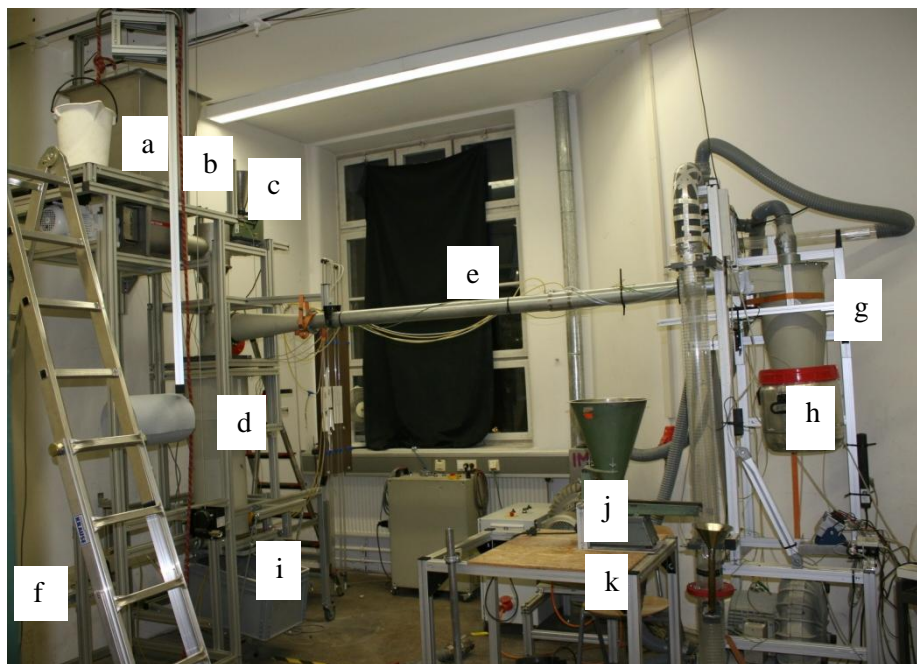


Abb. 45: Versuchsstand im IMVT

Durch die Parallelschaltung der Ventilatoren wird der Hauptvolumenstrom \dot{V}_H erzeugt. Druckseitig wird der Sekundär volumenstrom \dot{V}_{Sek} am Ventilator mit einer Leistung von 5,5 kW erzeugt. Der Hauptvolumenstrom \dot{V}_H wird Saugseitig durch einen Ventilator mit einer Leistung von 7,5 kW an das Fließbett oder die Umgebung abgegeben. Der Primär volumenstrom \dot{V}_{Pri} wird durch die Differenz des Hauptvolumenstrom \dot{V}_H und des Sekundär volumenstrom \dot{V}_{Sek} berechnet (5.1).

$$\dot{V}_{\text{Pri}} = \dot{V}_{\text{H}} - \dot{V}_{\text{Sek}} \quad (5.1)$$

$$\dot{V}_{\text{H}} = \dot{V}_{\text{Pri}} + \dot{V}_{\text{Sek}} \quad (5.2)$$

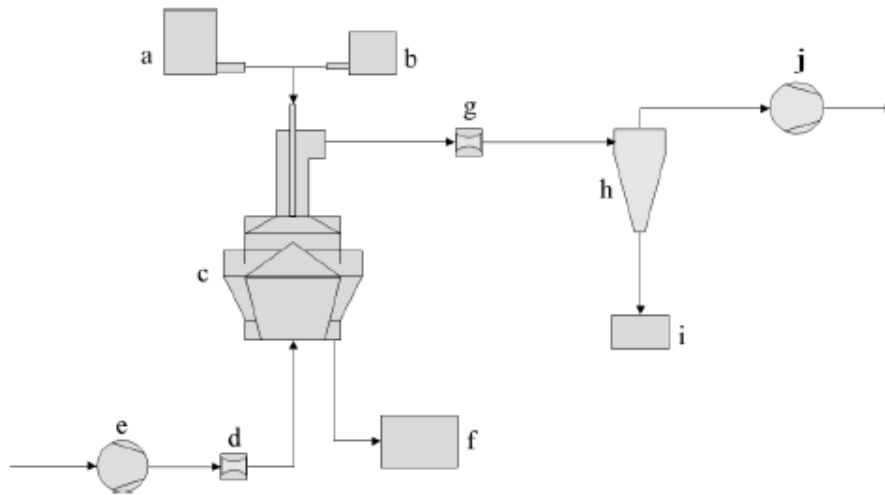


Abb. 46: Skizze des Prüfstandes (vgl. (10))

Die Messung der Volumenströme erfolgt durch eine ISA-1932 Düse nach DIN EN ISO 5167-1-4 (Abb. 46, g, d). Dazu wird zunächst durch die Formel (5.3) der Massestrom der Luft \dot{m}_L berechnet. Die Formel (5.3) bezieht den Durchflusskoeffizienten C , die Expansionszahl ε und das Durchmesser Verhältnis $\beta = \frac{d}{D}$ des Düsendurchmessers zum Rohrrinnendurchmesser D sowie die Luftdichte ρ zur Berechnung des Luftmassestroms \dot{m}_L mit ein. Die Druckdifferenz Δp des Haupt- oder Sekundär volumensstroms V_{Sek} zum Absolutdruck wird an je einer Wassersäule abgelesen. Der Absolutdruck zur Überprüfung des zulässigen Druckverhältnisses wird durch einen Präzisionsensor mit einer Messgenauigkeit von $\leq \pm 0,35\%$ gemessen und durch das Programm LabVIEW von National Instruments ausgegeben.

$$\dot{m}_L = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (5.3)$$

Der Luftvolumenstrom wird durch die Formel berechnet:

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_f} \quad (5.4)$$

Für die Dichte der Luft gilt:

$$\rho_f = 1,189 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (5.5)$$

Sowohl die Luftvolumenströme als auch die Massenströme der Partikel werden für jede Messung neu eingestellt. Bei der Auswertung der Versuche wurde der Massenanteil jedes der 3-Modellpartikel sowohl im Grobgut als auch im Feingut bestimmt. Dazu wurden die im Grob- oder Feingut enthaltenen Modellpartikel durch Sieben und anschließend durch Sichtung im Schwebekennlinienprüfstand getrennt. Die Masse der im Grob- oder Feingut enthaltenen Modellpartikel wurde durch Wiegen bestimmt. Zur Auswertung der Ergebnisse standen zwei Waagen zur Verfügung, eine Feinwaage der Firma ACCULAB (ALC 310.3) mit einer Genauigkeit von 0,001 g bei einem Maximalgewicht von 300 g und eine Waage der Firma Sartorius (ISI 10) mit einer Genauigkeit von 0,005 g bei einer maximalen Belastung von 150kg.

6 Ergebnisse der Trennversuche

Es wurden drei Versuchsreihen mit je 15 Betriebspunkten durchgeführt. Die Versuchsreihen wurden anhand des in Tabelle 13 dargestellten Versuchsrasters erstellt, so dass ein direkter Vergleich aller Messungen möglich ist. Die Geometrie, die Beladung und der Massenanteil der Spelzen-Modellpartikel P6 blieben bei allen Versuchsreihen konstant, während die Massenanteile der Korn-Modellpartikel P8 und Bruchkorn-Modellpartikel P2 variierten. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Das in Tabelle 13 abgebildete Versuchsraster zeigt die Einstellungen des Sekundär volumenstroms \dot{V}_{Sek} auf der waagrechten, die Einstellungen des Primär volumenstroms \dot{V}_{Pri} auf der senkrechten Achse der Tabelle. Der im Mittelteil der Tabelle angegebene Hauptvolumenstrom \dot{V}_{H} ergibt sich aus dem in der Formel (5.2) angegebene Verhältnis des Primär- und Sekundär volumenströmen \dot{V}_{Sek} zum angegebenen Hauptvolumenstrom \dot{V}_{H} .

Tabelle 13: Versuchsraster der Versuchsreihen

		$\dot{V}_{\text{Sek}} \text{ [m}^3/\text{h]}$		
		0	100	150
$\dot{V}_{\text{Pri}} \text{ [m}^3/\text{h]}$	100		200	250
	150	150	250	300
	200	200	300	350
	250	250	350	400
	300	300	400	-
	350	350	-	-

Die Beladung bezieht sich bei jeder der drei Versuchsreihen auf den Hauptvolumenstrom \dot{V}_{H} und ist nach Formel (3.11) definiert. Der Massenanteil der Modellpartikel für Spelzen P6 ist konstant bei 0,1%, da das dem Massenanteil im realen Partikelsystem entspricht.

Tabelle 14: Versuchsparameter

	V1	V2	V3
Beladung	4,5	4,5	4,5
$X_{\text{P6}}/X_{\text{SP}} \text{ [%]}$	0,1	0,1	0,1
$X_{\text{P2}}/X_{\text{Br}} \text{ [%]}$	0,00	0,85	1,7
$X_{\text{P8}}/X_{\text{K}} \text{ [%]}$	99,9	99,05	98,2

Durch die Ergebnisse der Versuchsreihen soll der Einfluss des Bruchkornanteils, des Sekundär volumenstroms \dot{V}_{Sek} und der Geometrie auf den Abscheidegrad der Modellpartikel η_M für Korn $\eta_{M,K}$, Bruchkorn $\eta_{M,Br}$ und Spelzen $\eta_{M,SP}$ untersucht werden.

Der Abscheidegrad ist die jeweilige Masse i im Feingut $m_{F,i}$ zum Aufgabegut (s. Formel (6.1)):

$$\eta_i = \frac{m_{F,i}}{m_A} * 100 \quad \text{mit } i = K, Br, Sp \quad (6.1)$$

Die im nachfolgenden Kapitel aufgezeigten Abscheidegrade beziehen sich auf die Masse des Modellpartikels im Feingut. Die Massen wurden wie in Kapitel 5.2 beschrieben ermittelt.

6.1 Einfluss des Bruchkornanteils auf den Abscheidegrad

Der Einfluss der Modellpartikel für Bruchkorn auf die Trennleistung des Windsichters nicht-konventioneller Bauart wird im folgenden Kapitel untersucht, da die Sichtanalyse (Kapitel 3.6.4) einen Einfluss von Bruchkorn zeigt.

In der Abb. 47 wird der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Modellpartikel für Spelzen zum Hauptvolumenstrom \dot{V}_H aufgetragen. Der Sekundär volumenstrom \dot{V}_{Sek} für die abgebildeten Messpunkte ist Null, damit entspricht der Hauptvolumenstrom \dot{V}_H dem Primär volumenstrom \dot{V}_{Pri} .

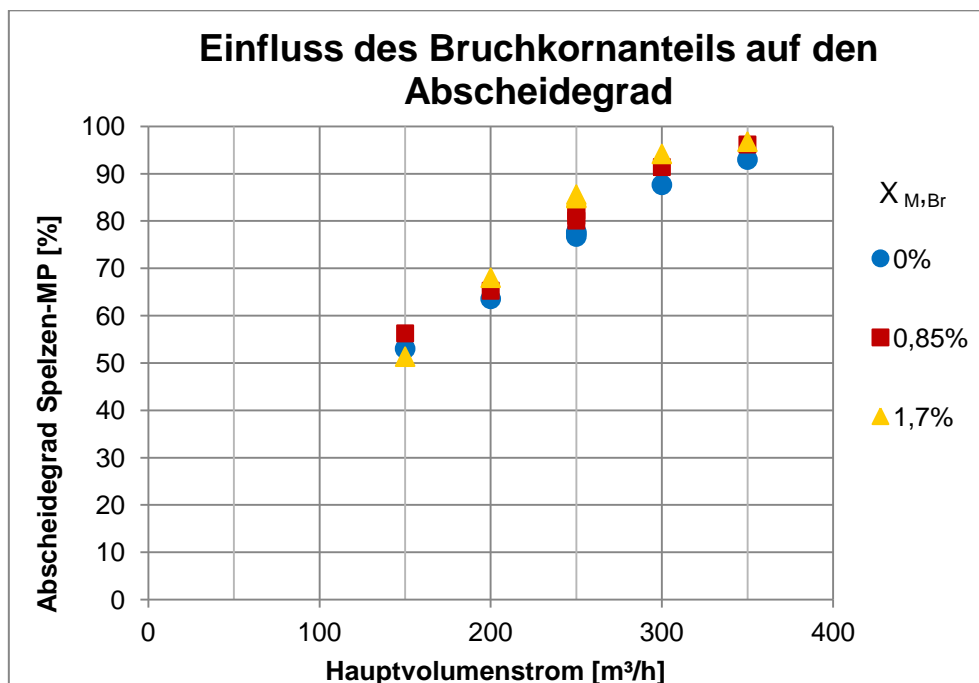


Abb. 47: Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel

Anhand der Abb. 47 erkennt man, dass der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Spelzen-Modellpartikel durch die Zugabe der Bruchkorn-Modellpartikel tendenziell verbessert wird. Außerdem ist erkennbar, dass bei

steigendem Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel auch der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Spelzen-Modellpartikel steigt. Durch die Erhöhung des Massenanteils der Bruchkorn-Modellpartikel steigt die Anzahl der Partikel, so dass das Volumen der Feststoffschüttung bei gleichbleibender Masse deutlich zunimmt. Im Verhältnis zum Volumen hat sich der Strömungsquerschnitt A verkleinert. Da der Hauptvolumenstrom \dot{V}_H konstant bleibt, erhöht sich die Fluidgeschwindigkeit v_f (s. Formel (6.3)). Mit der erhöhten Fluidgeschwindigkeit werden vermehrt leichte Partikel ausgetragen, weshalb der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Modellpartikel für Spelzen zunimmt.

$$\dot{V}_F = A * v_f \quad (6.2)$$

$$v_f = \frac{\dot{V}_F}{A} \quad (6.3)$$

Neben dem verbesserten Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Spelzen-Modellpartikel tritt auch ein verringerter Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Korn-Modellpartikel auf. Im realen Partikelsystem entsteht ein verringerter Kornverlust und somit eine Gewinnmaximierung für den Landwirt. Das Ziel ist ein Kornverlust von $< 0,1\%$. Diese Tendenz ist in Abb. 48 beim Hauptvolumenstromen $\dot{V}_H \leq 300 \text{ m}^3/\text{h}$ zu erkennen. Der Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Modellpartikel für Korn verringert sich aufgrund der Partikel-Partikel Wechselwirkungen bei einem $\dot{V}_H = 350 \text{ m}^3/\text{h}$. Durch die Erhöhung des Bruchkornanteils erhöhen sich die Wechselwirkungen, die Partikel verlieren an kinetischer Energie und werden als Grobgut ausgetragen. Je größer die Partikel desto stärker sind die Wechselwirkungen, weshalb dieser Effekt keinen Einfluss auf die Spelzen-Modellpartikel hat. Somit ergibt sich bei höherem Bruchkornanteil ein geringerer Kornverlust bei höherem Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel $\eta_{M,SP}$.

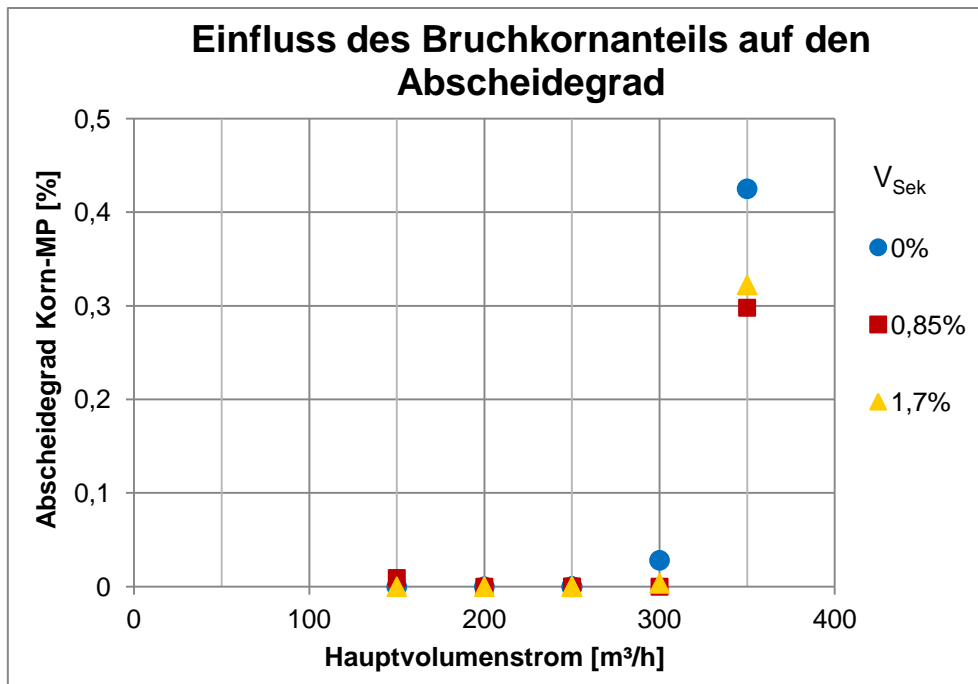


Abb. 48: Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel

Die Erhöhung des Massenanteils der Bruchkorn-Modellpartikel hat einen verbesserten Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Spelzen mit einem gleichzeitig verringerten Kornverlust zur Folge. Die Ergebnisse machen deutlich, dass mit dem 3-Modellpartikel-System bessere Ergebnisse als mit dem 2-Modellpartikel-System erzielt werden. Die Bruchkorn Modellpartikel spielen eine wichtige Rolle bei den Wechselwirkungen des Stoffsystems.

6.2 Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad

Der Sekundär volumenstrom \dot{V}_{Sek} strömt durch den Verteilerkegel, um das Aufgabegut im Fließbett zu entmischen. Der Primär volumenstrom \dot{V}_{Pri} trägt anschließend die leichten Partikel, die im Fließbett oben schwimmen, aus. Das Ziel ist, dass durch das Fließbett der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Spelzen-Modellpartikel verbessert wird, bei einem Kornverlust kleiner 0,1%. In diesem Kapitel wird der Einfluss des Sekundär volumenstroms V_{Sek} auf den Abscheidegrad der Modellpartikel für Korn $\eta_{M,K}$, Bruchkorn $\eta_{M,Br}$ und Spelzen $\eta_{M,SP}$ betrachtet.

In Abb. 49 ist der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Modellpartikel für Spelzen bei variierenden Sekundär volumenströmen dargestellt. Der Massenanteil der Modellpartikel für Spelzen beträgt 1,7%.

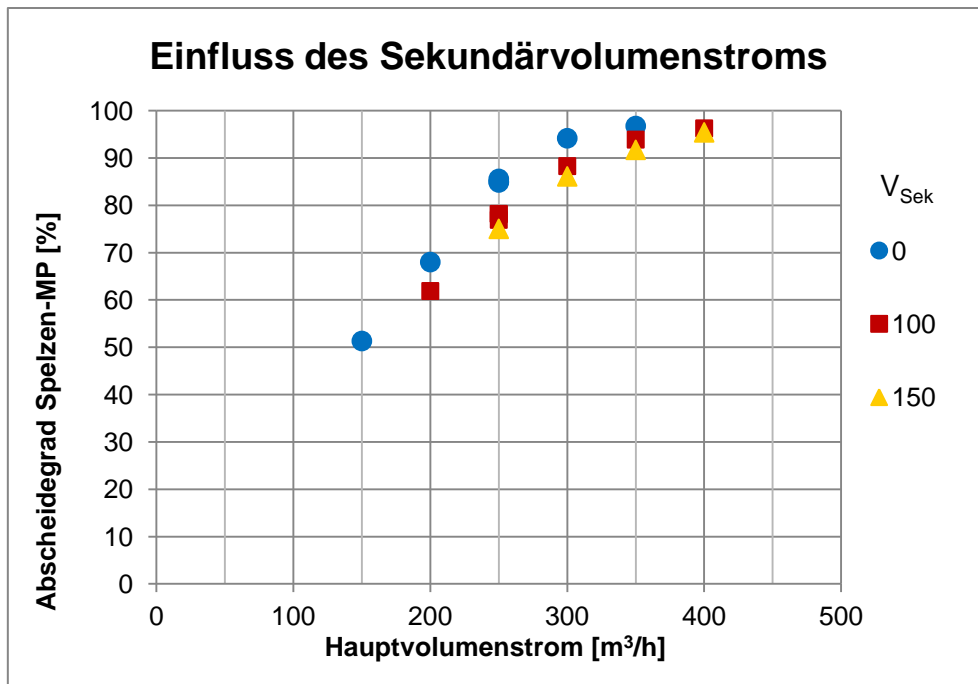


Abb. 49: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel

Bei einem Hauptvolumenstrom von $\dot{V}_H = 250 \frac{m^3}{h}$ liegt der Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ ohne Sekundär volumenstrom bei $\eta_{M,SP} = 85,2\%$ und mit dem Sekundär volumenstrom von $\dot{V}_{Sek} = 100 \frac{m^3}{h}$ verringert sich der Abscheidegrad um $\eta_{M,SP} = 7,4\%$ und mit einem Sekundär volumenstrom $\dot{V}_{Sek} = 150 \frac{m^3}{h}$ um $\eta_{M,SP} = 10,2\%$. Anhand dieser Ergebnisse bei $\dot{V}_H = 250 \frac{m^3}{h}$ ist eine Tendenz zu erkennen.

Die folgende Abbildung (Abb. 50) zeigt den Einfluss des Sekundär volumenstroms \dot{V}_{Sek} bei minimalem und maximalem Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel.

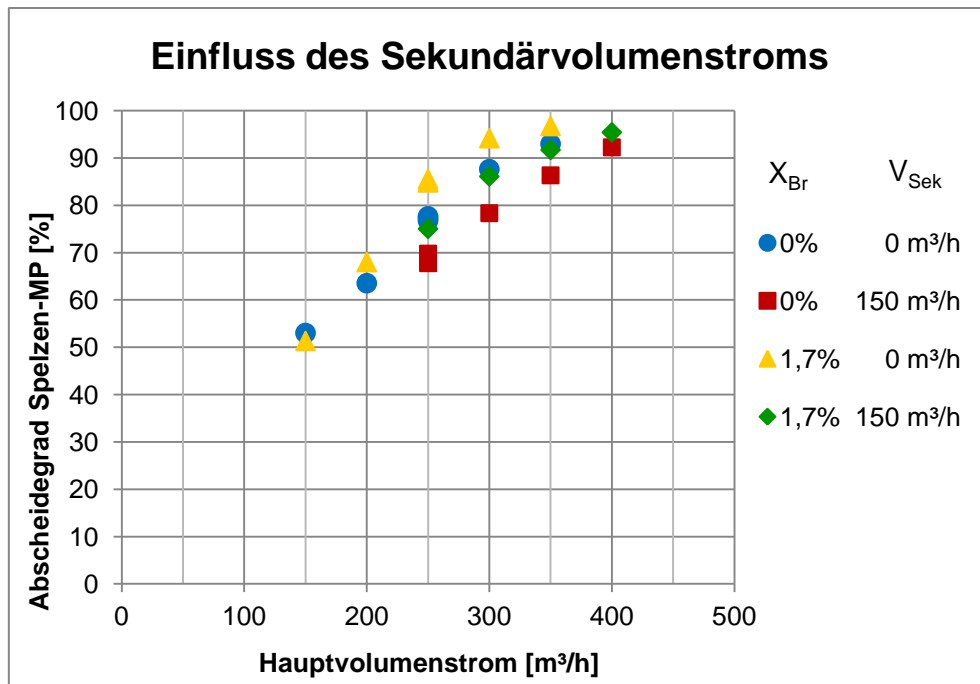


Abb. 50: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel

Vergleicht man die Abscheidegrade $\eta_{M,SP}$ der Messreihen ohne Bruchkorn-Modellpartikel wird eine tendenzielle Verschlechterung der Abscheidegrade $\eta_{M,SP}$ deutlich. Diese Tendenz ist auch bei den Messreihen mit einem Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel von 1,7% zu beobachten.

Sowohl in Abb. 49 als auch in Abb. 50 verschlechtert der Sekundär volumenstrom V_{Sek} tendenziell den Abscheidegrad $\eta_{M,SP}$ der Modellpartikel für Spelzen. Ein Grund für die Verschlechterung des Abscheidegrads $\eta_{M,SP}$ für Spelzen-Modellpartikel ist, dass die Modellpartikel durch die gestiegene Fluidgeschwindigkeit v_f an die Fließbettberandung (Abb. 43, e) geschleudert werden. Durch den Kontakt mit der Fließbettberandung verlieren die Modellpartikel an kinetischer Energie und werden daher mit dem Grobgut ausgetragen.

In Abb. 51 ist der Einfluss des Sekundär volumenstroms V_{Sek} auf den Abscheidegrad $\eta_{M,Br}$ der Bruchkorn-Modellpartikel grafisch dargestellt. Der Sekundär volumemstrom wird für einen hohen Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel von 1,7% variiert, da man erst ab diesem Massenanteil eine Tendenz erkennen kann.

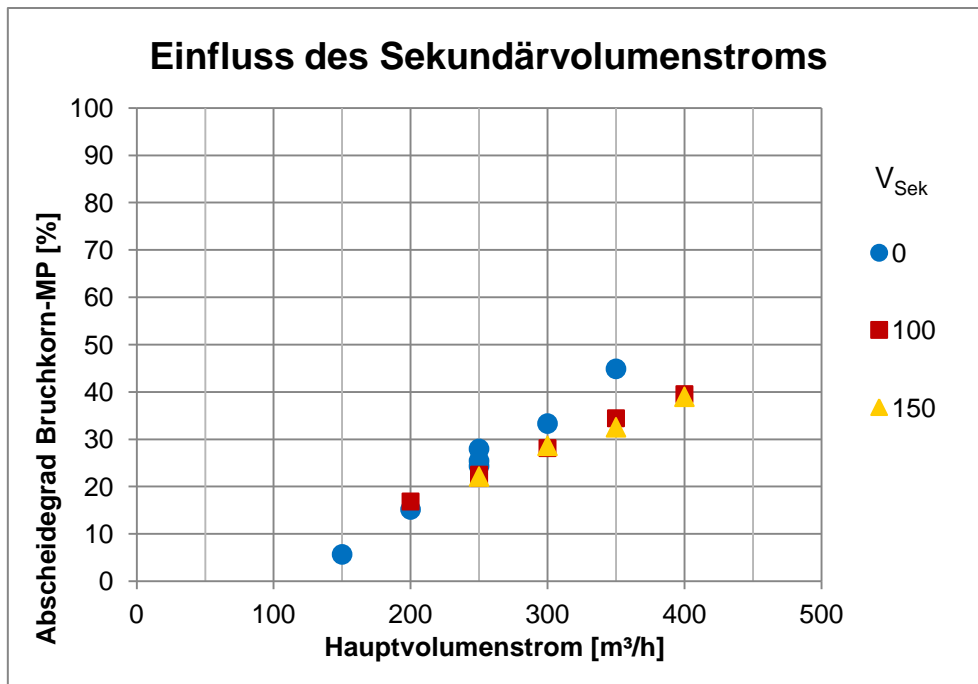


Abb. 51: Einfluss des Sekundär volumenstroms auf den Abscheidegrad der Bruchkorn-Modellpartikel

Der Abscheidegrad $\eta_{M,Br}$ der Bruchkorn-Modellpartikel verringert sich durch den Sekundär volumenstrom V_{Sek} , wie auch bei den Spelzen-Modellpartikeln. Die Bruchkorn-Modellpartikel sind schwerer als die Spelzen-Modellpartikel und werden somit erst bei höheren Volumenströmen ausgetragen. Eine signifikante Verschlechterung des Abscheidegrads $\eta_{M,Br}$ der Bruchkorn-Modellpartikel ist daher erst bei einem Hauptvolumenstrom $\dot{V}_H = 350 \frac{m^3}{h}$ zu erkennen (Abb. 50).

Der Einfluss des V_{Sek} auf den Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Korn-Modellpartikel ist grafisch durch Abb. 52 und Abb. 53 dargestellt.

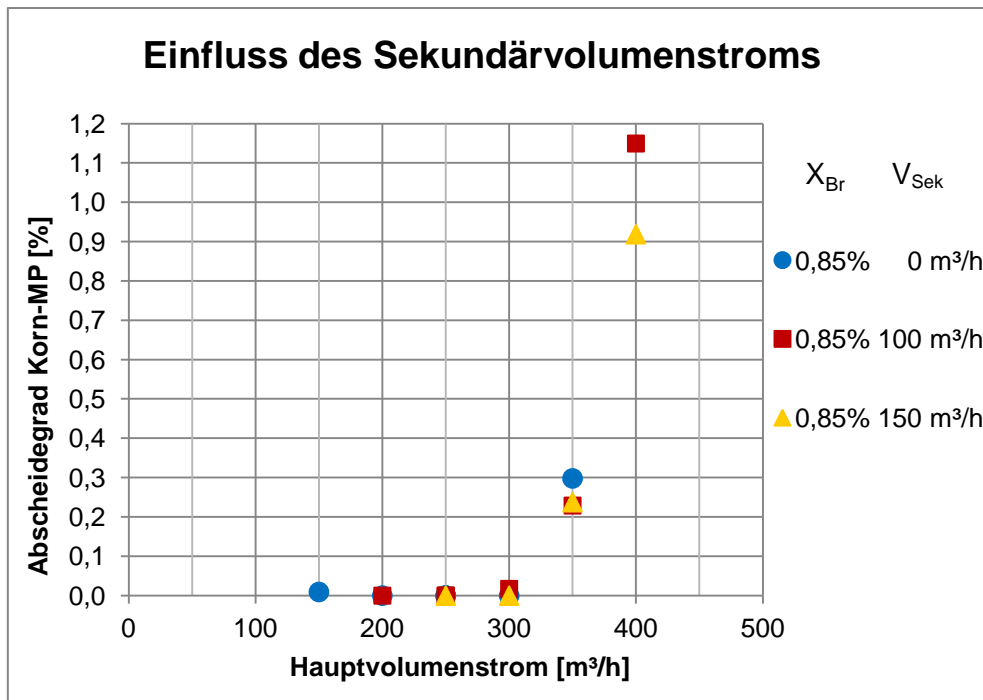


Abb. 52: Einfluss des Sekundärstroms auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel

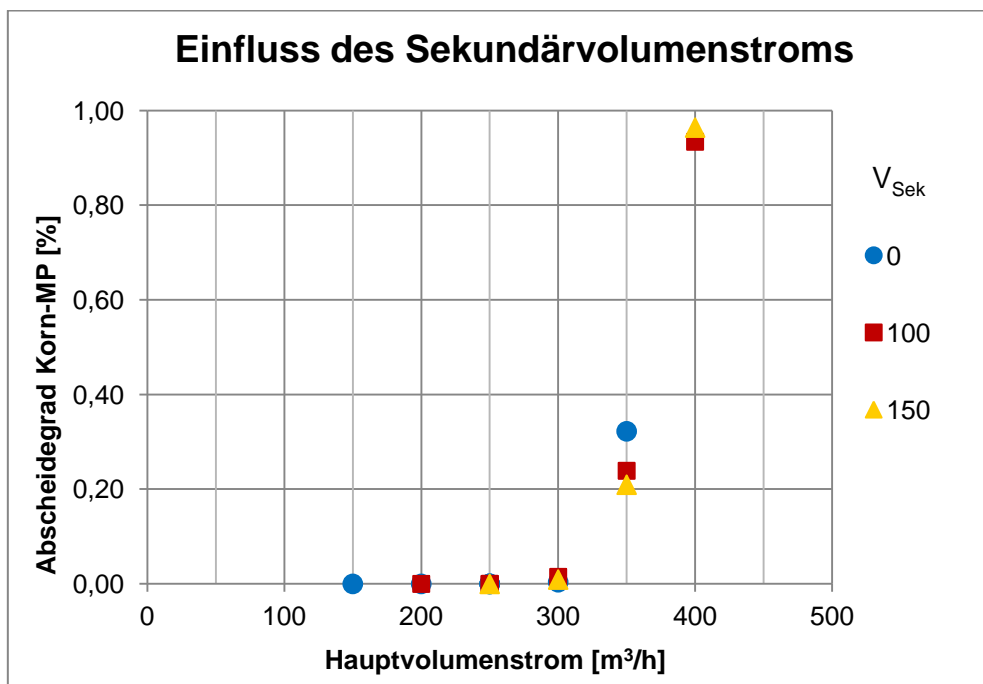


Abb. 53: Einfluss des Sekundärstroms auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel

Anhand der Grafiken wird deutlich, dass sowohl bei einem Massenanteil von $X_{Br} = 0,85\%$ der Bruchkorn-Modellpartikel wie auch beim Massenanteil von $X_{Br} = 1,7\%$ ein Einfluss auf den Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Korn-Modellpartikel vorhanden ist (Abb. 50, Abb. 52). Aufgrund von

erhöhten Partikel-Partikel Wechselwirkungen durch die Zugabe der Bruchkorn-Modellpartikel werden die Korn-Modellpartikel erst bei einem Hauptvolumenstrom $\dot{V}_H > 300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ausgetragen. Ziel ist ein Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Korn Modellpartikel $< 0,1\%$, daher sind Hauptvolumenströme $\dot{V}_H = 300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ wirtschaftlich nicht sinnvoll. Sowohl in Abb. 52 als auch in Abb. 53 sinkt der Abscheidegrad $\eta_{M,K}$ der Korn-Modellpartikel durch den Massenanteil der Bruchkorn-Modellpartikel bei Hauptvolumenströmen $\dot{V}_H > 300$.

6.3 Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad

Durch die Ergebnisse in Kapitel 6.1 wird deutlich, dass mit der Geometrie des Windsichters nicht konventioneller Bauweise gute Trennergebnisse erzielt werden. Auch bei Mischungen mit einem hohen Bruchkornanteil wird bei dieser Geometrie ein guter Abscheidegrade η erzielt. Bei dieser Geometrie wurde den Innenkegel (Abb. 44 (g)) durch einen zylindrischen Einbau (Abb. 43) ersetzt (s. Kapitel 5.1). Um den Einfluss der minimal modifizierten Geometrie zu untersuchen wird ein Vergleich der aktuellen Messergebnisse mit den Ergebnissen von Radkowitsch (8) durchgeführt.

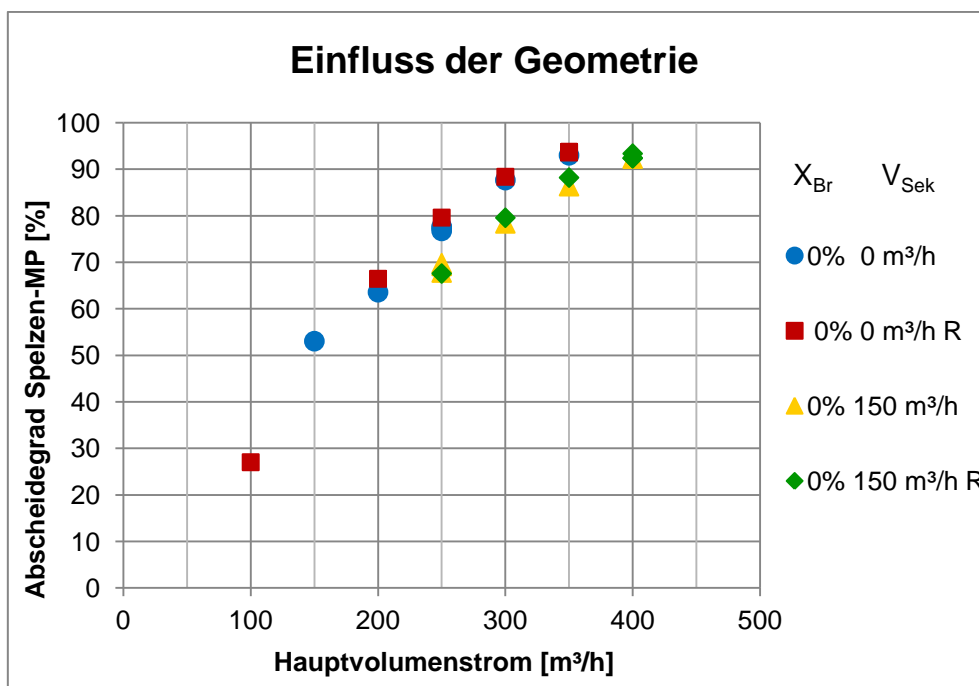


Abb. 54: Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad der Spelzen-Modellpartikel

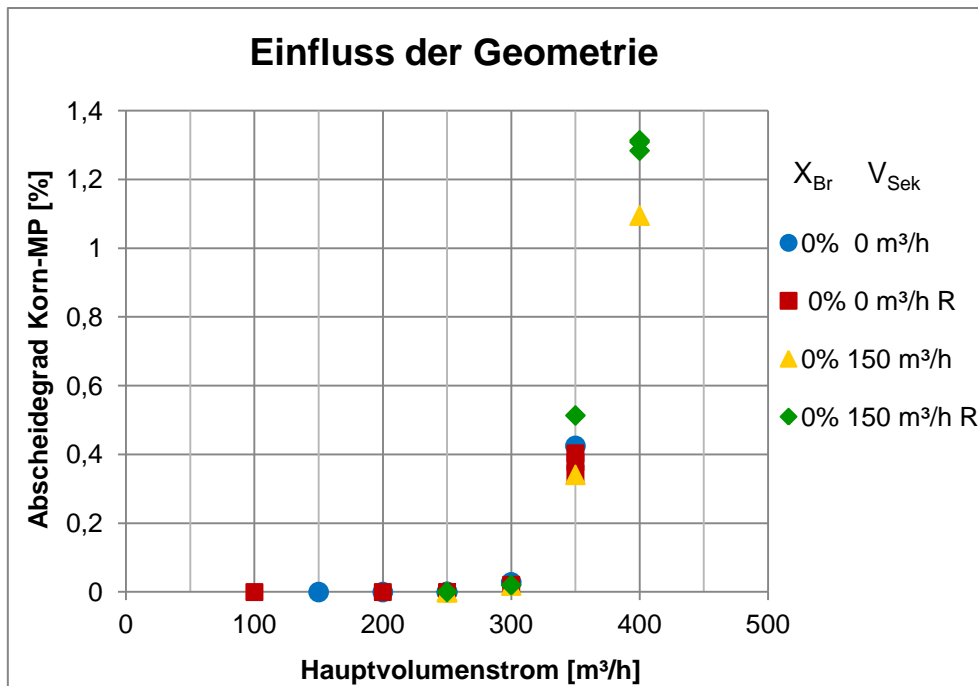


Abb. 55: Einfluss der Geometrie auf den Abscheidegrad der Korn-Modellpartikel

Die Versuche von Radkowitzsch (8) sind in den Diagrammen mit „R“ gekennzeichnet. Anhand der Abscheidegrade der Spelzen- und Korn-Modellpartikel (Abb. 54 und Abb. 55) wird deutlich, dass die Messergebnisse aufgrund der geringen Schwankungen reproduzierbar sind. Die größten Abweichungen ergeben sich beim Kornverlust bei einem Hauptvolumenstrom von $\dot{V}_H = 350 \text{ m}^3/\text{h}$ und einem Sekundärstrom von $\dot{V}_{Sek} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$, da sich die Form der Fließbettteilung bei hohen Luftvolumenströmen stärker auf die Strömung des Sekundärstroms auswirkt.

In Kapitel 6.2 konnte eine Verschlechterung des Abscheidegrads $\eta_{M,SP}$ der Spelzen-Modellpartikel durch den Einfluss des Sekundärstroms \dot{V}_{Sek} festgestellt werden. Durch Einstellen des Sekundärstroms \dot{V}_{Sek} prallen die leichten Modellpartikel an die Fließbettberandung des Windsichters nicht-konventioneller Bauart und gelangen durch den Verlust kinetischer Energie ins Grobgut. Durch eine Erhöhung der Trennzone (Abb. 43) können sich die Partikel frei entmischen, um ein optimales Trennergebnis zu erzielen.

6.4 Trenngrad

Neben der Beschreibung des Gesamtabscheidegrads wurde auch der Trenngrad durch die Siebanalyse ermittelt (s. Abb. 30). Es wurde ausschließlich der Trenngrad der Bruchkorn-Modellpartikeln berechnet, da diese aufgrund ihrer Schwebeseigenschaften (s. Kapitel 3.6) Bruchkorn abbilden. Nach der Trennung im Windsichter nicht-konventioneller Bauart wurde die Größenverteilung der im Grobgut enthaltenen Bruchkorn-Modellpartikel durch eine Siebanalyse bestimmt.

Es wurden drei Versuchsreihen bei verschiedenen Volumenströmen durchgeführt (Tabelle 15). Jede Versuchsreihe wurde drei Mal gemessen, der Mittelwert der Messungen ist in der Abb. 56 grafisch dargestellt.

Tabelle 15: Versuchsparameter der Trenngradbestimmung

	V1	V2	V3
V_H [m ³ /h]	250	350	400
V_{Pri} [m ³ /h]	250	250	250
V_{Sek} [m ³ /h]	0	100	150

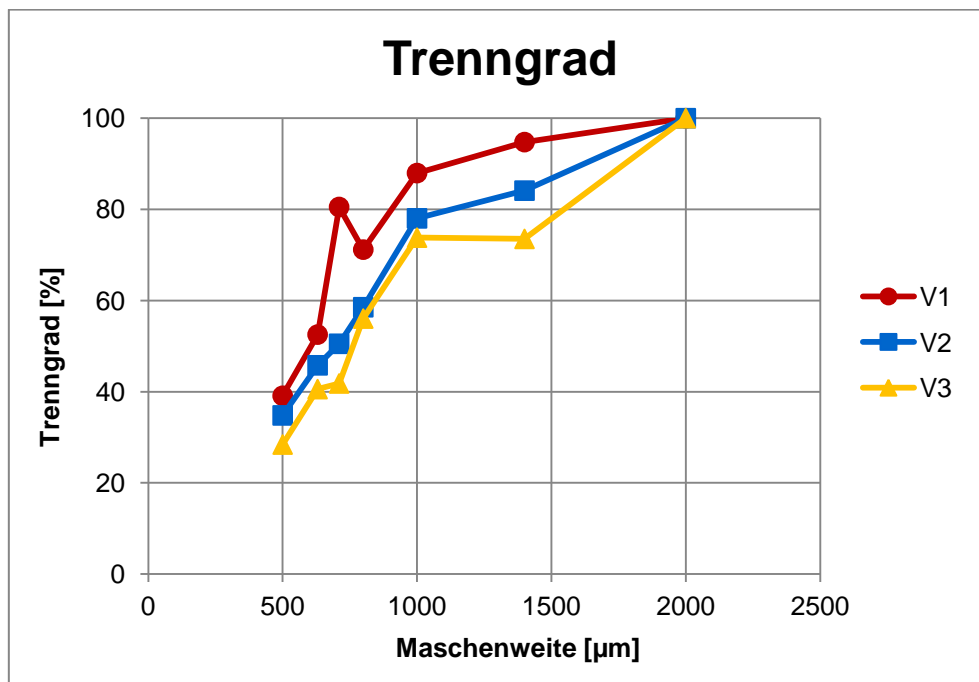


Abb. 56: Trenngrad der Bruchkorn-Modellpartikel

Tendenziell zeigen alle drei Versuche ähnliche Steigungen des Trenngrads auf. Der Grenzkorndurchmesser x_t erhöht sich minimal bei den Versuchen V1, V2 und V3.

Tabelle 16: Grenzkorndurchmesser

Versuchsreihe	$x_{t,50}$ [μm]
V1	578
V2	692
V3	762

Anhand der in Tabelle 16 veranschaulichten Werte der Grenzkorndurchmesser x_t wird deutlich, dass die Kurven kaum voneinander abweichen. Das bedeutet, dass der Trenngrad auch bei hohen Luftvolumenströmen konstant bleibt und somit eine gleichbleibende Trennleistung erreicht wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung eines Windsichters nicht-konventioneller Bauart untersucht werden. Da das Naturprodukt Getreide aufgrund hygienischer und messtechnischer Gesichtspunkte nicht verwendet werden kann, wurden die Messungen anhand von Modellpartikeln durchgeführt.

Das natürliche Stoffsystem besteht aus den drei Komponenten Korn, Bruchkorn und Spelzen. Aufgrund von Voruntersuchungen wurde ein 2-Modellpartikel-System bestehend aus Korn- und Spelzen-Modellpartikeln verwendet. Um den Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung eines Windsichters nicht-konventioneller Bauart zu untersuchen wurden Versuche zur Ermittlung eines idealen Bruchkorn-Modellpartikels durchgeführt. Dazu wurden bei 10 unterschiedlichen Modellpartikeln der Durchmesser, die Dichte, die Partikelgrößenverteilung und die aerodynamischen Eigenschaften untersucht. Der ermittelte Bruchkorn-Modellpartikel wurde in das 2-Modellpartikel-system implementiert.

Mit dem entwickelten 3-Modellpartikel-System wurde der Einfluss des Bruchkorns auf die Trennleistung des Windsichter nicht-konventioneller Bauart untersucht. Es wurden drei Versuchsreihen mit je 15 Messpunkten mit variierenden Luftvolumenströmen durchgeführt. Bei der Versuchsreihe eins bestand das Modellpartikel-System nur aus Korn- und Spelzen-Modellpartikeln, bei der Versuchsreihe zwei wurde ein geringer Massenanteil Bruchkorn und bei der Versuchsreihe drei ein höherer Massenanteil Bruchkorn hinzugefügt.

Die im Windsichter nicht-konventioneller Bauart durchgeführten Versuche ergaben, dass mit dem 3-Modellpartikel-System bessere Trennleistungen als mit dem 2-Modellpartikel-System erzielt wurden. Durch den Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel stieg der Abscheidegrad der Spelzen tendenziell, während der Kornverlust sank. Dabei ist erkennbar, dass mit der Einführung des 3-Modellpartikel-System im Vergleich zum 2-Modellpartikel-System die angestrebten höheren Abscheidegrade erzielt werden können.

Zur Optimierung der Trennung wurde das Aufgabegut durch den Sekundärstrom im Fließbett fluidisiert und entmischt. Anhand der Versuche erkennt man jedoch mit dem Einsetzen des Sekundärstroms eine Verschlechterung der Trennergebnisse. Ursache der Verschlechterung ist, dass die Modellpartikel durch den Sekundärstrom an die Fließbettberandung (Abb. 43, e) geschleudert werden und durch den Kontakt mit der Fließbettberandung kinetische Energie verlieren und daher mit dem Grobgut ausgetragen werden. Um dies zu verhindern muss die Trennzone (Abb. 43) erhöht werden, damit sich die Partikel frei entmischen und ein optimales Trennergebnis erzielt werden kann.

Bei den Versuchen von Radkowitzsch (8) war der Fließbetteiler ein auf der Spitze stehender Kegel (Abb. 44). Um eine optimale Strömung des Sekundärstroms zu erhalten wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Änderung der Geometrie vorgenommen. Dazu wurde anstelle des Kegels ein zylindrischer Fließbetteiler (Abb. 43) eingebaut.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die veränderte Geometrie bei hohen Luftvolumenströmen ein tendenziell geringerer Kornverlust auftritt. Mit dem entwickelten 3-Modellpartikel-System und der Änderung der Geometrie ist eine verbesserte Trennleistung im Vergleich zum 2-Modellpartikel-System zu erkennen. Der Einfluss der Bruchkorn-Modellpartikel steigert den Abscheidegrad der Spelzen und senkt den Kornverlust.

Die Arbeit konnte nachweisen, dass durch eine weitere Änderung der Geometrie die Effizienz deutlich erhöht werden kann. Für den zukünftigen Anwender ergibt sich durch die erhöhte Kornausbeute und die erhöhte Reinheit ein deutlicher wirtschaftlicher Nutzen.

Literaturverzeichnis

1. **Schmid, Max.** *Inbetriebnahme eines Windsichter Prüfstandes zur Getreidereinigung und Untersuchung des Strömungsfeldes und Trennverhaltens.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 21.12.2012.
2. **Stieß, Matthias.** *Mechanische Verfahrenstechnik 1. 2., neubearbeitete Auflage.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1995. ISBN 3-540-59413-2.
3. —. *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1. 3. vollst.neu bearb. Aufl.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2009. ISBN 978-3-540-32552-9.
4. **Bochum, Ruhr-Universität.** RUB. [Online] [Zitat vom: 2014. 11 27.] http://www.fvt.rub.de/intern/PHP/Wirbelschicht-Fachlabor%20WS10_11.pdf.
5. **Kraume, Matthias.** *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik, Grundlagen und apparative Umsetzung, 2. Aufl.* Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-25148-1.
6. **Piesche, Manfred.** *Vorlesungsskript Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik.* Stuttgart : Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, 2012.
7. **Scheel, Maren.** *Experimentelle Untersuchung zum Abscheideverhalten eines Windsichters nicht-konventioneller Bauart zur Getreidereinigung.* Stuttgart : Universität Stuttgart, IMVT, 03.04.2013.
8. **Radkowitz, Florian.** *Experimentelle und analytische Untersuchung zur Charakterisierung des Trennverhaltens eines nicht-konventionellen Windsichters zur Getreidereinigung.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 20.03.2014.
9. **Schopfer, Bernhard.** *Experimentelle Untersuchung des Reinigungsverhaltens eines modifizierten Windsichters Bauart zur Getreidereinigung.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 28.03.2013.
10. **Koch, Davina.** *Optimierung eines Prüfstandes sowie experimentelle Untersuchungen zum Abscheideverhalten eines Getreidereinigers nicht-konventioneller Bauart.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 17.10.2013.
11. **Palmberg, Moritz.** *Numerische Untersuchung zum Trennverhalten eines Windsichter-Fließbettkonzepts zur Getreidereinigung.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 18.11.2013.
12. [Online] http://orgprints.org/18135/4/FG15_Brosch%C3%BCre_Qualit%C3%A4t_erhalten_Risiken_vermeiden_101115.pdf.
13. **Böttinger, Stefan.** *Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage im Mähdrescher.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 1993.