

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



**Rohrschneckenförderer
mit Produktpfropfen für
die explosionstechnische
Entkopplung**

F-05-1201

Projekt F-05-1201

Rohrschneckenförderer mit Produktpfropfen für die explosionstechnische Entkopplung

Dr. Albrecht Vogl
Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit
und Arbeitsmedizin e.V.

Mannheim, 18.08.2017

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung / Abstract	1
1. Einleitung	3
1.1. Allgemeines	3
1.2. Zielsetzung	3
2. Versuchsaufbau	5
3. Schüttgüter	9
3.1. Explosionskenngrößen der verwendeten Stäube	9
3.2. Fließeigenschaften der verwendeten Schüttgüter	10
4. Rohrschneckenförderer	13
4.1. Versuche zur Pfropfenbildung	13
4.2. Explosionsversuche	16
4.2.1. Versuchsdurchführung	16
4.2.2. Ergebnisse ohne Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer	17
4.2.3. Ergebnisse mit Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer	19
5. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	23
6. Literaturangaben	27
Anhang	29
– Technische Zeichnung des Rohrschneckenförderers	
– Mikroskopische Betrachtung der Schüttgüter (Quelle: Schüttgutuntersuchung, Projekt-nummer: 100065-03, Fa. AZO)	
– Ermittlung der Fließfähigkeit durch Scherversuche (Quelle: Schüttgutuntersuchung, Projekt-nummer: 100065-03, Fa. AZO)	
– Beispielhafte Messsignale (Druck und Flamme):	

Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsprojekt der FSA (Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V.) sollte die Frage geklärt werden, ob Schneckenförderer für den Transport von Schüttgütern gleichzeitig als Schutzmaßnahme für die explosionstechnische Entkopplung verwendet werden können, um die Übertragung einer Staubexplosion vom Entstehungsort in angeschlossene Anlagenteile zu verhindern.

Es wurde ein Rohrschneckenförderer verwendet, in dessen Förderschnecke ein Schüttgutpfropfen erzeugt werden kann. Das angewandte Prinzip beruht auf der Entfernung eines kleinen Teils des Schneckenganges, so dass an dieser Stelle ein Schüttgutpfropfen entstehen kann, der die Explosionsübertragung verhindern soll.

Die Wirksamkeit dieses Funktionsprinzips wurde durch Explosionsversuche im Großmaßstab mit unterschiedlich heftig ablaufenden Staubexplosionen und in Abhängigkeit verschiedener Schüttguteigenschaften untersucht.

Die Mindestzündenergie MZE des Staubes und die Fließeigenschaften, charakterisiert durch den dimensionslosen Fließfähigkeitsfaktor ffc , spielen dabei eine wichtige Rolle.

Es konnte gezeigt werden, dass ein Rohrschneckenförderer auch ohne Schüttgutpfropfen für die explosionstechnische Entkopplung verwendet werden kann, wenn die Mindestzündenergie des Staubes $MZE \geq 100 \text{ mJ}$ beträgt. Wenn der Staub jedoch eine geringere Mindestzündenergie besitzt ($5 \text{ mJ} < MZE < 100 \text{ mJ}$), ist zusätzlich ein Schüttgutpfropfen erforderlich.

Ausreichend große Schüttgutpfropfen konnten durch die Entfernung von 1,5 bis 2 Schneckengängen erzielt werden, wenn die Schüttgüter kohäsive Eigenschaften besaßen. In den experimentellen Untersuchungen war die Pfropfenbildung erfolgreich, wenn der Fließfähigkeitsfaktor $ffc < 5$ betrug.

Abstract

A research project was carried out by FSA (Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V.) to answer the question whether a modified screw conveyor for the conveying of bulk material may also be used as a safety device to prevent explosion transmission from the origin of the dust explosion to connected plant components.

A tubular screw conveyor was used in which a plug of bulk material can be produced as choke. The principle is based on the removal of a few turns of the conveying screw so that a plug of bulk material should always remain as a choke to prevent an explosion transmission.

The effectiveness of the modified screw conveyor was investigated in large scale explosion tests with dust explosions of different violence taking into consideration specific properties of the bulk material.

The Minimum Ignition Energy MIE of the dust and the flow properties characterized by the dimensionless flow factor ffc play an important role.

It has been shown, that a tubular screw conveyor can be used for explosion isolation even without a plug of bulk material as choke if the Minimum Ignition Energy is $MIE \geq 100$ mJ.

However, if the Minimum Ignition Energy is in the range of $5 \text{ mJ} < MIE < 100 \text{ mJ}$ a plug of bulk material as choke is necessary in addition to prevent explosion transmission.

A sufficiently large plug of bulk material as choke was obtained by the removal of 1,5 to 2 turns of the screw, if the bulk material had cohesive properties. In the experimental investigations, the generation of a plug of bulk material as choke was successful with a dimensionless flow factor $ffc < 5$.

1. Einleitung

1.1. Allgemeines

Schneckenförderer dienen dem Transport von Schüttgütern, die staubförmig, körnig oder faserig ebenso wie in Form von Granulaten vorliegen können. Sie werden in industriellen Betrieben in unterschiedlichen Bauarten und Baugrößen in großer Anzahl eingesetzt.

Die eigentliche Förderschnecke befindet sich in einem trog- oder rohrförmigen Gehäuse. Der Schüttguttransport beruht dabei auf dem Prinzip der archimedischen Schraube. Durch die Schwerkraft und Reibung mit der Trog- oder Rohrwandung wird verhindert, dass sich das Schüttgut mit der Förderschnecke drehen kann. Es wird kontinuierlich weitertransportiert. Ist der Befüllungsgrad jedoch zu hoch gewählt, so kann die Wandreibung zu klein sein. In diesem Fall rotiert das Schüttgut lediglich quer zur Schneckenachse und wird nicht weiter transportiert. Je nach technischer Auslegung können Förderschnecken für den horizontalen, schrägen und sogar für den vertikalen Transport eingesetzt werden.

1.2. Zielsetzung

Bei den geförderten Produkten handelt es sich vielfach um staubförmige oder staubhaltige Schüttgüter, die brennbar sind. Die Schneckenförderer werden somit in Anlagenbereichen betrieben, die durch explosionsfähige Staub/Luft-Gemische gefährdet sind und gegen die gefährlichen Auswirkungen von Staubexplosionen geschützt werden müssen.

Eine wichtige konstruktive Explosionsschutzmaßnahme stellt dabei die explosionstechnische Entkopplung dar, die eine Explosionsübertragung in angeschlossene Anlagenbereiche verhindern soll [1-4].

Die Zielsetzung der vorliegenden Untersuchungen besteht nun darin, Schneckenförderer durch technische Modifikationen zusätzlich zu ihrer Funktion als Stetigförderer auch für die explosionstechnische Entkopplung nutzbar zu machen.

Hierfür wurde ein Prinzip aufgegriffen, das erstmals von Wheeler [1, 5] beschrieben wurde. Es beruht darauf, dass aus einer Rohrförderschnecke ein kleiner Teil des Schneckengangs herausgetrennt wird (Bild 1 oben), so dass an dieser Stelle ein Schüttgutpfropfen entsteht (Bild 1 Mitte), der eine mögliche Explosionsübertragung verhindert (Bild 1 unten).

Dieser Schüttgutpfropfen sollte auch nach dem Leerfahren des Rohrschneckenförderers noch bestehen bleiben. Die maximale Länge des Schüttgutpfropfens muss so bemessen werden, dass einerseits eine Explosionsübertragung verhindert, andererseits jedoch der Förderprozess nicht unzulässig beeinträchtigt wird.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden Wirksamkeit und Grenzen einer derartigen explosionstechnischen Entkopplung in Abhängigkeit von Schüttguteigenschaften, Explosionsdruck und Pfropfenlänge (Anzahl der entfernten Schneckengänge) untersucht.

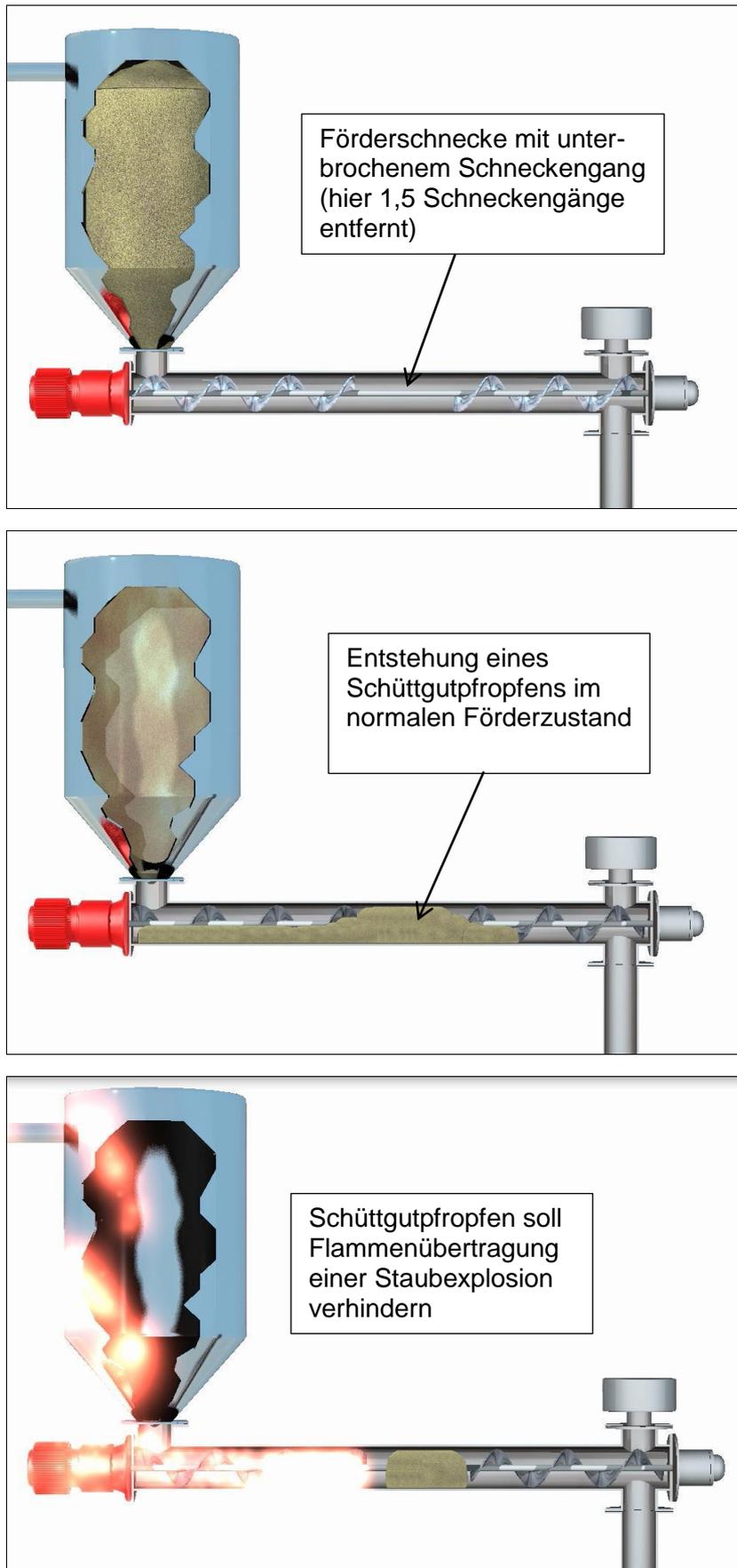


Bild 1: Prinzip der explosionstechnischen Entkopplung mit Rohrschneckenförderer und internem Schüttgutpfropfen

2. Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde ein Rohrschneckenförderer in explosionsfester Bauweise für 10 bar Überdruck von der Firma AZO hergestellt (siehe Tabelle 1). Er wurde mit zwei Anschlussmöglichkeiten für die Produktaufgabe und einem Schüttgutauslauf ausgestattet (siehe Bild 2). Durch den ersten Flanschanschluss (nahe Antriebsmotor) erfolgte die Produktaufgabe mit Hilfe einer regelbaren Dosierschleuse. Der zweite Flanschanschluss wurde über ein kurzes Rohrstück mit einem druckentlasteten Explosionsbehälter verbunden, in dem die gewünschten Staubexplosionen entzündet wurden. Der Schüttgutauslauf erfolgte schließlich in einen flexiblen Schüttgutbehälter.

Die Volumina der Explosionsbehälter betragen $V_1 = 1 \text{ m}^3$ oder $V_2 = 26 \text{ m}^3$.

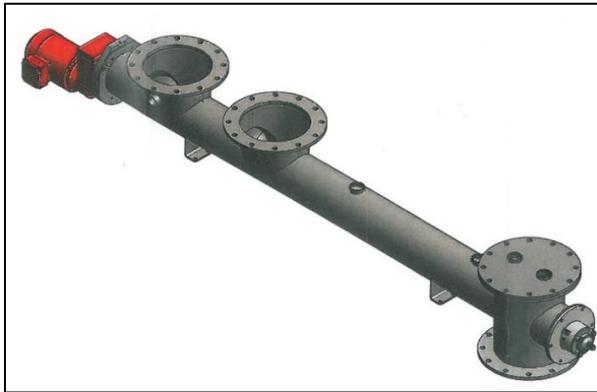


Bild 2: Prinzipbild des Rohrschneckenförderers



Bild 3: Förderschnecke mit einem entfernten Schneckengang (Pfpfenlänge 180 mm)

Der Rohrschneckenförderer konnte wahlweise mit drei verschiedenen Förderschnecken ausgerüstet werden. Sie unterschieden sich dadurch, dass mittig 1, 1.5 oder 2 Schneckengänge herausgetrennt waren (siehe Beispiel in Bild 3), was mit einer Steigung der Schneckenwendel von 180 mm eine maximale mittlere Pfpfenlänge von 180 mm, 270 mm oder 360 mm ergibt. Somit konnte der Einfluss der Pfpfenlänge auf die Wirksamkeit der

explosionstechnischen Entkopplung untersucht werden. Unmittelbar nach der Unterbrechung des Schneckengangs war die Steigung der Schneckenwendel von 180 mm auf 210 mm erhöht, um einen guten Abzug des Schüttgutes zur Produktabgabe hin zu gewährleisten. Das Prinzipbild des Versuchsaufbaus ist in Bild 4 zu sehen, die praktische Realisierung kann den Bildern 5 und 6 entnommen werden.

Tabelle 1: Technische Daten des Rohrschneckenförderers HFS 200 (Fa. AZO)

Gesamtlänge (ohne Antriebsmotor)	3000 mm
Innendurchmesser des Rohrschneckenförderers	200 mm
Außendurchmesser der Schneckenwendel	180 mm
Durchmesser der Schneckenwelle	50 mm
Schneckensteigung vor Pfropfen	180 mm
Schneckensteigung nach Pfropfen	210 mm
Mittlere Spaltbreite zwischen Förderschneckenumfang und Gehäuseinnenwandung	10 mm
Länge von Produktaufgabe 1 bis Produktauslauf	2400 mm
Länge von Produktaufgabe 2 bis Produktauslauf	1800 mm
Leistung Flachgetriebemotor	3,0 kW
Motordrehzahl (50 Hz)	120 U/min
Förderleistung	5.5 t/h (Schüttgewicht 0.7 kg/dm ³)
Druckstoßfestigkeit (Überdruck)	10 bar

Die Explosionsdrücke in Explosionsbehälter, Verbindungsleitung und Rohrschneckenförderer wurden mit piezoelektrischen Druckaufnehmern (p_1 bis p_5) gemessen. In der Verbindungsleitung und im Rohrschneckenförderer vor und nach dem Schüttgutpfropfen wurden IR-Flammenmelder (F1 bis F3.3) installiert. Da unmittelbar vor und nach dem Schüttgutpfropfen mit einer hohen Verschmutzung der IR-Flammenmelder gerechnet werden muss, wurden an diesen Positionen aus Gründen der Redundanz jeweils zwei IR-Flammenmelder installiert (F2.1/F2.2 und F3.1/F3.2).

Der Schüttgutauslauf wurde zusätzlich mit einer Videokamera überwacht, um einen möglichen Flammenaustritt eindeutig zu identifizieren. Die Anordnung der Messstellen kann Bild 7 entnommen werden.

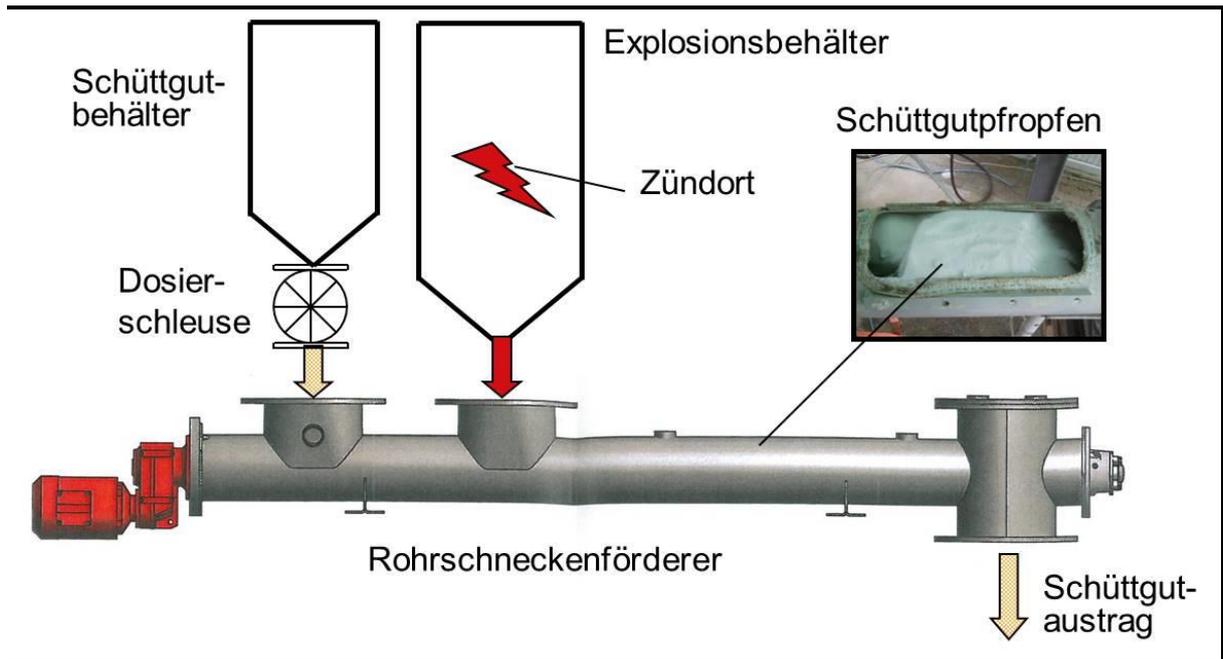


Bild 4: Prinzipbild des Versuchsaufbaus

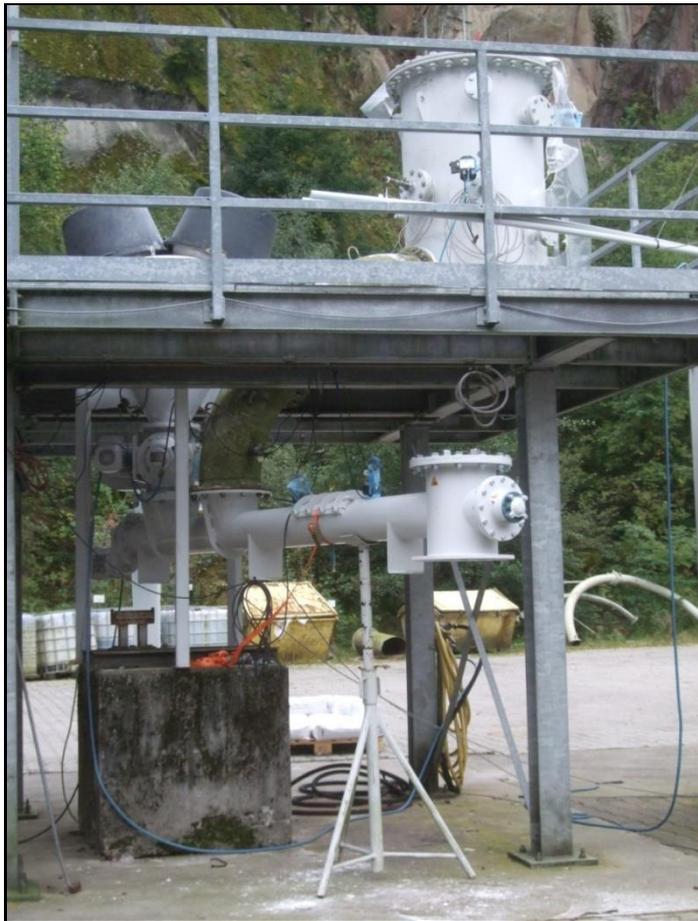


Bild 5: Praktische Realisierung des Versuchsaufbaus mit Rohrschneckenförderer, der über einen Rohrbogen mit dem darüber angeordneten 1 m³ - Explosionsbehälter verbunden ist



Bild 6: Praktische Realisierung des Versuchsaufbaus mit 26 m³ - Explosionsbehälter. Im Vordergrund sind die Rohrförderschnecke und die Schüttgutaufgabe zu sehen.

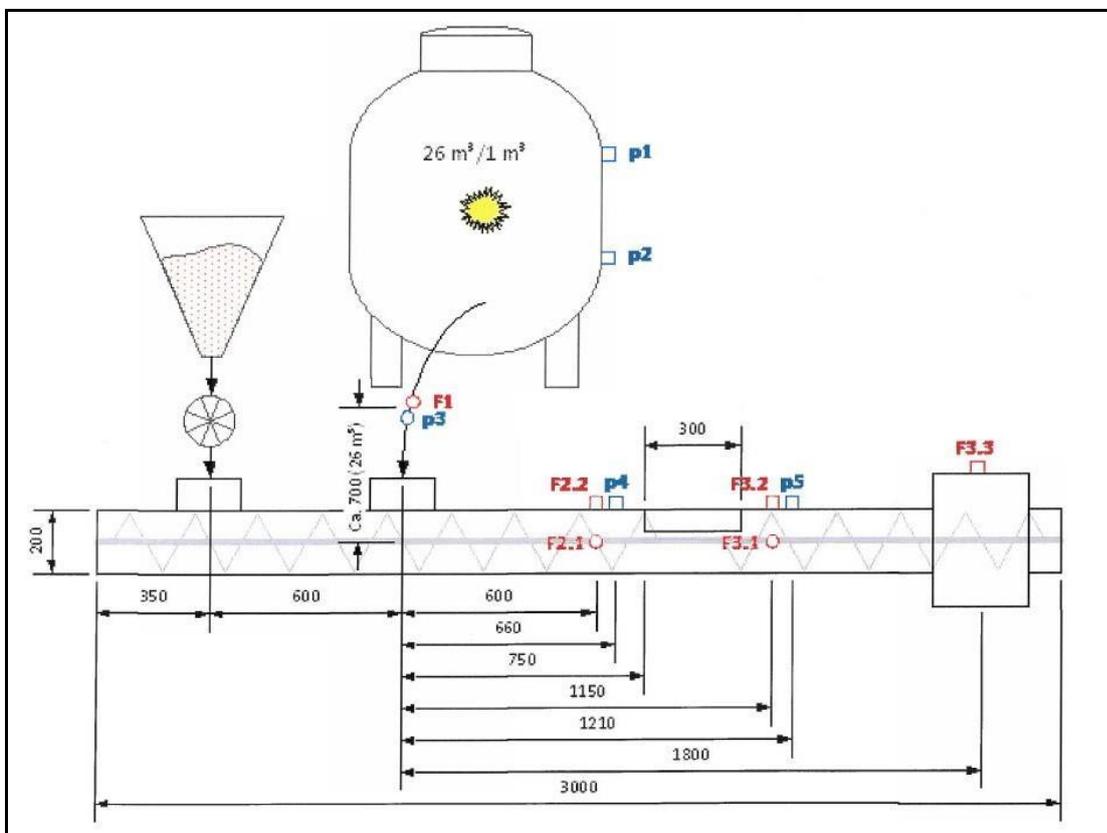


Bild 7: Positionierung der Druck- und Flammenmelder

3. Schüttgüter

Für die explosionstechnischen Untersuchungen des modifizierten Rohrschneckenförderers wurden staubförmige organische Schüttgüter verwendet, die sich hinsichtlich der Explosionskenngrößen, Korngrößen, Schüttdichten und Fließeigenschaften unterschieden.

3.1 Explosionskenngrößen der verwendeten Stäube

Die Explosionskenngrößen der Stäube wurden im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) ermittelt [6,7]. Es wurden hierfür keine genormten Prüfmuster hergestellt, sondern die Stäube wurden mit Ausnahme des Kristallzuckers im Anlieferungszustand (Urmuster) untersucht, in dem die Stäube auch für die Explosionsversuche im Großmaßstab Verwendung fanden. Die Maisstärke wurde bereits in getrocknetem Zustand (Restfeuchtegehalt < 3%) luftdicht verschlossen angeliefert und in diesem Zustand auch in den Explosionsversuchen verwendet.

Getreide in Form von Weizenkorn, das aufgrund der Korngröße im Millimeterbereich selbst nicht explosionsfähig ist, wurde in die Betrachtungen mit einbezogen. In diesem Fall sollten Erkenntnisse gewonnen werden, ob mit Getreidekörnern ebenfalls Pfropfen erzeugt werden können, um die Übertragung einer Staubexplosion des Feinstaubanteils zu verhindern.

Tabelle 2: Explosionskenngrößen der verwendeten Stäube (Urmuster)

Schüttgut	Medianwert [μm]	p_{max} [bar]	K_{St} [$\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	MZE [mJ]	MZT [$^{\circ}\text{C}$]
Maisstärke (Typ 3411, getrocknet)	14	9,4	200	> 3 / \leq 10	380
Cellulose (Arbocel BE 600-10-TG)	17	9,2	175	> 5 / \leq 10	400
Malzstaub	20	8,4	150	> 5 / \leq 10	370
Pudierzucker (Südzucker)	31	7,9	140	> 5 / \leq 10	410
Sprühmagermilchpulver	60	8,8	125	> 30 / \leq 100	460
Holzmehl Jeluxyl HAHO 120/f	72	8,5	160	> 50 / \leq 100	420
Weizenmehl (Typ 550)	51	7,5	80	>100 / \leq 500	410
Kristallzucker (Südzucker EEC2)	424	3,8*	12*	> 10^6	-
Weizenkorn	(3-4 mm)	nicht explosionsfähig			

* Kristallzucker: Kenngrößen nur der Feinstaubanteile < 63 μm

3.2 Fließeigenschaften der verwendeten Schüttgüter

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass sich auch durch die Entfernung von bis zu zwei Gewindegängen aus der Förderschnecke nicht mit allen Schüttgütern die gewünschten Pfropfen erzeugen lassen. Teilweise waren nur mehr oder weniger starke Schüttgutanhäufungen zu beobachten (z.B. mit Weizenkorn, Kristallzucker oder Maisstärke). Die Untersuchungen konzentrierten sich daher zunächst auf die Fragestellung, mit welchen Schüttgütern die gewünschten Pfropfen im Rohrschneckenförderer erzeugt werden können und welche Schüttguteigenschaften hierfür von relevanter Bedeutung sind.

Für die Charakterisierung der Fließeigenschaften der Schüttgüter wurden im Labor der Firma AZO verschiedene Kenngrößen ermittelt. Es handelte sich um die Kenngrößen Stoffdichte, Schüttdichte, Böschungswinkel, dynamische Fließenergie, Fluidisierung, Permeabilität, Kompressibilität, Fließfähigkeit (ff_c -Wert) und Wandreibung (siehe Tabelle 3).

Diese Kenngrößen charakterisieren u.a. den Einfluss, den Kohäsionskräfte und mechanisches Verhaken der Partikel untereinander auf das Fließverhalten besitzen.

Die beste Korrelation mit den Ergebnissen der später durchgeführten Versuche zur Pfropfenbildung ergab sich jedoch mit dem Fließfähigkeitsfaktor ff_c , auf den sich daher die nachfolgenden Betrachtungen beschränken.

Der in Tabelle 3 angegebene dimensionslose Fließfähigkeitsfaktor ff_c nach Jenike [8] ergibt sich aus der Division von Verfestigungsspannung σ_1 und einaxialer Druckfestigkeit σ_2 :

$$ff_c = \sigma_1 / \sigma_2 \quad (1)$$

mit

σ_1 - Verfestigungsspannung

σ_2 - Druckfestigkeit

Beide Kenngrößen, Verfestigungsspannung und Druckfestigkeit, können aus Scherverversuchen ermittelt werden [9, 10]. Je größer der Fließfähigkeitsfaktor ff_c ist, d.h. umso kleiner die Druckfestigkeit im Verhältnis zur Verfestigungsspannung ist, desto besser fließt ein Schüttgut. Die Fließfähigkeit kann wie nachfolgend angegeben bewertet werden:

$ff_c < 1$	verhärtet, sehr schlecht fließendes Schüttgut
$1 < ff_c < 2$	sehr kohäsiv
$2 < ff_c < 4$	kohäsiv
$4 < ff_c < 10$	leicht fließend
$10 < ff_c$	frei fließend

Der Einfluss der Dichte auf die Fließeigenschaften findet im Fließfähigkeitsfaktor ff_c jedoch keine Berücksichtigung.

Bei Untersuchungen von Schüttgütern mit unterschiedlicher Dichte empfiehlt Schulze die Fließfähigkeit mithilfe der dichtegewichteten Fließfähigkeit ff_p zu vergleichen [11, 12], die sich wie nachfolgend angegeben berechnet:

$$ff_p = ff_c \cdot \rho_b / \rho_w \quad (2)$$

mit

ff_c - Fließfähigkeit nach Jenike

ρ_b - Dichte des Schüttgutes

ρ_w - Dichte von Wasser

Tabelle 3: Stoff und Fließeigenschaften der verwendeten Schüttgüter

Schüttgut	Stoffdichte [g/cm ³]	Schüttdichte* [kg/l]	Schüttdichte ρ_b ** [kg/l]	Böschungswinkel α [°]	Schüttwinkel [°]	Fluidisierungsverhalten AR-Wert	Dynam. Fließenergie SE-Wert	Kompresibilität	Fließfähigkeitsfaktor ff _c	Dichtegewichteter Fließfähigkeitsfaktor ff _p
Pudermilch (Südzucker)	1,61	0,60	0,640	23,8	132,5	6,72	11,1	hoch	2,08	3,34
Weizenmehl (Typ 550)	1,43	0,54	0,566	25,3	129,3	20,2	5,08	mäßig	2,80	4,00
Cellulose (Arbocel BE 600-10-TG)	1,84	0,32	0,299	29,2	121,6	6,25	13,3	mäßig	2,79	5,13
Sprühmagermilchpulver	1,25	0,56	0,541	10,0	160,0	6,03	6,97	mäßig	3,73	4,66
Holzmehl Jeluxyl HAHO 120/f	1,46	0,23	0,245	17,5	145,0	2,09	12,3	hoch	4,62	6,74
Malzstaub	1,98	0,22	0,250	22,3	135,3	0,972	7,12	hoch	6,40	12,67
Kristallzucker (Südzucker EEC2)	1,60	0,88	0,902	8,5	162,9	0,839	2,86	gering	8,60	13,76
Maisstärke (Typ 3411)	1,59	0,64	0,577	3,8	172,4	11,7	5,71	gering	9,78	15,55
Weizenkorn	1,37	0,70	0,723	3,8	172,4	-	-	mäßig	11,00	15,07

* Schüttdichte nach FEM 2 481

4. Rohrschneckenförderer

4.1 Versuche zur Pfropfenbildung

Die Versuche zur Pfropfenbildung wurden mit horizontaler Einbaulage des Rohrschneckenförderers begonnen. Zunächst kam die Förderschnecke zum Einsatz, aus der mittig 1,5 Schneckengänge entfernt wurden. Die Versuchsdurchführung erfolgte derart, dass nach kurzzeitigem normalem Förderbetrieb die Produktzufuhr abgestellt und der Rohrschneckenförderer leer gefahren wurde. Der Schüttgutpfropfen sollte jedoch bestehen bleiben. Oberhalb des unterbrochenen Schneckengangs war eine Inspektionsöffnung installiert um die Schüttgutanhäufung visuell beurteilen zu können. Eine Schüttgutanhäufung wurde dann als „Pfropfen“ gewertet, wenn das Schüttgut den gesamten Querschnitt verschloss.



Bild 8: Schüttgüter mit und ohne Pfropfenbildung: Keine Pfropfenbildung mit leichtfließender Maisstärke (oben) und Pfropfenbildung mit kohäsivert Cellulose (unten)

In Bild 8 sind zwei Fälle beispielhaft dargestellt. Bei anderthalb fehlenden Schneckengängen ist ein vollständig ausgebildeter Pfropfen von Cellulose zu sehen, wie er ca. 60 Sekunden nach Abschaltung der Schüttgutzufuhr bei weiterlaufender Förderschnecke bestand. Mit der leichtfließenden Maisstärke hingegen konnte unter gleichen Bedingungen nur eine lockere Anhäufung festgestellt werden.

Nach erfolgreicher Pfropfenbildung wie im Falle der Cellulose wurden die Versuche mit nur noch einem fehlenden Schneckengang wiederholt. Wenn jedoch kein Pfropfen entstand, so wurden die Versuche mit der Förderschnecke fortgesetzt, aus der zwei Schneckengänge entfernt wurden.

Bei horizontalem Betrieb der Rohrförderschnecke und 1,5 fehlenden Schneckengängen konnten mit Malzstaub ($ff_c = 6.4$) und Schüttgütern mit höherem Fließfähigkeitsfaktor als Malzstaub ($ff_c > 6.4$) keine Pfropfen erzeugt werden. Eine gute Pfropfenbildung war hingegen noch mit Holzmehl festzustellen, dessen Fließfähigkeitsfaktor ($ff_c = 4.62$) sich im Grenzbereich zwischen kohäsiven und leichtfließenden Schüttgütern befindet (siehe Abschnitt 3.2). Es bildeten sich ferner Pfropfen mit allen weiteren Schüttgütern, deren Fließfähigkeitsfaktor unterhalb des Wertes von Holzmehl lag ($ff_c < 4.62$).

Die Versuche mit nur einem fehlenden Schneckengang und horizontaler Lage des Rohrschneckenförderers führten mit keinem der untersuchten Schüttgüter zum Erfolg.

Es entstanden zwar starke Schüttgutanhäufungen, jedoch verblieb auf der Oberseite stets ein Freiraum gegenüber der Gehäusewand. Andererseits entstanden auch bei Verwendung der Förderschnecke mit 2 entfernten Schneckengängen keine Schüttgutpfropfen, wenn der Fließfähigkeitsfaktor $ff_c > 6,4$ betrug.

In weiteren Versuchen wurde geprüft, ob durch eine geringe Steigung des Rohrschneckenförderers in Förderrichtung eine Verbesserung der Pfropfenbildung erzielt werden kann. Die Förderschnecke wurde hierfür mit geringen Steigungswinkeln von $\alpha = 5^\circ$ bis 20° in Förderrichtung betrieben.

Mit den zuvor negativ getesteten Schüttgütern waren durch diese Maßnahme zwar stärker ausgeprägte Schüttgutanhäufungen zu beobachten als zuvor, jedoch entstanden noch immer keine Pfropfen, die den gesamten Rohrquerschnitt verschlossen.

Eine Ausnahme stellte die leichtfließende getrocknete Maisstärke ($ffc = 9.78$) dar, bei der ab einem Steigungswinkel von $\alpha \geq 5^\circ$ und einer Förderschnecke mit 2 fehlenden Schneckengängen eine Pfropfenbildung zu beobachten war. Mit Steigungswinkeln $\alpha \geq 10^\circ$ war im verwendeten Rohrschneckenförderer jedoch ein Zurückfließen der Maisstärke gegen die Förderrichtung zu beobachten, so dass keine akzeptable Förderung mehr erfolgen konnte. Um diesem negativen Effekt zu begegnen, wäre eine Erhöhung der Drehzahl

erforderlich gewesen, die mit dem vorhandenen Schneckenförderer jedoch nicht gefahren werden konnte.

Mit den kohäsiven Schüttgütern Cellulose, Milchpulver und Holzmehl waren hingegen bereits Schüttgutpfropfen mit nur 1 fehlenden Schneckengang zu erzielen, wenn der Steigungswinkel $\alpha = 15^\circ$ bzw. $\alpha = 20^\circ$ betrug.

Tabelle 4: Ergebnisse der Versuche zur Bildung von Schüttgutpfropfen bei Verwendung einer Förderschnecke mit 1,5 fehlenden Schneckengängen.

Schüttgut	ff _c	ff _p	Pfpfen mit Steigung α				
			0°	5°	10°	15°	20°
Puderzucker	2,08	3,34	ja	ja	ja	ja	ja
Cellulose	2,79	5,13	ja	ja	ja	ja ¹⁾	ja ¹⁾
Weizenmehl	2,80	4,00	ja	ja	ja	ja	ja
Milchpulver	3,73	4,66	ja	ja	ja	ja	ja ¹⁾
Holzmehl	4,62	6,74	ja	ja	ja	ja	ja ¹⁾
Malzstaub	6,40	12,67	nein	nein	nein	nein	nein
Kristallzucker	8,60	13,76	nein	nein	nein	nein	nein
Maisstärke	9,78	15,55	nein	nein ²⁾	nein	nein	nein
Weizenkorn	11,00	15,07	nein	nein	nein	nein	nein

¹⁾ Pfpfen entstand unter diesen Bedingungen auch mit nur 1 fehlenden Schneckengang

²⁾ Pfpfen entstand mit 2 fehlenden Schneckengängen

Die Entfernung von 1,5 bis maximal 2 Schneckengängen aus der Förderschnecke hat sich als optimal herauskristallisiert. Hiermit gelingt einerseits die Erzeugung der gewünschten Pfpfen, die auch nach Abschaltung der Produktzuführung im Schneckenförderer zumindest für eine gewisse Zeitdauer bestehen bleiben (> 1 Minute) und andererseits ist keine relevante Beeinträchtigung der normalen Schüttgutförderung zu erwarten.

Die gewünschten Pfpfen konnten mit allen Schüttgütern erzeugt werden, deren Fließfähigkeitsfaktor $ff_c < 5$ bzw. deren dichtegewichteter Fließfähigkeitsfaktor $ff_p < 7$ betrug,

wie Tabelle 4 entnommen werden kann. Der dichtegewichtete Fließfähigkeitsfaktor ff_p ergibt dabei eine bessere Trennschärfe zwischen den Schüttgütern mit und ohne Pfropfenbildung. Im normalen Förderbetrieb hingegen, d.h. ohne Unterbrechung der Schüttgutzufuhr, konnte mit Ausnahme von Maisstärke mit allen in Tabelle 4 aufgeführten Schüttgütern eine erfolgreiche Pfropfenbildung beobachtet werden. Mit Maisstärke entstanden Pfropfen erst dann, wenn 2 Schneckengänge entfernt wurden und der Steigungswinkel $\alpha \geq 5^\circ$ betrug.

4.2 Explosionsversuche

Die Wirksamkeit des Rohrschneckenförderers mit Schüttgutpfropfen für die explosions-technische Entkopplung sollte mit Hilfe von Staubexplosionsversuchen im Großmaßstab untersucht werden.

Der Rohrschneckenförderer wurde hierfür an druckentlastete Behälter mit Volumina von $V_1 = 1 \text{ m}^3$ und $V_2 = 26 \text{ m}^3$ angeschlossen, in denen mit Hilfe verschiedener Druckentlastungsflächen unterschiedlich heftige Staubexplosionen erzeugt wurden [13, 14].

4.2.1 Versuchsdurchführung

Die definierte Produktzuführung in den Rohrschneckenförderer erfolgte mit Hilfe einer regelbaren Dosierschleuse. Sie wurde so eingestellt, dass sich im Rohrschneckenförderer ein Befüllungsgrad von ca. 45 % ergab, der bei den verwendeten Schüttgütern eine optimale Förderung mit dem Rohrschneckenförderer gewährleistete.

Die Versuche wurden so gefahren, dass nach kurzzeitigem normalem Förderbetrieb von ca. 60 Sekunden die Dosierschleuse wieder abgeschaltet und die Produktzufuhr dadurch unterbrochen wurde. Auf diese Weise wurde der Rohrschneckenförderer bis auf den Schüttgutpfropfen leergefahren. Nach einer weiteren Zeitspanne von ca. 30 Sekunden erfolgte im Explosionsbehälter schließlich die Entzündung der Staubexplosion, die durch eine kurze Rohrverbindung aus dem Explosionsbehälter in den Rohrschneckenförderer übertragen wurde.

Die Staub/Luft-Gemische im Explosionsbehälter wurden in Anlehnung an die Staubwolken-erstellungsvorgang für die Kennzahlermittlung erstellt, d.h. definierte Staubmengen wurden aus unter 20 bar Überdruck stehenden Staubvorratsbehältern im Explosionsbehälter dispergiert und nach definierter Zündverzögerungszeit mit Hilfe pyrotechnischer Zünder (Zündenergie: 10 kJ) im Zentrum des Explosionsbehälters entzündet.

Die Druckentlastungsflächen wurden mit Polyethylenfolie verschlossen, deren Folienstärke so bemessen war, dass sich ein statischer Ansprechüberdruck von $p_{\text{stat}} = 0,1 \text{ bar}$ ergab.

Die reduzierten Explosionsüberdrücke p_{red} wurden durch die Verwendung unterschiedlich großer Druckentlastungsflächen im Bereich von $p_{\text{red}} = 0.12 \text{ bar}$ bis 2,4 bar variiert.

4.2.2 Ergebnisse ohne Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer

In Vorversuchen wurden die Staubkonzentrationen ermittelt, die zu einer zuverlässigen Explosionsübertragung durch den Rohrschneckenförderer führten. Hierfür wurde die eigentliche Förderschnecke aus dem Rohrschneckenförderer ausgebaut, so dass lediglich das rohrförmige Gehäuse an den Explosionsbehälter angeschlossen war. Im nächsten Schritt wurden unter gleichen Bedingungen Referenzversuche mit eingebauter Förderschnecke, jedoch noch ohne Schüttgutpfropfen durchgeführt.

Die Ergebnisse mit dem druckentlasteten 1 m³ - Explosionsbehälter und ohne Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer können Tabelle 5 entnommen werden. Hierbei befand sich der Flammenmelder F1 im Verbindungsrohr zwischen Explosionsbehälter und Förderschnecke, der Flammenmelder F2 (es wurden zur Erhöhung der Detektionssicherheit schließlich 2 Flammenmelder an dieser Stelle montiert: F2.1 und F2.2) war unmittelbar vor dem Pfropfen installiert (0.6 m nach dem Schüttguteinlauf) und der Flammenmelder F3 (F3.1 und F3.2) unmittelbar nach dem Schüttgutpfropfen (1.2 m nach dem Schüttguteinlauf). Der Abstand d zwischen Schüttguteinlauf und -auslauf betrug d = 1.8 m (siehe Bild 7).

Tabelle 5: Ergebnisse der Explosionsversuche mit druckentlastetem 1 m³ - Behälter und **Rohrschneckenförderer ohne Schüttgutpfropfen**;

Schüttgut	Vers. Nr.	c [g/m ³]	P _{red} [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	Flammenaustritt
Weizenmehl	G2	250	0.18	919	-	-	Nein
	G6	500	0.37	339	-	-	Nein
	G1	500	0.66	187	-	-	Nein
	G4	750	0.80	271	-	-	Nein
	G5	750	1.06	127	-	-	Nein
	G3	750	1.23	100	-	-	Nein
Holzmehl	H4	350	0.19	531	725	-	Nein
	H6	350	0,27	423	-	-	Nein
	H3	500	0.40	378	497	-	Nein
	H8	500	0.72	206	-	-	Nein
	H5	500	0.87	192	-	-	Nein
	H7	500	1.22	193	-	-	Nein
	H2	750	2.34	82	-	-	Nein
Puderzucker	J5	750	0.15	367	619	-	Nein
	J6	500	0.31	249	400	-	Nein
	J3	750	0.58	225	323	-	Nein
	J2	750	0.65	202	-	-	Nein
	J1	1000	0.78	181	239	415	Nein
	J4	750	1,18	213	-	-	Nein
	J7	750	2.70	71	91	95	Ja
Cellulose	O3	750	0.29	435	-	-	Nein
	O4	750	0.72	140	170	174	Ja
Maisstärke	A4	750	0.12	285	372	-	Nein
	A5	750	0.48	164	270	297	Ja

Die Explosionsversuche mit Weizenmehl und Holzmehl führten zu unerwarteten Ergebnissen, denn auch ohne Schüttgutpfropfen konnte keine Flammenübertragung durch den Rohrschneckenförderer provoziert werden. Mit Puderzucker ($5 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 10 \text{ mJ}$), der eine erheblich niedrigere Mindestzündenergie MZE als Holzmehl ($50 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 100 \text{ mJ}$) besitzt, wurde hingegen eine Flammenübertragung mit Flammenaustritt aus dem Schneckenförderer festgestellt (siehe Tabelle 5, Versuch Nr. J7).

Flammenübertragungen traten ferner mit Cellulose (Versuch Nr. O4) und mit Maisstärke (Versuch Nr. A5) auf, also mit Stäuben mit niedriger Mindestzündenergie (siehe Tabelle 2).

In weiteren Versuchen sollte der Volumeneinfluss auf die Explosionsübertragung ohne Schüttgutpfropfen untersucht werden. Durch die Vergrößerung des Explosionsraumes von 1 m^3 auf 26 m^3 nimmt der zeitliche Druckanstieg (dp/dt) bei gleichem reduziertem Explosionsüberdruck zwar ab, jedoch bleibt die Expansionsströmung der heißen Verbrennungsgase länger bestehen als im Falle des kleineren Behältervolumens. Es wurden daher ausgewählte Versuche mit Weizenmehl, Holzstaub und Maisstärke mit dem 26 m^3 - Explosionsbehälter wiederholt.

Wie aus Tabelle 6 entnommen werden kann, kam es in Verbindung mit Weizenmehl nun zu einer Flammenfortpflanzung bis zum Flammenmelder F2 und mit Holzstaub lief die Flammenfront bis zum Flammenmelder F3. Ein Flammenaustritt aus dem Rohrschneckenförderer konnte jedoch auch mit dem 26 m^3 - Explosionsbehälter nicht beobachtet werden.

Eine Ausnahme stellte der Versuch Y4 mit Weizenmehl dar. Hier trat der seltene Fall einer um ca. 100 ms zeitlich verzögerten zweiten Flammenfront auf. Wegen Verschmutzung der Flammenmelder an den Positionen F1 und F2 konnte das Signal dieser zweiten Flammenfront leider nur mit Flammenmelder F3 gemessen werden.

Die Versuche führten somit zu der Erkenntnis, dass auch ohne Schüttgutpfropfen eine Flammen- bzw. Explosionsübertragung verhindert werden kann. So gelang es selbst ohne Schüttgutpfropfen nicht, mit den Schüttgütern Weizenmehl und Holzmehl eine Flammenübertragung durch den Rohrschneckenförderer herbeizuführen.

Die Mindestzündenergie MZE dieser Stäube (Urmuster) betrug $50 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 100 \text{ mJ}$ für Holzmehl und $100 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 500 \text{ mJ}$ für Weizenmehl, jeweils gemessen mit Induktivität im Entladekreis [9]. Das Phänomen einer zweiten Flammenfront, wie in Versuch Y4 mit Weizenmehl beobachtet, tritt nur in sehr seltenen Fällen auf und ist aufgrund der Versuchserfahrung nicht reproduzierbar.

Ein Flammenübertragung ohne Vorhandensein eines Schüttgutpfropfens erfolgte hingegen mit Puderzucker ($5 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 10 \text{ mJ}$), Cellulose ($5 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 10 \text{ mJ}$) und Maisstärke ($3 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 10 \text{ mJ}$).

Tabelle 6: Ergebnisse der Explosionsversuche mit druckentlastetem 26 m^3 - Behälter und **Rohrschneckenförderer ohne Schüttgutpfropfen**;

Schüttgut	Vers. Nr.	c [g/m ³]	P _{red} [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	Flammenaustritt
Weizenmehl	X2	750	0.17	574	755	-	Nein
	X1	750	0.20	480	670	-	Nein
	X6	750	0.66	485	680	-	Nein
	X5	750	0.87	427	500	-	Nein
	X4	750	1.07	356	419	-	Nein
	X3	750	1.32	439	481	-	Nein
	Y2	750	0.13	557	840	-	Nein
	Y1	750	0.19	600	-	-	Nein
	Y5	750	0.76	341	443	-	Nein
	Y6	750	0.89	357	416	-	Nein
	Y4	750	1.15	370/-	428/-	540/~640	Ja *)
Y3	750	1.59	350	396	-	Nein	
Holzstaub	X11	300	0.19	451	516	527	Nein
	X12	300	0.27	505	559	568	Nein
	X10	300	0.58	303	352	360	Nein
	X9	300	0.77	342	374	382	Nein
	X7	480	1.71	218	253	269	Nein
	X8	480	1.93	249	277	-	Nein
	AA6	300	0.13	474	541	553	Nein
	AA3	300	0.63	385	422	-	Nein
	AA4	300	0.72	335	379	386	Nein
	AA2	300	1.51	197	219	-	Nein
AA1	300	1.61	165	210	-	Nein	
Maisstärke	Z3	300	0.36	261	333	339	Ja
	Z4	300	0.57	284	371	377	Ja
	Z2	500	1.75	161	186	190	Nein
	Z1	500	2.13	136	159	-	Nein

*) zeitlich verzögerte zweite Flammenfront

4.2.3 Ergebnisse mit Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer

Da mit den leichtfließenden Produkten Malzstaub und Maisstärke keine Schüttgutpfropfen entstanden, war in den weiterführenden Versuchen insbesondere Cellulose von großem Interesse. Die verwendete Cellulose besaß eine ähnlich niedrige Mindestzündenergie wie Maisstärke (siehe Tabelle 2), jedoch eine deutlich geringere Fließfähigkeit. Ohne Schüttgutpfropfen wurde Flammenübertragung durch den Rohrschneckenförderer festgestellt.

Für die Explosionsversuche wurde mit 1,5 entfernten Schneckengängen gearbeitet. Die Versuchsergebnisse mit 1 m^3 - Explosionsbehälter sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Im Gegensatz zu Weizenmehl lief die Explosionsflamme mit Cellulose bis zum Flammenmelder F2 unmittelbar vor dem Schüttgutpfropfen. In einem Explosionsversuch wurde auch vom Flammenmelder F3 unmittelbar nach dem Ort des Schüttgutpfropfens eine Flamme registriert, jedoch erfolgte kein Flammenaustritt aus dem Rohrschneckenförderer. Vergleichsversuche mit Maisstärke führten hingegen zum Flammenaustritt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Explosionsversuche mit druckentlastetem 1 m³ - Behälter und Rohrschneckenförderer mit Schüttgutpfropfen; 1.5 Schneckengänge entfernt; Schneckenförderer bis auf Schüttgutpfropfen leergefahren;

Schüttgut	Vers. Nr.	c [g/m ³]	P _{red} [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	Flammenaustritt
Weizenmehl	C1	750	0.18	215	-	-	Nein
	C2	500	0.21	469	-	-	Nein
	C3	500	0.42	236	-	-	Nein
	C4	750	2.96	142	-	-	Nein
	C5	750	1.65	172	-	-	Nein
	C6	750	1.56	158	-	-	Nein
	C7	750	0.85	251	-	-	Nein
Cellulose	O5	750	0.45	-	-	-	Nein
	O6	750	0.53	445	-	-	Nein
	O7	750	0.66	320	750	-	Nein
	O8	750	1.68	110	-	-	Nein
	O9	750	2.42	104	125	130	Nein
	O10	750	2.23	105	130	-	Nein
Maisstärke*)	B1	750	0.27	225	-	-	Nein
	B2	750	0.65	144	737	904	Ja
Maisstärke**)	Q1	750	0.62	550	-	-	Nein
	Q2	750	0.59	600	-	-	Nein
	Q3	750	1.02	~990	~1060	~1100	Ja

*) Maisstärke: Nur Schüttgutanhäufung, keine Pfpfenbildung

***) Maisstärke: Pfpfenbildung aufgrund veränderter Einbaulage des Rohrschneckenförderers mit 5° Steigungswinkel in Förderrichtung

Die explosionstechnischen Untersuchungen des Rohrschneckenförderers mit Schüttgutpfropfen wurden mit Cellulose und druckentlastetem 26 m³ - Behälter fortgeführt.

Die Ergebnisse können Tabelle 8 entnommen werden. Im Gegensatz zu den Versuchen mit kleinerem Explosionsbehälter pflanzte sich die Explosionsflamme aufgrund der stärkeren Expansionsströmung nun stets bis zum Flammenmelder F3 fort, der unmittelbar nach dem Ort des Schüttgutpfropfens angeordnet war (1.2 m nach Schüttguteinlauf). Es konnte jedoch kein Flammenaustritt aus der Produktabgabe beobachtet werden. Typisch hingegen ein starker Staubaustritt, wie in Bild 9 gezeigt wird.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde mit Maisstärke gearbeitet. Abweichend von den zuvor durchgeführten Versuchen wurde der Rohrschneckenförderer jedoch nicht leergefahren.

Der Befüllungsgrad des Rohrschneckenförderers betrug somit ca. 45 %. Im Bereich des unterbrochenen Schneckengangs entstand zwar kein Pfropfen, jedoch eine starke Schüttguthäufung. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 9 angegeben. Mit 1,5 entfernten Schneckengängen war in einem Versuch (Versuch Nr.: X24) ein Flammenaustritt aus dem Rohrschneckenförderer festzustellen, wie in Bild 10 zu sehen ist. Bei Wiederholung der Versuche mit 2 fehlenden Schneckengängen und somit einer größeren Schüttguthäufung war keine Flammenübertragung mehr festzustellen.

Tabelle 8: Ergebnisse der Explosionsversuche mit druckentlastetem 26 m³ - Behälter, Rohrschneckenförderer mit Schüttgutpfropfen; 1.5 Schneckengänge entfernt; Schneckenförderer bis auf Schüttgutpfropfen leergefahren; Schüttgut: Cellulose

Vers. Nr.	c [g/m ³]	P _{red} [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	Flammenaustritt
X19	300	0.15	541	587	599	Nein
X17	300	0.28	347	385	391	Nein
X13	300	0.82	-	297	302	Nein
X15	300	0.88	337	367	371	Nein
X14	300	1.09	304	329	333	Nein
X16	300	2.21	202	260	300	Nein

Tabelle 9: Ergebnisse der Explosionsversuche mit druckentlastetem 26 m³ - Behälter und Rohrschneckenförderer während normalem Förderbetrieb; Schüttgut: Maisstärke

Vers. Nr.	entfernte Wendelgänge	c [g/m ³]	P _{red} [bar]	F1 [ms]	F2 [ms]	F3 [ms]	Flammenaustritt
X23	1.5	300	0.41	337	408	442	Nein
X24	1.5	300	0.74	240	831	858	Ja
X22	1.5	300	1.62	256	-	-	Nein
X21	1.5	300	1.77	282	305	-	Nein
X20	1.5	500	3.07	191	205	-	Nein
X27	2	300	0.15	-	-	-	Nein
X28	2	300	0.27	-	-	-	Nein
X29	2	300	0.27	-	-	-	Nein
X26	2	300	0.56	955	-	-	Nein
X25	2	300	0.73	304	530	697	Nein
X30	2	500	1.49	184	-	-	Nein
X31	2	500	1.47	183	-	-	Nein

Nach jedem Explosionsversuch wurde die Förderschnecke durch die Inspektionsöffnung einer visuellen Prüfung unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass sich nach allen Explosionsversuchen keine Schüttgutrückstände bzw. Staubreste mehr im

Rohrschneckenförderer befanden. Auf Grund der Explosionsströmung der heißen Verbrennungsgase wird offenbar auch ein zuvor vollständig ausgebildeter Schüttgutpfropfen stets vollständig aus dem Rohrschneckenförderer herausgeblasen.



Bild 9: Explosionsversuch mit Cellulose ohne Flammenaustritt



Bild 10: Maisstärkeexplosion mit Flammenaustritt aus dem Rohrschneckenförderer

5. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die explosionstechnischen Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass durch die Verwendung eines Rohrschneckenförderers auch ohne Schüttgutpfropfen eine Explosionsübertragung verhindert werden kann, wenn

- die Mindestzündenergie des Staubes $MZE \geq 100$ mJ und die Explosionskenngroße $K_{St} \leq 160$ [bar·m·s⁻¹] beträgt und
- die konstruktiven Anforderungen an den Rohrschneckenförderer entsprechend Tabelle 10 erfüllt sind.

Unter den vorgenannten Bedingungen stellt die Förderschnecke eine mechanische Versperung dar, die die Explosionsfortpflanzung behindert und die Flammenfrontgeschwindigkeit reduziert. Die deflagrative Verbrennung erfährt dabei hinreichend hohe Wärmeverluste über die Gehäusewandung und die metallische Förderschnecke, die die Oberfläche vergrößert, so dass die Flammenfront erlischt und keine Explosionsfortpflanzung mehr erfolgt.

Befindet sich die Mindestzündenergie des Staubes im Bereich von $5 \text{ mJ} < MZE < 100 \text{ mJ}$ mit einer Explosionskenngroße $K_{St} \leq 200$ [bar·m·s⁻¹], dann ist für eine erfolgreiche explosionstechnische Entkopplung zusätzlich ein Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer erforderlich.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein wirksamer Schüttgutpfropfen im Rohrschneckenförderer dann entsteht, wenn

- der dimensionslose Fließfähigkeitsfaktor des Schüttguts $ff_c < 5$ (dichtegewichteter Fließfähigkeitsfaktor $ff_p < 7$) beträgt und
- $\geq 1,5$ Schneckengänge (maximal 2 Schneckengänge) aus der Förderschnecke entfernt werden (mit einer Schneckensteigung von 180 mm ergibt sich somit eine Pfropfenlänge von ≥ 270 mm).

Es sollten jedoch nicht mehr als 2 Wendelgänge entfernt werden, um die Schüttgutförderung im Normalbetrieb nicht negativ zu beeinträchtigen.

Der Schüttgutpfropfen bleibt auch erhalten, wenn der Rohrschneckenförderer leergefahren wird. Allerdings war zu beobachten, dass der Schüttgutpfropfen durch die weiterlaufende Förderschnecke mit der Zeit abgetragen werden kann. Die „Lebensdauer“ des Pfropfens hängt vom Schüttgut und von mechanischen Einflüssen (z.B. Vibrationen) ab. Eine geringe Steigung der Rohrförderschnecke in Förderrichtung kann diesen unerwünschten Effekten entgegen wirken.

Nach erfolgter Explosion bleibt der Schüttgutpfropfen aufgrund der Explosionsdruckwelle und der Expansionsströmung heißer Verbrennungsgase jedoch nicht erhalten. Der Staub wird vielmehr aus dem Rohrschneckenförderer herausgeblasen, wie beispielhaft in Bild 9 zu

sehen ist. Die Wirksamkeit der explosionstechnischen Entkopplung mit Schüttgutpfropfen kann somit nicht alleine auf dessen mechanische Versperrung zurückgeführt werden, wie ursprünglich vermutet wurde. Als Ursache muss vielmehr eine Kombinationswirkung angesehen werden, die zum einen auf der mechanischen Versperrung durch die Förderschnecke mit Schüttgutpfropfen beruht und zum anderen auf der hohen Staubkonzentration, die sich aus dem Schüttgutpfropfen unter Einwirkung der Explosionsdruckwelle einstellt.

Auf Grund der mechanischen Versperrung wird die Flammenfrontgeschwindigkeit gegenüber den Verhältnissen in freier Rohrleitung stark reduziert. Die damit einhergehenden Wärmeverluste und die inertisierende Wirkung der hohen Staubkonzentration können als Ursache für die Löschwirkung angenommen werden.

Die konstruktiven Anforderungen an den Rohrschneckenförderer für die Wirksamkeit als explosionstechnische Entkopplungsmaßnahme mit und ohne Schüttgutpfropfen sind in Tabelle 10 angegeben. Das Volumen des verbundenen Behälters, Silos oder Apparates, in dem das Auftreten der zu entkoppelnden Staubexplosion zu erwarten ist, sollte auf der Grundlage des derzeitigen Kenntnisstandes ein Volumen von 26 m³ nicht übersteigen.

Abweichende konstruktive Merkmale des Rohrschneckenförderers (z.B. größere Durchmesser oder Spaltbreiten) ebenso wie größere Explosionsvolumina führen nicht zwangsweise zum Versagen dieses Entkopplungsprinzips, bedürfen jedoch weiterführender Untersuchungen.

Tabelle 10: Allgemeine konstruktive Anforderungen an Rohrschneckenförderer für die Verwendung als explosionstechnische Entkopplung

Bauausführung	Stahl
Explosionsfestigkeit	≥ Explosionsfestigkeit der zu schützenden Anlage
Innendurchmesser	≤ 200 mm
Länge der Förderschnecke von Produktaufgabe bis Produktabgabe	≥ 1800 mm
Spaltbreite zwischen Schneckenumfang und Gehäusewandung	≤ 10 mm
Anzahl n der zu entfernenden Schneckengänge	$1,5 \leq n \leq 2$

Auch im Falle leicht fließender Stäube mit geringer Mindestzündenergie, zum Beispiel getrockneter Maisstärke ($K_{St} = 200 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $5 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 10 \text{ mJ}$), bei der sich aufgrund der Fließeigenschaften keine Pfropfen ausbildeten, führte nicht jeder Explosionsversuch zu einer Explosionsübertragung. Sowohl mit oder als auch ohne Schüttgutpfropfen vermindert ein Rohrschneckenförderer die Übertragungswahrscheinlichkeit.

Wenn das Leerfahren des Rohrschneckenförderers ausgeschlossen werden kann und 2 Wendelgänge (360 mm) aus der Förderschnecke entfernt werden, so gelingt die explosionstechnische Entkopplung auch mit leichtfließenden und zündempfindlichen Produkten, wie am Beispiel Maisstärke gezeigt werden konnte (siehe Tabelle 9).

Die reduzierten Explosionsüberdrücke in den druckentlasteten Explosionsbehältern wurden im Allgemeinen zwischen ca. 0.15 bar und mehr als 2 bar variiert. Ein Einfluss des reduzierten Explosionsüberdrucks p_{red} auf die Wirksamkeit der explosionstechnischen Entkopplung konnte nicht festgestellt werden.

Ein Versuch wurde mit Maisstärke im geschlossenen 26 m³ - Behälter durchgeführt ($p_{max} = 7.70$ bar im Explosionsbehälter). Dabei trat keine Explosionsübertragung auf. Die Flammenfront pflanzte sich in diesem Versuch nur bis zum Flammenmelder F2 fort. Diese Beobachtung ist in Übereinstimmung mit Explosionsversuchen durch dünne Rohrleitungen (Durchmesser ≤ 80 mm). Auch hier konnte beobachtet werden, dass eine Explosionsübertragung nur dann auftrat, wenn die reduzierten Explosionsüberdrücke im angeschlossenen druckentlasteten Behälter in einem eher niedrigen Druckbereich lagen und der zeitliche Druckverlauf (dp/dt) einen relativ sanften Anstieg aufwies [15].

Die Volumenvergrößerung des druckentlasteten Explosionsbehälters von $V = 1$ m³ auf $V = 26$ m³ hat eine stärkere Expansionsströmung heißer Verbrennungsgase im Rohrschneckenförderer zur Folge. Dadurch kann sich die Explosionsflamme bis zur Erlöschung über eine längere Wegstrecke im Rohrschneckenförderer fortpflanzen. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass es bei Volumina $V > 26$ m³ in Verbindung mit einem kurzen Rohrschneckenförderer einer Länge von nur 1800 mm zwischen Produktaufgabe und -abgabe, wie in den vorliegenden Untersuchungen verwendet, zu einer Explosionsübertragung kommen kann. Es ist zu vermuten, dass der negative Einfluss größerer Volumina durch die Verwendung längerer Rohrschneckenförderer kompensiert werden kann. Angaben über die Mindestlänge eines Rohrschneckenförderers in Abhängigkeit des Explosionsvolumens bedürfen jedoch weitergehender Untersuchungen.

6. Literaturangaben

- [1] Eckhoff, Rolf K.: Dust Explosions in the Process Industries, S. 74 - 83, Butterworth-Heinemann Ltd Oxford, ISBN 0 7506 1109 X, 1991
- [2] Bartknecht, Wolfgang: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, S. 664 – 745, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1993
- [3] VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen (Entwurf), Beuth Verlag, Berlin, 2017
- [4] TRBS 2152 Teil 4 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken, Ausgabe 2012
- [5] Wheeler, R.V.: Report on Experiments into the Means of Preventing the Spread of Explosions of Carnoaceous Dust. His Majesty's Stationary Office, London, 1935
- [6] DIN EN 13821: Potentially explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures, Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [7] DIN EN 14034-2: 2006 + A1: 2011: Determination of explosion characteristics of dust clouds – Part 2: Determination of the maximum rate of pressure rise (dp/dt)_{max} of dust clouds, Beuth Verlag, Berlin
- [8] Jenike, A. W.: Storage and Flow of Solids; Bull.No. 123, Engng. Exp. Station, Univ. Utah, Salt Lake City, USA, 1970
- [9] Schulze, D.: Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern – Definition und Messverfahren; Chem.-Ing.-Tech. 67(1), Seiten 60 – 68, 1995
- [10] Schulze, D.: Flowability of Bulk Solids – Definition and Measuring Techniques, Part 1 and 2, Powder and Bulk Engeneering 10 (1996) 4, p. 45-61 and 10 (1996) 6, p. 17-28
- [11] Fürll, Ch., Hoffmann, T.: Bewertung der Fließeigenschaften von Getreidemischfutter. – Mühle + Mischfutter 153 (2016) 4, S. 127 – 133
- [12] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter, Fließeigenschaften und Handhabung – 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006
- [13] DIN EN 14491: Dust explosion venting protective systems, Beuth Verlag Berlin, 2012
- [14] EN 14797: Explosion venting devices, Beuth Verlag Berlin, 2007
- [15] Vogl, A., Radandt, S.: Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen, VDI-Berichte 1601, S. 575- 594, Symposium in Nürnberg, 27 to 29 March 2001, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001

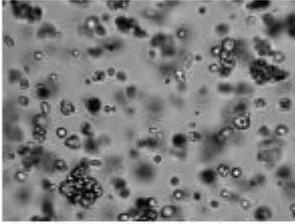
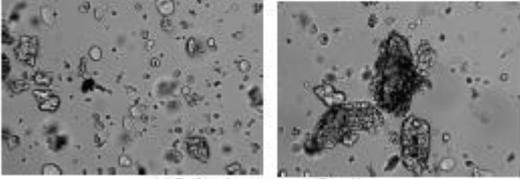
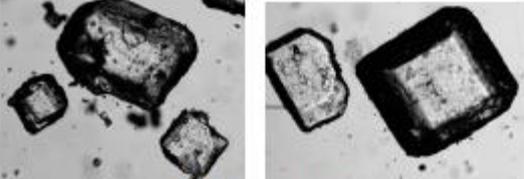
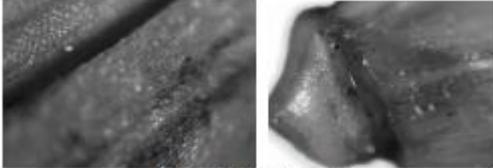
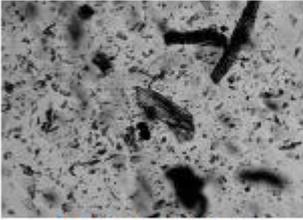
Anhang

- Technische Zeichnung des Rohrschneckenförderers
- Mikroskopische Betrachtung der Schüttgüter (Quelle: Schüttgutuntersuchung, Projekt-nummer: 100065-03, Fa. AZO)
- Ermittlung der Fließfähigkeit durch Scherversuche (Quelle: Schüttgutuntersuchung, Projekt-nummer: 100065-03, Fa. AZO)
- Beispielhafte Messsignale (Druck und Flamme):
 - Versuche X9 (siehe Tabelle 6, Holzstaub, 26 m³-Behälter mit Rohrschnecken-förderer ohne Schüttgutpfropfen)
 - Versuch X5 (siehe Tabelle 6, Weizenmehl, 26 m³-Behälter mit Rohr-schneckenförderer ohne Schüttgutpfropfen)
 - Versuch H8 (siehe Tabelle 6, Holzstaub, 1 m³-Behälter mit Rohrschnecken-förderer ohne Schüttgutpfropfen)
 - Versuch G4 (siehe Tabelle 6, Weizenmehl, 1 m³-Behälter mit Rohrschnecken-förderer ohne Schüttgutpfropfen)

TECHNIK

Thema: Schüttgutuntersuchung
 Projektnummer: 100065-03

**Mikroskopische Betrachtung**

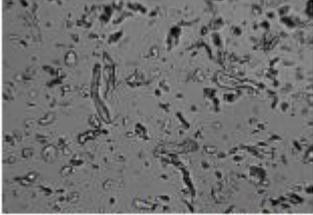
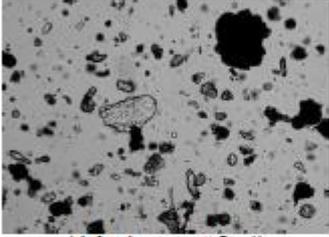
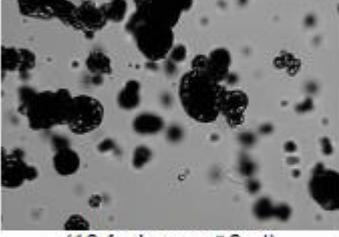
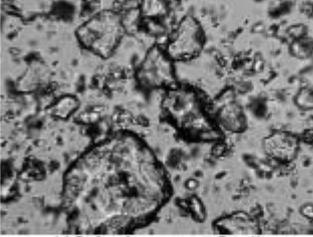
<p>Rechteckiges Ausschneiden</p> <p>1. Maisstärke (Typ 3411)</p>	 <p>(10-fach vergrößert)</p>
<p>2. Weizenmehl (Typ 550)</p>	 <p>(10-fach vergrößert)</p>
<p>3. Kristallzucker (Südzucker EEC2)</p>	 <p>(4-fach vergrößert)</p>
<p>4. Weizenkorn</p>	 <p>(4-fach vergrößert)</p>
<p>5. Holzstaub (Jeluxyl Haho 120/f)</p>	 <p>(4-fach vergrößert)</p>

TECHNIK

Thema: Schüttgutuntersuchung

Projektnummer: 100065-03



<p>6. Cellulose (Arbocel BE 600-10-TG)</p>	 <p>(10-fach vergrößert)</p>
<p>7. Milkibeef Sprint 2000 (Milchaustausch- Alleinfuttermittel für Aufzuchtkälber)</p>	 <p>(4-fach vergrößert)</p>
<p>8. Spröhmagermilchpulver (Material: 6007)</p>	 <p>(10-fach vergrößert)</p>
<p>9. Puderzucker (Südzucker)</p>	 <p>(10-fach vergrößert)</p>
<p>10. Malzstaub</p>	 <p>(4-fach vergrößert)</p>

TECHNIK

Thema: Schüttgutuntersuchung

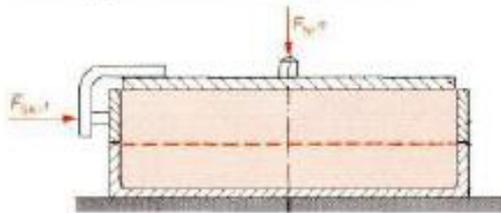
Projektnummer: 100065-03



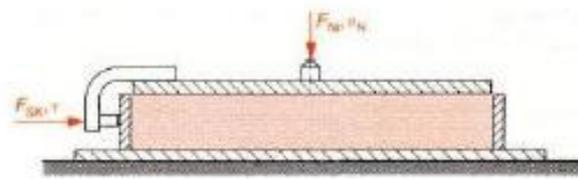
Ermittlung der Fließfähigkeit durch Scherversuche

In der Schüttgutmechanik wird die Reibung zwischen Schüttgut und Schüttgut (innere Reibung) und die Reibung zwischen Schüttgut und Wandmaterial eines Silos/Behälters (Wandreibung) mit einem Schergerät gemessen. Hierbei wird eine Schüttgutprobe durch eine Normalkraft F_N vorverdichtet und in einem Ring mit definierter Fläche durch eine Scherkraft F_{SK} mit konstanter Geschwindigkeit verschoben. Die notwendige Scherkraft F_{SK} wird durch eine Wägezelle gemessen. Durch die bekannte Fläche können Normalkraft F_N und Scherkraft F_{SK} in Normalspannung σ ($\sigma = F / A$) und Scherspannung τ umgerechnet werden.

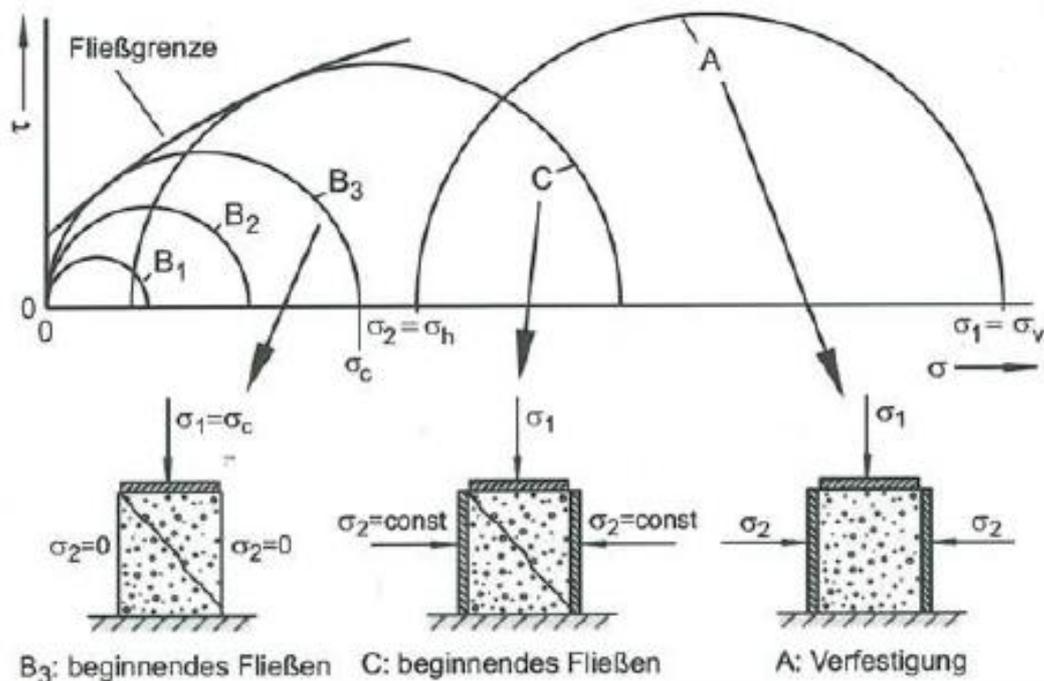
Ermittlung des inneren Reibungswinkels



Ermittlung des Wandreibungswinkels



Hieraus ergibt sich für jede Normalspannung ein sogenannter Fließort, der in einem σ / τ -Diagramm eingezeichnet wird. Mit Hilfe von Mohrschen Spannungskreisen können die **größte Hauptspannung σ_1 (Verfestigungsspannung)** sowie die **Druckfestigkeit σ_c** ermittelt werden.



TECHNIK

Thema: Schüttgutuntersuchung

Projektnummer: 100065-03



Die **Fließfähigkeit** eines Schüttgutes wird als Verhältnis zwischen Verfestigungsspannung und Druckfestigkeit mit $ffc = \sigma_1 / \sigma_c$ angegeben. Dabei bedeutet:

$ffc < 1$ verhärtet, sehr schlecht fließendes Schüttgut

$1 < ffc < 2$ sehr kohäsiv

$2 < ffc < 4$ kohäsiv

$4 < ffc < 10$ leicht fließend

$10 < ffc$ frei fließend

