

**Projekt: F-05-9902**

**Abschlussbericht**

# **Explosionsdruckentlastung von Behältern und Silos bei tangentialer pneumatischer Befüllung**

**A. Arnold, F. Hauert, A. Vogl, S. Radandt**

## Gliederung

1. **Einführung in die Problematik**
2. **Anlagenbeschreibung**
3. **Sicherheitstechnische Kenngrößen der verwendeten Produkte**
4. **Versuchsdurchführung**
5. **Resultate**
  - 5.1 Variation der Fördermenge
  - 5.2 Variation der Luftgeschwindigkeit
  - 5.3 Variation des Längen/Durchmesserhältnisses  $L/D_E$
  - 5.4 Variation der Entlastungsfläche
6. **Auswertung**
7. **Zusammenfassung**
8. **Literatur**
9. **Anhang: Wortlaut der Ergänzung zur Richtlinie 3673 Blatt 1**

### 1 Einführung in die Problematik

Die Dimensionierung von Druckentlastungsflächen erfolgt nach der VDI-Richtlinie 3673 Blatt 1 [3]. Diese wurde im Dezember 2000 überarbeitet und ist seither im Entwurf gültig. In dieser Richtlinie wird zwischen zwei Berechnungsarten der erforderlichen Entlastungsfläche für das zu schützende Objekt unterschieden, nämlich zwischen der Berechnung gemäß Anhang A "Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen bei speziellen Beschickungsverfahren" (in Ausgabe 7/95 "inhomogen" genannt) und der Berechnung für alle anderen Behälter und Füllverfahren nach Abschnitt 7 (in Ausgabe 7/95 "homogen" genannt). Unter den speziellen Beschickungsverfahren wird – wie auch schon in der Ausgabe 7/95 – nur die axiale, zentrale Einförderung sowie die Befüllung im freien Fall genannt.

Bei der Berechnung der benötigten Entlastungsflächen ergeben sich für axiale, zentrale Befüllung und Befüllung im freien Fall, bei sonst identischen Parametern, kleinere Werte im Vergleich zu der Berechnung gemäß Abschnitt 7.

Die tangentielle Befüllung fällt gemäß dieser Richtlinie nicht unter diese speziellen Beschickungsverfahren. Die Richtlinie gestattet jedoch, dass Abweichungen von ihr zulässig sind, wenn durch praxisorientierte Experimente nachgewiesen wird, dass die gleiche Sicherheit trotz dieser Abweichungen gewährleistet ist.

Um die Verhältnisse bei der tangentialen Befüllung eingehend zu beschreiben, wurden umfassende Experimente durchgeführt. Bereits 1996 wurde in einem Forschungsprojekt die Teilchengeschwindigkeit, die Turbulenz und die Staubkonzentration der Staubwolken gemessen, die bei verschiedenen Befüllmethoden (pneumatisch tangential und zentral sowie mechanisch im freien Fall) in einem 12 m<sup>3</sup> Silo entstehen [2]. Zusätzlich wurden zum Vergleich numerische Berechnungen dieser Größen durchgeführt [1]. Die korrespondierenden Explosionsversuche wurden ebenfalls an diesem Silo durchgeführt; die Ergebnisse sind in [1] dargestellt.

Im Gegensatz zu den damaligen Untersuchungen wurde die Anlage (Gebläse und Zellenrad-schleuse) modifiziert, um die Staubbeladung des Produktstromes erhöhen zu können. Die

verwendeten Werte decken bei den hier beschriebenen Versuchen alle in der Praxis vorkommenden Anlagenzustände ab.

## 2 Anlagenbeschreibung

Die verwendete Anlage setzt sich aus einem Silo, der Förderleitung, der Produktaufgabe und einem Gebläse zusammen. Bei dem Gebläse handelt es sich um ein Drehkolbengebläse der Aerzener Maschinenfabrik GmbH welches unbelastet bei maximaler Drehzahl (3800 U/min) einen Volumenstrom von  $9,8 \text{ m}^3/\text{min}$  liefert. Es könnte zwar prinzipiell eine höhere Drehzahl gefahren werden, diese würde allerdings unter Belastung durch die begrenzte Antriebsleistung des Motors (11 kW) absinken und so zu nicht definierten Betriebszuständen führen. Der maximale Überdruck, den das Gebläse erzeugen kann, ist durch ein Sicherheitsventil auf 800 mbar begrenzt. Mit steigendem Überdruck sinkt der Luftbedarf des Gebläses, der bei maximaler Drehzahl und maximalem Druck noch  $8,3 \text{ m}^3/\text{min}$  beträgt. Aus dem Luftbedarf errechnet sich über den Innendurchmesser der Förderleitung von 76 mm die mittlere Geschwindigkeit der Luft in der Leitung. Der Luftbedarf des Gebläses entspricht neben gewissen Leckage-Mengen der Luftmenge am Austritt der Rohrleitung.

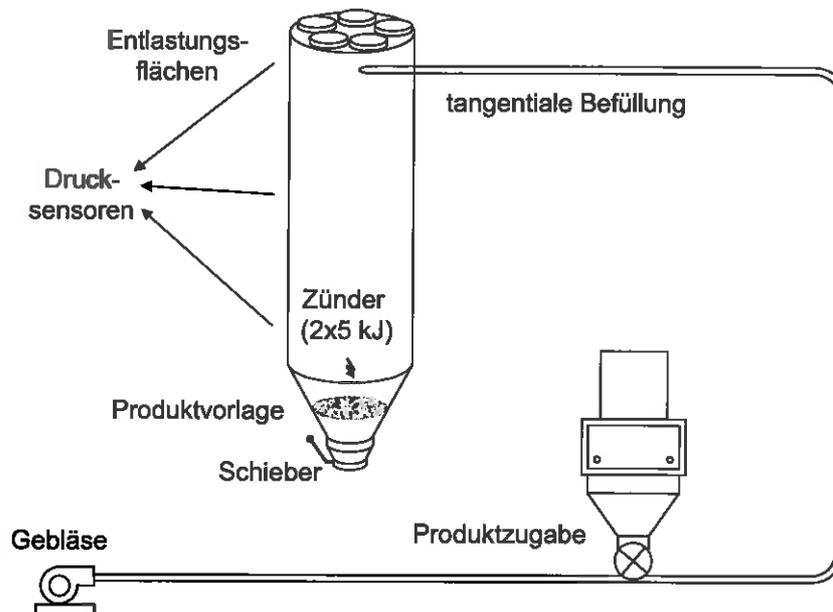


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Der Volumenstrom an Luft ist über jeden Querschnitt der Rohrleitung der gleiche. Der Überdruck in der Förderleitung ändert sich jedoch entlang der Förderstrecke. Auf der Druckseite des Gebläses ist er maximal und sinkt auf 0 mbar am Rohraustritt. Entsprechend zum Druck ändert sich auch die Geschwindigkeit der Luft im System. Für die Angabe der Luftgeschwindigkeit ist es folglich notwendig einen Punkt innerhalb der Rohrstrecke zu definieren, auf den sich die Luftgeschwindigkeit bezieht. Bei der hier vorliegenden Druckför-

derung ist dies das Rohrende. Der Begriff der Fördergeschwindigkeit bezieht sich intuitiv auf die Produktgeschwindigkeit. Da diese sich innerhalb der Förderleitung ebenfalls verändert, kann sie zu Verwirrungen führen und sollte besser durch den Begriff der Luftgeschwindigkeit ersetzt werden.

Die Luftgeschwindigkeit wurde auf zwei unterschiedliche Methoden bestimmt. Zum einen erfolgte die Bestimmung der Geschwindigkeit mit Hilfe einer Normblende von 45 mm Durchmesser (nach DIN EN ISO 5167-1) in der Förderleitung zwischen Gebläse und Produktaufgabe. Die sich einstellende Druckdifferenz zwischen der Vorder- und Rückseite der Blende ist ein Maß für die Geschwindigkeit der Luft in der Förderleitung in der Nähe der Blende. Dieses Verfahren beinhaltet allerdings bedingt durch den Messort den Nachteil, dass die Geschwindigkeit in heißer komprimierter Luft bestimmt wird. Damit sind zum einen Korrekturen in der Bestimmungsgleichung, wie sie in der Norm angegeben ist, anzubringen. Zum anderen muss die Umrechnung des Volumenstromes vom Ort der Messung auf das Rohrende der Förderleitung erfolgen. Weiterhin kam es gelegentlich zur Ausbreitung von Druckwellen die von der Explosion aus dem Silo zurück in die Förderleitung und damit zum Druckmessgerät gelangten. Hierdurch wurde die Belastungsgrenze des Messgerätes mehrfach überschritten.

In dem anderen Verfahren zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit wurde der Filterkasten auf der Ansaugseite des Gebläses durch ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 95 mm ca. 1 m vom Gebläse entfernt montiert. In diesem Rohrstück wurde die Geschwindigkeit mit einem Staurohr bestimmt. Da diese Messung bei Atmosphärendruck und Umgebungstemperatur erfolgte, ergab sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rohrquerschnitte, ohne weitere Korrekturen die Luftgeschwindigkeit. In den Fällen in denen auf beide Methoden die Geschwindigkeit bestimmt wurde, ergab sich innerhalb der Fehlergrenzen eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Aufgabe des Produktes erfolgte zunächst mit Sackware per Hand in einen Vorratsbehälter, aus dem es über eine Zellenradschleuse in die Förderleitung eingebracht wurde. Nachdem während der ersten Phase des Projektes der Produktdurchsatz erhöht werden musste, wurde die vorhandene Schleuse durch einen größeren Typ ersetzt. Die Steuerung der Zellenradschleusen erfolgte über Frequenzumformer. Zur Kalibrierung des Produktdurchsatzes wurden zwei verschiedene Verfahren gewählt. Zunächst wurde eine abgewogene Menge von Produkt in den Vorratsbehälter gegeben und die Zeit zwischen dem Anlaufen der Zellenradschleuse und dem Leerlaufen des Behälters gemessen. Dies wurde für verschiedene Einstellungen des Frequenzumformers vorgenommen, sodass eine Kalibrierkurve erstellt werden konnte. Für das zweite Verfahren wurde die Tatsache genutzt, dass sich beim Start und beim Ende des Produkteintrags in die laufende Pneumatik eine Änderungen der Geräusentwicklung ergibt. Durch Vorgabe einer bekannten Menge von Produkt im Vorratsbehälter und durch Messen der Zeit zwischen den beiden Tonänderungen, kann während der Explosionsversuche der Produktdurchsatz bestimmt werden.

Die Förderung des Produktes erfolgte tangential in das Silo. Das Silo-Volumen wurde durch den Einbau eines 1 m langen Zwischenstückes variiert. Es ergaben sich daraus folgende Silo-Geometrien:  $V=12 \text{ m}^3$  mit  $L/D_E=3,5$  und  $V=17 \text{ m}^3$  mit  $L/D_E=5$ . Durch den Eintrag einer Produktvorlage wurde zudem für einige Versuche das Volumen des Silos auf  $9,2 \text{ m}^3$  reduziert. Es resultierte daraus ein  $L/D_E$  von 2,8. Des Weiteren wurde mit identischer Fördereinrichtung ein anderes Silo mit einem Volumen von  $V=9,2 \text{ m}^3$  jedoch mit einem  $L/D_E$  von 1,5 ebenfalls tangential befüllt.

Auf dem Silo befinden sich verschiedene Öffnungen, die zur Druckentlastung dienen können. Je nach benötigter Fläche wurden Kombinationen dieser Öffnungen mit PE-Folie versehen, die anderen Öffnungen mit Stahlplatten verschlossen. Die PE-Folien waren in der Dicke so gewählt, dass sie bei den Explosionsversuchen bei einem Druck von 0,1 bar die Entlastungsöffnungen frei gaben.

### 3 Sicherheitstechnische Kenngrößen der verwendeten Produkte

Zur Dimensionierung der Entlastungsfläche, bzw. zum Vergleich der gemessenen maximalen reduzierten Explosionsdrücke mit den nach der VDI-Richtlinie 3673 Blatt 1 zu erwartenden Drücke wird der  $K_{st}$ -Wert und der maximale Explosionsdruck  $p_{max}$  benötigt. Die Bestimmung dieser beiden Kenngrößen erfolgte im 1 m<sup>3</sup>-Behälter nach ISO 6184/1. Hierfür ist zunächst die Erstellung eines genormten Musters notwendig. Dies erfordert die Trocknung des Produkts und die Abtrennung der Partikelfraktion mit einer Größe kleiner oder gleich 63 µm. Bei den vergleichsweise großen Produktmengen, die im 1 m<sup>3</sup>-Behälter für die Kennzahlenbestimmung benötigt werden, ist ein Absieben auf solch kleine Partikelgrößen nicht mehr praktikabel. Insofern wird bei der Erstellung des genormten Musters auf die Abtrennung der kleinen Partikelfraktion verzichtet. Bei Maisstärke besitzen ohnehin 97 % aller Partikel eine Größe unterhalb von 63 µm, sodass das getrocknete Produkt sehr gut einem genormten Muster entspricht. Bei dem ebenfalls verwendeten Weizenmehl Typ 550 ist der Unterschied etwas größer. Hier beträgt der Anteil aller Partikel mit Größen unterhalb von 63 µm nur ca. 50 %.

	Produktfeuchte (%)	$p_{max}$ (bar)	$(dp/dt)_{max}$ (bar/s)	
Weizenmehl	12	8,04	109	Urmuster
Weizenmehl	3	8,13	128	Getrocknetes Urmuster
Maisstärke	11,9	8,49	160	Urmuster
Maisstärke	2,4	9	220	Getrocknetes Urmuster
Kristallzucker	0,05	5,5	20	Urmuster

Tab. 1: Sicherheitstechnische Kennzahlen der verwendeten Produkte. Der  $K_{st}$ -Wert errechnet sich über das kubische Gesetz aus dem  $(dp/dt)_{max}$ . Im 1 m<sup>3</sup>-Behälter sind beide Werte zahlenmäßig gleich. Der  $K_{st}$ -Wert ist jedoch nur an genormten Mustern definiert.

### 4 Versuchsdurchführung

Um die Schwankungsbreite der Explosionsversuche zu minimieren, war es notwendig möglichst konstante und reproduzierbare Ausgangsbedingungen zu schaffen. Hierfür wurde zunächst vor jedem Versuch das Silo so gut wie möglich von Staubablagerungen an den Innenwänden befreit. Die im Silo befindliche Produktmenge zum Schutz der Austrageinheit wurde immer auf dem gleichen Niveau gehalten.

Nach dem Einbringen einer abgewogenen Menge von Produkt wurde zunächst das Gebläse auf die gewünschte Drehzahl gebracht. Daraufhin erfolgte der Eintrag des Produktes in die Pneumatik durch Einschalten der Zellenradschleuse. Um hinreichend stationäre Bedingungen im Silo zu erzeugen, wurde erst 30 Sekunden nach dem Start der Eintrags gezündet. Die Zeitspanne von 30 sec wurde durch Staubkonzentrationsmessungen in einer früheren Projektphase als ausreichend lang, zum Einstellen stationärer Bedingungen verifiziert. Die pyrotechnischen Zünder befanden sich in der Mittelachse des Silos und waren so ausgerichtet, dass der entstehende Flammenstrahl radial nach außen gerichtet war. Ihre Energie betrug je 5 kJ, d.h. es kam eine Gesamtenergie von 10 kJ zum Einsatz. Messungen zeigten, dass es bei der Zündung im untersten Bereich des Silos zu den heftigsten Explosionen kam. Folglich wurden alle folgenden Explosionsversuche mit dieser Zündortlage durchgeführt.

Zur Messung der Druckverläufe während der Explosionsversuche war das Silo mit drei Drucksensoren ausgestattet. Deren Signale wurden von Ladungsverstärkern aufbereitet und

in einem Transientenrecorder aufgezeichnet. Die Bestimmung des Zeitpunktes bei dem die Entlastungsöffnungen von den Folien freigegeben wurden, erfolgte durch eine Lichtschranke oberhalb der Öffnungen, die die austretende Staubwolke detektierte. Durch Vergleich mit den Druckmessungen wurde der Druck bestimmt, an dem die Entlastungsvorrichtungen die Öffnungen freigeben. Versuche, bei denen die Öffnung deutlich unterhalb von 100 mbar, also zu früh freigegeben wurde, wurden in der Auswertung der Daten nicht berücksichtigt.

## 5 Resultate

Aus den Druckverläufen der Explosionsversuche wurden die maximalen reduzierten Explosionsdrücke bestimmt. Die Druckwerte der drei installierten Drucksensoren zeigten voneinander Abweichungen von unter 5%. Die im Folgenden angegebenen Druckwerte sind jeweils die Mittelwerte der drei unterschiedlichen Messpositionen. Folgende Parameter wurden variiert:

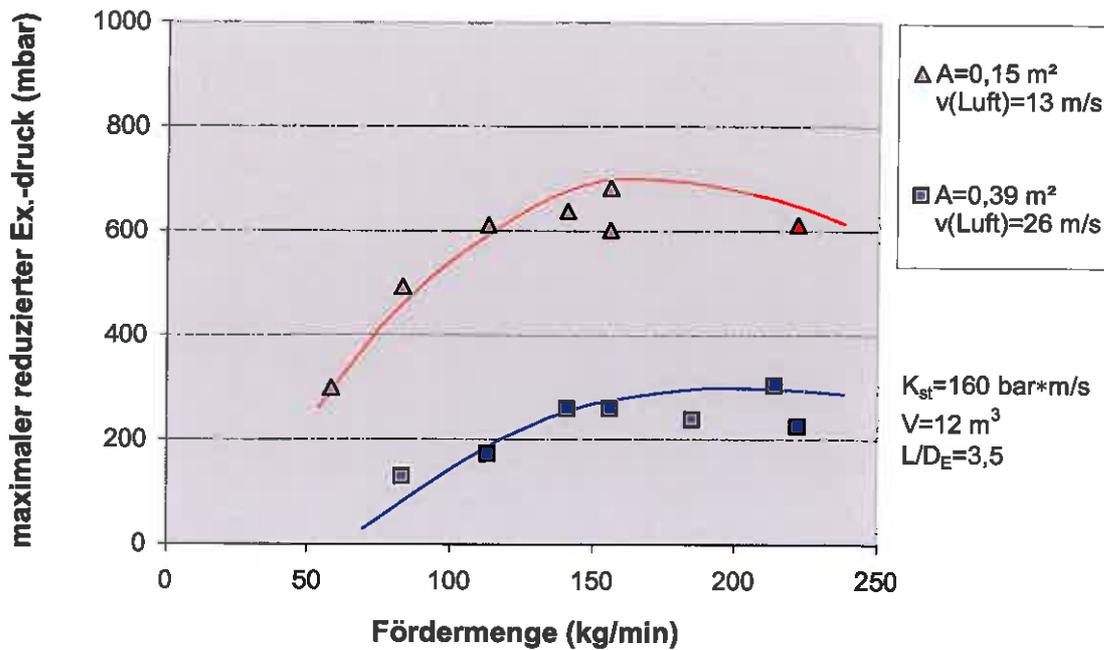
- Art des Produkts
- Luftgeschwindigkeit
- Produktmenge bzw. Staubbeladung
- Entlastungsfläche
- Silo-Volumen
- Längen/Durchmesser-Verhältnis  $L/D_E$

### 5.1 Variation der Fördermenge

Zunächst wurde für Maisstärke die Fördermenge im Bereich von 58 bis 228 kg/min variiert. Die Umrechnung auf die Staubbeladung (Produktbeladung) erfolgt über den Luftbedarf des Gebläses der bei 3200 U/min bei etwa  $7 \text{ m}^3/\text{min}$  liegt. Damit ergibt sich eine Variation der Produktbeladung bei dieser Luftgeschwindigkeit zwischen  $8,3$  und  $32,6 \text{ kg/m}^3$ . Die Messungen bei halber Luftgeschwindigkeit führen entsprechend zur doppelten Produktbeladung. Dieser Bereich deckt die in der Praxis i.A. vorkommenden Werte von  $20$ - $22 \text{ kg/m}^3$  gut ab. Der Tatsache weshalb ein solch breiter Bereich überfahren wurde, lag folgende Überlegung zugrunde.

Mit ansteigendem Produktdurchsatz ist über die zunehmende Konzentration im Siloinneren nach Überschreitung der unteren Explosionsgrenze mit einer Zunahme des maximalen reduzierten Explosionsdruckes zu rechnen. Bei noch weiter ansteigender Konzentration sollte allerdings der Punkt erreicht werden, bei dem die Explosionsheftigkeit wieder abnimmt. Es ist somit anzunehmen, dass es eine Fördermenge gibt, bei der der maximale reduzierte Explosionsdruck ein Maximum annimmt. Dieser Wert wäre also als Obergrenze des Druckes bei allen denkbaren Fördermengen anzusehen. Die Dimensionierung von Entlastungsflächen könnte somit unter Bezugnahme auf diesen Wert unabhängig von der Fördermenge erfolgen.

In Abbildung 2 sind die maximalen reduzierten Explosionsdrücke bei tangentialer Befüllung als Funktion der Fördermenge von Maisstärke zu sehen. Die Variation der Fördermenge erfolgte für zwei verschiedenen Entlastungsflächen ( $0,15 \text{ m}^2$  und  $0,39 \text{ m}^2$ ) bei zwei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten nämlich  $13 \text{ m/s}$  (entspricht  $1600 \text{ U/min}$ ) und  $26 \text{ m/s}$  (entspricht  $3200 \text{ U/min}$ ).



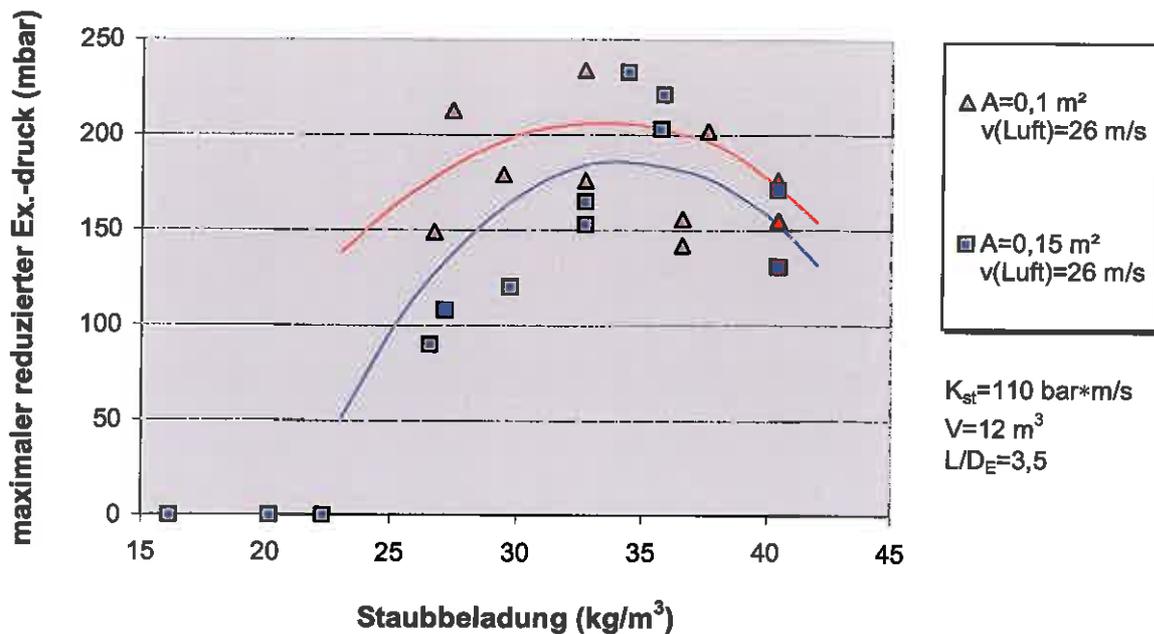
**Abb. 2:** Maximaler reduzierter Explosionsdruck als Funktion der geförderten Menge an Maisstärke.

Die angegebenen Kurven stellen lediglich eine Gruppierung der Messergebnisse dar und sollen somit einer besseren Übersichtlichkeit des Diagramms dienen.

Bei den Kurven zeigt sich oberhalb einer Fördermenge von ca. 200 kg/min keine weitere Zunahme der Druckwerte. Sämtliche weiteren Explosionsversuche mit Maisstärke erfolgten mit Durchsätzen im Bereich des Maximums dieser Kurven.

Der Vergleich der Druckwerte mit denen, die sich aus der VDI-Richtlinie 3673 ergeben, zeigt, dass die gemessenen Drücke weit unterhalb der Werte der VDI-Richtlinie liegen. So ergibt sich bei der Berechnung gemäß Abschnitt 7 der Richtlinie bei einer Entlastungsfläche von 0,39 m<sup>2</sup> ein reduzierter maximaler Explosionsdruck von 1,04 bar, bei A=0,15 m<sup>2</sup> sogar ein Wert größer als 2 bar. Bei der Berechnung gemäß Anhang A1 der Richtlinie ergeben sich Druckwerte von 0,73 bzw. 1,63 bar bei A=0,39 bzw. 0,15 m<sup>2</sup>.

Entsprechende Experimente mit Weizenmehl führen zu noch deutlicheren Unterschieden zwischen den gemessenen Drücken und den sich nach der VDI-Richtlinie ergebenden Werten. Auch diese Experimente zeigen ein deutliches Maximum des maximalen reduzierten Explosionsdruckes bei einer Staubbeladung im Bereich von 30-35 kg/m<sup>3</sup> entsprechend einer Fördermenge von etwa 210-240 kg/min.



**Abb. 3:** Maximaler reduzierter Explosionsdruck als Funktion der Staubbelastung von Weizenmehl.

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass trotz der sehr kleinen Entlastungsfläche von 0,1 m<sup>2</sup> kein maximaler reduzierter Explosionsdruck von über 250 mbar gemessen wurde. Die VDI Richtlinie ergibt gemäß Anhang A1 bei einer Entlastungsfläche von 0,15 m<sup>2</sup> einen Druck von 1,21 bar, bei 0,1 m<sup>2</sup> sogar 1,66 bar. Die Berechnung nach Abschnitt 7 der Richtlinie ergibt bei A=0,1 m<sup>2</sup> ein  $p_{red,max}$  oberhalb von 2 bar und verlässt damit den Gültigkeitsbereich der Gleichung. Bei A=0,15 m<sup>2</sup> ergibt sich ein Wert von 1,49 bar.

Die Entlastungsöffnung mit 0,3 m<sup>2</sup> setzte sich aus zwei Teilöffnung mit je 0,15 m<sup>2</sup> zusammen. Im weitaus größten Teil der Explosionsversuche mit Weizenmehl riss jedoch nur eine der beiden Folien auf und führte somit zu einer kleineren Entlastungsfläche als geplant. Diese Messergebnisse wurden nicht verworfen, sondern den Ergebnissen mit einer Entlastungsfläche von 0,15 m<sup>2</sup> zugeordnet.

Ein wichtiger Aspekt, der sich während der Experimente zeigte, war die Zündwilligkeit der erzeugten Staubwolke. Unterhalb einer Fördermenge von 180 kg/min konnte in keinem Fall eine Explosion initiiert werden. Bei weiterer Steigerung der Förderrate kam es im gesamten durchgefahrenen Bereich nur in ca. 50 % aller Versuche zu einer Explosion. Dies bedeutet für die Praxis einen deutlichen Gewinn an Sicherheit.

Noch deutlicher zeigte sich die Reduktion der Zündwahrscheinlichkeit bei der tangentialen pneumatischen Befüllung mit Kristallzucker. Für die Versuche musste die Luftfeuchte < 60 % (besser < 50 %) betragen. Bei dem verwendeten Zucker handelte es sich nach Aussagen des Herstellers um den feinsten Zucker, der noch im Silo-Fahrzeug transportiert wird. Die Partikelgrößen-Verteilung wurde im Labor der BGN bestimmt, wobei sich ein Median Wert von 274 µm ergab. Bei der Kennzahlenermittlung im 1 m<sup>3</sup>-Behälter zeigte sich, dass der

Zucker mit einer Ringdüse nicht und mit der Pilzdüse nur in einem engen Konzentrationsbereich um  $1500 \text{ gr/m}^3$  zur Explosion zu bringen war. Versuche den Kristallzucker im Silo bei tangentialer pneumatischer Befüllung zur Explosion zu bringen, schlugen alle fehl. Dabei wurden insgesamt 16 Versuche bei verschiedenen Staubbelastungen bis zur Stopfgrenze der Pneumatik durchgeführt.

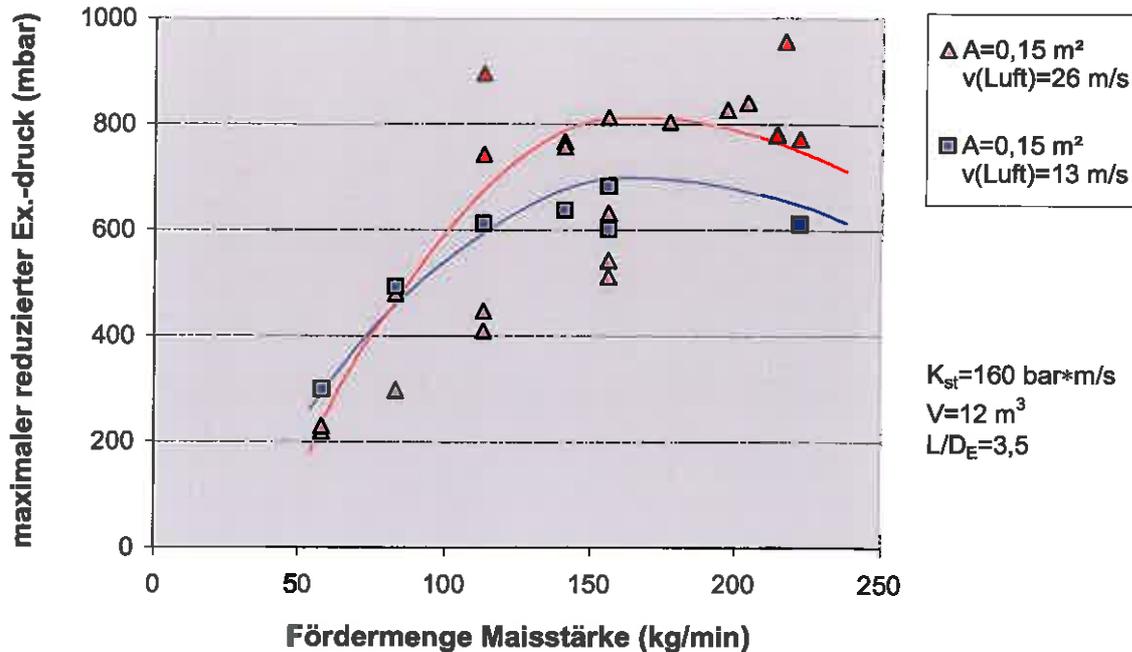
Der Unterschied der gemessenen maximalen reduzierten Explosionsdrücke zwischen Weizenmehl und Maisstärke ist weitaus größer, als es die Kenngrößen erwarten lassen. Es wird hierdurch deutlich, dass noch weitere Eigenschaften des Produktes von Bedeutung sind. Die Neigung von Weizenmehl bei der Förderung Staubwolken zu bilden, ist weitaus geringer als die von Maisstärke. In diesem praxisnahen Experiment ist das von außerordentlicher Bedeutung. Bei der Kennzahlenermittlung in den standardisierten geschlossenen Behältern, in die das Produkt über Vorratsbehälter in das Gefäß eingedüst werden, spielt dieser Sachverhalt keine Rolle mehr.

## 5.2 Variation der Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit wurde über die Drehzahl des Gebläses reguliert. Für die Versuchsreihen wurden zwei verschiedene Einstellungen des Gebläses gewählt, nämlich 1600 U/min und 3200 U/min. Über die gewählte Fördermenge an Produkt, stellt sich ein Vordruck ein, auf den der Experimentator keinen Einfluss hat. Mit dem Vordruck ändert sich allerdings der Luftbedarf des Gebläses, so dass sich damit auch die Luftgeschwindigkeit ändert. Eine Nachregulierung während des Betriebes auf konstante Luftgeschwindigkeit ist bedingt durch die begrenzte Produktmenge im Vorratsbehälter nicht möglich. In dem Druckbereich, in dem das Gebläse hier betrieben wurde, lagen diese Änderungen allerdings unter 10 %, so dass die Geschwindigkeit als annähernd konstant angenommen werden kann.

Die höchste in den Versuchen gefahrene Drehzahl wurde so gewählt (3200 U/min), dass bis zu einem Vordruck von 700 mbar die Leistungsgrenze des Gebläses nicht überschritten wird. Dieser Vordruck wurde konsequenterweise in den Experimenten nicht überschritten. Ein Überschreiten würde wie oben beschrieben zu einem undefinierten Absinken der Drehzahl unter Belastung führen.

Der Vergleich der Messwerte ( $A=0,15 \text{ m}^2$ ) bei einer Luftgeschwindigkeit von 13 m/s und 26 m/s in Abbildung 4 zeigt ein deutlich niedrigeres Druckniveau bei der kleineren Geschwindigkeit. Aus der kleineren Luftgeschwindigkeit folgen zwei gegenläufige Effekte. Einerseits führt die kleinere Geschwindigkeit zu einem niedrigeren Turbulenzniveau, was in niedrigeren maximalen reduzierten Explosionsdrücken resultiert. Andererseits wird das Produkt durch die niedrigere Eintrittsgeschwindigkeit weniger stark an die Wandung des Silos gedrückt. Dies könnte dazu führen, dass die Inhomogenität des Staub / Luft-Gemisches im Siloinneren weniger stark ausgeprägt ist. Wie die Messergebnisse zeigen, überwiegt jedoch der Einfluss des ersten Effekts.



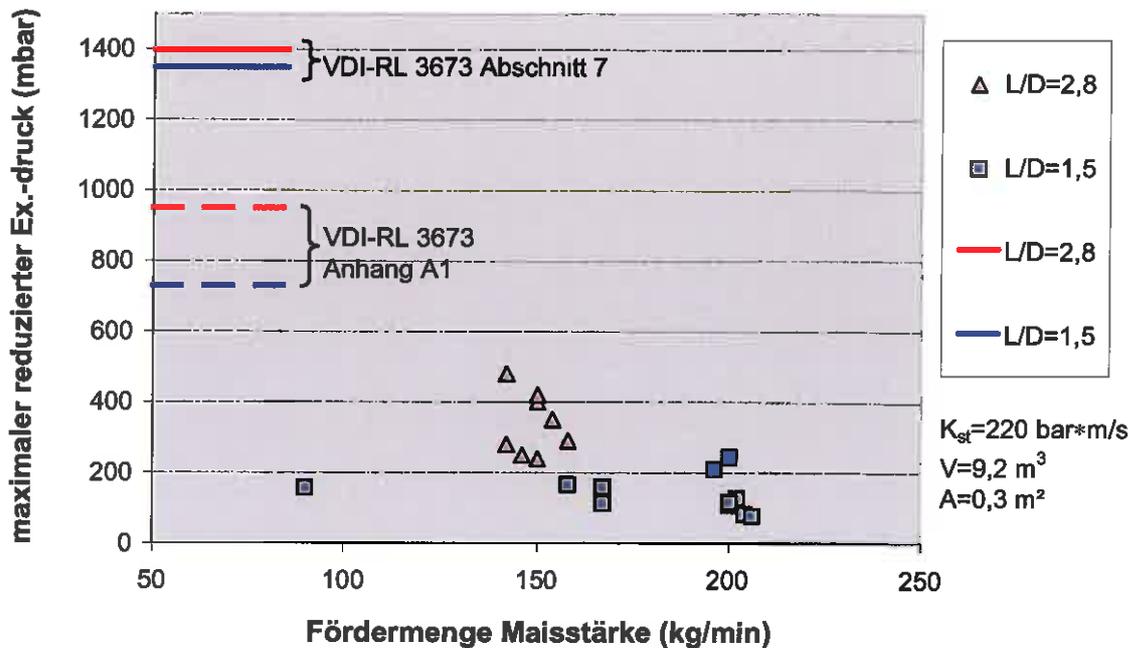
**Abb. 4:** Maximaler reduzierter Explosionsdruck als Funktion der geförderten Menge an Maisstärke für zwei verschiedene Luftgeschwindigkeiten

Um den schlimmst möglichen Fall anzunehmen, wurden sämtlichen weiteren Messungen mit der höheren der beiden Geschwindigkeiten vorgenommen.

### 5.3 Variation des Längen/Durchmesserverhältnisses $L/D_E$

Zum Vergleich der reduzierten Explosionsdrücke bei verschiedenen Längen/Durchmesser-Verhältnissen wurden Versuche am Silo der Fa. AZO mit einem Volumen von  $9,2 \text{ m}^3$  bei einem  $L/D_E$  von 2,8 vorgenommen. Das Volumen des eigentlich  $12 \text{ m}^3$  großen Silos wurde durch eine Produktvorlage im Silo auf die gewünschten  $9,2 \text{ m}^3$  eingestellt. Hinzu kamen Versuche an einem anderen Silo mit gleichem Volumen jedoch mit einem  $L/D_E$  von 1,5. Hierzu wurde das Silo für die tangentielle Befüllung modifiziert und die vorhandene pneumatische Förderanlage angepasst. Diese Versuchsreihe wurde mit getrockneter Maisstärke durchgeführt.

Die Explosionsversuche zeigen für das Silo mit dem  $L/D_E$  von 1,5 reduzierte Explosionsdrücke, die etwa 50% unter denen am Silo mit gleichem Volumen und dem  $L/D_E$  von 2,8 liegen. Dieser Unterschied wird primär auf das unterschiedliche  $L/D_E$  zurückzuführen sein. Es kann jedoch durch die Vielzahl von Messflanschen am schlanken Silo im Vergleich zu dem anderen Silo zu einer Aufstreuung von Produkt und damit zu einer verstärkten Staubwolkenbildung kommen, was ebenfalls in einem heftigeren Explosionsablauf resultieren kann. In Abbildung 5 sind neben den Messwerten auch die berechneten Druckwerte angegeben, die sich nach der VDI-Richtlinie 3673 ergeben.



**Abb. 5:** Variation des Längen/Durchmesserverhältnisses bei konstantem Volumen.

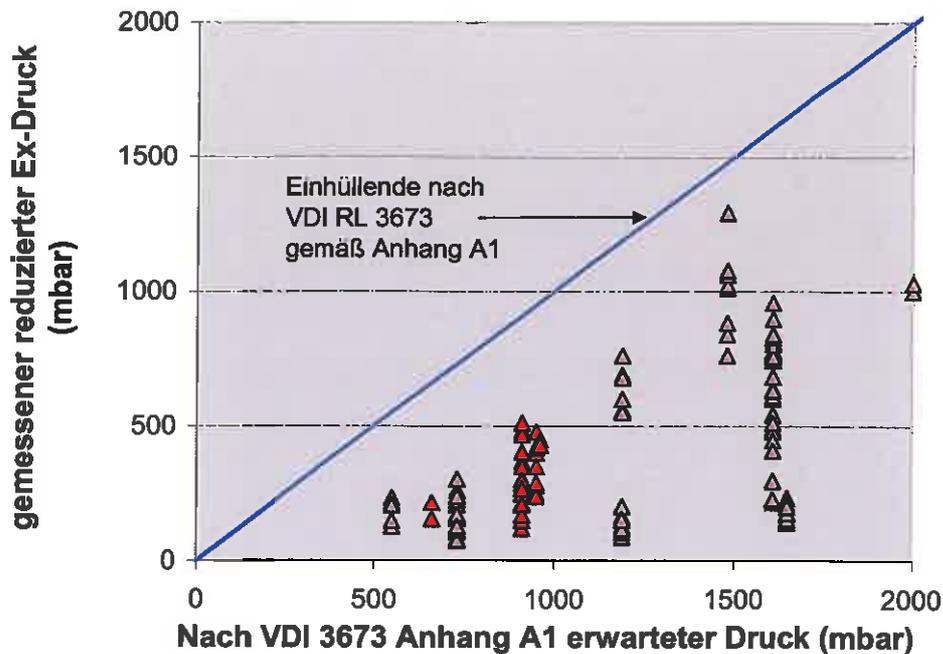
Weiterhin wurden Experimente mit anderen Längen/Durchmesserverhältnissen vorgenommen. Dazu wurde wie in Kapitel 2 bereits erwähnt durch den Einbau eines Zwischenstückes von 1 m Länge die Höhe des Silos vergrößert. Dadurch änderte sich jedoch gleichzeitig das Volumen, sodass hierbei nicht eindeutig die Abhängigkeit des maximalen reduzierten Explosionsdruckes vom  $L/D_E$  aufzuzeigen ist.

#### 5.4 Variation der Entlastungsfläche

Die Entlastungsfläche wurde im Bereich von 0,1 bis 0,54 m<sup>2</sup> variiert. Die meisten Versuche bei dieser Parameterstudie erfolgten mit ungetrockneter Maisstärke als Produkt. Die graphische Darstellung dieser Daten wird jedoch erst im folgenden Kapitel, also bei der Auswertung der Messdaten erfolgen.

### 6 Auswertung

Bei allen bisher beispielhaft gezeigten Ergebnissen ist klar zu erkennen, dass die Drücke deutlich unterhalb denen liegen, die die VDI-Richtlinie 3673 rechnerisch liefert. Abbildung 6 zeigt den Vergleich aller gemessenen Druckwerte mit den gemäß Anhang A1 berechneten, die innerhalb des Gültigkeitsbereiches der Gleichung liegen. Auf der y-Achse sind die gemessene Werte aufgetragen, auf der x-Achse, die Werte, die man für die jeweiligen Versuche nach der Richtlinie berechnet. Dabei wurde keine Gruppierung der Daten vorgenommen, d.h. in Abbildung 6 sind sämtliche Messungen aufgetragen, also für alle Volumina, alle  $L/D_E$ , alle Produkte, alle Entlastungsflächen, alle Luftgeschwindigkeiten und alle Staubbelastungen.



**Abb. 6:** Gemessener reduzierter Explosionsdruck bei tangentialer Befüllung, aufgetragen über dem nach der VDI-Richtlinie 3673 Anhang A1 berechneten Druck

Die in Abbildung 6 eingezeichnete Winkelhalbierende stellt die Einhüllende nach Anhang A1 der Richtlinie dar, d.h. sie ist die Menge aller Punkte für die der gemessene Druck gleich dem berechneten Druck wäre. Ergebnis dieser Abbildung ist, dass ist annähernd 200 Explosionsversuchen bei der tangentialen Befüllung der maximale reduzierte Explosionsdruck den Wert der Richtlinie nie erreicht, häufig sogar sehr deutlich unterschreitet. Das lässt den Schluss zu, dass für die Dimensionierung der Druckentlastungsflächen bei der tangentialen pneumatischen Befüllung die Dimensionierungsgleichung gemäß Anhang A1 mit ausreichender Sicherheit verwendet werden könnte.

Da jedoch die Messwerte jene Werte gemäß Anhang A1 teilweise sehr deutlich unterschreiten, sollte untersucht werden, ob eine neue Dimensionierungsgleichung erzeugt werden kann, die als Einhüllende für alle gewonnenen Messdaten dient. Dazu wurden die Messwerte nach dem  $K_{st}$ -Wert der verwendeten Produkte gruppiert. Abbildungen 7 a, b und c zeigen entsprechend der Auftragung in Abbildung 6 den Vergleich der Messwerte mit den nach der Richtlinie zu erwartenden Drücken. Abbildung 7a beinhaltet sämtliche Daten, die mit Weizenmehl durchgeführt wurden, also mit einem  $K_{st}$ -Wert von 109 bar\*m/s, Abbildung 7b zeigt die Daten mit einem  $K_{st}$ -Wert von 160 bar\*m/s und 7c mit einem  $K_{st}$ -Wert von 220 bar\*m/s.

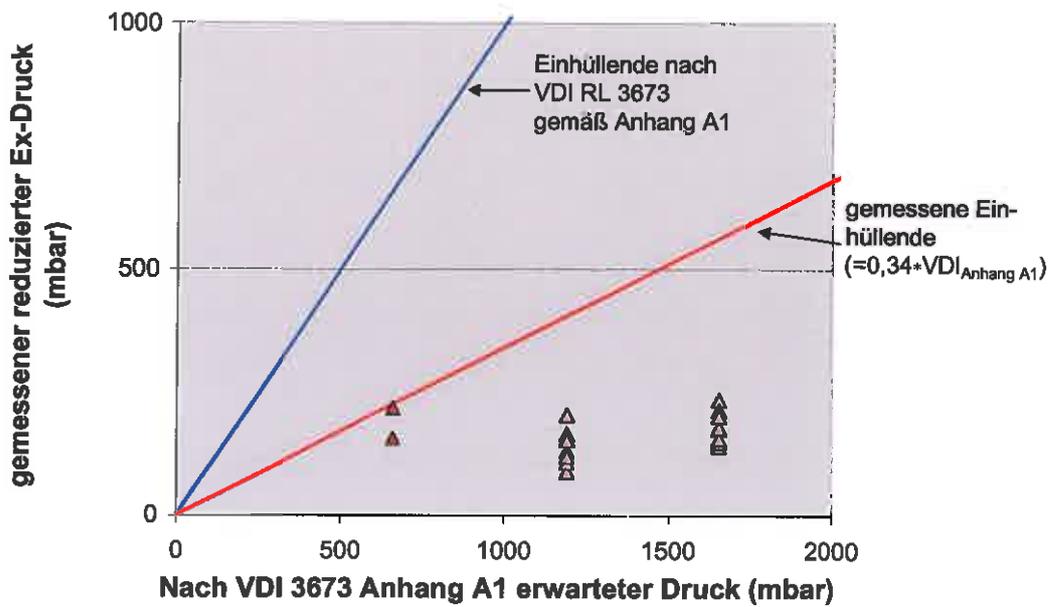


Abb. 7a: Gemessener reduzierter Explosionsdruck aller Daten mit  $K_{st} = 109 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$  bei tangentialer Befüllung, aufgetragen über dem nach der VDI-Richtlinie 3673 Anhang A1 berechneten Druck.

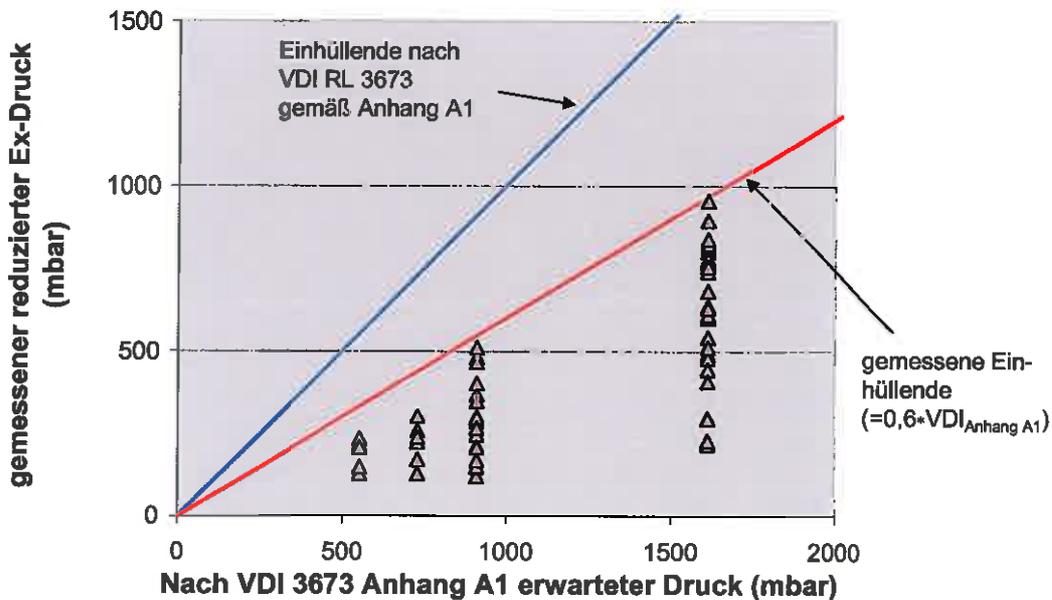
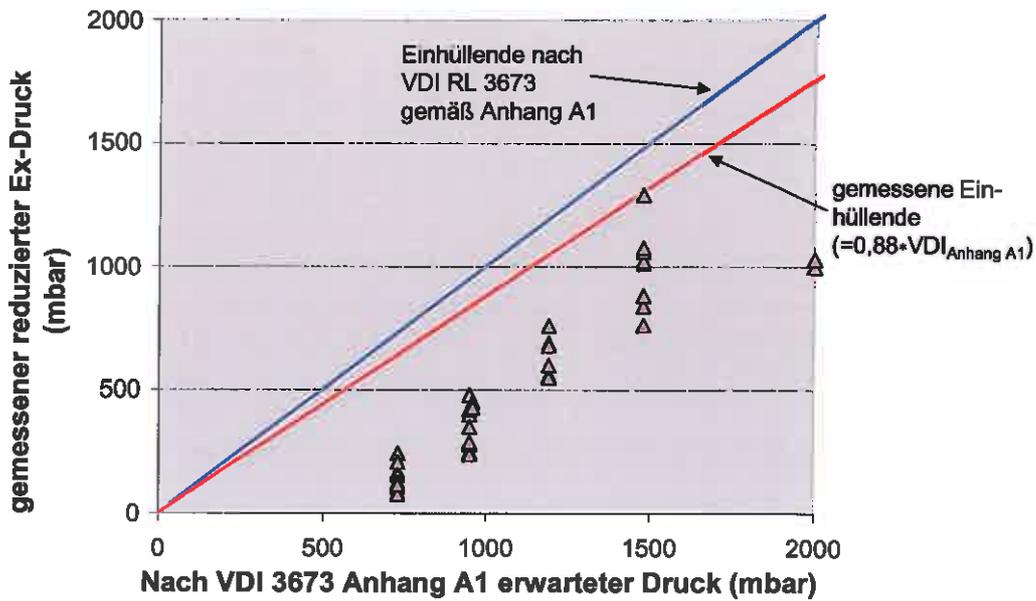
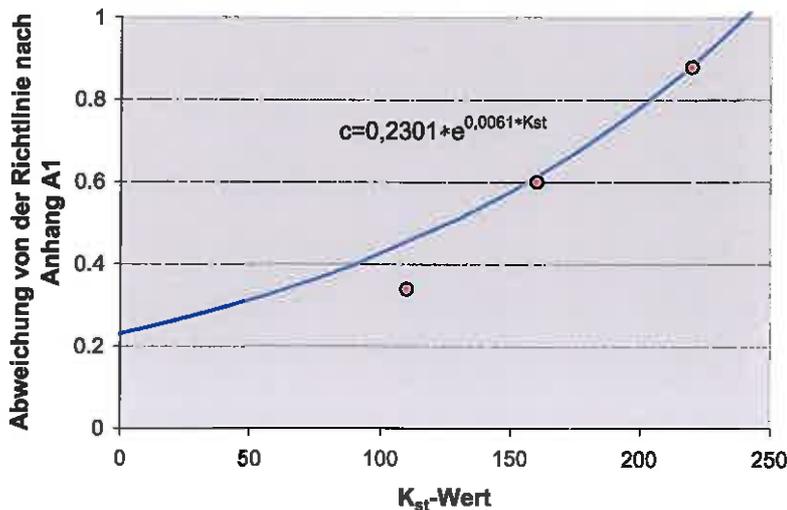


Abb. 7b: Gemessener reduzierter Explosionsdruck aller Daten mit  $K_{st} = 160 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$  bei tangentialer Befüllung, aufgetragen über dem nach der VDI-Richtlinie 3673 Anhang A1 berechneten Druck.



**Abb. 7c:** Gemessener reduzierter Explosionsdruck aller Daten mit  $K_{st} = 220 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$  bei tangentialer Befüllung, aufgetragen über dem nach der VDI-Richtlinie 3673 Anhang A1 berechneten Druck.

In Abbildungen 7 a, b und c ist neben der oben beschriebenen Winkelhalbierenden jeweils eine einhüllende Gerade für die Messwerte eingezeichnet. Diese Einhüllende ergibt sich aus der Winkelhalbierenden multipliziert mit einem Faktor  $c$ . Dieser Faktor beträgt 0,34 für  $K_{st} = 109 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ , 0,6 für  $K_{st} = 160 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$  und 0,88 für  $K_{st} = 220 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ . Dies bedeutet beispielsweise dass alle Messwerte bei einem  $K_{st}$  Wert von 160  $\text{bar}\cdot\text{m/s}$  unterhalb 60 % des nach der Richtlinie 3673 gemäß Anhang A1 berechneten Druckwertes liegen.



**Abb. 8:** Abweichung von der gemessenen Einhüllenden von der nach der VDI Richtlinie 3673 gemäß Anhang A1 berechneten.

Die Werte dieser drei Konstanten sind in Abbildung 8 über dem  $K_{st}$  Wert aufgetragen. Obwohl die Punkte sehr gut durch eine Gerade anzupassen wären, wurde ein exponentieller Fit gewählt. Dieser hat die Form  $c=0,2301 \cdot e^{0,0061 \cdot K_{st}}$ . Daraus ergibt sich, dass die Einhüllende für alle  $K_{st}$  Werte folgenden Form hat:

$$p_{red, max, neu} = c \cdot p_{red, max, Anhang A1} \quad \text{mit} \quad c = 0,2301 \cdot e^{0,0061 \cdot K_{st}} \quad \Rightarrow \quad p_{red, max, Anhang A1} = \frac{1}{0,2301} \cdot e^{-0,0061 \cdot K_{st}} \cdot p_{red, max, neu}$$

Durch Einsetzen von  $p_{red, max, neu}$  in die Gleichung nach Anhang A1 der Richtlinie ergibt sich für die notwendige Entlastungsfläche:

$$A = X \left( 1 + Y \cdot \log\left(\frac{L}{D_E}\right) \right) \quad \text{mit}$$

$$X = 0,011 \cdot K_{st} \cdot D_F \cdot E_F^{-1} \cdot \left( \frac{1}{D_2} \left( \frac{8,6}{k} \cdot \log(p_{red, max}) - \frac{K_{st}}{44} - 0,513 \right) - \frac{5,5}{k} \cdot \log(p_{red, max}) + \frac{K_{st}}{69} + 0,191 \right)$$

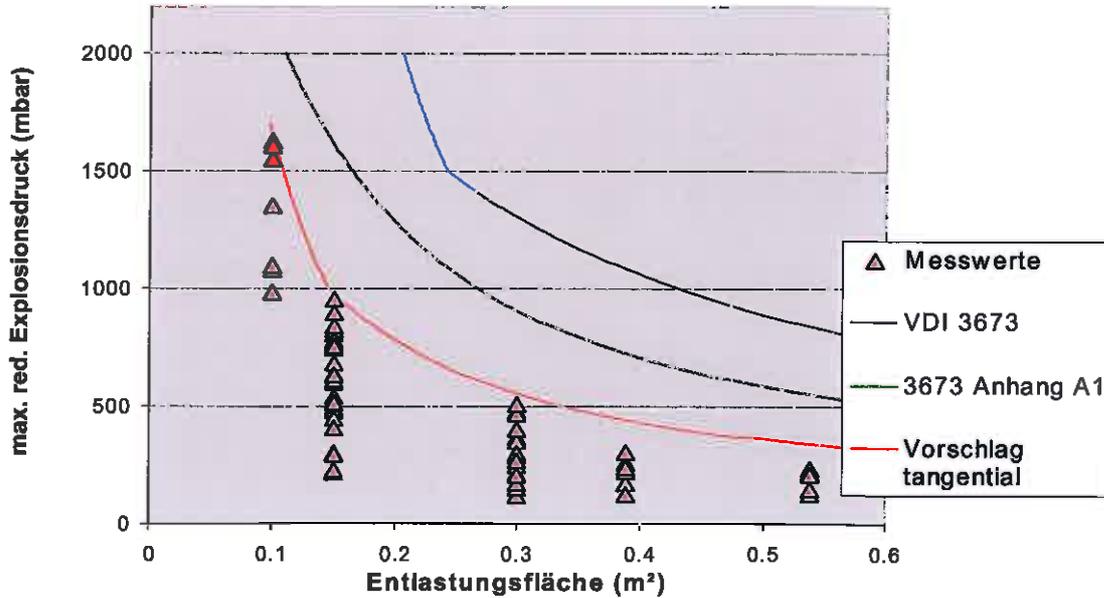
$$\text{und} \quad Y = 0,166 \cdot e^{\frac{K_{st}}{129} - 1,27} \cdot p_{red, max}^{-1,27}$$

mit  $k=1$  für  $0,1 \text{ bar} \leq p_{red, max} \leq 1 \text{ bar}$

Da auch Messungen durchgeführt wurden, die außerhalb des Gültigkeitsbereiches der Gleichung gemäß Anhang A1 liegen, also berechnete Druckwerte oberhalb von 2 bar liefern, wurde die neue Dimensionierungsgleichung so modifiziert, dass sie auch als Einhüllende für diese Werte dient. Um einen stetigen Verlauf der Funktion zu erreichen, wurde für  $p > 1 \text{ bar}$  in obige, neue Bestimmungsgleichung  $p_{neu}$  durch  $p_{alt}^2$ , d.h.  $p_{alt}$  durch  $p_{neu}^{1/2}$  ersetzt. Einsetzen von  $p_{alt}$  in die neue Bestimmungsgleichung führt zu der oben angegebenen Gleichung mit  $k=2$ .

d.h.  $k=2$  für  $1 \text{ bar} < p_{red, max} \leq 1,7 \text{ bar}$

Zur Visualisierung dieser neuen Gleichungen wurde in Abbildung 9 der gemessene reduzierte Explosionsdruck bei tangentialer pneumatischer Befüllung über der Entlastungsfläche aufgetragen. Diese Variation der Entlastungsfläche wurde mit ungetrockneter Maisstärke, d.h. mit einem  $K_{st}$  Wert von  $160 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$  am Silo mit dem Volumen von  $12 \text{ m}^3$  und einem  $L/D_E$  von 3,5 durchgeführt.



**Abb. 9:** Maximaler reduzierter Explosionsdruck von Maisstärke als Funktion der Entlastungsfläche ( $K_{st}=160 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ ,  $V=12 \text{ m}^3$ ,  $L/D_E=3,5$ )

In Abbildung 9 sind neben den Messwerten und der vorgeschlagenen Einhüllenden, die nach der neuen Formel berechnet wurde, auch die Druck-Flächenkurven der Richtlinie angegeben.

Als Definitionsbereich für die vorgeschlagene Gleichung gilt:

$$0,1 \text{ bar} \leq p_{red, max} \leq 1,7 \text{ bar}$$

$$1 \leq \frac{L}{D_E} \leq 5$$

$$6 \text{ m}^3 \leq V \leq 120 \text{ m}^3$$

$$100 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq K_{st} \leq 220 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{für kleinere } K_{st} \text{ Werte darf die Gleichung}$$

$$\text{mit } K_{st} = 100 \text{ bar} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ angewandt werden.}$$

$$0 < D_F \leq 0,2 \text{ m} \quad \text{und} \quad v_{Luft} \leq 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{mit} \quad \dot{V} \leq 2500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$p_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$$

$$p_{max} \leq 9 \text{ bar}$$

Bei der Dimensionierung der Entlastungsflächen bei tangentialer pneumatischer Befüllung nach der vorgeschlagenen Formel sind einige Sicherheitsreserven enthalten, über die im

Folgenden genauer eingegangen werden soll. Es gibt einerseits Sicherheitsreserven die sich aus der experimentellen Vorgehensweise ergeben, zudem solche die aus der Auswertung resultieren.

Zu den Experimentellen sind zu zählen, dass die meisten Explosionsversuche bei "optimaler" Fordermenge durchgeführt wurden, also bei solchen Staubbeladungen, die zu maximalen Drücken führen. Weiterhin sind bei fast allen Versuche die Zündungen im untersten Teil des Silos erfolgt, was wiederum zu den heftigsten Explosionen geführt hat. Des Weiteren soll noch angemerkt werden, dass das auf dem Versuchsfeld befindliche Silo durch eine Vielzahl von Flanschen für die Montage von Messsonden modifiziert wurde. Dadurch ist die Silowandung oftmals unterbrochen, was zu einer Störung des Produktstromes entlang der Silowand führt. Es ist folglich mit einer deutlich stärkeren Staubwolkenbildung zu rechnen, als es bei einem gewöhnlichen Silo der Fall wäre. Als Konsequenz davon ergibt sich ein höherer maximaler reduzierter Explosionsdruck in der Versuchsanlage, als er in der Praxis zu erwarten wäre.

Die sich aus der Auswertung der Messdaten ergebenden Sicherheitsreserven liegen darin, dass keine Mittelwertbildung erfolgte, so dass jeder Messwert, also auch "Ausreisser" zu hohen Druckwerten mit berücksichtigt wurden.

## **7 Zusammenfassung**

Durch praxisnahe Explosionsversuche bei tangentialer pneumatischer Befüllung konnte gezeigt werden, dass die sich einstellenden maximalen reduzierten Explosionsdrücke deutlich unterhalb denen sind, die nach der VDI-Richtlinie 3673 Blatt 1 zu erwarten sind. Dabei werden sowohl die Werte nach Abschnitt 7, als auch die gemäß Anhang A1 der Richtlinie in annähernd 200 Explosionsversuchen unterschritten. Durch die Modifikation der Gleichung gemäß Anhang A1 der Richtlinie wurde eine neue Dimensionierungsgleichung von Druckentlastungsflächen entwickelt, die als Einhüllende aller gemessenen Daten dient. Es wird für den Weißdruck der VDI-Richtlinie 3673 Blatt1 ein neuer Anhang vorgeschlagen, der sich mit der tangentialen Befüllung befasst. Hierin wird zur Benutzung der neu entwickelten Formel wahlweise die Verwendung der Gleichung gemäß Anhang A1 der Richtlinie vorgeschlagen.

Da es sich bei Silos die tangential befüllt werden, häufig um Silos mit kleineren Volumina handelt und diese sich meist in Hallen befinden, kommt der neuen Dimensionierungsgleichung eine besondere Bedeutung zu. Eine Druckentlastung ist in Hallen i.A. nur durch Abblaskanäle oder Q-Rohre zu realisieren. Folglich ist die Verwirklichung einer möglichst kleinen Druckentlastungsöffnung besonderers wichtig. Die Kosten der Abblasleitungen oder der Q-Rohre und die Versperrung des Raumes durch überdimensionierte Abblaskanäle sind hier vorrangig zu nennen.

## **8 Literatur**

- [1] Hauert F., Fogt H., Vogl A., Wennerberg D., Radandt S. Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen. In VDI Berichte 1272, Sichere Handhabung brennbarer Stäube, Seite 309–326. VDI-Verlag (Düsseldorf), 1996.
- [2] Hauert F., Vogl A., Radandt S. Turbulenz und Staubkonzentration beim Befüllen eines 12 m 3 –Silos. Staub-Reinhaltung der Luft, 56(10):375–381, 1996.
- [3] VDI 3673. Druckentlastung von Staubexplosionen (Pressure Release of Dust Explosions). Verein deutscher Ingenieure, Beuth-Verlag (Berlin), 2000.

## 9 Anhang: Wortlaut der Ergänzung zur Richtlinie 3673 Blatt1

### A2 Pneumatische Förderung mit tangentialem Produkteintritt

Praxisnahe Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer tangentialen Einföderung von Produkten durch pneumatische Förderung in Behälter und Silos ein geringerer maximaler reduzierter Explosionsüberdruck entsteht, als den Gleichungen (3) und (4) zugrunde gelegt ist [X1, X2]. Für die tangentiale pneumatische Befüllung können folgende empirische Zahlenwertgleichungen zur Berechnung der erforderlichen Entlastungsfläche A verwendet werden.

$$A = X(1 + Y \cdot \log(\frac{L}{D_E})) \quad \text{in } m^2 \quad (A-7)$$

mit

$$X = \left( \frac{1}{D_Z} \left( \frac{8,6}{k} \cdot \log(p_{red,max}) - \frac{K_{St}}{44} - 0,513 \right) - \frac{5,5}{k} \cdot \log(p_{red,max}) + \frac{K_{St}}{69} + 0,191 \right) \cdot 0,011 \cdot K_{St} \cdot D_F \cdot E_F^{-1} \quad (A-8)$$

$$Y = 0,166 \cdot e^{\frac{K_{St}}{129}} \cdot p_{red,max}^{-1,27} \quad (A-9)$$

mit  $k = 1$  für  $0,1 \text{ bar} \leq p_{red,max} \leq 1 \text{ bar}$

und  $k = 2$  für  $1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 1,7 \text{ bar}$

Die Gleichungen gelten unabhängig von der Produktbelastung für:

- tangentialen Produkteintritt über ein Förderrohr vom Durchmesser  $D_F \leq 0,2 \text{ m}$ ,
- runde Behälter/Silos ohne Einbauten (ausgenommen Messeinrichtungen),
- Volumen  $6 \text{ m}^3 \leq V \leq 120 \text{ m}^3$ ,
- ein Längendurchmesser Verhältnis  $L/D_E$  mit  $1 \leq L/D_E \leq 5$ ,
- Förderluftgeschwindigkeiten von  $v_L \leq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- einen Luftvolumenstrom von  $\dot{V} \leq 2500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,
- einen statischen Ansprechüberdruck der Druckentlastungseinrichtung von  $p_{stat} \leq 0,1 \text{ bar}$ ,
- einen maximalen reduzierten Explosionsüberdruck von  $0,1 \text{ bar} < p_{red,max} \leq 1,7 \text{ bar}$ ,
- einen maximalen Explosionsüberdruck von  $p_{max} \leq 9 \text{ bar}$ ,
- eine staubspezifische Kenngröße von  $100 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leq K_{St} \leq 220 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Für kleinere  $K_{St}$ -Werte kann die Gleichung mit  $K_{St} = 100 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  angewendet werden.
- $D_Z$  errechnet sich nach Gleichung (A-6).

Alternativ kann die Berechnung gemäß Anhang A1, unter den dort angegebenen Randbedingungen erfolgen.

[X1] F. Hauert, A. Arnold, A. Vogl, S. Radandt: Explosionsdruckentlastung eines Kleinsilos bei pneumatischer Befüllung mit tangentialer Produkteinleitung. VDI Berichte 1601, S. 473/481. VDI-Verlag Düsseldorf 2001

[X2] A. Arnold, F. Hauert, A. Vogl, S. Radandt: Explosionsdruckentlastung von Behältern und Silos bei tangentialer pneumatischer Befüllung, Abschlussbericht, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, Mannheim 2001