

# Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen

F. Hauert\* H. Fogt# A. Vogl\* D. Wennerberg# S. Radandt\*

\*Berufsgenossenschaft N & G, Mannheim #Battelle, Ingenieurtechnik, Eschborn

## Zusammenfassung

Die Turbulenz und die Staubkonzentration in Staubwolken sind entscheidende sicherheitstechnische Parameter für die Vorhersage der Heftigkeit von Staubexplosionen in der industriellen Praxis. An einem 12 m<sup>3</sup>-Silo wurden bei pneumatisch axialer bzw. tangentialer Befüllung mit Maisstärke die Staubkonzentration und mit einem Laser-Doppler-Anemometer die Teilchengeschwindigkeit bzw. Turbulenz bestimmt. Die Staubverteilungen und Geschwindigkeiten wurden zudem mit numerischen Verfahren berechnet. Unter gleichen Bedingungen wurden Explosionsversuche durchgeführt. Die Staubkonzentrationen übersteigen bei pneumatisch axialer Befüllung die untere Explosionsgrenze (UEG) nahezu im gesamten Silo, wogegen bei tangentialer Befüllung in einer dünnen Schicht am Silorand die UEG weit überschritten wird und im restlichen Volumen nur lokal optimale Konzentrationen auftreten. Sowohl die gemessene Geschwindigkeitsverteilung als auch die Staubkonzentration konnte mit numerischen Verfahren gut simuliert werden. Aus den Ergebnissen der Explosionsversuche ist zu erkennen, daß bei tangentialer Befüllung die reduzierten Drücke deutlich unter denen bei vertikaler Befüllung liegen.

## 1 Einleitung

Die Charakterisierung von Staubwolken bzw. von Luft-/Partikelgemischen, d.h. die Bestimmung der zeitlichen und räumlichen Teilchenbewegung sowie deren Konzentration ist in vielen Bereichen von Interesse. So zum Beispiel bei der Immission von Mehlstaub aus Bäckereimaschinen, Rauch aus Räumereianlagen oder die Staubverteilung in Wirbelschichttrocknern. Diese Liste ließe sich beliebig fortsetzen.

Neben diesen Anwendungsgebieten ist die Bestimmung der Staubkonzentration für die Einordnung bestimmter Behälter in die Zone 10 von großer Wichtigkeit. Läßt sich ein Rechenverfahren für die Bestimmung der Staubkonzentration verifizieren, kann damit die Beurteilung, ob die untere Explosionsgrenze überschritten wird, differenziert für verschiedene Behälter oder deren Teilbereiche vorgenommen werden.

Die Heftigkeit von Explosionsabläufen bei der Zündung von Staub/Luft-Gemischen mit deflagrativer turbulenter Verbrennung und damit auch die Auswirkungen auf die Umgebung werden neben einer Reihe unterschiedlicher Parameter entscheidend durch die Staubkonzentration, die Homogenität der Wolke und die Turbulenz zum Zeitpunkt der Entzündung bestimmt.

Die Turbulenz vor der Zündung hat einen großen Einfluß auf die resultierende Flammengeschwindigkeit und kann den maximalen Explosionsdruck sowie die Druckanstiegsgeschwindigkeit in druckentlasteten Anlagenteilen und Rohrleitungen durch Beschleunigung der Wärme- und Stofftransportprozesse der heterogenen Verbrennung [8, 12] erheblich steigern. Sie wird durch den industriellen Prozess selbst — durch Reibung oder Strömung — erzeugt [3].

Viele dieser Einflußfaktoren wie z.B. Korngröße, Feuchte, Temperatur oder Sauerstoffgehalt können relativ leicht bestimmt und damit die Verhältnisse der industriellen Praxis in Laborversuchen oder Großversuchen simuliert werden. Messungen der Staubkonzentration und der Teilchengeschwindigkeit sind, wie weiter unten beschrieben wird, möglich, erfordern aber — abhängig von den Randbedingungen — einen gewissen Meßaufwand.

Zuverlässige Simulationen bzw. Berechnungen der Partikelbewegung unter vorgegebenen geometrischen sowie verfahrensabhängigen Voraussetzungen könnten dann aufwendige Messungen einsparen. Denn für reale Anlagen ist eine hinreichende Risikoabschätzung nur möglich, falls die Einflüsse und die Wirkmechanismen aller explosionsbestimmenden Parameter, u.a. Turbulenz und Staubkonzentration, bekannt sind.

In einem Kleinsilo wurden die Teilchengeschwindigkeiten, die Turbulenz und die Staubkonzentration der Staubwolken gemessen, die bei verschiedenen Befüllmethoden entstehen, und die entsprechenden Explosionsversuche durchgeführt. Zusätzlich wurden zum Vergleich numerische Berechnungen der Teilchengeschwindigkeit, der Turbulenz und der Konzentration durchgeführt.

## 2 Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Staubkonzentrationsmessung

Das verwendete Meßsystem, das auf der Extinktion von infrarotem Licht ( $\lambda=950$  nm) beruht, erlaubt Konzentrationen von ca. 20–1500  $\frac{g}{m^3}$  bei Änderungen bis zu 2000 Hz mit Hilfe des Lambert-Beerschen Gesetzes zu messen [6].

Zusätzlich wurde für den Meßkopf eine Druckluftreinigung entwickelt, um die starke Verstaubung der Optik zwischen den Versuchen zu beseitigen, die die Linsen mit einem kurzen Luftstoß abreinigt.

## 2.2 Geschwindigkeitsmessungen

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Staubteilchen wurden mit einem transportablen Einkanal-Laser-Doppler-Anemometrie-System (LDA) (Flowlite, DANTEC) mit einer Brennweite von 50 mm durchgeführt. Das Prinzip dieses Meßverfahrens ist in Ruck [9] oder Durst et al. [2] detailliert dargestellt.

Die gemessenen Geschwindigkeitsverläufe werden in eine mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$  (Grundströmung) und in ihre Schwankungsgröße zerlegt, welche durch den RMS-Wert (Root Mean Square) charakterisiert wird [7]. In einem Zeitfenster  $\tau = t' - t$  ergeben sich unter der Annahme eines zeitlich konstanten Mittelwerts der Geschwindigkeit (stationäre Strömung) diese beiden Größen zu:

$$\bar{u} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t'} u(t) dt \quad RMS = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_t^{t'} (u(t) - \bar{u})^2 dt}.$$

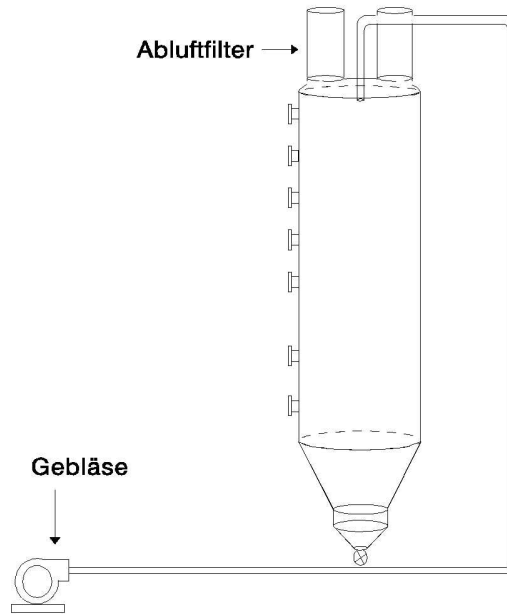
Zur Auswertung der Meßdaten wurden einzelne Fehlmessungen, die beispielsweise aufgrund von Rauschen entstehen, durch Vergleich mit den Nachbarpunkten eliminiert. Zudem wird für jeden gültigen Meßwert bei der verwendeten Zeitfenstermittlung eine Umgebung mit empirisch festgelegter Breite  $\tau$  betrachtet. Alle Meßwerte, die in diesem Zeitfenster liegen, werden zur Bildung des Mittelwertes bzw. RMS-Wertes herangezogen. Die turbulenten Geschwindigkeitsverteilungen wurden durch Mittelung von jeweils zehn Messungen an einer Meßposition erhalten [6].

## 2.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in einem Kleinsilo mit einem Volumen von 12 m<sup>3</sup> (L/D=3) mit einer pneumatischen Förderanlage durchgeführt. Abb. 1 zeigt eine Darstellung der Anlage. Auf dem Silo sind zur Luftabführung zwei Abluftfilter (Ø500 mm) mit einer Filterfläche von je 2.5 m<sup>2</sup> um die Einblasstelle angeordnet, durch die die Förderluft aus dem Silo entweicht.

Nach dem Einbringen des Produkts wird die Förderung im Kreislauf gefahren, d.h. aus dem Silo wird der Staub direkt über eine Zellenradschleuse mittels der Pneumatik wieder zum Silokopf gefördert. Der überwiegende Teil der Partikel gelangt auf die Schüttung im Fuß des Silos und wird durch den Auslauftrichter nach unten abgezogen.

Die Geschwindigkeits- und Konzentrationsmessungen wurden mit Maisstärke, Weizenmehl und Titandioxid (TiO<sub>2</sub>) bei pneumatisch axialer Befüllung, die Explosionsversuche und die numerischen Berechnungen mit Maisstärke durchgeführt. Die Explosionsversuche wurden zum Vergleich auch bei pneumatisch tangentialer Einfüllung durchgeführt.



**Abbildung 1:** Schema des 12 m<sup>3</sup>-Silo, das pneumatisch axial befüllt wurde. Das Feststoff-/Luftgemisch wird durch eine vertikale Förderleitung (Ø75 mm) mittels Druck-Flugförderung direkt in das Silo (axiale/zentrale bzw. tangentielle Befüllung) geblasen ( $v \approx 23$  m/s). Die Staubbeladung  $\xi$  des Förderstromes wird über die Zentralschleuse am Siloauslauf geregelt.

### 3 Numerische Berechnungen

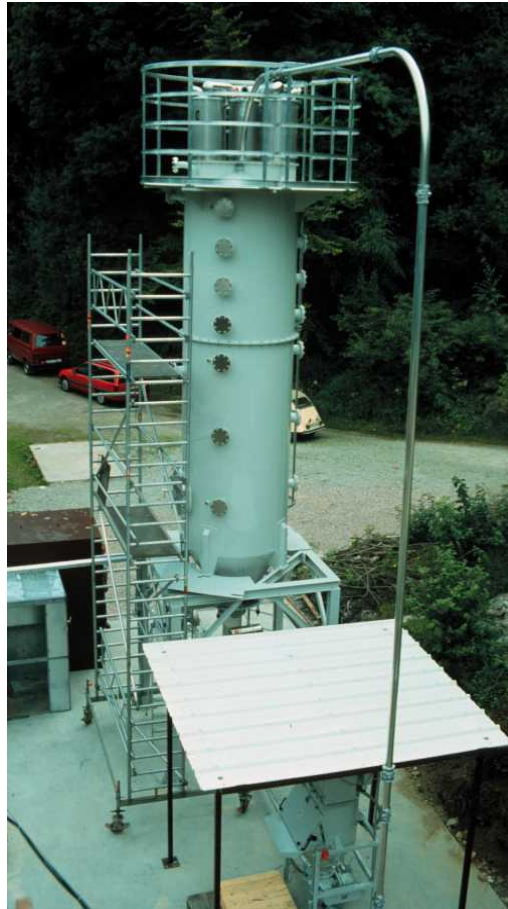
Für die numerische Berechnung der Gasphase und der Teilchenausbreitung wird angenommen, daß das Strömungsfeld stationär und rotationssymmetrisch ist. Diese Voraussetzung ist mit Ausnahme des obersten Behälterbereichs, der in unmittelbarer Nähe der drei Auslaßöffnungen liegt, gut erfüllt.

Nach Festlegung des numerischen Gitternetzes in einer vertikalen Schnittebene des Silos erfolgt die Berechnung in zwei Schritten. Zunächst wird das Geschwindigkeits-, Druck und Turbulenzfeld der Gasströmung mit einem Finite-Volumen-Verfahren berechnet [4]. Im zweiten Schritt werden die Bahnlinien einer ausreichend großen Zahl repräsentativer Teilchen in dieser Strömung mit einem Lagrange-Verfahren ermittelt [10]. Die Teilchen beeinflussen das Strömungsfeld des Gases. Die beiden Lösungsschritte werden deshalb so lange iterativ wiederholt, bis sich die Ergebnisse beider Phasen nicht mehr ändern.

Der Berechnung des Strömungsfelds liegen die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen in Verbindung mit dem Wirbelviskositätsansatz und dem  $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell zugrunde. Die Erhaltungsgleichungen lauten für die Fluidphase in differentieller Schreibweise und allgemeiner Form:

$$\nabla \cdot (\rho_c \vec{U}_c \Phi) - \nabla \cdot \Gamma_{\Phi,eff} \nabla \Phi = S_{\Phi} + S_{\Phi,p} \quad (1)$$

Darin ist  $\rho_c$  die Dichte und  $\vec{U}_c$  die zeitgemittelte Geschwindigkeit des Fluids. Die all-



**Abbildung 2:** Praktische Realisierung des Versuchsaufbaus aus Abb. 1. Die Meßsonden können an 21 Flanschen in sieben Ebenen positioniert werden. Die axiale wie auch die tangentielle Geschwindigkeitskomponente kann in je einer Messung erfaßt werden.

gemeine Variable  $\Phi$  nimmt unterschiedliche Werte an, um die Erhaltung von Masse, Impuls und Turbulenz (kinetische Energie der Schwankungsbewegung  $k$  und Dissipation  $\varepsilon$ ) zu repräsentieren. Der erste Term der Gleichung entspricht der konvektiven Änderung der dargestellten Strömungsgröße. Der zweite Ausdruck steht für ihre Diffusion mit dem Diffusionskoeffizient  $\Gamma_{\Phi,eff} = \Gamma_{\Phi,mol} + \Gamma_{\Phi,turb}$ , der einen molekularen und einen turbulenten Anteil enthält. Die molekulare Diffusion ist durch die Stoffeigenschaften des Fluids gegeben, die turbulente wird aus den lokalen Eigenschaften des Strömungsfeldes berechnet. Auf der rechten Seite befinden sich die Quell- bzw. Senkenterme. Der Ausdruck  $S_{\Phi,p}$  tritt nur bei zweiphasiger Strömung auf und beschreibt den Einfluß der Teilchenphase auf die Fluidphase.

Das System der gekoppelten, nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen wird mit der Finite-Volumen-Methode diskretisiert und in ein System algebraischer Gleichungen überführt, das numerisch gelöst wird. Die Diskretisierung erfolgt auf einem konturangepaßten, nicht versetzten Rechnernetz. Für die Simulation der Siloströmung wurden  $79 \times 38$  Kontrollvolumen verwendet. Die Druck-Geschwindigkeitskopplung beruht auf dem SIMPLE-Algorithmus.

Die Berechnung der Teilchenausbreitung erfolgt mit der Lagrange-Methode. Dazu muß die Häufigkeitsverteilung der Teilchengröße bekannt sein. Sie wird in eine überschaubare Anzahl von diskreten Teilchenklassen unterteilt. Im vorliegenden Fall wurden neun Klassen zwischen  $9\mu m$  und  $61.5\mu m$  gewählt. Aus jeder Teilchenklasse wird eine so große Anzahl von Teilchen berechnet, daß daraus repräsentative Mittelwerte für die Verteilung der betreffenden Klasse abgeleitet werden können.

Die Partikeln werden als punktförmige Einzelteilchen aufgefaßt und dem zuvor berechneten Strömungsfeld ausgesetzt, die Kräfte in einem mitbewegten Koordinatensystem bilanziert und die Bewegungsgleichung stückweise integriert. Für ein Teilchen mit der Masse  $m_p$  lautet sie unter dem Einfluß der Summe aller Kräfte  $\vec{F}$ :

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F} \quad (2)$$

Wirken nur Widerstandskraft und Schwerkraft auf das Teilchen, folgt daraus nach dem Einsetzen der Kräfte:

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{c_D}{D_p} \frac{\rho_c}{\rho_p} (\vec{U}_c - \vec{U}_p) |\vec{U}_c - \vec{U}_p| + \vec{g} \quad (3)$$

mit dem Teilchendurchmesser  $D_p$ .

Der Widerstandskoeffizient wird durch die Funktion

$$c_D = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{1}{6} Re_p^{0.66} \right), Re_p < 1000; \quad c_D = 0.44, Re_p \geq 1000.$$

approximiert, die von der Teilchenreynoldszahl

$$Re_p = \frac{D_p \rho_c |\vec{U}_c - \vec{U}_p|}{\mu_c}$$

abhängt.

Mit einem Interaktionsmodell wird der stochastische Einfluß der Turbulenz auf die Teilchenbewegung berücksichtigt. Unter Annahme isotroper Turbulenz werden Größe und mittlere Lebensdauer der Wirbel aus den Kennwerten des  $k$ - $\varepsilon$ -Modells berechnet. Daraus folgt die mittlere Interaktionszeit eines Teilchens mit einem Wirbel.

Trifft das Teilchen gegen eine feste Wand, wird ein Reflexionsgesetz der Form  $\vec{U}_{p,n}^{neu} = -b \cdot \vec{U}_{p,n}^{alt}$  für die Geschwindigkeitskomponente normal zur Wand vorgegeben. Der empirische Faktor  $b \leq 1$  berücksichtigt, daß die Stöße nicht ideal elastisch sind. Es wird angenommen, daß die Teilchen von der Schüttung aufgenommen werden, sobald sie den Siloboden erreichen und nicht wieder aufgewirbelt werden ( $b = 0$ ).

Jedes Teilchen, das ein Kontrollvolumen durchquert, hinterläßt einen Beitrag zum Quellterm  $S_{\Phi,p}$ . Die einzelnen Beiträge werden im Lauf der Rechnung summiert und fließen in den nächstfolgenden Berechnungsschritt der Fluidphase ein.

## 4 Explosionsversuche

Zur Durchführung der Explosionsversuche wurde zum Schutz der sich unten anschließenden Anlagenteile der Siloauslauf mit Sand gefüllt, so daß das Volumen auf  $9.4 \text{ m}^3$  reduziert wurde. 30 s nachdem die Pneumatik angelaufen war, wurde die Maisstärke über die Zellradschleuse dem Luftstrom zugeführt, um nach weiteren 30 s das Staub-/Luftgemisch im Silo bei laufender Förderung mit einem chemischen Zünder zu zünden [5].

## 5 Ergebnisse und deren Diskussion

### 5.1 Staubkonzentrationsmessungen und Berechnungen

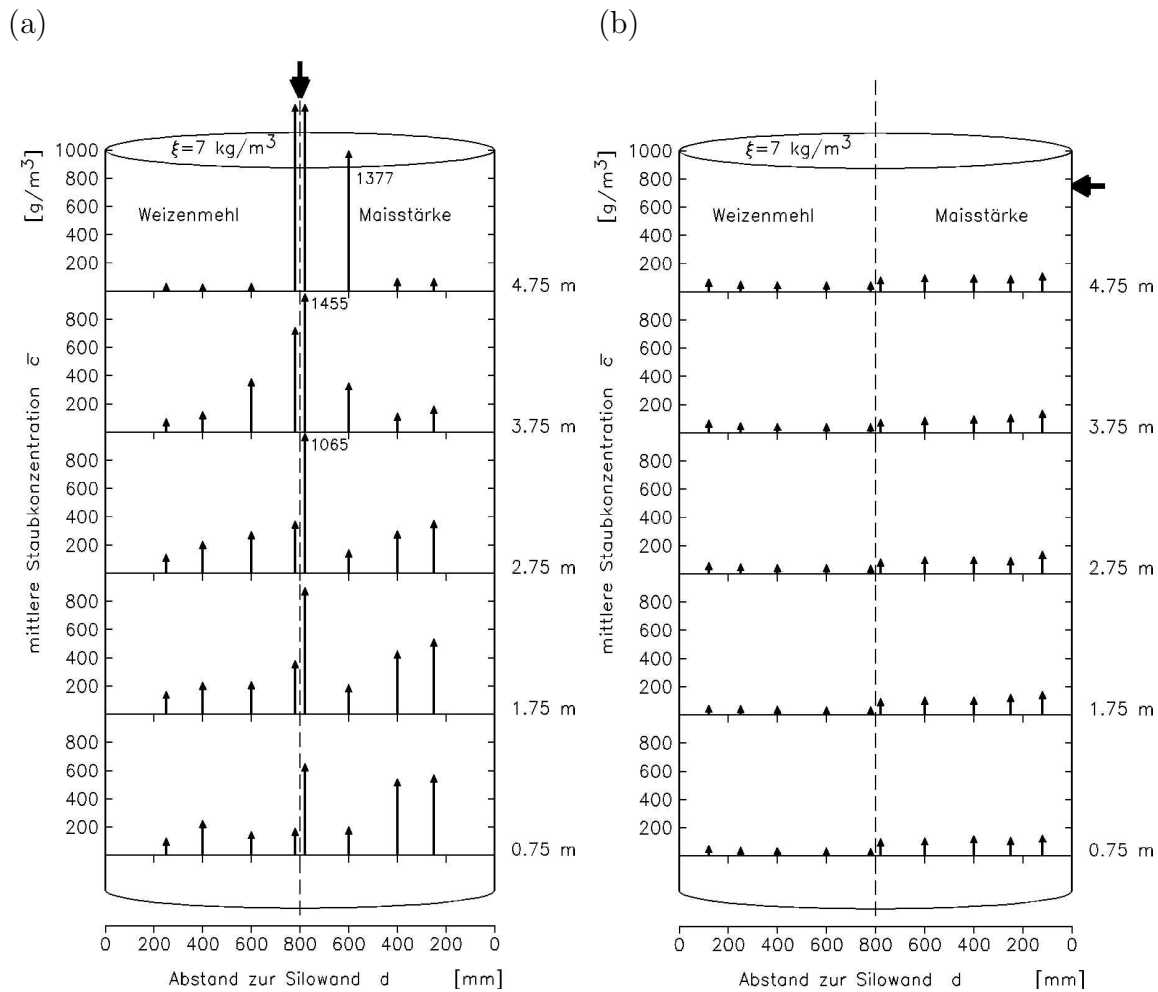
**Pneumatisch axiale Befüllung:** Obwohl die Absolutwerte der Staubkonzentration stark vom verwendeten Staub abhängen, wie Abb. 3(a) zeigt, können bei vertikaler Befüllung die gleichen Tendenzen für die Staubverteilung festgestellt werden. Unabhängig von der Staubbeladung des Förderstromes gilt:

- bis zu einem Abstand zur Silowand von 400 mm nimmt die Staubkonzentration bei wachsender Meßhöhe im Silo ab.
- zwischen 600 mm und 800 mm Wandabstand befindet sich bei zunehmender Meßhöhe der Bereich, in dem der Strahl noch hinreichend kollimiert ist und der damit eine hohe Staubkonzentration aufweist.

Erhöht man bei vertikaler Befüllung die Staubbeladung von 3 auf  $7 \text{ kg/m}^3$  und bleibt hierbei die hohe Staubkonzentration in der Mittelachse des Silos unberücksichtigt, so wächst die Staubkonzentration auf das ca. 1.5fache an [6].

Die numerische Simulation wurde für den Fall der axialen Befüllung mit einer Beladung von  $3 \text{ kg/m}^3$  durchgeführt. Die Teilchen werden der Gasströmung bereits im Zulaufrohr beigemischt. Die berechnete Staubverteilung stimmt qualitativ mit den Messungen überein (Abb. 4,5). In Analogie zum Experiment nimmt die Konzentration im Außenbereich mit wachsender Höhe ab. Die Absolutwerte der berechneten Verteilung liegen allerdings tiefer als die Meßwerte. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in der Vernachlässigung der Wiederaufwirbelung von Teilchen. Sie führt in der Realität zu einer Erhöhung der Staubkonzentration im unteren Bereich des Silos. Die aufgewirbelten Teilchen gelangen durch das äußere, nach oben gerichtete Geschwindigkeitsfeld erneut in die umlaufende Strömung und erhöhen die Staubkonzentration.

Im Zentrum des Strahls ist die berechnete Konzentration zu hoch, wie Abb. 4 zeigt. Für die Berechnung zu kleiner radialer Disperision dürften mehrere Gründe maßgeblich sein. Die Vernachlässigung der Teilchen-Teilchenkollisionen ist im größten Teil des Strömungsfelds zulässig, in dem Beladung und Kollisionswahrscheinlichkeit hinreichend gering sind. In der Mitte des Silos herrschen andere Bedingungen. Die Radialkoordinate geht in der Mitte gegen Null und erzeugt eine geometrische Singularität. Das berechnete



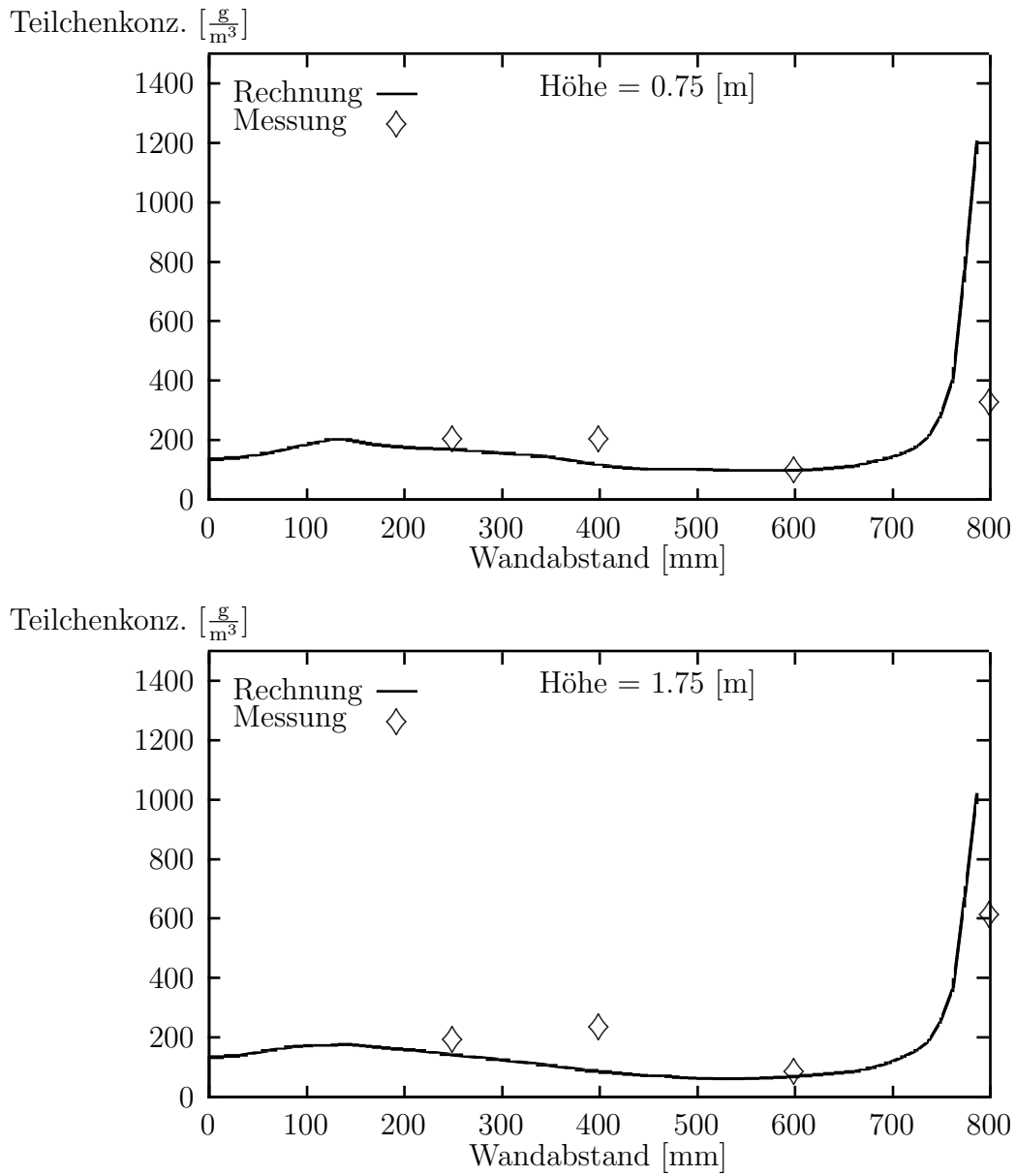
**Abbildung 3:** Staubverteilung im Silo: Die schematische Darstellung zeigt die gemittelten Werte der Staubkonzentration an verschiedenen Meßpositionen bei einer Staubbeladung von  $\xi=7 \text{ kg/m}^3$  für Weizenmehl und Maisstärke bei axialer (a) und tangentialer (b) Befüllung.

Strömungsfeld ist völlig rotationssymmetrisch. Auf der Mittellinie ist die Turbulenz der einzige Mechanismus, der die radiale Ausbreitung bestimmt.

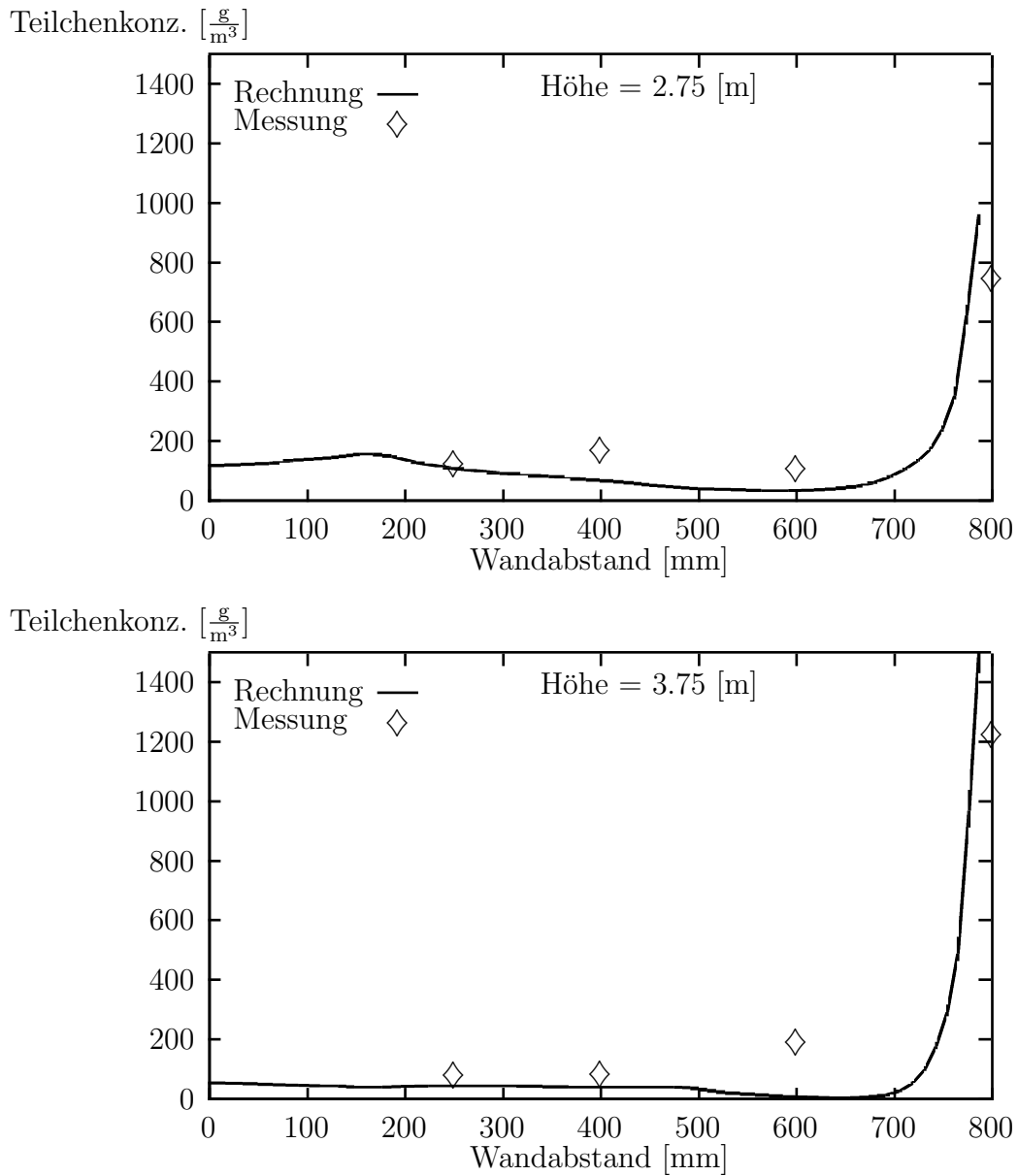
**Messungen bei pneumatisch tangentialer Befüllung:** Bei der tangentialen Befüllmethode zirkuliert der Hauptanteil des Staubes in einer dünnen Schicht ( $<100 \text{ mm}$ ) nahe der Silowand. Die Konzentrationen im verbleibenden Teil des Silos betragen nur ungefähr  $100 \text{ g/m}^3$  für Maisstärke bei einer Staubbeladung des Förderstromes von  $7 \text{ kg/m}^3$ , wie Abb. 3(b) zeigt.

Die bei Weizenmehl gegenüber Maisstärke grundsätzlich festgestellten kleineren Absolutwerte der Staubkonzentration sind eine Folge der kleineren Staubungsfähigkeit [1], welche wiederum direkt mit der Korngröße korreliert ist.





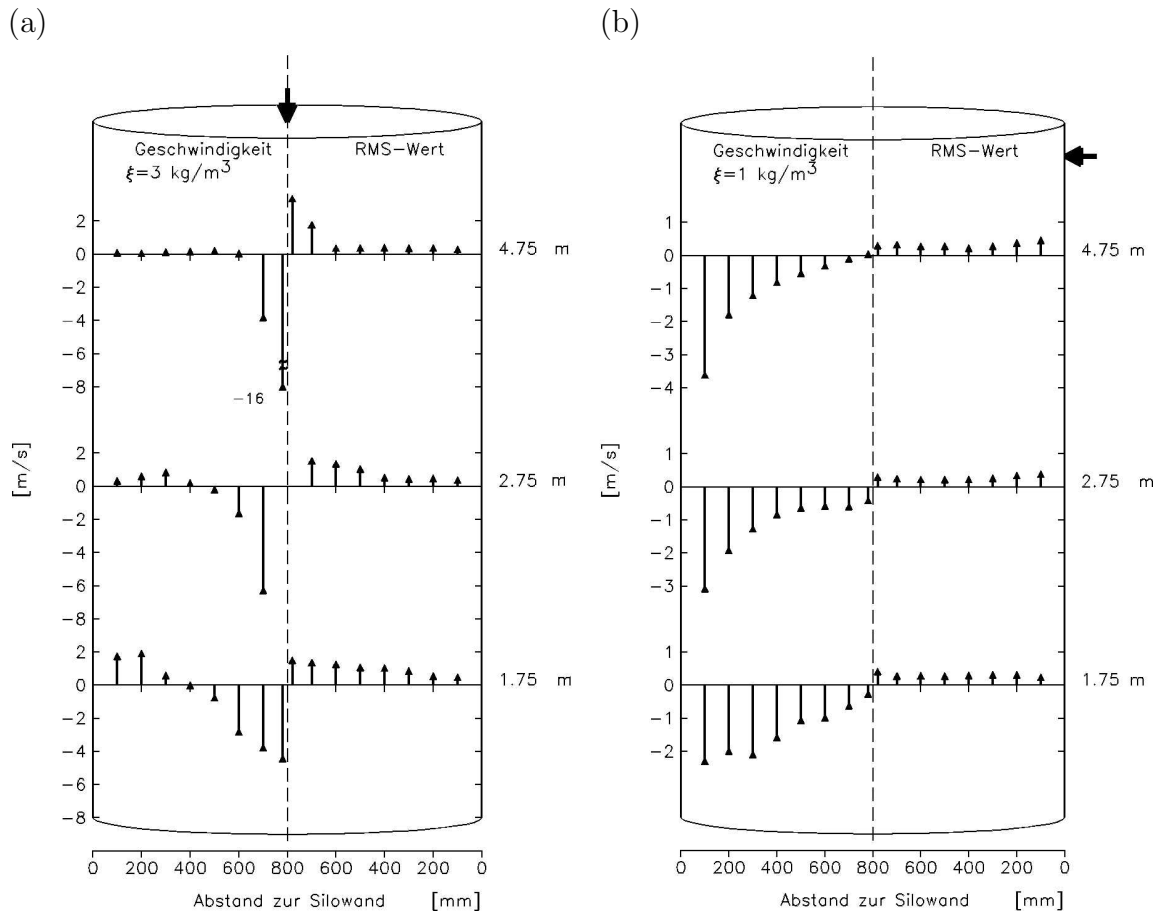
**Abbildung 4:** Vergleich der gemessenen ( $\diamond$ ) und berechneten Teilchenkonzentration [ $\text{g/m}^3$ ] in 0.75 m und 1.75 m über dem Auslauftrichter als Funktion des Abstandes von der Silowand. Der Wandabstand 800 mm entspricht dem Mittelpunkt des Silos.



**Abbildung 5:** Vergleich der gemessenen und berechneten Teilchenkonzentration [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] in 2.75 m und 3.75 m über dem Auslauftrichter.

## 5.2 Geschwindigkeitsmessungen und Berechnungen

Die Geschwindigkeits- bzw. Turbulenzgrößen sind bei vertikaler Befüllung für eine Staubbeladung von  $3 \text{ kg/m}^3$  und bei tangentialer Befüllung für  $1 \text{ kg/m}^3$  in Abb. 6 an drei vertikalen Meßpositionen im Überblick dargestellt.



**Abbildung 6:** (a) Die linke Hälfte des Silos zeigt jeweils die Partikelgeschwindigkeit und die rechte Hälfte den RMS-Wert der axialen Komponente, die mit einer Staubbeladung von  $\xi = 3 \text{ kg/m}^3$  bei axialer pneumatischer Befüllung gemessen wurde.

(b) Horizontale Komponente der Partikelgeschwindigkeit und des RMS-Wertes für tangentiale pneumatische Befüllung ( $\xi = 1 \text{ kg/m}^3$ ).

Bei vertikaler Befüllung nimmt die nach unten gerichtete axiale Geschwindigkeitskomponente zum Silofuß hin ab. Aufgrund der Abluftführung über das Silodach erfolgt jedoch Strömungsumkehr, weshalb der Richtungsvektor der Abluft nahe der Silowand nach oben zeigt. Die tangentialen Geschwindigkeitskomponenten sind innerhalb der Fehler bei dieser Befüllart nahezu konstant.

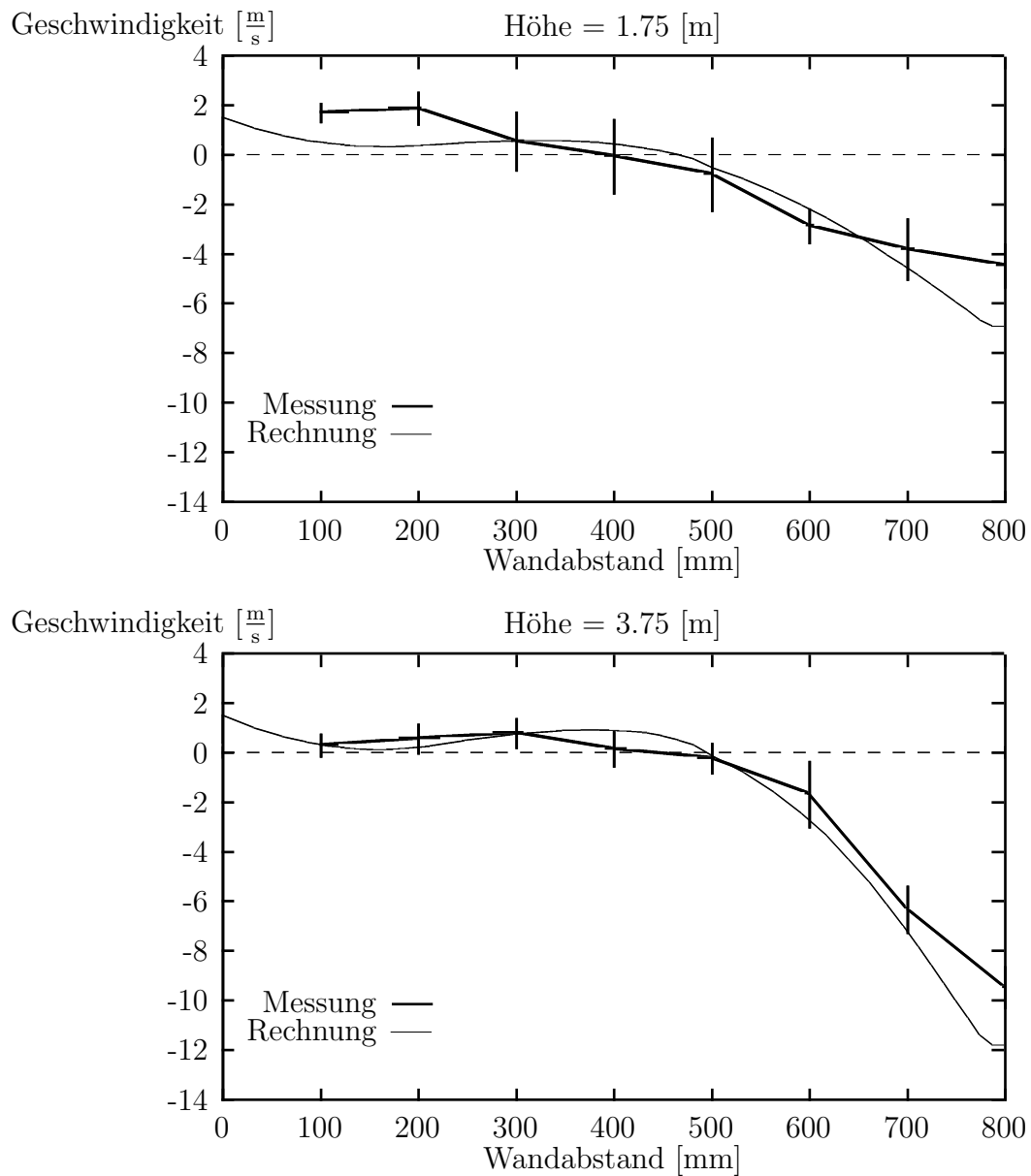
Der bei der tangentialen Befüllung erwartete Anstieg des Geschwindigkeitsbetrages in radialer Richtung zur Silowand wurde bestätigt.

Die verwendeten Stäube unterscheiden sich zwar durch ihre unterschiedliche Korngröße, die Messungen zeigen jedoch, daß weder die Geschwindigkeit noch der RMS-Wert von der Staubart beeinflusst wird.

In Abb. 7 ist für die Meßhöhe 1.75 m und 3.75 m der Vergleich zwischen den Messungen und den numerischen Berechnungen für die axiale Geschwindigkeitskomponente der Gasphase gegenübergestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Geschwindigkeitsverlaufs zwischen Theorie und Messung.

Messungen und Berechnungen zeigen, daß die Strömung ein großes Rezirkulationsgebiet aufweist. Sein Zentrum liegt etwa auf halbem Abstand zwischen Mittellinie und Silowand etwa 2.5 m über dem Siloboden. In seiner Umgebung befindet sich ein Gebiet sehr kleiner Geschwindigkeiten.

Die betragsmäßig größten Vertikalgeschwindigkeiten treten in der Silomitte auf. In der Simulation ist die radiale Aufweitung des Teilchenstrahls zu klein. Die Mischungsdichte ist deshalb an der Symmetrielinie zu hoch und erzeugt dort in der Simulation zu große Abwärtsgeschwindigkeiten. Im Außenbereich weist das Gas verhältnismäßig kleine, aufwärtsgerichtete Geschwindigkeiten auf. Sie reichen aus, um sämtliche Teilchengrößen mit sich zu tragen.



**Abbildung 7:** Vergleich der berechneten und der gemessenen Vertikalgeschwindigkeiten der Gasphase in 1.75 m und in 3.75 m Höhe im Silo für acht radiale Positionen. Die Fehler in den Meßpunkten ergaben sich aus der Mittelung von jeweils 10 Messungen.

### 5.3 Turbulenzmessungen und Berechnungen

Die beiden bei vertikaler Befüllung gemessenen Komponenten des RMS-Wertes (axial, tangential) zeigen gleiche Tendenzen. Der maximale RMS-Wert wurde mit 2.8 m/s ( $\xi = 1$  bzw. 3 kg/m<sup>3</sup>) direkt im Einfüllstrahl gemessen. Dieser Wert halbiert sich bereits an einer Meßposition, die 1 m tiefer liegt. Weiter zum Silofuß hin ist der Betrag des RMS-Wertes stets kleiner als 1 m/s (Abb. 6).

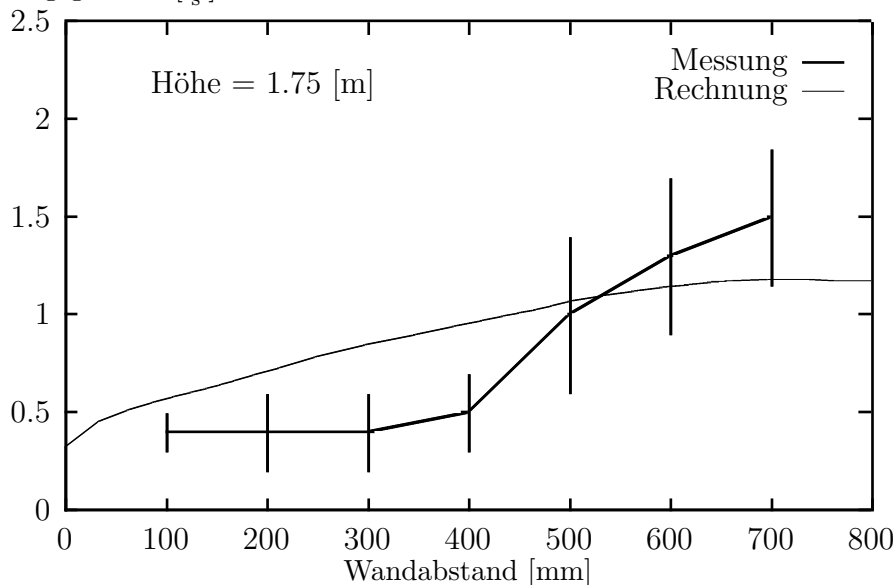
Bei der tangentialen Befüllung sind die Beträge der tangentialen Komponente etwas kleiner (ca. 0.5 m/s) und nahezu konstant.

Die Turbulenz wird durch die zeitliche Fluktuation  $\vec{u}'_c$  des Geschwindigkeitsvektors um dessen zeitlichen Mittelwert  $\vec{U}_c$  charakterisiert. Die Messung liefert die Schwankungsbeiträge von zwei Geschwindigkeitskomponenten (axial und tangential).

In der numerischen Simulation wird die turbulente kinetische Schwankungsenergie aus der Fluktuation aller drei Geschwindigkeitskomponenten  $k = \frac{1}{2} \sqrt{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}$  berechnet. Für den Vergleich zwischen Messung und Rechnung muß eine Annahme über die dritte, noch fehlende Komponente der Schwankungsbewegung getroffen werden. Im vorliegenden Fall wurde die empirisch motivierte Beziehung  $\overline{w'^2} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$  verwendet.

Durch diese Annahmen und durch die Unsicherheiten, die vom Turbulenzmodell ausgehen, sind gewisse Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Verlauf der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung festzustellen (Abb. 8). Das berechnete Profil zeigt eine geringere Abhängigkeit von der radialen Position als die Meßwerte. Die berechneten Werte sind in der Mitte des Silos etwas zu klein und im äußeren Bereich zu groß.

Turb. Schwankungsgeschw. [ $\frac{m}{s}$ ]



**Abbildung 8:** Vergleich der berechneten und der gemessenen turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit in axialer Richtung in 1.75 m Höhe. Die Fehler in den Meßpunkten ergaben sich wiederum aus der Mittelung von jeweils 10 Messungen.

## 5.4 Explosionsversuche

### 5.4.1 Pneumatisch vertikale Einfüllung

Aufgrund der Messungen und Berechnungen der Staubkonzentration, ergibt sich eine inhomogene Staubverteilung gemäß VDI 3673. Tabelle 1 zeigt  $p_{\text{red}}$  für zwei verschiedene Entlastungsflächen und Zündpositionen. Die Druck-Zeit-Diagramme zeigen, daß der maximale Explosionsüberdruck und der Druckanstieg sehr stark von der Position der Zündquelle abhängt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Explosionsversuche bei vertikaler Befüllung bei zwei verschiedenen Entlastungsflächen an verschiedenen Zündorten im Silo. Die RMS-Werte sind ebenfalls für zwei verschiedene Meßorte aufgeführt.

Entlastungsfläche	$p_{\text{red}}$	Zündort	Turbulenz
A=0.5 m <sup>2</sup>	0.35 bar	unten	RMS(unten) =1.5 m/s RMS(Mitte) =2 m/s
	0.25 bar	Mitte	
A=0.3 m <sup>2</sup>	0.7 bar	unten	
	0.36 bar	Mitte	

### 5.4.2 Pneumatisch tangentielle Einfüllung

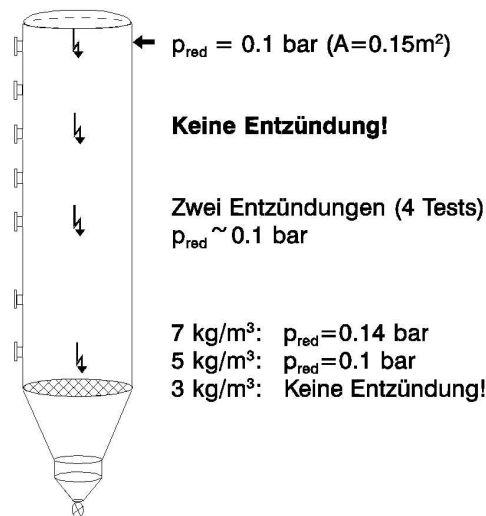
Die folgende Tabelle zeigt die Werte des reduzierten Explosionsdrucks  $p_{\text{red}}$  für tangentielle Befüllung an verschiedenen Positionen gemessen. Zusätzlich ist die Turbulenz vor der Zündung an zwei Zündpositionen dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Explosionsversuche bei tangentialer Befüllung bei einer Entlastungsfläche von 0.3 m<sup>2</sup> an verschiedenen Zündorten im Silo. Die RMS-Werte sind ebenfalls abhängig vom Meßort aufgeführt.

Entlastungsfläche	$p_{\text{red}}$	Zündort	Turbulenz
A=0.3 m <sup>2</sup>	0.14 bar bzw. keine Zündung	unten	RMS(unten) =0.4 m/s
	0.1 bar bzw. keine Zündung	Mitte	RMS(Mitte) =0.4 m/s

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Anzahl der Zündungen und die resultierenden Drücke an verschiedenen Zündpositionen.

Hinsichtlich des Explosionsschutzes erweist sich damit die tangentielle Befüllung als günstiger, da nahe der Silowand die obere Explosionsgrenze zwar überschritten wird,



**Abbildung 9:** Überblick über die Resultate der Explosionsversuche bei Zündung in verschiedenen Höhen im Silo bei tangentialer Befüllung. Bei der Zünderposition 3.75 m über dem Auslauf wurde das Staub-/Luftgemisch bei drei Versuchen nicht entzündet.

im verbleibenden Teil des Silos die UEG aber teilweise unterschritten (bei Weizenmehl) bzw. nur wenig überschritten wird. Nur in Teilvolumina liegt damit explosionsfähige Atmosphäre vor, die weit unterhalb optimaler Staubkonzentrationen (unterstöchiometrischer Bereich) liegt.

## 6 Schlußbetrachtungen und Ausblick

Die pneumatische und mechanische Silobefüllung sind in der Industriepraxis häufig vorkommende Prozesse.

Die bei pneumatischer zentraler Befüllung in der VDI 3673 [11] angenommene inhomogene Staubverteilung wurde in den Messungen bestätigt. Ebenfalls zeigt die pneumatisch tangentiale Befüllung eine inhomogene Staubverteilung.

Mit den vorgestellten Ergebnissen ist es erstmalig möglich, die den Explosionsablauf bestimmenden Größen wie Staubkonzentration und Teilchenbewegung in dieser Art von Anlage beurteilen zu können. Mit einem numerischen Verfahren wurden Geschwindigkeiten, Turbulenz und Teilchenkonzentration berechnet, die bei der pneumatischen Befüllung eines Silos auftreten.

Ein Anwendungsgebiet ist in die Berechnung der Staubkonzentration in verschiedenen Behältern und Anlagenteilen zu sehen. Dies ist im Hinblick auf das Vorliegen der Zone 10 und die damit verbundene Einordnung in die 12. BImSch-Verordnung von Interesse, da dann beispielsweise in großen Silos das Überschreiten der unteren Explosionsgrenze auf kleinere Bereiche reduziert werden kann.

Die Auswertung der Partikelbahnen zeigt, daß die großen Teilchen entweder direkt oder – falls sie in das Rezirkulationsgebiet eintreten – auf Grund ihrer verhältnismäßig



hohen Sinkgeschwindigkeit nach wenigen Umläufen auf den Boden fallen. Die kleinsten Partikeln unterliegen den turbulenten Schwankungseinflüssen am stärksten. Die meisten erreichen nach einigen Umläufen den Boden. Ihre Sinkgeschwindigkeit ist aber so klein, daß ein Teil durch den Auslaß im Deckel entweicht. Die typischen Verweilzeiten im Silo liegen bei etwa 30 Sekunden. Die übrigen Teilchen der mittleren Größe weisen sehr lange Umlaufzeiten auf, die 100 Sekunden übersteigen können und lange Rechenzeiten verursachen.

Wegen der hohen Beladung üben die Teilchen einen starken Einfluß auf die Gasphase aus. Es sind deshalb viele Iterationszyklen zwischen Fluid- und Teilchenberechnung erforderlich, die einen hohen Rechenaufwand verursachen. Die Simulation der Befüllung großer Behälter würde noch höhere Umlauf- und Rechenzeiten bedeuten. Das Verfahren wird deshalb zur Zeit für den Einsatz auf parallelen Rechnern erweitert, wodurch erhebliche Einsparungen an Rechenzeit zu erwarten sind.

Das heterogene Teilchenspektrum wird durch neun diskrete Teilchenklassen repräsentiert. Die Teilchen-Teilchen-Wechselwirkungen werden zur Zeit nicht berücksichtigt. Diese Vernachlässigung trägt dazu bei, daß die berechneten Konzentrationen und Abwärtsgeschwindigkeiten im Zentrum des Zweiphasenstrahles zu hoch sind.

Kann das Verfahren nach diesen Modifikationen an weiteren Beispielen verifiziert werden, könnte es auch in der Routine eingesetzt werden.

Der direkte Einfluß der Turbulenz auf den maximalen Druckanstieg bzw. Explosionsdruck konnte durch die Variation des Zündortes nicht gezeigt werden, da die räumliche Ausdehnung der Zünderflamme zu groß ist im Vergleich zu den Turbulenzunterschieden. Zudem sind beim Explosionsvorgang Effekte wie die Kompression von unverbranntem Staub bzw. der Verbrennungsgase zu berücksichtigen.

Der Vergleich der beiden Befüllarten pneumatisch vertikal und tangential zeigt hinsichtlich des entstehenden reduzierten Explosionsdrucks deutliche Vorteile bei der tangentialen Befüllung, wie bereits die Messungen der Staubkonzentration vermuten lassen. Weiterführende Untersuchungen bei Zündung aus einem angeschlossenen Behälter anstatt durch einen chemischen Zünder, die die Situation in der Praxis besser widerspiegeln, sollen weiteren Aufschluß geben.

## Literatur

- [1] BÜRKHOLZ A. Ein Verfahren zur Messung der Staubbungsfähigkeit von pulverförmigen Produkten. *Staub-Reinhaltung der Luft*, 49:433–438, 1989.
- [2] DURST F., MELLING A., WHITELAW J.H. *Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie*. G.Braun, Karlsruhe, 1987.
- [3] ECKHOFF R.K. Influence of Initial and Explosions-Induced Turbulence on Dust Explosions in Closed and Vented Vessels, Research on CMI. *Powder Technology*, 71:181–187, 1992.

- [4] GOSMAN A.D., PERIĆ M. User manual for the FASTEST computer package. Technical Report, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Univ. Erlangen-Nürnberg, 1990.
- [5] HAUERT F., VOGL A., RADANDT S. Dust Cloud Characterization and Its Influence on the Pressure-Time-History in Silos. *Process Safety Progress*, 1996. *im Druck*.
- [6] HAUERT F., VOGL A., RADANDT S. Turbulenz und Staubkonzentration beim Befüllen eines 12 m<sup>3</sup>-Silos. *Staub-Reinhaltung der Luft*, 56(10), 1996 *im Druck*.
- [7] LEWIS B., VON ELBE G. *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. Academic Press Inc., London, 3.Auflage, 1987.
- [8] PU Y.K., JAROSINSKI J., JOHNSON V.G., KAUFFMAN C.W. Turbulence effects on dust explosions in the 20-liter spherical vessel. In *Twenty-Third Symposium on Combustion*, Seite 843–849. The Combustion Institute, 1990.
- [9] RUCK B. *Laser-Doppler-Anemometrie*. AT-Fachverlag, Stuttgart, 1987.
- [10] SOMMERFELD M., WENNERBERG D. Editors. *5th Workshop on Two Phase Flow Predictions*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Mar 19–22 1990. Bilateral Seminars of the International Bureau, Volume 4.
- [11] VDI 3673:.. Druckentlastung von Staubexplosionen. Berlin: Beuth-Verlag 1983.
- [12] VOGL A. Explosionsablauf in Rohrleitungen: Untersuchungen im pneumatischen Fördersystem. In VDI-Berichte 975, *Sichere Handhabung brennbarer Stäube*, Seite 143–166. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.