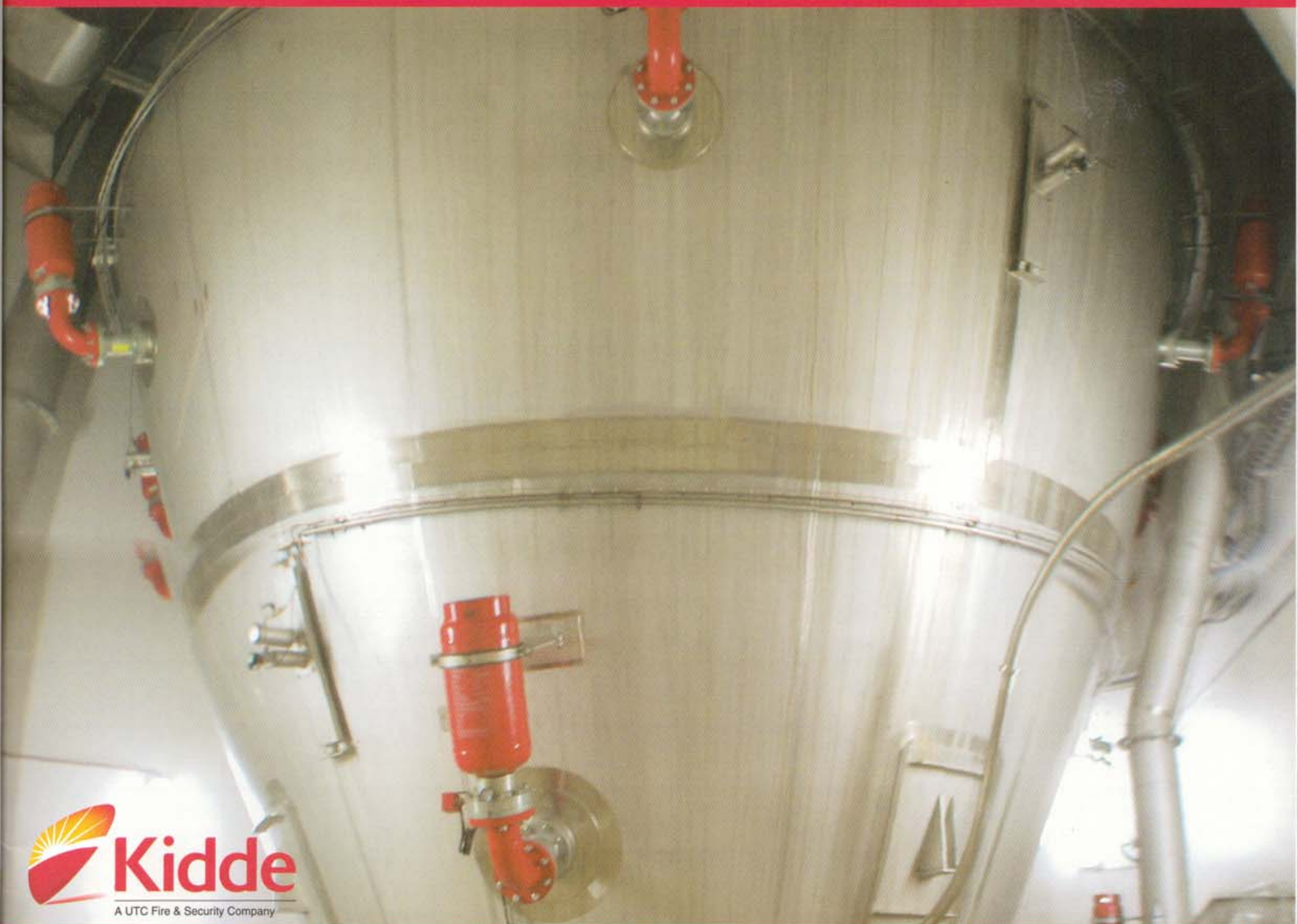


# Technische Überwachung

Anlagensicherheit · Arbeits- und Gesundheitsschutz · Umweltschutz





# Simulation von Staubexplosionen in Sprühtrocknern

Kees van Wingerden, Trygve Skjold, Bergen und Richard Siwek, Giebenach

Der Explosionsschutz bei konventionellen Sprühtrocknern war schon immer eine Herausforderung, da nur in einem Teil des Trockners ein explosionsfähiges Gemisch vorliegt. Im überwiegenden Teil des Trockners ist die Feuchtigkeit des gesprühten Produkts ausreichend, um einer Verbrennung vorzubeugen oder die Verbrennungsgeschwindigkeit einzugrenzen. Nur das Staub-Luftgemisch im unteren Teil des Trockners (Konus) kann zum Druckaufbau beitragen, möglicherweise aufgrund des Staubs, der durch die Explosion vom Boden (Konus) aufgewirbelt wird. Mit einer CFD-basierten Software ist es jetzt möglich, Staubexplosionen in Sprühtrocknern zu beschreiben.

Zur Auslegung von Schutzmaßnahmen, wie z. B. Explosionsdruckentlastung oder Explosionsunterdrückung, ist es erforderlich, die Verbrennungsgeschwindigkeit zu kennen. Die Verbrennungsgeschwindigkeit wird u. a. von Strömungsvorgängen und der Turbulenz im Trockner bestimmt. Weitere Einflussgrößen sind die Gestaltung des Trockners (z. B. konischer Boden oder Flachboden), das Volumen, und – in Bezug auf den Explosionsschutz – der Einbauort von Entlastungspaneelen.

Einfachere Verfahrungsweisen zur Auslegung von Schutzsystemen tendieren zu konservativen Lösungen, d. h. Einbau von relativ großen Entlastungsflächen oder vielen Löschmittelbehältern zur Explosionsunterdrückung.

Der Einsatz von CFD-basierter Simulationssoftware erlaubt eine detailliertere Darstellung von physikalischen und chemischen Prozessen, die vor (Trocknungsprozess, prozessbedingte Strömung) und während (Verbrennungsprozesse und daraus entstehender Druck und Strömung) einer Explosion eine Rolle spielen. Dadurch ist eine optimierte Auslegung von Schutzsystemen möglich, vorausgesetzt es werden geeignete Modelle in die Simulationssoftware eingebaut und die Software wird validiert.

In [1; 2] werden Ergebnisse von Simulationen, die mit der Simulationssoftware DESC durchgeführt wurden, aufgezeigt. Die Simulationen beziehen sich auf Versuche an einem Sprühtrockner [3]. DESC ist der erste Schritt zu einer CFD-Software, die sowohl die Bedingungen in Industrieanlagen beschreibt als auch daraus folgende Explosionen.

## Explosionsversuche in einem Sprühtrockner

Die Explosionsversuche [3] wurden in einem 43,3 m<sup>3</sup> großen Sprühtrockner durchgeführt. Der Versuchsbehälter war zylindrisch, verbunden mit einem konischen Bodenteil (Höhe 2,359 m). Entlastungsöffnungen waren oben im zylindrischen Teil des Behälters und über dem konischen Teil vorhanden. Die Größe der Entlastungsöffnungen konnte variiert werden (DN 200 bis DN 600).

Explosionsfähige Staubwolken wurden im konischen Teil der Trockenkammer (Volumen der Staubwolke ca. 6 m<sup>3</sup>) nach der in [4; 5] beschriebenen Methode (pneumatisches Einblasen aus 5-l-Staubbehältern) erzeugt. Für die Zündung wurden zwei 5-kJ-Zünder verwendet. Der Ort der Zündung wurde variiert.

Bei einigen Versuchen wurden Staubablagerungen in den Konus eingebracht, um damit realistische Bedingungen simulieren zu können, d. h. die Staubablagerungen werden von der Explosion aufgewirbelt und tragen damit auch selbst zur Explosion bei.

Die Versuche wurden mit Maisstärke (maximaler Explosionsdruck  $P_{\max} = 9,0$  bar, staubspezifische Konstante  $K_{St} = 161$  bar·m·s<sup>-1</sup>) und Zellulose ( $P_{\max} = 8,6$  bar;  $K_{St} = 168$  bar·m·s<sup>-1</sup>) durchgeführt und zwar:

- Versuche in einem geschlossenen Behälter,
- Explosionsentlastungsversuche,
- Explosionsunterdrückungsversuche.

Für alle Versuchskategorien wurden Simulationen durchgeführt.

## Die Software Dust Explosion Simulation Code (DESC)

Grundlage von DESC ist die speziell für die Beschreibung von Gasexplosionen entwickelte Software FLACS. Die Entwicklung eines für Staub geeigneten Verbrennungsmodells [1; 2] führte zu DESC. Das Verbrennungsmodell beschreibt die Verbrennungszone (Ort der Flamme) und die Umwandlungsgeschwindigkeit von Reaktanten zu Verbrennungsprodukten (Energiefreisetzungsgeschwindigkeit).

Das Verbrennungsmodell in DESC und FLACS ist das  $\beta$ -Modell [6] mit konstanter Flammendicke und der turbulenten Verbrennungsgeschwindigkeit  $S_T$ , die empirisch beschrieben wird mit dem Modell:

$$S_T = 15,1 \cdot S_L^{0,784} \cdot u'_{rms}{}^{0,412} \cdot l_l^{0,196}$$

mit

$S_L$  = laminare Verbrennungsgeschwindigkeit,

$u'_{rms}$  = Turbulenzintensität

$l_l$  = turbulentes Längenmaß

Das Modell ist eine Abwandlung der empirischen Gleichung von Bradley [7]. Das Modell von Bradley ist eine Korrelation zwischen  $S_T/S_L$ ,  $u'_{rms}/S_L$  und dem Karlovitz-Streckungsfaktor  $K$ .

In [8] wurde eine ähnliche Korrelation für die Verbrennung von Maisstärke/Luftgemische vorgeschlagen. Falls die Korrelation für alle Staub/Luftgemische stichhaltig ist, ist es möglich, Staubexplosionen ebenso wie Gasexplosionen zu simulieren. Die fehlenden Verbrennungsparameter, die zur Simulation von Staubexplosionen notwendig sind, werden Druck-Zeitverläufen entnommen, die in geschlossenen Ex-



plosionsbehältern gemessen werden. Die größte verfügbare Datenbank enthält Druck-Zeitverläufe, die in der standardisierten 20-l-Kugel gemessen wurden [4; 5].

Zur Beschreibung der Aufwirbelung von Staubablagerungen wurde eine empirische Korrelation, basierend auf Versuchen mit Staubaufwirbelung durch turbulente Strömung und Stoßwellen verwendet [9]. Die Korrelation beschreibt die Aufwirbelung von Staub mit einer Staubeinblasungsgeschwindigkeit  $v_z$  in m/s, wobei die Staubkonzentration  $c_d$  gleich  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ist:

$$v_z = 0,004 h_1^{0,216} u^{1,743} d_p^{-10,054} \rho_p^{-0,159} A_p^{0,957}$$

mit

$h_1$  Ablagerungsdicke in mm,

$u$  Strömungsgeschwindigkeit über der Staubablagerung in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$d_p$  Teilchengröße in  $\mu\text{m}$

$\rho_p$  Teilchendichte in  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

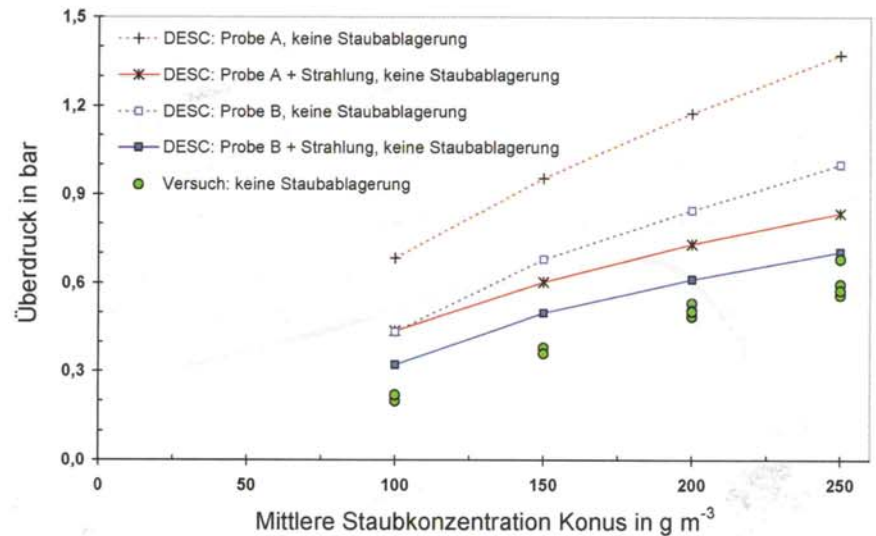
$A_p$  dimensionslose empirische Konstante

Strahlungsverluste von Verbrennungsprodukten können die Simulationsergebnisse erheblich beeinflussen, insbesondere in geschlossenen Behältern und Rohrleitungen. Solche Einflüsse können in DESC mithilfe eines Strahlungsmodells [10] beschrieben werden, das auf dem Lösungsvorschlag von *Hotel* und *Egbert* basiert [11].

Für die Darstellung der Explosionsunterdrückung wurde ebenfalls ein empirisches Modell verwendet. Das Modell wird in [12] detailliert beschrieben. Die Daten aus Versuchen mit einer 20-l-Kugel zeigen eine lineare Abnahme der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit in Staub-Luftgemischen mit zunehmender Konzentration des Unterdrückungsmittels (z. B. Natriumbikarbonat). Diese Abnahme geht bis zu einer Konzentration, bei der eine Verbrennung im Staub-Luftgemisch nicht mehr möglich ist (Inertisierungsgrenzkonzentration). Im Modell wurden Inertisierungsgrenzkonzentrationen aus [13] verwendet. Diese Versuche [13] wurden in einem  $1\text{-m}^3$ -Behälter durchgeführt. Die Inertisierungsgrenzkonzentrationen, die in der 20-l-Kugel gemessen wurden, könnten vom begrenzten Volumen [14] beeinflusst sein.

### Simulation von Explosionen in geschlossenen Behältern

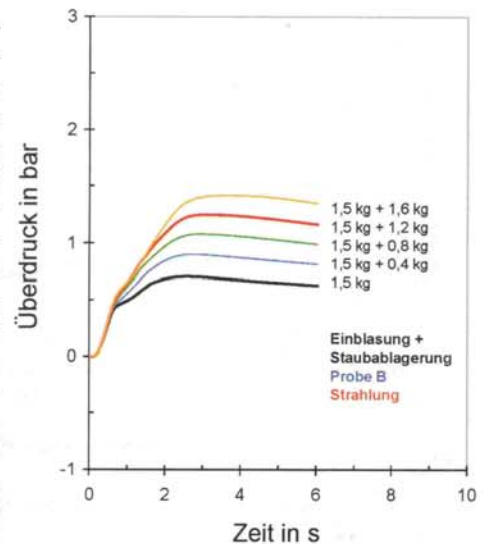
Zunächst wurden Simulationen von Explosionen im geschlossenen Behälter, mit und ohne Staubablagerung im Konus, durchgeführt. Dabei wurde auch das Einblasen von Staub aus den Staubbehältern dargestellt. Die Simulationen wurden für Maisstärke durchgeführt. Die Verbrennungseigenschaften für Maisstärke wur-



**Bild 1** Maximaler Explosionsdruck im Trockner als Funktion der Menge an eingeblasenem Staub, simuliert mit empirischen Modellen für zwei Maisstärkeproben (A und B) – mit und ohne Strahlung; das Bild enthält auch einige Versuchsdaten.

den aus Versuchen mit der 20-l-Kugel gewonnen. Für zwei verschiedene Proben lagen Daten vor: Probe A:  $K_{St} = 160 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_{\text{max}} = 8,65 \text{ bar}$ , Probe B:  $K_{St} = 114 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_{\text{max}} = 7,9 \text{ bar}$ . **Bild 1** zeigt den Vergleich der maximalen Explosionsdrücke für zwei Brennstoffmodelle und den experimentellen Daten als Funktion der mittleren Staubkonzentration im Konus des Behälters. Es war keine Staubablagerung vorhanden. Die Maximalwerte bei den Simulationen übersteigen die Versuchsdaten. Dies ist eigentlich keine Überraschung, da verschiedene Mechanismen, die den Druck reduzieren, in DESC nicht modelliert worden sind (z. B. nicht beendete Staubeinblasung, Kondensierung von Dämpfen usw.). Die Simulationen mit Probe B und dem aktivierten Strahlungsmodell zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Ergebnisse betonen den Einfluss der Strahlungsverluste auf die Thermodynamik und damit auf den maximalen Explosionsdruck der Staubexplosionen. Darüber hinaus zeigen die Simulationen die Bedeutung von Verbrennungsparametern, die von Faktoren, wie Feuchtigkeit und Partikelgrößenverteilung, beeinflusst werden.

**Bild 2** zeigt Simulationsergebnisse für Staubexplosionen in geschlossenen Behältern, wobei  $1,5 \text{ kg}$  Staub in den Konus eingeblasen wurden, d. h. es ist eine nominelle Staubkonzentration von  $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  im  $6\text{-m}^3$ -Konus vorhanden. Außerdem lagen noch weitere Staubablagerungen (zwischen  $0,4$  und  $1,6 \text{ kg}$ ) als dichte Staubwolke am Boden des Konus vor. Das normale Modell für die Staubaufwirbelung in DESC erwies sich für diese Anwendung (Staubablagerungen auf der Wand des Konus) als

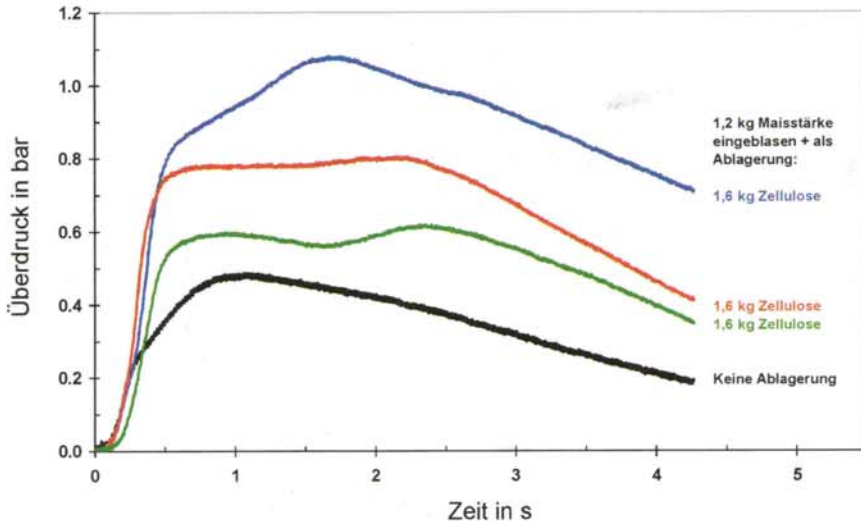


**Bild 2** Explosionsdruckentwicklung nach dem Einblasen von  $1,5 \text{ kg}$  Maisstärke und verschiedenen Mengen Maisstärke im Konus (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert).

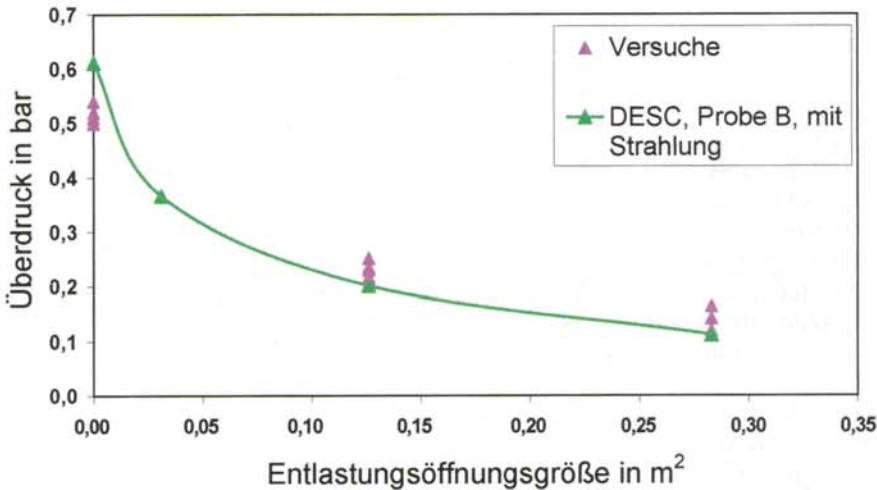
nicht geeignet, wahrscheinlich weil die empirischen Aufwirbelungsraten in Versuchen mit einer waagerechten Staubablagerung bestimmt worden sind [1; 9]. Die im Bild gezeigten Simulationen wurden mit der Maisstärkeprobe B mit aktiviertem Strahlungsmodell durchgeführt.

**Bild 3** zeigt Ergebnisse von weiteren ähnlichen Versuchen, die mit in den Konus eingeblasener Maisstärke sowie einer Zellulosestaubablagerung ( $1,65 \text{ kg}$ ) [3] durchgeführt wurden. Die unberechenbare Art des Staubaufwirbelungsprozesses („bursts“) ist der Grund dafür, dass unterschiedliche Mengen an Zellulose aufgewir-

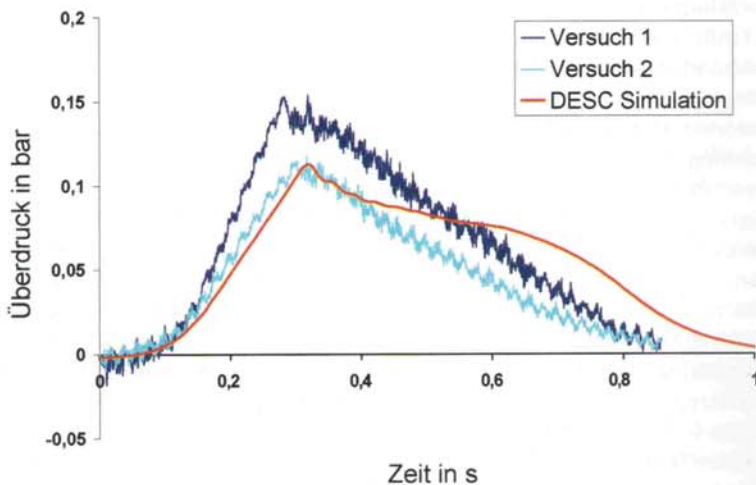




**Bild 3** Beispiele von Druck-Zeitverläufen, gemessen für Maisstärke (eingeblassene Menge 1,2 kg), mit und ohne Zellulose im Konus [3]; nominelle eingeblassene Staubkonzentration im Konus  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; Zentralzündung 0,5 m oberhalb des Bodens.



**Bild 4** Maximaler reduzierter Überdruck bei entlasteten Explosionen ( $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  Maisstärke, Entlastungsöffnung oben im zylindrischen Teil, keine Staubablagerung). Vergleich Versuche und Ergebnisse von DESC-Simulationen (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert).



**Bild 5** Vergleich zweier Druck-Zeitverläufe, gemessen für Maisstärke ( $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  Maisstärke-Luftgemische) und einem Druck-Zeitverlauf einer Simulation mit DESC (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert). Entlastungsöffnung  $0,28 \text{ m}^2$  oben im zylindrischen Teil des Behälters, Ansprechdruck der Entlastungseinrichtung  $P_{\text{stat}} = 0,1 \text{ bar}$ , keine Staubablagerung.

belt werden und sich an der Explosion beteiligen. Die Ähnlichkeit der Versuchsergebnisse und der Simulationen ist mittlerweile einleuchtend, wenn man die Bilder 2 und 3 vergleicht. Die Explosions-eigenschaften ( $P_{\text{max}}$  und  $K_{\text{St}}$ ) der eingeblassenen Maisstärke sind denen von Zellulose ähnlich, was einen Vergleich von Zellulose (Versuche) und Maisstärke (Simulationen) ermöglicht.

Die Druck-Zeitverläufe sowohl der Versuche als auch der Simulationen (beide ohne Staubablagerungen) zeigen eine Abnahme der Druckanstiegsgeschwindigkeit, nachdem die Flamme das obere Ende der Staubwolke erreicht hat und auf niedrigere Konzentrationen und letztendlich nicht-brennbare Teile der Wolke trifft. Bei Explosionen mit Staubablagerungen dauert der Initialdruckanstieg in den Versuchen länger als bei den Simulationen. Die Ursache ist wahrscheinlich die unmittelbare Aufwirbelung von Staub an der Konuswand beim Einblasen von Staub aus den Staubbehältern. In den Simulationen wird Staub vom Boden des Konus durch die Explosion aufgewirbelt, wodurch dieser Staub sich erst später an der Energiefreisetzung beteiligt. Die Initialdruckanstiegsgeschwindigkeit ist in den Versuchen auch deutlich höher, wahrscheinlich durch höhere Staubkonzentrationen.

### Simulation von entlasteten Staubexplosionen

Die in [3] dargestellten Explosionsdruckentlastungsversuche beinhalten Versuche mit und ohne Staubablagerung im Konus des Behälters und mit wechselnden Entlastungsbedingungen, d. h. Entlastungsöffnungsposition im oberen zylindrischen Teil des Behälters und über dem konischen Teil, Ansprechdruck und Entlastungsöffnungsgröße. Mehrere dieser Versuche wurden mit DESC simuliert. **Bild 4** zeigt die Auswirkung der Entlastungsöffnungsgröße auf den maximalen reduzierten Explosionsdruck in den Versuchen (ohne Staubablagerung) und in der Simulation mit DESC (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert). Die vorhergesagten Überdrücke liegen im unteren Bereich der gemessenen Werte. Eine Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Druck-Zeitverläufen ist in den **Bildern 5** und **6** dargestellt (Entlastungsöffnungen von  $0,28$  bzw.  $0,126 \text{ m}^2$ ). Beide Bilder zeigen, dass der Initialdruckanstieg bei den Simulationen ein wenig niedriger ist als in den Versuchen. Das erklärt die niedrigeren Überdrücke bei den Simulationen. Der Grund für den niedrigeren Explosions-



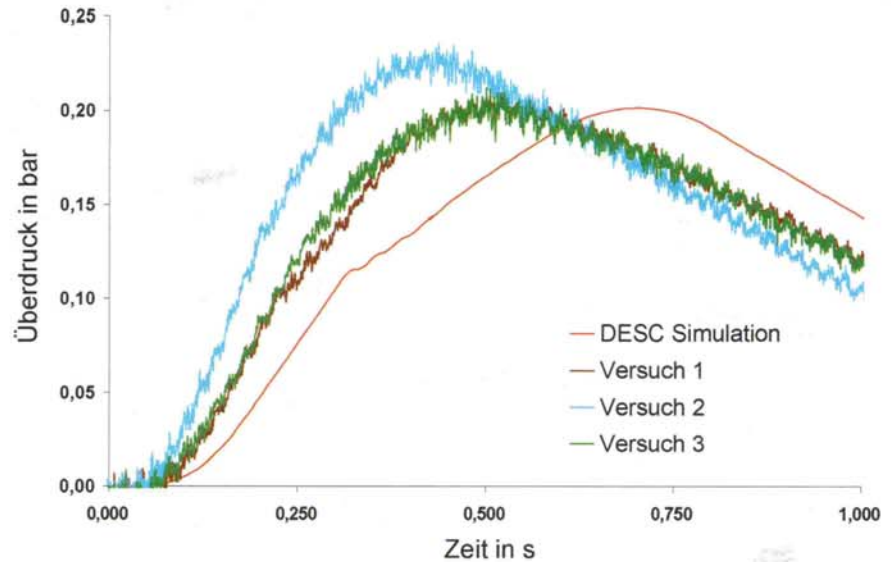
druck könnte eine zu niedrige Turbulenzintensität bei den Simulationen sein oder die Darstellung des Brennstoffs.

Es wurden auch Simulationen für Szenarien mit Staubablagerungen durchgeführt. Die Versuche wurden mit 1,65 kg Zellulose als Staubablagerung im Konus gefahren. Bei den Simulationen wurde die Zellulose mit Maisstärke (1,5 kg) dargestellt; die mittlere Staubkonzentration im Konus betrug  $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Bei den Versuchen war eine mittlere Staubkonzentration von  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  vorhanden. Simulationen wurden für beide Entlastungsöffnungspositionen (im zylindrischen Teil oben und oberhalb des Konus) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Bild 7** zusammengefasst. Es zeigt eindeutig, dass das Modell die Versuchsergebnisse nicht reproduziert. Der Hauptgrund ist das Aufwirbeln von Staub von den Konuswänden durch das Einblasen von Staub aus 5-l-Staubbehältern. Die mittlere Staubkonzentration ist hierdurch in den Versuchen beträchtlich höher, was deutlich höhere Reaktionsgeschwindigkeiten und deshalb hohe reduzierte Explosionsdrücke bedeutet. Bei den Simulationen ist der Einfluss der Staubaufwirbelung begrenzt. Das Modell für die Staubaufwirbelung in DESC ist für schräge Wände nicht zufriedenstellend. Der Vergleich von simulierten und gemessenen Druck-Zeitverläufen veranschaulicht diesen Unterschied.

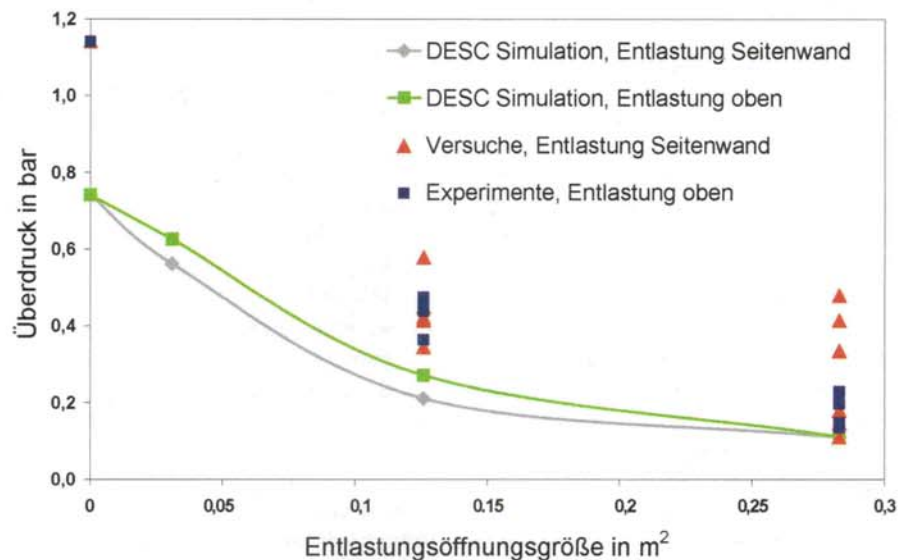
Die Auswirkung der Entlastungsöffnungsposition mit dem Modell ist wie erwartet: Die Entlastungsöffnung in der geraden Seitenwand oberhalb des Konus befindet sich ganz in der Nähe der Explosion, wodurch schon frühzeitig eine Entlastung von Verbrennungsprodukten stattfinden kann (die Entlastung von Verbrennungsprodukten ist wegen der geringeren Dichte effektiver). Die Entlastungsöffnung oben wird hauptsächlich unverbranntes Gemisch abblasen, was höhere Drücke bewirkt. In den Versuchen ist dieser Effekt nicht erkennbar, wahrscheinlich wegen der begrenzten Reproduzierbarkeit der Versuche.

### Simulation der Explosionsunterdrückung bei Staubexplosionen

**Bild 8** zeigt einige Simulationen von unterdrückten Explosionen sowohl für zwei 5-l-Löschmittelbehälter als auch für zwei 20-l-Löschmittelbehälter (Strahlungsverluste sind einkalkuliert). Zum Vergleich sind im gleichen Bild die entsprechenden Druck-Zeitverläufe von nicht unterdrückten Explosionen, mit und ohne Staubablagerungen, zu sehen. Die simulierten Szenarien



**Bild 6** Vergleich von drei Druck-Zeitverläufen, gemessen bei Explosionen in  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  Maisstärke-Luftgemischen und einem Druck-Zeitverlauf einer DESC-Simulation (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert). Entlastungsöffnung von  $0,126 \text{ m}^2$  oben im zylindrischen Teil des Behälters, Ansprechdruck Entlastungseinrichtung  $P_{\text{stat}} = 0,1 \text{ bar}$ .



**Bild 7** Entlastung von Staubexplosionen mit Staubablagerungen im Konus des Behälters (1,65 kg Zellulose in den Versuchen, 1,5 kg Maisstärke in der Simulation). Einfluss der Entlastungsöffnungsgröße und Entlastungsöffnungsposition. Vergleich DESC-Simulationen (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert) und Versuche aus [3].

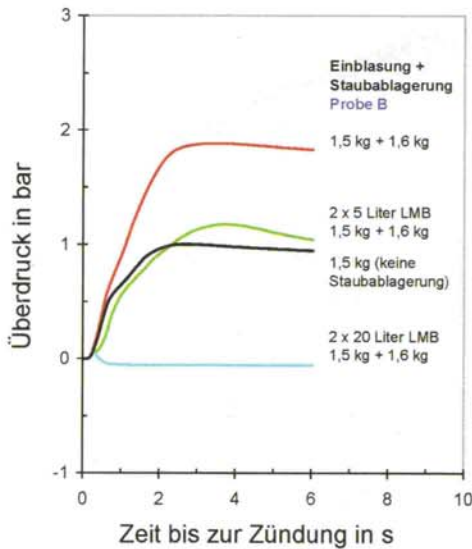
umfassen Explosionen, bei denen 1,5 kg Staub eingeblasen wurde (d. h.  $250 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  mittlere Staubkonzentration im Konus), mit 1,2 kg Staub als Ablagerung. Die betreffenden Versuche umfassen eine eingeblasene Menge an Maisstärke von 1,2 kg (d. h.  $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) und 1,65 kg Zellulose als Staubablagerung.

In DESC gibt es mehrere Einschränkungen in den Modellen zur Darstellung des Unterdrückungsmittels. Das Unterdrückungsmittel wird als Schwergas, d. h. hochmolekulares Gas, dargestellt. Bei einer Unterdrückung würde die Ausdehnung dieses Gases (Initialdruck 60 bar) unrealistisch niedrige Temperaturen verursachen.

Die Auswirkung auf die Simulationsergebnisse für die beiden 20-l-Löschmittelbehälter (siehe Bild 8) ist deutlich. Das simulierte Unterdrückungssystem ist übermäßig wirkungsvoll: Die beiden 20-l-Behälter – jeder Behälter sprüht 16 kg Natriumbikarbonat ein – begrenzen den reduzierten Explosionsdruck unterhalb 0,1 bar und der Druck ist nicht mehr atmosphärisch. Dieses Ergebnis ist eindeutig von der nicht physikalischen Darstellung des Unterdrückungsmittels als Schwergas beeinflusst worden. Hinzu kommt noch, dass im Modell die Wärmekapazität die Auflösung des Natriumbikarbonats bei hoher Temperatur nicht beschreibt.



## Literaturverzeichnis



**Bild 8** Simulierte Druckentwicklung für unterdrückte Explosionen im Behälter mit 1,5 kg eingeblasenem Staub und 1,2 kg Staub im Konus (Maisstärkeprobe B, Strahlungsmodell aktiviert). Druck-Zeitverläufe für Szenarien ohne Unterdrückung sind als Referenz aufgenommen worden.

Bild 8 zeigt auch, dass die Unterdrückung für die beiden 5-l-Löschmittelbehälter (beide sprühen 4 kg Natriumbikarbonat ein) nicht erfolgreich ist. Die berechneten Explosionsdrücke gehen über den simulierten Druck für Szenarien ohne Unterdrückung und Staubablagerungen hinaus. Diese Tendenz betrifft beide Maisstärkeproben (A und B), mit und ohne Strahlungsverluste. Obschon eine mittlere Löschmittelkonzentration von mehr als  $1300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  für eine Explosionsunterdrückung ausreichend sein sollte, könnte es mehrere Gründe geben, warum dies nicht der Fall ist: die relativ mangelhafte Verteilung des Löschmittels und die verspätete Dispergierung der Staubablagerung. Die Versuche zeigen eine Streuung des reduzierten Explosionsdrucks zwischen 0,18 und 0,41 bar, was möglicherweise auf ähnliche Prozesse in den Versuchen hinweist. In den Versuchen ohne Unterdrückung schwankt der Explosionsdruck zwischen 0,47 und 1,76 bar.

### Schlussfolgerungen

Die Simulationen zeigen, dass eine Beschreibung von Staubexplosionen (in ge-

schlossenen Behältern, in entlasteten Behältern und in Behältern mit Explosionsunterdrückung) mit einer CFD-basierten Software wie DESC möglich ist. In der Zukunft wird diese Modellierung Ingenieuren die Möglichkeit geben, Einsatzmöglichkeiten und Begrenzungen von Explosionsentlastungs-, Explosionsunterdrückungs- und Entkopplungssystemen zu untersuchen. Damit können Mechanismen, die bei Staubexplosionen eine Rolle spielen, verstanden werden.

Insbesondere zeigen die Simulationen, dass Strahlungsverluste Explosionsüberdrücke bei Staubexplosionen stark beeinflussen können. Die Ergebnisse zeigen auch einige grundlegenden Begrenzungen der jetzigen Modelle in DESC auf. Einige

Modelle sind relativ einfach zu verbessern, wie z. B. eine Änderung der Zustandsgleichung zur Darstellung der fehlenden Komprimierbarkeit des Löschmittels (Natriumbikarbonat) und eine verbesserte Beschreibung der Wärmekapazität des Löschmittels (thermische Spaltung bei erhöhter Temperatur). Es gibt jedoch andere Schwächen, deren Behebung sehr anspruchsvoll sein könnten, wie z. B. ein Modell zu finden, das die Aufwirbelung von Staubablagerungen beschreibt. TÜ 768

Dr. Kees van Wingerden, Dr. Trygve Skjold, GexCon AS, Bergen (Norwegen) und Dr. Richard Siwek, FireEx Consultant GmbH, Giebenach (Schweiz).

**Fliegen Sie lieber in die Luft – oder nach Mallorca?**  
Lumiglas: Sicherheit in explosionsgefährdeten Bereichen!



Licht und Sicht für verfahrenstechnische Prozesse



Schauglas-Armaturen in Kombination

- Ex-Kamerasystem
- Ex-Scheibenwischer
- Ex-Schauglas-Leuchte
- Ex-Timer