

**VDI-Fachtagung**

# **Sichere Handhabung brennbarer Stäube 2020**

**Nürnberg, 04. und 05. November 2020**

Bildquelle: © Steinbeis integrative Sicherheit GmbH



# VDI-BERICHTE

Herausgeber:

VDI Wissensforum GmbH

### **Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek** (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

### **© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020**

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092376-5

# Inhalt

Vorwort . . . . .1

► **Bestimmung von Sicherheitskenndaten**

---

Entwicklungen zu Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen des  
Explosionsschutzes für hybride Gemische . . . . . 3

S. Spitzer, Fachbereich Explosionsschutz Gase, Stäube,  
V. Schröder, E. Askar, A. Krietsch, Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung (BAM),  
Berlin

Selbstentzündungsverhalten von Feststoffschüttungen –  
Validierung der Extrapolation von Labortests mit Hilfe halbtechnischer Versuche bis 1 m<sup>3</sup>  
und thermoanalytischer Methoden . . . . .17

R. Erdt, M. Schmidt, Bundesanstalt für Material-forschung und -prüfung (BAM), Berlin;  
M. Gödde, S. Salg, BASF SE, Ludwigshafen

► **Aufkommen von Staub-Luft-Gemischen in Silos**

---

Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit stückigem  
Schüttgut – Betrachtung des Staubexplosionsrisikos bei mechanischer Förderung von  
stückigem, abrasiven Produkts. . . . .37

B. Schmidt, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin,  
Mannheim

Simulation von Staubverteilung und Turbulenz während der pneumatischen Befüllung von  
Silos . . . . . 49

J.-N. Tödt, FSA e.V., Mannheim

Staubverteilung in Silos – Ergebnisse von Messungen in Großsilos . . . . .59

A. Harmanny, ISMA, Kontich, Belgien

## ► Neuerungen im konstruktiven Explosionsschutz

---

**Die Kombination der Schutzmaßnahmen Explosionsdruckentlastung und Explosions-entkopplung – weitere Forschungsergebnisse zu den beobachteten Effekten . . . . . 71**  
P. Schepp, U. Faißt, FSA GmbH, Mannheim

**Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen . . . . . 85**  
D. Lorenz, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim

**Einfluss von Abblasrohren und deren Wetterschutzeinrichtungen auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck staubführender, druckentlasteter Anlagen. . . . . 97**  
M. Sippel, DEKRA Testing and Certification GmbH, Bochum;  
J. Wandt, INBUREX Consulting GmbH, Hamm

**Explosionsschutz Ad Absurdum – das ATEX-Paradoxon – Kuriositäten aus Explosionsschutzkonzepten und die zentrale Frage: Quo Vadis, ATEX?! . . . . . 113**  
J. Lottermann, M. Bloching, REMBE® GmbH Safety + Control, Brilon

## ► Rechtskonforme Umsetzungen in der Praxis

---

**Aus einem Duktus werden zwei – Bewährtes und Neues bei der Sicherheitsbetrachtung zur betrieblichen Explosionsgefahr. . . . . 123**  
U. Barth, Bergische Universität Wuppertal;  
S. Grund, Berufsgenossenschaft Nahrung und Gastgewerbe, Dortmund;  
O. Losert, Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Heidelberg

**Erfahrungen aus der Prüfung nach Betriebssicherheitsverordnung von Anlagen mit konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen . . . . . 145**  
M. Sippel, DEKRA Testing and Certification GmbH, Bochum

## ► Neuerungen im VDI-Regelwerk

---

**Neue VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10 – „Staubbrände und Staubexplosionen – Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen – Mischeranlagen“ . . . . . 159**  
M Reinecke, Covestro Deutschland AG, Leverkusen  
J. Lucas, IBEU GmbH, Freiberg

► **Lernen aus Ereignissen**

---

**Ganzheitlicher Explosionsschutz mit integriertem Objektbrandschutz. . . . . 169**  
M. Scheid, R. Siwek, FireEx Consultant GmbH, Gais, Schweiz

**Examples of Incidents from Practice . . . . . 183**  
G. F. M. van Laar, M.Sc., Inburex GmbH, Hamm

**Elektrostatik – Lösungsvorschläge aus der Praxis – Zündgefahren infolge  
elektrostatischer Aufladungen, Auftreten von Büschelentladungen, Antennentechnik,  
experimentelle Untersuchungen . . . . . 195**  
M. Glor, Swiss Process Safety Consulting GmbH, Allschwil, Schweiz;  
C. Blum, TÜV Nord, InfraChem GmbH & Co. KG, Marl





Ingenieure wollen immer alles ganz genau wissen. Wie wär's mit einem E-Paper- oder Zeitungs-Abo?



### **Mehr Meinung. Mehr Orientierung. Mehr Wissen.**

Wesentliche Informationen zu neuen Technologien und Märkten.

Das bietet VDI nachrichten, Deutschlands meinungsbildende Wochenzeitung zu Technik, Wirtschaft und Gesellschaft, den Ingenieuren. Sofort abonnieren und lesen.

Donnerstagabends als E-Paper oder freitags als Zeitung.

**Jetzt abonnieren: Leser-Service VDI nachrichten, 65341 Eltville**

**Telefon: +49 6123 9238-201, Telefax: +49 6123 9238-244, [vdn-nachrichten@vuservice.de](mailto:vdn-nachrichten@vuservice.de)**

**VDI nachrichten**

Die journalistische Heimat der Ingenieure.

[www.vdi-nachrichten.com/abo](http://www.vdi-nachrichten.com/abo)



## Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

Explosionssicherheit ist ein vorrangiges Ziel bei der Handhabung brennbarer Stäube. Experten und all diejenigen Menschen, die Verantwortung für die mit brennbaren Stoffen umgehenden Personen sowie die Sicherheit der Anlagen und deren Umgebung wahrnehmen, sorgen tagtäglich in kompetenter Weise dafür, dieses Ziel zu erreichen. Das systematische Beherrschen von Staubexplosions- und -brandgefahren sowie deren Auswirkungen verlangt von der Industrie, Forschungseinrichtungen der Sicherheitstechnik, benannten Stellen, Normungsausschüssen, Herstellern von Sicherheits- und Schutzeinrichtungen und Behörden eine hohe Performanz. Der VDI veranstaltet seit 1970 in regelmäßiger Folge Fachtagungen und dokumentiert diese Ergebnisse in VDI-Berichten und teilweise in VDI-Richtlinien, die immer wieder auch Grundlage für die europäische Normung bilden. Die VDI-Fachtagung ist die Plattformveranstaltung in Deutschland zum Austausch und zur Bildung neuer Kompetenzen im Themenfeld „Explosions- und Brandschutz“.

Durch die Umsetzung der Europäischen ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU (für Hersteller) und der ATEX-Betriebsrichtlinie 1999/92/EG (für Betreiber) ins deutsche Recht wuchsen die Freiräume und die Möglichkeiten für Hersteller und Betreiber, die Explosionssicherheit anforderungsgerecht und regelwerkskonform zu gestalten. Allerdings nahmen auch oft die Anforderungen an die persönlichen Sach- und Methodenkompetenzen der Personen zu, die an entsprechenden Beurteilungs- und Konzipierungsprozessen mitwirken. Erfahrene Experten aus der Praxis erläutern unter anderem an Hand von Fallbeispielen die zum Teil komplizierten Themenstellungen und zeigen beispielhafte Lösungswege auf. Die Fachtagung führt Experten zusammen, die sich mit den Themen des Staubexplosionsschutzes und des viele Anlagen und Prozesse flankierenden Brandschutzes auseinandersetzen. Neues Wissen und Erfahrungen aus Forschung und Praxis werden ebenso wie Änderungen bei den Rahmenbedingungen gemeinsam erörtert und verständlich vermittelt.

Wir würden uns freuen, Sie in Nürnberg begrüßen zu dürfen.

**Prof. Dr.-Ing. Siegfried Radandt**, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth**, Lehrstuhl für Methoden der Sicherheitstechnik/  
Unfallforschung, Bergische Universität Wuppertal



## Entwicklungen zu Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen des Explosionsschutzes für hybride Gemische

M. Eng. **Stefan Spitzer**, Fachbereich Explosionsschutz Gase, Stäube,  
Dr.-Ing. **Volkmar Schröder**, Dr.-Ing. **Enis Askar**,  
Dr.-Ing. **Arne Krietsch**,  
Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung (BAM), Berlin

### Kurzfassung

Zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen (STK) von hybriden Gemischen (Gemisch aus mindestens zwei brennbaren Phasen, wie z.B. Staub/Gas- oder Gas/Dampf-Gemisch) existieren bislang keine einheitlichen, genormten Prüfmethoden. Die Normen und Regelwerke zur Bestimmung der STK von einphasigen brennbaren Systemen (Staub, Gas, Dampf) unterscheiden sich teilweise erheblich. Beispielsweise sind in den jeweiligen Normen für Stäube, Gase und Dämpfe unterschiedliche Zündquellen und Zündenergien definiert. Des Weiteren unterscheiden sich die in den Normen definierten Prüfabläufe bei der Gemischherstellung. Bei der Entwicklung einer einheitlichen Norm für hybride Gemische muss der Einfluss dieser beiden Parameter ermittelt werden, um die Vergleichbarkeit mit den STK der einzelnen Komponenten Gas, Staub und Dampf gewährleisten zu können und bisherige Erkenntnisse zu hybriden Gemischen interpretieren und bewerten zu können.

### Abstract

For the determination of safety characteristics of hybrid mixtures (mixture of at least two burnable phases, eg. dust/gas- or gas/vapor-mixture) there is no existing standard so far. In the standards for the evaluation of the safety characteristics of dusts, gases and vapors there are big differences. For example, in the standards for dusts, gases and vapors different types of ignition sources are listed and there is a difference in the mixture preparation. For the development of a new standard for hybrid mixtures the influence of these two parameters must be investigated to obtain a relationship to the safety characteristics of the single substances and to be able to interpret and evaluate the results of the actual research.

## 1. Einleitung

Aktuelle Untersuchungen aus Praxis und Forschung zu den sicherheitstechnischen Kenngrößen (STK) hybrider Gemische orientieren sich an den Normen für Gase, Dämpfe und Stäube. Bisher hat sich noch keine einheitliche Prüfmethode durchgesetzt, die einen nahtlosen Anschluss an die Gas- bzw. Staub-Normen ermöglicht. Eine Schwierigkeit dabei ist, dass sich diese in wesentlichen Teilen unterscheiden, besonders große Unterschiede bestehen bei den Zündquellen und dem Mischvorgang.

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Zündquellen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Zündquellen in den Normen zur Bestimmung der STK

| Bestimmung der STK von Stäuben        | Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen |
|---------------------------------------|--|
| DIN EN 14034                          | DIN EN 1839  |
| Zündquelle in der Mitte der 20L-Kugel |  |
| Pyrotechnischer Zünder                | Funkenstrecke oder explodierender Draht                |
| 2.000 J – 10.000 J                    | 2 J – 20 J   |
| 2 Zünder                              | 1 Zünder   |

Vor allem in Hinblick auf die Zündenergie unterscheiden sich die Zündquellen um drei bis vier Größenordnungen. Eine einheitliche Lösung bei der Zündenergie zu finden ist deshalb relativ schwer, weil bei Gasen mit einer zu starken Zündquelle eine Überinitiiierung stattfinden kann mit einem falsch positiven Ergebnis: Ein Versuch bzw. ein Gemisch wird als Zündung gewertet, obwohl das Gemisch unter normalen den Bedingungen in der Praxis nicht explosiv wäre. Der gemessene Druckanstieg als Kriterium für eine Explosion ist in diesem Fall darauf zurückzuführen, dass die Zündquelle im Verhältnis zum Volumen des Zündbehälters sehr stark ist. Auf der anderen Seite ist v.a. bei Stäuben bei einer zu schwache Zündquelle das Ergebnis sehr stark von der Zündenergie abhängig. Das kann dazu führen, dass ein Gemisch in sicherheitstechnisch bedenklicher Weise als nicht-explosionsfähig eingestuft wird.

Die Unterschiede beim Mischvorgang führen ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen, da bei der Bestimmung der STK von Stäuben während des Zündvorgangs innerhalb des Zündgefäßes turbulente Zustände herrschen, bei Gasen und Dämpfen jedoch ein ruhendes Gemisch gezündet wird. Da die Turbulenz einen großen Einfluss auf einige STK hat, muss dieser

Unterschied untersucht werden, um einen Vergleich zu den STK der reinen Gase und Dämpfe zu ermöglichen [1, 2].

## 2. Bestimmung der Zündenergie genormter Zündquellen

Die Zündenergie wird in den Normen angegeben, in der Praxis wird sie bei den meisten Zündquellen jedoch nicht gemessen oder kann nicht gemessen werden. In Tabelle 2 sind die in den Normen aufgeführten Zündquellen mit ihren technischen Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 2: Genormte Zündquellen und ihre technischen Eigenschaften

| Zündquelle                  | Energie-bereich in J | Anwendung   | Aufgeführt in Norm                          |
|-----------------------------|----------------------|---|---|
| Pyrotechnischer Zünder      | 100 - 10.000         | Bestimmung der STK von Stäuben                                    | EN 14034                                    |
| Hochspannungsfunkkenstrecke | 2 - 40               | Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen            | EN 1839, EN 15967, ASTM 681                 |
| Gleitfunken                 | 5-50                 | Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration von Gasen und Dämpfen | ASTM 2079                                   |
| Explodierender Draht        | 2 - 5.000            | Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen            | EN 1839, EN 15967, ASTM E 918, EN ISO 10156 |

Die pyrotechnischen Zünder sind in verschiedenen Energieabstufungen erhältlich. Herstellerseitig wird die berechnete Energie aus dem pyrotechnischen Satz als Zündenergie angegeben. Bei der Induktionsfunkenstrecke wird in der Norm zur Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen [3] sowie in der Norm zur Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs von Gasen [5] ein Schätzwert angegeben, der mit den in dieser Arbeit gemessenen Ergebnissen übereinstimmt. In der Praxis wird jedoch oft der Fehler gemacht die Leerlaufspannung des Hochspannungstrafos mit der Stromstärke des Kurzschlussstroms zu verrechnen, was zu einem falschen Ergebnis (~Faktor 5) führt, da der Innenwiderstand vernachlässigt wird. Bei dem Gleitfunken ist in der Norm zur Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration von Gasen und Dämpfen unter nicht-atmosphärischen Bedingungen gefordert, dass die Zündenergie im Prüfbericht angegeben werden soll, es ist jedoch kein Hinweis enthalten, wie diese bestimmt werden kann [12].

Zur Bestimmung der Zündenergie der vier Zündquellen kam in dieser Arbeit ein in der BAM entwickeltes Bombenkalorimeter zum Einsatz (siehe Abbildung 1). Das Kalorimeter wurde mit

einer 100 Watt-Birne, einem 12,5 Volt DC Labornetzteil mit einem Strom von 8 Ampere und einem zeitgesteuerten Relais kalibriert, das auf verschiedene Zündzeiten eingestellt wurde. Mit der Gleichung  $E[J] = U[V] \cdot I[A] \cdot t[s]$  wurde so eine Kalibriergerade mit einer Steigung von 0.0698 mV/J und einer maximalen Abweichung von 4 % erstellt.

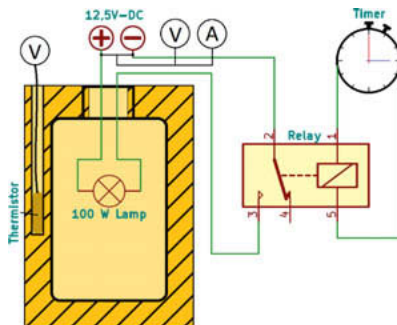


Bild 1: Adiabates Bombenkalorimeter im Kalibrier-setup

Nach der Kalibrierung ergab die Überprüfung eine maximale Abweichung des Sollwerts vom Istwert von 4 %. Von allen vier Zündquellen wurde anschließend die Zündenergie gemessen.

### Pyrotechnischer Zünder

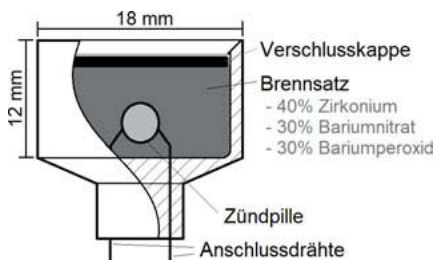


Bild 2: Schematischer Aufbau eines pyrotechnischen Zünders

Bei den pyrotechnischen Zündern wurden Abweichungen von der Nenn-Energie gemessen, vor allem bei den kleinsten mit einer Nenn-Energie von 100 J ergaben sich höhere Werte. Die Abweichungen ergeben sich möglicherweise dadurch, dass nur die Masse des pyrotechnischen Satzes, nicht jedoch die Zündpille bei der Angabe der Zündenergie berücksichtigt wurde. Gerade bei kleineren Nenn-Energien liefert die Zündpille einen signifikanten Beitrag zur Gesamtenergie. Um diese These zu bestätigen wurden die Zünder disassembliert und der



pyrotechnische Satz gewogen. Die Zünder mit einer Nenn-Energie von 500 J hatten dabei die Hälfte der Masse an Brennsatz, die mit 100 J ein Zehntel, im Vergleich zu den 1kJ-Zündern. Anschließend wurden nur die Zündpillen kalorimetrisch vermessen, diese sind in Abbildung 3 mit dem Nennwert „0 Joule“ aufgeführt, haben jedoch eine kalorimetrisch gemessene Energie von etwa 300 J.

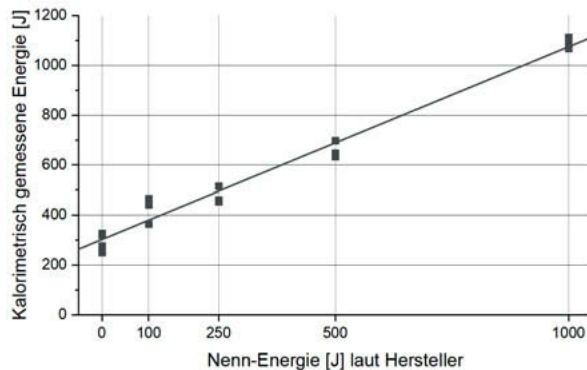


Bild 3: Kalorimetrisch gemessene Energie in Abhängigkeit von der Nennenergie laut Hersteller

### Hochspannungsfunken

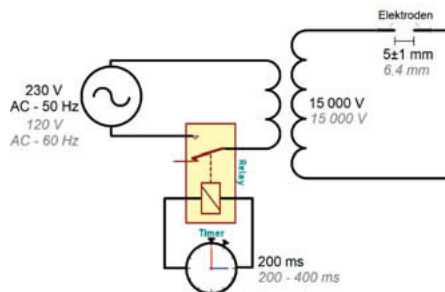


Bild 4: Schematischer Aufbau der Hochspannungsfunkenstrecke mit Angaben aus der DIN 1839:2017 [3] und ASTM E-681 [4] in kursiv-grau

Der Hochspannungsfunken hat laut Norm eine Leistung von ca. 10 Watt bei einer Leerlaufspannung von 13 kV bis 16 kV und einem Kurzschlussstrom von 20 mA bis 30 mA [3,5]. Die Brenndauer der Funkenstrecke wird laut den Normen auf 200 ms oder 500 ms eingestellt.

Kalorimetrische Messungen in Luft mit drei verschiedenen Transformatoren ergaben eine Leistung von 11,9 Watt mit einer maximalen Abweichung von 4,4 %. Damit ergeben sich mit den genannten Brenndauern Zündenergien von 2,2 J bis 6,2 J, Abweichungen eingerechnet. In der Norm zur Bestimmung der Brennbarkeit und des Oxidationsvermögens zur Auswahl von Ventilausgängen sind die gleichen Transformatoren (15 kV, 30 mA) angegeben mit einer Energie von 10 J je Funken [6]. Bei dieser Norm ist die Energieangabe also offensichtlich fehlerhaft.

### Gleitfunken

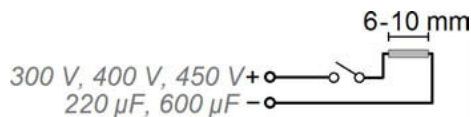


Bild 5: Schematischer Aufbau des Gleitfunken, Kursive Werte sind typisch aber nicht spezifiziert

Bei dem Gleitfunken wird eine Kondensatorentladung über ein kurzes Stück Bleistiftmine geleitet, auf dessen Oberfläche sich ein Funken ausbildet. Eine erste Testreihe mit 22 Tests bei einer Spannung von 450 V und einer Kapazität von 220 µF ergab eine Zündenergie von 7,9 J  $\pm$  0,9 J. Damit ergibt sich ein Wirkungsgrad von 35 % verglichen mit der Bruttoenergie von 22,75 J. Es gibt viele Einflussfaktoren bei dem Gleitfunken (z. B. die Kabellänge, Alter der Bleistiftmine) die die eingebrachte Zündenergie beeinflussen. Eine reine Abschätzung über die Bruttoenergie liefert ungenaue Werte. Es empfiehlt sich deshalb vor Beginn jeder Testreihe kalorimetrische Messungen durchzuführen.

### Explodierender Draht

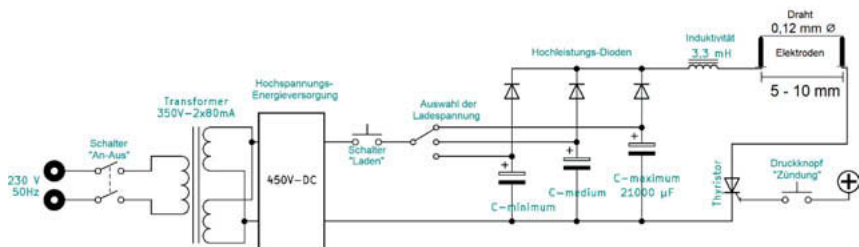


Bild 6: Schematischer Aufbau eines explodierenden Drahtes mit hohen variablen Energien

Bei dem explodierenden Draht wird eine Kondensatorentladung über eine Induktivität und einen dünnen NiCr-Draht geleitet. Dieser schmilzt, verdampft und es zündet ein Lichtbogen, der die eigentliche Zündquelle darstellt. Der explodierende Draht erlaubt eine elektrische Messung der Energie während des Zündvorgangs. Dazu werden die Spannung und die Stromstärke gemessen, miteinander multipliziert und integriert. Eine Korrekturrechnung der Stromstärke erlaubt ebenfalls den Einsatz verschiedener Kabel-Längen und -Querschnitte. Es wurden mehrere Tests mit variablen Energien zwischen 6,6 J und 1400 J (jeweils Doppelbestimmung) durchgeführt. Die Ergebnisse der elektrischen und der kalorimetrischen Messungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

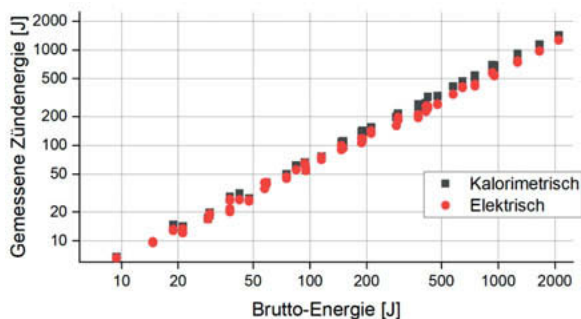


Bild 7: Kalorimetrisch und elektrisch gemessene Energie des explodierenden Drahts in Abhängigkeit von der Bruttoenergie (doppelt-logarithmische Skala)

### 3. Bestimmung der Brenndauer genormter Zündquellen

#### Hochvoltfunkenstrecke

Die Brenndauer der Funkenstrecke wird laut Norm mit einem Relais auf 200 ms (DIN EN 1839) [3] bzw. 200 ms oder 500 ms (DIN EN 15967) [5] eingestellt. Damit ist es die einzige Zündquelle mit klar definierter und ebenfalls die mit der längsten Brenndauer.

Die Brenndauer der drei anderen genormten Zündquellen wurde mit Highspeed-Kameras ermittelt. Dabei wurden jeweils mehrere Zündungen gefilmt und anschließend die Bilder gezählt.

#### Gleitfunken

Beim Gleitfunken ist die Brenndauer mit unter 100  $\mu$ s am kürzesten (siehe Abbildung 8) und liegt damit um drei Größenordnung unter der Funkenstrecke. Die eingebrachte Energie ist im ein- bis zweistelligen Joule-Bereich und damit vergleichbar.



Bild 8: Zündung der Gleitfunkenstrecke mit ca. 8 J, eigentliche Brenndauer ca. 50 µs

### Explodierender Draht

Beim explodierenden Draht kann die Brenndauer in einem gewissen Bereich eingestellt werden, typische Werte liegen zwischen 2 und 10 ms (siehe Abbildung 9).

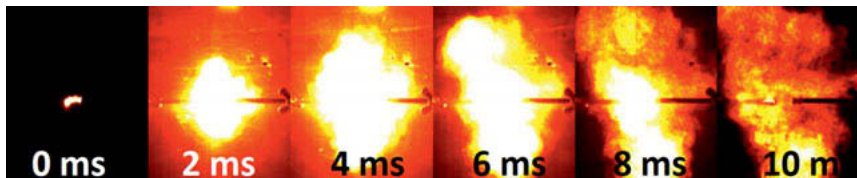


Bild 9: Zündung des explodierenden Drahts mit ca. 1000 J, Brenndauer 10 ms

### Pyrotechnischer Zünder

Bei den pyrotechnischen Zündern ist die Bestimmung der Brenndauer etwas schwieriger, da einzelne Partikel teilweise bis zu einer Sekunde nachbrennen oder glühen. So ist bei der Aufnahme eines 5kJ-Zünders nach 15-20 ms der Feuerball erloschen, einzelne Partikel glühten noch bis zu 332 ms nach der Zündung (siehe Abbildung 10).

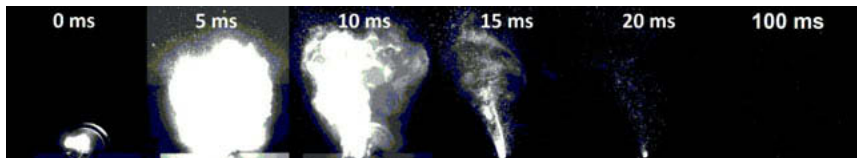


Bild 10: Zündung eines pyrotechnischen Zünders mit 5 kJ, Haupt-Brenndauer ca. 15 ms, einzelne glühende Partikel bis 332 ms nach Zündung erkennbar

Insgesamt wurden Aufnahmen von elf pyrotechnischen Zündern mit Energien von 100 J bis 5 kJ aufgenommen. Die Werte der „Hauptbrenndauer“ liegen hier im Bereich von 5 ms bis 17 ms (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Hauptbrenndauern der pyrotechnischen Zünder und Zeitangabe des letzten sichtbaren glühenden Partikels, Auszug

| Nennenergie lt. Hersteller | Hauptbrenndauer | Letzter glühender Partikel |
|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| -                          | [ms]            | [ms]                       |
| 100 J                      | 5               | 100                        |
| 250 J                      | 18              | 160                        |
| 500                        | 17              | 167                        |
| 1 kJ                       | 8               | 205                        |
| 5 kJ                       | 15              | 332                        |

#### 4. Untersuchungen zur Gemischherstellung bei hybriden Gemischen

In der Literatur finden sich verschiedene Verfahren zur Herstellung von hybriden Gemischen. Meistens wird in der 20L-Kugel ein Gemisch mit hohem Brenngasanteil vorgemischt, dass nach einblasen des Staubs mit Luft aus dem Staubvorratsbehälter die gewünschte Konzentration erreicht [7, 8, 9]. Es gibt jedoch auch den gegenteiligen Fall, dass ein Gemisch mit hohem Brenngasanteil aus dem Staubvorratsbehälter in die 20L-Kugel eingeblasen wird [10]. Der dritte mögliche Fall, sowohl im Staubvorratsbehälter als auch in der 20L-Kugel vor Beginn des Versuchs die gewünschte Gaskonzentration einzustellen, wurde bei der Literaturrecherche nicht gefunden.

Bei den ersten zwei genannten Mischverfahren wird angenommen, dass bei der Zündung das Gemisch homogenisiert ist. Da es nicht möglich ist, Proben innerhalb der Kugel im turbulenten Zustand zu entnehmen wurden die sicherheitstechnischen Kenngrößen Explosionsdruck und  $dp/dt$  von zwei verschiedenen Mischverfahren miteinander verglichen. Einmal Brenngas-Luft-Gemisch im Staubvorratsbehälter und in der Kugel vor der Zündung und Brenngas-Luft-Gemisch mit hohem Brenngasanteil in der Kugel und Luft im Staubvorratsbehälter. Zur Kontrolle wurden die erhaltenen Daten mit denen aus der CHEMSAFE-Datenbank verglichen (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).

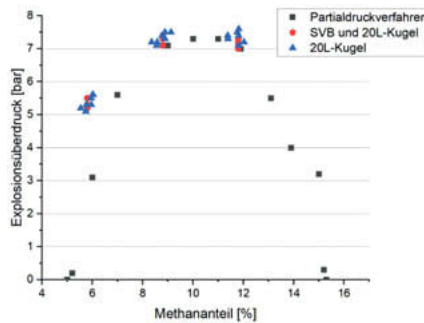


Bild 11: Explosionsüberdruck in Abhängigkeit vom Methananteil; Partialdruckverfahren (Daten aus CHEMSAFE[11]) mit 3J-Zündquelle, gemessen in der 20L-Kugel, Vormischung in **StaubVorratsBehälter** und 20L-Kugel und Gemisch mit hohem Brenngasanteil in 20L-Kugel mit jeweils 2kJ und 10kJ pyrotechnischen Zündern

Der Explosionsüberdruck von Methan unterscheidet sich bei drei verschiedenen Mischverfahren und verschiedenen Zündquellen und -energien nicht signifikant in der Nähe der stöchiometrischen Mischung. Bei geringeren Konzentrationen kommt es zu Abweichungen, die durch die vorhandene Turbulenz oder die energiereichere Zündquelle hervorgerufen werden können. Zur Bestimmung von  $p_{\max}$  liefern also alle drei Verfahren dieselben Ergebnisse und sind somit geeignet.

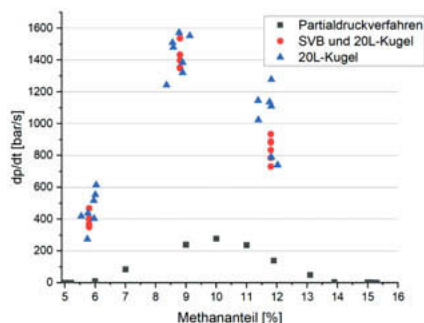


Bild 12:  $dp/dt$  in Abhängigkeit vom Methananteil; Partialdruckverfahren (Daten aus CHEMSAFE [11]) mit 3J-Zündquelle, gemessen in der 20L-Kugel, Vormischung in **StaubVorratsBehälter** und 20L-Kugel und Gemisch mit hohem Brenngasanteil in 20L-Kugel mit jeweils 2kJ und 10kJ pyrotechnischen Zündern

Der maximale zeitliche Druckanstieg unterscheidet sich ebenfalls nicht bei den zwei angewandten Mischverfahren. Da er aber sehr stark von der Turbulenz zum Zündzeitpunkt abhängig ist, ist ein direkter Anschluss an die vorhandenen Datensätze von Gasen nur schwer möglich [1,2]. Eine direkte Umrechnung durch einen Korrekturfaktor ist ebenfalls schwierig, da das Verhältnis von  $dp/dt$  zwischen den turbulenten und den nicht-turbulenten Mischverfahren stark schwankt. In CHEMSAFE ist für 6 Mol-% Methananteil ein  $dp/dt$  von 10 bar/s angegeben, bei unseren Tests mit 5,8 Mol-% Methananteil beträgt  $dp/dt$  im Schnitt 425 bar/s (Faktor 42,5), bei den anderen beiden Konzentrationen ergibt sich ein kleinerer Faktor von ca. 6.

Bei den beiden Mischverfahren, bei denen erst kurz vor der Zündung die gewünschte Konzentration eingestellt wird, sollten Vorversuche zur Validierung der Gemisch-Zusammensetzung stattfinden. Der Grund dafür ist, dass das Füllen nach der Partialdruckmethode normalerweise langsam durchgeführt wird und somit keine thermischen Effekte auftreten. Durch den schnellen Druckausgleich bei turbulenter Zündung erwärmt sich das Gasgemisch in der Kugel und es wird ein höherer Druck gemessen, als tatsächlich vorliegt. Um diesem Effekt und anderen eventuellen Störfaktoren bei der Gemisch-Herstellung entgegenzuwirken wurden vor Versuchsbeginn Versuche ohne Zündung durchgeführt und das fertige Gasgemisch analysiert. Der Druck vor Versuchsbeginn wurde auf  $0,4 \text{ bar} \pm 0,0006 \text{ bar}$  eingestellt. Der gemessene Druckausgleich war bei jedem Versuch 0,64 bar. Die Gemisch-Zusammensetzung nach Partialdruckverfahren wurde auf 5,8 Mol-%  $\pm 0,24 \text{ Mol-\%}$ , 8,8 Mol-%  $\pm 0,17 \text{ Mol-\%}$  und 11,8 Mol-%  $\pm 0,08 \text{ Mol-\%}$  eingestellt. Die lineare Abweichung wurde bei der Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngrößen ebenfalls abgezogen. Die Streuung beträgt maximal  $\pm 0,15 \text{ Mol-\%}$ , hier bei 6 Mol-% Methananteil (siehe Abbildung 13).

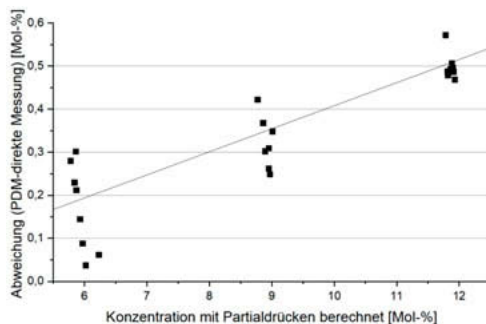


Bild 13: Abweichung der Gaskonzentration, Anteil nach **P**artial**D**ruck**M**ethode abzüglich des gemessenen Anteils in Abhängigkeit von der mit den Partialdrücken berechneten Konzentration

## 5. Fazit

Die Zündenergien aller vier genormten Zündquellen wurden kalorimetrisch gemessen. Bei einigen genormten Zündquellen unterscheiden sich die Herstellerangaben bzw. die Angaben in den Normen von den kalorimetrisch gemessenen. Eine sehr gute Übereinstimmung gibt es beim explodierenden Draht zwischen elektrisch und kalorimetrisch gemessener Zündenergie. Die Zünddauer unterscheidet sich bei den vier standardisierten Zündquellen um vier Größenordnungen (ca. 50  $\mu$ s bis 500 ms). Die Zünddauer könnte neben der Zündenergie auch einen signifikanten Einfluss auf Bestimmung der STK haben. Die Gemisch-Herstellung ist bei der an die DIN EN 14034 angelehnte Methode ungenauer und schlechter reproduzierbar. Vor allem für die Bestimmung von Explosionsgrenzen ist diese wahrscheinlich zu ungenau. Für ein standardisiertes Prüfverfahren müsste entweder vorgemischt oder weniger Toleranz zugelassen werden. Für die Bestimmung von  $(dp/dt)_{\max}$  und  $p_{\max}$  sind die Methoden ausreichend. Vor allem für  $dp/dt$  ist jedoch auf den Einfluss der Turbulenz zu achten, der bei dem turbulenten Mischverfahren weit höhere Werte liefert als die in der Literatur angegebenen. Erste Untersuchungen mit der standardisierten Zündquelle „explodierender Draht“ zeigen, dass bei Methan die sicherheitstechnischen Kenngrößen  $dp/dt$  und der Explosionsdruck keine signifikanten Unterschiede bei Zündung mit Energien von 200 J und 2.000 J aufweisen. Bei Tests mit Maisstärke und dem Vergleich zwischen 200 J und 2.000 J erhöhte sich die untere Explosionsgrenze mit geringerer Zündenergie. Die Kenngrößen  $dp/dt$  und Explosionsdruck unterscheiden sich jedoch auch nicht signifikant.

## Danksagungen

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie die Finanzierung des NEX-HYS Forschungsvorhabens (Förderkennzeichen: 03TNH006C). Des Weiteren danken wir Herrn Daniel Kadoke und Herrn Peter Löwe (beide Mitarbeiter der BAM) sowohl für die fachliche Unterstützung bei den Highspeed-Aufnahmen als auch für die Bereitstellung der Highspeed-Kameras.



## Quellenverzeichnis

- [1] Maximilian Weiß und Nikolaos Zarzalis, SAFEKINEX, No. 11, Effect of turbulence on the explosion severity ( $K_G$ -value), 2006
- [2] G.F.P Harris, The effect of vessel size and degree of turbulence on gas phase explosion pressures in closed vessel, 1967
- [3] DIN EN 1839:2017 - Determination of the explosion limits for flammable gases and vapours, Beuth-Verlag, Berlin
- [4] ASTM 681-09 - Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases), ASTM International, West Conshohocken
- [5] DIN EN 15967 - Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe, Beuth-Verlag, Berlin
- [6] DIN EN ISO 10156:2017 - Gas cylinders – Gases and gas mixtures – Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets, Beuth-Verlag, Berlin
- [7] Christoph Cesana und Richard Siwek, Handbuch 20L-Kugel, 2009, Kühner AG
- [8] Zaheer Abbas et. al., Theoretical evaluation of lower explosion limit of hybrid mixtures, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019
- [9] Jiaojun Jiang et. al., A correlation of the lower flammability limit for hybrid mixtures, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014
- [10] Wentao Ji et. al., Comparative analysis of the explosibility of several different hybrid mixtures, Powder Technology, 2018
- [11] CHEMSAFE, [www.chemsafe.ptb.de](http://www.chemsafe.ptb.de), PTB Braunschweig, Sabine Zakel, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany, abgerufen am 14.09.2020
- [12] ASTM E 2079-00 - Standard Test Methods for Limiting Oxygen (Oxidant) Concentration in Gases and Vapors, ASTM International, West Conshohocken



# Selbstentzündungsverhalten von Feststoffschüttungen

## Validierung der Extrapolation von Labortests mit Hilfe halbtechnischer Versuche bis 1 m<sup>3</sup> und thermoanalytischer Methoden

Dipl.-Ing. **René Erdt**, Dr. **Martin Schmidt**,  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin;  
Dr. **Markus Gödde**, Dr. **Steffen Salg**, BASF SE, Ludwigshafen

### Kurzfassung

Zur Bestimmung der reaktionskinetischen Daten von Schüttgütern und zur Vorhersage des Selbstentzündungsverhaltens großer Lager kommen verschiedene Analysemethoden zum Einsatz. Dabei handelt es sich um thermische Verfahren wie die Differential-Scanning-Kalorimetrie DSC, die simultane Thermoanalyse STA sowie die Mikrokalorimetrie zur hochpräzisen Messung von Wärmeströmen. Für die oben genannten Methoden werden sehr kleine Probenmengen verwendet. In der Regel wird das Selbstentzündungsverhalten jedoch mit Hilfe von isoperibolen oder adiabatischen Warmlagerungsversuchen ermittelt; die Probenvolumina liegen hier meist im Bereich von ca. 100 cm<sup>3</sup> bis zu mehreren Litern.

Die Extrapolation auf technisch relevante Volumina birgt jedoch erhebliche Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten zu identifizieren und zu reduzieren ist das Hauptziel eines 2018 gestarteten Forschungsprojekts. Dies soll in erster Linie durch den Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung von Probengrößen von bis zu 1000 dm<sup>3</sup> geschehen.

Sowohl Warmlagerungsversuche im Labormaßstab als auch thermoanalytische Verfahren, die mit Hilfe verschiedener Methoden ausgewertet werden, lassen, einzeln betrachtet, häufig nur bedingt zuverlässige Aussagen über das Selbstentzündungsverhalten von großen Schüttgütern zu. Es werden komplette Versuchsreihen mit allen genannten Prüfverfahren vorgestellt und Aussagen zur Anwendbarkeit der Extrapolationsmethoden diskutiert.

### Abstract

Several analytical methods are used for the determination of reaction kinetic data of solid bulk materials and to predict the self-ignition behaviour of large storages. These are thermal analyses such as differential scanning calorimetry DSC, simultaneous thermal analysis STA as

well as microcalorimetry for high-precision measurement of heat flows. Very small sample quantities are used for the above methods.

Usually, the self-ignition behaviour is determined by means of isoperibolic or adiabatic hot storage tests; the sample volumes here are typically in the range of approx. 100 cm<sup>3</sup> to several liters.

The extrapolation to technically relevant volumes holds, however, considerable uncertainties. The main objective of a research project launched in 2018 is to identify and to reduce these uncertainties. This is to be done primarily by setting up a test stand for the investigation of sample sizes of up to 1000 dm<sup>3</sup>.

Both hot storage tests on a laboratory scale and thermoanalytical analysis evaluated with the aid of various methods allow, individually considered, only partially reliable conclusions about the self-ignition behaviour of large bulk materials. Complete test series using all mentioned test methods will be presented and conclusions regarding the applicability of the extrapolation methods will be discussed.

## 1. Einleitung

Bei der Lagerung und dem Transport von brennbaren Schüttgütern besteht die Gefahr der Brandentstehung durch Selbstentzündung.

Die Gefahr der Selbstentzündung erhöht sich dabei mit Zunahme sowohl der Mengen des gelagerten brennbaren Materials als auch mit der Lagerdauer. Zur Beurteilung des Selbstentzündungsverhaltens eines Schüttgutes werden in der Regel so genannte isoperibole Warmlagerungsversuche nach prEN15188:2019 [1] herangezogen, mit deren Hilfe Selbstentzündungstemperaturen ( $T_{SI}$ ) für verschiedene Probenvolumina im Labormaßstab bestimmt werden. Eine Extrapolation der im Labormaßstab gewonnenen Ergebnisse erfolgt auf Basis der Theorie der Wärmeexplosion. Aus diesem Ergebnis können Bedingungen abgeleitet werden, die einen sicheren Transport sowie eine sichere Lagerung der Materialien ermöglichen.

Die Extrapolation auf Basis der Laborversuche (üblicherweise bis etwa 1 dm<sup>3</sup>) hin zu technisch relevanten Volumina birgt jedoch erhebliche Unsicherheiten [2].

Das Hauptziel der hier vorgestellten Forschung ist es, diese Unsicherheiten zu identifizieren und zu reduzieren. Durch eine Kombination von halbtechnischen Warmlagerungsversuchen bis zu einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> und thermoanalytischen Methoden mit sehr kleinen Proben-volumina sollen die in [1] aufgeführten Methoden der Extrapolation überprüft werden.

Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf Materialien mit komplexen Reaktionskinetiken oder -mechanismen gelegt. Zusätzlich wird die Anwendbarkeit von (neuen) Screening-Methoden

zur Erkennung von für die Extrapolation (un)geeigneter Stoffe überprüft, die auf mikrokalorimetrischen Methoden basieren.

## 2. Stand der Wissenschaft und Technik

Ein gängiger Ansatz zur Übertragung von Ergebnissen aus Laborexperimenten auf praktische Bedingungen ist die so genannte Theorie der Wärmeexplosion, die von Frank-Kamenetskii entwickelt wurde [3]. Basierend auf dieser Theorie ergibt sich eine Korrelation aus der charakteristischen Länge einer Ablagerung (z.B. Radius eines Zylinders) und ihrer kritischen Lagertemperatur  $T_{SI}$  (Selbstentzündungstemperatur).

Bild 1 zeigt die Extrapolation der kritischen Lagertemperaturen auf größere Volumina im sogenannten Arrhenius-Diagramm (mit:  $\delta_{cr}$  - kritischer Frank-Kamenetskii-Parameter,  $T_{SI}$  - Selbstentzündungstemperatur,  $r$  - charakteristische Länge).

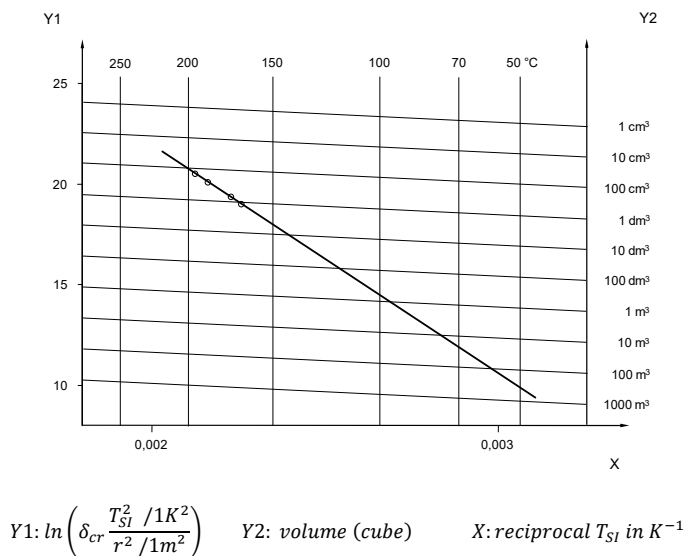


Bild 1: Arrhenius Diagramm (nach [1])

Für eine vereinfachte schnelle Extrapolation wird häufig der sogenannte Pseudo-Arrhenius-Plot verwendet, bei dem das Volumen-Oberflächen-Verhältnis der Probe ( $V/A$ ) gegen die reziproke Selbstentzündungstemperatur ( $1/T_{SI}$ ) aufgetragen wird (siehe [1], Anhang A.5). Diese Methode wird in Abschnitt 3.2 verwendet, um die Ergebnisse der durchgeführten isoperibolen Testreihen zu veranschaulichen.

Erfahrungen aus Störfällen haben jedoch gezeigt, dass die im Labormaßstab gewonnenen Daten oft nur begrenzt und mit einer nicht quantifizierbaren Unsicherheit auf Anwendungen im realen Maßstab übertragbar sind. Wenn Reaktionsvorgänge, die von dieser Methode nicht erfasst werden mit Hilfe detaillierter mathematischer Modelle berücksichtigt werden können, lassen sich Selbstentzündungsvorgänge im realen Maßstab viel genauer vorhersagen und bessere Parameter für einen sichereren Betrieb von Prozessanlagen sowie bei Lagerung und Transport ableiten. Dies erfordert sowohl Laborversuche als auch numerische Methoden, die durch Großversuche im halbindustriellen Maßstab verifiziert werden müssen. Systematische Großversuche mit Probengrößen, die weit über den in der Vergangenheit üblichen Volumina liegen, wurden bisher noch nicht durchgeführt.

Einen Überblick über verschiedene Methoden zur Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens geben z.B. Fei und Liang [4]. Eine Reihe von Parametern (z.B. Materialeigenschaften, Lagerbedingungen und die Geometrie des Schüttgutes) beeinflussen den Selbstentzündungsvorgang. Aus diesem Grund wurde bereits in der Vergangenheit versucht, diese Prozesse durch systematische Laborexperimente in Kombination mit geeigneten Modellansätzen besser zu beschreiben und die Ergebnisse der Laborexperimente mit Hilfe numerischer Methoden auf den realen Maßstab zu übertragen, z.B. [5] bis [11]. Einige der bisher durchgeführten Arbeiten umfassen auch Großversuche. In diesem Zusammenhang wurden Untersuchungen zur Selbstentzündung in Schüttgütern im realen Maßstab durchgeführt, wie z.B. in Kohlehalden [5] und Holzhackschnitzelhalden [8]. Bei diesen Untersuchungen ging es jedoch nicht um die systematische Bestimmung kritischer Lagerbedingungen, wie sie zur Überprüfung der Extrapolation notwendig wären, sondern um die Untersuchung ausgewählter Szenarien.

Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Anwendung numerischer Berechnungsmethoden ist jedoch die Kenntnis der reaktionskinetischen Daten der bei den Selbstzündungsvorgängen ablaufenden Prozesse. Diese Daten werden wiederum aus den bereits beschriebenen Laborversuchen ermittelt und unterliegen damit den oben aufgeführten Unsicherheiten.

### **3. Experimentelle Arbeiten**

#### **3.1 Untersuchte Materialien**

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Reihe verschiedener Materialien ausgewählt. Darunter sind Holzpellets, Petrolkoks, Steinkohle, eine Vitaminmischung, vernetztes Polyvinyl-Pyrrolidon (PVP) und eine Sterinzubereitung. Eine detaillierte Beschreibung zu den ausgewählten Stoffen findet sich in [2].

### 3.2 Isoperibole Warmlagerungsversuche

#### 3.2.1 Versuchsaufbau für großvolumige Warmlagerungsversuche

Der für die Durchführung von Versuchen im halbertechnischen Maßstab zur Verfügung stehende Versuchsaufbau ist in Bild 2 abgebildet. Er besteht aus vier identischen Wärmekammern, in denen Warmlagerungsversuche mit einem Volumen von bis zu 1000 dm<sup>3</sup> möglich sind.

Die Wärmekammern sind mit verschiedenen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet, die es ermöglichen Versuche jederzeit abubrechen und den Ofen mit Stickstoff zu spülen.

Als Probenbehälter stehen kubische Drahtgitterkörbe mit einem Volumen von 10 dm<sup>3</sup>, 125 dm<sup>3</sup> und 1000 dm<sup>3</sup> zur Verfügung. In jedem Ofen kann eine Temperaturmessung an bis zu 16 Messstellen durchgeführt werden.



Bild 2: Wetterschutzunnel mit vier Wärmekammern für Warmlagerungsversuche (links); Instrumentierter Probenbehälter (125 dm<sup>3</sup>) mit Petrolkoks (rechts)

#### 3.2.2 Messergebnisse

##### Petrolkoks

Ein Warmlagerungsversuch wird als Entzündung gewertet, wenn mindestens eines von zwei Kriterien erfüllt ist (nach [1]):

- der zeitliche Temperaturverlauf im Probenzentrum weist einen Wendepunkt oberhalb der Lagertemperatur auf.
- die Temperatur in der Mitte der Probe steigt um mindestens 60 K über die Ofentemperatur an ( $\Delta T > 60 \text{ K}$ ).

In der Praxis treten beide Kriterien häufig bei identischer Lagertemperatur auf. Eine Warmlagerung ohne Selbstentzündung weist in den meisten Fällen keinen Wendepunkt und keine

Selbsterhitzung über 60 K auf. Ein Versuch mit Zündung zeigt häufig einen deutlichen Wendepunkt mit einhergehender Erhitzung der Probe über mehr als 60 K oberhalb der Ofentemperatur und einem signifikanten Massenverlust durch Verbrennung.

Bild 3 zeigt Temperaturkurven der isoperibolen Warmlagerungsversuche mit Petrolkoks bei vier verschiedenen Probenvolumina. In Bild 3 (oben links) sind Versuche mit 137 cm<sup>3</sup> Petrolkoks bei Ofentemperaturen von 206 °C bis 265 °C dargestellt. Aufgetragen sind die Temperaturverläufe im Probenzentrum. Die Temperatur steigt bei allen Ofentemperaturen über 206 °C um mehr als 60 K über die Ofentemperatur an und ist daher als Entzündung gemäß [1] zu werten. Die erreichte Maximaltemperatur steigt sukzessive mit der Erhöhung der Ofentemperatur an. Ein Wendepunkt sowie ein Abbrand mit signifikantem Massenverlust tritt jedoch erst bei Ofentemperaturen über 265 °C auf. Die durch die verschiedenen Kriterien bestimmte kritische Temperatur weicht somit um 59 K ab. Es stellt sich die Frage, ob das in der Norm definierte 60 K-Kriterium tatsächlich ein geeignetes Zündkriterium für dieses Material ist.

Werden jedoch größere Probenvolumina untersucht, so nimmt der Temperaturunterschied zwischen beiden Zündkriterien mit zunehmendem Probenvolumen ab. Bei Versuchen mit 1097 cm<sup>3</sup> Petrolkoks wird das 60 K-Kriterium bei einer Lagertemperatur von 165 °C erreicht, ein erster Wendepunkt ist bei 167 °C zu erkennen. Wenn die Versuche mit noch größeren Probenvolumina (10,8 dm<sup>3</sup> und größer) durchgeführt werden, treten beide Zündkriterien bei der gleichen Lagertemperatur auf (siehe Bild 3 unten rechts). Die gezeigten Versuche mit 1000 dm<sup>3</sup> Probenvolumen wurden aus Sicherheitsgründen noch vor Erreichen einer Temperaturerhöhung von 60 K abgebrochen; hätten ohne Löschung dieses Kriterium jedoch ebenso erfüllt.

Das Pseudo-Arrhenius-Diagramm für Petrolkoks ist in Bild 4 dargestellt. Eingetragen sind die ermittelten Selbstentzündungstemperaturen sowie zwei verschiedene Extrapolationen. Die untere Extrapolationsgerade basiert lediglich auf den Versuchen im Labormaßstab unter Verwendung des 60 K-Zündkriteriums. Sie zeigt demnach die Extrapolation, die aus der Anwendung der Norm [1] resultieren würde. Es wird deutlich, dass die ermittelten Selbstentzündungstemperaturen bei höheren Probenvolumina signifikant von dieser Extrapolation abweichen. Die Anwendung des 60 K-Kriteriums auf Versuche im Labormaßstab mit Petrolkoks überschätzt die Neigung zur Selbstentzündung für große Volumina.



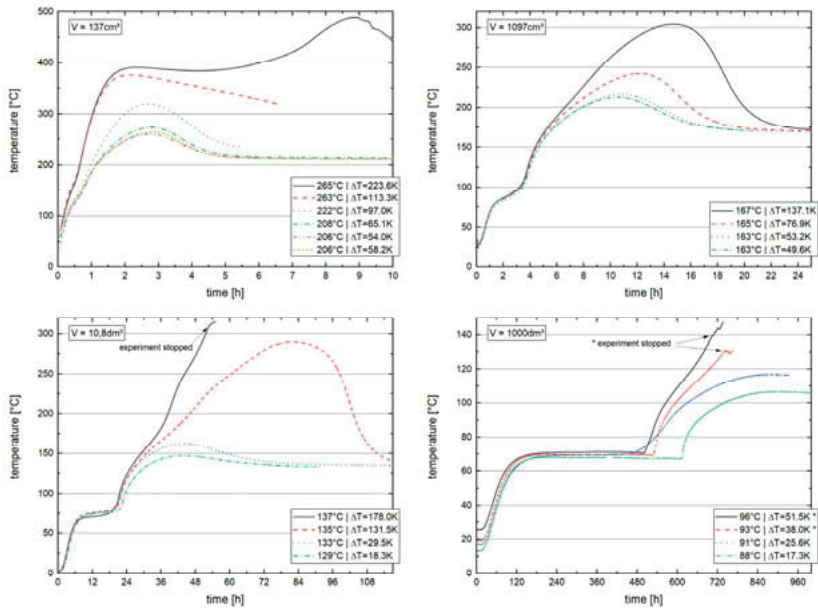


Bild 3: Zeitliche Verläufe der Temperatur im Probenzentrum bei verschiedenen Lagertemperaturen und unterschiedlichen Probenvolumina Petrolkoks

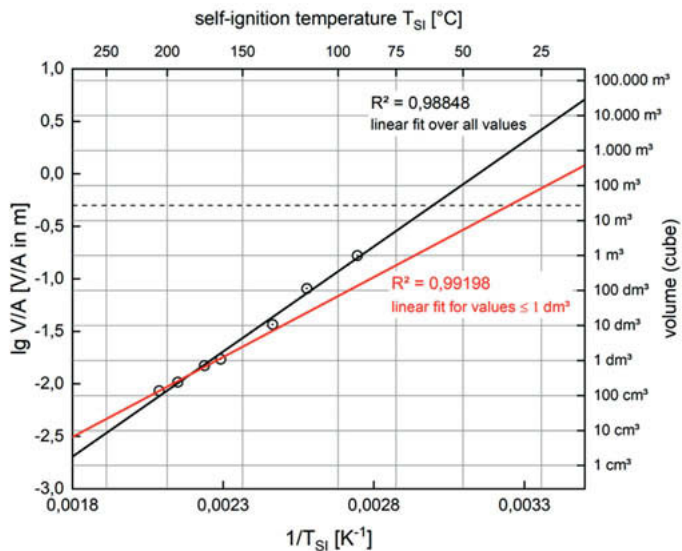


Bild 4: Pseudo-Arrhenius-Diagramm Petrolkoks

## Holzpellets

Für die Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Holzpellets wurden isoperibole Warmlagerungsversuche bis zu einem Volumen von 1000 dm<sup>3</sup> durchgeführt.

Bild 5 zeigt die ermittelten Selbstentzündungstemperaturen für unterschiedliche Volumina sowie zwei Extrapolationsgeraden im Pseudo-Arrhenius-Diagramm. Werden lediglich die Versuchsergebnisse im Labormaßstab ( $V \leq 1 \text{ dm}^3$ ) für die Extrapolation genutzt, so ergibt sich die untere, rote, Extrapolationsgerade. Diese zeigt eine gute Übereinstimmung mit Versuchen, die mit einem Volumen von 125 dm<sup>3</sup> und 1000 dm<sup>3</sup> durchgeführt wurden. Die für größere Volumina ermittelten Selbstentzündungstemperaturen weichen nur geringfügig von der Extrapolation der Laborwerte ab und liegen innerhalb der in [1] definierten Messunsicherheit der Extrapolation. Die Extrapolation über alle untersuchten Volumina ergibt etwas höhere kritische Temperaturen für technische Lagervolumina.

In den Versuchen mit 125 dm<sup>3</sup> und 1000 dm<sup>3</sup> wurden jedoch konvektive Effekte innerhalb der Probe beobachtet. Die höchste gemessene Temperatur in der Probe und der Ort der tatsächlichen Entzündung der Probe befindet sich bei den Versuchen mit 1000 dm<sup>3</sup> etwa 25 cm oberhalb des geometrischen Zentrums. Der Grund dafür ist wahrscheinlich konvektiver Massen- und Wärmetransport im Schüttgut, das ein vergleichsweise großes Lückenvolumen aufweist. Diese beobachteten Effekte erfordern weitere Untersuchungen.

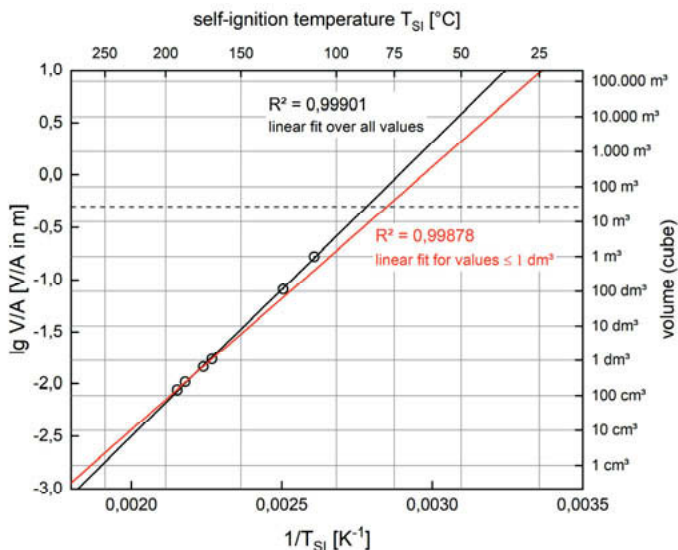


Bild 5: Pseudo-Arrhenius-Diagramm Holzpellets mit zwei Extrapolationsgeraden

### Vernetztes Polyvinyl-Pyrrolidon (PVP)

Isoperibole Warmlagerungsversuche mit PVP im Labor zeigen bei ihrer Einstufung in Zündung und Nichtzündung ähnliche Schwierigkeiten auf, wie bei den Versuchen mit Petrolkoks. Auch hier ergibt eine Auswertung mit den beiden Zündkriterien, dem 60 K-Kriterium und dem Wendepunktkriterium, unterschiedliche Ergebnisse. Bei PVP tritt, im Gegensatz zum Verhalten bei Petrolkoks, ein Wendepunkt im Temperaturverlauf oberhalb der Ofentemperatur schon sehr viel früher auf als eine Temperaturdifferenz  $> 60\text{ K}$  gefolgt vom Abbrand der Probe. Dabei bleibt die Erwärmung der Probe über die Ofentemperatur zunächst sehr gering - erhöht man die Lagertemperatur, tritt jedoch eine scharfe Grenze auf, bei der die maximale Temperaturdifferenz zwischen Probenzentrum und Ofentemperatur schlagartig zunimmt. Dieses Verhalten ist in Bild 6 für ein Probenvolumen von  $715\text{ cm}^3$  zu erkennen. Eine klare Bestimmung einer Lagertemperatur, bei der kein Wendepunkt auftritt, ist aufgrund des Reaktionsverhaltens der Probe schwierig und bedarf weiterer Untersuchungen. Auch hier nähern sich, wie schon bei den Untersuchungen mit Petrolkoks, die beiden Kriterien bei steigendem Probenvolumen einer gemeinsamen kritischen Temperatur an.

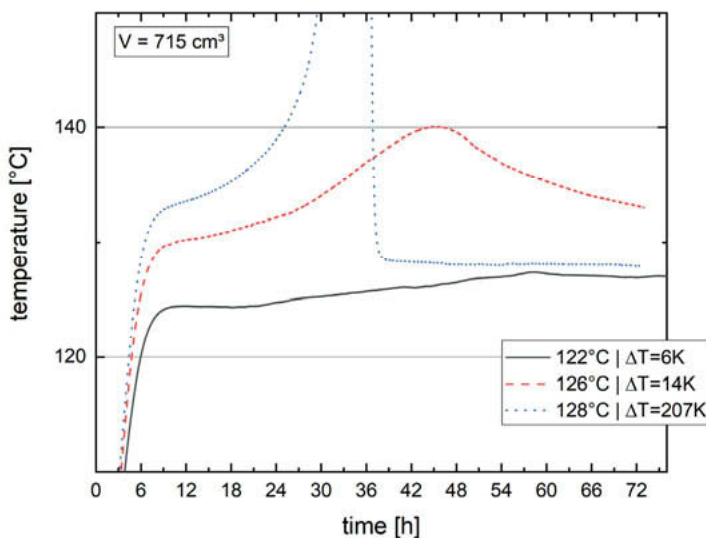


Bild 6: Zeitliche Verläufe der Temperatur im Probenzentrum bei verschiedenen Lagertemperaturen für Versuche mit  $715\text{ cm}^3$  PVP

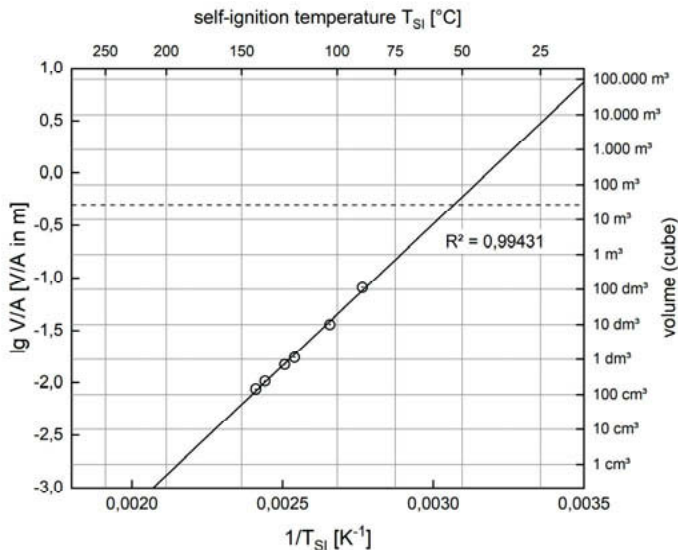


Bild 7: Pseudo-Arrhenius-Diagramm PVP

In Bild 7 sind die ermittelten Selbstentzündungstemperaturen für PVP im Pseudo-Arrhenius-Diagramm dargestellt. Die Versuche bis zu einem Volumen von etwa 114 dm<sup>3</sup> liegen sehr gut auf einer Extrapolationsgerade mit den im Labor unter Anwendung des 60 K-Kriteriums gemessenen  $T_{SI}$ . Extrapoliert man die Ergebnisse lediglich der Versuche 10 dm<sup>3</sup> und 114 dm<sup>3</sup> nach unten hin zu den im Labormaßstab verwendeten Volumina, gibt es einen Hinweis auf zu niedrigeren Werten verschobenen  $T_{SI}$ , wie sie bei Anwendung des Wendepunktkriteriums auftreten würden. Diese Vermutung ist jedoch auf Grundlage von nur zwei Volumina nicht hinreichend zu belegen. Messergebnisse für Versuche mit 1000 dm<sup>3</sup> Probenvolumen, stehen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrages noch aus.

### 3.2.3 Bestimmung formalkinetischer Daten

Das Reaktionsverhalten von Schüttgütern lässt sich mit der Theorie der Wärmeexplosion von Frank-Kamenetskii bzw. dem Modell von Thomas ermitteln. Die Modelle sind im Detail z.B. in [1] - Anhang A beschrieben. Das Modell von Thomas berücksichtigt das Verhältnis von Wärmeübertragung an den Grenzen und Wärmeleitung innerhalb der Schüttung, dies ist insbesondere für kleine Proben von Relevanz. Dieses Verhältnis kann durch die Biot-Zahl ausgedrückt werden:

$$Bi = \frac{h}{\lambda} L. \quad (1)$$

Der Parameter  $h$  ist der Wärmeübergangskoeffizient und kann mit  $h = 5 \frac{W}{m^2K}$  (BASF-Versuchsaufbau) und  $h = 10 \frac{W}{m^2K}$  (BAM-Versuchsaufbau) angenähert werden.  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit des Schüttguts und wurde mit der Hot Disk-Methode bei Raumtemperatur bestimmt.  $c_p$  ist die spezifische Wärmekapazität des Schüttguts und wurde mittels Calvetkalorimetrie bei 50 °C bestimmt. Die resultierenden  $\lambda$ - und  $c_p$ -Werte für Proben im Anlieferungszustand (nicht getrocknet) sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Stoffdaten der Proben (Anlieferungszustand)

| Probe                      | $\lambda$ (23 °C)<br>[W/(m*K)] | $c_p$ (50 °C)<br>[J/(g*K)] |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Petrolkoks                 | 0,15874                        | 1,47                       |
| Vitaminmischung            | 0,08954                        | 1,71                       |
| Polyvinyl-Pyrrolidon (PVP) | 0,07207                        | 1,51                       |
| Sterolmischung             | 0,06163                        | 1,85                       |

Der Parameter  $L$  ist die charakteristische Länge einer Geometrie. Beide Modelle, Frank-Kamenetskii und Thomas, werden im vorliegenden Beitrag zur Bestimmung kinetischer Daten (scheinbare Aktivierungsenergie  $E_a$ ) verwendet, siehe Abschnitt 4.

### 3.3 Adiabate Warmlagerungsversuche

Bei adiabaten Warmlagerungsversuchen wird die Umgebungstemperatur (Ofentemperatur) so eingeregelt und nachgeführt, dass sie der Kerntemperatur der Probe entspricht. Unter diesen Bedingungen wird die Fourier-Wärmegleichung auf diese Weise vereinfacht, dass keine Wärmeleitung in der Probe und keine Wärmeübertragung von der Probe auf die Umgebung auftritt und daher die Reaktionskinetik aus einem einzigen Versuch bestimmt werden kann. Adiabate Warmlagerungsversuche sind in [1] im Anhang D beschrieben. Die Ergebnisse der adiabaten Messungen der Vitaminmischung und der Sterolmischung werden in Bild 9 dargestellt. Die scheinbaren Aktivierungsenergien, die aus adiabaten Messungen erhalten werden, werden in Abschnitt 4 diskutiert.

### 3.4 Thermoanalytische Untersuchungen

#### 3.4.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Vier Proben - Petrolkoks, die Vitaminmischung, PVP und die Sterolmischung - wurden ausgewählt, um kinetische Analysen durchzuführen. Die Messungen wurden in offenen Aluminium-Tiegeln durchgeführt, die Thermogramme sind in Bild 8 dargestellt.

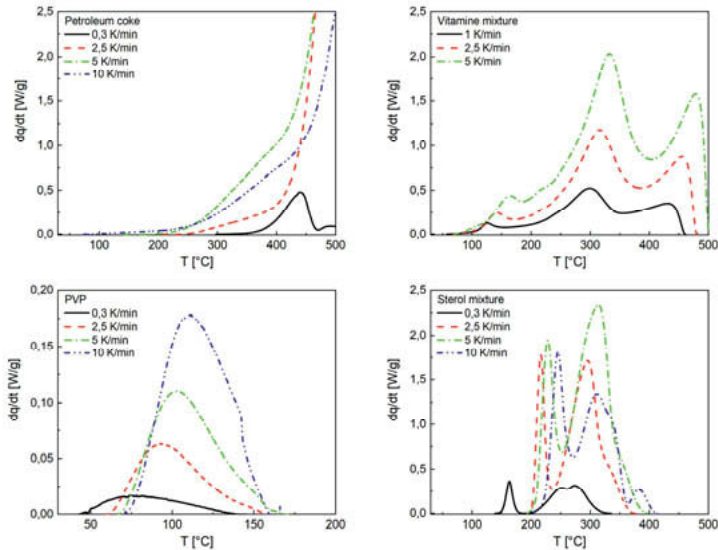


Bild 8: Thermogramme von Petrolkoks (oben links), Vitaminmischung (oben rechts), Polyvinyl-Pyrrolidon (PVP, unten links) und Sterolmischung (unten rechts) mit unterschiedlichen Heizraten, Messungen in offenen Aluminium-Tiegeln

#### 3.4.2 Modellfreie Schätzmethoden

Die Ergebnisse thermoanalytischer Untersuchungen wurden in einem früheren Beitrag von Schmidt et al. vorgestellt [2]. In diesen Untersuchungen ist der thermische Umsatzgrad  $\alpha$  die Grundlage für kinetische Berechnungen. Die Änderung des Umsatzgrades  $\frac{d\alpha}{dt}$  kann als

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot f(\alpha) \quad (2)$$

berechnet werden. Hierbei ist  $f(\alpha)$  eine vom Reaktionsmodell abhängige Funktion und  $k(T)$  ist die temperaturabhängige Geschwindigkeitskonstante. Deren Temperaturabhängigkeit wird durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben, wobei  $A$  der präexponentielle Faktor,  $E_a$  die Aktivierungsenergie und  $R$  die universelle Gaskonstante ist [14].

Zur Schätzung kinetischer Parameter wurden modellfreie Schätzmethoden wie Friedmann [15], Ozawa [16]/ Flynn/Wall [17], Kissinger [18] und die Bestimmung der Anfangssteigung angewendet. Diese Methoden liefern erste Erkenntnisse, ob eine Reaktion eher komplexen oder einfachen Mechanismen folgt. Ein Teil der Untersuchungen bestand darin, die scheinbare Aktivierungsenergie des ersten Reaktionsschritts zu schätzen und zu überprüfen, ob die Ergebnisse geeignet sind, das Reaktionsverhalten in größerem Maßstab vorherzusagen. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst und sie werden in Abschnitt 4 diskutiert.

### 3.4.3 Mikrokolorimetrie

Die Mikrokolorimetrie basiert auf dem Differenzwärmestromprinzip analog wie die DSC. Sie zeichnet sich durch eine sehr hohe Messempfindlichkeit im Bereich von 1 mW/kg bis 10 mW/kg und eine hohe Basislinienstabilität aus. Dies ermöglicht die Messung von sehr geringen Wärmeströmen und damit eine Beurteilung von Reaktionen bei niedrigen Temperaturen. Auf diese Weise kann die Wärmeproduktionsrate von Selbsterhitzungsprozessen direkt im für einen industriellen Maßstab relevanten Temperaturbereich gemessen werden. Das verwendete Mikrokolorimeter ist ein Thermal Activity Monitor (TAM III) von TA Instruments. Innerhalb dieses Gerätes wird eine sogenannte Perfusionszelle zur Messung oxidativer Selbsterhitzungsprozesse eingesetzt. Dies ermöglicht die Durchströmung der Probe mit Luft während der Messung, um eine ausreichende Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten. Darüber hinaus kann die Probe mit anderen definierten Gasen, z.B. Magerluft mit reduziertem Sauerstoffgehalt, durchströmt werden, um Prozess- oder Lagerbedingungen nachzustellen. Die Ergebnisse mikrokolorischer Messungen der Vitaminmischung und der Sterolmischung werden in Bild 9 dargestellt. Die Vorteile mikrokolorimetrischer Methoden werden in Abschnitt 4 erläutert.

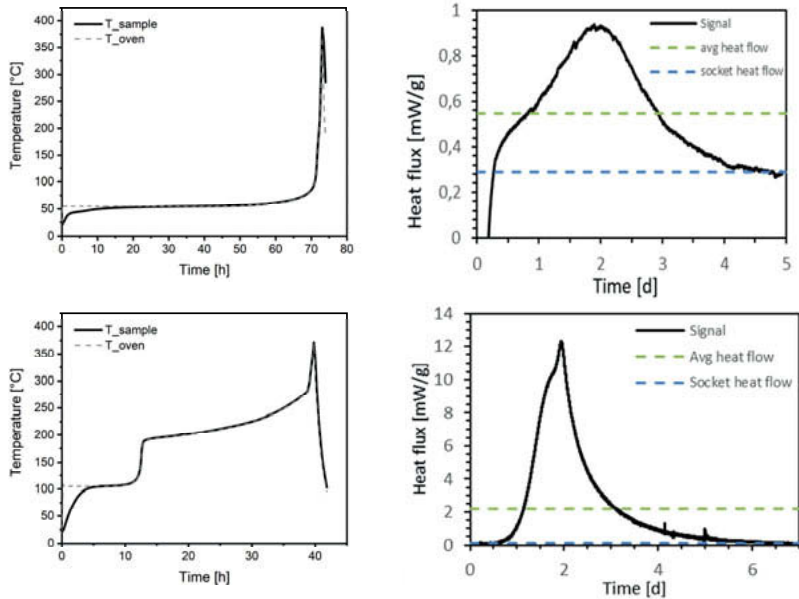


Bild 9: Vitaminmischung: adiabater Warmlagerungsversuch bei einer Anfangstemperatur von 55 °C (oben links) und isotherme TAM-Messung bei 60 °C (oben rechts); Sterolmischung: adiabater Warmlagerungsversuch bei einer Anfangstemperatur von 105 °C (unten links) und isotherme TAM-Messung bei 90 °C (unten rechts)

#### 4. Diskussion

Neben thermoanalytischen Methoden liefern klassische Warmlagerungsversuche in Drahtkörben kinetische Parameter der oxidativen Selbsterhitzungsreaktion. Zur Bestimmung der scheinbaren Aktivierungsenergie wurden adiabate sowie isoperibole Experimente mit unterschiedlichen Probenvolumina durchgeführt. Bei isoperibolen Experimenten wurden beide Modelle, Frank-Kamenetskii (FK) und Thomas (Thom), verwendet. Die mit verschiedenen Experimenten und Berechnungsmethoden ermittelte scheinbare Aktivierungsenergie ist in Tabelle 2 angegeben.



Tabelle 2: Überblick über die scheinbaren Aktivierungsenergien aus verschiedenen Experimenten und Berechnungsmethoden

| Probe                    | $E_a$ Fried-<br>man<br>[kJ/mol] | $E_a$ Ozawa,<br>Flynn, Wall<br>[kJ/mol] | $E_a$ Kissin-<br>ger<br>[kJ/mol] | $E_a$ An-<br>fangs-stei-<br>gung<br>[kJ/mol] | $E_a$ An-<br>adiabat<br>[kJ/mol]           | $E_a$ isoperibol<br>(FK/Thom)<br>[kJ/mol]   |
|--------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|--|--|---|
| Petrolkoks               | n.a.                            | n.a.                                    | n.a.                             | n. a.  | 64-73 <sup>a, 1</sup><br>66 <sup>b</sup>   | 83/72 <sup>a</sup><br>91/85 <sup>a, 2</sup> |
| Vitamin-mi-<br>schung    | 89 ± 5                          | 99 ± 7                                  | 56 ± 4                           | 80 ± 24                                      | 101-118 <sup>a, 1</sup><br>89 <sup>b</sup> | 108/89 <sup>a</sup>                         |
| Polyvinyl-<br>Pyrrolidon | 104 ± 4                         | 101 ± 3                                 | 99 ± 5                           | 150 ± 69                                     | 99 <sup>b</sup>                            | 110/100 <sup>a</sup><br>99/76 <sup>b</sup>  |
| Sterol-Mi-<br>schung     | 72 ± 1                          | 76 ± 9                                  | 74 ± 6                           | 528 ± 157                                    | 61 <sup>b</sup>                            | 62/54 <sup>a</sup><br>60/47 <sup>b</sup>    |

<sup>a</sup> Messungen BAM, <sup>b</sup> Messungen BASF

<sup>1</sup> Ergebnis abhängig von Starttemperatur, Probenvolumen oder beidem

<sup>2</sup> nur Probenvolumen von 10 dm<sup>3</sup> und mehr berücksichtigt

Die Vitaminmischung und die Sterolmischung wurden zusätzlich isotherm im Mikrokalorimeter bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert, siehe Bild 9. In Bild 10 und Bild 11 sind der maximale, der durchschnittliche und der Sockelwärmestrom während der Lagerung gegen die reziproke Probentemperatur zusammen mit dem Wärmestrom aufgetragen, der aus einem in Bild 9 gezeigten adiabaten Warmlagerungsversuch bestimmt wurde. Der Wärmefluss des adiabaten Warmlagerungsversuchs wurde aus dem gemessenen Temperaturgradienten und mit den in Tabelle 1 angegebenen spezifischen Wärmekapazitäten berechnet.

Bei Petrolkoks fällt das exotherme Signal am Ende des Messbereichs bei 500 °C nicht auf die Basislinie zurück, was bedeutet, dass in der Messung nicht die gesamte Reaktion beobachtbar war. Daher sind modellfreie Schätzmethode auf der Grundlage der verfügbaren Daten nicht anwendbar.

Die geschätzten Werte der scheinbaren Aktivierungsenergie für die Vitaminmischung schwanken zwischen 56 kJ/mol und 118 kJ/mol. Die Ergebnisse der Isoumsatzmethoden Friedman und Ozawa, Flynn, Wall sowie die adiabaten und isoperibolen Ergebnisse variieren in einem Bereich von ± 15 kJ/mol. Die Kissinger-Methode und die Methode der Anfangssteigung liefern Ergebnisse, die stärker von der Streuung der oben genannten Methoden abweichen. Die Ergebnisse eines adiabaten Warmlagerungsversuchs und die Ergebnisse mikrokalorischer

Messungen sind in Bild 10 gezeigt. In einem  $\ln \dot{q} - \frac{1}{T}$ -Diagramm ist ein relativ großer Bereich von mehr als einer Größenordnung eines linearen Temperaturgradienten vorhanden. Auf diese Weise kann die scheinbare Aktivierungsenergie mit hoher Sicherheit bestimmt werden, und es scheint, als ob eher eine Reaktion n-ter Ordnung stattfindet. Eine Arrhenius-Extrapolation des gemessenen Temperaturgradienten zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Sockelwärmestrom, der in isothermen mikrokolorimetrischen Experimenten bei 45 °C und 60 °C gemessen wurde.

Im Fall von vernetztem Polyvinyl-Pyrrolidon (PVP) besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den durch die Schätzmethode bestimmten Werten und den in den Warmlagerungsversuchen gemessenen Werten. Obwohl die Reaktion einem autokatalytischen Mechanismus zu folgen scheint, liefern die Schätzmethode sehr gute Vorhersagen über die scheinbare Aktivierungsenergie.

Für die Sterolmischung liefern die Analysen nach Friedman, Ozawa, Flynn, Wall und Kissinger eine gute Übereinstimmung zwischen der scheinbaren Aktivierungsenergie. Die korrekte Interpretation der Messungen ist schwierig, da die Reaktion in mehreren Stufen abläuft und der erste Schritt offensichtlich autokatalytisch aktiviert ist. Dies kann zum Beispiel durch den aufsteilenden Verlauf des Temperaturgradienten in einem  $\ln \dot{q} - \frac{1}{T}$ -Diagramm erkannt werden, siehe Bild 11. In solchen Fällen ist es schwierig, die wahre scheinbare Aktivierungsenergie ohne weitere Untersuchungen zu finden. Dies ist ein gutes Beispiel, bei dem mikrokolorimetrische Experimente wertvolle zusätzliche Informationen liefern. Insbesondere isotherme Messungen bei niedrigeren Temperaturen als solchen, bei denen Wärmeflüsse in adiabaten Warmlagerungsversuchen nachweisbar sind, tragen zur Überprüfung der für die Extrapolation erforderlichen kinetischen Daten bei. Im vorliegenden Beispiel zeigen die mikrokolorimetrischen Ergebnisse bei 75 °C und bei 90 °C in Kombination mit adiabaten Daten eine scheinbare Aktivierungsenergie von 61 kJ/mol. Weitere Untersuchungen werden durchgeführt, um diese Interpretation zu validieren.

Beim Vergleich der modellfreien Schätzmethode ist festzustellen, dass die Bestimmung der Anfangssteigung die schwächste Methode ist. Sie liefert in allen Beispielen eher schlechte Vorhersageergebnisse und die Werte selbst enthalten eine hohe Unsicherheit. Der für die Sterolmischung ermittelte Wert ist mit 528 kJ/mol unrealistisch hoch.

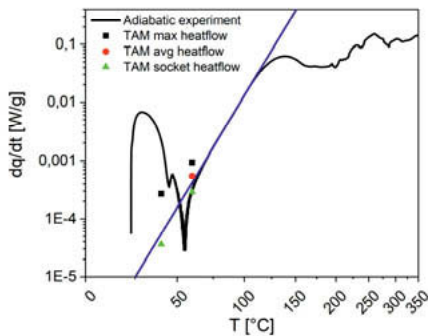


Bild 10: Vitaminmischung A: Ergebnisse des adiabaten Versuchs (Ableitung der T-t-Kurve gemäß Bild 9) und isotherme TAM-Messungen bei 45 °C und 90 °C

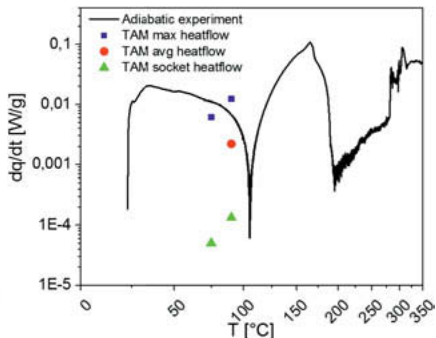


Bild 11: Sterolmischung: Ergebnisse des adiabaten Versuchs (Ableitung der T-t-Kurve gemäß Bild 9) und isotherme TAM-Messungen bei 75 °C und 90 °C

## 5. Zusammenfassung

Die Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von brennbaren Stoffen ist mit einer Vielzahl von Unsicherheiten behaftet. In vielen Fällen ist die Bewertung von Versuchen im Labormaßstab mit Schwierigkeiten verbunden, wenn Materialien bei den verwendeten Probengrößen kein eindeutig zu interpretierendes Zündverhalten zeigen. Auch geben isoperibole Standardversuche häufig keinen Hinweis auf z.B. autokatalytisches Reaktionsverhalten. Versuche im halbertechnischen Maßstab in Kombination mit thermoanalytischen Methoden können dazu beitragen, die Genauigkeit der Extrapolation von Labordaten auf technische Bedingungen zu verbessern bzw. Hinweise zu erhalten, ob diese Extrapolation zulässig ist. Bei den bisher bis zu einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> untersuchten Stoffen haben sich die kritischen Lagertemperaturen technisch relevanter Volumina im Vergleich zu den Extrapolationen aus Versuchen im Labormaßstab zu höheren Werten verschoben.

Modellfreie Schätzverfahren auf der Basis thermoanalytischer Untersuchungen können Warmlagerungsversuche sinnvoll ergänzen. Insbesondere die Methoden nach Friedman und Ozawa, Flynn, Wall zeigen eine gute Übereinstimmung mit den aus Warmlagerungsversuchen ermittelten kinetischen Daten. Diese Methoden eignen sich daher für die überschlägige Abschätzung eines möglichen Risikos der Selbstentzündung.

Die Auswertung adiabatischer Versuche kann mit Schwierigkeiten verbunden sein oder sogar zur Bestimmung kinetischer Daten führen, die das Reaktionsverhalten unter

Prozessbedingungen in nicht geeigneter Weise abbilden, z.B. bei Vorhandensein von Mehrstufenreaktionen oder autokatalytischem Verhalten. Mikrokalorimetrische Untersuchungen ermöglichen die direkte Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen, die im Bereich realer Prozess- bzw. Lagerungstemperaturen liegen. Die Ergebnisse isoperiboler bzw. adiabater Warmlagerungsversuche, die in der Regel bei höheren Temperaturen durchgeführt werden, können so auf ihre Plausibilität überprüft werden.

## Literaturangaben

- [1] prEN15188:2019 Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staub-schüttungen, Beuth Verlag, Berlin
- [2] Schmidt, M., Erdt, R., Gödde, M., Salg, S. und Itemann, L. (2020): Selbstentzündungsverhalten von Feststoffen: Validierung der Extrapolation von Labortests mit Hilfe halotechnischer Versuche bis 1 m<sup>3</sup>.- PTB-Mitteilungen 130(1): 9-18
- [3] Frank-Kamenetskii, D.A. (1969): Diffusion and heat transfer in chemical kinetics.- New York, London, Plenum Press
- [4] Fei F. und Liang D. (2011): Research Progress and Comparison of Methods for Testing Self Ignition Materials.- Procedia Engineering, 11 (2011), pp 91-99
- [5] Fierro, V., et al. (1999): Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles – Experimental results in coal storage yard.- Fuel Processing Techn. 59: 23–34
- [6] Lohrer, C., Schmidt, M. und Krause, U., (2005): A study on the influence of liquid water and water vapour on the self-ignition of lignite coal-experiments and numerical simulations.- Journal of Loss Prevention in the Process Industries 18(3): 167-177
- [7] Krause U., M. Schmidt, C. Lohrer (2006): A numerical model to simulate smouldering fires in bulk materials and dust deposits.- Journal of Loss Prevention in the Process industries 19, pp 218-226
- [8] Ferrero F. et al. (2009): A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles.- Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22, pp 439–448
- [9] Zhu H. et al. (2013): Numerical investigation and theoretical prediction of self-ignition characteristics of coarse coal stockpiles.- Journal of Loss Prevention in the Process Industries 26, pp 236-244
- [10] Everard C. D., M. Schmidt, K. P. McDonnell and J. Finnan (2014): Heating processes during storage of Miscanthus chip piles and numerical simulations to predict self-ignition.- Journal of Loss Prevention in the Process Industries 30, pp 188-196
- [11] Degenkolbe S. und Witt W. (2016): Self-ignition in structured packed columns, fundamentals of methodology development.- Journal of Loss Prevention in the Process Industries 40, pp 437-448
- [12] Wu, D., F. Norman, M. Schmidt, M. Vanierschot, F. Verplaetsen, J. Berghmans and E. Van den Bulck. (2017): Numerical investigation on the self-ignition behaviour of coal dust accumulations: The roles of oxygen, diluent gas and dust volume.- Fuel 188, pp 500-510

- [13] Wu, D., M. Schmidt, J. Berghmans (2019): Spontaneous ignition behaviour of coal dust accumulations: A comparison of extrapolation methods from lab-scale to industrial-scale.- *Proceedings of the Combustion Institute* 37, pp 4181-4191
- [14] Vyazovkin, S., et al. (2011): ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data.- *Thermochimica Acta*, 520(1): p. 1-19.
- [15] Friedman, H.L. (1964): Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic.- *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1964. 6(1 DOI - 10.1002/polc.5070060121): p. 183
- [16] Ozawa, T. (1965): A New Method of Analyzing Thermogravimetric Data.- *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1965. 38(11): p. 1881-1886
- [17] Flynn, J.H. and Wall, L.A. (1966): General treatment of the thermogravimetry of polymers.- *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 1966. 70A (6 DOI - 10.6028/jres.070A.043): p. 487-+
- [18] Kissinger, H.E. (1957): Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis.- *Analytical Chemistry*, 1957. 29(11 DOI - 10.1021/ac60131a045): p. 1702-1706

# Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Befüllvorgänge mit stückigem Schüttgut

## Betrachtung des Staubexplosionsrisikos bei mechanischer Förderung von stückigem, abrasiven Produkts

M.Sc. **Benjamin Schmidt**, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, Mannheim

### Kurzfassung

Im vorliegenden Bericht wird die Messung der Staubkonzentration während der Förderung von stückigem abrasiven Produkts und deren Ergebnisse beschrieben. Diese Messungen sollten eine Antwort auf die Frage liefern, ob bei der Förderung von stückigem Schüttgut staubexplosionsfähige Atmosphären entstehen können und somit die Explosionsschutzmaßnahmen ähnlich aufwendig ausfallen müssen, wie bei Schüttgütern, die aus feinen Partikeln bestehen. In einem Technikumssilo wurden Holzschüttgüter (Holzpellets der Güteklasse EN B und EN plus A1 sowie Holzhackschnitzel der Güteklasse EN plus A1) untersucht. Hierbei kam es zu Konzentrationen in Höhe von bis zu 68 % der UEG. Zudem wurde hier der Einfluss der Förderleistung und des anfänglichen Füllstands untersucht. Hierbei zeigte sich für die Holzhackschnitzel eine geringe Abhängigkeit vom Füllstand. Für die Holzpellets hingegen ließ sich erkennen, dass der Füllstand 0 % (sprich das leere Silo) die höchste Staubkonzentration hervorrief. Förderleistungen von 5 t/h und 14 t/h bedingten bei den Holzpellets niedrigere Staubkonzentration als die standardmäßig verwendeten 10 t/h. Weiterhin wurden Versuche mit Weizen und Gerste im Realmaßstab durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Staubkonzentration bei Weizen unkritische Werte von 36 % der unteren Explosionsgrenze annimmt, wohingegen Gerste die UEG um 35 % überschritt.

### 1. Einleitung

Immer wieder treten in der Industrie Staubexplosionen mit verheerenden Folgen auf. Die Ursachen dieser Explosionen müssen zum Schutze des Arbeitnehmers, der Produktionsanlage, aber auch vorbeugend gegenüber dem Produktionsausfall untersucht werden. Basierend auf diesen Untersuchungen sind präventive Maßnahmen sowohl zur Verhütung, als auch zur Schadensbegrenzung solcher Ereignisse zu treffen. Folgende Kriterien müssen für den Auftritt einer Staubexplosion erfüllt sein:

- Vorliegen einer entsprechenden Atmosphäre aus einem brennbaren Staub im explosionsfähigen Konzentrationsbereich
- Präsenz von Sauerstoff in ausreichend hoher Konzentration
- Ein ausreichend hoher Energieeintrag.

Um Staubexplosionen vorzubeugen, bedarf es lediglich des Ausschlusses eines Explosionskriteriums. Maßnahmen wie Vermeidung der explosionsfähigen Atmosphäre (primärer Explosionsschutz), Vermeidung einer wirksamen Zündquelle (sekundärer Explosionsschutz) oder Minderung der Auswirkung im Explosionsfall durch konstruktive Maßnahmen (tertiärer Explosionsschutz), sind allerdings sehr kostenintensiv und belasten somit die Wirtschaftlichkeit kleinerer produzierender Betriebe. Fraglich ist bisher die Notwendigkeit der Explosionsschutzmaßnahmen in Betrieben, welche sich mit der Produktion von abrasiven, groben Schüttgütern beschäftigen, deren Abrieb in ausreichend hoher Konzentration zur Staubexplosion führen kann. Zu diesen Gütern zählen zum Beispiel Getreide, Holz- sowie Futtermittelpellets und Hackschnitzel. Da der Forschungsstand noch nicht ausreichend hoch ist, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob Explosionsschutzmaßnahmen bei der Handhabung genannter Produkte analog zur rein staubförmigen Produkten getroffen werden müssen, wird durch die FSA ein Forschungsprojekt initiiert, welches die Untersuchung der Staubwolkenentstehung durch Füllvorgänge mit stückigen Produkten thematisiert. Inhalt dieses Projekts war unter anderem die Messung des sich bildenden Staubkonzentrationsprofils, während der Förderung in ein Silo im Technikumsmaßstab. Weiterhin wurden Messungen an Silos unterschiedlicher Größe im Realmaßstab durchgeführt. Ziel ist es, eine Aussage darüber treffen zu können, ob es während der Förderung in das betrachtete Volumen, zu einer Überschreitung der für eine Explosion notwendigen Staubkonzentration (auch untere Explosionsgrenze, kurz UEG) kommt.

## **2. Beschreibung der untersuchten Schüttgüter**

Untersucht wurden die folgenden Schüttgüter:

- Holzpellets der Güteklasse EN plus A1 (Haushaltspellets)
- Holzpellets der Güteklasse EN B (Industriepellets)
- Holzhackschnitzel der Güteklasse EN plus A1
- Weizenkörner
- Gerstenkörner



Grundsätzlich werden diese Schüttgüter in diesem Projekt in einen Grobanteil (Partikel mit einer Korngröße von  $x > 3\text{ mm}$ ) und einen Feinanteil (Abrieb der durch die Mechanische Förderung bzw. den Produktionsprozess entsteht) unterteilt. Da das Zündrisiko nicht von dem Grobanteil ausgeht, sondern vom Feinanteil, wird von diesem die untere Explosionsgrenze bestimmt. Betrachtet werden hierbei die Fraktionen mit  $x < 500\text{ }\mu\text{m}$ . Zur UEG ist weiterhin anzumerken, dass dieser Wert die Höhe der Konzentration angibt, bei der es in dem getesteten Staubkonzentrationspektrum nicht mehr zu einer Explosion kommt.

In Tabelle 1 ist für jedes Produkt die UEG (bestimmt nach [1]) aufgelistet. Da es sich bei den Holzpellets um gepresste Holzspäne handelt, wird zudem für beide Pelletsorten die mechanische Festigkeit aufgeführt.

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Schüttgüter

| Produkt                            | Holzpellets<br>EN plus A1 | Holzpellets<br>EN B | Holzackschnitzel<br>EN plus A1 | Weizen-<br>körner | Braugersten-<br>körner |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------|
| UEG <sup>1)</sup> [g/m³]           | 60                        | 125                 | 30                             | 60                | 60                     |
| Mechanische<br>Festigkeit<br>[m-%] | ≥ 97,5                    | ≥ 96,5              | -                              | -                 | -                      |

<sup>1)</sup>UEG gibt die Konzentration wieder, bei der das Staub-Luft-Gemisch nicht mehr zündet.

### 3. Versuchsaufbau der Staubkonzentrationsmessungen im Technikums- und Realmaßstab

#### 3.1 Versuchsaufbau im Technikumsmaßstab

Die Holzschüttgüter wurden im Technikumsmaßstab untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein Silo mit  $11\text{ m}^3$  Fassungsvermögen mechanisch mit dem Schüttgut befüllt und die sich dabei einstellende Staubkonzentration im inneren des Silos an definierten Messpunkten gemessen. Hierbei werden mit den EN Plus A1 und den EN B Holzpellets Versuche durchgeführt, bei denen der Einfluss des Massenstroms auf das sich ausbreitende Konzentrationsprofil innerhalb des Silos untersucht wird. Dieser wird dabei um  $\pm 50\%$  variiert.

Weitere Untersuchungen werden bezüglich des Einflusses des anfänglichen Füllstands des Silos durchgeführt. Es werden Füllstände von 0%, 9%, 25%, 50% und 75% untersucht. Für diese Untersuchungen wurden die beiden Holzpelletsorten, sowie die Holzhackschnitzel verwendet. Weiterhin werden unter definierten Bedingungen (anfänglich leeres Silo und eine Förderleistung von 10 t/h) die Staubkonzentrationsprofile der drei Holzschüttgüter miteinander verglichen.

Das verwendete Silo verfügt über ein Volumen von  $V_s = 11,04 \text{ m}^3$  und ein Verhältnis der Länge zum Durchmesser von  $L / D = 3,88$ . Im unteren, mittleren und oberen Bereich verfügt die Silowandung über jeweils drei DN 125 Flansche, die radial um  $120^\circ$  versetzt sind. Am Silokopf befindet sich zentral ein DN 250 Flansch, über den die Holzpellets dem Silo zugeführt werden. Hierauf ist ein Fallrohr angeflanscht, welches die Aufgabe hat, den Einfluss des vorgeschalteten Förderaggregats zu mindern. Die mechanische Zuführung der EN B Pellets und der Holzhackschnitzel wurde über einen Elevator realisiert. Für die Förderung der EN plus A1 Pellets wurde sich aus praktikablen Gründen dazu entschieden, eine Förderschnecke zu verwenden. Die Produktvorlage vor dem Förderaggregat erfolgt in Form eines Big Bags mit einem Volumen von  $V_{BB} = 1 \text{ m}^3$ . In der Holzpelletproduktion wird pro Produktionslinie ein Massenstrom von maximal  $m_P = 4 - 5 \text{ t/h}$  erreicht.

Um einen Worst Case abzubilden, wird in der Annahme, dass die Staubkonzentration mit der Förderleistung steigt, den Untersuchungen die doppelte Förderleistung zugrunde gelegt. Somit wird für die Untersuchungen bei denen der Füllstand variiert wird ein konstanter Volumenstrom von  $m_P = 10 \text{ t/h}$  verwendet. In Zusammenhang mit der Produktvorlage von  $V_{BB} = 1 \text{ m}^3$ , was bei einer Schüttdichte von  $\rho_{Sch} = 600 \text{ kg / m}^3$  einer Masse von  $m_P = 600 \text{ kg}$  entspricht, ergibt sich eine Förderzeit von  $t_F = 216 \text{ s}$ .

Gemessen wird der zeitliche Verlauf der sich einstellenden Staubkonzentration mit 6 Staubkonzentrationsmessgeräten SKG 5 Typ 7, welche von der BGN / FSA entwickelt wurden. Diesen nachgeschaltet ist ein Datenlogger, der die Messsignale speichert. Diese werden im Nachhinein mit Tabellenkalkulationsprogrammen ausgewertet. Die 6 Messgeräte werden auf

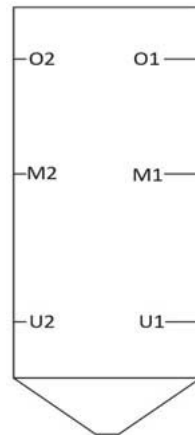


Abbildung: 1 Messstellenskizze des Versuchsaufbaus, Indizes 1: 100 mm Wandabstand, Indizes 2: 400 mm Wandabstand.

die drei Messebenen verteilt, sodass auf jeder Ebene 2 Messgeräte in unterschiedlich radialer Tiefe den lokalen zeitlichen Verlauf der Staubkonzentration messen (siehe Abbildung 1). Die Tiefe der einzelnen Messköpfe, sowie deren Wichtung, wurden nach dem Schwerelinien-Verfahren bestimmt [3,4].

### 3.2 Versuchsaufbau im Realmaßstab

Für Messungen im Realmaßstab wurden Versuche an Silozellen der ZG Raiffeisen in Freistett durchgeführt. Die hierbei betrachteten Schüttgüter waren Weizen- sowie Gerstenkörner. Aus einer Auswahl von Silos wurden Silozellen mit  $30 \text{ m}^3$ ,  $95 \text{ m}^3$  und  $130 \text{ m}^3$  Fassungsvermögen gewählt. Die  $30 \text{ m}^3$  und die  $130 \text{ m}^3$  Zellen waren am Kopf miteinander verbunden. Die  $95 \text{ m}^3$  Zellen verfügten über durchgehende Wände. Die Silos werden über Becherelevatoren und Trogkettenförderer befüllt. Die obere Begrenzung der Silos bildet der Fußboden des nächsten darüber befindlichen Stockwerks, in den die oberen Kontrollluken eingelassen sind (siehe Abbildung 2).

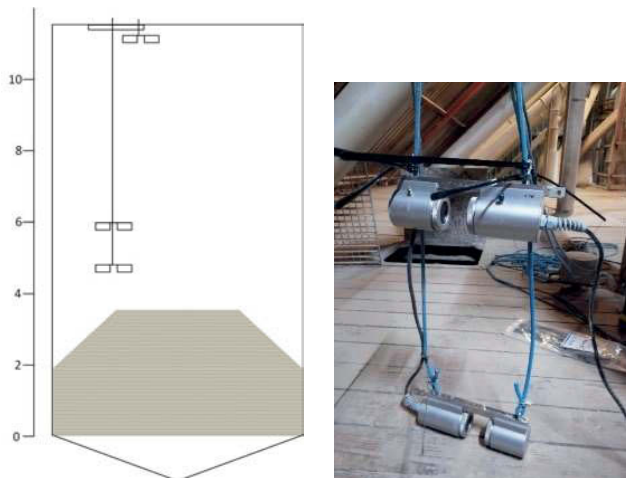


Abbildung 2: Links: Skizze der Messanordnung. Rechts: Vorbereitung der Messköpfe für die Messung am Schüttkegel.

Über diese Kontrollluken wurden die Staubkonzentrationsmessgeräte eingelassen.

Aufgrund der begrenzten Zugangsmöglichkeiten für die Messgeräte wurde hier die Messung am Kopf des Silos und in einem definierten Bereich am sich aufbauenden Schüttkegel durchgeführt. Hierfür wurden die Messköpfe an einem Seil befestigt (wie in Abbildung 2 dargestellt) und in das Silo eingelassen. Anhand des Signals des unteren Messkopfes lässt sich erkennen, wann der Schüttkegel so hoch angewachsen ist, dass die Schüttung den Strahlengang der Messoptik blockiert. Zu diesem Zeitpunkt werden beide Geräte um 2 m nach oben gezogen. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass der definierte Bereich oberhalb des Schüttkegels über die komplette Fülldauer untersucht werden konnte, welche abhängig vom Silovolumen 40, 90 oder 120 Minuten betrug. Die Förderleistung des Becherelevators und des Trogkettenförderers betrug 50 t/h.

## 4. Messergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Versuche im Technikumsmaßstab

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Staubprofile, welche sich durch die unterschiedlichen Holzschüttgüter ausbilden, wenn mit einer Förderleistung von  $m_F = 10 \text{ t/h}$  in das leere Silo gefördert wird. Hierbei ist pro Messstelle jeweils die mittlere lokale Staubkonzentration aufgetragen.

Bei den Haushaltspellets zeigt sich, dass die Staubkonzentration, unabhängig vom Messort, recht niedrig ist. Lokal wurde die maximale mittlere Staubkonzentration im unteren Bereich in Wandnähe gemessen. Diese beträgt  $\bar{c}_{\max} = 22 \text{ g/m}^3$ . Sie verringert sich in Richtung Silozentrum. Auf der mittleren Ebene ist ebenfalls eine Verringerung der Staubkonzentration von der Silowandung in Richtung Silozentrum zu erkennen. Allerdings ist auf beiden Ebenen der Konzentrationsabfall zur Silomitte hin nicht sehr stark ausgeprägt. Im oberen Bereich lässt sich kein Einfluss des Messortes auf die Höhe der Staubkonzentration feststellen.

Die Industriepellets hingegen weisen auf allen Messebenen eine höhere Staubkonzentration als die Haushaltspellets auf. Auch hier wurde das lokale Maximum der Staubkonzentration in der untersten Ebene in der Nähe der Wand gemessen. Diese beträgt  $\bar{c}_{\max} = 86 \text{ g/m}^3$ . Es lässt sich erkennen, dass die Staubkonzentration von der Wand zum Zentrum hin abnimmt. Für die mittlere und die obere Messebene zeigt sich, dass die Staubkonzentration von der Wand zur Silomitte hin zunimmt. Dieser Anstieg ist auf der obersten Ebene am stärksten zu erkennen. Bei den Holzhackschnitzeln ähnelt das sich bildende Staubkonzentrationsprofil qualitativ den Ergebnissen der Industriepellets. Auf der untersten Ebene fällt die Konzentration zur

Silomitte hin ab, auch wenn dieser Abfall nicht sehr signifikant ist. Auf der mittleren und oberen Messebene steigt sie zur Silomitte hin wieder an. Die höchste Staubkonzentration wurde auf

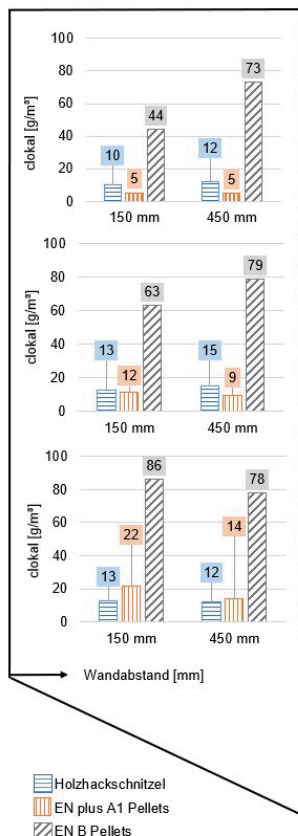


Abbildung 3: Staubkonzentrationsprofil im Technikumssilo bei der Untersuchung der Holzhack-schnitzel, EN plus A1- und EN B Holzpellets

der mittleren Ebene im Bereich der Silomitte gemessen und betrug  $\bar{c}_{\text{max}} = 15 \text{ g/m}^3$ . Die Ergebnisse dieser Versuchssituation sind quantitativ exemplarisch für alle mit Holzpellets und Hackschnitzeln durchgeführten Versuche. Von daher wird bei dem Einfluss der Förderleistung und des Füllstands, der qualitative Lauf betrachtet.

Um den Einfluss der Förderleistung auf das sich bildende Staubkonzentrationsprofil zu untersuchen, wurden die beiden Holzpelletsorten sowohl mit reduzierter, als auch mit erhöhter Förderleistung von 5 t/h und 14 t/h in das leere Silo gefördert. Die Staubkonzentration in Abhängigkeit zur Förderleistung ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei ist über die jeweilige Förderleistung die maximale Konzentration bezogen auf die mittlere Konzentration aller Förderleistungen aufgetragen. Somit lässt sich darstellen, wie die Staubkonzentration von der mittleren Staubkonzentration abweicht.

Es ist für beide Pelletsorten zu erkennen, dass sich die Staubkonzentration im Silo bei einer Verringerung der Förderleistung von  $m_p = 10 \text{ t/h}$  auf  $m_p = 5 \text{ t/h}$  ebenfalls verringert. Bei den Haushaltspellets stellt sich eine Verringerung auf 48 % der mittleren Konzentration ein. Die Industriepellets liegen mit 77 % ebenfalls in einem niedrigeren Bereich als bei der ursprünglichen

Förderleistung von 10 t/h. Bei dieser Förderleistung ist für die EN B Pellets eine leicht höhere Abweichung zum Konzentrationsmittel zu erkennen, sodass die Konzentration den Mittelwert

um 48 % übersteigt. Ebenfalls höher ist Konzentration die durch die Haushaltspellets bedingt ist und 127 % vom Mittel beträgt.

Mit einer Erhöhung der Förderleistung auf 14 t/h ergibt sich für beide Pelletsorten keine weitere Erhöhung der maximalen Staubkonzentration. Die Werte für die Haushaltspellets stagnieren bei einem Wert von 124 %. Die Staubkonzentration der Industriepellets hingegen reduziert sich auf 74 %. Somit scheint für diese Silogeometrie eine Förderleistung zu existieren, oberhalb der die Staubkonzentration nicht weiter zunimmt.

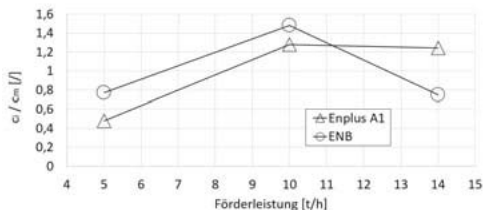


Abbildung 4: Staubkonzentration in Abhängigkeit zur Förderleistung

In Abbildung 5 ist die Abhängigkeit der Staubkonzentration im Silo vom Füllstand zu erkennen. Hierbei wurde die über das gesamte Silo gemittelte Staubkonzentration auf die mittlere Staubkonzentration aller Füllstandsversuche genormt.

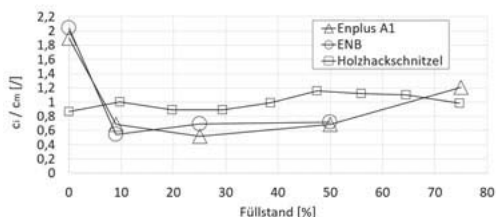


Abbildung 5: Staubkonzentration in Abhängigkeit zum Füllstand

Der Füllstand mit 75 % wurde nur mit Industrieholzpellets und den Holzackschnitzeln untersucht, da die hierfür benötigte Menge an Haushaltspellets nicht vorlag. Für die Holzpellets ist zu entnehmen, dass unabhängig von der Pelletart die Staubkonzentration bei Förderung ins leere Silo die höchsten Werte annimmt (Faktor 2). Dies ist mit der Beschaffenheit der Pellets zu begründen. Durch den Aufprall auf den Silokonius werden die Holzpellets stärker mechanisch belastet, als wenn sie auf einen bereits ausgebildeten Schüttkegel fallen.

Hierdurch splittern Holzpartikel und -späne ab, da es sich bei den Pellets ja nur um gepresste Agglomerate handelt.

Bei Füllung des Silos verringert sich die mittlere Staubkonzentration auf etwa 54 % (EN B) bzw. 69 % (EN plus A1). Auf einem ähnlichen Niveau verharrt die Staubkonzentration bei weiterer Füllung. Zu dem Füllstand von 50 % hin steigt die Konzentration leicht an (auf 68 % bei EN B und 71 % bei EN Plus A1 Pellets) und zu 75 % hin nimmt sie noch einmal höhere Werte für die EN B Pellets an (Faktor 1,2).

Die Ergebnisse der Versuche mit Holzhackschnitzeln zeigen, dass die Staubkonzentration schwach bis zu einem Füllstand von 47 % auf 110 % ansteigt und mit weiterer Füllung wieder auf 98 % sinkt.

#### 4.2 Ergebnisse der Versuche im Realmaßstab

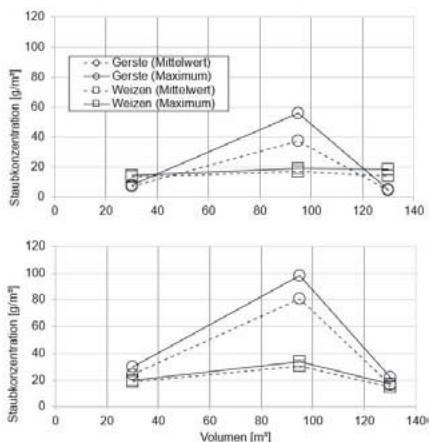


Abbildung 6: Staubkonzentration am Kopf (oben) sowie am Schüttkegel (unten) für die Silogrößen 30 m³, 95 m³ und 130 m³

In Abbildung 6 sind die mittlere maximale Staubkonzentration sowie die höchsten Staubkonzentrationsmesswerte für die Messungen am Silokopf und am Schüttkegel in den Silozellen mit 30, 95 und 130 m³ zu sehen.

Für die Messergebnisse am Silokopf des 30 m³ Silos zeigt sich, dass die mittlere Staubkonzentration bei Gerste mit  $\bar{c}_{\max} = 7 \text{ g/m}^3$  und bei Weizen mit  $\bar{c}_{\max} = 13 \text{ g/m}^3$  recht niedrige Werte annimmt. Am Schüttkegel des 30 m³ Silos wurden höhere Ergebnisse verzeichnet. Hier beträgt die mittlere

Staubkonzentration für Gerste  $\bar{c}_{\max} = 24 \text{ g/m}^3$  und für Weizen  $\bar{c}_{\max} = 19 \text{ g/m}^3$ .

Am 95 m³ Silo ergibt sich am Silokopf bei der Messung mit Gerste eine mittlere Staubkonzentration von  $\bar{c}_{\max} = 37 \text{ g/m}^3$ . Durch die Befüllung mit Weizen wurden lediglich  $\bar{c}_{\max} = 17 \text{ g/m}^3$  verzeichnet. Am Schüttkegel hingegen wurden für Gerste im Mittel

$\bar{c}_{\max} = 81 \text{ g/m}^3$  gemessen. Die Staubkonzentration welche durch den Weizen bedingt war nahm zwar ebenfalls größere Werte an, allerdings nicht in dem Maßstab wie die der Gerste. Hier kam es zu einer mittleren Konzentration von  $\bar{c}_{\max} = 31 \text{ g/m}^3$ .

Die Staubkonzentration im  $130 \text{ m}^3$  Silo nahm am Kopf bei Gerste einen Wert von  $\bar{c}_{\max} = 5 \text{ g/m}^3$  an. Bei Weizen ergaben sich  $\bar{c}_{\max} = 14 \text{ g/m}^3$ . Am Schüttkegel ließen sich mittlere Staubkonzentrationen von  $16 \text{ g/m}^3$  für Gerste und  $\bar{c}_{\max} = 15 \text{ g/m}^3$  für Weizen messen. Die Tatsache, dass sich die Staubkonzentrationen für die  $30 \text{ m}^3$  und  $130 \text{ m}^3$  Silos in einem eher niedrigeren Niveau befinden, ist in einer ersten Überlegung darauf zurückzuführen, dass die Silos, wie bereits erwähnt, am Kopf miteinander verbunden waren.

## 5. Zusammenfassung und Fazit

Die durchgeführten Versuche hatten das Ziel, die Frage zu beantworten, ob die sich einstellende Staubwolke, welche sich während der mechanischen Förderung von stückigem Schüttgut in ein Silo hinein entwickelt, ein Staubexplosionsrisiko darstellt.

Es zeigte sich, dass bei der Untersuchung der Holzschüttgüter im Technikumsmaßstab die Holzpellets der Güteklasse EN B Plus ein Vielfaches der Staubkonzentration der Haushaltspellets und der Holzhackschnitzel hervorriefen. Außerdem nahm im Realmaßstab die Staubkonzentration die durch die Förderung von Gerste bedingt war die kritischsten Werte an. Nachfolgend wird, unabhängig vom Messort, die höchste mittlere Konzentration für jedes Schüttgut der entsprechenden unteren Explosionsgrenze gegenübergestellt.

| Produkt                             | Holzpellets<br>EN plus A1 | Holzpellets<br>EN B | Holzhackschnitzel<br>EN plus A1 | Weizen-<br>körner | Braugersten-<br>körner |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------|
| UEG [ $\text{g/m}^3$ ]              | 60                        | 125                 | 30                              | 60                | 60                     |
| $\bar{c}_{\max}$ [ $\text{g/m}^3$ ] | 22                        | 86                  | 15                              | 31                | 81                     |
| $\bar{c}_{\max} / \text{UEG}$ [/]   | 0,36                      | 0,68                | 0,50                            | 0,51              | 1,35                   |

Es ist zu erkennen, dass die mittlere Staubkonzentration nur in einem Fall unter 50 % der UEG blieb. Die niedrigste Konzentration wurde bei der Verwendung von Haushaltspellets festgestellt (36 % der UEG). Die Holzhackschnitzel und die Weizenkörner bedingten beide eine Staubkonzentration im Bereich von 50 % der UEG. Erhöhte Werte wurden bei den Holzpellets der Klasse EN B festgestellt. Hier erreichte die Konzentration 68 % der UEG. Eine



Überschreitung der unteren Explosionsgrenze wurde bei den Braugerstekörnern verzeichnet. Hier lag die Staubkonzentration sogar um 35 % über der UEG.

Um nun die Frage zu beantworten, ob es bei der Förderung von stückigen Schüttgütern zur Bildung von explosionsfähiger Atmosphäre kommen kann:

Für die Holzschüttgüter und die Weizenkörner kann dies klar verneint werden. Im Fall der Braugerste gilt es etwas genauer hinzuschauen. Da die Konzentration für die Bestimmung der UEG von  $500 \text{ g/m}^3$  beginnend immer weiter reduziert wird, bis die Staubwolke nicht mehr zündet, liegt für Braugerste der letzte Wert, bei dem es noch zu einer Zündung kam, bei  $125 \text{ g/m}^3$ , also bei mehr als dem zweifachen Wert der UEG. Somit entsteht bei einer Konzentration von 135% der UEG ein Grenzfall. Zumal diese Konzentration auch nur lokal am Schüttkegel verzeichnet wurde und nicht im gesamten Silo.

- [1] DIN EN 14034-3: 2011-04, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] VDI / VDE 2640, Blatt 1: Netzabmessungen in Strömungsquerschnitten. Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [3] VDI / VDE 2640, Blatt 3: Netzabmessungen in Strömungsquerschnitten. Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

# Simulation von Staubverteilung und Turbulenz während der pneumatischen Befüllung von Silos

Dr. rer. nat. **Jan-Niklas Tödt**, FSA e.V., Mannheim

## Kurzfassung

Es wird ein numerisches Modell für die Beschreibung der axialen pneumatischen Befüllung von Silos vorgestellt. Mittels einer bestehenden experimentellen Studie zur Befüllung eines  $11 \text{ m}^3$  Silos wird die Simulation des Befüllungsvorgangs in diesem Silo validiert. Darüber hinaus wird die Befüllung eines  $114 \text{ m}^3$  Silos simuliert.

## 1. Einleitung

Zur Dimensionierung von Explosionsentlastungsflächen bei Silos stellt die EN 14491 mehrere Formelsätze zur Verfügung. Neben einer allgemein verwendbaren Formel, die den schlimmstmöglichen Fall einer, für die den Ablauf einer Staubexplosion idealen und homogenen Staubkonzentration beschreibt, sind auch Formeln speziell für die axiale und tangential Silobefüllung hinterlegt. Diese Unterscheidung beruht maßgeblich auf der Tatsache, dass sich bei der Silobefüllung eine inhomogene Konzentrationsverteilung im Silo einstellt und somit nur in einem begrenzten Anteil des Silovolumens ideale Bedingungen für eine Staubexplosion vorliegen können. Aufgrund der geringen Datenlage hinsichtlich der Staubverteilung und des Explosionsablaufs bei größeren Silos ist der Formelsatz für die axiale Befüllung - auf die wir uns hier beschränken werden – beschränkt auf Silos mit einem Volumen kleiner als  $250 \text{ m}^3$ . Kenntnis über die Konzentrationsverteilung in Großsilos würde eine präzisere Auslegung der nötigen Entlastungsflächen für diese ermöglichen.

Im hier vorgestellten Projekt wurde ein numerisches Modell zur Simulation der axialen pneumatischen Befüllung entwickelt, um Vorhersagen über Staubkonzentrationsverteilung und Turbulenzstärke in Großsilos treffen zu können. Es werden Simulationen zur Befüllung eines  $11 \text{ m}^3$  Silos gezeigt und das Modell wird mit Hilfe bereits vorhandener Messungen der Staubkonzentration und Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Silo validiert. Letztlich wird die Simulation der axialen Befüllung eines  $114 \text{ m}^3$  Silo vorgestellt und aufgezeigt, dass sich in diesem Fall eine stark inhomogene Konzentrationsverteilung einstellt.

## 2. Numerisches Verfahren

Im folgenden Absatz wird das Simulationsmodell kurz zusammengefasst. Die Simulationen der Mehrphasenströmung wurden mit dem frei verfügbaren Softwarepaket openFoam erstellt [2,3].

Da die Strömungsverhältnisse während der pneumatischen Befüllung stark turbulent sind, ist die Verwendung eines Turbulenzmodelles unerlässlich. Es wird ein Modell [4] aus der Klasse der Large-Eddy-Simulations (LES) verwendet. In diesem Ansatz werden Turbulenzen unterhalb einer definierten Größengrenze modelliert, während größere Wirbel in der Simulation direkt erfasst werden.

Die Trajektorien der Staubpartikel werden nach der Multiphase Particle-in-Cell (MP-PIC) Methode bestimmt [5]. Hierbei handelt es sich um ein Modell mit 4-Wege-Kopplung, dies bedeutet, dass der Einfluss des Fluids auf die Partikel, der Einfluss der Partikel auf das Fluid, sowie Partikelstöße berücksichtigt werden. Letztere werden durch einen statistischen Ansatz beschrieben [6,7]. Zwecks Reduktion des Rechenaufwandes werden die Einzelpartikel in Partikelpäckchen der Größenordnung von  $10^4$  bis  $10^5$  Partikeln gleicher Eigenschaften zusammengefasst und die Trajektorien der resultierenden Päckchen numerisch bestimmt.

Als simulierter Staub wurde hier die Maisstärke gewählt. Maisstärke zählt zu den wichtigsten Brennstoffen für Staubexplosionsversuche und bildet, durch ihren geringen mittleren Partikeldurchmesser von ca.  $15\text{ }\mu\text{m}$  bedingt, verhältnismäßig homogen verteilte Staubwolken.

Um gegebenenfalls auftretende Sedimentationserscheinungen erfassen zu können, wurde die Größenverteilung der simulierten Partikel auf eine experimentell gemessene Größenverteilung monodisperser Maisstärke eingestellt. Agglomerationseffekte werden im Sinne einer Worst-Case Betrachtung nicht berücksichtigt. Bei Auftreffen eines Partikelpäckchens auf die Silowand wird das Päckchen als an der Wand haftend betrachtet und an der Auftretsstelle fixiert.

## 3. Validierung des Modells mittels Messungen in einem $11\text{ m}^3$ Silo

Zur Validierung der Simulationen werden bereits erhobene Messdaten der axialen pneumatischen Befüllung eines  $11\text{ m}^3$  Silos verwendet. Die Messungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes Mitte der 1990er Jahre erhoben [1]. Der Vergleich der hier erstellten Mo-

dellvorhersagen mit den Messdaten soll dazu dienen, die Genauigkeit der Simulationen zu bestimmen.

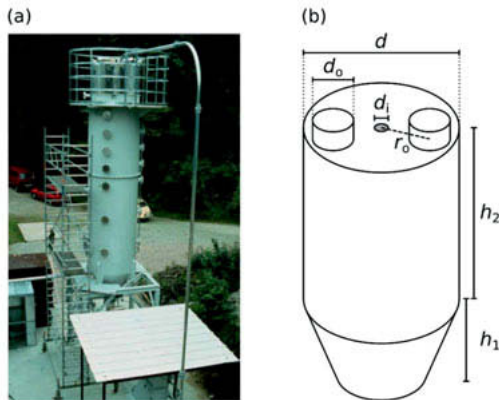


Bild 1: (a) 11 m³ Silo während der Messkampagne. (b) Skizze des Silos und seiner Maße.

In Bild 2 (a) ist das 11 m³ Silo während der Messkampagne dargestellt. Ein zentral angebrachtes Rohr, mit einem Innendurchmesser  $d_i = 75$  mm, war mit einem Gebläse und einer Zellradschleuse verbunden. Aus dem Rohr strömte in das Silo ein Maisstärke-Luft Gemisch mit der Eingangsgeschwindigkeit  $u_0 = 23$  m/s. Da in der Messkampagne gezeigt werden konnte, dass relative Staubverteilung und Strömungsfeld bei Beladungen von  $c_0 > 1$  kg/m³ näherungsweise konstant bleiben, wird im Folgenden die Beladung  $c_0 = 1$  kg/m³ betrachtet. Bild 2 (b) zeigt eine nicht maßstabsgerechte Skizze des Silos mit Definition der Silodimensionen. Die Maße des Silos sind in Tabelle 1 hinterlegt. An den Silowänden waren in verschiedenen Höhen je drei Flansche angebracht, die das Einführen von Messgeräten an Lanzen in das Silo ermöglichten. Dies ermöglichte das orts aufgelöste Vermessen von Strömung und Staubkonzentration im Silo.

Tabelle 1: Maße des simulierten 11 m³ Silos

|       |        |
|-------|--------|
| $h_1$ | 0,8 m  |
| $h_2$ | 5,0 m  |
| $d$   | 1,6 m  |
| $d_i$ | 75 mm  |
| $d_0$ | 0,25 m |
| $r_0$ | 0,5 m  |

Die Silogeometrie wurde für die Simulation am Rechner nacherstellt und ein ca. 4,3 Mio. Zellen umfassendes Simulationsnetz erstellt. Bild 3 zeigt die Zeitentwicklung der Staubausbreitung in den ersten vier Sekunden der pneumatischen Befüllung. Zunächst breitet sich der Staub in Form eines runden frei Strahls Richtung Siloboden aus. Dabei wird der Strahl, dominiert von turbulenten Verwirbelungen, im oberen Silobereich breiter. Im unteren Silobereich treten Staubpartikel in die aufwärts strömende Kehrströmung ein und bilden eine, sich aufwärts bewegende, Staubwolke. Nach etwa 3 Sekunden treffen die ersten einzelnen Partikel auf die Silowand und bleiben an ihr haften. Nach 4 Sekunden sind sowohl Befüllungsstrahl als auch aufsteigende Staubpartikel, getragen von der Kehrströmung, klar erkennbar. Da die Geschwindigkeit der Kehrströmung deutlich höher ist als die Sinkgeschwindigkeit der Partikel, breitet sich der Staub im gesamten Silo aus.

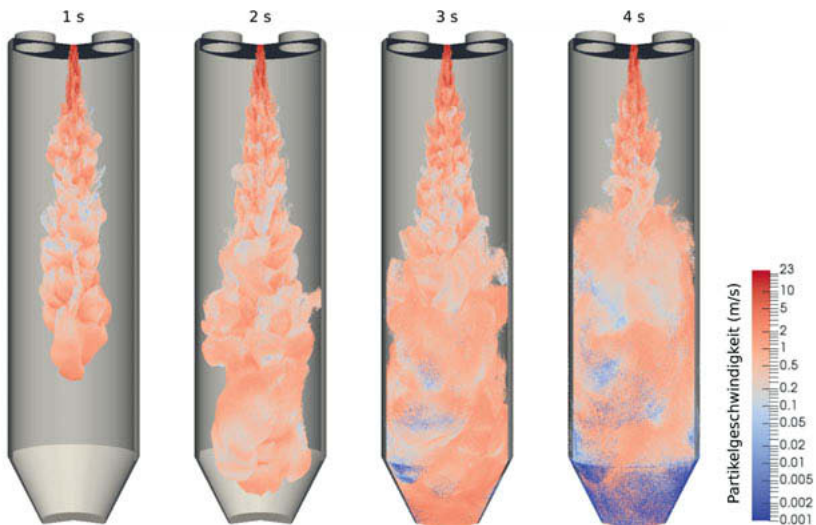


Bild 2: Entwicklung der Staubverteilung innerhalb der ersten vier Sekunden der pneumatischen Befüllung. Die Partikelfärbung zeigt die Partikelgeschwindigkeit an.

In Bild 4 ist ein zentraler Schnitt durch das Silo zum Zeitpunkt  $t = 20$  s nach Befüllungsbeginn dargestellt. Aufgetragen sind die instantane Staubkonzentration  $c$ , die Staubkonzentration mittlere Staubkonzentration  $\bar{c}$ , gemittelt über einen Zeitraum  $\Delta t = 5$  s, sowie der Betrag der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit  $|\mathbf{u}_{\text{RMS}}|$ . In Bild 4 (a) & (b) zeigt sich die Trennung

von einem Strahlbereich in der Silomitte und einem umgebenden Kehrströmungsbereich, der Staubpartikel Richtung Silodach trägt. Im Kehrströmungsbereich ist die vorhergesagte Staubkonzentration relativ konstant in horizontaler Richtung, während sich ein vertikaler Gradient einstellt. Die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit ist, wie erwartet, im Bereich des Strahles am stärksten und im Kehrströmungsbereich deutlich geringer.

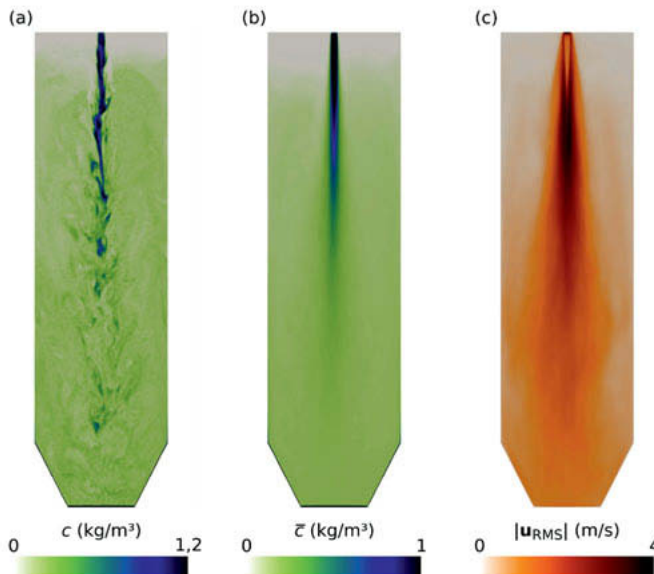


Bild 3: Schnitt durch das 11 m<sup>3</sup> Silo 20 s nach Beginn der pneumatischen Befüllung.

(a) Instantane Staubkonzentration. (b) Mittlere Staubkonzentration. (c) Turbulente Schwankungsgeschwindigkeit  $|u_{RMS}|$ .

Bild 5 zeigt einen Vergleich zwischen den numerisch ermittelten und den experimentell gemessenen mittleren Staubkonzentrationen. Aufgetragen sind vier vertikale Verläufe in unterschiedlichem Abstand zur Silomitte. Im Vergleich zu den Messdaten zeigt sich insgesamt eine Überschätzung der Staubkonzentration, dies ist im Einklang mit der getroffenen Worst-Case Bedingung der Monodispersität. Insbesondere zur Silowand hin, fällt die gemessene Staubkonzentration unter die Vorhersage. Eine wahrscheinliche Ursache sind elektrostatische Effekte, die zur verstärkten Anlagerung von Partikeln an die Wand führen. Im erstellten Modell werden elektrostatische Effekte vernachlässigt. Im oberen Silobereich kommt es bei  $r=0,2\text{m}$  zu einer leichten Unterschätzung der Staubkonzentration.

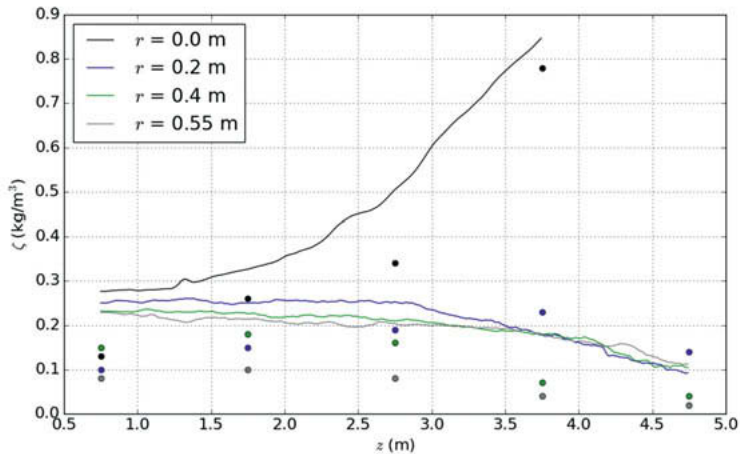


Bild 4: Simulierte mittlere Staubkonzentration 30 s nach Beginn der pneumatischen axialen Befüllung eines 11 m³ Silos. Gezeigt sind vier vertikale Konzentrationsverläufe, wobei bei  $r=0$  der Silomitte entspricht.

#### 4. Staubverteilung und Turbulenz in einem 114 m³ Silo

Das Modell wurde auf ein, einem real existierenden Silo nachempfundenen, 114 m³ Silo übertragen. Das Simulationsnetz umfasste hier ca. 8,3 Mio. Zellen. Die Konzentration der zugeführten Maisstärke beträgt weiterhin  $c_0 = 1 \text{ kg/m}^3$  und wird mit  $u_0 = 23 \text{ m/s}$  durch ein zentrales Rohr mit Innendurchmesser  $r_i = 120 \text{ mm}$  eingebracht. Die Abmessungen des Silos sind, der in Bild 1 angegebenen Definition folgend, in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Maße des simulierten 114 m³ Silos

|       |        |
|-------|--------|
| $h_1$ | 1,9 m  |
| $h_2$ | 9,0 m  |
| $d$   | 3,8 m  |
| $d_i$ | 120 mm |
| $d_o$ | 0,5 m  |
| $r_o$ | 1,35 m |



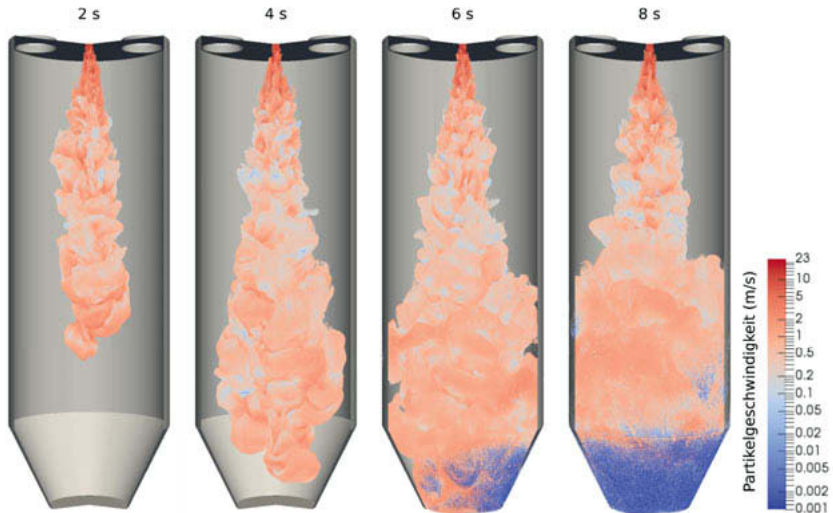


Bild 5: Entwicklung der Staubverteilung im 114 m<sup>3</sup> Silo innerhalb der ersten acht Sekunden der pneumatischen Befüllung. Die Partikelfärbung zeigt die Partikelgeschwindigkeit an.

In Bild 5 ist die Zeitentwicklung der Staubverteilung im 114 m<sup>3</sup> Silo während der ersten acht Sekunden der Befüllung gezeigt. Qualitativ betrachtet ist der Verlauf dem im 11 m<sup>3</sup> Silo ähnlich. Zunächst propagiert die Maisstärke strahlförmig zum Siloboden. Der Strahl wird durch turbulente Verwirbelungen aufgefächert. Ab ca.  $t=6$  s treffen die ersten Partikel auf die Silowand im unteren Silobereich auf und, von der Kehrströmung getragen, steigen im äußeren Bereich Staubpartikel Richtung Silodach auf.

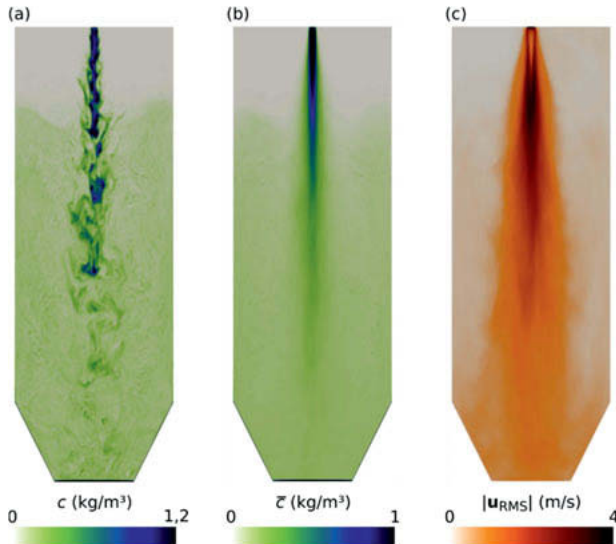


Bild 6: Schnitt durch das 114 m<sup>3</sup> Silo 30 s nach Beginn der pneumatischen Befüllung.  
 (a) Instantane Staubkonzentration. (b) Mittlere Staubkonzentration. (c) Turbulente Schwankungsgeschwindigkeit  $|u_{RMS}|$ .

In Bild 6 ist ein zentraler Schnitt durch das Silo nach  $t = 30$  s pneumatischer Befüllung dargestellt. Bei der Betrachtung der Staubkonzentrationsverteilung zeigen sich einige Unterschiede im Vergleich zum 11 m<sup>3</sup> Silo. Um die Strahlregion herum bildet sich eine Zone verringerter Staubkonzentration. Zur Silowand hin steigt die Staubkonzentration an. Darüber hinaus ist die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit außerhalb des Strahlbereiches deutlich geringer als im Falle des kleineren Silos. Der Blick auf die vertikale Verteilung der Staubkonzentration in Bild 7 zeigt im Bereich außerhalb des Befüllungsstrahls bis  $z = 6$  m einen konstanten Abfall der Staubkonzentration. In den oberen Silosbereich hat sich zu diesem Zeitpunkt der Staub noch nicht ausgebreitet.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Staubkonzentrationsverteilung im 114 m<sup>3</sup> Silo, verglichen mit dem kleineren Silo, inhomogener ausfällt und die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit in einem großen Bereich des Silos niedriger ist. Die Situation im 114 m<sup>3</sup> Silo ist somit dem Worst-Case Szenario im Sinne der EN 14491 unähnlicher als dies bereits im 11 m<sup>3</sup> der Fall ist.

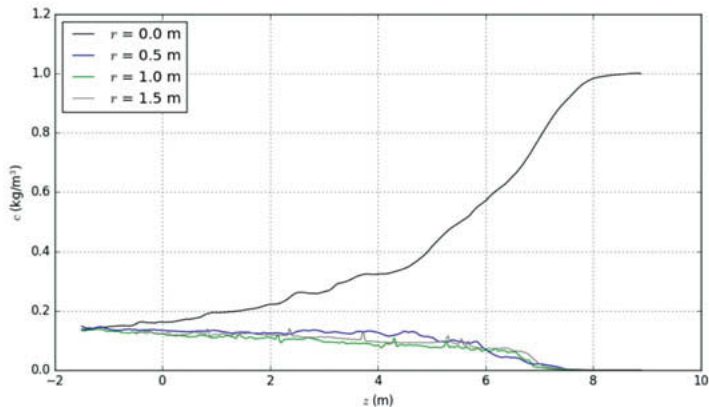


Bild 7: Simulierte mittlere Staubkonzentration 30 s nach Beginn der pneumatischen axialen Befüllung eines 114 m³ Silos. Gezeigt sind 4 vertikale Konzentrationsverläufe, wobei  $r=0$  der Silomitte entspricht.

## 5. Zusammenfassung

Ein Modell für die Vorhersage der Staubkonzentration bei der pneumatischen axialen Befüllung von Silos wurde entwickelt und anhand vorherig aufgenommener Messungen an einem 11 m³ Silo validiert. Das Modell liefert eine Worst-Case Abschätzung der Staubkonzentration. Die Anwendung des Modelles auf ein 114 m³ zeigt eine stärkere Inhomogenität der Staubkonzentration und geringere Turbulenzen auf; die Situation ist im hinsichtlich des Ablaufes einer Staubexplosion unkritischer, als dies im kleineren Silo der Fall ist.

- [1] Hauert F. et. al. (1996): Staubverteilung und Geschwindigkeitsparameter in einem pneumatisch befüllten Silo mit numerischen Simulationen – VDI-Berichte 1272, Mannheim
- [2] Weller H.G. & Tabor G. (1998): A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in Physics 12, 620
- [3] <https://openfoam.org>
- [4] Yoshizawa A. (1986): Statistical Theory for Compressible Turbulent Shear Flows with the Application to Subgrid Modelling, Physics of Fluids 29 (7), 2152-2164
- [5] Snider D.M. (2001): An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows, Journal of Computational Physics 170, 523-549
- [6] O'Rourke P.J & Snider D.M. (2010): An Improved Collision Damping Time for MP-PIC Calculations of Dense Particle Flows with Applications to Polydisperse Sedimenting Beds and Colliding Particle Jets, Chemical Engineering Science 65, 6014-6028
- [7] O'Rourke P.J & Snider D.M. (2012): Inclusion of Collisional Return-to-Istropy in the MP-PIC Method, Chemical Engineering Science 80, 39-54

## **Staubverteilung in Silos – Ergebnisse von Messungen in Großsilos**

## **Dust distribution in silo's – results from concentration measurements in large silo's**

Ir. **Ake Harmanny**, ISMA, Kontich, Belgien

### **Kurzfassung**

Realmessungen der explosionsfähige Staub-Luft Gemische in Großsilos.

- Messungen bei Getreidesilos während Befüllung
- Einfluss von: Zeit, Messtiefe, Art von Getreide, Füllmengen und Absaugung
- Präsentation und Diskussion der Messergebnisse
- Aussagen für die Praxis bei der Zoneneinteilung

### **Abstract**

Measurement of potential dust explosion hazardous concentrations in large silo's.

- Measurements in grain silo's during filling
- Effect of: time, depth of measurement, type of grain, mass flow and extraction
- Presentation und discussion of results
- Practical consequences for zoning
- 

### **1. Einleitung**

Wenn Getreidesilos gefüllt werden, bilden sich dichte Staubwolken. Daher wird häufig angenommen, dass dann ständig ein explosionsfähiges Gemisch vorhanden ist. In ATEX Sprache: eine Zone 20 Situation.

Eine Zone 20 Situation führt dann dazu, dass diese Silos konstruktiven Explosionsschutz brauchen: typisch Druckentlastung (zusammen mit Entkopplung). Gemäß ATEX Richtlinien kann auf Explosionsschutz nur verzichtet werden, wenn nachgewiesen ist dass alle potenziellen Zündquellen im Silo mit nahezu 100% Sicherheit ausgeschlossen sind, was in der Praxis oft unmöglich ist. Für bestehende Silos ist eine Nachrüstung mit Druckentlastung oft schwierig oder sogar unmöglich. Es ist daher wichtig, ein korrektes Bild der Staubkonzentrationen in Großsilos zu erhalten.

In der Vergangenheit war ISMA an Forschungsprogrammen mit Staubkonzentrationen in Getreidesilos beteiligt. Die Ergebnisse wurden bis jetzt nicht veröffentlicht. Weil solche Daten auch heute noch immer hilfreich sind werden die Ergebnisse hier vorgestellt und diskutiert.

**Wichtig:** *alle Messungen betreffen Getreidesilos, ohne integrierten Filter, die im freien Fall (über Elevator) befüllt wurden mit nicht gereinigtem (also staubigem) Getreide. Die Ergebnisse dürfen nicht für andere Silos verwendet werden: in einem Silo, das pneumatisch mit Mehl befüllt wird sind, während der Füllung, viel höhere Staubkonzentrationen zu erwarten.*

Die Konzentrationsmessungen wurden mit einem Testgerät entwickelt von der FSA durchgeführt. Das Gerät besteht aus einer Lichtquelle und einem lichtempfindlichen Empfänger. Die Lichtabsorption zwischen Quelle und Empfänger ist Maß für die Staubkonzentration. Zur Kalibrierung des Gerätes wurden nachher, im Labor, Staubproben aus dem bezogenen Silo entnommen, aufgewirbelt in bekannten Konzentrationen. Vorteil dieser Messmethode im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, bei denen Luftmuster aus dem Silo angesaugt werden, ist, dass diese Messmethode die Staubkonzentration im Silo nicht beeinflusst.

## 2. Phase 1

Es wurde vorher angenommen, dass beim Befüllen eines Getreidesilos wahrscheinlich ein explosionsfähiges Gemisch vorhanden ist. Zweck der Messungen war hauptsächlich Informationen zu erhalten über die auftretenden Konzentrationen in Abhängigkeit von Zeit und Ort.

Die Tests in Phase 1 wurden mit Gerste (die erfahrungsgemäß sehr staubig ist) und ohne Absaugung am Silo durchgeführt.

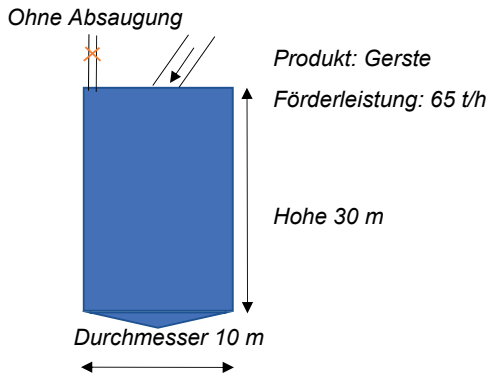


Bild 1: Situation Phase 1

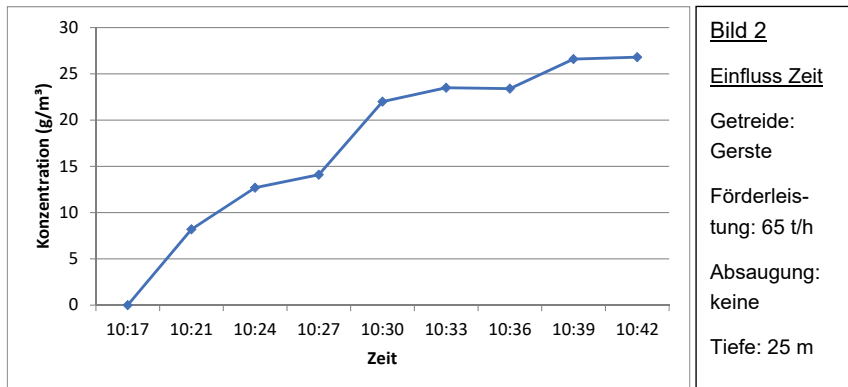
### Visuelle Beobachtungen

Unmittelbar nach dem Beginn des Befüllens sieht man als Beobachter eine „Säule“ Produkt die im Silo scheinbar „steht“: die Bewegungen individueller Partikel sind nicht direkt erkennbar. Da das Getreide aber tatsächlich fällt, gibt es eine große Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Luft und Getreidepartikel. Diese Geschwindigkeitsdifferenz führt dazu dass Luft sich mit hoher Geschwindigkeit entlang der „Säule“ bewegt und Staub aus der Oberfläche der „Säule“ herauszieht. Dies führt zu einer Staubwolke: zunächst nur um den „Säule“ herum, dann aber nach kurzer Zeit dehnt sich die Staubwolke aus, bis sie schließlich das gesamte Silo füllt. Die „Säule“ ist dann schon lange nicht mehr sichtbar.

### Staubkonzentration: zeitliche Abhängigkeit (Bild 2)

Zuerst wurde die Staubkonzentration in einer Tiefe von 25 m gemessen, sofort nach Beginn der Füllung.

*Bemerkung: Die Tiefe ist hier immer der Abstand gemessen von der Oberseite des Silos (= die Länge vom Seil, womit das Messgerät hinuntergelassen wurde). Eine Tiefe von 25 m (in einem 30 m hohen Silo) bedeutet also 5 m über dem Boden des Silos.*



Die Staubkonzentration steigt langsam an: nach etwa 20 Minuten wurde eine Gleichgewichtssituation erreicht von 27 g/m³.

### **Staubkonzentration: Variation über die Tiefe (Bild 3)**

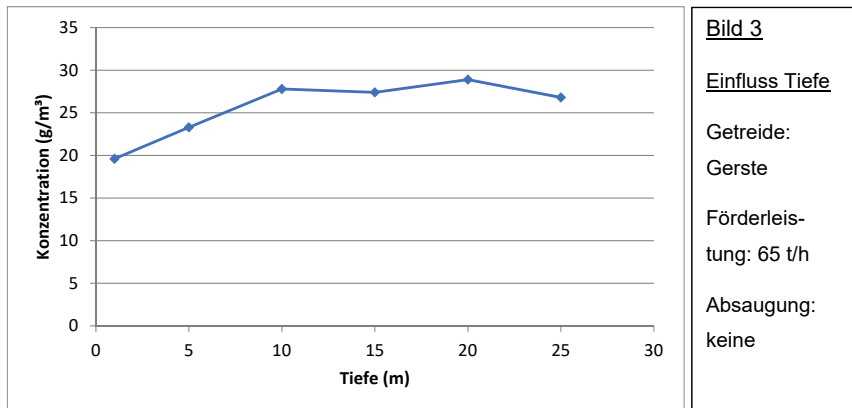
Nachdem diese Situation erreicht war, wurde das Messgerät langsam hochgezogen und wurden die Staubkonzentrationen in verschiedenen Tiefen gemessen.

Aus Bild 3 ist klar, dass die Staubkonzentration über fast die ganze Tiefe nahezu konstant ist. Nur ganz oben (Tiefe weniger als 10 m) ist die Konzentration etwas niedriger.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurde entschieden keine Messungen in unterschiedlichen Abständen von der Wand durch zu führen (wie ursprünglich beabsichtigt war): es sind nur geringe Abweichungen zu erwarten.

Zum Vergleich: im Jahr 2015 sind bei FSA Staubbmessungen durchgeführt in einem Silo (Durchmesser 1,6 m, Höhe etwa 6 m) während der Befüllung mit Holzpellets, Referenz [1]. Da wurden, auf mehreren Ebenen, Staubkonzentrationen gemessen auf 0,1 und 0,4 m von der Wand. Konzentrationen waren auch hier meistens in der gleichen Größenordnung, nur im oberen Bereich waren die Konzentrationen in der Nähe von der Wand etwa 50 % niedriger als bei 0,4 m Distanz.





### Schlussfolgerungen aus Phase 1

Die höchst gemessene Staubkonzentration beträgt ca. 30 g/m³. Dies ist erheblich weniger als die untere Explosionsgrenze (UEG) von Gerstenstaub: 125 g/m³.

*Daumen-Regel: es gibt ein explosionsfähiges Gemisch, wenn die Sichtbarkeit in der Wolke weniger als 1 m beträgt (die Hand am gestreckten Arm ist nicht sichtbar). Dies wurde getestet, indem das Messgerät so weit in das Silo abgesenkt wurde, bis es nicht mehr sichtbar war. Dies war der Fall, in einer Tiefe von etwa 3 m, so dass die Sichtbarkeit in die Staubwolke ca. 3 m war. Dieses bestätigt eine Staubkonzentration unter der UEG.*

### 3. Phase 2

Auf der Grundlage vorheriger Ergebnisse, wobei die Staubkonzentration immer weit unter der UEG blieb, stellten sich folgende Fragen:

- Gilt dieses Ergebnis auch für andere Getreidearten?
- Wie groß ist der Einfluss der Förderleistung: Bilden sich bei höheren Leistungen explosionsfähige Gemische?
- Welchen Einfluss hat eine Absaugung während der Befüllung: wird die Staubkonzentration dadurch (erheblich) reduziert (wie oft angenommen)?

Daher wurde entschieden in einer zweiten Testrunde, dass diese Einflüsse weiter untersucht wurden.

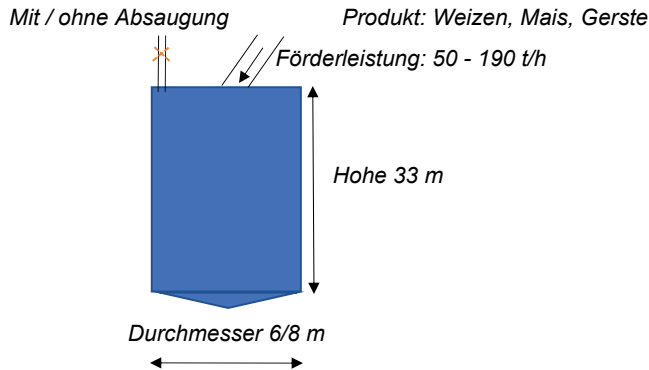
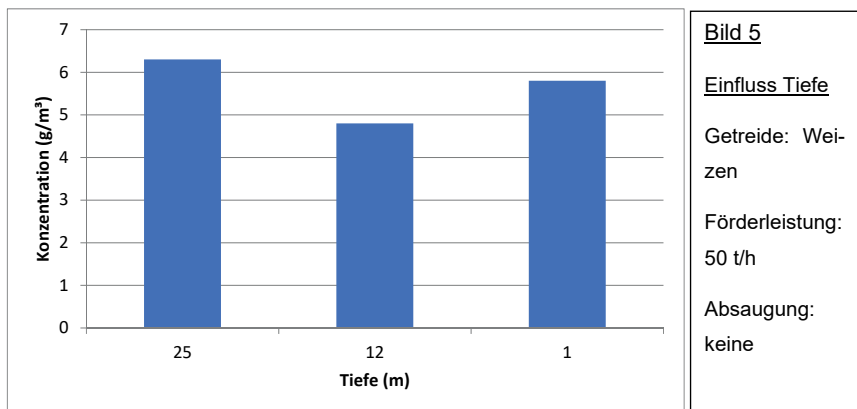
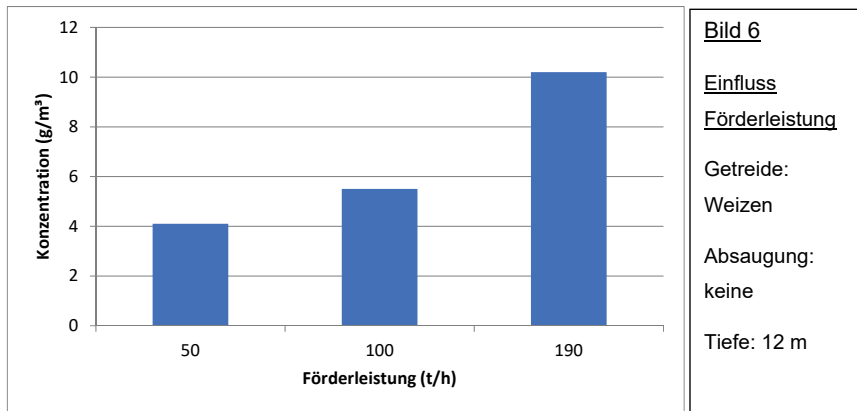


Bild 4: Situation Phase 2

**Staubkonzentration: Variation über die Höhe (Bild 5)**

Die Ergebnisse für Weizen, mit einer ähnlichen Rate wie vorher für Gerste (50 t/h im Vergleich zu 65 t/h) in unterschiedlichen Tiefen gemessen, zeigen, dass die Staubkonzentrationen viel niedriger sind: Weizen ist eindeutig viel weniger „staubig“ als Gerste. Die Ergebnisse stellen eine größere (relative) Variation über die Höhe da, aber in absolutem Wert, sind die Unterschiede ähnlich wie bei Gerste.

**Staubkonzentration: Variation der Förderleistung (Bild 6)**

Es ist klar, dass die Staubkonzentration mit der Leistung zunimmt, jedoch nicht proportional. Basierend auf den vorherigen visuellen Beobachtungen (der „Säule“) lautet die Begründung wie folgt:

- Wenn sich die Förderleistung erhöht, ändert die Fallgeschwindigkeit vom Getreide sich nicht. Wenn davon ausgegangen wird, dass sich auch die Dichte im „Säule“ nicht erhöht, muss das Volumen der „Säule“ proportional zur Förderleistung zunehmen. Also: Wenn sich die Förderleistung um den Faktor  $F$  erhöht, erhöht sich der Durchmesser der „Säule“ um den Faktor  $\sqrt{F}$ .
- Die Oberfläche der „Säule“ nimmt daher mit  $\sqrt{F}$  zu.
- Weil der Luftstrom Staub aus der Oberfläche der „Säule“ zieht sollte dann auch die Staubkonzentration mit  $\sqrt{F}$  zunehmen.

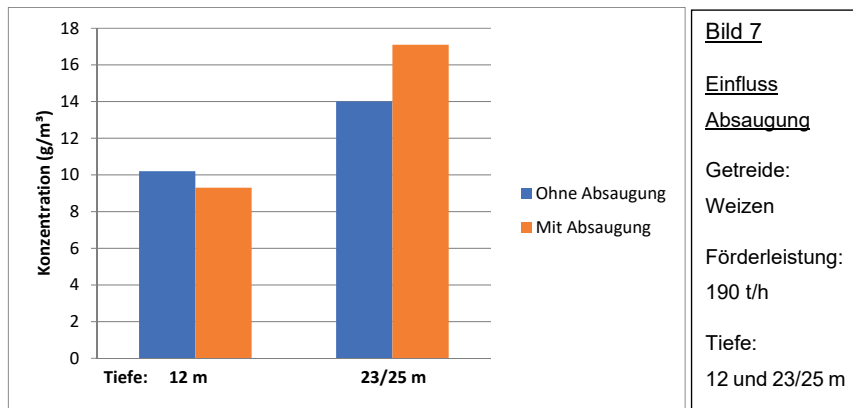
Dies wurde gegen die Messungen getestet. Ausgehend von 4,1 g/m³ bei 50 t/h, erfolgt:

- bei 100 t/h eine Konzentration von 5,8 g/m³ (gemessen: 5,5 g/m³)
- und bei 190 t/h eine Konzentration von 8,0 g/m³ (gemessen: 10,2 g/m³)

Wenn die zuvor beobachteten Variationen berücksichtigt werden, erscheint die Abschätzung angemessen. Um mehr Sicherheit zu erhalten, wurde eine zusätzliche Messung mit Gerste bei einer hohen Förderleistung durchgeführt: 180 t/h. Ausgehend von einer Konzentration von 27 g/m³ bei 65 t/h (in Phase 1) folgt dann eine Konzentration von 45 g/m³ (gemessen: 41 g/m³).

Folgerung: die gemessenen Werte entsprechen nahezu den auf diese Weise berechneten Werten.

### Staubkonzentration: Einfluss der Absaugung (Bild 7)



Die Ergebnisse zeigen, dass die Staubkonzentration mit Absaugung wenig abnimmt. In größeren Tiefen (23 /25 m) erhöht sich die Konzentration sogar. Eine mögliche Ursache ist die Tatsache dass hier die Messungen direkt oberhalb des gelagerten Produkts genommen wurden: gerade über das Produkt ist eine höhere Konzentration zu erwarten (Staubentwicklung durch Aufschlag vom Produkt). Eine kleine Änderung in der Distanz (von 25 auf 23 m Tiefe<sup>1</sup>) könnte deswegen ein großer Unterschied in der Konzentration geben. Aber auch in anderen Getreidearten und auf anderen Arten wurde oft festgestellt, dass, durch Absaugung, die Konzentration zunimmt. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch die Absaugung ein vertikaler Luftstrom erzeugt wird, so dass Staub länger schwebt.

Das Absaugen an einem Silo soll hauptsächlich einen leichten Unterdruck aufrechterhalten und dadurch das Austreten von Staub verhindern. Zumindest bei diesen Silos trägt die Absaugung jedoch kaum zu einer Verringerung der Staubkonzentration im Silo bei.

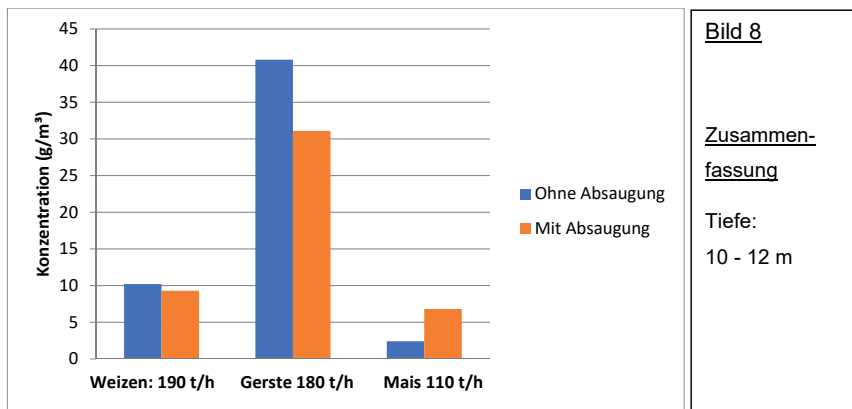
<sup>1</sup> Diese Änderung war notwendig, weil bei der zweiten Messung (mit Absaugung) ein Tiefe von 25 m schon unter Produktebene war.

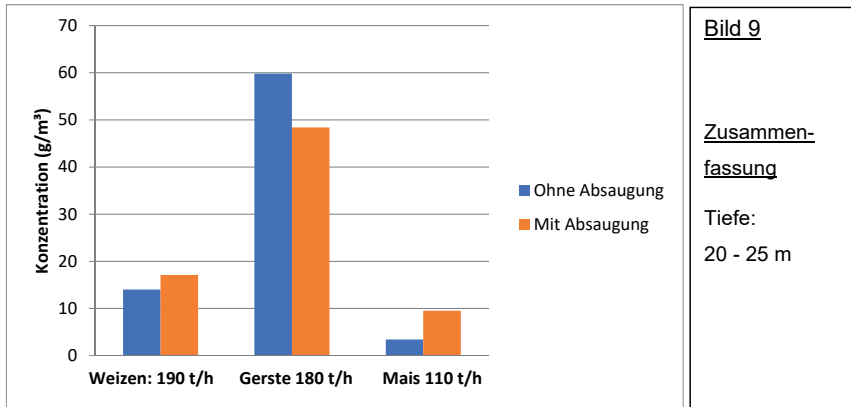
### **Staubkonzentration: Ablagerung**

Um zu bestimmen, wie schnell die Staubkonzentration abnimmt durch Ablagerung wurde, im Test mit 50 t/h von Weizen, um eine Konzentration von  $4,1 \text{ g/m}^3$  bei 12 m Tiefe, die Messung wiederholt 16 Minuten nach beenden des Befüllens. Ergebnis:  $2 \text{ g/m}^3$ .

*Zum Vergleich: auch Schmidt hat, mit Holzpellets, Staubkonzentrationsmessungen wiederholt nach beenden der Befüllung. Seine Messergebnisse zeigen eine „Halbwertszeit“ in der Größenordnung von einer Minute. Weil Staubpartikel mit einer konstanten Geschwindigkeit hinunter schweben, ist zu erwarten das diese „Halbwertszeit“ direkt proportionell zu der (freien) Höhe ist. Diese Höhe war, bei den Getreideversuchen, etwa das 5 fache von der Höhe bei Holzpellets. Bei identischem Produkt sollte deswegen im Getreidesilo die „Halbwertszeit“ etwa 5 Minuten betragen, und keine 16 Minuten. Also, offensichtlich enthält Weizen viel mehr Feinstaub als Holzpellets: deswegen niedrige Fallgeschwindigkeit und längere „Halbwertszeit“.*

### **Staubkonzentrationen, Zusammenfassung: Einfluss von Getreideart und Absaugung (Bild 8 und 9)**





In diese Abbildungen werden die gemessenen Staubkonzentrationen (unter möglichst gleichen Bedingungen) der verschiedenen Getreide sowohl mit als auch ohne Absaugung verglichen. Es stellt sich heraus, dass Gerste bei weitem die höchsten Staubkonzentrationen aufweist: die Werte für Weizen sind viel geringer, die für Mais sogar noch etwas niedriger. Insbesondere bei Mais scheint die Absaugung einen großen Einfluss zu haben und mit Absaugung steigt die Staubkonzentration erheblich an.

#### 4. Diskussion

Auf der Grundlage vorliegender Ergebnisse könnte entschieden werden, dass das Risiko einer Staubexplosion in einem Getreidesilo während des Befüllens sehr gering ist, eben wenn eine Zündquelle vorhanden wäre. Dies widerspricht jedoch der Praxis. In der Vergangenheit sind sicherlich viele Staubexplosionen in Getreidesilos aufgetreten.

Obwohl es nicht möglich war, alle diese Explosionen erneut zu untersuchen, besteht der starke Eindruck, dass es sich zumindest in den meisten Situationen um sogenannte Sekundärexplosionen handelte. Die Explosion beginnt woanders, zum Beispiel im Elevator. Aus der Forschung an Elevatoren (die zur Veröffentlichung von CEN/TR 16829:2016 führte) ist bekannt, dass in solchen Elevatoren hohe Staubkonzentrationen auftreten. Wenn der Elevator mit einem Silo verbunden ist, kann die Explosion in Richtung Silo weiter gehen. Infolge der Explosion im Elevator wird bereits ein Teil des Staubes vom Elevator in das Silo hineingeblasen. Der Luftstrom und die Vibrationen sorgen auch dafür, dass Staubablagerungen im Silo (gegen Wand und Dach) aufgewirbelt werden. Wenn die Flamme im Silo ankommt, ist aufgrund dieser

Effekte inzwischen eine viel höhere Staubkonzentration entstanden. Auf diese Weise kann eine Explosion in einem Elevator zu einer (sekundären) Explosion in einem Silo führen.

Wenn also in der Vorstufe ausreichende Maßnahmen getroffen werden, wie z. B. am Elevator, um dort eine Explosion zu verhindern, und wenn eine Explosion auftritt, die Ausbreitung zu den Silos zu verhindern (z. B. durch Verwendung einer Zellenradschleuse), wird die Möglichkeit von einer Explosion in einem solchen Getreidesilo tatsächlich sehr klein!

## 5. Literatur

- [1] Schmidt, B.W.L. (2015): Untersuchung des Staubwolkenentstehens durch Befüllvorgänge mit Holzpellets. Masterarbeit Hochschule Mannheim und FSA, F-05-1401.

## 6. Anhang: Staubfraktion und Korngrößenverteilung

Von allen verwendeten Getreiden wurde die Staubfraktion ermittelt (gesiebt < 500 µm).

Von dem Stäuben wurde die Korngrößenverteilung ermittelt. Wichtig: bei Gerste Phase 1, wurde hier vorabgesiebt auf < 1 mm!

Tabelle 1: Staubfraktion und Korngrößenverteilung

| Getreide         | Staubfraktion<br>(Gewichts %) | Korngrößenverteilung (Gewichts %) |          |          |         |         |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------|----------|---------|---------|
|                  |                               | < 500 µm                          | < 250 µm | < 125 µm | < 63 µm | < 32 µm |
| Gerste (Phase 1) | 0,125                         | 78,5                              | 60,9     | 49,6     | 28,9    | 17,6    |
| Gerste (Phase 2) | 0,14                          | 91                                | 46,2     | 30       | 22,6    | 18,7    |
| Weizen           | 0,066                         | 99                                | 80,9     | 64,8     | 55,4    | 49,2    |
| Mais             | 0,11                          | 99,8                              | 86,6     | 78,3     | 71,7    | 62,2    |





## **Die Kombination der Schutzmaßnahmen Explosionsdruckentlastung und Explosionsentkopplung – weitere Forschungsergebnisse zu den beobachteten Effekten**

### **The combination of the explosion protective measures venting and explosion isolation – further research results on the effects observed**

Dipl.-Ing. **Peter Schepp**, **Ulrike Faißt**, M.Sc., FSA GmbH, Mannheim

#### **Kurzfassung**

Wie vor einiger Zeit von FSA in Explosionsversuchen erstmalig beobachtet, können Explosionsentkopplungs-Systeme, die mit druckentlasteten Behältern verbunden sind, Einfluss auf den Explosionsablauf in diesen Behältern nehmen, und zwar dergestalt, dass teilweise erheblich höhere reduzierte Explosionsüberdrücke im Behälter entstehen, als es nach sachgerechter Auslegung der Druckentlastung zu erwarten wäre. Derartige Verstärkungseffekte waren zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt und sind auch in den einschlägigen Europäischen harmonisierten Normen zur Auslegung und Dimensionierung der Schutzmaßen "Druckentlastung" und "Explosionsentkopplung" nicht berücksichtigt. Das daraus resultierende Risiko veranlasste FSA dazu, ein umfangreiches Forschungsprojekt aufzulegen, das dazu beitragen soll, das beobachtete Phänomen besser zu verstehen und Algorithmen zu erarbeiten, die es erlauben, die auftretenden Effekte besser zu berücksichtigen.

Präsentiert werden hier aktuelle Ergebnisse aus dem laufenden Forschungsprojekt zunächst rein phänomenologisch. Die Beschreibung weitergehender Analysen der gewonnenen Daten würde den hier gegebenen Rahmen sprengen. Allerdings werden in der Zusammenfassung auch Hypothesen vorgestellt, die auf detaillierteren Auswertungen beruhen.

#### **Abstract**

Some time ago FSA observed for the first time in explosion tests, that explosion isolation systems connected to vented vessels can influence the explosion course in the vessels in such a way, that in some cases considerably higher reduced explosion overpressures occur in the vessels than would be expected after adequate design of the venting. Such amplification effects were not known at that time and are also not considered in the relevant European harmonised standards for the design and dimensioning of the protective measures "explosion

venting" and "explosion isolation". The resulting risk motivated FSA to launch a comprehensive research project which is to contribute to a better understanding of the observed phenomenon and to develop algorithms which allow a better consideration of the occurring effects. Here, current results from the running research project are presented, initially on a purely phenomenological basis. The description of further analysis of the data collected would go beyond the scope of this paper. However, the summary also presents hypotheses based on more detailed evaluations.

## 1. Einleitung

Zu den bewährten und weit verbreiteten Schutzmaßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zählen die Explosionsdruckentlastung und die Explosionsentkopplung. Erstere schützt nicht explosionsfeste Behälter wie z. B. Silos, Trockner oder Filter durch die Reduzierung des im Falle einer Explosion im Gehäuse entstehenden Überdrucks auf ein der Gehäusesfestigkeit angepasstes Maß. Dies geschieht durch die kontrollierte Freisetzung von brennendem und unverbranntem Material sowie der Verbrennungsprodukte über Entlastungsöffnungen, die sich im Explosionsfall bei Überschreitung eines definierten Ansprechdrucks öffnen. Explosionsentkopplungs-Systeme dienen dazu, die Übertragung einer Explosion vom Entstehungsort über Rohrleitungen oder Kanäle in andere Bereiche der Anlage zu verhindern. Ziel kann dabei sein, sowohl die Druckwelle als auch die Flammenfront aufzuhalten, häufig genügt es aber auch schon, nur die Flammenübertragung und damit das Risiko einer energiereichen Flammenstrahlzündung in nachfolgenden Anlagenteilen zu verhindern.

Beide Schutzmaßnahmen werden in der Regel als autonome Schutzsysteme vertrieben und installiert und sind zunächst einmal unabhängig voneinander. In den einschlägigen harmonisierten europäischen Normen [1 bis 4] sind Verfahren und Kriterien beschrieben, mit Hilfe derer in einer EU-Baumusterprüfung der Nachweis geführt werden kann, dass die Anforderungen der ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU erfüllt werden und die geprüften Geräte die gewünschte Funktionalität aufweisen. Nach erfolgreicher Baumusterprüfung steht der Verwendung dieser Schutzsysteme nichts mehr im Wege, und zwar auch in jeder beliebigen Kombination – im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung, versteht sich. Naheliegenderweise finden sich häufig Szenarien, in welchen die beiden Schutzmaßnahmen in Kombination eingesetzt werden.

In der Praxis kann eine derartige Kombination allerdings unerwartete Nebenwirkungen haben. Bei Versuchen mit Explosionsentkopplungs-Systemen, die über eine Rohrleitung mit einem druckentlasteten Behälter verbunden waren, wurde beobachtet, dass sich das System völlig anders verhält, als es die bekannten Eigenschaften der Einzelkomponenten erwarten ließen:

Der im druckentlasteten Explosionsbehälter auftretende reduzierte Explosionsüberdruck nahm erheblich höhere Werte an, sobald eine Explosionsentkopplungseinrichtung (hier eine Rückschlagklappe) über eine Rohrleitung mit dem Behälter verbunden war. Bild 1 zeigt beispielhaft den Vergleich der zeitlichen Druckverläufe eines derartigen Versuchs. Zusammen aufgetragen sind die Verläufe der reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter für die drei Fälle:

- druckentlasteter Behälter ohne Rohrleitung,
- druckentlasteter Behälter mit Rohrleitung und offenem Rohrleitungsende,
- druckentlasteter Behälter mit Rohrleitung und Rückschlagklappe.

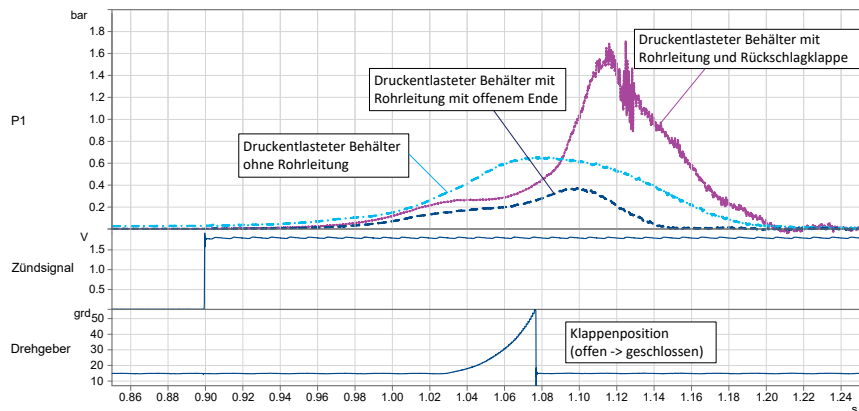


Bild 1: Beispielhafte Druck/Zeit-Kurven der gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter (10 m<sup>3</sup>-Explosionsbehälter + Rohrleitung DN 800 der Länge 6 m)

P1 ist das Signal des Drucksensors im unteren Drittel des Prüfbehälters, das Sprungsignal der Zündspannung gibt den Zeitpunkt an, zu dem die Explosion startet. Ebenfalls aufgetragen ist ein Drehgebersignal, welches die Klappenstellung signalisiert.

Wegen der Bedeutung der bei diesen Versuchen erstmals beobachteten Phänomene für die Praxis wurde im Jahr 2015 ein Forschungsprojekt aufgelegt mit dem Ziel, die Einflussparameter für diese Effekte zu identifizieren und im Experiment auf ihre Wirkung zu untersuchen. Dazu zählen u. a. geometrische Parameter, Produkt- und Prozessparameter sowie gerätespezifische Parameter. Die mit Hilfe umfangreicher explosionstechnischer Untersuchungen gewonnenen Daten sollen dazu dienen, die beobachteten Phänomene besser zu verstehen und - im besten Falle - Algorithmen zu erarbeiten, die es erlauben, die auftretenden Effekte besser zu berücksichtigen.

Inzwischen wurde über den Fortgang der Untersuchungen und auch über erste Erklärungsversuche bereits mehrfach berichtet [5 bis 8]. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Untersuchungen vorgestellt.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

Der Aufwand für explosionstechnische Untersuchungen im Großmaßstab ist erheblich. Deshalb ist es unabdingbar, die Zahl der Versuche auf das notwendige Maß zu beschränken, was jedoch nicht zu Lasten der Qualität der Ergebnisse gehen darf. Derartige Versuche unterscheiden sich von Versuchen im Labormaßstab auch dahingehend, dass ihre Reproduzierbarkeit in der Regel erheblich schlechter ist. Es muss daher immer ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Anspruch auf statistische Absicherung der Ergebnisse und dem vertretbaren Aufwand. Aufgrund der Vielzahl der identifizierten Einflussparameter ist die Gesamtzahl durchgeführter Versuche trotzdem bereits auf ca. 450 angewachsen, wobei Versuche zur Ermittlung der explosionstechnischen Kennzahlen der verwendeten Stäube nicht berücksichtigt sind.

Der prinzipielle Versuchsaufbau bestand immer aus einem druckentlasteten Explosionsbehälter, einer damit verbundenen Rohrleitung und einer Entkopplungseinrichtung am Ende dieser Rohrleitung, Bild 2. Dabei waren der Rohrdurchmesser und die Konzentration des brennbaren Staubes im Explosionsbehälter zum Zündzeitpunkt die einzigen Konstanten über alle Versuche.

Variiert wurden:

- der Typ der Entkopplungseinrichtung (EE1: Klappenprinzip, EE2: Axialventil),
- das Volumen des Explosionsbehälters ( $26 \text{ m}^3 / 9,6 \text{ m}^3 / 5 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^3$ ),
- die Behältergeometrie ( $L/D = 1,0 / 1,5 / 1,8$ ),
- der Entstehungsort der Explosion im Behälter = Zündort (Behältermitte bzw. nahe Rohrleitungseintritt),
- die Position der Rohrleitung relativ zum Zündort und zur Druckentlastungsöffnung (Zündort auf Höhe der Rohrleitung, Zündort zwischen Rohrleitung und Druckentlastungsöffnung, Rohrleitung und Druckentlastungsfläche auf der gleichen Seite relativ zum Zündort; Bild 3),
- die Einbauabstände der Entkopplungseinrichtungen ( $3 \text{ m} / 4,5 \text{ m} / 6 \text{ m}$ , in einer Versuchsreihe  $10 \text{ m}$ ),
- die Explosionscharakteristika der Stäube ( $p_{\max}$ ,  $K_{St}$  / MZE),
- das Niveau des reduzierten Explosionsüberdrucks.

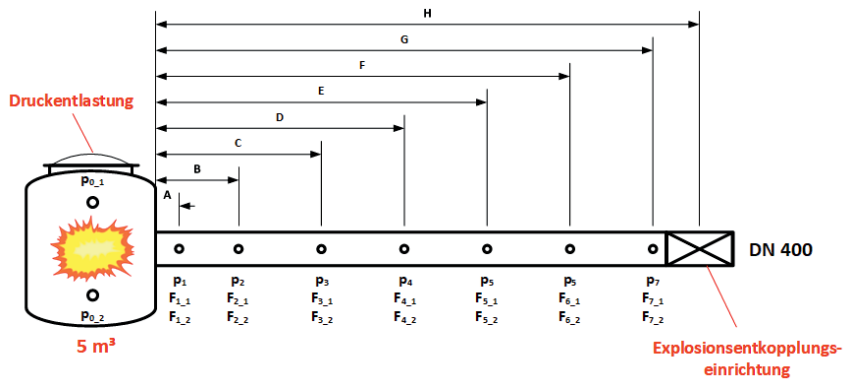
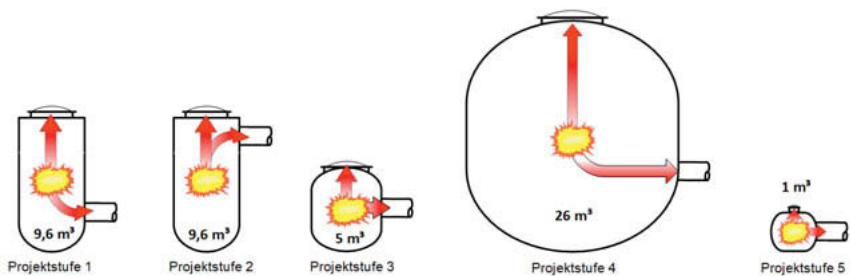
Bild 2: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus, am Beispiel des Setups mit dem  $5 \text{ m}^3$ -Behälter

Bild 3: Parametervariation Behältervolumen und Rohrleitungsposition

Zu jeder untersuchten Konfiguration wurden Referenzversuche mit dem jeweiligen Explosionsbehälter durchgeführt, und zwar ohne angeflanschte Rohrleitung aber mit Druckentlastung. Der Mittelwert der so ermittelten maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter stellt den Bezugswert  $p_{red,0}$  dar, auf den die bei den Versuchen mit Rohrleitung und Entkopplungseinrichtung gemessenen maximalen Explosionsüberdrücke  $p_{i,max}$  normiert werden, so dass der Rückwirkungsseffekt  $RW$  als Vielfaches des Referenzwertes dargestellt werden kann.

$$RW = \frac{p_{i,max}}{p_{red,0}}$$

Diese Vorgehensweise erlaubt den anschaulichen Vergleich des Einflusses der unterschiedlichen untersuchten Konfigurationen auf die beobachteten Rückwirkungseffekte der Entkopplungseinrichtungen und wurde auch für Auswertung weiterer potenzieller Einflussparameter verwendet.

Auf eine detailliertere Beschreibung der Versuchsdurchführung wird hier zugunsten einer ausführlicheren Ergebnisdarstellung verzichtet.

### 3. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Zunächst einmal galt es in Form einer rein phänomenologischen Betrachtung zu versuchen, durch Variation einzelner Parameter deren Bedeutung für die beobachteten Effekte einzugrenzen. Idealerweise würden dabei erste Korrelationen sichtbar werden.

#### 3.1 Einfluss des Behältervolumens

Mit der Variation des Volumens des gekoppelten Explosionsbehälters zwischen 1 m<sup>3</sup> und 26 m<sup>3</sup> verändert sich das Verhältnis des Behältervolumens zum Rohrleitungsquerschnitt  $V_B/A_{RL}$  linear mit dem Behältervolumen, da  $A_{RL}$  über alle Versuche konstant gehalten wurde. Variiert wurde allerdings auch der Einbauabstand, so dass sich das Volumenverhältnis  $V_B/V_{RL}$  zusätzlich umgekehrt proportional mit dem Einbauabstand ändert.

In Tabelle 1 sind die maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke im druckentlasteten Behälter als Vielfache der Referenzdrücke dargestellt, und zwar die Maximalwerte über alle Versuche. Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse wird der Einfluss des Behältervolumens sofort qualitativ deutlich: Während bei den Versuchen mit dem größten Behältervolumen (26 m<sup>3</sup>) allenfalls eine geringfügige Rückwirkung der Entkopplungseinrichtung auf  $p_{red}$  zu verzeichnen war, wurden die maximalen Rückwirkungseffekte bei den Versuchen mit dem kleinsten Volumen (1 m<sup>3</sup>) beobachtet: hier erreichte der reduzierte Explosionsdruck im Behälter den 4,6-fachen Wert des Referenzdrucks. Die Druckerhöhungen durch die Rückwirkungseffekte lagen bei den Versuchen mit dem 5 m<sup>3</sup>-Behälter bei einem Faktor von ca. 3, bei den Versuchen mit dem 9,6 m<sup>3</sup>-Behälter bei einem Faktor von ca. 2 (wobei hier auch noch eine Abhängigkeit von der Rohrleitungsposition sichtbar wird). Der Einfluss der Rohrleitungslänge zwischen Explosionsbehälter und Entkopplungseinrichtung ist im betrachteten Längenbereich nicht unbedingt als signifikant zu bezeichnen.

Somit kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Rückwirkung eine starke Korrelation mit dem Behältervolumen, oder besser mit dem Verhältnis  $V_B/A_{RL}$  aufweist.

Tabelle 1: Druckerhöhung durch Rückwirkungseffekt, als Vielfaches des Referenzdrucks;  
Einfluss von Behältervolumen, Einbauabstand und Rohrleitungsposition

|               | 26 m³       | 9.6 m³ |      | 5 m³   | 1 m³   |
|---------------|-------------|--------|------|--------|--------|
| Einbauabstand | Rohrleitung |        |      |        |        |
|               | unten       | unten  | oben | mittig | mittig |
| 3.0           | 1.1         | 1.9    | 1.5  | 2.7    | -      |
| 4.5           | 1.1         | 2.3    | 1.8  | 3.0    | -      |
| 6.0           | 1.3         | 2.3    | 1.8  | 2.8    | 4.6    |
| 10.0          | 1.0         | -      | -    | -      | -      |

### 3.2 Einfluss der Explosionskenngrößen des Staubes

In gleicher Weise wie der Einfluss des Behältervolumens wurde auch der Einfluss der Explosionskenngrößen  $p_{max}$  und  $K_{St}/MZE$  zunächst einmal nur phänomenologisch betrachtet. In der Erwartung, dass für die beobachteten Effekte die Reaktionsgeschwindigkeit einen erkennbaren Einfluss haben sollte, wurden Stäube mit unterschiedlichen  $K_{St}$ -Werten und Mindestzündenergien verwendet. Der zwangsläufig aufgrund der staubspezifischen Kenngrößen ebenfalls variierte maximale Explosionsdruck spielt hier keine Rolle, sehr wohl aber die Verbrennungsgeschwindigkeit. Wiederum über alle Versuche betrachtet zeichnet sich die Tendenz ab, dass die Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks im Behälter aufgrund der Rückwirkungseffekte mit abnehmendem  $K_{St}$ -Wert bzw. zunehmender  $MZE$  stärker ausfällt, Tabelle 2 und Bild 4. Besonders deutlich sichtbar wird das bei den Ergebnissen der Versuche mit dem 1 m³-Behälter.

Tabelle 2: Druckerhöhung durch Rückwirkungseffekt, als Vielfaches des Referenzdrucks;  
Einfluss des  $K_{St}$ -Werts und des Behältervolumens

|  | 26 m³       | 9.6 m³ |      | 5 m³   | 1 m³   |
|--|-------------|--------|------|--------|--------|
| Prüfstaub  | Rohrleitung |        |      |        |        |
|  | unten       | unten  | oben | mittig | mittig |
| Weizenmehl K <sub>St</sub> 70/K <sub>St</sub> 80   | 1.3         | 2.3    | 1.8  | 3.0    | 4.6    |
| Maisstärke K <sub>St</sub> 125                     |             |        |      |        | 2.8    |
| Maisstärke K <sub>St</sub> 180                     | 1.0         |        |      |        |        |
| Maisstärke K <sub>St</sub> 230/K <sub>St</sub> 235 |             | 1.9    | 1.2  | 1.4    | 1.8    |

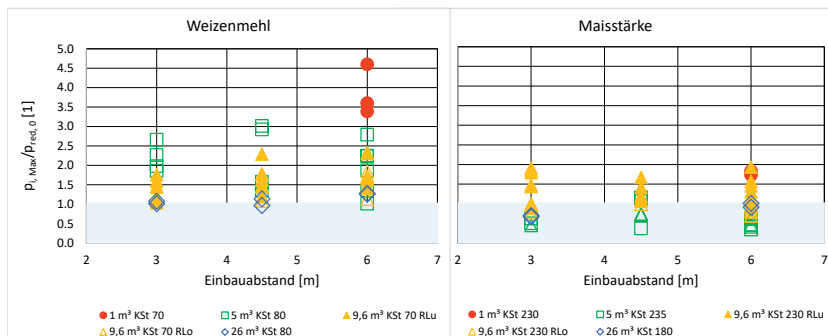


Bild 4: Einfluss des  $K_{St}$ -Werts, des Behältervolumens, des Einbauabstandes und der Rohrleitungsposition

### 3.3 Einfluss der Position der Rohrleitung relativ zu Zündort und Druckentlastungsöffnung

Die beiden mittleren Diagramme in Bild 5 zeigen erwartungsgemäß, dass die Zuordnung von Entstehungsort der Explosion, Druckentlastungsöffnung und Rohrleitungsposition den Rückwirkungseffekt beeinflusst. Befindet sich die entkoppelte Rohrleitung relativ nahe der Druckentlastungsöffnung, fällt die Druckerhöhung erkennbar schwächer aus.

Bild 4 fasst die bisherigen Aussagen zum Einfluss des Behältervolumens, der Explosionscharakteristika der verwendeten Teststäube und der Rohrleitungsposition noch einmal in grafischer Form zusammen.

### 3.4 Einfluss der Bauart der Explosionsentkopplungseinrichtung

Wie bereits erwähnt wurden zwei Entkopplungseinrichtungen prinzipiell unterschiedlicher Bauart untersucht: ein System ähnlich einer Rückschlagklappe sowie ein rotationssymmetrisches axial wirkendes Explosionsschutzventil. Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, dass sich potenzielle, durch die Bauart der Entkopplungseinrichtungen bedingte, Unterschiede in der Rückwirkung nicht reproduzierbar abbilden ließen. Auch ließen die sehr ähnlichen Schließzeiten beider Systeme den Schluss zu, dass der Einfluss des Entkopplungsprinzips zumindest für die beiden betrachteten Fälle eher gering sein würde. Die Streubreiten bei derartigen Versuchen im Großmaßstab sind zu groß, als dass eventuelle Auswirkungen von Asymmetrien beim Schließvorgang belastbar erkennbar wären.



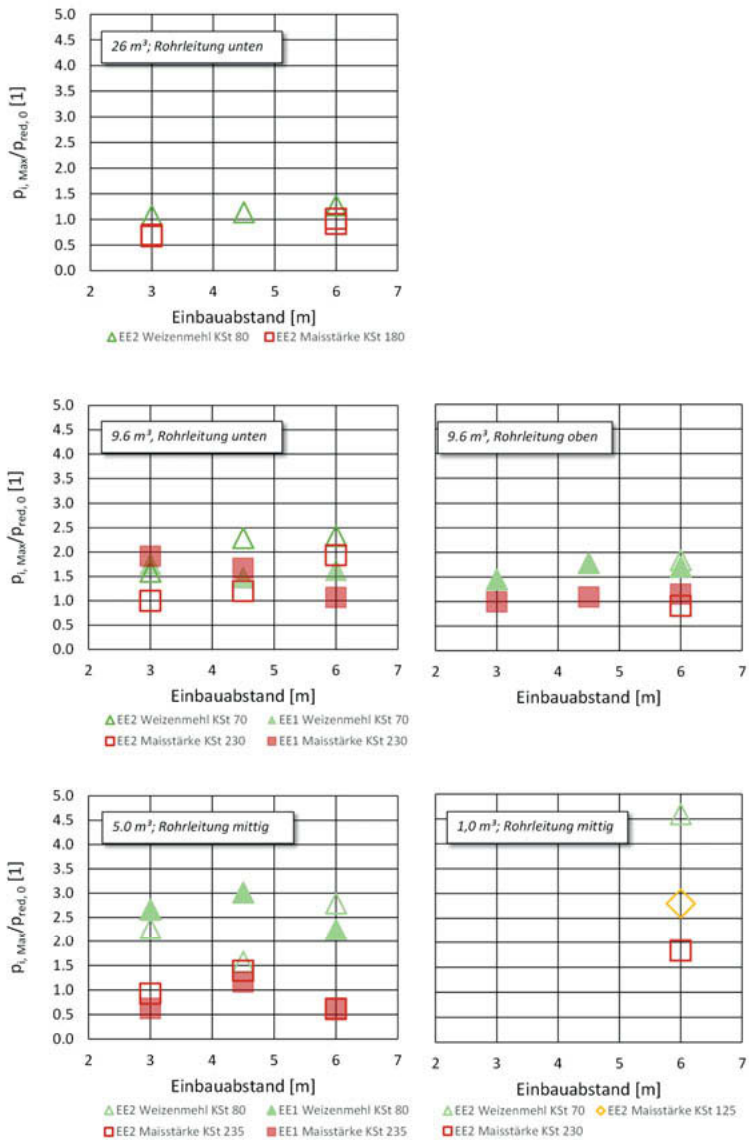


Bild 5: Einfluss von Behältervolumen, Explosionscharakteristika der Teststäube, Einbauabstand, Rohrleitungsposition und Bauart der Entkopplungseinrichtung

### 3.5 Einfluss des Zündorts

In der Regel befand sich der "Zündort", also die Position im Explosionsbehälter, an der das homogen verteilte, explosionsfähige Staub/Luft-Gemisch mit Hilfe von pyrotechnischen Zündern entzündet wurde, etwa im Zentrum des Behälters. In der Versuchsreihe mit dem 5 m<sup>3</sup>-Explosionsbehälter wurden zusätzlich Versuche durchgeführt, bei denen sich der Zündort im Behälter nahe dem Eintritt in die angeflanschte Rohrleitung befand. Startet eine Explosion an dieser Position, läuft die Flamme zu einem früheren Zeitpunkt in die Rohrleitung, so dass die Flammenfront die Entkopplungseinrichtung zu einem früheren Zeitpunkt erreicht.

Zumindest in der untersuchten Konfiguration führte diese Parametervariation eher zu geringeren Druckerhöhungen aufgrund der Rückwirkung, Bild 6.

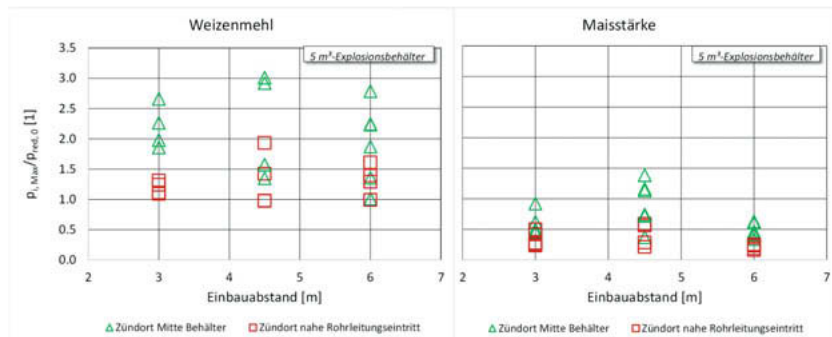


Bild 6: Einfluss der Zündortlage

### 3.6 Einfluss der Behältergeometrie ( $L/D$ )

Ein Einfluss des Längen/Durchmesserverhältnisses  $L/D$  des gekoppelten Behälters konnte für den untersuchten Bereich  $L/D = 1,0 / 1,5 / 1,8$  nicht festgestellt werden.

## 4. Zusammenfassung und Hypothesen

Mit den vorgestellten Versuchen konnten weitere Daten gesammelt werden, die es erlauben, die beobachtete Rückwirkung von Explosionsentkopplungs-Systemen auf den reduzierten Explosionsüberdruck in verbundenen druckentlasteten Behältern besser zu verstehen.

So konnten die Art der Entkopplungseinrichtung, der Zündort sowie das  $L/D$ -Verhältnis der Behälter im betrachteten Bereich als Haupteinflussparameter ausgeschlossen werden. Eine erheblich größere Bedeutung kommt dem Verhältnis Behältervolumen zu Rohrleitungsquerschnitt  $V_B/A_{RL}$  zu: Bei konstant gehaltenem Rohrleitungsquerschnitt nimmt die Druckerhöhung aufgrund von Rückwirkungseffekten mit zunehmendem Volumen ab. Auch die

Explosionskenngrößen der Stäube, insbesondere der  $K_{St}$ -Wert, beeinflussen die Rückwirkung erheblich: Explosionen von Staub/Luft-Gemischen mit Stäuben niedriger  $K_{St}$ -Werte führten zu stärkeren Erhöhungen des reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter als solche mit Stäuben hoher  $K_{St}$ -Werte. Die stärksten Druckerhöhungen wurden bei Versuchen mit Weizenmehl ( $K_{St} = 70 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) im  $1 \text{ m}^3$ -Explosionsbehälter beobachtet: Die hier entstehenden reduzierten Explosionsüberdrücke erreichten maximal den 4,6 fachen Wert des Referenzdrucks, der ohne Rohrleitung und Entkopplungs-System im druckentlasteten Behälter gemessen worden war. Aus detaillierteren Auswertungen der gewonnenen Daten wie z. B. der lokalen zeitlichen Druckverläufe in der Rohrleitung und im Behälter, der Druckanstiegsgeschwindigkeiten oder der Stoffumsätze konnten zwischenzeitlich weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die hier, um den Rahmen nicht zu sprengen, nur ansatzweise vorgestellt werden.

Der Verlauf der Druckkurven weist beginnend mit dem Schließvorgang charakteristische Schwingungen auf, ebenso einige Kurvenverläufe der Flammenmelder. Dies deutet auf eine Interaktion des Druckgeschehens mit den Flammen und eine starke Turbulenzerhöhung aufgrund der Veränderung der Strömungsverhältnisse durch das Schließen hin, durch die die Reaktionsrate erhöht wird. Zudem ist der Fortschritt der Reaktion im Behälter zum Schließzeitpunkt von erheblicher Bedeutung für das Ausmaß der Rückwirkung. Bei Versuchen ohne Druckerhöhung im Vergleich zu den Referenzversuchen erfolgte das Schließen der Entkopplungseinrichtung (EE) häufig erst kurz vor Erreichen des  $p_{red,max}$  im Behälter. Im Gegensatz dazu führte ein frühes Schließen der EE bereits in der Anlaufphase der Explosion im Behälter zu einer deutlichen Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Vergleich zum Referenzdruck. Diese Beobachtung korreliert mit dem bereits beschriebenen Einfluss des  $K_{St}$ -Werts: Die Explosion eines Staubes mit einem hohen  $K_{St}$ -Wert läuft erheblich schneller ab, so dass das Druckmaximum im Behälter häufig schon nahezu erreicht ist, bis die EE schließt. Die höhere Reaktionsgeschwindigkeit führt auch dazu, dass zum Schließzeitpunkt ein erheblich größerer Anteil des zur Verfügung stehenden brennbaren Staubes bereits umgesetzt ist.

Diese und weitere Überlegungen führten zu folgender Hypothese: Die in die Rohrleitung laufende Expansionsströmung der Explosion kann zunächst durch die noch offene EE abströmen, wird aber mit dem Schließen der EE abrupt abgebremst. Es kommt zu einer Reflexion an der geschlossenen EE und einer daraus resultierenden Umkehrströmung. Diese strömt zwischen der Rohrrinnenwand und der zur EE weisenden Kernströmung zurück in Richtung Behälter. Dort ankommend induziert sie zusätzliche Turbulenz, die die dort ablaufenden Reaktionen verstärkt. Außerdem wirken sich die Scherströmungen der beiden gegenläufigen Ströme im Rohr sowie die Temperatur- und damit Dichteunterschiede verstärkend auf die Reaktionsgeschwindigkeit im Rohr aus. Befindet sich nun nur noch wenig brennbarer Staub im System, da

aufgrund des hohen  $K_{ST}$ -Werts bereits ein erheblicher Anteil entweder umgesetzt oder aber unverbrannt aus dem System ausgestoßen wurde, sind die Auswirkungen der beschriebenen Vorgänge nur schwach bis nicht vorhanden. Schließt die EE aber zu einem frühen Zeitpunkt, zu dem die Reaktion im Behälter noch im Anlaufen begriffen ist, werden die Verstärkungseffekte wirksam: Sowohl Kernströmung als auch Umkehrströmung enthalten noch nennenswerte Mengen an unverbranntem Staub, so dass die Reaktion in der Rohrleitung beschleunigt werden kann. Die in den Behälter eintretende Rückströmung facht nicht nur die Turbulenz an, sondern liefert zusätzlichen Brennstoff für die dort im Anlaufen begriffene Reaktion. Abhängig von den beschriebenen Zeiteffekten, kann dieser Vorgang zu erheblich höheren reduzierten Explosionsüberdrücken im Behälter führen. Dieses Phänomen ist stark abhängig vom Verhältnis  $V_B/A_{RL}$ . Eine in einer kleinen Rohrleitung auftretende Reflexion der Expansionsströmung wird bei ihrem Eintreffen in ein großes Behältervolumen nur wenig Wirkung zeigen. Je kleiner jedoch das Verhältnis  $V_B/A_{RL}$  ist, desto mehr Volumenanteile werden nahezu zeitgleich von der durch das Schließen ausgelösten Störung erfasst, mit den oben beschriebenen Auswirkungen. Auch die Position der Rohrleitung relativ zu Zündort und Entlastungsfläche beeinflusst die Größe dieses Volumenanteils. Liegen Entlastungsfläche und die Rohrleitung räumlich sehr nah bei einander, wird weniger vom Behältervolumen involviert, da ein schneller Abbau des Druckes über die Entlastungsöffnung auf kurzem Weg erfolgen kann. Auch verlassen mit der Rückströmung zurückgeführte Anteile unverbrannten Staubes den Behälter, ohne sich an der Reaktion im Behälter zu beteiligen. Bei einer entfernt von der Druckentlastungsöffnung positionierten Rohrleitung ist das beteiligte Volumen erheblich größer und unverbrannte Brennstoffanteile können zusätzlich eingemischt werden. Die in der Folge freigesetzte Energie kann nicht schnell genug über die Entlastungsöffnung abgebaut werden, wodurch es zur Drucküberhöhung kommt.

Mit diesen Erkenntnissen ist auch das Hauptziel dieser Forschungen etwas näher gerückt: Algorithmen zu erarbeiten, die es erlauben, diese Effekte zukünftig bereits bei der Auslegung und Dimensionierung zu berücksichtigen.

## 5. Literaturangaben

- [1] DIN EN 14491:2012, Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen
- [2] DIN EN 14797:2006, Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung
- [3] DIN EN 16447:2014, Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung
- [4] DIN EN 15089:2009, Explosions-Entkopplungssysteme
- [5] Sippel, M., Schepp, P., Hesener, U.: Neue Erkenntnisse für den Einsatz von Systemen zur Explosions-Entkopplung an explosionsdruckentlasteten Behältern, Technische Sicherheit Bd. 5 (2015) Nr. 7/8 – Juli/August
- [6] Sippel, M., Schepp, P., Hesener, U.: New findings for the use of explosion isolation systems at explosion vented vessels. Chemical Engineering Transactions 48 (2016) DOI:10.3303/CET1648089 S. 529 – 534
- [7] Schepp, P., Sippel, M. (2017): Neue Erkenntnisse zum Einsatz von Systemen zur Explosions-Entkopplung an explosionsdruckentlasteten Behältern. VDI-Berichte 2314: 207 – 219, Düsseldorf, VDI-Verlag
- [8] van Wingerden, K., Wilkins, B., van Wingerden, M., Holme, M., Schepp, P., Lade, R.: On the Occurrence of Flame Instabilities during Dust Explosions. Chemical Engineering Transactions 77 (2019) DOI:10.3303/CET1977030: S. 175 – 180



# Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen

Dr.-Ing. **Dirk Lorenz**, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, Mannheim

## Kurzfassung

Basierend auf einer experimentellen Untersuchung der Kraftwirkung auf Explosionsklappenscharniere in Abhängigkeit von Klappenträgeitsmoment und Explosionsheftigkeit wird eine Modellrechnung aufgezeigt, mit der die mechanischen Größen, die während des Druckentlastungsvorganges an einer Explosionsklappe auftreten, beschrieben werden können. Die Modellrechnung dient der Dimensionierung von Explosionsklappenscharnieren und eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit zur

- konservativen Abschätzung der Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen
- Durchführung von EU-Baumusterprüfungen von Explosionsklappen mit sehr großen Dimensionen
- Bestimmung der maximalen Wurfweite abgerissener Explosionsklappen
- Entwicklung zweier Explosionsklappentypen, die ohne Aufbauten auf und um die Entlastungsöffnung herum auskommen und über einen präzise einstellbaren und sehr gut reproduzierbaren Ansprechdruck verfügen sowie über eine Entlastungsfähigkeit von 100%

## Abstract

Based on an experimental study of the force acting on the hinges of explosion doors depending on their moment of inertia and blast intensity, a model calculation is presented to describe the mechanical parameters occurring during the pressure venting at an explosion door. The model calculation is used for the dimensioning of explosion door hinges and also opens up the possibility to

- conservative estimation of the discharge capacity of explosion doors
- execution of EU type tests of explosion dampers with very large dimensions
- determination of the maximum throwing distance of torn off explosion doors
- development of two types of explosion doors, which do not require any superstructures on and around the relief opening have a precisely adjustable and very well reproducible response pressure as well as a 100% relief capability

## 1. Modellierung des Öffnungsvorganges von Explosionsklappen bei Staubexplosionen

Basierend auf umfangreichen Messdaten, gewonnen durch Experimente am 1 m³-, 9,4 m³- und 60 m³-Behälter auf dem Versuchsfeld der BGN/FSA in Kappelrodeck, wurde eine Modellrechnung entwickelt, aus der alle relevanten Kräfte in Abhängigkeit der Zeit hervorgehen, die an einer Explosionsklappe bei der Druckentlastung von Staubexplosionen auftreten. Das Modell wurde in eine Software namens SIMEK übertragen und als Modul in das Softwarepaket ExProtect der FSA integriert [1-4].

An einer Explosionsklappe greifen im Explosionsfall vier Kräfte an (Bild 1):

1. die öffnend wirkende Kraft  $F_{\text{Ex}}$  aufgrund des Druckanstiegs im Behälter
2. die Gravitationskraft  $F_{\text{Gr}}$  aufgrund der Klappenmasse
3. die Reibungskraft  $F_{\text{LR}}$  aufgrund des Luftwiderstandes
4. die Kraft  $F_{\text{SR}}$  aufgrund von Reibung in den Klappenscharnieren

Als Resultierende ergibt sich daraus die öffnend wirkende Kraft  $F_s$ .

Auf die Klappenscharniere wirken dabei zwei Kräfte:

1. die radial wirkende Zentrifugalkraft  $F_r$
2. die tangential wirkende Kraft  $F_t$

Diese beiden Kräfte wirken zusammen als Resultierende  $F_g$ .

Bei den Experimenten zur Untersuchung der Kraftverläufe an Explosionsklappen wurden durchweg Verläufe gefunden, wie sie exemplarisch in Bild 2 zu sehen sind. Die zeitliche Entwicklung der Kraft  $F_s$  zeigt, dass die Klappenbeschleunigung über zwei Maxima erfolgt. Diese Beobachtung führte auf den Ansatz, die Kraft  $F_{\text{Ex}}$  als Kombination aus zwei verschiedenen Kräften zu beschreiben, die zeitlich versetzt ineinander übergehen. Zu Beginn des Klappenöffnungsvorganges dominiert die Druckkraft auf die Klappe  $F_{\text{D,Ex}}$ , am Ende die Reibungskraft zwischen Klappe und ausströmenden Medium  $F_{\text{R,Ex}}$ . Den Übergang von einer zur anderen Kraft während des Klappenöffnungsvorganges steuert eine sigmoide Funktion. Damit ergibt sich Gleichung (1) zur Abschätzung von  $F_{\text{Ex}}$ .

$$F_{\text{D,Ex}} \approx \frac{h}{S} p A_E \cos \varphi \quad F_{\text{R,Ex}} \approx \frac{h}{2S} c_w \rho_A A_{\text{KA}} v_{\text{rel}}^2 \cos \varphi$$

$$F_{\text{Ex}} \approx \frac{F_{\text{D,Ex}}}{1 + \exp\left(\frac{-\varphi - 0,35}{-0,06}\right)} + \frac{F_{\text{R,Ex}}}{1 + \exp\left(\frac{-\varphi - 0,47}{0,09}\right)} \quad (1)$$



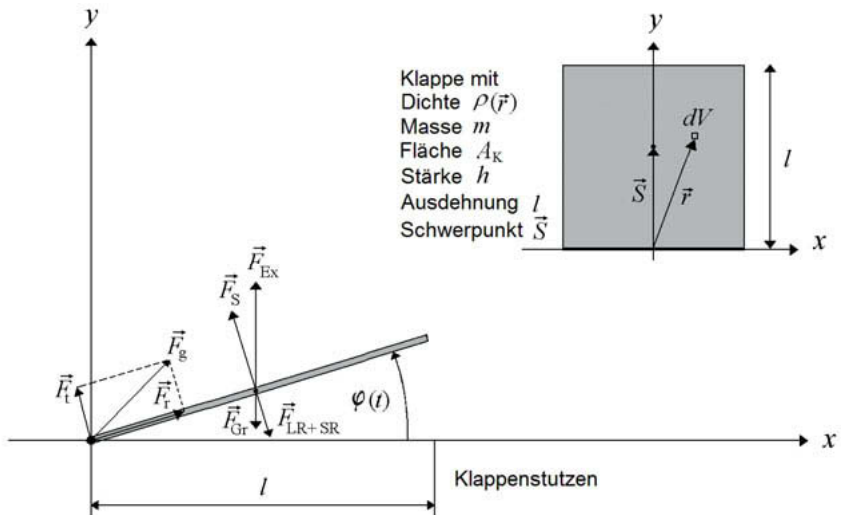
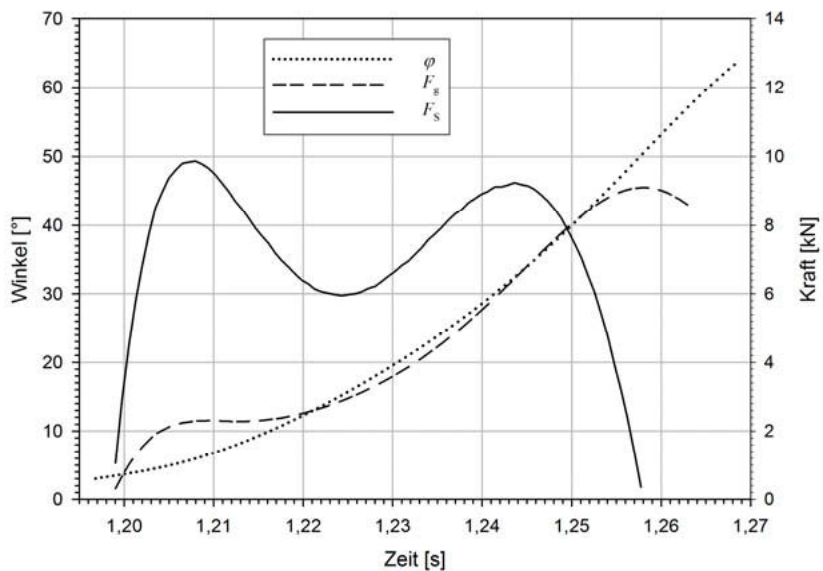


Bild 1: Skizze der Kraftverhältnisse an einer Explosionsklappe.

Bild 2: Kraft- und Winkelverlauf an einer Explosionsklappe bei der Druckentlastung einer Staubexplosion am 9,4 m³-Behälter ( $K_{St} = 130 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ,  $m = 36,3 \text{ kg}$ ,  $A_E = 0,484 \text{ m}^2$ ).

In Gleichung (1) ist  $h$  der Abstand zwischen Scharnierachse und Kraftangriffspunkt,  $A_E$  die Fläche der Entlastungsöffnung,  $A_{KA}$  die sich im Abgasstrom befindliche Klappenfläche,  $c_w$  der Reibungsbeiwert der Explosionsklappe,  $\rho_A$  die Dichte des ausströmenden Mediums und  $v_{rel}$  die Relativgeschwindigkeit zwischen Klappe und ausströmendem Medium.  $v_{rel}$  wird mit Hilfe des zeitabhängigen Drucks im Behälter und der Ausflussformel von Torricelli berechnet.

Der zeitabhängige Druck im Behälter wird mit

$$p(t) = p_{red,max} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{K_{St} |t-a|}{3,333 \sqrt[3]{V}} \right)^2 \right) \quad (2)$$

berechnet, wobei der reduzierte maximale Explosionsdruck  $p_{red,max}$  mit Gleichung

$$p_{red,max} \approx \left[ \left( 3,264 \cdot 10^{-5} p_{max} K_{St} + \frac{1}{4} (p_{stat} - 0,1) \right) \frac{V^{\frac{3}{4}}}{A_E} \right]^{\frac{7}{4}} \cdot \exp \left( 2,35 \cdot 10^{-3} \frac{K_{St}}{V^{\frac{1}{3}}} \sqrt{Q} \right) \quad (3)$$

abgeschätzt wird und  $K_{St}$  die sicherheitstechnische Kenngröße zur Charakterisierung der Druckanstiegsgeschwindigkeit im geschlossenen Behälter ist mit  $V$  als Behältervolumen. In (3) ist  $p_{max}$  der maximale Explosionsdruck im geschlossenen Behälter,  $p_{stat}$  der statische Ansprechdruck der Explosionsklappe und  $Q$  der Klappenwiderstand

$$Q = \frac{\Theta_K}{A_E h} \quad (4)$$

mit  $\Theta_K$  als Trägheitsmoment der Explosionsklappe bezogen auf die Klappenscharnierachse. Sowohl für die Gravitations- als auch die Luftreibungskraft werden Newton'sche Gleichungen angesetzt. Die Scharnierreibungskraft wird mit einer experimentell bestimmten festen Zahlengröße identifiziert, wie Gleichungen (5) zu entnehmen ist.

$$F_{Gr} = m g \quad F_{LR} \approx \frac{1}{2} c_R \rho_l A_K (\dot{\varphi} h)^2 \quad F_{SR} \approx 45 \text{ N} \quad (5)$$

Mit diesen vier Kräften ergibt sich die Bewegungsgleichung (6)

$$\Theta_K \ddot{\varphi} = S \underbrace{\left( (F_{Ex} + F_{Gr}) \cos \varphi + F_{LR} + F_{SR} \right)}_{F_S} \quad (6)$$

deren numerische Lösung den Klappenwinkel  $\varphi$  über der Zeit und seine Ableitungen liefert. Somit sind alle an der Explosionsklappe auftretenden Kräfte zu jedem Zeitpunkt bekannt. Die Belastung auf die Klappenscharniere folgt daraus mit

$$F_g = \sqrt{(m S \dot{\varphi}^2)^2 + \left(\frac{\Theta_s \ddot{\varphi}}{S}\right)^2} \quad (7)$$

Weitere Informationen hierzu finden sich in [1-4].

Das Diagramm in Bild 3 zeigt einen Vergleich der maximalen Scharnierbelastung, bestimmt durch Experiment, SIMEK und dem DIN Fachbericht 140. Dabei fällt auf, dass das Verfahren aus dem DIN Fachbericht 140 die Scharnierbelastungen deutlich unterschätzt und folglich Scharnierversagen bzw. Klappenabriss droht wenn Klappenscharniere mit dem DIN Fachbericht 140 dimensioniert werden [1]!

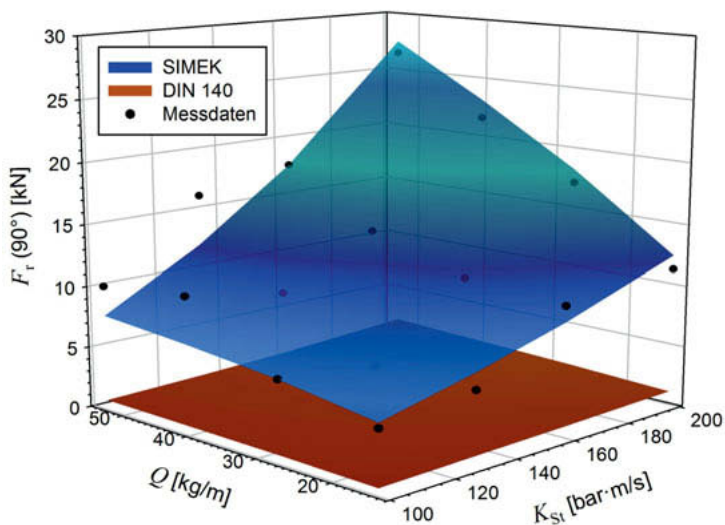


Bild 3: Vergleichende Darstellung der maximalen radialen Scharnierbelastung an einer Explosionsklappe als Funktion von Klappenwiderstand  $Q$  und  $K_{St}$ -Wert bestimmt durch Experiment, SIMEK sowie dem DIN Fachbericht 140.

## 2. Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen

Aus Gleichung (3) wurde die Formel

$$E_f \approx \left( \exp \left( 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K_{St}}{V^{\frac{3}{5}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \right)^{-\frac{4}{7}} \cdot 100 \quad (8)$$

zur Abschätzung der Entlastungsfähigkeit  $E_f$  von Explosionsklappen abgeleitet. (8) stellt eine konservative Abschätzung für die Entlastungsfähigkeit dar. Bei kubischen Behältern mit  $V < 25 \text{ m}^3$  und  $p_{\text{red,max}} < 1 \text{ bar}$  liefert (8) Ergebnisse mit einem maximalen relativen Fehler von ca. 20%. Bei Überschreiten der angegebenen Werte für  $V$  und  $p_{\text{red,max}}$  werden die prognostizierten Entlastungsfähigkeiten tendenziell zu klein [1-4].

## 3. Vermeiden von Deckenaufbauten

Um Aufbauten jeglicher Art beim Einsatz von Explosionsklappen zu vermeiden, wurde der Explosionsklappentypus entwickelt, der in Bild 4 als CAD-Grafik dargestellt ist.

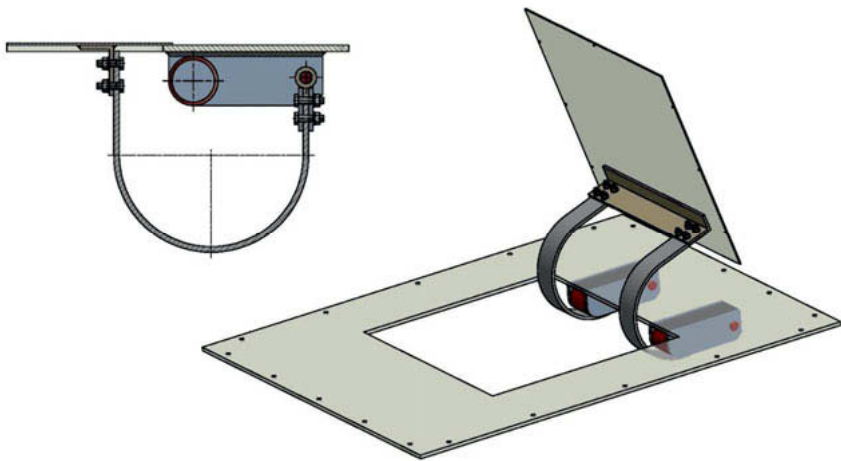


Bild 4: CAD-Zeichnung einer Explosionsklappe ohne Deckenaufbauten [1].

Die Explosionsklappe besteht aus einer quadratischen Stahlplatte, die entweder frei aufliegt oder z. B. mit Kunststoffschrauben verschlossen wird. Mit Hilfe von zwei gebogenen Flacheisen (Bügel) ist die Klappe an einem Scharnier befestigt, welches im Inneren des Silos unterhalb der Silodecke montiert ist. Horizontal vor dem Scharnier in Richtung der Entlastungsöffnung sind zwei Stahlrohre in die Scharnierhalterung integriert. Öffnet die Klappe, so schlagen

die Bügel bei einer Winkelstellung von etwa  $70^\circ$  an die Stahlrohre an und beginnen sich zu verbiegen. Die Verformung verläuft zunächst elastisch, später plastisch. Die Rotationsenergie der Klappe geht dabei teilweise in die plastische Verformungsarbeit über. Zur Dimensionierung der Bügel wird die Formel

$$d_B = \sqrt{\frac{4 D_B}{\sigma_B b_B}} \quad (9)$$

herangezogen mit  $d_B$  als Stärke und  $b_B$  als Breite der Bügel.  $\sigma_B$  stellt die Biegespannung des Bügelmaterials dar und  $D_B$  ist das maximale Biegemoment bezogen auf die Mitte der Bügel.  $D_B$  wird aus der mit SIMEK gewonnenen maximalen Belastung auf die Klappenscharniere berechnet. Details können [1] und [5] entnommen werden.

#### 4. Reproduzierbarkeit des Ansprechverhaltens

Um eine Explosionsklappe als Referenzsystem für Baumusterprüfungen einsetzen zu können, muss ihr Ansprechdruck einstellbar und möglichst exakt reproduzierbar sein. Außerdem muss ihre Entlastungsfähigkeit 100% aufweisen. Marktübliche Explosionsklappen besitzen diese Eigenschaften nicht in hinreichendem Maße. Aus diesem Grund wurde die in Bild 5 gezeigte Explosionsklappe aufgebaut.

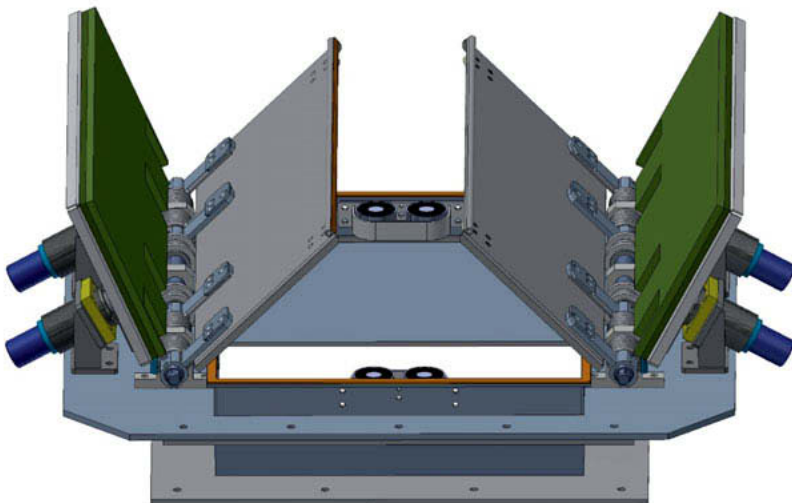


Bild 5: Explosionsklappe mit einstellbarem und exakt reproduzierbarem Ansprechverhalten sowie einer Entlastungsfähigkeit von 100%.

Die Explosionsklappe ist zweiflügelig ausgeführt. Jede der Klappen wird mit zwei elektrisch ansteuerbaren Permanentmagneten verschlossen. Je vier Torsionsfedern, welche auf der Scharnierwelle einer Klappe positioniert sind, beschleunigen den Klappenöffnungsvorgang im Entlastungsfall. Eine Elektronik zur Ansteuerung der Magnete nutzt das bei Explosionsversuchen standardmäßig gemessene Drucksignal zur Triggerung: Wird die an der Elektronik einstellbare Triggerschwelle, d. h. der Spannungswert, der dem statischen Ansprechdruck  $p_{\text{stat}}$  entspricht, erreicht, wird eine aufgeladene Kapazität über die Magnete entladen und schaltet diese in rund 1 ms kraftfrei. Die beiden Klappen öffnen sich. Bei einer Klappenwinkelstellung von  $110^\circ$  schlagen die Klappen an stoßgedämpfte Fangplatten an. Die Stoßdämpfer nehmen die Klappenrotationsenergie restlos auf, so dass ein Zuschlagen der Klappen verhindert wird und eine lange Klappenlebensdauer durch Vermeidung extremer Kraftspitzen gewährleistet ist. Um trotz der massiven Bauweise eine Entlastungsfähigkeit von 100 % zu erreichen, ist die gesamte Entlastungsfläche der Explosionsklappe größer als die Entlastungsfläche des zu schützenden Behälters. Ein Adapter zur Verbindung von Klappe und Behälter ist deshalb erforderlich. Zur Dimensionierung der Flächenvergrößerung wurde Formel (8) herangezogen. Die Auslegung der Antriebsfedern und Stoßdämpfer erfolgte mit Hilfe von SIMEK. Durch zwei umfangreiche Versuchsreihen auf dem Versuchsfeld der BGN/FSA in Kappelrodeck konnte die Funktionsfähigkeit der Klappe nachgewiesen werden. Die maximale Abweichung zwischen eingestelltem ( $p_{\text{stat}}$ ) und gemessenem ( $p_{\text{dyn}}$ ) Ansprechdruck lag bei 7,4% ( $p_{\text{stat}} = 100 \text{ mbar}$ ,  $p_{\text{dyn}} = 107,4 \text{ mbar}$ ). Details siehe [1].

## 5. Prüfbarkeit von Explosionsklappen großer Dimension

Druckentlastungseinrichtungen müssen gemäß der Richtlinie 2014/34/EU eine EU-Baumusterprüfung durchlaufen, bevor sie als autonome Explosionsschutzsysteme in konkreten Anwendungsfällen zugelassen werden. Die notifizierte Stellen stoßen schnell an ihre Grenzen, wenn Explosionsklappen mit Kantenlängen oder Durchmessern größer als ca. 2 m geprüft werden sollen. In solchen Fällen können Versuche im Modellmaßstab durchgeführt werden. Die Ergebnisübertragung von Modellversuchen auf reale Verhältnisse ist nur dann möglich, wenn die Vorgänge in der Natur im Modell physikalisch richtig wiedergegeben werden, was gleichbedeutend mit dynamischer Ähnlichkeit ist. Letztgenannte erfordert neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die Ähnlichkeit der am Vorgang beteiligten Kräfte. Sind Systeme dynamisch ähnlich, transformieren die physikalischen Größen beim Übergang in die Modellgrößen gemäß den in Tabelle 1 angegebenen Faktoren, wobei  $q$  das Größenverhältnis zwischen Realität und Modell ist.

Tabelle 1: Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fläche, Volumen, Kraft, Druck, Druckanstiegsgeschwindigkeit, Zeit und Masse mit Änderungsfaktor bei dynamischer Ähnlichkeit.

| Größe  | $v$ | $a$      | $A$   | $V$   | $F$   | $p$ | $dp/dt$  | $t$ | $m$   |
|--------|-----|----------|-------|-------|-------|-----|----------|-----|-------|
| Faktor | $q$ | $q^{-1}$ | $q^2$ | $q^3$ | $q^2$ | 1   | $q^{-1}$ | $q$ | $q^3$ |

Zur Durchführung der EU-Baumusterprüfung einer Explosionsklappe mit großen Abmessungen wird diese in SIMEK virtuell auf verschiedene Behälter gesetzt und mit den vom Antragsteller vorgegebenen Werten für  $K_{St}$  und  $p_{red,max}$  ein worst case-Szenario aufgesucht, d. h. die reduzierte, maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{red,max}$  und die maximale Scharnierbelastung  $F_{g,max}$  maximiert. Die sich dabei ergebenden Werte für  $p_{red,max}$ ,  $(dp/dt)_{red,max}$ ,  $F_{g,max}$  etc. müssen sich bei der verkleinerten Variante auf dem Versuchsfeld – verändert um den Maßstab  $q$  und Potenzen desselben gemäß der dynamischen Ähnlichkeit – wiederfinden lassen. Um dies zu gewährleisten, werden Staubexplosionsversuche mit SIMEK simuliert, bei denen virtuelle Verkleinerungen des Prüflings Computermodelle der verschiedenen Behälter des Versuchsfeldes druckentlasten. Ist eine Behälter/Klappen-Kombination gefunden, welche die Erfordernisse der dynamischen Ähnlichkeit näherungsweise liefert, kann gegebenenfalls durch Variation des  $K_{St}$ -Wertes eine Feinabstimmung vorgenommen werden. Abschließend wird der Prüfling in einer maßstäblich verkleinerten Version hergestellt und auf dem ausgewählten Behälter mit dem durch Simulationsrechnung bestimmten  $K_{St}$ -Werten geprüft.

In [7] konnte ein exemplarischer, experimenteller Nachweis erbracht werden, dass das erarbeitete Prüfverfahren anwendbar ist, d. h. dass im Rahmen der Messunsicherheit tatsächlich dynamische Ähnlichkeit vorliegt. Für weitere Informationen siehe [1] sowie [6-10].

## 6. Wurfweitenberechnung abgerissener Explosionsklappen

Wenn bei staubexplosionsgefährdeten Anlagen Explosionsklappen als Schutzsysteme eingesetzt werden, besteht im Explosionsfall die Gefahr des Klappenabrisses durch defekte Klappenscharniere. Folglich muss die Frage nach der Wurfweite abgerissener Explosionsklappen beantwortet werden, um Sicherheitsabstände zu umliegenden Gebäuden angeben zu können.

Die Rotationsenergie einer Explosionsklappe vor dem Abriss teilt sich nach dem Abriss in Rotationsenergie und Translationsenergie auf. Wegen der Erhaltung des Eigendrehimpulses verändert sich die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_a$  der Klappe nicht, jedoch verschiebt sich die Rotationsachse in den Klappenschwerpunkt. Die Differenz in der Rotationsenergie aufgrund dieser

Achsenverschiebung erscheint nun als Translationsenergie. Auflösen nach der Startgeschwindigkeit  $v_a$  zum Zeitpunkt des Abrisses liefert

$$v_a = \sqrt{\frac{\Theta_K \omega_a^2 - \Theta_S \omega_a^2}{m}} \quad (10)$$

mit  $\Theta_K$  als Klappen­trägheitsmoment bezogen auf die Scharnierachse und  $\Theta_S$  als Klappen­trägheitsmoment bezogen auf die Rotationsachse durch den Klappenschwerpunkt. Da die Belastung, bei der die Scharniere versagen, in der Regel unbekannt ist, wird eine worst case-Betrachtung herangezogen, d. h. die Klappe reißt beim Auftreten der maximalen Scharnierbelastung ab. Diese maximale Scharnierbelastung wird mit SIMEK berechnet. Die Software liefert auch die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_a$  zu diesem Zeitpunkt, wodurch (10) zur Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit herangezogen werden kann. Eine Optimierungsrechnung liefert daraus den optimalen Startwinkel  $\varphi_a$  im Hinblick auf eine maximale Wurfweite:

$$\varphi_a = \arccos \left( \frac{\sqrt{2(v_a^4 + 3v_a^2 h_a g + 2h_a^2 g^2)}}{2(v_a^2 + h_a g)} \right) \quad (11)$$

In (11) ist  $h_a$  die Starthöhe und  $g$  die Erdbeschleunigung. Mit den Anfangsbedingungen  $v_a$ ,  $\varphi_a$  und  $h_a$  kann die Differentialgleichung für den schiefen Wurf mit Newton-Reibung, flächenhaftem Flugobjekt und horizontalem Rücken- oder Gegenwind numerisch gelöst werden. Aufgelöst in ihre Komponenten lautet diese Gleichung

$$m \ddot{x} + \frac{1}{2} \rho_L (c_{w,x} A_x \cos^2(\beta) + c_{w,y} A_y \sin^2(\beta)) \sqrt{(\dot{x} - v_W)^2 + \dot{y}^2} (\dot{x} - v_W) = 0 \quad (12)$$

$$m \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho_L (c_{w,x} A_x \sin^2(\beta) + c_{w,y} A_y \cos^2(\beta)) \sqrt{(\dot{x} - v_W)^2 + \dot{y}^2} \dot{y} = -m g$$

wobei  $A_x$  die vertikale und  $A_y$  die horizontale Querschnittsfläche der Klappe darstellen. Die  $c_w$  sind die dazugehörigen Reibungsbeiwerte,  $\beta$  die zeitabhängige Winkelstellung der Klappe zur Horizontalen,  $\rho_L$  die Dichte der Luft und  $v_W$  die Windgeschwindigkeit in horizontaler Richtung. Das Rechenverfahren ist in das Modul SIMEK integriert worden. Weitere Details finden sich in [1-4].



## Literatur

- [1] Lorenz, D.: Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen, Bergische Universität Wuppertal, Dissertation 2020.
- [2] Lorenz, D. (1999): ExProtect – A Software Response to Important Questions on Safety in Dust and Gas Explosions, EuropEx – 3rd Worldwide Seminar on the Explosion Phenomenon and on the Application of Explosion Protection Techniques in Practice – Session 2, 1-32, Ghent.
- [3] Lorenz, D., Schiebler, H. (2001): ExProtect – Ein Programm zur Beantwortung wichtiger Fragen zum angewandten Explosionsschutz, VDI-Berichte 1601, 595-618, Düsseldorf.
- [4] Lorenz, D., Schiebler, H. (2001): ExProtect – Ein Programm zur Beantwortung sicherheits-technisch relevanter Fragen bei Gas- und Staubexplosionen, Technische Überwachung 3/2001, 19-23, Düsseldorf.
- [5] Lorenz, D., Schiebler, H., Seithel, M.: Entwicklung einer Druckentlastungsklappe ohne Silodeckenaufbauten, Abschlussbericht zum Projekt Nr. F-05-0301 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim 2013.
- [6] Lorenz, D. (2009): Baumusterprüfung von Druckentlastungselementen im Modellmaßstab, Jahrbuch Prävention 2009 der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 76-78, Mannheim 2009.
- [7] Chupin, P.: Experimentelle Verifizierung von Baumusterprüfungen im Modellmaßstab, Hochschule Mannheim, Masterarbeit 2009.
- [8] Lorenz, D., Chupin, P. (2010): Beweis erbracht: Baumusterprüfungen im Modellmaßstab anwendbar, Jahrbuch Prävention 2010 der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 96-99, Mannheim 2010.
- [9] Pape, T., Lorenz, D., Chupin, P. (2010): Konstruktiver Explosionsschutz großer Silos, Technische Überwachung 11/12/2010, 10-17, Düsseldorf.
- [10] Pape, T., Lorenz, D., Chupin, P. (2010): Prüfung von Druckentlastungselementen im Modellmaßstab, VDI Berichte 2096, 151-166, Düsseldorf.



## **Einfluss von Abblasrohren und deren Wetterschutzeinrichtungen auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck staubführender, druckentlasteter Anlagen**

**Dr.-Ing. M. Sippel**, DEKRA Testing and Certification GmbH, Bochum;  
**J. Wandt**, M. Eng., INBUREX Consulting GmbH, Hamm

### **Kurzfassung**

Anlagen, die zur Verarbeitung explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische genutzt werden, sind in vielen Fällen Gegenstand der sogenannten „konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen“ zur Beschränkung der Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß. In vielen Fällen werden hierzu Maßnahmen zur Reduzierung des maximal zu erwartenden Explosionsüberdrucks wie die Druckentlastung angewendet. Aus sicherheitstechnischen Gründen werden diese Anlagen oftmals zusätzlich mit Abblasrohren ausgestattet, die zur Ableitung von Explosionsflammen und Explosionsdruck in Bereiche dienen, in denen es nicht zu einer Personengefährdung kommen kann.

Die Anforderungen an Systeme zur Druckentlastung von Staubexplosionen werden u. a. in der EN 14491 definiert. Jüngste Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anwendung der in dieser Norm beschriebenen empirischen Formeln je nach Anlagenkonstellation zu einer Über- oder Unterschätzung des Einflusses von Abblasrohren mit und ohne Wetterschutzeinrichtungen führen kann. Die im Folgenden beschriebenen Versuche sollen zunächst in Ergänzung zu den oben erwähnten Versuchen weitere Erkenntnisse bzgl. möglicher Abweichungen aber auch Übereinstimmungen liefern.

### **1. Einführung**

Bei Anlagen, die zur Verarbeitung von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen dienen, sind oftmals Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zur Beschränkung der Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß vorzusehen, vgl. [1]. Hierzu sind ausreichend explosionsfeste Anlagen im Sinne der EN 14460 [3] erforderlich, die dem maximal zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten. Da explosionsfeste Anlagen z. B. im Vergleich zu Druckbehältern relativ komplexe Formen aufweisen, ist die Festigkeit der Anlagengehäuse bei noch vertretbarem Werkstoffeinsatz limitiert. Aus diesem Grund werden diese Anlagen mit Maßnahmen zur Druckentlastung des Explosionsüberdrucks ausgestattet. Die Druckentlas-

tung sorgt bei korrekter Auslegung dafür, dass der für die jeweilige Anlage ertragbare reduzierte maximale Explosionsüberdruck  $p_{red,max}$  nicht überschritten wird. Da der Druckentlastungsvorgang bei der ausschließlichen Verwendung von Berstscheiben oder Explosionsklappen als Druckentlastungseinrichtung immer mit austretendem Explosionsüberdruck und Flammen verbunden ist, werden oftmals Abblasrohre verwendet, welche die Flammen und den Explosionsüberdruck z. B. aus dem Gebäude ins Freie ableiten, um eine Personengefährdung sicher zu vermeiden. Die Verwendung von Abblasrohren führt jedoch oftmals zu einer Minderung der Wirksamkeit einer Druckentlastungseinrichtung. Dies ist einerseits bedingt durch den je nach Form des Abblasrohres auftretenden Strömungswiderstand und andererseits auch durch die Sekundärexplosion im Abblasrohr. Diese tritt auf, wenn der zuvor durch die Volumenexpansion im zu schützenden Behälter verdrängte unverbrannte Staub in das Abblasrohr eintritt und kurz danach durch die in das Abblasrohr eintretende Flamme gezündet wird. Wird an der Mündung des Abblasrohres ins Freie zusätzlich eine Wetterschutzeinrichtung genutzt, beeinflusst auch diese unter Umständen den Explosions- und Druckentlastungsablauf. Als weitere Variante der Druckentlastung wird teilweise eine Konstellation genutzt, bei der die Druckentlastung nicht zwischen Behälter und Abblasrohr sitzt, sondern als „endständige Druckentlastung“ an der Mündung des Abblasrohres ins Freie installiert ist und gleichzeitig die Aufgabe eines Wetterschutzes wahrnehmen soll.

Der Explosionsablauf in einem solchen druckentlasteten Behälter wird u. a. maßgeblich durch folgende Randbedingungen beeinflusst:

- Geometrie des zu schützenden Behälters,
- Explosionsschutztechnische Eigenschaften des explosionsfähigen Gemisches im zu schützenden Behälter,
- Anfangskonzentration des explosionsfähigen Gemisches,
- Zündinitial,
- Zündortlage,
- Anfangstemperatur, -turbulenz und -druck vor Gemischzündung,
- Position und Geometrie des Abblasrohres,
- Art und Ansprechdruck der Einrichtung zur Druckentlastung zwischen zu schützendem Behälter und angeschlossenem Abblasrohr,
- Art und Ansprechdruck der Wetterschutzeinrichtung an der Mündung des Abblasrohres ins Freie.

Die oben beschriebene Aufzählung macht deutlich, dass der Explosionsablauf durch eine Reihe komplexer Randbedingungen und physikalisch/chemischer Abläufe beeinflusst wird.

Der Einfluss von Abblasrohren war bereits in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, vgl. [6] und [7]. Um für unterschiedliche Anwendungsfälle eine praxisgerechte Auslegung zu ermöglichen, beschreibt mittlerweile die EN 14491:2012 „Druckentlastung von Staubexplosionen“ [2] in den Abschnitten 5.6 und 5.7 eine Systematik auf Basis empirischer Formeln mit im Vergleich zu oben erwähnter Aufzählung vergleichsweise wenigen Einflussgrößen, um den Einfluss von Abblasrohren mit den oben beschriebenen Einrichtungen zur Druckentlastung und zum Wetterschutz auf den reduzierten Explosionsüberdruck im zu schützenden Behälter abzuschätzen. Die Einflussgrößen sind hier:

- Reduzierter, maximaler Explosionsüberdruck im zu schützenden Behälter ohne Abblasrohr,
- Erforderliche Entlastungsfläche ohne Abblasrohr,
- Volumen des zu schützenden Behälters,
- Länge des Abblasrohres.

Die Norm gibt hier Grenzen des Anwendungsbereichs vor. Die oben erwähnte endständige Druckentlastung ist vom Anwendungsbereich ausgenommen. Eine Wetterschutzeinrichtung an der Mündung des Abblasrohres ins Freie ist nur zulässig, wenn der statische Ansprechdruck  $p_{\text{stat}}$  maximal 50 % des statischen Ansprechdrucks der Druckentlastung beträgt und die spezifische Masse dieser Einrichtung einen Wert kleiner  $0,5 \text{ kg m}^{-2}$  aufweist. Für die Form des Abblasrohres werden bestimmte Grenzen definiert, die den Strömungswiderstand und die Strömungsturbulenz begrenzen sollen, um den Entlastungsvorgang nicht in gefährlicher Weise zu behindern. Sämtliche Gleichungen gelten nicht für Metallstäube.

Man erkennt anhand dieser Aufstellung, dass der Anwendungsbereich vor dem Hintergrund der Vielzahl an Varianten insbesondere in der chemischen Prozessindustrie stark eingeschränkt ist. Zudem zeigten einzelne Explosionsversuche auf dem Testfeld der INBUREX Consulting GmbH in Möhnesee, an einem Explosionsbehälter mit einem Volumen von  $7 \text{ m}^3$ , dass der Einfluss des Abblasrohres für eine bestimmte Konstellation stark überschätzt, der Einfluss der Wetterschutzeinrichtung mit oben erwähnten Eigenschaften jedoch unterschätzt wird. Dies kann einerseits dazu führen, dass die Anlagenfestigkeit im Explosionsfall überschritten wird, andererseits kann dies zu einem unverhältnismäßig hohen Werkstoffeinsatz führen, um eine Explosionsfestigkeit zu erreichen, die aus sicherheitstechnischen Gründen nicht erforderlich ist.

Um hier einen tieferen Einblick in die Anwendbarkeit der in der EN 14491 beschriebenen Formeln für spezielle Anwendungsfälle zu bekommen, wurden auf dem o. g. Testfeld zusätzlich

zu den Versuchen an dem Explosionsbehälter mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup> Explosionsversuche mit einem druckentlasteten Behälter mit einem Volumen von 1 m<sup>3</sup>, mit Abblasrohren, Druckentlastungs- und Wetterschutzeinrichtungen durchgeführt. Ein wesentliches Merkmal dieser zusätzlichen Versuche war, dass im Gegensatz zur Forderungen der EN 14491 der statische Ansprechdruck der Wetterschutzeinrichtung demselben Wert entsprach, wie der statische Ansprechdruck der Druckentlastung zwischen Behälter und Abblasrohr.

## 2. Explosionsversuche – Beschreibung und Ergebnisauswertung

### 2.1 Explosionsversuche am Behälter mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup>

Diese Explosionsversuche wurden mit getrockneter Maisstärke an einem rechteckigen, nahezu quaderförmigen Explosionsbehälter mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup> und einem Länge/Durchmesser-Verhältnis von eins durchgeführt. Die Zündortlage befand sich jeweils nahezu in der Mitte des Explosionsbehälters. Die Zündenergie betrug 10 kJ. Der Staub wurde in Anlehnung an das in der Normenreihe EN 14034 (vgl. beispielsweise [4] und [5]) beschriebene Verfahren über Staubflaschen (Vordruck 10 bar statt 20 bar gem. vorgenannter Normenreihe) mit rohrförmigen Austrittsquerschnitten in den Explosionsbehälter vor Gemischzündung eingebracht. Die Zündverzögerung betrug jeweils 600 ms.

Die Explosionsfestigkeit des Behälters betrug ca. 300 mbar. Die Länge des Abblasrohres betrug ca. 1,5 m, die wirksame Druckentlastungsfläche aller verwendeten Berstscheiben betrug jeweils 0,5 m<sup>2</sup>, was ebenfalls annähernd der rechteckigen Abblasrohr-Querschnittsfläche entsprach. Ausgehend von einem Volumen von 7 m<sup>3</sup>, einem Länge/Durchmesser-Verhältnis (L/D) von 1, einer Explosionsfestigkeit von 200 mbar als Zielgröße zur Anlagendimensionierung, einem maximalen Explosionsüberdruck des Staubs von 9 bar, einem statischen Ansprechdruck der Berstscheibe von 100 mbar, ergibt sich gemäß EN 14491:2012 unter Annahme einer wirksamen Druckentlastungsfläche von 0,5 m<sup>2</sup> eine maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit des Staubs von 157 bar m s<sup>-1</sup>.

Der über das in der EN 14034-2 beschriebene Normverfahren ermittelte K<sub>St</sub>-Wert des Prüfstaubes lag für die Anfangskonzentration des Staubs im Explosionsbehälter von 1.000 g m<sup>-3</sup> bei ca. 200 bar m s<sup>-1</sup>. Umgerechnet wäre für die Nutzung eines Staubs mit einem K<sub>St</sub>-Wert von 200 bar m s<sup>-1</sup> für eine Explosionsfestigkeit von 200 mbar des Behälters mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup> bei ansonsten gleichen Randbedingungen, wie oben beschrieben, eine wirksame Druckentlastungsfläche von 0,64 m<sup>2</sup> erforderlich gewesen. Die eingestellten Versuchsrandbedingungen in Gestalt der Staubeinblasung und Zündverzugszeit stellten somit sicher, dass auch für den beschriebenen Prüfstaub und die Druckentlastungsfläche von 0,5 m<sup>2</sup> der Zielwert

des reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks von 200 mbar bei einem Explosionsversuch ohne Abblasrohr nicht signifikant überschritten wurde.

Für die Konstellation mit einem effektiven  $K_{St}$ -Wert von 157 bar m s<sup>-1</sup> der Explosionsversuche wäre gem. EN 14991:2012 eine Erhöhung des reduzierten Explosionsüberdrucks im Explosionsbehälter aufgrund des Abblasrohres mit einer Länge von 1,5 m auf einen Wert von **260 mbar** zu erwarten.

Es wurden mit diesem Versuchsaufbau Versuche mit einer Berstscheibe (statischer Ansprechdruck  $p_{stat} = 100$  mbar) am Explosionsbehälter ohne Abblasrohr, sowie mit einer Berstscheibe ( $p_{stat} = 100$  mbar) am Explosionsbehälter und dem oben erwähnten Abblasrohr sowie Versuche mit einer Berstscheibe ( $p_{stat} = 100$  mbar) am Explosionsbehälter und dem oben erwähnten Abblasrohr und einem Wetterschutz in Gestalt einer weiteren Berstscheibe ( $p_{stat} = 50$  mbar) durchgeführt.

Um während der Explosionsversuche mit Abblasrohr und ggf. Wetterschutz ein Aufreißen des Explosionsbehälters mit einem Auslegungsdruck von ca. 300 mbar zu vermeiden, wurde auf dem Dach des Explosionsbehälters eine zusätzliche Öffnung mit einer Querschnittsfläche von 0,92 m x 0,42 m = 0,39 m<sup>2</sup> vorgesehen. Diese Öffnung wurde vor Versuchsbeginn mit zwei Lagen Aluminiumfolie mit einer Stärke von jeweils 30 µm verschlossen. Der Ansprechdruck von zwei Lagen Aluminiumfolie während einer Explosion lag bei > 200 mbar. Die Tabelle 1 beschreibt die Versuchsergebnisse anhand des jeweils gemessenen reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks im Explosionsbehälter.

Tabelle 1: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 7 m<sup>3</sup> mit Maisstärke / effektiver  $K_{St}$ -Wert der Versuche ca. 160 bar m s<sup>-1</sup> / Anfangsstaubkonzentration 1.000 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr. | Abblasrohr<br>Länge 1,5 m | Berstscheibe               | $p_{stat}$<br>in mbar | Gemessener<br>$p_{pred,max}$ Behälter<br>in bar | $p_{pred,max}$ Behälter<br>gem.<br>EN 14491:2012 in<br>bar |
|----------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|---|--|
| 1        | Ohne                      | 1 x Behälter               | 100                   | 0,19  | 0,2  |
| 2        | 0,5 m <sup>2</sup>        | 1 x Behälter               | 100                   | 0,19  | <b>0,36</b>  |
| 3        | 0,5 m <sup>2</sup>        | 1 x Behälter + 1<br>x Rohr | 100 / 50              | 0,27*   | Siehe Versuch <b>2</b>                                     |

\* Druckentlastung auf dem Behälterdach ( $p_{stat} > 200$  mbar) hat geöffnet

Man erkennt anhand des Vergleichs von Versuch 2 mit Versuch 1, dass das mit 1,5 m vergleichsweise kurze Abblasrohr keinen Einfluss auf den reduzierten, maximalen Explosions-

überdruck im Explosionsbehälter ausübt. Der zu erwartende Explosionsüberdruck wird bei Anwendung der Formeln der EN 14491:2012 um 89 % überschätzt. Die EN 14491:2012 schätzt den Einfluss des Wetterschutzes in Form einer Druckentlastung mit einem statischen Ansprechdruck von 50 % des statischen Ansprechdrucks der Druckentlastung am Behälter als vernachlässigbar ein, was sich durch die Versuche gem. Tabelle 1 allerdings nicht bestätigt hat. Durch die Verwendung des Wetterschutzes steigt der reduzierte, maximale Explosionsüberdruck im Behälter im Vergleich zum Versuch 2 um mehr als 40 % an. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die Drucksteigerung ggf. noch höher ausgefallen wäre, wenn die Druckentlastung am Behälterdach zum Schutz der Behälterstruktur, die während des Versuchs 3 angesprochen hat, nicht vorhanden gewesen wäre und der Explosionsbehälter der Belastung standgehalten hätte. Ob der Explosionsdruck in diesem Fall den durch die EN 14491 berechneten Wert von 260 mbar erreicht oder überschritten hätte, konnte aufgrund der oben erwähnten begrenzten Festigkeit des Explosionsbehälters jedoch nicht abschließend geklärt werden.

## 2.2 Explosionsversuche am Behälter mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup>

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden weitere Explosionsversuche an einem Explosionsbehälter mit einem Volumen von 1 m<sup>3</sup> und mit einem Länge/Durchmesser-Verhältnis von eins durchgeführt. Der Durchmesser des Abblasrohres mit kreisförmigem Querschnitt wurde variiert und auch die Konstellation der Druckentlastungseinrichtungen, für diese Versuche in Gestalt von Berstfolien, wurde verändert. Als Berstfolie wurden Aluminiumfolien unterschiedlicher Dicke genutzt. Der statische Ansprechdruck  $p_{\text{stat}}$  dieser Folien wurde jeweils durch statische Druckprüfungen ermittelt. Die Montage der Folien bedingt aus der Erfahrung mit ähnlichen Versuchen gewisse Schwankungen des tatsächlichen Ansprechdrucks bei verschiedenen Versuchen von ca. +/- 10 mbar, die sich nicht vermeiden lassen. Die Tabelle 2 beschreibt die gemessenen Ansprechdrücke der beiden Folien mit unterschiedlicher Stärke bei den unterschiedlichen Rohrdurchmessern



Tabelle 2: Gemessene statische Ansprechdrücke der Folien bei verschiedenen Rohrdurchmessern

| Rohrdurchmesser / Folienstärke | Statischer Ansprechdruck $p_{\text{stat}}$ in mbar |
|--------------------------------|--|
| DN 300 / 50 $\mu\text{m}$      | Ca. 110  |
| DN 300 / 80 $\mu\text{m}$      | Ca. 280  |
| DN 500 / 50 $\mu\text{m}$      | Ca. 80   |
| DN 500 / 80 $\mu\text{m}$      | Ca. 150  |

Bei der Angabe der Versuchsergebnisse wird die Schwankungsbreite des statischen Ansprechdrucks in den jeweiligen Tabellen angegeben. Wenn in den Tabellen die mit dem Formelwerk der EN 14491 berechneten Werte angegeben werden, dann wurde für den statischen Ansprechdruck aus der o. g. Schwankungsbreite der Wert für die Formel der EN 14491 genommen, der im Ergebnis der Rückrechnung auf einen reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck zu der besten Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen geführt hat.

Als Abblasrohr wurden zwei Rohrleitungen DN 300 und DN 500 mit einer Länge von jeweils 3 m genutzt. Als Brennstoff wurde sowohl getrocknete Maisstärke als auch Holzstaub eingesetzt. Die über das in der Normenreihe EN 14034 beschriebene Verfahren ermittelten Werte des konzentrationsabhängigen maximalen Explosionsdrucks und des maximalen zeitlichen Druckanstiegs der Prüfstäube sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 beschrieben. Für diese Werte ist ebenfalls mit Schwankungen von ca.  $\pm 10\%$  bei der Bestimmung der Werte zu rechnen. Bzgl. der Angabe von Werten, die mit dem Formelwerk der EN 14491 berechnet wurden, gilt das bereits oben für den statischen Ansprechdruck erwähnte Vorgehen.

Tabelle 3: Konzentrationsabhängige Werte des maximalen Explosionsdrucks und Kenngröße des maximalen zeitlichen Druckanstiegs der getrockneten Maisstärke

| Konzentration in $\text{g m}^{-3}$ | Maximaler Explosionsdruck $P_{\text{max,Konz}}$ in bar | Kenngröße für den maximalen zeitlichen Druckanstieg $K_{\text{max,Konz}}$ in $\text{bar m s}^{-1}$ |
|------------------------------------|--|--|
| 500                                | 8,7  | 160  |
| 750                                | 8,9  | 176  |
| 1000                               | 8,3  | 131  |

Für die Explosionsversuche mit Maisstärke wurde bis auf einen orientierenden Versuch mit  $400 \text{ g m}^{-3}$  eine Konzentration von  $1000 \text{ g m}^{-3}$  genutzt um für die gewählten Versuchsbedingungen sicher zu stellen, dass eine ausreichende Staubmenge für die Sekundärexplosion in der Rohrleitung zur Verfügung steht.

Tabelle 4: Konzentrationsabhängige Werte des maximalen Explosionsdrucks und Kenngröße des maximalen zeitlichen Druckanstiegs des Holzstaubs

| Konzentration in g<br>$\text{m}^{-3}$ | Maximaler Explosionsdruck $P_{\text{max,Konz}}$ in<br>bar | Kenngröße für den maximalen zeitlichen<br>Druckanstieg $K_{\text{max,Konz}}$ in bar m<br>$\text{s}^{-1}$ |
|---------------------------------------|---|--|
| 750                                   | 7,1   | 73   |
| 1000                                  | 7,2   | 80   |

Für die Explosionsversuche mit Holzstaub wurde eine Konzentration von  $750 \text{ g m}^{-3}$  gewählt, um im Gegensatz zu den Versuchen mit Maisstärke einen insgesamt eher moderaten Explosionsablauf bei gleichzeitig ausreichender Staubmenge für die Explosion in der Rohrleitung zu erzeugen.

Die Zündortlage befand sich jeweils in der Mitte des Explosionsbehälters. Die Zündenergie betrug 10 kJ. Der Staub wurde in Übereinstimmung mit dem in der Normenreihe EN 14034 beschriebenen Verfahren mittels Staubflasche (Vordruck 20 bar) über eine Ringdüse in den Explosionsbehälter vor Gemischzündung eingebracht. Die Zündverzögerung betrug jeweils 600 ms. Die Abbildung 1 zeigt den Prüfstand mit dem Explosionsbehälter mit einem Volumen von  $1 \text{ m}^3$ , dem Abblasrohr mit einer Länge von 3 m und der Berstfolie an der Mündung des Abblasrohres ins Freie (Wetterschutz).

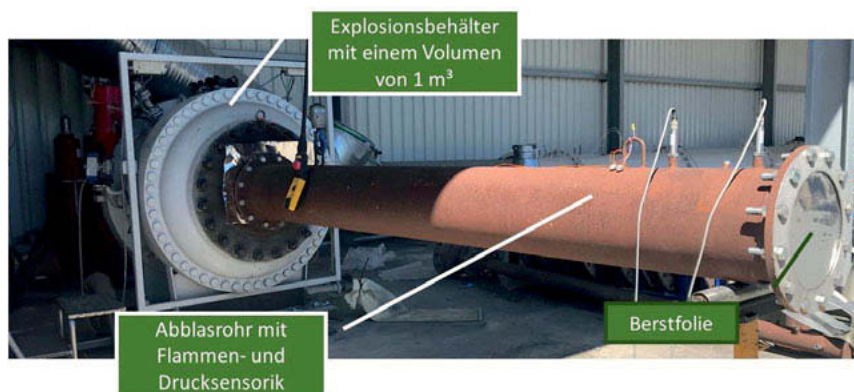


Bild 1: Versuchsaufbau des Prüfstands mit Explosionsbehälter  $1 \text{ m}^3$ , Abblasrohr und Berstfolie

Die Tabelle 5 beschreibt die ermittelten Ergebnisse anhand des gemessenen reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks im Explosionsbehälter.

Tabelle 5: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 1 m<sup>3</sup> mit Maisstärke / Anfangsstaubkonzentration 1000 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr. | Abblasrohr<br>Länge 3 m | Berstfolie<br>DN 300       | p <sub>stat</sub><br>in mbar | Gemessener<br>p <sub>pred,max</sub> Behälter<br>in bar | p <sub>pred,max</sub> Behälter<br>gem.<br>EN 14491:2012 in<br>bar |
|----------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--|---|
| 1        | Ohne                    | 1 x Behälter               | 100-120                      | 0,62   | 0,51 <sup>BW</sup>  |
| 2        | DN 300                  | 1 x Behälter               | 100-120                      | 2,18   | 0,89 <sup>BW</sup> /1,09 <sup>MW</sup>                            |
| 3        | DN 300                  | 1 x Behälter + 1<br>x Rohr | 100-120 / 100-<br>120*       | 2,18   | ---*  |
| 4        | DN 300                  | Ohne                       | --                           | 1,77   | ---*  |
| 5        | DN 300                  | 1 x Rohr*                  | 100-120                      | 2,00   | ---*  |

\* Außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 14491:2012

BW: Mittels der EN 14491 berechneter Wert

MW: Mittels der EN 14491 berechneter Wert, wobei p<sub>pred,max</sub> aus der Messung für den Versuch ohne Abblasrohr übernommen wurde

Die Ergebnisse in Tabelle 5 zeigen, dass das Formelwerk der EN 14491 für den beschriebenen Anwendungsfall die zu erwartenden reduzierten Explosionsdrücke unterschätzt (Versuch 1) und im Falle der Verwendung des Abblasrohres (Versuch 2) deutlich zu niedrig berechnet. Selbst im Falle der Verwendung des Abblasrohres ohne jegliche Berstfolie (Versuch 4) liegt der gemessene reduzierte, maximale Explosionsüberdruck des Explosionsversuchs 38 % (MW-Wert) bis 50 % (BW-Wert) höher, als der jeweilige berechnete Wert des EN 14491:2012. Im Vergleich der Ergebnisse des Versuchs Nr. 2 mit Versuch 3 ist hingegen zu sehen, dass der zusätzliche Wetterschutz in Gestalt der zusätzlichen Berstfolie an der Kanalmündung ins Freie mit einem Ansprechdruck identisch zum Ansprechdruck der Berstfolie am Behälter zu identischen reduzierten, maximalen Explosionsüberdrücken führt. Ein signifikanter Einfluss der zusätzlichen Berstfolie, die entgegen der Forderung in der EN 14491:2012 sogar einen statischen Ansprechdruck aufweist, wie die der Berstfolie zwischen Behälter und Rohrleitung, ist hier nicht zu erkennen.

Die endständige Berstfolie im Versuch 5 hat ebenfalls kaum Einfluss auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck im Vergleich zu Versuch 2 und Versuch 3.

Ein tendenziell ähnliches Bild ergibt sich, wenn der Rohrdurchmesser sowie sämtliche Druckentlastungseinrichtungen auf einen Durchmesser von 500 mm vergrößert werden, vgl. Tabelle 6.

Tabelle 6: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 1 m<sup>3</sup> mit Maisstärke / Anfangsstaubkonzentration 1000 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr. | Abblasrohr Länge 3 m | Berstfolie DN 500       | p <sub>stat</sub> in mbar | Gemessener p <sub>pred,max</sub> Behälter in bar | p <sub>pred,max</sub> Behälter gem. EN 14491:2012 in bar |
|----------|----------------------|-------------------------|---------------------------|--|--|
| 6        | Ohne                 | 1 x Behälter            | 70-90                     | 0,14   | 0,09* <sup>BW</sup> entspr. p <sub>stat</sub>            |
| 7        | DN 500               | 1 x Behälter            | 70-90                     | 0,58   | 0,43 <sup>BW</sup> / 0,68 <sup>MW</sup>                  |
| 8        | DN 500               | 1 x Behälter + 1 x Rohr | 70-90 / 70-90*            | 0,65   | —*   |
| 9        | DN 500               | 1 x Rohr*               | 70-90                     | 0,72   | —*   |

\* Außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 14491:2012

<sup>BW</sup>: Mittels der EN 14491 berechneter Wert

<sup>MW</sup>: Mittels der EN 14491 berechneter Wert, wobei p<sub>pred,max</sub> aus der Messung für den Versuch ohne Abblasrohr übernommen wurde

Auch hier wird der Wert des reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks ohne Abblasrohr (Versuch 1) durch die EN 14491:2012 unterschätzt. Im Falle der Verwendung eines Abblasrohres mit einer Länge von 3 m im Vergleich zum Explosionsversuch stimmen die Werte überein (Versuch 7). Wird der Messwert für die Berechnung nach EN 14491 übernommen, wird der Einfluss des Abblasrohres geringfügig überschätzt, liegt jedoch innerhalb der typischen Schwankungsbreite vergleichbarer Explosionsversuche.

Man erkennt über den Vergleich des Versuchs 8 mit Versuch 7 den Einfluss des Wetterschutzes mit identischem Ansprechdruck im Vergleich zur Berstfolie am Behälter, der nun zu einer leichten Erhöhung des reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks von ca. 12 % führt.

Die endständige Druckentlastung (Versuch 9) führt nun zu einer weiteren und deutlichen Steigerung des reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks im Vergleich zu Versuch 7 um ca. 24 %.

Bei den Versuchen mit Staub eines relativ niedrigen K<sub>St</sub>-Wertes (Holzstaub - Tabelle 8) bei ansonsten identischen Randbedingungen zu den Versuchen mit einem höheren K<sub>St</sub>-Wert (Maisstärke - Tabelle 5) ist eine ähnliche Tendenz zu erkennen.

Tabelle 7: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 1 m<sup>3</sup> mit Holzstaub / Anfangsstaubkonzentration 750 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr. | Abblasrohr<br>Länge 3 m | Berstfolie<br>DN 300       | p <sub>stat</sub><br>in mbar | Gemessener<br>p <sub>pred,max</sub> Behälter<br>in bar | p <sub>pred,max</sub> Behälter<br>gem.<br>EN 14491:2012 in<br>bar |
|----------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--|---|
| 10       | DN 300                  | 1 x Behälter               | 100-120                      | 0,40   | 0,26 <sup>BW</sup>  |
| 11       | DN 300                  | 1 x Behälter +<br>1 x Rohr | 100-120 / 100-<br>120*       | 0,36   | --*   |

\* Außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 14491:2012

<sup>BW</sup>: Mittels der EN 14491 berechneter Wert

Der zusätzliche Wetterschutz (gleicher Ansprechdruck wie die Berstfolie am Behälter) übt kaum einen Einfluss auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck aus (Vergleich des Versuchs 11 mit Versuch 10). Die EN 14491 unterschätzt insgesamt den Einfluss des Abblasrohrs. Die Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Ausstoß des unverbrannten Staubs während des Druckentlastungsvorgangs der im Außenbereich in Form einer Sekundärexplosion gezündet wird.



Bild 2: Ausstoß von unverbranntem Staub mit Zündung der Staub/Luft-Wolke im Außenbereich

Für beide Prüfstäube wurden weitere Versuche mit Berstfolien, die einen im Vergleich zu den oben beschriebenen Versuchen erhöhten Ansprechdruck von ca. 280 mbar aufweisen, durchgeführt. Die Versuchsrandbedingungen und Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellt. Bei den Versuchen gem. Tabelle 8 ist bereits bei den Versuchen ohne Abblasrohr aufgrund des sich einstellenden reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks > 2 bar der Anwendungsbereich der EN 14491:2012 überschritten. Dies gilt für beide Versuchsreihen (Tabelle 8 und Tabelle 9) ebenso aufgrund des statischen Ansprechdrucks > 200 mbar, insofern wurde auf die Darstellung der über die EN 14491 berechneten Werte für diese Versuchsreihen verzichtet.

Tabelle 8: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 1 m<sup>3</sup> mit Maisstärke / Anfangsstaubkonzentration 1.000 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr.         | Abblasrohr Länge 3 m | Berstfolie DN 300       | p <sub>stat</sub> in mbar | Gemessener p <sub>pred,max</sub> Behälter in bar |
|------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| 12               | Ohne                 | 1 x Behälter            | 270-290*                  | 1,35   |
| 13               | DN 300               | 1 x Behälter            | 270-290*                  | 2,80*  |
| 14a              | DN 300               | 1 x Behälter + 1 x Rohr | 270-290* / 270-290*       | 2,66*  |
| 14b <sup>1</sup> | DN 300               | 1 x Behälter + 1 x Rohr | 270-290* / 270-290*       | 2,66*  |

\* Außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 14491:2012

<sup>1</sup> Orientierender Versuch mit eine Anfangskonzentration des Staubs von 400 g m<sup>-3</sup>

Tabelle 9: Versuchsergebnisse Explosionsbehälter 1 m<sup>3</sup> mit Holzstaub / Anfangsstaubkonzentration 750 g m<sup>-3</sup>

| Lfd. Nr. | Abblasrohr Länge 3 m | Berstfolie DN 300       | p <sub>stat</sub> in mbar | Gemessener p <sub>pred,max</sub> Behälter in bar |
|----------|----------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| 15       | DN 300               | 1 x Behälter            | 270-290*                  | 1,22   |
| 16       | DN 300               | 1 x Behälter + 1 x Rohr | 270-290* / 270-290*       | 1,10   |

\* Außerhalb des Anwendungsbereichs der EN 14491:2012

Die Versuche mit erhöhtem statischen Ansprechdruck zeigen sowohl für die Maisstärke gem. Tabelle 8 als auch für den Holzstaub gem. Tabelle 9 kaum einen Einfluss des Wetterschutzes am Abblasrohr auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck im Behälter. Vergleichbar zu den Ergebnissen in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 ist bei Verwendung eines Wetterschutzes mit identischem Ansprechdruck im Vergleich zur Druckentlastung am Behälter tendenziell sogar ein geringes Absinken des reduzierten, maximalen Explosionsüberdrucks im Explosionsbehälter erkennbar. Der orientierende Versuch 14 b mit einer Anfangskonzentration von  $400 \text{ g m}^{-3}$  zeigt identische Ergebnisse zum Versuch 14a, da die explosionsschutztechnischen Kenngrößen bei dieser Staubkonzentration ähnlich zu denen bei einer Konzentration von  $1000 \text{ g m}^{-3}$  sind, vgl. Tabelle 3.

Die Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Gasfreistrahle während Versuch 12 mit relativ hohem reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck, bei dem sich aufgrund der Überschallströmung im Abblasrohr im Außenbereich die sog. „Mach'schen Knoten“ bilden, vgl. [8].

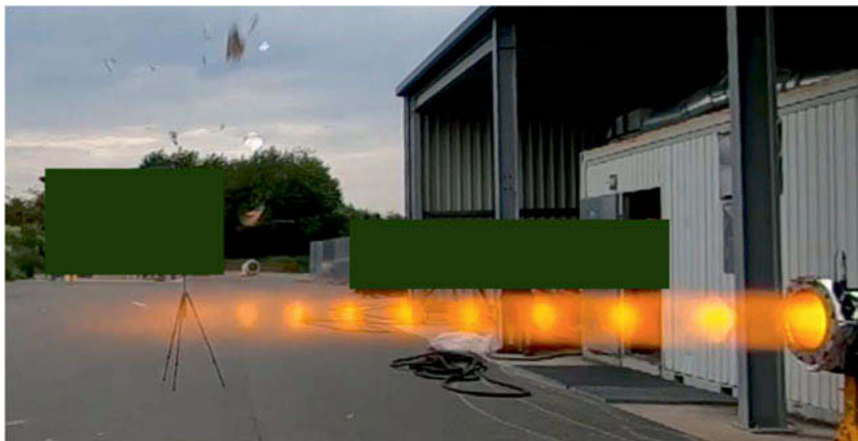


Bild 3: Gasfreistrahle während einer Druckentlastung mit hohem Explosionsdruck im Explosionsbehälter einschließlich Ausbildung der „Mach'schen Knoten“ in der Überschallströmung

### 3. Zusammenfassung und Fazit

Zur Vertiefung des Verständnisses der Einflüsse von Abblasrohren mit und ohne Wetterschutzeinrichtungen auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck in druckentlasteten

Behältern wurden Staubexplosionsversuche mit zwei verschiedenen Explosionsbehältern und unterschiedlichen Abblasrohren, Druckentlastungs- und Wetterschutzeinrichtungen durchgeführt. Hierbei zeigte sich bzgl. des oben erwähnten Einflusses trotz einer eng begrenzten Versuchszahl folgende Tendenzen:

1. Der Einfluss des Abblasrohres ist sehr stark abhängig von der Rohrlänge, was in Übereinstimmung mit der EN 14491:2012 zu sehen ist.
2. Der Einfluss eines relativ kurzen Abblasrohres wird zum Teil jedoch durch die EN 14491 deutlich überschätzt.
3. Der Einfluss einer Wetterschutzeinrichtung auch bei einem relativ niedrigen statischen Ansprechdruck dieses Wetterschutzes scheint größer zu werden, wenn der Explosionsablauf im Behälter ohne Abblasrohr zu einem eher niedrigen reduzierten Explosionsüberdruck  $< 200$  mbar führt. Dies wird durch die EN 14491:2012 nicht wiedergegeben, wenngleich diese Tendenz vielmehr für den Einfluss des Abblasrohres ohne Wetterschutz durch die EN 14491:2012 prognostiziert wird.
4. Der Einfluss zumindest der normgerechten Wetterschutzeinrichtung scheint bei der Konstellation gem. Punkt 3. umso größer zu sein, je geringer der Einfluss des Abblasrohres auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck ausfällt, somit bei eher geringer Rohrlänge. Der Effekt der Wetterschutzeinrichtung kann auch bei relativ niedrigem Ansprechdruck die geringere Einflussnahme des kurzen Abblasrohres kompensieren bzw. übersteigen. Letzteres kann zumindest derzeit nicht sicher ausgeschlossen werden. Dies wird durch die EN 14491:2012 nicht wiedergegeben.
5. Eine erhöhte Behinderung des Druckentlastungsvorgangs durch einen Wetterschutz, der bzgl. seines statischen Ansprechdrucks dem Wert der Druckentlastung am zu schützenden Behälter entspricht, konnte bei keinem der Versuche eindeutig nachgewiesen werden. Die Notwendigkeit der Forderung der EN 14491 auf eine Begrenzung des statischen Ansprechdrucks des Wetterschutzes auf 50 % des Wertes der Druckentlastung am Behälter konnte zumindest durch die oben beschriebenen Versuche nicht eindeutig nachvollzogen werden.

Die oben dargestellten Versuche bilden nur einen sehr kleinen Teil der möglichen Konstellationen an druckentlasteten Systemen ab, die in der Prozessindustrie zu finden sind. Anzumerken ist jedoch, dass sich bereits in diesem oben beschriebenen engen Rahmen teilweise deutliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Explosionsversuche und den Ergebnissen des Formelwerks der EN 14491:2012 bei der Einschätzung des Einflusses von Abblasrohren



mit oder ohne Wetterschutzeinrichtungen auf den reduzierten, maximalen Explosionsüberdruck im zu schützenden Behälter ergeben haben. Bei ähnlichen Konstellationen kann hier eine gefährliche Fehlauslegung bzgl. der Explosionsfestigkeit des zu schützenden Behälters nicht ausgeschlossen werden. Die Notwendigkeit der Beschränkung des statischen Ansprechdrucks auf maximal 50 % des Wertes des statischen Ansprechdrucks der Druckentlastung zwischen Behälter und Rohrleitung konnte zumindest mittels der hier beschriebenen Versuche nicht bestätigt werden.

Gleichfalls wurde der Einfluss eines vergleichsweise kurzen Abblasrohres am Behälter mit einem Volumen von 7 m<sup>3</sup> deutlich überschätzt, was zu einer sehr konservativen Bauteilauslegung mit hohem Materialeinsatz führen kann. Der Einfluss des Wetterschutzes mit normgerechten Eigenschaften wurde im weiteren Verlauf wiederum deutlich unterschätzt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass weitere experimentelle Untersuchungen angeraten sind, um die hierfür relevanten chemisch/physikalischen Effekte besser einschätzen zu können. Es muss auch aufgrund der bislang bekannten Limitierung des Anwendungsbereichs der EN 14491, z. B. bei der Verwendung von endständigen Druckentlastungseinrichtungen, festgehalten werden, dass diese speziellen Konstellationen derzeit experimentell untersucht werden müssen, um eine sichere Auslegung der Druckentlastung zu ermöglichen.

- [1] TRGS 724 „Gefährliche explosionsfähige Gemische – Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken“, Ausgabe 07/2019
- [2] EN 14491:2012, Druckentlastung von Staubexplosionen
- [3] EN 14460:2018, Explosionsfeste Geräte
- [4] EN 14034-1:2004+A1:2011, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes  $p_{\max}$  von Staub/Luft-Gemischen
- [5] EN 14034-22:2006+A1:2011, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs  $(dp/dt)_{\max}$  von Staub/Luft-Gemischen
- [6] Siwek, R.: Druckentlastung über Abblasrohre – Vergleich der Methoden, 9/2002, Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, Springer Verlag
- [7] Bartknecht, W.: Einfluss von Abblasrohren auf die Druckverstärkung in entlasteten kubischen und langgestreckten Behältern mit homogener und inhomogener Staubverteilung bei spezieller Berücksichtigung von Wirbelschicht-Apparaturen, Freiberg, 23.02.1998
- [8] Norman, M. L., Winkler, K. H. A.: Supersonic Jets, Spring/Summer, 1985, Los Alamos Science

# Explosionsschutz Ad Absurdum – das ATEX-Paradoxon

## Kuriositäten aus Explosionsschutzkonzepten und die zentrale Frage: Quo Vadis, ATEX?!

Dr.-Ing. **Johannes Lottermann, Marius Bloching, M.Sc.**,  
REMBE® GmbH Safety + Control, Brilon

### Kurzfassung

26 Jahre Richtlinie 94/9/EG (heute: 2014/34/EU), 21 Jahre Richtlinie 1999/92/EG und damit rund ein Vierteljahrhundert mutmaßlich harmonisierter Explosionsschutz innerhalb der Europäischen Union – Anlass genug, Bilanz zu ziehen und sich kritisch der Frage zu stellen, ob den Leitgedanken von damals aus heutiger Sicht vollumfänglich entsprochen wird und ob deren Implementierung in der betrieblichen Praxis zu erhöhter (Rechts)Sicherheit geführt hat. Das vorliegende Manuskript erhebt dabei keinen Anspruch auf (wissenschaftliche) Vollständigkeit oder gar eine abschließende systematische Beurteilung. Vielmehr möchten die Autoren, frei von politischer oder diplomatischer Etikette, anlässlich des möglicherweise bedeutenderen Ereignisses, nämlich des 50. Jubiläums der „traditionellen Institution“ der VDI-Fachtagung „Sichere Handhabung brennbarer Stäube“, die 1970 einst als Kolloquium zur „Verhütung von Staubbränden und Staubexplosionen“ ihren Ursprung nahm, den Teilnehmern und Lesern Impulse zum Nach- und Überdenken geben aber auch ein bisschen zum Schmunzeln einladen.

### 1. Ursprüngliche Leitgedanken und Ziele der ATEX

Eine Anmerkung haben die Autoren vorab: Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden der Terminus ATEX gleichermaßen synonym für den Explosionsschutz aus Sicht der maßgeblich für Hersteller relevanten Richtlinien 94/9/EG bzw. 2014/34/EU als auch der vorrangig an Betreiber adressierten Richtlinie 1999/92/EG verwendet.

Leitgedanken und Ziele der ATEX finden sich originär in den Gründen zur Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlamentes und Rates zur Angleichung (später in Richtlinie 2014/34/EU: Harmonisierung) der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Darin heißt es:

„Das Sicherheitsniveau in den einzelnen Mitgliedstaaten wird durch zwingende Vorschriften bestimmt, denen Geräte und Schutzvorrichtungen zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen entsprechen müssen. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um technische Vorschriften auf dem Gebiet der Elektrik und auch auf anderen Gebieten, die Konzeption und Bau solcher Geräte beeinflussen. Innerhalb der einzelnen Mitgliedstaaten unterschiedlich umfangreiche Anforderungen und Abweichungen bei den vorgeschriebenen Prüfverfahren führen zu Ungleichheiten, die den freien Warenverkehr innerhalb der Gemeinschaft hemmen. Nur durch eine Harmonisierung der einzelstaatlichen Rechtsvorschriften können diese Hindernisse des freien Warenverkehrs beseitigt werden. Dieses Ziel kann durch die einzelnen Mitgliedstaaten nicht erreicht werden. In dieser Richtlinie werden lediglich die für den freien Warenverkehr der ihr unterfallenden Produkte unerlässliche Anforderungen festgelegt. Diese Richtlinie definiert daher nur die grundlegenden Anforderungen. Um den Nachweis zu erleichtern, dass ein Gerät diesen Anforderungen entspricht, müssen auf europäischer Ebene einheitliche Normen geschaffen werden, und zwar insbesondere für den nichtelektrischen Bereich des Explosionsschutzes; diese Normen müssen Konzeption, Bau und Prüfungen der Geräte und Vorrichtungen umfassen, und ihre Einhaltung stellt sicher, dass bei einem Produkt von der Einhaltung der grundlegenden Anforderungen für die Konformitätsbescheinigung ausgegangen werden kann.“

In Ergänzung dazu wurde mit der Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können, eine ergänzende Richtlinie geschaffen, die sich insbesondere mit der Gefahr durch Explosionen aufgrund der Verwendung und/oder der Art und Weise der Installation der Geräte befasst. Zur Begründung dieser Richtlinie heißt es ferner: „Die Verbesserung der Sicherheit, der Arbeitshygiene und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer am Arbeitsplatz ist ein Ziel, das nicht rein wirtschaftlichen Überlegungen untergeordnet werden sollte. Die Einhaltung der Mindestvorschriften ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer.“

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine kursorische Prüfung der Wirksamkeit der Implementierung der Leitgedanken von Gleichheit und Harmonisierung einerseits und Sicherheit und Gesundheitsschutz andererseits.

## 2. Zur Gleichheit und Harmonisierung in der betrieblichen Praxis

Der Theorie nach ist es ganz einfach und letztlich auch im Kern systematisch und methodisch transparent: Die Europäische Richtlinie adressiert Anforderungen, die in harmonisierten Normen konkretisiert werden und die die Basis für allfällige Konformitätsbewertungen von Herstellern in Zusammenarbeit mit benannten, notifizierten Stellen bilden.

Bei aller formaljuristischen Korrektheit wird jedoch der Faktor Mensch entscheidend unterschätzt: Vielmehr als Feststellung denn als Kritik gemeint liegt doch auf der Hand, dass nicht jeder Mensch in allem gleich gut sein kann: Konformitätsbewertungsstellen die beispielsweise für die EU-Baumusterprüfung autonomer Schutzsysteme notifiziert sind, deren Mitarbeiter aber zum ersten Mal eine Zellenradschleuse gemäß EN 15089 als Explosions-Entkopplungssystem oder eine Berstscheibe als Einrichtung zur Explosionsdruckentlastung nach EN 14797 prüfen und zulassen sollen, können bei aller normativer Transparenz aber letztlich nicht vergleichbar zu einer anderen benannten, notifizierten Stelle mit mehr Prüferfahrung sein. Selbst im internen Vergleich ist es doch letztlich nur allzu menschlich nachvollziehbar, dass sich mit zunehmender Prüferfahrung mit/an bestimmten Geräten oder Schutzsystemen, die Bewertungsmuster durch die Mitarbeiter ändern und sich letztlich sogar die Inhalte von EU-Baumusterprüfbescheinigungen unterscheiden können. In der betrieblichen Praxis äußert sich das oftmals trotz oder sogar entgegen der Zielstellung der Gleichheit beispielsweise in der Unantastbarkeit ehemals ausgestellter Zulassungen.

Nicht zuletzt infolge der in der Begründung zur Richtlinie 94/9/EG selbst erwähnten Relevanz für eine hohe Anzahl von Bereichen des Handels und der Industrie und deren beträchtliche wirtschaftliche Bedeutung einerseits aber auch der menschlichen Komponenten Stolz und Ehre andererseits mag es kaum verwundern, dass jeder Mitgliedstaat (die Notifizierung) eigene(r) Konformitätsbewertungsstellen in der Praxis priorisiert und entsprechend vorantreibt. Entsprechend groß sind die Mannigfaltigkeit und damit letztlich aber auch die immer oftmals zitierte und diplomatisch häufig tolerierte Qualitätsvarianz notifizierter Stellen.

Insbesondere vor diesem Hintergrund ist mit der Richtlinie 2014/34/EU der Versuch einer Neufassung zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen unternommen worden – so heißt es auszugsweise ganz konkret: „Die Erfahrung hat gezeigt, dass die in der Richtlinie 94/9/EG enthaltenen Kriterien, die von den Konformitätsbewertungsstellen zu erfüllen sind, damit sie von der Kommission notifiziert werden können, nicht dafür ausreichen, unionsweit ein einheitlich hohes Leistungsniveau der notifizierten Stellen

zu gewährleisten. Es ist aber besonders wichtig, dass alle notifizierten Stellen ihre Aufgaben auf gleichermaßen hohem Niveau und unter fairen Wettbewerbsbedingungen erfüllen. Dies erfordert mithin die Festlegung von verbindlichen Anforderungen für die Konformitätsbewertungsstellen, die eine Notifizierung für die Erbringung von Konformitätsbewertungsleistungen anstreben.“ Ferner soll ein einheitliches Qualitätsniveau bei der Konformitätsbewertung dadurch sichergestellt werden, indem einheitliche Anforderungen an andere Stellen, die bei der Bewertung, Notifizierung und Überwachung von notifizierten Stellen tätig sind, festgelegt werden. Der Einsatz von Akkreditierungssystemen, der Austausch von Beurteilungen nationaler Behörden zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit als auch die Möglichkeit anderer Mitgliedstaaten Einwände gegenüber notifizierten Stellen zu erheben, sowie nicht zuletzt eine zweckmäßige Koordinierung und Zusammenarbeit soll(ten) daher die Gleichbehandlung der Wirtschaftsakteure gewährleisten.

Die Praxis sieht dabei jedoch auch heute leider oftmals noch anders aus: Unterschiedliche Auslegungen und Interpretationen normativer Anforderungen kennzeichnen dabei nur die berühmte Spitze des Eisberges. Während erfahrene Konformitätsbewertungsstellen unterschiedliche Effekte zu bewerten wissen, wonach beispielsweise farb- oder materialstärkebedingte Kühleffekte von Rohrleitungen und Testbehältern oder gar Witterungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung oder frischkühle Temperaturen der Testbehälter am Prüfmorgen Einflüsse auf die Prüfergebnisse haben können, vermischen andere Prüfstellen beispielsweise noch sicherheitstechnische Kenngrößen wie den  $K_{St}$ -Wert mit  $dp/dt$ -Werten, unterschätzen gar deren Temperatur-, Konzentrations- oder Einblasevordrucksabhängigkeit. Auf normativer Ebene wurde dieser Umstand jüngst erkannt und perspektivisch angegangen.

Hinzu kommen jedoch auch technische Herausforderungen zur exakten, innerhalb enger Toleranzen liegenden Reproduktion von Versuchen, die sich neben den voran genannten Effekten auch aus den Prüfstäuben selbst ergeben können. Das wird gerade dann deutlich, wenn die Realisierung komplexer Prüfaufbauten, beispielsweise für Rückschlagklappen in DN 1000 im s. g. Push-Flow-Verfahren zur explosionstechnischen Entkopplung erfolgen soll. Kritisch sind dabei insbesondere die rein aus ökonomischen und wettbewerbsmäßigen Aspekten heraus angebotenen Schnellverfahren notifizierter Stellen zu sehen, bei denen letztlich die Gefahr besteht, dass infolge abgespekter Prüfumfänge nicht alle Mängel von Geräten oder Schutzsystemen im Rahmen der EU-Baumusterprüfung aufgedeckt werden können.

Derartige diplomatische als auch technische Herausforderungen bestehen nicht zuletzt auch in der Marktüberwachung. Wirksamkeit, Zuverlässigkeit und vor allem deren Qualität hängen auch hier stark von der technischen Kompetenz und der Erfahrung der Mitarbeiter, d. h. der Menschen hinter der Marktüberwachung, ab.

Ob in diesem gesamten v. g. Kontext von Gleichheit oder gar (Fair)gleichbarkeit gesprochen werden kann, stellen die Autoren zur Diskussion.

### **3. Zur Sicherheit und zum Gesundheitsschutz in der betrieblichen Praxis**

Der voran genannten Politisierung des Explosionsschutzes auf Herstellerseite steht bei kritischer Betrachtung eine Kommerzialisierung des Explosionsschutzes auf Betreiberseite gegenüber. Explosionsschutz verkommt mitunter bei Lieferanten zur Ware, und beim Anlagenbetreiber zum notwendigen Kostenübel – schnell spielt der eigentliche Zweck, nämlich das Retten von Leben, eine untergeordnete Rolle. Hinzu kommt, dass infolge des gefährdungsorientierten Ansatzes einerseits und eines liberalen Beurteilungsspielraumes zur Anerkennung oder Benennung von Sachverständigen, befähigten Personen o. ä. andererseits ferner auch hier die Mannigfaltigkeit an Interpretationen, Erfahrung und Qualität der beteiligten Akteure entsprechend groß ist.

Selbst bei großen Prüfororganisationen und zugelassenen Überwachungsstellen (ZÜS) konnte dies in der Vergangenheit durch die Autoren beobachtet werden: „Heute Dampfkessel, morgen Aufzugsanlagen, übermorgen Druckbehälter und am Donnerstag noch ne Ex-Anlage“ – obgleich es überraschend erscheinen mag: Auch dort arbeiten am Ende des Tages Menschen, von denen man unter Berücksichtigung des oft herrschenden Wettbewerbs-, Zeit- und Leistungsdruckes nur kursorische Bewertungen erwarten darf. Letztlich kann auch weder der erfahrenste TÜV-Sachverständige noch der bestausgebildetste Technische Aufsichtsbeamte der Berufsgenossenschaft oder auch ein noch so sicherheits- und technikaffiner Beamter der Arbeitsschutzverwaltung bzw. der Gewerbeaufsicht nicht jede explosionstechnische Besonderheit im Detail wissen. Die Klaviatur des Explosionsschutzes mit all ihren Spezialthemen von der Elektrostatik, über den nichtelektrischen Explosionsschutz bis hin zur Auslegung autonomer Schutzsysteme bei Spezialmaschinen oder den Einfluss von Prozessparametern auf die sicherheitstechnischen Kenngrößen ist bekanntermaßen von komplexer Natur. Wo die Herausforderung für Mitarbeiter der Konformitätsbewertungsstellen in den Geräten und Schutzsystemen besteht, haben v. g. Akteure zusätzlich in der betriebspraktischen Vielfalt von Anlagen, industrie- und betreiberspezifischen Besonderheiten sowie stoffeigenen Eigen-

schaften ihre tägliche Herausforderung. Selbiges gilt natürlich in absolut gleicher Weise für Mitarbeiter von Herstellern von Geräten und autonomen Schutzsystemen bei der Ausarbeitung von technischen Schutzkonzepten oder gar den Menschen in den Sicherheitsabteilungen der Betreiber selbst.

Folglich kann auch hier das Ergebnis der kursorischen Bewertung nur sein, dass die Erreichung und die Wirksamkeit der Ziele von Sicherheit und Gesundheitsschutz zur Diskussion zu stellen ist.

#### **4. Beispiele aus der betrieblichen Praxis – Explosionsschutz ad absurdum?**

Der Blumenstrauß an diskussionsbedürftigen, fragwürdigen, sicherheitskritischen aber auch zum Schmunzeln anregenden Beispielen, ist bei allem Respekt und ohne den Keim einer Arroganz seitens der Autoren aufkeimen lassen zu wollen, eines: Sehr bunt! So konnten die Autoren infolge ihrer beruflich bedingten Nähe zu betrieblichen Fragestellungen des Explosionsschutzes nahezu täglich Beobachtungen kurioser Natur machen. Die im Folgenden genannten Beispiele sind bewusst vor dem Hintergrund ausgewählt worden, im Sinne eines Weckrufes zur kritischen und konstruktiven Hinterfragung des Status quo des ATEX-Gedankens anzuregen, gar zu provozieren:

Im ersten Beispiel wurde durch eine benannte Stelle eine (damals noch) EG-Baumusterprüfbescheinigung für eine Hammermühle als 1D-Gerät erteilt. Infolge der (technisch unmöglichen) nicht zündquellenfreien Bauweise der Mühle enthielt die EG-Baumusterprüfbescheinigung jedoch die besondere Bedingung, den Einsatz konstruktiver Schutzsysteme wie Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung oder Explosions-Unterdrückungssysteme aufzuerlegen. Dem sicherlich versierten Leser des Manuskriptes wird an der Stelle die Auflösung des Paradoxons erspart. Der Fall führte allerdings zu einer Wettbewerbsverzerrung, nachdem nämlich auch andere Hersteller von Hammermühlen „ein vergleichbares Zertifikat“ haben wollten, da die ausgestellte EG-Baumusterprüfbescheinigung zum Benchmark bei den Betreibern von Hammermühlen wurde.

In einem anderen Fall unterschätzte der Hersteller einer flammenlosen Druckentlastung bei einer EU-Baumusterprüfung die Wirkungen der „atmosphärischen Bedingungen“ wie beispielsweise die der Temperatur von -20 °C auf die Materialeigenschaften und damit die Druckstoßfestigkeit des Gehäuses. Erst die seitens der notifizierten Stelle geforderten Kerb-



schlagbiegeversuche am Gehäusematerial mit niedrigen Temperaturen brachten die notwendige Klarheit und Transparenz.

Das ATEX-Paradoxon auf den Punkt bringend war die Aussage einer anderen benannten, notifizierten Stelle, wonach ein Mischer genau deswegen nicht mehr unter die (damals noch gültige) Richtlinie 94/9/EG gefallen ist, weil durch Anwendung von Zündschutzmaßnahmen gemäß EN 13463-5 keine potentiellen Zündquellen mehr vorhanden seien.

Ähnlicher Natur ist die Gefährdungsbeurteilung durch eine befähigte Person für einen filternden Abscheider einer Schleifstraße in einem Spanplattenwerk, der auf die Nachfrage nach der Auslegung der Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung antwortete, dass die Ausrüstung des Filters nur dem branchenüblichen Design, nicht aber einem echten Explosionsrisiko geschuldet sei.

Ebenso konnten mutmaßlich überzogene Anforderungen beobachtet werden: Der Sicherheitsingenieur eines Betreibers forderte beispielsweise infolge einer PFD-basierten Berechnung zur Zuverlässigkeit des konstruktiven Explosionsschutzes die doppelte Menge an Explosionsdruckentlastungseinrichtungen, gleichwohl die Auslegung auf Basis der harmonisierten Norm EN 14491 erfolgt ist.

In einem anderen Fall forderte der Mitarbeiter einer zugelassenen Überwachungsstelle ebenfalls eine deutlich überdimensionierte flammenlose Druckentlastung, da der betrieblich vorhandene maximale Explosionsüberdruck ( $p_{max}$ ) im Vergleich zum  $p_{max}$  in der Baumusterprüfbescheinigung um 0,2 bar höher lag. Dass der maximale  $K_{St}$ -Wert nur 1/3 der geprüften Staubexplosionskonstante aufzeigte, der maximale, reduzierte Explosionsdruck  $p_{red,max}$  im Verhältnis zur Behälterfestigkeit ausreichend Sicherheit bot und zusätzlich hohe Mindestzündtemperaturen und ein kleines Volumen die Situation begünstigten wertete er nicht bzw. konnte es vielleicht auch nicht.

In den v. g. Beispielen war zumindest – wenngleich auch formal nicht korrekt – Explosionsschutz vorhanden. Wesentlich sicherheitskritischer sind die nachfolgenden Beispiele zu bewerten:

So führt die erst im letzten Jahr veröffentlichte, harmonisierte Norm EN 16985 Hersteller und Betreiber von Lackierkabinen für organische Beschichtungsstoffe dahingehend in die Fehl-

bewertung, als das eine (schnell wirkende) Feuerlöschanlage als Alternative zu konstruktiven (Explosions)schutzmaßnahmen genannt wird.

Auch für die zuvor genannten, kommerzialisierungsbedingten Qualitätsverluste zugelassener Überwachungsstellen finden sich Beispiele: So beschrieb ein Mitarbeiter einer namhaften deutschen Institution, dass „die Auswirkungen von vernünftigerweise auszuschließenden Explosionen (einer Schleifanlage inklusive filterndem Abscheider) deshalb nicht näher diskutiert werden sollen, da diese ohnehin auf die betroffene Arbeitsstelle selbst begrenzt wären, Schäden an Gebäuden und technischen Ausstattungen zwar möglich seien, Folgebrände und weitere Explosionen infolge der Schäden an im Umfeld befindlicher Güter zwar ausgelöst werden könnten, Personenschäden allenfalls aber nur bei den unmittelbar Beteiligten zu erwarten sein.“ Der Verfasser bestätigt im Schlusswort – wie auch eines weiteren Internetfundes zur Störfallverordnung und einer Dampfkesselanlage – dass das Explosionsschutzdokument zumindest nach bestem Wissen und Gewissen erstellt worden sei: Dann ist ja gut....!

## 5. Zusammenfassung, Ansätze und Ausblick

Ist das EX-Periment ATEX also gescheitert? Wohl kaum! Es wäre vermessen, das zu behaupten – um es jedoch mit den Worten zur Begründung der Richtlinie 2014/34/EU zu zitieren und auf den Punkt zu bringen: „Mit der Richtlinie 94/9/EG wurde eine positive Entwicklung auf dem Gebiet eines wirksamen Explosionsschutzes für Untertageanlagen und Über-tageanlagen eingeleitet. Die Wirtschaftsakteure sollten dafür verantwortlich sein, dass die Produkte diese Richtlinie erfüllen, je nachdem welche Rolle sie jeweils in der Lieferkette spielen, damit ein hohes Niveau beim Schutz der Gesundheit und Sicherheit von Menschen, insbesondere von Arbeitnehmern, und gegebenenfalls beim Schutz von Haus- und Nutztie-ren und Gütern gewährleistet wird und ein fairer Wettbewerb auf dem Unionsmarkt sicherge-stellt ist. Weil der Hersteller den Entwurfs- und Fertigungsprozess in allen Einzelheiten kennt, ist er am besten für die Durchführung des Konformitätsbewertungsverfahrens geeignet. Die Konformitätsbewertung sollte daher auch weiterhin die ausschließliche Pflicht des Herstellers bleiben.“

Allen beteiligten Akteuren müssen also die beschriebenen Aspekte und Risiken der Politisierung und Kommerzialisierung einschließlich der menschlichen Grenzen bewusst sein – nicht zuletzt im Hinblick auf eine Zukunft ohne die Möglichkeit zur Konsultierung von Experten der

Geburtsstunden des Explosionsschutzes, die ihre Erfahrungen wirklich „erfahren“ und nicht nur erlesen haben.

Letzteren ist bewusst, dass beispielsweise

- Normen letztlich bewusst vor dem Hintergrund der Lesbarkeit einerseits und einer breiten Anwendbarkeit andererseits Freiheitsgrade lassen müssen,
- ein  $P_{\max}$  von 10,2 bar alleine nicht unsicher ist und damit nicht unzulässig sein muss, bloß weil nur 10 bar in der EU-Baumusterprüfbescheinigung eines Schutzsystems genannt werden,
- man auch mit Stärke mit einem  $K_{St}$ -Wert von 180 bar x m / s St1-Zulassungen erwirken kann, anstatt den Inhalt des FIBCs nach Ermittlung der sicherheitstechnischen Kenngrößen nur noch zum Kekse backen zu verwenden,
- man eben keinen Staub mit einer definierten Staubexplosionskonstante bei gleichzeitig minimal niedriger Mindestzündenergie bestellen kann,
- sämtliche in Zulassungen aufgeführte sicherheitstechnische Kenngrößen aber niemals zugleich mit ihrem jeweils kritischsten Wert bei einem Stoff und einem geprüften Ex-Produkt in der Praxis auftreten werden,
- Explosionsschutz eine Ingenieursdisziplin aber keine digitale Schwarz-Weiß-Wissenschaft ist und damit
- auch bei mutmaßlich binären Bewertungen transparente und alternative Entscheidungsspielräume zulässig sein können.

In dem Kontext regen die Autoren beispielsweise zu einer Novellierung der Konformitätsbewertungsverfahren im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU an, wonach letztlich der Hersteller am besten dafür geeignet ist für sein Produkt die Erfüllung der Mindestanforderungen zu bewerten. Als Beispiel könnte der im konservativen amerikanischen Rechtssystem proklamierte Ansatz „prescriptive vs. performance-based“ dienen. Hiernach wird beispielsweise einem Hersteller oder einem Betreiber aber auch einer befähigten Person (im amerikanischen System als AHJ – authority having jurisdiction – bezeichnet) bei Abweichung einer normativen Forderung eingeräumt, mit einem gleichen Maß an Sicherheit den Nachweis der Konformität zu führen, volle Haftung vorausgesetzt.

Nachteil des amerikanischen Systems ist dabei die stark lobbyistisch geprägte Regelwerksgebung. In einem konkreten Fall haben die Autoren selbst Erfahrungen hierzu gemacht, in-

dem Sie auf einer NFPA-Sitzung technisch begründbaren Einspruch eingelegt haben, und dabei zunächst auf einer Folie mit dem Foto einer Wurstplatte und später dann unter Auflösung Otto von Bismarcks zitiert haben, dass „Gesetze wie Würste sind, man sollte besser nicht dabei sein, wenn sie gemacht werden“.

Wie einleitend beschrieben, beabsichtigen die Autoren frei von politischer oder diplomatischer Etikette den Teilnehmern der Fachtagung und Lesern des Manuskriptes Impulse zu geben. Sie nehmen das 50. Jubiläum der „traditionellen Institution“ der VDI-Fachtagung „Sichere Handhabung brennbarer Stäube“ nicht zuletzt aufgrund der breiten EX-Pertise der Mitglieder des Programmausschusses und der Teilnehmer zum Anlass anzuregen und dafür zu sorgen, dass die ursprünglichen Leitgedanken und Ziele der ATEX in ihrem Kern erhalten bleiben und die Weichen für eine zeitgemäße Bewertung des Explosionsschutzes gestellt werden können. Die realen Beispiele aus der Praxis sollen dabei mehr konstruktiv als provokativ zum Nachdenken anregen und die „Pinguine auf eine Zeit mit Gurus im Ruhestand“ vorbereiten. Letztere haben genug Leben gerettet.

## 5. Epilog

Nimm die Erfahrung und die Urteilskraft der Menschen über 50 heraus aus der Welt, und es wird nicht genug übrig bleiben, um Ihren Bestand zu sichern.

(Henry Ford)

Man soll Schweigen oder Dinge sagen, die noch besser sind als das Schweigen. (*Pythagoras von Samos*)

Wer einen Fehler gemacht hat und ihn nicht korrigiert, begeht einen Zweiten.

(Konfuzius)

## Aus einem Duktus werden zwei

### Bewährtes und Neues bei der Sicherheitsbetrachtung zur betrieblichen Explosionsgefahr

Dr.-Ing. **Uli Barth**,  
Bergische Universität Wuppertal;  
Dipl.-Ing. **Stefan Grund**,  
Berufsgenossenschaft Nahrung und Gastgewerbe, Dortmund;  
Dr. rer. nat. **Oswald Losert**,  
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Heidelberg

#### Kurzfassung

Im Juli 2020 wurden im Gemeinsamen Ministerialblatt die vollständig überarbeiteten Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 720) *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Allgemeines* veröffentlicht. Diese bilden die Basis für weitere Technische Regeln einer TRGS 720er Reihe. Trotz des veränderten Aussehens der TRGS 720:2020 wurde viel Praxis-bewährtes unter Anpassung an geänderte rechtliche Begriffe und Anforderungen der Gefahrstoffverordnung beibehalten. Bei den Praktikern des betrieblichen Explosionsschutzes sind die TRGS 720 oft dadurch ein bekanntes Regelwerk, weil diese den sog. Duktus, die wahrscheinlich am häufigsten angewandte Vorgehensweise zur systematischen Beurteilung allfälliger Explosionsgefährdungen im Rahmen des Arbeitsschutzes darstellen. Der Fachbeitrag beleuchtet wichtige Aspekte der novellierten Technischen Regeln, damit diese von den Anwendern in nützlicher Weise beigezogen werden können.

#### Einleitung

Im Rahmen des Arbeitsschutzes haben eine große Zahl der Betriebe einen hohen Sicherheitsgrad [COMPES1965] erreicht. Diese Feststellung trifft auch für die Explosions-sicherheit zu. Vielleicht ist das auch eine gewisse Folge typischer heute noch nachwirkender (preußischer) Tugenden wie etwa Pflichtbewusstsein, Redlichkeit oder Gewissenhaftigkeit? M.a.W., in Deutschland sind wir es seit langer Zeit gewohnt, vieles zu regulieren aber auch Regeln treu einzuhalten.

Wen dieser Einleitungsversuch anhand deutscher Tugenden etwas weniger anspricht, der lässt sich eventuell mit einigen Erkenntnissen von René Descartes (1596 – 1650) mehr begeistern. Dieser soll 1637 in seinem *Discours de la Méthode* vier Regeln für eine logische Problemlösung [DESCARTES2001] genannt haben und zwar unter den Aspekten

- des Zweifels,
- des (Unter-)Teilens,
- eines angemessenen Vorgehens sowie
- der Vollständigkeit.

Auf diese Weise lehrt uns schon Descartes zumindest mittelbar einige der wesentlichen Grundsätze, die durchaus auf die Durchführung zeitgemäßer Sicherheitsbetrachtungen übertragen werden können. Inspiriert durch diese klaren logischen Handlungsprämissen entwickelte sich ein leicht zu merkender Leitsatz [BARTH2018], der für heutige betriebliche Gefährdungsbeurteilungen auch im Kontext der Explosionssicherheit hilfreich sein kann:

#### *Eine Gefährdungsbeurteilung ist RUND*

Das Akronym RUND soll daran erinnern, dass Beurteilungen R\_ichtig, U\_mfassend (i.S. von vollständig), N\_achvollziehbar (i.S. von transparent, überprüfbar) und D\_okumentiert (i.S. von belegbar) zu erstellen sind.

Im normativen Wortlaut definieren die Technischen Regeln für Gefahrstoffe [TRGS 400:2017] was eine Gefährdungsbeurteilung erfüllen soll und zwar in Abschnitt 4 „Grundsätze zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung“ Absatz (1):

*„Die Gefährdungsbeurteilung ist die systematische Ermittlung und Bewertung relevanter Gefährdungen der Beschäftigten mit dem Ziel, erforderliche Maßnahmen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit festzulegen. (...)“*

## **Motivation**

In der Einleitung wurde bereits versucht darauf hinzuleiten, dass sich eine zeitgemäße Beurteilung im Kontext der Sicherheit gewissen Anforderungen zu unterziehen hat. Dies gilt, obgleich der Gesetzgeber bislang kein dezidiertes Beurteilungsverfahren vorschreibt. Durch die so eingeräumte Liberalität besteht für die Ausführenden in den Betrieben eine Möglichkeit zur Auswahl des Beurteilungsverfahrens, gleichzeitig aber auch die Notwendigkeit der entsprechenden Entscheidung für ein solches. Damit sind Kompetenz und Verantwortung der dafür im Betrieb zuständigen Person gefordert.

Versierte Praktiker in den Betrieben wissen, dass sich die Debatten bei der Beurteilung der Sicherheit grundsätzlich an zwei Themenfelder entzünden können:

- am **Beurteilungsverfahren**,  
welches zum Zweck der Beurteilung gewählt wurde  
(manchmal auch als Beurteilungsmethode bezeichnet)
- an den **Beurteilungsmaßstäben**,  
welche zur Bewertung beigezogen werden

Während auch kontroverse aber konstruktive Debatten um die Bemessung des im Einzelfall konkret betrachteten Systems aus Person, Gefahrstoff, Arbeitsmittel und Arbeitsstätte innerhalb eines beurteilenden Teams mehr oder weniger im Verlaufe des gesamten Beurteilungsprozesses geführt werden, empfiehlt es sich, Auswahl und Festlegung des Beurteilungsverfahrens dem Prozess voranzustellen. Auch ein Infragestellen bzw. Anzweifeln des Beurteilungsverfahrens selbst im Verlaufe der auf die Festlegung folgenden Verfahrensschritte ist i.d.R. für die angestrebte Zielerreichung eher kontraproduktiv.

Damit werden auch die ersten Gründe offensichtlich, was die Autoren dieses Beitrages seit Jahren grundsätzlich dazu motiviert, sich insbesondere im Rahmen der unterstützenden Beratung von Betrieben, in der Erwachsenenfortbildung und bei der berufsqualifizierenden Ausbildung immer wieder für die Thematik „Beurteilen von Explosionsgefährdungen im betrieblichen Arbeitsschutz“ zu engagieren. Zusätzliche Motivationsschübe werden meist dann bewirkt, wenn Fortschritte beim sicherheitlichen Erkenntnisstand zu verzeichnen sind oder das einschlägige Regelwerk fortgeschrieben wurde. Die Fortschreibung der Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS 720 in der Fassung vom 24.7.2020 bot den konkreten Anlass für diesen Beitrag.

## **Zielsetzung und Vorgehen**

Gegenstand des Beitrages ist die Beurteilung der Explosionsgefährdung im Rahmen des betrieblichen Arbeitsschutzes, wobei sich dieser auf die in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS 720 beschriebene Vorgehensweise fokussiert. Die im Jahr 2006 noch als TRBS 2152 und als TRGS 720 im Bundesanzeiger veröffentlichten Technischen Regeln trugen den Titel „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines“.

Im Jahr 2020 wurden die fortgeschriebenen Technischen Regeln als TRGS 720 im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBI) veröffentlicht und zwar mit dem modifizierten Titel „Gefährliche

explosionsfähige Gemische – Allgemeines“. Mit dem modifizierten Titel soll verdeutlicht werden, dass der Geltungsbereich dieser überarbeiteten Technischen Regeln nun auch die nicht-atmosphärischen Bedingungen umfasst.

Der Beitrag zielt darauf ab, wesentliche im Rahmen der Fortschreibung in den Technischen Regeln vorgenommene Änderungen darzustellen und näher zu erläutern, um so den Adressaten der Regeln, nämlich den für die Explosionssicherheit in den Betrieben zuständigen Personen, das Verständnis der darin enthaltenen sicherheitlichen Anforderungen und deren sachgerechte Anwendung näher zu bringen. Des Weiteren soll auch das in der Praxis oft geäußerten Bedürfnis nach Konformität zu den gesetzlichen Anforderungen Berücksichtigung finden.

*Anmerkung:* Die hier aus dem Sicherheitsjargon des Bergbaus entlehene Bezeichnung „sicherheitlich“ wurde gewählt, um damit auszudrücken, dass Technische Regeln nicht nur rein technische, sondern auch organisatorische und weitere Anforderungen enthalten.

Um diese Ziele zu erreichen, gliedern sich die weiteren Ausführungen zur TRGS 720 in folgende Themenabschnitte:

- Normative Verortung
- Betriebsbewährte Aspekte
- Neue Elemente
- Anwendungspraktischer Nutzen

## **Normative Verortung**

Die Fachdisziplin des Explosionsschutzes fußt auf Erfahrungen und Wissen, welche über einen Zeitraum von mehr als 200 Jahren zusammengetragen wurden [PTB2016], [TÜV2014], [BARTH2008]. Wichtiger Teil dieser Tradition sind die berufsgenossenschaftlichen Regeln. So können auch die Berufsgenossenschaftliche Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) in Deutschland auf eine mehr als 60-jährige Anwendungspraxis zurückblicken.

Die Anfang der 1990er Jahre zunächst für das Unternehmen BAYER vorgesehene Vorgehensweise zur Beurteilung von Explosionsgefährdungen wurde von dessen Mitarbeitern Helmut Schacke und Michael Müller entwickelt [SCHACKE2020]. Später wurde diese Systematik auch in das berufsgenossenschaftliche Regelwerk in Form des „Abfrageschema zum Erkennen und Vermeiden von Explosionsgefährdungen“ in ihre Explosionsschutz-Regeln aufgenommen. Damit wurde ein schrittweises Vorgehen zur systematischen Beurteilung von Explosionsgefährdungen in das Regelwerk übernommen. Das „Abfrageschema zum Erkennen und



Vermeiden von Explosionsgefährdungen“ - so die offizielle Bezeichnung – wurde fortan im Praxisjargon gerne verkürzt als der „Duktus“ bezeichnet (s. Bild 1). Ab dem Juli 2000 wurden die Explosionsschutz-Regeln (BGR 104) im Zuge der Umsetzung europäischer Richtlinien, der Einführung neuer staatlicher Verordnungen und der Anpassung an den Stand der Technik komplett überarbeitet und bis zum Juli 2020 insgesamt 26 Ergänzungslieferungen herausgegeben. Die letzte Ergänzungslieferung erfolgte im Juli 2020. Zusätzlich wurde durch Änderung der Nomenklatur des berufsgenossenschaftlichen Regelwerkes die Bezeichnung BGR 104 durch DGUV Regel 113-001 abgelöst.

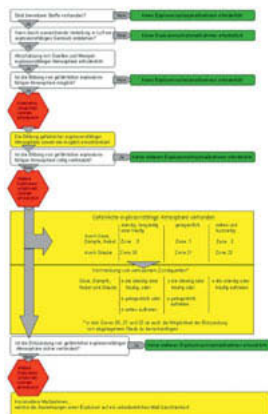


Bild 1: Abfrageschema zum Erkennen und Vermeiden von Explosionsgefährdungen  
(Quelle: TRBS 2152/TRGS 720 v. 2. Juni 2006 Bild 1)

Im Kontext der Arbeitsschutzregelungen zum Explosionsschutz veröffentlichte Oswald Losert im Jahr 2018 einen Fachartikel [LOSERT2018]. Dieser bietet auch dem betrieblichen Praktiker die Möglichkeit, sich zu den Änderungen der Umsetzung europäischer Richtlinien in nationales Recht, dem aktuellen Stand und der Untersetzung der deutschen Verordnungen zum betrieblichen Explosionsschutz rasch einen profunden Überblick zu verschaffen. Bild 2 veranschaulicht diese Untersetzung der Verordnungen durch TRGS, TRBS und ABS als Handlungshilfe für den Arbeitgeber bei der betrieblichen Umsetzung.

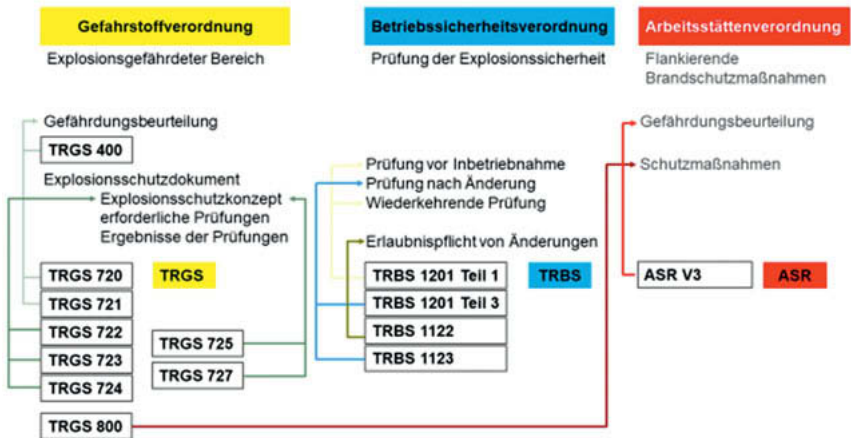


Bild 2: Untersetzung der Verordnungen zum betrieblichen Explosionsschutz  
(Quelle: [LOSERT2018]; aktualisiert 9/2020)

In dem v.g. Fachartikel beleuchtet Oswald Losert den Kontext zwischen den Gefährdungen aufgrund chemischer Arbeitsstoffe und den für den Explosionsschutz wichtigen Begriffen der Gefahrstoffverordnung (s. Bild 3),

- das **gefährliche explosionsfähige Gemisch** und
- die **gefährliche explosionsfähige Atmosphäre**.

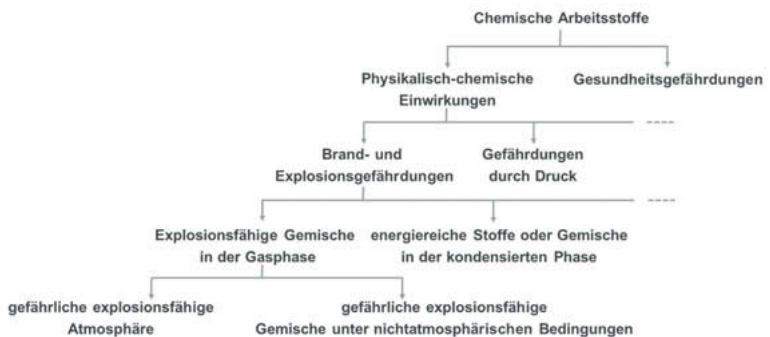


Bild 3: Gefährdungsarten [LOSERT2018]

Die weitere Fortschreibung bei den Technischen Regeln bewirkte u.a., dass der aus den EX-RL bekannte Duktus ab dem Jahr 2006 zum Bestandteil der TRBS 2152/TRGS 720 wurde.

## Betriebsbewährte Aspekte

### Abfrageschema

Das Augenscheinlichste unter den betriebsbewährten Aspekten dürfte vermutlich für viele Praktiker das graphische Ablaufschema selbst sein. Dieses illustriert den Prozess mit seinen einzelnen Schritten und Elementen nach denen Explosionsgefährdungen erkannt und vermieden werden sollen. Bild 1 zeigte das Abfrageschema bereits.

### Prinzipien

Im Kontext des ursprünglichen Duktus wurden auch mehrere Prinzipien der Explosionsexperten etabliert bzw. allgemein in die Denkmuster eingeführt. Diese haben sich bis heute in der betrieblichen Praxis gut bewährt. Betriebsbewährt haben sich

- Das Ursache-Wirkungs-Folge-Prinzip

Von der Struktur des Duktus lässt sich ableiten, dass diesem mittelbar ein Vorstellungsmodell von der Explosionsgefährdung zugrundeliegt, das dem allgemeinen Gefahrenmodell von Peter C. Compes ähnelt. Letzteres kann in der Weise „Gefahr wirkt auf Person und/oder Sache“ beschrieben werden. Dafür gebraucht dieser [COMPES1970] [COMPES1966] auch die verkürzte Darstellung

**G ⇒ P(S)**

- Das Prinzip des schrittweisen Vorgehens

Der Duktus bietet während des Beurteilungsprozesses dem Beurteilungsteam eine Handlungsleitlinie. Anhand dieser kann ein Moderator sein Team konkret zur schrittweisen Bearbeitung, Bewertung und Entscheidung anleiten bis die Ziele der Explosionsgefährdungsbeurteilung erreicht sind.

- Prinzip der Rangfolge der Schutzmaßnahmen

Der Duktus integriert die vom Gefahrstoffrecht geforderte Rangfolge (s. § 11 [GefStoffV:2017] der Schutzmaßnahmen beginnend mit präventiven Maßnahmen hin zu auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen. Dafür ist auch eine verkürzte Darstellung in Gebrauch

## S T O P

Das Akronym STOP soll daran erinnern, dass möglichst vorrangig Maßnahmen zur S\_ubstitution der Gefahr und nachrangig T\_echnische Maßnahmen, O\_rganisatorische Maßnahmen sowie P\_ersonenbezogene Maßnahmen konzipiert werden sollen. Bei den Maßnahmen zum Technischen Explosionsschutz gibt der Duktus explizit Vorbeugenden Maßnahmen den Vorrang gegenüber den Konstruktiven Maßnahmen.

- Probabilistisches Prinzip

Bei der Gefährdungsermittlung soll von Gesetzes wegen streng genommen bewertet werden, ob eine Gefährdung „möglich“ ist. „Möglich“ bedeutet dabei sinngemäß „aufgrund der bestehenden Zusammenhänge realisierbar“. M.a.W., sofern im konkreten betrieblichen Einzelfall ein Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang (Vorstellungsmodell  $G \rightarrow P(S)$ ) als möglich bewertet wird, ist eine Explosion als möglich festgestellt und bei der weiteren Beurteilung von einer Explosionsgefährdung auszugehen. Zur Unterscheidung gegenüber dem Probabilistischen Prinzip kann das v.g. auch als „Deterministischer Ansatz“ gesehen werden.

Peter C. Compes hat zum einschlägigen Begriffsverständnis eine mitunter hilfreiche Erklärung formuliert [COMPES1970]:

**Möglich** ist ein Ereignis, sofern der dafür erforderliche physikalische Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang gegeben ist. Ein Ereignis muss noch nicht eingetreten sein.

**Wahrscheinlich** ist ein Ereignis ab dem Zeitpunkt, ab dem sich ein zuvor als möglich betrachteter Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang zum ersten Mal **tatsächlich** ereignet hat.

Der Duktus sieht vor, im Zuge des fortschreitenden Beurteilungsprozesses zunächst sog. „Explosionsgefährdete Bereiche“ zu ermitteln. Im konkreten betrieblichen Einzelfall werden diese konkret verortet und bezüglich ihrer flächigen und räumlichen Größe bemessen.

Sofern für das mögliche Auftreten einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre (g.e.A.) - also einer explosionsfähigen Atmosphäre in gefahrdrohender Menge - im Zuge der Beurteilung eine Auftretenswahrscheinlichkeit abschätzbar ist, können explosionsgefährdeter Bereich „zoniert“ werden. M.a.W., anhand normativ vorgegebener Einteilungskriterien können sog. Zonen ermittelt werden. Dies sind die dem betrieblichen Praktiker geläufigen Zonen 22, 21 und 20 im Zusammenhang mit brennbaren Stäuben und die Zonen 2, 1 und 0 im Falle von brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln. Anders als beim deterministischen Ermitteln einer möglichen Explosionsgefährdung sieht der Duktus zum Konzipieren von Explosionsschutzmaßnahmen einen probabilistischen Ansatz vor. Dieser koppelt die Anforderungen zur Vermeidung von wirksamen Zündquellen an die Wahrscheinlichkeit mit der gefährliche explosionsfähige Atmosphäre vorhanden sein wird. Diese Kopplung resultiert dann in einem über alle Kombinationen gleich geringen Restrisiko. Dies ließe sich auch in der Weise ausdrücken, dass dieses dann verbleibende Restrisiko (implizit) dem gesellschafts-politisch tolerierten Maß entspricht.

- Zwei-Fehler-Toleranz-Prinzip

Anhand der sog. Fehler-Toleranz ist erkennbar, mit wie vielen Fehlern die explosionsgeschützte Anlage noch „explosionssicher betrieben“ werden kann.

Der Duktus enthält eine Zuordnung zwischen den anhand einer abgeschätzten Auftretenswahrscheinlichkeit ermittelten Zonen einerseits und den daran gebundenen Anforderungen an die Vermeidung von wirksamen Zündquellen (s. Bild 4).



räumt, sondern vielmehr eine dynamische Kopplung an den fortschreitenden Stand der Technik fordert. Konformitäts-orientierte Betreiber achten daher oft auch darauf, dass bei der Vorbereitung einer Explosionsgefährdungsbeurteilung ein Beurteilungsverfahren gewählt wird, das (nachweislich) dem Stand der Technik entspricht. Im Falle des Duktus formulieren die TRGS 720:2006 im Abschnitte Vorbemerkungen explizit:

*„Diese Technische Regel (...) gibt dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene entsprechende Regeln und sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse (...) für den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen wieder. (...) Bei Anwendung der beispielhaft genannten Maßnahmen kann der Arbeitgeber insoweit die Vermutung der Einhaltung der Vorschriften (...) für sich geltend machen.“*

Verkürzt wird in diesem Zusammenhang oft von der **Vermutungswirkung** gesprochen.

Trotz dieser Präferenz räumt das Regelwerk dem Betreiber grundsätzlich die Wahl von Alternativen ein. Statt die Vermutungswirkung in Anspruch nehmen zu können, hat der Betreiber dann allerdings die Nachweispflicht, dass mit der gewählten Lösung ein vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht wird. Die TRGS 720:2006 führt dazu folgendes aus:

*„Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, hat er die gleichwertige Erfüllung (...) schriftlich nachzuweisen.“*

## Neue Elemente

Die im v.g. Abschnitt erläuterten Prinzipien und Elemente haben sich über Jahre in der betriebspraktischen Anwendung bewährt. Im Zuge der Novellierung der Technischen Regeln für Gefahrstoffe wurden jedoch auch einige Änderungen bzw. Anpassungen vorgenommen. Dieser Abschnitt setzt sich daher mit neuen Elementen in der TRGS 720:2020 auseinander.

## Schemata

Beim ersten Blick in die neuen TRGS 720:2020 fällt zunächst auf, dass jetzt zwei Schemata zum Erkennen von Explosionsgefährdungen und zur Festlegung von Schutzmaßnahmen und Ermittlung von Prüfverpflichtungen abgebildet sind (s. Bild 5).

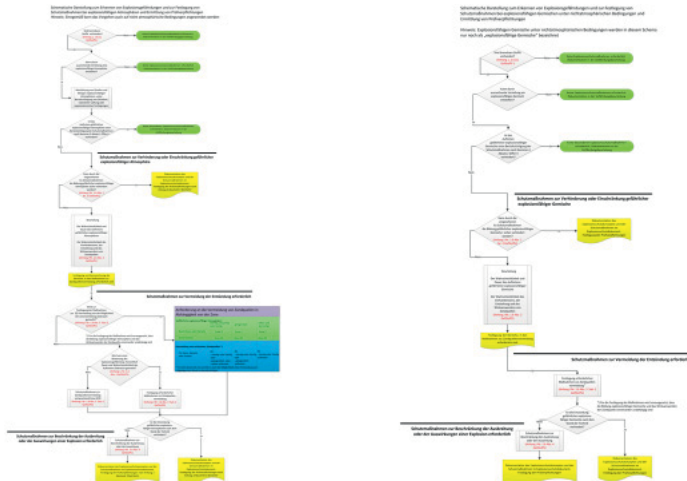


Bild 5: Schemata zum Erkennen und Vermeiden von Explosionsgefährdungen

Die links abgebildete Vorgehensweise bezieht sich auf explosionsfähige Atmosphäre, die rechts abgebildete Vorgehensweise gilt für explosionsfähige Gemische unter nicht-atmosphärischen Bedingungen, z.B. bei anderen Sauerstoffgehalten als in Luft, anderen Oxidationsmitteln, anderen Temperaturen und Drücken  
(Quelle: [TRGS 720:2020] Abbildungen 1 und 2)

Die Neuerung bei den Schemata ist dem Umstand geschuldet, dass die Gefahrstoffverordnung [GefStoffV:2017] die Explosionsgefährdungen unter die physikalisch-chemischen Einwirkungen einordnet. Dies bewirkt für die Praxis, dass eine Abgrenzung zwischen „explosionsfähigen Gemischen in der Gasphase“ und „energiereichen Stoffen oder Gemischen in der kondensierten Phase“ vorgenommen wird, um zwischen Gefährdungen bei Tätigkeiten mit z.B. organischen Peroxiden und Explosionsgefährdungen i.S. der Europäischen Richtlinie 1999/92/EG (auch bekannt als ATEX-Richtlinie, ATEX 118a später ATEX 137) zu unterscheiden. Die GefStoffV verwendet deshalb den Leitbegriff „explosionsfähiges Gemisch“ (eine ausführliche Erläuterung dieses rechtlichen Hintergrundes findet man bei [LOSERT2018]).

Die TRGS 720:2020 gilt für die Beurteilung allfälliger Explosionsgefährdungen durch Stoffe, die gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bilden können. Sie gilt auch für explosionsfähige Gemische unter nicht-atmosphärischen Bedingungen. Des Weiteren gilt sie für Verbrennungsreaktionen chemisch instabiler Gase.



Vom Anwendungsbereich ausgeschlossen hingegen sind Zerfallsreaktionen sowie Reaktionen energiereicher Stoffe oder Gemische in der kondensierten Phase.

Die Beziehung zwischen einem „gefährlichem explosionsfähigen Gemisch (g.e.G.)“ und einer „gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre (g.e.A.)“ visualisierte [LOSERT2018] bereits in einer Graphik (s. Bild 6).

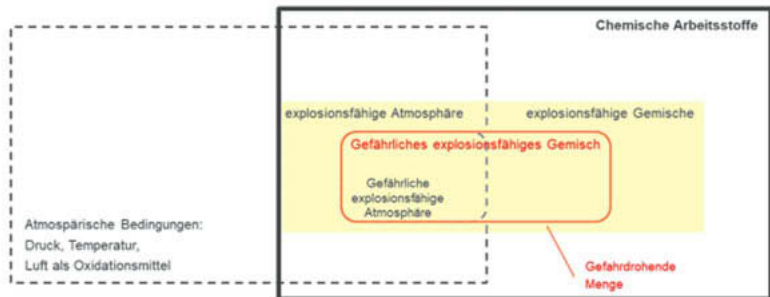


Bild 6: Beziehung „gefährliches explosionsfähiges Gemisch“ und „gefährliche explosionsfähige Atmosphäre“

Quelle: [LOSERT2018]

Innerhalb des mit dem Duktus beschriebenen Prozesses der Gefährdungsbeurteilung zum Explosionsschutz bezwecken die anfänglichen Schritte und Fragen die Analyse und Feststellung, ob im konkret analysierten betrieblichen Einzelfall Explosionsgefährdung möglich ist. Die neuen Duktus zeigen hier bereits augenscheinlich textliche Veränderungen. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind diese herausgearbeitet.

Tabelle 1: Detaillierte Änderung von der TRGS 720:2006 zu den TRGS 720:2020 bei den Schritten zur Analyse und Feststellung ob Explosionsgefährdung möglich ist. Textpassagen in schwarz waren bereits in der TRGS 720:2006 so enthalten, die in blau wurden erst im Zuge der Änderungen in die TRGS 720:2020 eingefügt. Blau durchgestrichen bedeutet Text, der im Rahmen der Novellierung weggefallen ist.

| Vormaliger Duktus<br>nach TRGS 720:2006 Bild 1                                      | Neuer Duktus<br>nach TRGS 720:2020 Abbildung 1  | Neuer Duktus<br>nach TRGS 720:2020 Abbildung 2   |
|---|---|--|
| Sind brennbare Stoffe vorhanden?  | Sind brennbare Stoffe vorhanden?<br>(Anhang 1, 1.6 (1) GefStoffV)   | Sind brennbare Stoffe vorhanden?<br>(Anhang 1, 1.6 (1) GefStoffV)  |
| Kann durch ausreichende Verteilung in Luft ein explosionsfähiges Gemisch entstehen? | Kann durch ausreichende Verteilung in Luft eine explosionsfähiges Gemisch Atmosphäre entstehen?   | Kann durch ausreichende Verteilung in Luft ein explosionsfähiges Gemisch entstehen?  |
| Abschätzung von Quellen und Mengen explosionsfähiger Atmosphäre erforderlich!       | Abschätzung von Quellen und Mengen explosionsfähiger Atmosphären erforderlich, unter Berücksichtigung von Dichtigkeit, natürlicher Lüftung oder organisatorischer Festlegungen! |  |
| Ist die Bildung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre möglich?              | Ist die Bildung von das Auftreten gGefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre möglich unter Berücksichtigung der Schutzmaßnahmen nach Abschnitt 3 Absatz 1 Nummer 4 verhindert?  | Ist die Bildung von das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre Gemische unter Berücksichtigung der Schutzmaßnahmen nach Abschnitt 4 Absatz 2 Nummer 4 möglich verhindert? |
| Maßnahmen des Vorbeugenden Explosionsschutzes                                       |   |  |

Im Zuge der Feststellung, ob eine Explosionsgefährdung (entweder gleichbedeutend mit g.e.A. oder g.e.G.) möglich ist, sehen beide neuen Duktus explizit vor, dass im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung gewisse Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden können. Zu berücksichtigen sind:

- passive technische Maßnahmen, wie z.B. Dichtigkeit von Behältern oder Anlagen
- organisatorische Maßnahmen, wie z.B. Beseitigung von Staubablagerungen
- natürliche Lüftung

Charakteristisch für diese Maßnahmen ist, dass es sich bei ihnen originär nicht um Explosionsschutz-Maßnahmen handelt, sie sind aber geeignet das Auftreten von g.e.A. zu verhindern. Somit liegt kein explosionsgefährdeter Bereich vor. Als weitere Folge bestehen daher in diesen Fällen keine besonderen Prüfpflichten nach Anhang 2 Abschnitt 3 Betriebssicherheitsverordnung [BetrSichV:2019].

Anmerkung: Eine vollständige Kenntlichmachung der textlichen Änderungen in der TRGS 720:2020 gegenüber der vormaligen TRGS 720:2006 ist zur Veröffentlichung [BGRCI2020] auf der Plattform EXINFO bei der BG RCI vorgesehen.

Der zweite Duktus für g.e.G. ergibt sich aus dem ersten durch Vereinfachung, da bekanntlich für g.e.G. eine Zoneneinteilung nicht vorgesehen ist und somit keine korrespondierenden ATEX-Geräte verfügbar sind.

## Prinzipien

Die im o.g. Abschnitt erläuterten bewährten Prinzipien wurden im Rahmen der Novellierung der TRGS 720:2020 überwiegend beibehalten.

Als wichtige Änderung zu den Festlegungen der alten TRGS 720:2006 hingegen ist die Verwendung des Begriffs „explosionsgefährdeter Bereich“ sowie die „Möglichkeit zur Einteilung in Zonen“ hervorzuheben.

- **Explosionsgefährdeter Bereich**

*„Explosionsgefährdeter Bereich ist der Gefahrenbereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre (g.e.A.) auftreten kann (s. [TRGS 720:2020] Abschnitt 2.2 (13)).“*

- **Zonen**

*„Explosionsgefährdete Bereiche, in denen Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung oder zur Auswirkungsbegrenzung erforderlich sind, können nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen unterteilt werden (s. [TRGS 720:2020] Abschnitt 2.2 (14)).“*

Zur Definition der Zonen s. Anhang 1 Nummer 1.7 Gefahrstoffverordnung [GefStoffV:2017]).

Neu ist, dass das Einteilen in Zonen optional ist. Wird auf eine Zoneneinteilung verzichtet, d.h. es wird die Dauer und Häufigkeit für das Auftreten einer g.e.A. nicht ermittelt, sind nach TRGS 720:2020 Schutzmaßnahmen und Geräte für das höchste Schutzniveau zur Vermeidung von Zündquellen, also für die Zone 0 oder 20, auszuwählen.

## Anwendungspraktischer Nutzen

Die Überarbeitung der TRGS 720 wurde durch die 2015 erfolgte Verschiebung der Anforderungen zum Explosionsschutz aus der ehemaligen BetrSichV:2003 in die Gefahrstoffverordnung erforderlich. Dies führte u.a. zu einer Ausweitung des Anwendungsbereichs der TRGS 720, was bereits am Titel der novellierten Ausgabe Juli 2020 augenscheinlich ist.

Bei der vollständigen Überarbeitung wurden viele aus der Vorgängerversion TRGS 720:2006 bekannte und bewährte Prinzipien beibehalten. Im Zuge der Aktualisierung der TRGS 720 erfolgte u.a. eine Anpassung der Vorgehensweise zur Beurteilung von Explosionsgefährdungen

bei atmosphärischen Bedingungen. In der novellierten Ausgabe musste das bekannte Ablaufschema (Duktus) erweitert werden, um das Vorgehen zu beschreiben, wenn auf die sinnvolle Einteilung des explosionsgefährdeten Bereichs in Zonen verzichtet wird. Weiterhin berücksichtigt der neue Duktus die gegenüber der alten Version deutlich strengere Auslegung des Begriffs „explosionsgefährdeter Bereich“ und die damit verbundenen Konsequenzen insbesondere im Hinblick auf die Prüfanforderungen nach der BetrSichV. Dies sollte bei der mündlichen Verwendung des Begriffs im Rahmen von teamgestützten Gefährdungsbeurteilungen, aber auch bei der schriftlichen Verwendung in der Sicherheitsdokumentation mit Sorgfalt beachtet werden.

Für die Vorgehensweise zur Beurteilung von Explosionsgefährdungen bei Gemischen unter nicht-atmosphärischen Bedingungen gibt es ebenfalls eine Beschreibung (zusätzlicher Duktus), die der für die Beurteilung der Explosionsgefährdungen bei atmosphärischen Bedingungen ähnelt. Obwohl sich die Struktur dieses neuen Duktus vergleichsweise weniger verzweigt gestaltet, dürfen mit einer gewissen Neugier entsprechende Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung erwartet werden, da z. B. weder sicherheitstechnische Kenngrößen noch ATEX-Geräte unbesehen für die Verwendung unter nicht-atmosphärischen Bedingungen übernommen werden können.

Dennoch schaffen die novellierten TRGS 720 einen wichtigen Beitrag zur Rechtssicherheit, da im praktischen Betriebsgeschehen eben nicht nur explosionsfähige Atmosphären, sondern auch explosionsfähige Gemische auftreten und demzufolge den verantwortlichen Personen die Pflicht obliegt, die damit verbundenen Explosionsgefährdungen zu beurteilen. Um dieser Aufgabe nachzukommen, können sie mit der TRGS 720 von der Vermutung ausgehen, dass die dort erläuterten Vorgehensweisen der zwei Duktus dem Stand der Technik entsprechen.

## **Ausblick und Fazit**

Die Anpassung der TRGS 720 wurde mit der Veröffentlichung der Ausgabe Juli 2020 im (GMBI) 2020 S. 419-426 [Nr. 21 (v. 24.07.2020)] jüngst abgeschlossen. Damit sind die TRGS 720:2020 als eine Art „Zusammenfassung“ bzw. „Basis“ der TRGS 720er-Reihe verfügbar. Augenscheinlich wird diese Bedeutung an dem Umstand, dass darin im Vorgriff auf weitere Technische Regeln bestimmte Begriffsbestimmungen vorgenommen werden (z.B. sicherheitstechnische Kenngrößen). Gegenwärtig besteht noch ein Bedarf zur Novellierung weiterer Technischer Regeln. Tabelle 2 gibt dazu einen Statusüberblick.

Tabelle 2: Statusüberblick zum Stand Technischer Regeln zur Untersetzung der Verordnungen zum betrieblichen Explosionsschutz im Rahmen des Arbeitsschutzes  
Die ursprüngliche Übersichtstabelle wurde in [LOSERT2018] mit Stand 10/2018 veröffentlicht; die blauen Textpassagen entsprechen dem Aktualisierungsstand 9/2020

|                  | Stand (09/2020)  | Bemerkung   |
|------------------|--|---|
| TRGS 720         | überarbeitete Fassung 07/2020 ist veröffentlicht               | TRBS 2152 ist zurückgezogen   |
| TRGS 721         | im AGS beschlossen, noch nicht im GMBL. veröffentlicht         | TRBS 2152 Teil 1 wird zurückgezogen, sobald Neufassung veröffentlicht ist |
| TRGS 722         | überarbeitete Fassung soll in 11/2020 dem AGS vorgelegt werden | TRBS 2152 Teil 2 wird zurückgezogen, sobald Neufassung veröffentlicht ist |
| TRGS 723         | überarbeitete Fassung 07/2019 ist veröffentlicht               | TRBS 2152 Teil 3 ist zurückgezogen  |
| TRGS 724         | überarbeitete Fassung 07/2019 ist veröffentlicht               | TRBS 2152 Teil 4 ist zurückgezogen  |
| TRGS 725         | überarbeitete Fassung 01/2016 ist veröffentlicht               |   |
| TRGS 727         | überarbeitete Fassung 01/2016 ist veröffentlicht               |   |
| TRBS 1201 Teil 1 | überarbeitete Fassung 03/2019 ist veröffentlicht               |   |
| TRBS 1201 Teil 3 | überarbeitete Fassung 01/2018 ist veröffentlicht               |   |
| TRBS 1122        | überarbeitete Fassung 07/2018 ist veröffentlicht               |   |
| TRBS 1123        | überarbeitete Fassung 07/2018 ist veröffentlicht               |   |

Nach Auffassung der Autoren besteht aufgrund der fortgeschriebenen Technischen Regeln für Gefahrstoffe kein Grund bei den für die Sicherheit und Gesundheit in den Betrieben verantwortlichen Personen, die bestehenden Explosionsschutzkonzepte grundlegend in Frage zu stellen. Wie gezeigt wurde, sind die bekannten praxisbewährte Prinzipien weiter im Regelwerk vorhanden. Bezüglich der Änderungen könnte man vereinfacht feststellen, dass die Fortschreibung der TRGS 720:2020 nun regelwerkseitig das unterstützt, was während des davorliegenden Zeitraumes bei der betrieblichen Beurteilung der Explosionsgefährdung im Rahmen des Arbeitsschutzes in vielen Anwendungsfällen auch schon erforderlich war und oft in pragmatischer und sehr ähnlicher Weise gehandhabt worden war. Die Technischen Regeln „runden quasi die Praxis ab“, in dem sie einen wichtigen Beitrag darstellen, um überall dort in den Betrieben rechtssicheres Beurteilen und Betreiben zu ermöglichen, wo - dem neuen Begriffsverständnis entsprechend - explosionsgefährdete Bereiche vorhanden sind und entsprechend der ebenfalls neuen Option keine Zonenfestlegung erfolgt. Des Weiteren sind nun auch explosionsfähige Gemische bei nichtatmosphärischen Bedingungen in die Vermutungswirkung einbezogen, was zuvor nicht der Fall gewesen war.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die weitere Unterstützung während der Ausarbeitung dieses Fachbeitrages bei allen nicht explizit genannten Kolleginnen und Kollegen insbesondere des Lehrstuhls ‚Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung‘ an der Bergischen Universität Wuppertal, der Berufsgenossenschaft Nahrung und Gastgewerbe in Dortmund und Mannheim, der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie in Heidelberg und Maimark sowie dem Steinbeis Transferzentrum Integrative Sicherheit für zahlreiche konstruktiven Sachdebatten. Weiterer Dank gilt dem Verein Deutscher Ingenieure, der mit dem Fachforum 2020 die langjährige Reihe der ingenieurwissenschaftlichen Fachforen „Sichere Handhabung brennbarer Stäube“ wieder in Nürnberg veranstaltet hat.

## Referenzen und weiterführende Quellen

- ASR V3:2017 Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR): *Gefährdungsbeurteilung*. Ausgabe: Juli 2017, GMBI 2017, S. 390  
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-V3.html>  
 abgerufen am 2020-09-01
- BetrSichV:2019 Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV). Ausfertigungsdatum: 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung v. 30. April 2019 (BGBl. I. S. 554) geändert worden ist.  
<file:///C:/Users/Ull%20Barth/AppData/Local/Temp/BetrSichV.pdf>  
 abgerufen am 2020-09-05
- DGUV113-001:2020 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): *Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) - Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispiel-sammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen*. Juli 2020, Artikel-Nr. 4157033  
[https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL\\_Praevention/Explosionsschutzportal/Dokumente/EX\\_RL\\_Beispielsammlung/EX\\_RL\\_Teil\\_I\\_Ti\\_In\\_Vo\\_2020.pdf](https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/Explosionsschutzportal/Dokumente/EX_RL_Beispielsammlung/EX_RL_Teil_I_Ti_In_Vo_2020.pdf)  
 abgerufen am 2020-08-19
- GefStoffV:2017 *Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV)* v. 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643), zuletzt geändert durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626)  
[https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/Arbeiten-mit-Gefahrstoffen/pdf/Gefahrstoffverordnung-Aenderungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefahrstoffe/Arbeiten-mit-Gefahrstoffen/pdf/Gefahrstoffverordnung-Aenderungen.pdf?__blob=publicationFile&v=2)  
 abgerufen am 2020-09-06

- TRGS 400:2017 Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS): *Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen*. Ausgabe: Juli 2017, Fassung 08.09.2017, GMBI 2017 Nr., 36 S. 638 (08.09.2017)  
[https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-400.pdf? blob=publicationFile&v=7](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-400.pdf?blob=publicationFile&v=7)  
abgerufen am 2020-08-31
- TRGS 720:2006 Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 2152) inhaltsgleich Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 720): *Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines*. Bundesanzeiger Nr. 103a v. 2. Juni 2006
- TRGS 720:2020 Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 720): *Gefährliche explosionsfähige Gemische – Allgemeines*. Ausgabe Juli 2020, Fassung 24.7.2020, GMBI 2020 S. 419-426 [Nr. 21 (v. 24.07.2020)]  
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-720.html>  
abgerufen am 2020-08-19
- TRGS 721:2006 Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 2152 Teil 1) inhaltsgleich Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 721): *Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Beurteilung der Explosionsgefährdung* -, Ausgabe 2006, Bekanntmachung vom 15.03.2006 (BANz. Nr. 103a vom 02.06.2006)  
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-721.html>  
abgerufen am 2020-08-19
- TRGS 722:2012 Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 2152 Teil 2) inhaltsgleich Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 722): *Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre*. Ausgabe März 2012, GMBI 2012 S. 398 [Nr. 22] (inhaltsgleich: TRBS 2152 Teil 2)  
[https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-2.pdf? blob=publicationFile&v=2](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-2152-Teil-2.pdf?blob=publicationFile&v=2)  
abgerufen am 2020-08-27
- BARTH2008 *Das Unglück von Courrières - Zäsur in der Entwicklung eines systemischen Explosionsschutzes*. In: Farrenkopf, M.; Friedemann, P. [Hrsg.]: Die Grubenkatastrophe von Courrières 1906: Aspekte transnationaler Geschichte. ISBN-13: 978-3937203393, ISBN-10: 3937203397. Deutsches Bergbau-Museum (26. Juli 2008)
- BARTH2018 Barth, U.: *Betriebssicherheit Überwachungsbedürftiger Anlagen*. Vorlesung (PO17 MScS SSI-b BÜA) im Masterstudiengang Sicherheitstechnik, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

- BGRCI2020 Barth, U.; Losert, O.; Leksin, A.: *Veranschaulichung der Änderungen zwischen der TRGS 720:2020 vs TRGS 720:2006*. Dokument erarbeitet beim Steinbeis Transferzentrum Integrative Sicherheit. Wuppertal mit Unterstützung der BG RCI, Heidelberg, August 2020 Herausgegeben von der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI)  
vorgesehen zum Abrufen vom Internetportal EXINFO der BG RCI  
<https://www.bgrci.de/exinfo/exinfo-newsletter>
- COMPES1965 Compes, P. C.: *Betriebsunfälle wirtschaftlich gesehen*. Ein Beitrag zur Ermittlung und Senkung der Unfallkosten im Betrieb, S. 5-7, 98. Köln 1965
- COMPES1966 Compes, P. C.: *Rationelle Organisation der Unfallverhütung im Betrieb*. Köln 1966, S. 36-39  
Referiert im Kapitel von Gniza, Erwin: *Zur Theorie der Wege der Unfallverhütung*. In „Literaturexpertise über theoretische Grundlagen des Arbeitsschutzes“. Forschungsbericht Nr. 111, herausgegeben von Robert B. Thiele und Frank Gottschalk, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung (BAU), Dortmund, 1973, S. 96ff
- COMPES1970 Compes, P. C.: *Mechanische Sicherungs- und Schutzmaßnahmen*. In: Symposium für Unfallforschung in Dortmund am 31. Nov./1. Dez. 1970, Bericht E12 des Bundesinstituts für Arbeitsschutz, Koblenz, 1971, S. 151-190  
Referiert im Kapitel von Compes, Peter C.: *Modell zur Unfallkausalität und zum Störfall im Mensch-Maschine-Umgebungs-System*. In „Literaturexpertise über theoretische Grundlagen des Arbeitsschutzes“. Forschungsbericht Nr. 111, herausgegeben von Robert B. Thiele und Frank Gottschalk, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung (BAU), Dortmund, 1973, S. 237
- DESCARTES2001 Descartes, René: *Discours de la Méthode. Bericht über die Methode. Übersetzt von Holger Oswald*, ISBN-10: 3150181003, ISBN-13: 978-3150181003, Reclam, 2001
- LOSSERT2018 Losert, O.: *Arbeitsschutzregelungen zum Explosionsschutz – Änderungen der Umsetzung europäischer Richtlinien 2015 und aktueller Stand*. Technische Sicherheit (TS) Bd. 8 (2018) Nr. 11/12 November/Dezember, S. 55-59
- LOTTERMANN2012 Lottermann, J. W.: *Ansätze zur integrierten Brand- und Explosions-sicherheit: Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staub-führender Anlagen*. Zugl. Univ. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, ISBN 9783863863135, 1. Auflage  
abrufbar bei [www.book-on-demand.de](http://www.book-on-demand.de)



- MAIWALD2017a Maiwald, K.; Liske, B.; Barth, U.: *The "Ductus" for the Assessment of Explosion Hazards – A Methodical Toolbox for Application*. Institution of Chemical Engineers (IChemE), Paper and Presentation No. 35 at Hazards 27 – Safety and Loss Prevention, Symposium Series 162, ISBN: 978-1-5108-4288-5, International Convention Centre (ICC), Birmingham/UK, 10-12 March 2017, pp 304-311
- MAIWALD2017b Maiwald, K.; Liske, B.; Barth, U.: *Der „Duktus“ zur Explosionsgefährdungsbeurteilung – Ein methodisches Werkzeug zur Unterstützung dieser Herausforderung*. Technische Sicherheit (TS) Bd. 7 (2017) Nr. 9 September 2017, S. 12-17  
<https://www.ingenieur.de/fachmedien/technischesicherheit/explosionsschutz/der-duktus-zur-explosionsgefaehrungsbeurteilung/>  
abgerufen am 2020-07-09
- PTB2016 200 Jahre Explosionsschutz. PTB Mitteilungen – Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft, Amts- und Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 126. Jahrgang, Heft 1, März 2016  
<https://oar.ptb.de/files/download/574e82f0a4949dd0373c986b>  
abgerufen am 2020-08-24
- SCHACKE2020 Schacke, H.: *Persönliche Mitteilungen ... zur Entstehung bzw. Historie des Duktus*. Drahtnachricht (eMail) Schacke./Barth v. 24.01.2020
- STELZ1993 Stelz, H.: *Preis des Versagens - Hoechst: Der Störfall war vermeidbar - unter dem Vertrauensverlust leidet nun die ganze Branche*. Artikel in: Die Zeit Nr. 10/1993
- TÜV2014 *Geschichte des Arbeitsschutzes in Deutschland. Videofilm des TÜV Rheinland, 2014*  
[https://www.youtube.com/watch?v=V\\_nQOFzYQic](https://www.youtube.com/watch?v=V_nQOFzYQic)  
abgerufen am 2017-10-26 un2018-10-18
- WALTHER2020 Walther, C.-D.: *Persönliche Mitteilungen ... zur Entstehung bzw. Historie des Duktus*. Drahtnachricht (eMail) Walther./Barth v. 17.08.2020



# **Erfahrungen aus der Prüfung nach Betriebssicherheitsverordnung von Anlagen mit konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen**

**Dr.-Ing. Michael Sippel,**  
DEKRA Testing and Certification GmbH, Bochum

## **Kurzfassung**

Bei Anlagen, die zur Verarbeitung von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen dienen, sind oftmals Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zur Beschränkung der Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß vorzusehen. Die dabei in der Prüfpraxis – vorwiegend im Rahmen von Prüfungen überwachungsbedürftiger Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen gem. Betriebssicherheitsverordnung - festgestellten Mängel sind in vielen Fällen als „erheblich“ (Mangel, der bis zur nächsten regulären wiederkehrenden Prüfung eine Gefährdung für Beschäftigte und Dritte erwarten lässt) oder in einzelnen Fällen sogar als „gefährlich“ (Mangel, durch den Beschäftigte und Dritte gefährdet werden) einzustufen.

Dieser Beitrag beschreibt anhand des Anlagentyps „Filteranlage“ typische Mängel und beschreibt ebenfalls mögliche Problemlösungswege.

## **1. Einführung**

Maßnahmen des sogenannten „konstruktiven Explosionsschutzes“, welche die Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken, sind im Rahmen von Explosionsschutzkonzepten immer dann anzuwenden, wenn die vorbeugenden Explosionsschutzmaßnahmen, wie die Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische oder die Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Gemische, kein ausreichendes Maß an Sicherheit für die Beschäftigten erwarten lässt. Die Technische Regel TRGS 724 [8] „Gefährliche explosionsfähige Gemische - Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken“, konkretisiert die Anforderungen der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) [2] zu Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes wie explosionsfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung, Explosionsunterdrückung und explosionstechnische Entkopplung von Flammen und Explosionsdruck.

Im Folgenden wird diesbezüglich ein Beispiel aus der Prüfpraxis konstruktiv geschützter Anlagen beschrieben, für das nach wie vor ein vergleichsweise hoher Anteil an erheblichen und zum Teil sogar gefährlichen Mängeln während der Prüfung en nach Betriebssicherheitsverordnung [1] festzustellen ist. Gleichzeitig werden Vorschläge zur Lösung der beschriebenen Problemstellungen gegeben.

## 2. Explosionsschutzkonzepte von Filteranlagen

In filternden Abscheidern bzw. Filteranlagen ereignen sich augenscheinlich auch in der aktuellen Zeit im Vergleich zu anderen verfahrenstechnischen Anlagen gehäuft Explosionen mit z. T. großem Schadensausmaß. Die Tabelle 1 beschreibt auszugsweise den Anteil verschiedener Anlagentypen an Explosionsereignissen für verschiedene Jahre.

Tabelle 1: Anteil verschiedener Anlagentypen an Staubexplosionsereignissen (Auszug)

| Anlagentyp                      | BIA Report<br>11/97 – Zeitraum<br>bis einschl. 1995 [16] | Combustible Dust Incident Report |           |           |           |
|---------------------------------|--|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                 |  | 2016 [17]                        | 2017 [18] | 2018 [19] | 2019 [20] |
| Filteranlagen                   | 18 %   | 30 %                             | 16 %      | 23 %      | 22 %      |
| Silos                           | 19 %   | 12 %                             | 14 %      | 14 %      | 13 %      |
| Speicheranlagen                 | n.u.   | 15 %                             | 8 %       | 10 %      | 10 %      |
| Trockner                        | 9 %  | n.a.                             | n.a.      | n.a.      | 17 %      |
| Mahl- und Zerkleinerungsanlagen | 13 %   | 6 %                              | n.a.      | n.a.      | n.a.      |
| Elevatoren / Transportanlagen   | 11 %   | 6 %                              | 10 %      | 10 %      | 11 %      |

Vor diesem Hintergrund sind filternde Abscheider für brennbare Stäube, wie sie z. B. in der VDI 2263 Blatt 6 [6] beschrieben werden, in vielen Fällen Gegenstand konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen. Die Gefährdungsbeurteilung führt in diesen Fällen zum Schluss, dass eine Vermeidung explosionsfähiger Gemische innerhalb der Filteranlage und deren unmittelbar angeschlossenen Roh- und Reingasleitungen zumindest zeitweise und zumindest innerhalb einzelner Bereiche dieser Anlagen nicht mit einem ausreichenden Maß an Sicherheit möglich ist. Die Filteranlage filtert die aus den vorgeschalteten Prozessen abgesaugten Stäube. Es handelt sich hierbei in der Regel um staubförmige Stoffe mit hohen Feinanteilen < 500 µm, die je nach Stoff als vergleichsweise zündwillig und zündempfindlich einzustufen sind.

Im Falle von organischen Stäuben weisen diese Stoffe unter Umständen auch ein als vergleichsweise kritisch einzustufendes Selbstentzündungsverhalten im Sinne der EN 15188 [9] in Verbindung mit einem als kritisch zu wertenden Brandverhalten im Sinne der EN 17077 [10] auf. Zum Teil filtern diese Anlagen auch abgesaugte Stäube aus Trocknern, die mit Prozess-temperaturen weit über atmosphärischen Temperaturen arbeiten oder aus Mahlanlagen, wo mit vergleichsweise hoher Auftretenswahrscheinlichkeit mit dem Eintrag potenzieller Zündquellen in Form von heißen Partikeln in die Filteranlage zu rechnen ist, vgl. hierzu ebenfalls Tabelle 1 bzgl. des Anteils von Mahl- und Trocknungsanlagen an Staubexplosionsereignissen. Sind z. B. im Falle der Betrachtung zur möglichen Zündquelle „Selbstentzündung“ Verweilzeiten abgelagerter Stäube bei höheren Temperaturen über Umgebungstemperatur (d.h. über der sog. Selbstentzündungstemperatur) und die Menge dieser abgelagerten Stäube nicht eindeutig quantifizierbar, ergibt sich i.d.R. aufgrund der dann nicht mit ausreichender Sicherheit ausschließbaren möglichen Zündquelle „chemische Reaktion/Selbstentzündung“ die Notwendigkeit der Integration konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen. Eine Explosion im Inneren der Filteranlage kann nicht sicher ausgeschlossen werden und es müssen schädliche Auswirkung dieser Explosion auf die Beschäftigten vermieden werden.

Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes sind grundsätzlich Gegenstand von Prüfungen überwachungsbedürftiger Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen gemäß Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV [1]). Diese Prüfungen setzen sich zusammen aus einer Ordnungsprüfung und einer technischen Prüfung. In Abhängigkeit der Prüfung ist auch die Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes erforderlich. Eine wesentliche Prüfgrundlage für diese Prüfung stellt die Dokumentation des Explosionsschutzkonzeptes dar. Um einerseits die Notwendigkeit konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen und andererseits auch deren ordnungsgemäße Umsetzung im Rahmen der technischen Prüfung zu prüfen, ist die Nachvollziehbarkeit anhand einer ausreichend detaillierten Beschreibung des betrachteten verfahrenstechnischen Prozesses einschließlich der relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen der Stoffe sowie der im Einzelnen umgesetzten Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes unerlässlich.

Die Prüfpraxis im Falle von Filteranlagen einschließlich deren vorgeschalteter Anlagen wie z. B. Trockner oder Mahlanlagen sieht oftmals so aus, dass mit Ausnahme einer Konformitätserklärung nach Richtlinie 2006/42/EG [4] und ggf. einer vom Informationsumfang nach den o. g. Prüfmaßstäben dürftigen Betriebsanleitung keinerlei Hinweise zur ordnungsgemäßen Ausführung der Anlage nach dem Stand der Technik geliefert werden. Im Gegensatz zu den Inhalten der Konformitätserklärung ist in vielen Fällen im Rahmen der technischen Prüfung sogar davon

auszugehen, dass gefährliche Auswirkungen auf die Arbeitnehmer nicht ausgeschlossen werden können. Als typische Mängel sind beispielhaft zu nennen:

- Widersprüchliche Aussagen im Explosionsschutzdokument: Auf der einen Seite wird ein möglicher Zündquelleneintrag in die Filteranlage beschrieben, es finden sich jedoch keine Erklärungen, warum auf konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen für die Filteranlage bzw. auch für die dieser Anlage vorgeschalteten Anlagen verzichtet wurde.
- Konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen wurden speziell für die Filteranlage vorgesehen, die technische Ausführung dieser Maßnahmen scheint jedoch den Anforderungen der EN 14491 „Druckentlastung von Staubexplosionen“ [14] zu widersprechen, z. B. Einbauten in Form von Filterschläuchen sind direkt vor der Druckentlastung angeordnet, Rückhalteeinrichtungen für Filterschläuche wurden nicht genutzt und es existieren keine experimentellen Nachweise, welche die Wirksamkeit dieser Ausführung für den speziellen Fall belegen.
- Explosions-Entkopplungseinrichtungen im Sinne der EN 15089 „Explosions-Entkopplungssysteme“ [12] wurden nicht integriert (rohgasseitig und ggf. reingasseitig), bzw. die Einbauvorschriften für diese Systeme wurden ignoriert.
- Die Explosionsfestigkeit im Sinne der EN 14460 „Explosionsfeste Geräte“ [11] der explosionsdruckhaltenden Bauteile ist unbekannt, bzw. nicht dokumentiert.
- Die Berechnung der erforderlichen Druckentlastungsfläche berücksichtigt nicht die ggf. eingeschränkte Wirksamkeit von Druckentlastungseinrichtungen, vgl. EN 14491.
- Es werden Druckentlastungseinrichtungen genutzt, die nicht als autonome Schutzsysteme im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU [3] geprüft wurden.

Auch wenn gemäß TRBS 1201 Teil 1 „Prüfung von Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“ [7], im Abschnitt 4.3.3.1 Prüfinhalte der Anlagenprüfung, die im Rahmen von Konformitätsbewertungsverfahren bereits geprüft und dokumentiert wurden, nicht erneut im Rahmen von Prüfungen nach Betriebssicherheitsverordnung geprüft werden müssen, so ist nach dieser Technischen Regel trotzdem die oben erwähnte Dokumentation, die im Rahmen von Konformitätsbewertungsverfahren für den Verwender zu erstellen ist, auf Vollständigkeit und Plausibilität hinsichtlich der Eignung des Produktes für den Verwendungszweck zu prüfen (Konformitätserklärung, Betriebsanleitung, ggf. zugehörige Produktdatenblätter, Ergebnisse von Prüfungen etc.). Die erforderlichen Mindestanforderungen bezüglich des Inhaltes dieser Dokumentation sind unter anderem in den europäischen Normen zu finden, welche für das jeweilige Produkt anwendbar sind. Die alleinige Vorlage einer EG- bzw. EU-Konformitätserklärung mit

Bezug zu den für dieses Produkt anwendbaren europäischen Gemeinschaftsrichtlinien, wie zum Beispiel Richtlinie 2006/42/EG oder 2014/34/EU, ist nicht ausreichend.

Ergeben sich bei der Prüfung der Dokumentation Mängel, so ist infrage zu stellen, ob das jeweilige Produkt die Anforderungen der angewendeten Richtlinien erfüllt und ordnungsgemäß inverkehr gebracht wurde. In diesem Fall steht dann die Prüfung nach BetrSichV und nicht zuletzt der Prüfer selbst im Spannungsfeld zwischen

- a) dem Arbeitgeber als Auftraggeber der Prüfungen nach BetrSichV, der sich auf die EG- bzw. EU-Konformitätserklärung des Herstellers abstützt,
- b) dem Hersteller des Produktes, der ebenfalls nachdrücklich auf die EG- bzw. EU-Konformitätserklärung verweist und
- c) ggf. dem Stand der Technik, der unter anderem in den für das jeweilige Produkt anwendbaren europäischen Normen dokumentiert ist.

### 3. Problemlösungsvorschläge

Zur Dokumentation der Explosionsschutzmaßnahmen und des Explosionsschutzkonzeptes ist sowohl eine aussagekräftige Gefährdungsbeurteilung im Sinne der Gefahrstoffverordnung aber ebenso eine aussagekräftige Dokumentation des Herstellers von Produkten, die mit konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen ausgerüstet sind, erforderlich. Filteranlagen sind im europäischen Wirtschaftsraum als Bestandteil von „Maschinen“ konform zur europäischen Richtlinie 2006/42/EG auszuführen. Sie weisen in vielen Fällen jedoch keine gerätebezogenen potenziellen Zündquellen im Sinne der EN ISO 80079-36 [15] auf und fallen somit nicht in den Anwendungsbereich der Richtlinie 2014/34/EU auch wenn sie explosionsfähige Staub/Luft-Gemische verarbeiten. Unabhängig davon müssen jedoch im Rahmen der Risikobeurteilung gem. Richtlinie 2006/42/EG Anhang I Abschnitt 1.5.7 Explosionsgefahren betrachtet werden.

#### Einschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische

Diese Betrachtung erfordert, dass Aspekte wie die Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische bereits durch den Hersteller der Filteranlage geklärt werden müssen. Auch wenn die formale Zoneneinteilung, wie sie in der Richtlinie 1999/92/EG [5] beschrieben ist, nicht im Verantwortungsbereich eines Herstellers liegt, so muss er sich für die verschiedenen Bereiche seiner Filteranlage wie Rohgasleitung, Rohgasraum, Reingasraum und Reingasleitung Klarheit über die Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische verschaffen, um Explosionsschutzmaßnahmen für die Maschine in Gestalt der Filteranlage zu definieren und umzusetzen.

Speziell für die Filteranlage sind folgende Aspekte bei der Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische zu beachten:

- Art des abzusaugenden und zu filternden Staubs, d. h. Korngröße, Staubungsverhalten, was sich je nach Qualität oder Herkunft der einzusetzenden Stoffe auch verändern kann,
- anfallende Staubmenge im Prozess, beeinflusst durch mechanische Einwirkung der an die Filteranlage angeschlossenen Anlagen aus denen abgesaugt wird unter Berücksichtigung von Fehlerzuständen dieser Anlagen,
- Absaugvolumenstrom, Position und Form der Absaugeinrichtungen, welche den Stauberfassungsgrad maßgeblich beeinflussen,
- Gasgeschwindigkeit in den Rohrleitungen, sowie Geometrie der Rohrleitung mit Rohrkümmern, Querschnittsänderungen, Rücksprünge u. a.,
- Methode zur Reinigung der Filterelemente, wie Austausch der Filterelemente ohne mechanische oder pneumatische Abreinigung bei sehr geringen Staubmengen, Abreinigung der Filterelemente mechanisch oder pneumatisch zeitgetaktet oder ausgelöst durch eine Differenzdruckmessung an den Filterelementen,
- Neigung der Filterelemente zum Filterdurchbruch,
- Art der Überwachung der Anlage auf Filterdurchbruch einschließlich deren Stillsetzung und Berücksichtigung der Ausfallsicherheit dieser Überwachung,
- Verwendung von Sicherheitsfiltern.

Soweit die Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische für sämtliche Bereiche der Filteranlage abgeschlossen wurde folgt der nächste Schritt:

#### Einschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit wirksamer Zündquellen

Die Tatsache, dass die Filteranlage keine gerätebezogenen potenziellen Zündquellen aufweist, bedeutet nicht, dass keine weiteren Zündgefahren betrachtet werden müssen. Vor dem Hintergrund der in Tabelle 1 dargestellten hohen Anteile der Filter-, Mahl- und Trocknungsanlagen an Staubexplosionseignissen sollte sorgfältig abgewogen werden, ob insbesondere bei der Verwendung der Filteranlage an verfahrenstechnischen Anlagen wie Mahl- oder Trocknungsanlagen auf konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen verzichtet werden kann. Die Mahlanlage, die oftmals mit hohem Energieeintrag, hohen Umfangsgeschwindigkeiten gleichzeitig zeitlich überwiegend explosionsfähige Gemische im Inneren erzeugt, wird häufig zumindest im seltenen Fehlerfall eine wirksame Zündquelle für explosionsfähige Staub/Luft-Gemische erzeugen. Je nach Betriebsart der Mühle mit hoher Strömungsturbulenz oder auch sehr



kleinen freien Volumina im Mahlrauminneren in Verbindung mit den eingesetzten Stoffen wird es nicht zwangsläufig zur Zündung innerhalb des Mahlgehäuses kommen, es werden jedoch glimmende, brennende Partikel in die der Mühle angeschlossenen Filteranlage eintreten, die in Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische dort zur Gemischzündung führen können.

Gleichfalls ist innerhalb von Trocknern nicht in allen Fällen mit einer Gemischzündung im Trocknerinneren zu rechnen, da dort in großer Konzentration eher grobe, stückige Stoffe mit einem eher geringen Feinanteil, der in die Filteranlage eingetragen wird, verarbeitet werden. Im Trockner ist dann eher mit einem Brandrisiko als mit einem Staubexplosionsrisiko zu rechnen. An den Filterelementen akkumulierter Staub aus diesem Trockner wird zwar eher in größeren Zeitabständen abgereinigt und führt dann nur gelegentlich, nicht zeitlich überwiegend zur Bildung explosionsfähiger Gemische im Rohgasraum des Filters. Wenn jedoch im Trockner keine zuverlässige Branddetektion vorhanden ist, die innerhalb einer Zeitspanne, die deutlich geringer ist, als das Abreinigungsintervall der Filterelemente zu einer sofortigen Abschaltung der Anlage und sofortigen Abschottung der Rohgasleitung vom Trockner zur Filteranlage führt, dann kann eine Gemischzündung in der Filteranlage trotzdem nicht sicher ausgeschlossen werden. Zu beachten ist hier insbesondere auch die eingeschränkte Verlässlichkeit von Branddetektionseinheiten, wie z. B. CO-Warneinrichtungen oder Temperaturmessungen bei hohen Abluftvolumenströmen innerhalb der Filteranlage. Durch Verdünnung der Brandgase mit Frischluft können unter Umständen Zeitverzögerungen bei der Detektion entstehen, die eine frühzeitige Anlagenabschaltung in o. g. Sinne unmöglich macht.

Folgende Zündgefahren sind in Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische speziell für Filteranlagen relevant:

- Eingetragene Zündquellen, z. B. brennende Partikel durch die der Filteranlage vorgeschalteten Anlagen wie Trockner, Mahlanlagen aber auch Schleifarbeitsplätze bei denen bereits betriebsmäßig zumindest innerhalb eines bestimmten Umkreises von der Arbeitsstelle mit Funkenbildung zu rechnen ist,
- Zündquellen aus elektrostatischen Entladungen bei Stäuben mit geringer Mindestzündenergie oder bei leitfähigen Stäuben, z. B. durch isolierende Filtermaterialien und Auskleidungen an den Innenwänden der Filteranlage im Bereich stark ladungserzeugender Prozesse wie pneumatische Filterabreinigung,
- gefährliche Aufladung der Staubwolke im Falle von hoch isolierenden Stäuben bei gleichzeitiger Anwesenheit brennbarer Gase während des pneumatischen Abreinigungsvorgangs,

- Einbindung kleiner Metallteile in ein isolierendes Filtertuch, die sich dann als isolierte Kapazität gefährlich aufladen und z. B. für extrem zündempfindliche Stäube zu zündwirksamen Funkenentladungen führen können,
- Selbstentzündung von Stäuben, z. B. Selbstentzündung von im Rohgasraum abgelagerten Stäuben bei erhöhten Prozesstemperaturen innerhalb der Filteranlage; zu beachten sind hier auch Schwankungen der Qualität und Herkunft der Stoffe, die neben einem sich ändernden Selbstentzündungsverhalten, auch die Menge und die Verweilzeit abgelagerter brennbarer Stäube beeinflussen können.

Kommt die Risikobeurteilung des Herstellers bzw. die Gefährdungsbeurteilung des Arbeitgebers zum Schluss, dass konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen für die Filteranlage erforderlich sind, so erfolgt der letzte konzeptionelle Schritt:

#### Festlegung konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen

Eine konstruktiv geschützte Filteranlage weist nach dem aktuellen Stand der Technik folgende Merkmale auf:

- Explosionsfest im Sinne der EN 14460 entweder für den maximalen Explosionsüberdruck oder explosionsfest für einen reduzierten Explosionsüberdruck durch Anwendung von Maßnahmen wie
- Explosions-Unterdrückung im Sinne der EN 14373 „Explosions-Unterdrückungssysteme“ [13] oder Druckentlastung im Sinne der EN 14491 und
- ergänzt durch Maßnahmen zur Explosions-Entkopplung im Sinne der EN 15089 roh- und ggf. reingasseitig (sofern die angrenzenden Anlagenbereiche nicht selbst ausreichend konstruktiv geschützt sind oder es sich nicht um ungefährdete Bereiche im Freien handelt).

Bei druckentlasteten Systemen sind in allen Fällen Auswirkungen bzgl. Flamme und/oder Explosionsdruck auf die Umgebung der Druckentlastung zu beachten. Der Druckentlastungsvorgang darf sowohl durch Einbauten innerhalb der Filteranlage als auch durch Hindernisse im Einwirkungsbereich der Druckentlastung nicht behindert werden, vgl. EN 14491. Die Vorgaben der Hersteller autonomer Schutzsysteme wie Einrichtungen zur Druckentlastung, Explosions-Entkopplung und -unterdrückung sind zu beachten. Speziell bei Explosions-Entkopplungssystemen wie Explosionsschutzventile, Schieber u. ä. sind Beschränkungen bei den Einbauabständen und Rohrleitungsführung vor und ggf. nach dem Schutzsystem zu betrachten.

Sieht man sich die Inhalte der vorgenannten Normen und Regelwerke an, so wird relativ schnell deutlich, dass ein solches Explosionsschutzkonzept selbst für einen ansonsten überschaubaren Anlagenumfang wie Rohgasleitung, Filteranlage, Filteraustragsapparate und Reingasleitung mit Ventilator als vergleichsweise komplex einzustufen ist.

Die TRGS 724 führt über die Inhalte der Normen hinaus allein zur Ermittlung des zu erwartenden Explosionsdrucks die Kenntnis folgender Randbedingungen auf:

- Brennstoffart und -konzentration,
- explosionstechnische Kenngrößen,
- Anlagengeometrie,
- Herstellungs- oder Bearbeitungsverfahren,
- Sauerstoffkonzentrationen,
- Teilbefüllung von Anlagenteilen mit explosionsfähigem Gemisch,
- Druckverhältnisse,
- Turbulenzen,
- Wirksamkeit vorgelagerter Maßnahmen, z. B. Mengen- oder Konzentrationsbegrenzung, Inertisierung,
- Wirksamkeit explosionsdruckmindernder Maßnahmen, z. B. Explosionsdruckentlastung, Explosionsunterdrückung, explosionstechnische Entkopplung.

Es ist nach Durchsicht der vorgenannten Normen und Regelwerke ebenfalls klar, dass nicht jeder verfahrenstechnische Prozess innerhalb der Anwendungsgrenzen dieser Normen und Regelwerke liegt. Und so bedeutet die Abweichung der Ausführung konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen von den Anforderungen der Normen und Regelwerke nicht zwangsweise, dass die damit ausgestattete Anlage aus explosionsschutztechnischer Sicht nicht sicher betrieben werden kann. Es besteht immer die Möglichkeit die Wirksamkeit der Maßnahmen für den speziellen Anwendungsfall anhand von Explosionsversuchen ggf. ergänzt durch die Anwendung rechnerischer Verfahren nachzuweisen und für den Verwender entsprechend zu dokumentieren. Über Variation von Anlagengeometrie, Staubkonzentration und Zündortlagen an einem repräsentativen Anlagentyp können hiermit praxisnahe Ergebnisse erhalten werden. Bild 1 zeigt die Flammenausbreitung während eines Staubexplosionsversuchs an einem druckentlasteten Behälter.

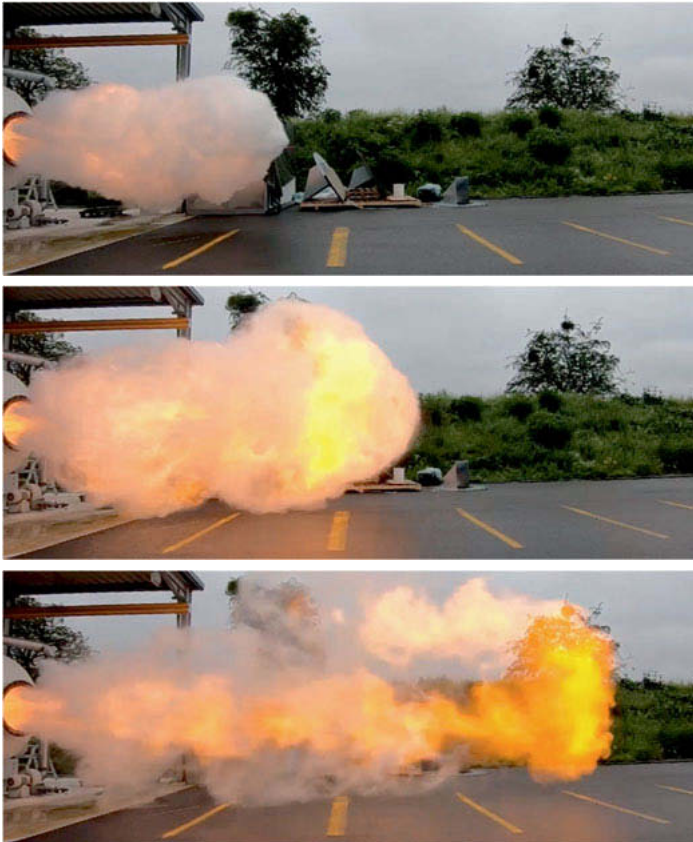


Bild 1: Flammenausbreitung während einer druckentlasteten Staubexplosion

#### 4. Fazit

Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken, sind im Rahmen von Explosionsschutzkonzepten immer dann anzuwenden, wenn die vorbeugenden Explosionsschutzmaßnahmen wie die Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische oder die Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Gemische kein ausreichendes Maß an Sicherheit für die Beschäftigten erwarten lässt. Diese Explosionsschutzmaßnahme wird bei einer Vielzahl an überwachungsbedürftigen Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen einge-

setzt, wie z. B. an Filteranlagen, welche brennbare Stäube aus Trocknungsanlagen oder Mahlanlagen absaugen. Die Schadenstatistik zeigt, dass Filteranlage auch in der heutigen Zeit gehäuft Explosionsereignissen ausgesetzt sind. Teilweise sind sie ursächlich für Explosionsereignisse zu sehen, teilweise werden in diese Anlagen aus den vorgeschalteten Anlagen wirkungsvolle Zündquellen oder Explosionen eingetragen, die dann zum Teil zu einem erheblichen Schadensausmaß führen.

Es ist im Rahmen von Prüfungen nach Betriebssicherheitsverordnung im Einklang mit diesem Sachverhalt festzustellen, dass ein nicht unerheblicher Anteil an Staubfilteranlagen erhebliche oder in einzelnen Fällen sogar gefährliche Mängel aufweist, wenn man die technische Ausführung mit dem Stand der Technik vergleicht. Die Anlagen sind oftmals im Kontext der Richtlinie 2006/42/EG inverkehr gebracht worden und es ist davon auszugehen, dass die durchgeführte Risikobeurteilung mögliche Explosionsrisiken nicht in ausreichender Bearbeitungstiefe erfasst hat.

Die Bewertung der Explosionsrisiken kann für diesen Anlagentyp nur durch enge Zusammenarbeit des Anlagenherstellers mit dem Verwender erfolgen, der beispielsweise die der Filteranlage angeschlossenen Anlagen wie Trocknungs- oder Mahlanlagen betreibt. Das Zusammenwirken aller an die Filteranlage angeschlossenen Anlagen in Verbindung mit den Eigenschaften der zu verarbeitenden Stoffe ist entscheidend für die korrekte Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen für die Filteranlage. Eine isolierte Betrachtung der Filteranlage ist in allen Fällen nicht zielführend, da die Auftretenswahrscheinlichkeit des explosionsfähigen Gemisches als auch die der Zündquellen in der Filteranlage maßgeblich durch das Schutzkonzept der angeschlossenen Anlagen beeinflusst wird. Änderungen der Stoffeigenschaften in den der Filteranlage angeschlossenen Anlagen und Fehlerzustände dieser angeschlossenen Anlagen führen in vielen Fällen ungehindert zum Eintrag wirksamer Zündquellen in die Filteranlage, die zudem die relativ zündwilligen und zündempfindlichen Feinstäube verarbeitet. Dementsprechend führt eine Gemischzündung dieses Staubs zu Explosionsabläufen mit hohen Reaktionsgeschwindigkeiten, die durch korrekt ausgelegte konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen beherrscht werden müssen.

Durch das rechtzeitige Hinzuziehen einer geeigneten Prüforganisation bereits bei der Planung der Errichtung oder Änderung staubverarbeitender Anlagen können erfahrungsgemäß vorgenannte Fehler und Explosionsgefahren frühzeitig erkannt und vermieden werden.

- [1] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (BetrSichV) zuletzt geändert durch Artikel 147 der Verordnung vom 08. Mai 2019, Bundesministerium für Arbeit und Soziales
- [2] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) zuletzt geändert durch Artikel 148 der Verordnung vom 29. März 2017, Bundesministerium für Arbeit und Soziales
- [3] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, 26.02.2014
- [4] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)
- [5] Richtlinie 1999/92/EG Richtlinie 1999/92/EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können (Fünfzehnte Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Abs. 1 der Richtlinie 89/391/EWG) Vom 16. Dezember 1999 (ABl. EU Nr. 2000 L 023, S. 57) zuletzt geändert durch Richtlinie 2007/30/EG vom 20. Juni 2007 (ABl. EU Nr. L 165, S. 21) in Kraft getreten am 28. Juni 2007
- [6] VDI 2263 Blatt 6, Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren -Beurteilung – Schutzmaßnahmen, Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen, Ausgabe 2017
- [7] TRBS 1201 Teil 1 „Prüfung von Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“, Ausgabe 03/2019
- [8] TRGS 724 „Gefährliche explosionsfähige Gemische – Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken“, Ausgabe 07/2019
- [9] prEN 15188:2019, Bestimmung des Selbstentzündungsverhalten von Staubschüttungen
- [10] EN 17077:2018, Bestimmung des Brandverhaltens von Staubschüttungen
- [11] EN 14460:2018, Explosionsfeste Geräte
- [12] EN 15089:2009, Explosions-Entkopplungssysteme
- [13] EN 14373:2005. Explosions-Unterdrückungssysteme
- [14] EN 14491:2012, Druckentlastung von Staubexplosionen
- [15] EN ISO 80079-36:2016, Explosionsfähige Atmosphären - Teil 36: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären - Grundlagen und Anforderungen

- [16] BIA-Report 11/97, Dokumentation Staubexplosionen Analyse und Einzelfalldarstellung, Verfasser Jeske, A., Beck, H., Dezember 1997, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA des HVBG, Sankt Augustin
- [17] 2016 Combustible Dust Incident Report (North America), Author: Clooney, Ch., Dust Safety Science, DustEx Research Ltd, 60 Bridgeview Drive, Halifax, NS B3P 2M4, Canada
- [18] 2017 Combustible Dust Incident Report (North America), Author: Clooney, Ch., Dust Safety Science, mydustexplosionresearch.com, DustEx Research Ltd, 60 Bridgeview Drive, Halifax, NS B3P 2M4, Canada
- [19] 2018 Combustible Dust Incident Report (North America), Author: Clooney, Ch., Dust Safety Science, dustsafetyscience.com, DustEx Research Ltd, 60 Bridgeview Drive, Halifax, NS B3P 2M4, Canada
- [20] 2019 Combustible Dust Incident Report (North America), Author: Clooney, Ch., Dust Safety Science, dustsafetyscience.com , DustEx Research Ltd, 60 Bridgeview Drive, Halifax, NS B3P 2M4, Canada





## **Neue VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10**

### **„Staubbrände und Staubexplosionen – Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen – Mischeranlagen“**

## **New VDI-Guideline 2263 Part 10**

### **"Dust fires and dust explosions – Hazards –assessment – protective measures – Mixing equipments"**

M.Sc. **Matthias Reinecke**, Covestro Deutschland AG, Leverkusen;  
Dipl.-Ing. **Joachim Lucas**, IBExU GmbH, Freiberg

#### **Kurzfassung**

In Mischern und Mischanlagen werden in der industriellen Praxis häufig brennbare und explosionsfähige Stoffe verarbeitet. In Abhängigkeit von den verwendeten Ausgangsstoffen und dem angewandten Mischverfahren können dabei Brände und/oder Explosionen durch die Entzündung von Staub/Luft-Gemischen, Gas/Luft-Gemischen, Dampf/Luft-Gemischen oder hybriden Gemischen auftreten. Diese Einflussparameter müssen im Rahmen der durch den Mischeranlagenhersteller durchzuführenden Risikobeurteilung als auch der durch den Arbeitgeber durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung als Basis zur Festlegung erforderlicher Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen berücksichtigt werden. Der Entwurf (Gründruck) zur neuen VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10 [1] findet daher Anwendung auf die Brand- und Explosionsgefahren, deren Beurteilung und die Maßnahmen des Brand- und Explosionsschutzes an Mischeranlagen. Die Richtlinie legt die europäischen und deutschen gesetzlichen Regelungen zur Bereitstellung von Mischern auf dem Markt sowie zum Betrieb von Mischern dar und gibt praktische Hilfestellung zur Bewertung des Brand- und Explosionsrisikos sowie zur Festlegung adäquater, dem Stand der Technik entsprechender Schutzkonzepte.

#### **1. Einleitung - Basis für das neue Blatt 10 zum Explosionsschutz an Mischern**

Die im September 2020 als Gründruck veröffentlichte VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10 beschreibt den Stand der Technik zum Brand- und Explosionsschutz von Mischeranlagen im Sinne der Legaldefinition des § 2 Abs. 15 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) sowie § 2 Abs. 10 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Die in der Richtlinie abgebildeten Grundlagen zur Risiko- und Gefährdungsbeurteilung sowie zur Ableitung von Schutzkonzepten basieren auf

den Erkenntnissen von Forschungsvorhaben [2], [3] sowie Erfahrungswerten aus der Hersteller- als auch Betreiberpraxis.

Entsprechend Erfahrungswerten und früheren Angaben in den Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) wurde ehemals ein Mindestfüllgrad von 70 % im Mischer als ausreichende vorbeugende Explosionsschutzmaßnahme zur Vermeidung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre angesehen. Eine im Rahmen der Aktualisierung der Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) angestrebte Validierung dieses „Mindestfüllgradkriteriums“ durch praktische Explosionsversuche zeigte jedoch keine positiven Ergebnisse [2]. Demnach ist das Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Bereich von möglichen wirksamen Zündquellen bei einem hohen Befüllgrad von mindestens 70 % nicht mit hinreichender Sicherheit auszuschließen. Ein weiterführendes Vorhaben [3] zur strukturierten und umfassenden Untersuchung der Explosionsrisiken an Mischern zeigte, dass branchenabhängig Randbedingungen beim Betrieb von Mischern anzunehmen sind, die sich nicht primär auf den Explosionsschutz beziehen, jedoch einen Einfluss auf diesen haben können. Beispielsweise zu erwähnen sind die in der Nahrungsmittel- und Pharmaindustrie aus Qualitäts- und Hygienegründen getroffenen Maßnahmen zur Vermeidung eines Fremdkörpereintrages oder der Anteil nennenswerter Mengen an inerten Rohstoffen in typischen Baustoffmischungen. Daraus wurden beispielhafte Schutzkonzepte abgeleitet, die branchenunabhängig angewandt werden können, aber bei denen nicht zwingend inhärente Prozesseigenschaften vorauszusetzen sind.

Basierend auf den im Rahmen der durchgeführten Forschungsvorhaben [2], [3] gewonnenen Erkenntnissen wurden die in den Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) aufgeführten Beispiele für Mischer im Jahr 2014 angepasst.

Die seither durch verschiedene Hersteller sowie Betreiber als auch notifizierte Stellen in der Anwendung dieser Erkenntnisse gesammelten Erfahrungen sind in die Erstellung des Gründrucks zur neuen VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10 eingeflossen.

## **2. VDI 2263, Blatt 10: Inhaltsübersicht**

Die Gliederung des Gründrucks zur neuen VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10 entspricht dem bewährten Konzept zur Planung einer neuen Anlage und ist Bild 1 zu entnehmen.



Bild 1: Gliederung des Gründrucks zur neuen VDI-Richtlinie 2263 Blatt 10

Durch die neue Richtlinie wird dem Anwender in der Praxis anhand von Beispielen zur Zoneneinteilung in Abhängigkeit von den Rohstoffeigenschaften und dem angewandten Mischverfahren eine wichtige Hilfestellung zur Erstellung eines Explosionsschutzkonzeptes gegeben. Ferner werden Maßnahmen beispielhaft aufgezeigt, mit der die Auftretenswahrscheinlichkeit gefährlicher explosionsfähiger Gemische reduziert und damit die Zoneneinteilung beeinflusst werden kann. Ergänzend gibt die Richtlinie eine Orientierungshilfe bei der Beurteilung des Auftretens von für den Betrieb von Mischern relevanten Zündquellen und Maßnahmen zu deren Vermeidung. Anknüpfend sind Anforderungen an die funktionale Sicherheit der beschriebenen Maßnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Gemische und wirksamer Zündquellen angegeben. In diesem Zusammenhang werden Beispiele zur Umsetzung von MSR-Einrichtungen nach dem technischen Regelwerk zur funktionalen Sicherheit aufgezeigt.

Die VDI-Richtlinie enthält weiterhin relevante organisatorische Maßnahmen zum Brand- und Explosionsschutz an Mischieranlagen.

Ebenfalls werden die rechtlich relevanten Aspekte zur Bereitstellung von Mischern auf dem Markt als auch zum Betrieb von Mischern mit Brand- und Explosionsgefahren in der neuen Richtlinie erläutert. Insbesondere werden die Schnittstellen zwischen dem Hersteller und Verwender sowie die jeweiligen Verantwortlichkeiten als auch der mögliche Umgang mit Altgeräten beleuchtet.

### 3. Mischertypen und Mischprinzipien

Unter dem Begriff „Mischen“ versteht man im Allgemeinen die Vereinigung von mindestens zwei verschiedenen Ausgangsstoffen (hier: Schüttgüter bzw. Stäube) zu einem Gemisch. In der industriellen Produktion werden Mischer daher überall dort eingesetzt, wo mehrere Stoffe homogenisiert werden müssen.

Mischer lassen sich nach gängigen Unterscheidungsmerkmalen, welche eine Relevanz für die Beurteilung der Brand- und Explosionsrisiken haben, klassifizieren. In der Industrie werden im Wesentlichen folgende zwei Mischprinzipien eingesetzt, die auch kombiniert zur Anwendung kommen:

- **Zwangsmischer:** Mischer mit motorisch betriebenen Mischwerkzeugen werden als Zwangsmischer bezeichnet. Für den überwiegenden Anteil der Zwangsmischer ist ein stationärer Mischbehälter, in welchem ein oder mehrere Mischwerkzeuge angeordnet sind, charakteristisch. Die Mischwerkzeuge werden üblicherweise mit Umfangsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5 m/s bis 45 m/s betrieben und weisen in der Regel einen wenige Millimeter großen Spalt zum Behälter auf.
- **Freifallmischer:** Diese Mischer basieren auf der ausschließlichen Ausnutzung der Schwerkraft. Das Mischgut wird im Allgemeinen durch einen rotierenden Mischbehälter, welcher im Inneren statische Mischwerkzeuge aufweisen kann, homogenisiert. Hierbei wird das Mischgut infolge der Rotationsbewegung des Mischbehälters angehoben und durch das schwerkraftgestützte Herabfallen vermischt.

Mischer können zudem hinsichtlich folgender Merkmale unterschieden werden:

- **Bauform:** Horizontal-, Vertikal-, Konusschnecken- und Containermischer
- **Betriebsweise, z. B.:**
  - kontinuierlicher (Durchlaufmischer) oder batchweiser (Chargenmischer) Betrieb
  - Betrieb bei niedrigen bzw. hohen Temperaturen zur Kühlung respektive Heizung/ Trocknung
  - Betrieb im Vakuum/Unterdruck bzw. bei Überdruck

Die unterschiedlichen Mischprinzipien, Bauformen und Betriebsweisen sind relevant bei der Bewertung des Brand- und Explosionsrisikos.

### 4. Brand- und Explosionsrisiken an Mischern

Brände und Explosionen stellen grundsätzlich ein hohes Risiko für Mensch, Umwelt und Sachwerte dar. Die Hauptursachen hierfür liegen in der teils beträchtlichen Wärme- und

Druckwirkung und in den entstehenden Verbrennungsprodukten, die toxisch und umweltgefährdend sein können.

Bei Mischern handelt es sich sehr häufig um Bestandteile verfahrenstechnischer Anlagen, die im Inneren von Produktionsgebäuden aufgestellt sind. Sie weisen oftmals diverse Schnittstellen zu vor- und nachgeschalteten Anlagenbereichen, wie z.B. Einrichtungen zur Rohstofflagerung und -dosierung oder Produktsilos/ Verpackungseinrichtungen, auf. Daher sind in der Regel Wechselwirkungen bei der Bewertung des Brand- und Explosionsrisikos von Mischern mit den vor- und nachgeschalteten Anlagen zu bewerten.

Kommt es zu einem Brand im Inneren eines Mixers, so führen die daraus resultierenden Temperaturen meist zur Schädigung und/oder Zerstörung von Dichtungen und ggf. vorhandenen Filtermedien eines Aufsatzfilters. Ferner ist eine Brandübertragung, z. B. in angeschlossene Entstaubungsanlagen oder den Aufstellungsbereich, möglich. Übersteigt der bei einer Explosion resultierende Druck die Festigkeit des Mixers, kann es zum Bersten des Mischbehälters kommen. Dabei können zusätzliche Gefahren durch wegfliegende Teile und austretende Flammen im Aufstellungsbereich entstehen. Diese können im Umfeld anwesende Personen verletzen oder eine gegebenenfalls vorhandene explosionsfähige Atmosphäre im Aufstellungsbereich entzünden.

Eine Besonderheit beim Betrieb von Mischern ist, dass es in der Folge der verfahrenstechnisch gewollten Vermischung der Ausgangsstoffe zur betrieblichen Aufwirbelung der am Verfahren beteiligten Feststoffe kommt. Sind diese brennbar und weisen einen nennenswerten Feinanteil auf, muss häufig von einem betrieblich bedingten Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Mischbehälter ausgegangen werden. Insbesondere in der Pharma- und Nahrungsmittel- als auch chemischen Industrie werden den Feststoffen in Mischern häufig brennbare Flüssigkeiten z. B. zum Granulieren oder Coaten zugemischt. Dabei kann es abhängig von den sicherheitstechnischen Kenngrößen der Feststoffe und Flüssigkeiten zum Auftreten hybrider Gemische kommen, welche ein im Vergleich zu reinen Feststoffmischungen erhöhtes Brand- und Explosionsrisiko aufweisen. Hinsichtlich der resultierenden Zoneneinteilung werden im Blatt 10 der VDI-Richtlinie 2263 entsprechende Fallbeispiele erläutert (Mischer mit brennbaren Feststoffen, Vertikal- und Konusmischer mit brennbaren Feststoffen geringer Staubbauart, Mischer mit inerten Feststoffanteilen und Mischer mit Inertisierung).

Beim Mischen von metallischen Produkten sind brandfördernde Verunreinigungen, z. B. Farbreste, Öle und Fette, zu beachten, durch welche ggf. auch schwer entzündbare Stoffe zur Entzündung gebracht werden können. Insbesondere bei Vorhandensein von Leichtmetallstäuben kann Wasser bzw. Feuchtigkeit ggf. gefährliche Reaktionen im Mischer auslösen (siehe dazu z. B. Ereignis 1 in [4]).

## 5. Maßnahmen zum Brand- und Explosionsschutz an Mischern

### 5.1 Brandschutz

Zur Beurteilung der Brandgefährdung/Festlegung von Brandschutzmaßnahmen an Mischern ist die Kenntnis der temperaturbezogenen Brennzahl ( $BZ_T$ ), der Glimmtemperatur und des Selbstentzündungsverhaltens der Feststoffe erforderlich. Neben dem Mischgut, das i. d. R. die größte Brandlast an einem Mischer darstellt, sind auch andere brennbare Bauteile des Mischers (z. B. Filtermedium eines Aufsatzfilters oder brennbare Auskleidungen im Mischer) in die Risiko-/Gefährdungsbeurteilung einzubeziehen.

Grundsätzlich sind die Brandschutzmaßnahmen für Mischanlagen im Kontext zur Brandgefährdung im Aufstellungsbereich zu sehen. Da Mischer selbst häufig keine erhöhte Brandgefährdung darstellen, genügt es in der Regel, die entsprechend der Brandlast erforderliche Menge an Löschmitteleinheiten bereitzustellen. Darüber hinausgehende brandschutztechnische Maßnahmen am Mischer sind auch bei brennbaren Stäuben/Schüttgütern mit der Brennzahl  $BZ_T > 2$  oder bei brennbaren Filtermedien bei einem vorhandenen Aufsatzfilter nicht üblich. Zur Vermeidung eines Brandes können die identischen Schutzmaßnahmen angewendet werden, wie sie zur Vermeidung einer Entzündung von explosionsfähigen Gemischen zur Anwendung kommen.

### 5.2 Explosionsschutz

#### 5.2.1 Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre

Für den Aufstellungsbereich von Mischern finden die allgemein bewährten Maßnahmen zur Vermeidung des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre Anwendung, wie:

- technische Dichtheit der Mischanlage,
- Aspiration in Bereichen mit betriebsbedingter Freisetzung (z.B. Einfüll- und Entleerstellen),
- regelmäßige Reinigung zur Vermeidung gefahrdrohender Ablagerungen sowie
- technische Lüftung bei Vorhandensein/Freisetzung brennbarer Gase/Dämpfe.

Eine insbesondere bei älteren Anlagen vorzufindende Ausführung von Aufsatzfiltern ohne Gehäuse und angeschlossene Aspiration (einfacher Filterschlauch auf Entlüftungsstutzen am Mischbehälter) hingegen ist meist nicht geeignet, da der Abscheidegrad in der Regel gering ist und die Umgebung des Mischers mit der Zeit verhältnismäßig stark verstaubt.

Im Inneren von Mischern kann das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Gemische z.B. durch eine Inertisierung unter Zugabe *gasförmiger Inertstoffe* (z. B. Kohlendioxid,

Wasserdampf, Stickstoff oder Edelgase) reduziert/verhindert werden. Als Inertisierungsmethoden mit gasförmigen Inertstoffen haben sich in der Praxis Druckwechselverfahren, unter Anwendung von Vakuum oder Überdruck, sowie die Durchflussspülung zur Aufrechterhaltung der vorhandenen Inertisierung bewährt. Bei Inertisierung mit Wasserdampf ist die Auswirkung einer möglichen Kondensation zu berücksichtigen. Die Inertisierung ist nur in geschlossenen Anlagenteilen anwendbar. Sie erfordert einen erhöhten apparativen Aufwand, führt in der Regel zur Verlängerung von Chargenzeiten und muss messtechnisch überwacht werden.

Neben der Verdrängung des Oxidationsmittels mit einem Inertgas kann das Explosionsrisiko auch durch eine *Feststoffinertisierung* im Mischer vermindert werden bzw. durch eine rezepturbedingte Mischung von brennbaren mit nicht brennbaren Feststoffen entsteht automatisch eine gewisse Inertisierungswirkung. Falls der Anteil an inerten Feststoffen so hoch ist, dass die hergestellten Mischungen nicht explosionsfähig sind (ab einem Inertanteil größer 90 Gew.-% gegeben oder alternativ nachzuweisen), ist ausschließlich während der Befüllung und zu Beginn des Mischvorgangs mit dem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische zu rechnen. Die inerten Bestandteile sind bei der Beschickung vorzulegen. Weiterhin ist auch eine Aufgabe von vordosierten, geschichteten Rohstoffen aus Vorlagebehältern möglich. Hierbei werden die brennbaren Rohstoffe in die inerten Rohstoffe eingebettet. Bei dem Befüllen des Mixers ist eine Relativgeschwindigkeit von  $< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  zu empfehlen.

Die *Begrenzung der Staubkonzentration* als Maßnahme zur Vermeidung explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische ist für reine Trockenmischungen aufgrund der starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen der Staubkonzentration in Mixern in der Regel nicht anwendbar.

Ist das Auftreten von Gasen oder Dämpfen zu berücksichtigen, kann durch gezielte *Be- und Entlüftung des Mischbehälters* ein Betrieb unterhalb der unteren Explosionsgrenze des Gases/Dampfes realisiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass selbst beim Betrieb unterhalb der unteren Explosionsgrenze des Gases respektive Dampfes die Bildung eines hybriden Gemisches aus brennbarem Staub und brennbarem Gas/Dampf möglich ist. Erst bei weniger als 10 % der unteren Explosionsgrenze des brennbaren Gases/Dampfes ist nicht mehr von einem hybriden Gemisch auszugehen, d. h. für die sicherheitstechnische Beurteilung (z. B. Zündquellenbewertung) sind dann nur die Kenngrößen des brennbaren Staubes heranzuziehen. Bereits ab 10 % der UEG des brennbaren Gases/Dampfes tritt eine signifikante Beeinflussung der Entzündbarkeit/des Explosionsverhaltens des brennbaren Staubes auf. Eine Abschätzung des notwendigen Luftvolumenstromes zur Vermeidung einer explosionsfähigen Gas/Dampf-atmosphäre bei der Durchströmung eines Mixers ist jedoch kaum möglich, da sowohl die Stoffaustauschflächen durch die Mischgutbewegung als auch die Mischguttemperatur während des Mischvorganges zeitlich und örtlich stark variieren können. Daher ist in der Regel

eine experimentelle Ermittlung der Quellstärke oder der notwendigen Luftvolumenströme erforderlich.

Die *Begrenzung der Mischguttemperatur* ist eine besondere Betriebsweise eines Mischers zur Konzentrationsbegrenzung brennbarer Dämpfe. Sie kann bei lösungsmittelfeuchten Mischgütern angewandt werden, wenn die Lösungsmittelzugabe nicht über ein Versprühen/Verdüsen der Flüssigkeit erfolgt. Dabei wird die Mischguttemperatur auf einen Wert begrenzt, bei dem die resultierende Dampfkonzentration im und oberhalb des Mischgutes unterhalb des unteren Explosionspunktes der brennbaren Flüssigkeit liegt. Soweit der untere Explosionspunkt nicht bekannt ist, kann ersatzweise der Flammpunkt unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands bei reinen, nicht halogenierten Flüssigkeiten von 5 K und bei Lösungsmittel-Gemischen ohne halogenierte Komponente von 15 K herangezogen werden. Die Schutzmaßnahme kann immer dann zum Einsatz kommen, wenn die maximale Mischguttemperatur während des gesamten Prozesses die oben genannten Bedingungen erfüllt. Dabei sind auch Temperaturschwankungen bei den Rohstoffen und im Prozess zu berücksichtigen. Hybride Gemische sind gesondert zu betrachten, da diese bereits bei Temperaturen unterhalb des unteren Explosionspunktes bzw. der oben genannten Sicherheitsabstände zum Flammpunkt auftreten können.

### 5.2.2 Vermeidung von Zündquellen

Schwerpunktmäßig sind zum sicheren Betrieb von Mischern Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung im Bereich der heißen Oberflächen, mechanisch erzeugten Funken, elektrischen Anlagen und der statischen Elektrizität erforderlich. Neben der für den jeweiligen Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen erforderlichen Eignung von Anbauteilen, wie z.B. den elektrischen Betriebsmitteln, kommt am Mischer insbesondere den Bauteilen, an denen Reib-, Schlag- bzw. Schleifvorgänge auftreten können, eine besondere Bedeutung zu. Zur Vermeidung heißer Oberflächen bzw. mechanisch erzeugter Funken können daher folgende Schutzmaßnahmen erforderlich werden:

- Temperaturüberwachungen an Lagern oder Dichtungen,
- Sperr- oder Spülgasbetrieb an Dichtungen,
- Schwingungsüberwachung,
- Gewährleistung eines ausreichenden Mindestabstands zwischen bewegten Mischwerkzeugen und dem Mischbehälter,
- Maßnahmen der vorbeugenden Wartung und Instandhaltung insbesondere an Lagerungen,



- Vermeidung eines Fremdkörpereintrages, z. B. durch Siebabscheider, Metallabscheider und
- Vermeidung von lösbaren Verbindungen, z. B. verschweißte Mischwerkzeuge oder durch Losdrehsicherungen für innenliegende Schraubverbindungen.

Elektrostatische Zündgefahren sind durch die in der Praxis bewährten und üblichen Erdungs- und Potenzialausgleichsmaßnahmen zu vermeiden. Eine Besonderheit stellt der Betrieb von Mischern mit hybriden Gemischen bzw. vorhandener Gasexplosionsgefahr im Bezug zu den elektrostatischen Zündgefahren durch aufgeladene Staubwolken dar. Können im Mischer Büschelentladungen durch aufgeladene Staubwolken (Feststoff mit spezifischem Widerstand  $\rho \geq 10^8 \Omega \cdot m$ ) nicht ausgeschlossen werden, so sind zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. eine Inertisierung, erforderlich.

### 5.2.3 Konstruktiver Explosionsschutz

Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes werden in der industriellen Mischpraxis vergleichsweise selten eingesetzt. Die grundsätzlich bei der Planung, Konstruktion und Errichtung von konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen zu berücksichtigenden Randbedingungen werden im Blatt 10 der VDI-Richtlinie 2263 dennoch erläutert.

Bei der Anwendung von Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes an Mischeranlagen ist insbesondere darauf zu achten, dass eine explosionstechnische Entkopplung an den Schnittstellen zu vor- und nachgeschalteten Anlagenbereichen erfolgt, die nicht konstruktiv geschützt sind.

## 6. Zusammenfassung, Ausblick

Im Blatt 10 der VDI-Richtlinie 2263 wird der Brand- und Explosionsschutz an Mischeranlagen umfassend dargestellt. Im vorliegenden Beitrag konnten aber nur einige wichtige Themen / Besonderheiten bei Mischeranlagen angerissen werden. Für eine umfassende Informationsbeschaffung wird deshalb auf den im September 2020 erschienenen Entwurf dieser Richtlinie verwiesen. Bis zum 28.02.2021 können Einsprüche zur Richtlinie beim VDI eingereicht werden. Diese werden anschließend in einer Einspruchssitzung im Richtlinienausschuss beraten bzw. in die endgültige VDI-Richtlinie eingearbeitet, mit deren Erscheinen dann in der 2. Jahreshälfte von 2021 zu rechnen ist.

Es ist zudem geplant, ein Blatt 10.1 der Richtlinie zu erarbeiten, welches schwerpunktmäßig konkrete Schutzmaßnahmen an speziellen Mischeranlagen darstellt.

## 7. Literaturangaben

- [1] Verein Deutscher Ingenieure [Hrsg.]: VDI Richtlinie 2263 Blatt 10 (Entwurf): - Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Mischieranlagen, Düsseldorf, September 2020
- [2] Kleßen, R. und Hesener, U.: Forschungsbericht zum Projekt „Explosionsdrucktechnische Untersuchungen in Mischern mit unterschiedlichen explosionsfähigen Stäuben und einem Befüllgrad von 70 Vol.-%“, DEKRA EXAM GmbH, Bochum, Deutschland, 2007
- [3] Reinecke, M. und Hesener, U.: Forschungsbericht „Untersuchungen zum Staubexplosionsrisiko an Mischern mit bewegten Werkzeugen zur Erstellung und Abgrenzung möglicher Explosionsschutzkonzepte“, Projekt-Nr. FF-FP 0290, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DEKRA EXAM GmbH, Bochum, 01.02.2013
- [4] Lucas, J.: Explosionsereignisse bei aluminiumhaltigen Stäuben – Ursachenermittlung und Schlussfolgerungen für die Praxis, Technische Überwachung, Bd. 48 (2007) Nr. 3, S. 20-25

# Ganzheitlicher Explosionsschutz mit integriertem Objektbrandschutz

Dr.-Ing. **Marc Scheid**, Ing. **Richard Siwek**,  
FireEx Consultant GmbH, Gais, Schweiz

## Kurzfassung

Für das sichere Handhaben brennbarer Stäube kommt häufig eine Kombination von vorbeugenden und konstruktiven Explosionsschutzmassnahmen zum Einsatz die von Brandschutzmassnahmen flankiert werden.

Schadensfälle an Anlagen mit Explosionsschutzmassnahmen zeigen, dass häufig der Explosionsschutz zu stark im Fokus steht und der Brandschutz vernachlässigt wird oder nicht optimal ausgelegt ist. Vorbeugende Explosionsschutzmassnahmen vermeiden in der Regel auch Brände hinreichend sicher. Kommen konstruktive Explosionsschutzmassnahmen zum Einsatz, können diese sich negativ auf den Brandschutz auswirken, wenn bestimmte Randbedingungen nicht beachtet werden. In vielen Fällen kommt es lediglich zu einem Brand und nicht zu einer Explosion. Es ist daher wichtig, dass Brandschutzsysteme auch auslösen, wenn es nicht zu einer Explosion kommt.

## 1. Einleitung

Beim Zusammentreffen brennbarer Stäube und Zündquellen mit ausreichend Energie, um den Feststoff zu entzünden, kommt es in industriellen Anlagen immer wieder zu Explosionen und Bränden. Die bei diesen Ereignissen auftretenden Druckwirkungen und/oder hohen Temperaturen können zu einer Gefährdung von Personen, Umwelt und Sachwerten führen und nicht selten kommt es zu einer Zerstörung von Anlagenteilen oder ganzer Anlagen.

Entsprechende Ereignisse durch Brände und Explosionen können durch geeignete Massnahmen verhindert oder zumindest in der Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert werden.

Beim Explosionsschutz spricht man hier vom so genannten vorbeugenden Explosionsschutz. Hierbei können zunächst explosionsfähige Gemische vermieden werden. Beispiele dafür sind: Austausch von Stoffen, Objektabsaugungen, dichte Bauweise, Inertisierung sowie Vermeiden von Staubakkumulationen durch kontinuierlichen Staubaustrag oder Vermeiden von Staubablagerungen durch ausreichende Luftgeschwindigkeiten und geeignete Oberflächengestaltung in Kombination mit Reinigungsmassnahmen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Zündquellen die in der Lage sind, entsprechende Staub/Luft- Gemische zu entzünden, zu vermeiden oder zumindest deren Auftretswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Können unter Berücksichtigung der Auftretswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Atmosphäre Explosionen nicht ausreichend sicher vermieden werden, sind weitere Massnahmen erforderlich, welche die Auswirkungen auf ein unbedenkliches Mass reduzieren. Man spricht hier vom konstruktiven Explosionsschutz. Auch hier sind wieder unterschiedliche Massnahmen möglich, die dann abhängig von den Randbedingungen zum Einsatz kommen können.

In der Praxis hat sich für das sichere Handhaben brennbarer Stäube oft eine Kombination aus vorbeugenden und konstruktiven Explosionsschutzmassnahmen bewährt. Durch das Zusammenspiel von vorbeugenden und konstruktiven Massnahmen bei der Handhabung von Stäuben wird das Explosionsschutzkonzept komplexer und auch schon kleine Änderungen in den Randbedingungen können einen signifikanten Einfluss auf das Schutzkonzept haben. Ein geeignetes, auf die spezielle Anlage abgestimmtes Schutzkonzept unter Berücksichtigung des Brenn- und Explosionsverhaltens der gehandhabten Feststoffe, ist daher unabdingbar. Häufig erfolgt das Erstellen zusammen mit einer Risikobeurteilung unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen von Ereignissen.

Neben dem Explosionsschutz ist hierbei auch der Objektbrandschutz zu beachten. Man unterscheidet hier zwischen vorbeugendem Brandschutz bzw. Brandverhütung und abwehrendem Brandschutz mit Massnahmen zur Schadensbegrenzung.

Brände treten häufig als Folge einer Explosion auf. Allerdings ist auch zu beachten, dass es in vielen Fällen beim Zusammentreffen von brennbarem Stoff und Zündquelle zu einem Brand, aber nicht zu einer Explosion kommt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Brand ist bei vielen Prozessen sogar höher, als für eine Explosion. Ausserdem kann die Explosion Folge eines Brandes sein, z.B. auch bei einem ungeeigneten Löschversuch.

Die Erfahrung mit Brandereignissen an explosionsgeschützten Anlagen zeigt, dass Brände häufig nicht oder zu wenig bei Schutzkonzepten berücksichtigt werden bzw. Schutzkonzepte nicht richtig durchdacht sind und Brandschutzmassnahmen nicht richtig mit dem Explosionsschutzkonzept abgestimmt sind und dadurch teilweise nicht oder nur eingeschränkt wirksam sind.

Massnahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes, insbesondere solche zur Zündquellenvermeidung, sind im Allgemeinen auch in der Lage, Brände zu vermeiden oder zumindest deren Auftretswahrscheinlichkeit zu reduzieren.

Bei inertisierten Prozessen ist allerdings zu beachten, dass die Sauerstoffkonzentration in der Anlage üblicherweise so eingeregelt wird, dass lediglich keine Explosionen mehr möglich sind. Diese Konzentrationen sind jedoch normalerweise nicht ausreichend, um Brände sicher zu verhindern oder einen Brand zu löschen.

Kommen Massnahmen zum Einsatz, die die Auswirkungen eines Ereignisses begrenzen (konstruktiver Explosionsschutz bzw. abwehrender Brandschutz), werden in der Regel unterschiedliche Konzepte verwendet.

Im Rahmen der Richtlinienreihe VDI 2263 «Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilen- Schutzmassnahmen» sind in diesem Zusammenhang mehrere Richtlinienblätter zu besonders durch Brände und Explosionen gefährdete Anlagen entstanden. In diesen werden Schutzkonzepte vorgestellt, bzw. Möglichkeiten aufgezeigt, wie entsprechende Anlagen sicher betrieben werden können:

- Blatt 5 /5.1: Explosionsschutz bei Wirbelschichtanlagen [1], [2],
- Blatt 6/6.1 Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen [3], [4],
- Blatt 7/7.1: Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen [5], [6],
- Blatt 8/8.1/8.2: Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren [7], [8], [9],
- Blatt 10: Mischeranlagen [10].

In den Richtlinienblättern zu Entstaubungsanlagen, Sprühtrocknungsanlagen, Elevatoren und Mischeranlagen werden neben Explosionsgefahren und Explosionsschutzmassnahmen auch verstärkt Brandgefahren betrachtet und auf den erforderlichen Brandschutz eingegangen.

Auch die IVSS Beispielsammlungen zum Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten «Teil 1: Mühlen, Brecher, Mischer, Abscheider, Siebmaschinen» [12] und «Teil 2: Stetigförderer, Übergabestellen und Empfangsbehälter» [13] geben einen guten Überblick zu Explosionsgefahren bei kritischen Anlagen und zeigen auf, wie entsprechende Anlagen sicher betrieben werden können bzw. wie Schutzkonzepte des vorbeugenden und konstruktiven Explosionsschutzes ineinandergreifen. Bei den IVSS Schriften liegt der Schwerpunkt aber beim Explosionsschutz.

## 2. Zündquellenvermeidung

Entsprechend den Richtlinien EN 1127-1 [14] und VDI 2263 (Grundlagenblatt) [11] kann zwischen 13 Zündquellenarten unterschieden werden. Die Praxis zeigt jedoch, dass in der Regel jeweils nur ein Bruchteil davon zu berücksichtigen ist.

Typische Zündquellen beim Handhaben brennbarer Stäube sind:

- Heisse Oberflächen,
- Flammen und heisse Gase (einschliesslich heisser Partikel),
- Mechanisch erzeugte Funken,
- Elektrische Anlagen,
- Statische Elektrizität (Funken-, Gleitstielbüschel-, Schüttkegelentladungen),
- Exotherme Reaktionen einschliesslich Selbstentzündung von Stäuben.

Abhängig von der betrachteten Anlage und dem Brenn- und Explosionsverhalten der gehandhabten Stäube haben sich in der Praxis folgende Massnahmen zur Zündquellenvermeidung bewährt:

- Einsatz von Geräten mit auf die ATEX Zone abgestimmter Gerätekategorie und auf den Staub abgestimmter maximal zulässiger Oberflächentemperatur zusammen mit regelmässiger Reinigung und Wartung sowie Instandsetzung.
- Einsatz von Geräten mit aussenliegenden Lagen und sicheren Wandabständen. Bei bewegten Anlagenteilen Begrenzung der Relativgeschwindigkeit  $< 1 \text{ m/s}$  und der Antriebsleistung  $< 4 \text{ kW}$  oder Einrichtungen zur Begrenzung oder Vermeidung unzulässiger Erhitzung wie Schieflaufwächter, Lagertemperaturüberwachung, Lagerspülung/Kühlung, Schlupfüberwachung/Drehzahlüberwachung, Überlastschutz, insbesondere bei Fördereinrichtungen und Mischern. Idealerweise zusammen mit geeigneten Materialkombinationen und Massnahmen zur Reduzierung eines Fremdkörpereintrages (z.B. Siebe, Schwergutabscheider, Metallabscheider). Sichern von Einbauten gegen lösen, insbesondere bewegten Einbauten oder Vermeiden von lösbaren Verbindungen.
- Bei Mischeranlagen Begrenzung der Mischdauer oder Betrieb ohne Zuschaltung von schnelllaufenden Mischelementen wie Zerhackern oder Begrenzung der Geschwindigkeit. Ausreichender Wandabstand zwischen Mischelementen und Gehäuse. Mischen von besonders empfindlichen Produkten die sich leicht zersetzen, zur Deflagration neigen oder bei der Prozesstemperatur beginnen zu schmelzen, ausschliesslich in Anlagen ohne bewegte Einbauten oder bei reduzierter Temperatur.
- Zum Vermeiden elektrostatischer Entladungen, Erden von allen leitfähigen Anlagenteilen, Vermeiden von Auskleidungen mit hoher Durchschlagsspannung sowie Einsatz geeigneter Packmittel z.B. Typ B oder C FIBC.

- Bei Entstaubungsanlagen zum Absaugen von Prozessen, an denen Zündquellen auftreten oder auftreten können, wie z.B. Schweissrauchabsaugungen oder Oberflächenbearbeitungsprozessen von Metallwerkstücken aber auch in der Holzindustrie, Installation von Funkendetektionsanlagen in Kombination mit Löschung oder anderen Massnahmen, die den Eintrag glühender, glimmender oder brennender Partikel in gefährdete Bereiche verhindern bzw. reduzieren, wie z.B. Ausschleusung.
- Begrenzen von Zulufttemperatur und Verweilzeit bei Trocknungsprozessen sowie Vermeiden von Anbackungen die über längere Zeit erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind (regelmässige Reinigung, Temperaturüberwachung, Temperaturschwankungen bei An- und Abfahrvorgängen, geeignete Konstruktion, Kameraüberwachung von Sprühbildern bei Trocknern). Je nach zu trocknendem Produkt kommt auch eine CO Detektion zum Einsatz.
- Organisatorische Massnahmen zum Vermeiden von so genannten trivialen Zündquellen wie Rauchen oder Heissarbeiten.
- Bei zur Zersetzung neigenden oder schmelzenden Produkten Kühlung und ggf. Zugabe von Stoffen, die ein Schmelzen oder Zersetzen vermeiden oder die Wahrscheinlichkeit reduzieren. Lagern bei abgesenkter Temperatur, Begrenzung von Lagerdauer und Volumen, Begrenzung bzw. Vermeiden von Lufteintritt und Anbackungen.

### 3. Schadensfälle

Besonders gefährdet gegen Brände sind Entstaubungsanlagen zur Absaugung von Prozessen, in denen eine Oberflächenbearbeitung von Metallen oder Leichtmetallen erfolgt sowie Schweissrauchabsaugungen.

Bei Schweissrauchabsaugungen, insbesondere bei Anlagen bei denen mit Schutzgas geschweisst wird, gelangen häufig nicht oder nur sehr wenig oxidierte, feine Metallpartikel in die Absaugung, meist zusammen mit Ölen.

Bei Absaugungen von Schleifprozessen gelangen neben feinem, nicht oder nur wenig oxidiertem Metall- oder Leichtmetallstaub, vielfach auch Schleifhilfsmittel oder Öle und Lacke mit in die Absauganlage.

Je nach Absaugstelle, können prozessbedingt Zündquellen betriebsmässig auftreten oder können nicht hinreichend sicher vermieden werden. Oft gelangen hierdurch glühende, glimmende oder brennende Partikel in die Absaugung und nicht selten auch bis in die Absauganlage und können dort zündwirksam werden. Aufgrund der oft geringen Staubkonzentrationen

in solchen Entstaubungsanlagen, kommt es in solchen Fällen deutlich häufiger zu Bränden als zu Explosionen.

In vielen Fällen sind solche Absauganlagen recht komplex und viele unterschiedliche Absaugstellen an einen Filter angeschlossen. Teilweise werden hier auch Absaugleitungen aus unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit für einen Zündquelleneintrag und Stäuben mit unterschiedlichem Brenn- und Explosionsverhalten zusammengeführt. Hierdurch kann es zu einem deutlich grösseren Brand- und Explosionsrisiko im Abscheider kommen (Zündwahrscheinlichkeit, Auswirkungen, explosionstechnische Entkopplung) aber auch zu grösseren Ablagerungen in den Rohrleitungen.

Zum Vermeiden solcher Brände werden häufig Funkendetektionsanlagen installiert, welche die Wahrscheinlichkeit für einen Eintrag von wirksamen Zündquellen in den Abscheider reduzieren sollen oder im Idealfall ganz vermeiden sollen.

Die Erfahrung eines der Autoren mit solchen Anlagen zeigt, dass entsprechende Anlagen in vielen Fällen mit recht kurzem Abstand zum Abscheider installiert werden. Dies hat den Vorteil, dass man die Anlage in der Hauptleitung installieren kann und nicht in jeder Absaugleitung eine entsprechende Anlage installieren muss. Das führt auf den ersten Blick bei Anlagen mit vielen Absaugstellen zu einer signifikanten Kostenersparnis. Zusätzlich nimmt die Anzahl der Auslösungen gegenüber einem Installationsort unmittelbar an der Absaugstelle signifikant ab.

Der Autor kann sich erinnern zu einem Fall hinzugezogen worden zu sein, bei dem wegen vieler «Fehlauflösungen» der Installationsort für eine Funkendetektion versetzt wurde. Ergebnis war jetzt, dass man nach dem Umsetzen plötzlich mehrere Brände in der Absauganlage hatte, die nicht erklärt werden konnten. In keinem der Fälle hatte die Funkendetektion angesprochen. Glücklicherweise kam es in keinem der Fälle zu einer Explosion in der Anlage. Eine genauere Betrachtung und Untersuchungen im Prüflabor kamen zu dem Ergebnis, dass sich die glühenden Partikel bis zur Funkendetektion soweit abgekühlt hatten, dass diese nicht mehr die Funkendetektion aktivierten, aber immer noch zündwirksam für im Abscheider anfallendes Gemisch waren, insbesondere, wenn dies auf den brennbaren Filterelementen anhaftete und die Zündquelle direkt mit den Filterelementen in Kontakt kam.

Interessanterweise war die Anlage mit einer Explosionsdruckentlastung ausgerüstet. Aufgrund der Funkendetektion hat man aber auf eine Löschanlage verzichtet, was beim letzten Ereignis zu einem Ausglühen des Filters und folglich zu einem Totalverlust geführt hatte.

Bei einer ähnlichen Anlage ist es zu Bränden in den Rohrleitungen gekommen. Untersuchungen zeigten hier, dass in den Absaugleitungen grössere Ablagerungen von klebrigem Feststoff



aufzufinden waren, die sich in regelmässigen Abständen entzündeten. In einem Fall kam es in der Folge auch zu einem Eintrag eines entsprechenden Glimmnestes in den Abscheider und dadurch zu Explosion. Auch hier kam es zu einem Brandschaden mit Totalverlust des Entstaubers. Dieser war zwar mit einer automatischen Löschanlage versehen, die Düsen waren allerdings nur auf der Reingasseite des Filters installiert. Man war davon ausgegangen, dass auch genügend Wasser über die Filterelemente auf die Rohgasseite gelangt. Dies war hier nicht der Fall, vermutlich wegen dem klebrigen Produkt.



Bild 1: Brandschaden ungeschützte oder nicht richtig geschützte Absauganlage

In einem anderen Fall im Bereich der metallverarbeitenden Industrie kam es in der Entstaubungsanlage einer Stahlanlage wiederholt zu Bränden und in einem Fall zu einer Explosion. Bei der Anlage war zwischen der dem filternden Abscheider und der Strahlanlage ein Zyklonabscheider zwischengeschaltet. Bei der Ursachenaufklärung konnte festgestellt werden, dass der Betreiber zwei gleiche Strahlanlagen betreibt bei der auch die gleichen Werkstücke bearbeitet werden. Allerdings ist es bisher immer nur auf einer Anlage zu Ereignissen gekommen und zwar auf der Anlage, bei der die Absaugung optimiert wurde und bei der man aufgrund der Randbedingungen zunächst von einer geringeren Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis ausgehen würde. Beispielsweise war die Entfernung zum filternden Abscheider deutlich länger als bei der anderen Anlage und zusätzlich war ein Zyklonabscheider zwischengeschaltet, der einen Funkeneintrag weiter reduzieren sollte. Interessanterweise hat man auch hier wieder die Anlage mit einer Druckentlastung versehen, aber wegen den vorbeugenden Massnahmen auf eine Löschanlage verzichtet. Eine Untersuchung des im filternden Abscheider anfallenden Produktes ergab, dass dieses deutlich feiner war, als das Produkt von der anderen Anlage

und deutlich zündempfindlicher. Es konnte auch nicht ganz ausgeschlossen werden, dass frisches Produkt, insbesondere bei den im filternden Abscheider herrschenden Temperaturen zur Selbstentzündung neigt bzw. pyrophore Eigenschaften aufweist. Untersuchungen zeigen, dass nicht nur Strahlstäube von Leichtmetallen kritisch sind. Auch Stahlstrahlstäube können ein kritisches Verhalten haben [15].

In einer anderen Branche war einer der Autoren in einen Fall involviert, in dem es zu einer Explosion in einer Anlage kam, die über einen Filter abgesaugt wurde. Anlage und Filter waren durch konstruktiven Explosionsschutz geschützt, der Filter über Druckentlastung. Zusätzlich waren alle Anlagenteile über eine halbstationäre Löschanlage geschützt, die über einen Wasservorrat gespeist werden konnte. Da man anfangs nicht bemerkt hatte, dass es auch im Filter brannte, wurde zunächst nur die Anlage selbst gelöscht. Als der Brand im Filter dann detektiert wurde, war der Wasservorrat zuneige gegangen und es konnte erst mit zeitlicher Verzögerung durch die Feuerwehr gelöscht werden. Als Folge glühte der Filter aus und es kam zu einem Totalausfall mit langem Stillstand der Anlage und entsprechendem Produktionsausfall.

Einer der Autoren wurde angerufen, dass irgendetwas bei einer Sprühtrocknungsanlage mit externem Fliessbett nicht stimme und wurde gebeten, sich das anzuschauen. Als der Autor kurze Zeit später an der Anlage eintraf, konnte er feststellen, dass das externe Fliessbett etwas seine Farbe verändert hatte. Augenscheinlich war die Anlage rotglühend. Es wurde augenblicklich eine automatische Löschung der Anlage veranlasst. Die Anlage war mit Explosionsunterdrückung und einer automatischen Löschanlage zur Brandbekämpfung ausgerüstet. Die Auslösung beider Systeme erfolgte über Drucksensoren. Da es lediglich zu einem Brand und keiner Explosion bzw. keinem Druckanstieg in der Anlage gekommen war, wurde durch das Ereignis weder die Explosionsunterdrückung noch die Löschanlage aktiviert.

In einem weiteren Fall wurde eine grosse Sprühtrocknungsanlage mit konstruktivem Explosionsschutz geschützt. Zusätzlich wurde eine halbstationäre Löschanlage installiert, die dann von der Feuerwehr mit Wasser versorgt werden sollte.

Als es zu einem Explosionsereignis kommt, funktioniert der konstruktive Explosionsschutz, allerdings ist die Feuerwehr erst mit sehr grosser Verspätung eingetroffen. Als Folge ist es zu einem Totalschaden in der Anlage und Teilen des Gebäudes gekommen.

Besonders kritisch sind auch Ereignisse, bei denen es zu einem Brand in Silos kommt. Typische Zündquellen hierzu sind Selbstentzündung oder der Eintrag von Zündquellen wie Glimmnestern aber auch eine primäre Explosion.

Entsprechende Brände sind sehr schwierig zu löschen und können sich über mehrere Tage hinziehen. Bei den Löschmassnahmen muss sichergestellt werden, dass es nicht zu Explosionen durch Staubaufwirbelung kommt, z.B. durch Ein- und Austragsmassnahmen, Einsturz von Materialbrücken oder durch den Löschvorgang selbst.



Bild 2: Nachbrand Sprühtrocknungsanlage geschützt mit Explosionsdruckentlastung

Eine übliche Brandbekämpfungsmassnahme ist die Inertisierung, zunächst zum Vermeiden von Explosionen durch Staub und Schwelgase, im weiteren Verlauf auch zur Bekämpfung des Brandes selbst. Erst wenn sichergestellt ist, dass der Brand vollständig gelöscht ist, kann der Materialaustrag erfolgen. Dies geschieht üblicherweise mit Inertgasüberlagerung.

Bei Folgebränden nach Explosionen kann bei geöffneten Berstscheiben und dadurch bedingter Luftzufuhr eine Inertisierung schwierig sein. Bei kritischen, zur Selbstentzündung neigenden Produkten wie Braunkohle, kommen daher häufig anstelle von Berstscheiben sich nach einer Explosion wieder schliessende Explosionsklappen zum Einsatz.



Bild 3: Silobrand: links nach einer Explosion, rechts Brand ohne Explosion

#### 4. Schutzkonzepte

Sowohl beim Brandschutz als auch beim Explosionsschutz soll durch vorbeugende Schutzmassnahmen das Eintreten von Brand- und Explosionsereignissen so weit wie möglich vermieden werden. Diese werden dann, falls erforderlich, mit Massnahmen flankiert, die die Auswirkungen soweit begrenzen, dass das verbleibende Restrisiko toleriert werden kann. Hierzu ist es ratsam, das Schutzkonzept auf Basis einer Risikobeurteilung zu erstellen.

Wie die im Abschnitt 3 zusammengestellten Schadensfälle zeigen, kommt es sehr darauf an, dass alle Zündquellen berücksichtigt werden. Das können sowohl anlagenspezifische Zündquellen als auch eingetragene Zündquellen sein, aber auch so genannte aus dem Staub heraus entstehende Zündquellen. Letztlich muss überprüft werden, ob alle Zündquellen hinreichend sicher vermieden werden können. Ist das nicht der Fall, müssen Wechselwirkungen zwischen Brandbekämpfung und konstruktivem Explosionsschutz betrachtet werden. Wesentliche Grundlage für das Schutzkonzept sind das Brenn- und Explosionsverhalten der gehandhabten Feststoffe bzw. deren sicherheitstechnische Kenngrössen (STK) sowie weitere Randbedingungen, wie z.B. Feststoffmengen, Anlagentyp, Aufstellungsort oder Verfügbarkeit einer Anlage.

Bei einer Anlage im Aussenbereich, z.B. einem Filter, kann die Risikobeurteilung beispielsweise zu einem anderen Ergebnis führen, als bei einer Anlage im Inneren von einem Gebäude.

Auch die Verfügbarkeit einer Anlage kann hier eine grosse Rolle spielen. Gibt es alternative Möglichkeiten für einen bestimmten Prozess oder ist mit einem monatelangen Produktionsausfall zu rechnen und ist die betroffene Anlage die einzige, in der ein gewisses Produkt hergestellt werden kann.

Bei den STK spielen insbesondere, Zündempfindlichkeit und das Brennverhalten bzw. die Brennzahl sowie die thermische Stabilität eine grosse Rolle bei der Beurteilung.

Beim konstruktiven Explosionsschutz kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz. Dies sind explosionsfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung und Explosionsunterdrückung, jeweils in Kombination mit explosionstechnischen Entkopplungsmassnahmen, die ein Ausbreiten einer Explosion in angeschlossene Anlagenteile verhindern.

Bei der Schutzmassnahme Explosionsunterdrückung wird die Explosion durch schnelles einblasen eines Löschmittels abgelöscht. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit für einen Folgebrand in der Regel deutlich reduziert. Dies kann ausreichend sein, unter Berücksichtigung von Staubmenge und STK die Anlage ohne zusätzliche Löschanlage zu betreiben. Bei einer druck-

entlasteten Anlage ist durch den zusätzlichen Lufteintritt eher mit einem Folgebrand zu rechnen. Dennoch kann bei einer explosionsunterdrückten Anlage nicht generell auf eine Löschanlage verzichtet werden. Hier sind insbesondere Ereignisse zu berücksichtigen, bei denen es lediglich zu einem Brand und nicht zu einer Explosion kommt.

Kommen Löschanlagen zum Einsatz, ist es empfehlenswert, diese mit mehreren Möglichkeiten zur Auslösung zu versehen. Wird eine Löschanlage beispielsweise automatisch bei Aktivierung einer Explosionsunterdrückung oder dem Öffnungssensor einer Druckentlastungseinrichtung ausgelöst, ist zusätzlich ein weiterer Sensor sinnvoll, der bei einer Branddetektion auslöst (z.B. Temperaturanstieg oder CO-Detektion). Ausserdem ist immer eine Möglichkeit für ein manuelles Auslösen empfehlenswert.

Bei Explosionsentkopplungseinrichtungen wie Zellenradschleusen trägt ein Stillsetzen der Zellenradschleuse nach einer Explosion auch dazu bei, dass es nicht zu einer Brandübertragung auf diesem Weg kommt.

Wichtig für wirkungsvolle Brandbekämpfung ist ein frühzeitiges Detektieren bzw. Erkennen eines Brandes mit hoher Zuverlässigkeit wie z.B. über Temperaturmelder (Absoluttemperatur oder Temperaturanstieg), optische Melder (z.B. Strahlung, IR, UV, Rauch), oder Detektion von Verbrennungsprodukten bzw. Zersetzungsprodukten wie CO, H<sub>2</sub>, Methan, Kohlenwasserstoffen oder Stickoxiden. Hierbei sind die Einsatzgrenzen der einzelnen Systeme zu beachten, abhängig vom gehandhabten Brennstoff und prozessspezifischen Randbedingungen wie Volumenströmen, Staubwolken und Verschmutzung. Hierdurch kann es ratsam sein, unterschiedliche Systeme zu verwenden (Mehrfachsensor).

Im Fall eines Brandes werden in der Regel automatische oder halbautomatische Löschanlagen wie Sprinkleranlagen, Sprühwasserlöschanlagen, Schaumlöschanlagen aber auch Anlagen mit Löschgasen aktiviert, da die Feuerwehr bei einem Brand meist nicht mehr in das Innere der Anlage kommt, ohne die Gefahr eine Staub- oder Schwelgasexplosion. Schutzziel ist in der Regel das Vermeiden von Totalschäden durch Ausglühen und das Vermeiden einer Brandausbreitung in angeschlossene Anlagenteile.

Zum Schutz von Absauganlagen ist es wichtig, dass ausreichend Wasser auf die Rohgasseite gelangt, da dort die grössten Brandlasten vorliegen. Hierzu haben sich Löschanlagen mit Löschrichtungen auf der Roh- und Reingasseite bewährt. Wichtig ist auch eine ausreichende Kühlung der Wand unter Inkaufnahme des Verlusts der Filterelemente. Diese können jedoch in der Regel zeitnah ersetzt werden.

Auch bei anderen zu schützenden Anlagen ist eine ausreichende Kühlung der Behälterwandungen wichtig. Hierzu ist eine für das zu schützende Objekt ausreichende Löschwasserversorgung erforderlich. Bei der Auslegung von Anlagen ist daher vorab zu prüfen, ob immer ausreichend Löschwasser zu Verfügung steht. Hierbei sind auch kalte Winter und trockene Sommer zu berücksichtigen. Bei Trocknern mit Fließbetten muss ausreichend Wasser zur Verfügung stehen, um das darin enthaltene Produkt zu löschen.

## 5. Fazit

Die Kombination von Brand- und Explosionsschutzmassnahmen kann wegen vieler Randbedingungen recht komplex sein und ist nicht immer leicht zu lösen. Schadensfälle zeigen, dass dies in der Vergangenheit nicht immer optimal gelöst wurde. Wichtig ist alle möglichen Zündquellen zu berücksichtigen und zu beachten, dass Brände und Explosionen unabhängig voneinander auftreten können. Idealerweise sollte die Auslegung auf Basis einer Risikobeurteilung unter Berücksichtigung der STK der brennbaren Stoffe erfolgen.

**Literatur:**

- [1] VDI 2263 Blatt 5:2005-03 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Explosionsschutz bei Wirbelschichtanlagen. Berlin: Beuth Verlag
- [2] VDI 2263 Blatt 5.1:2004-02 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Explosionsschutz bei Wirbelschichtanlagen; Hinweise und Ausführungsbeispiele für Hersteller und Betreiber. Berlin: Beuth Verlag
- [3] VDI 2263 Blatt 6:2017-08 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen. Berlin: Beuth Verlag
- [4] VDI 2263 Blatt 6.1:2017-08 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen - Beispiele. Berlin: Beuth Verlag
- [5] VDI 2263 Blatt 7:2010-07 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. Berlin: Beuth Verlag
- [6] VDI 2263 Blatt 7.1:2013-03 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen - Beispiele. Berlin: Beuth Verlag
- [7] VDI 2263 Blatt 8:2008-12 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren. Berlin: Beuth Verlag
- [8] VDI 2263 Blatt 8.1:2011-03 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren - Beispiele. Berlin: Beuth Verlag
- [9] VDI 2263 Blatt 8.1:2014-11 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Elevatoren - Explosionsunterdrückung und Kombination von konstruktiven Schutzmassnahmen an Elevatoren. Berlin: Beuth Verlag
- [10] VDI 2263 Blatt 10:2020-09 (Entwurf) Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Mischanlagen. Berlin: Beuth Verlag
- [11] VDI 2263:2018-07 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen. Berlin: Beuth Verlag

- [12] Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit IVSS: Beispielsammlung «Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten» Teil 1: Mühlen, Brecher, Mischer, Abscheider, Siebmaschinen. Mannheim: Internationale Sektion für Maschinen- und Systemsicherheit der Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS) und Heidelberg: Internationale Sektion für Prävention in der chemischen Industrie der Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS), 2019.
- [13] Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit IVSS: Beispielsammlung «Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten» Teil 2: Stetigförderer, Übergabestellen und Empfangsbehälter. Mannheim: Internationale Sektion für Maschinen- und Systemsicherheit der Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS) und Heidelberg: Internationale Sektion für Prävention in der chemischen Industrie der Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS), 2014.
- [14] DIN EN 1127-1 Explosionsfähige Atmosphären; Explosionsschutz; Teil 1: Grundlagen und Methodik; Berlin: Beuth Verlag
- [15] Scheid, M., Teske, H.-J., Lackes, R.: Strahlanlagen Metalle/Leichtmetalle – Explosionsgefahren und Schutzmassnahmen. VDI-Berichte Nr. 2024, 2008 S. 179-189, Düsseldorf: VDI-Verlag



# Examples of Incidents from Practice

G.F.M. van Laar, M.Sc., Inburex GmbH, Hamm

## 1. Abstract

Three quite recent dust explosions will be described, with circumstances and possible ignition sources that have led to these incidents.

Then it will be discussed how the risks have been handled.

## 2. Introduction

Despite all the recent knowledge in the field of dust explosion regarding their behavior and the numerous standards and regulations to reduce explosion risks, explosions still tend to occur.

Is the reason our knowledge is not sufficient, or have plant designers and users not been informed enough about hazards?

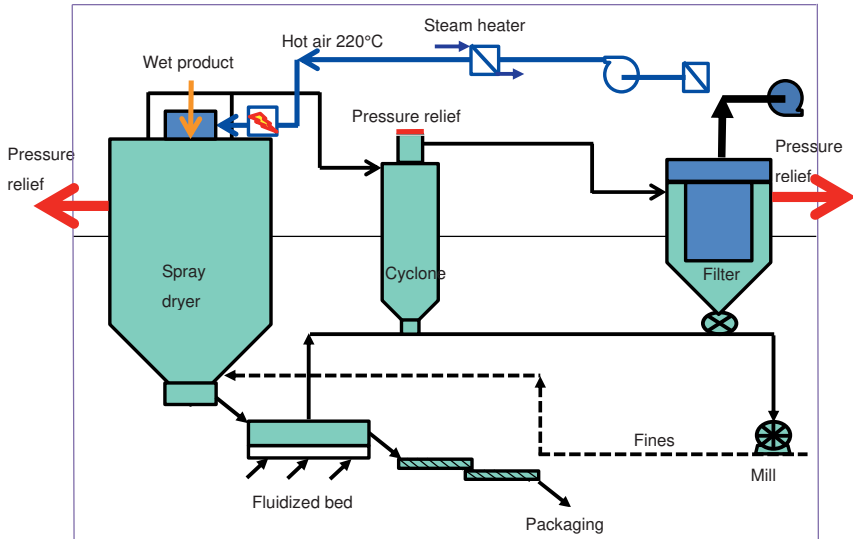
It is in fact true that not all phenomena are clearly understood by most users: why for instance wood dust still leads to fires and explosions or why do hoses, used for pneumatic transport, sometimes lead to the very hazardous propagating brush discharges even when the reinforcement spirals have been well earthed....

Hereafter three explosions will be discussed with an analysis why it went wrong to pinpoint what has been overseen in design, selection of equipment and safety procedures. For each incident it is discussed what should have been done to prevent the incident or reduce the effects to acceptable levels.

### 3. Explosion in Maltodextrin spray dryer

#### Description

In this installation Maltodextrin is produced. See the schematic flow chart.

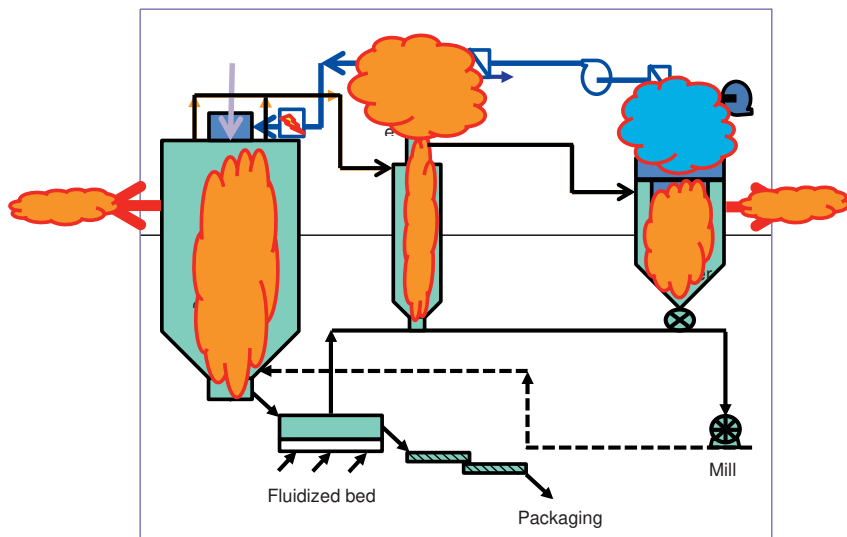


The safety philosophy was the following:

- Inlet hot air temperature limited to 220°C.
- T-monitoring: Alarm on dryer chamber air outlet temperature at 110°C, water extinguishing to be opened by hand at the spot.
- Explosion pressure relief to the outside on the dryer chamber and filter (no activation signal).
- On top of the cyclone: explosion door, venting inside the building.

### What happened:

- Explosion in spray chamber: Explosion vent opens and chamber explosion vents to outside. In control room they heard something, but nobody suspects anything.
- (Explosion) door on the cyclone top opens: Explosion in cyclone vents inside the building: Some doors, roof parts and windows are blown out.
- After some time (9-10 seconds) an explosion occurs in the filter. Filter top is blown off and pressure wave further damages the building.
- In the control room they heard and felt it, so it was decided: " we have an explosion ".
- Now also the outlet air temperature alarm is activated so the installation is shut-down manually... this took time...
- Operator walks to the dryer location to open the extinguishing water: The after-fire is partially extinguished. Later the fire brigade extinguishes the still burning parts of the plant.
- No casualties, but the installation facility and building got badly damaged.



### Likely ignition source

- Malfunction of electrical heating: Extreme heat was generated in electrical heater.
- Extreme heat resulted in formation of molten metal droplets on heat exchanger that were blown into the dryer chamber.

- Temperature of the welding droplets have been about  $>800^{\circ}\text{C}$  and caused ignition in dryer chamber.

### Aftermath

- Dryer installation is a "total loss" and will no longer be used.
- Another, even older dryer will be made suitable for maltodextrin production and put into operation: but with better explosion protection design, including explosion barriers.

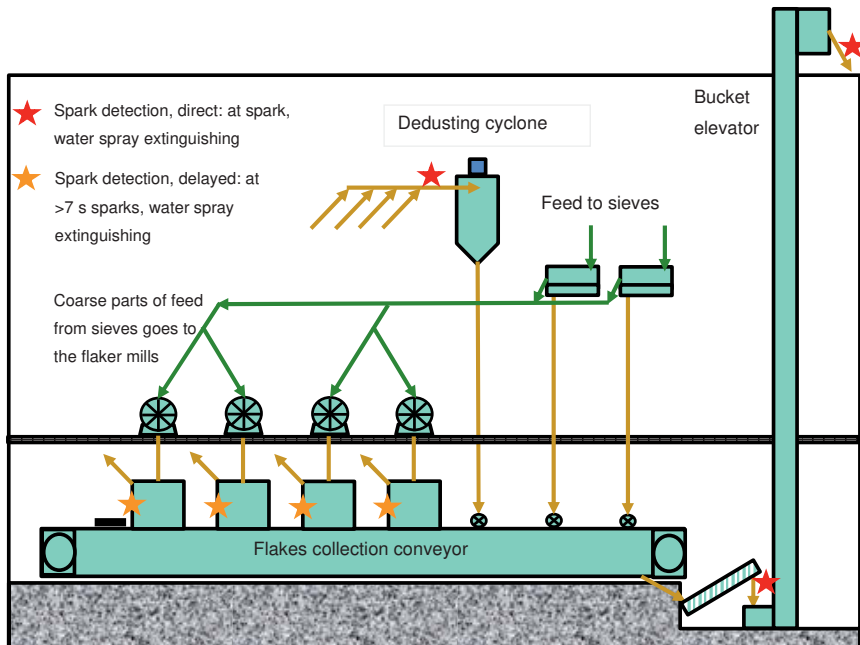
### What can we learn?

- A safe electrical system remains very important...
- Explosions do propagate.... also in spray dryer installations.
- Do not install explosion vents close to and in front of filter hoses.

#### 4. Explosion in flaker installation of a particle board plant

##### Description

In this installation green wood is being flaked: this is the base substance for particle board production. See the schematic flow chart.



##### Explosion protection concept

- The base of safety was prevention of explosions by flaking green wood. Green wood has a water content of >25% (wet basis) and as such is not explosive.
- Additional base of safety was prevention of ignition by spark detection with water spray/deluge:
  - Outlet chutes of flaker mills to collection conveyor: activation when detecting a shower of sparks during more than 7 seconds.
  - Inlet cyclone for dedusting of flaker outlet chutes to collection conveyor: activation at detecting of a single spark.
  - Feed chute to bucket elevator: activation at detection of a spark.
  - Outlet chute of bucket elevator: activation at detection of a spark.

## Explosions

What happened:

The incident occurred in the early morning during a hot and dry weather period in late summer.

Several hours before the incident occurred, sparks were detected four times at inlet bucket elevator, followed by water spray. The incident occurred without any clear warning.

- A cleaner walking on the ground floor at the flaker mills, saw a large flame emerging from the cellar and fled for safety.
- Seconds later a slow room explosion in the building occurred, blowing out windows, and several roll doors. It was a roll door that hit a person outside, causing serious injury.
- Two booms were heard within a time lapse of about 10 seconds.
- Video cameras in the top part of the building registered a weak flash of light. About 10 s later it was followed by a flame front that passed the cameras.
- Just after the explosion inside the conveyor, sparks were detected in the dedusting inlet duct to the cyclone and bucket elevator inlet, followed by water spray.

## Why did it happen?

- In time more and more recycled (and thus bone-dry) particle board was fed to the flakers: this means that the moisture content of the mixture became lower than 25% and thus became combustible.
- This implicates that inside the mills, chutes and collection conveyor, explosive mixtures are possible.
- A flaker mill has fast moving parts: formation of sparks and embers can be expected. Sparks have been detected a few hours before the incident in the feed to the elevator downstream of the collection conveyor. This clearly proves that sparks and embers are formed from time to time.

## Most likely course of incident

- In one of the mills some or a short burst of sparks and/or embers was created and fell into the collection conveyor. Since the spark detectors in the chute to the collection conveyor were set to react only at a continuous stream of sparks during minimal 7 seconds, the few or short burst of sparks and embers went unnoticed and thus were not extinguished.
- The sparks, embers or following outbreak of fire, caused a weak dust explosion inside the collection conveyor.
- The pressure inside the conveyor was not very high (only slight deformations), but high enough to open not well-fixed inspection doors and vent the explosion in the cellar.

- Thanks to the ample dust deposits in the cellar, a secondary dust explosion was triggered in the cellar which caused enough pressure to blow out some ceiling covers panels to the ground floor. Pressure to blow out such ceiling panels is about 0.025 barg.
- A large flame ejected out of the opening in the floor: this is what the cleaner observed. It was heard as the first boom and on the videos as the first (weak) flash.
- This vented explosion caused a large dust cloud in the building that only ignited several seconds later and lead to a large fireball. This created enough pressure to blow out windows and the roll doors: second boom and visible on the videos as a passing flame front.

### Why could it happen?

- Flaking of **too dry product**, that could lead to dust explosions.
- Ignition sources formed in flaker due to mechanical friction: sparks and embers.
- Spark detectors set on wrong detection level.
- Large dust deposits in cellar and flaker building

### Guidance

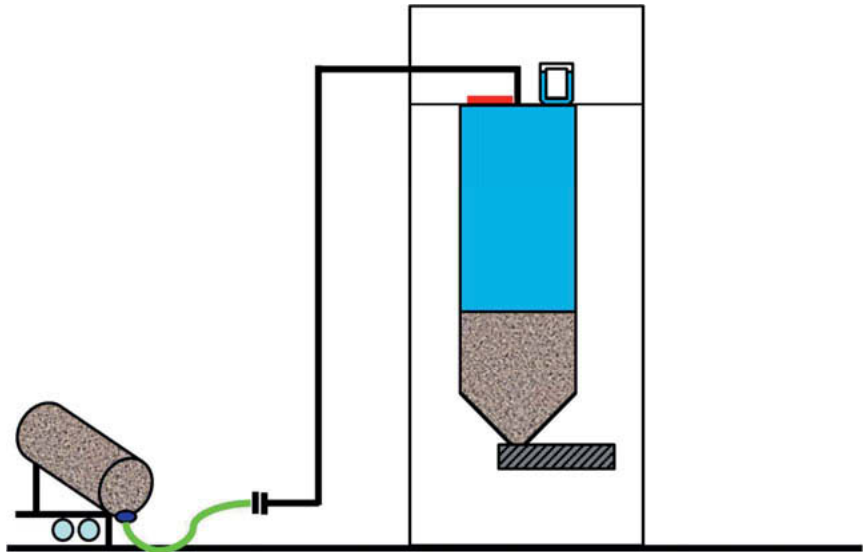
Prevent explosion and/or protect:

- Do not use too much recycle or ensure the recycle is wet enough.
- Tune the spark detection and extinguishing system so it can really work.
- Keep installations much cleaner.
- Protect the conveyor by venting or suppression.

## 5. Silo explosion during pneumatic delivery by road tanker

### Description

In this process a silo located inside a building is being filled pneumatically by road tanker via a rubber hose. See the schematic flow chart.



- Silo was filled pneumatically.
- Product was vegetable protein powder.
- All systems were well earthed and bonded.
- Multilayer rubber hose with spiral connecting the two flanges and was also well earthed.
- Silo was protected by a heavy 200 kg “explosion door” fixed on the silo by plastic breaking bolts and retained from flying away by chains.

### Incident

This was the second time.... Also, exactly 5 years before, in early April such an incident happened.

What happened this time?

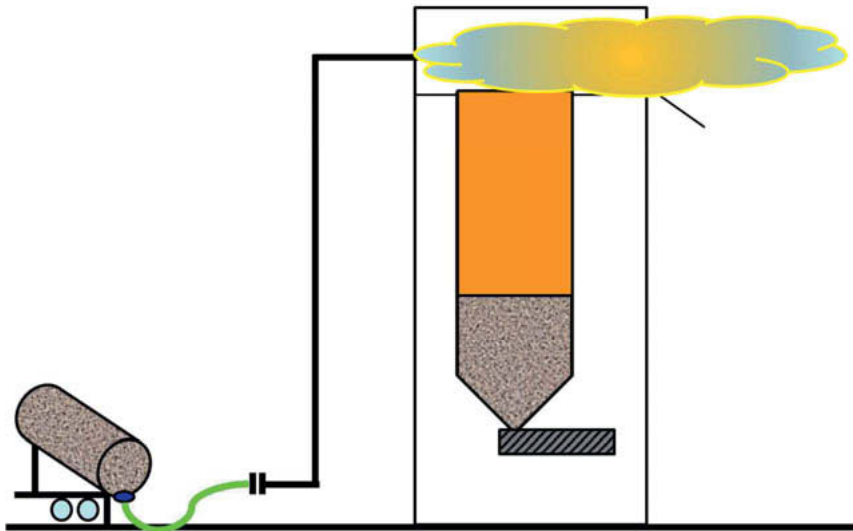
- During loading the silo exploded after transfer of about 10 tons of product.



- The 200 kg heavy explosion door was blown-off but was retained by chains.
- The silo fire was swiftly extinguished by the activated sprinkler on silo deck.
- Nobody was hurt: rule forbids presence on silo deck during loading.

Large damage:

- Silo roof was slightly deformed, but cylinder part of silo still intact.
- Spot filter was intact, but with internal fire damage.
- Few silo deck wall parts were blown out to vent off the pressure but did not fly-off.
- Fire damage to instrumentation and cables up to about 20 m distance from silo.



### Most likely cause

- Road tanker compressor was OK, product contained no glowing particles and was not hot or burning during delivery.

- One small steel object was found in the product in the silo (rectangular dimensions about one inch, weighing 50 g) but too light to create effective ignition sources by impact (mechanical impact sparks).
- Electrical installations in the silo were all explosion proof and still in good condition, even after the explosion.
- All metal parts were well earthed and bonded, including the transport hose.
- The paint layers in the feed pipe and internal silo walls were not able to create propagating brush discharges.
- Cone discharges had far too low energy to ignite the product.
- There was no indication of self-heating or smoldering product inside the silo product or near the exit screw conveyor.
- The hose was investigated for possibility of creating propagating brush discharges:
  - The hose inside surface had a resistance to earth of  $1.8 \cdot 10^8 \text{ Ohm}$  and thus more than the limit of  $10^8 \text{ Ohm}$  (IEC/TS 60079-32-1 Ed. 1.0: 2013-08) to prevent propagating brush discharges.
  - The specific volume resistivity of the inside hose layer was  $3.0 \cdot 10^9 \text{ Ohm.m}$  and thus more than the limit of  $2.5 \cdot 10^8 \text{ Ohm.m}$  (TRGS 727) to prevent propagating brush discharges.
  - Breakdown voltage was  $>20 \text{ kV}$  and thus above the limit of  $4 \text{ kV}$  (TRGS 727) to prevent propagating brush discharges.
  - The hose showed typical wear due to erosion but also crater like damages that indicate multiple occurrences of propagating brush discharges. See photo 1.

**Looking at the product MIE of 300-1000 mJ the only static discharge that can ignite it, is a propagating brush discharge**



Photo 1. Inside layer of hose showed next to typical erosion marks also strange crater like damages

### Guidance

- Use internally conductive hoses conform the IEC code of practice (IEC/TS 60079-32-1 Ed. 1.0: 2013-08) and TRGS 727 to prevent the occurrence of propagating brush discharges.
- Use of product with a MIE higher than 1000 mJ, so that, if still such discharges occur, they cannot ignite the product anymore.



## **Elektrostatik – Lösungsvorschläge aus der Praxis**

**Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, Auftreten von Büschelentladungen, Antennentechnik, experimentelle Untersuchungen**

## **Electrostatics – Proposed solutions from practice**

**Ignition hazards due to electrostatic charges, occurrence of brush discharges, antenna technology, experimental investigations**

Dr. **Martin Glor**, Swiss Process Safety Consulting GmbH,  
Allschwil, Schweiz;

Dr. **Carsten Blum**, TÜV Nord, InfraChem GmbH & Co. KG, Marl

### **Kurzfassung**

Es werden das Auftreten und die Eigenschaften von Büschelentladungen beschrieben. Bei verschiedenen in der Prozess Industrie durchgeführten Operationen stellt sich oft die Frage, ob Büschelentladungen auftreten. Diese Frage kann entweder durch Computersimulationsrechnungen beantwortet oder es kann versucht werden, durch geeignete Messtechniken Entladungen nachzuweisen oder auszuschliessen. Die Antennentechnik, bei welcher hochfrequente Wechselspannungssignale ausgehend von Entladungen mittels eines PC-Oszilloskops auf den PC übertragen und aufgezeichnet werden, stellt eine solche Möglichkeit dar. Es wurde in ersten orientierenden experimentellen Untersuchungen versucht, aus der Signalstärke Rückschlüsse auf die Entladungsenergie zu ziehen. Dies ist zwar möglich, da aber auch die Entfernung zwischen Funkenentladung und Antenne einen Einfluss auf die Signalstärke hat, wird eine Energiebestimmung in der Praxis schwierig sein, wenn der Ort der Entladung nicht bekannt ist.

### **Abstract**

The occurrence and properties of brush discharges are described. During various operations in the process industry the question often arises whether brush discharges occur. This question can either be answered by computer simulation calculations or it can be tried to detect or exclude discharges by suitable measuring techniques. Antenna technology, in which high-frequency alternating voltage signals forms by discharges are transferred to a PC oscilloscope and recorded, is one such possibility. In first orienting experimental investigations, it

was tried to draw conclusions about the discharge energy from the signal strength. This is possible, but since the distance between spark discharge and antenna also has an influence on the signal strength, an energy determination will be difficult in practice if the location of the discharge is not known.

## **1. Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen**

Eine elektrostatische Aufladung muss noch nicht von vornherein zu der Entzündung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen. Erst wenn die Aufladung hinreichend hoch wird, so dass die elektrische Durchbruchfeldstärke in Luft unter atmosphärischen Bedingungen von ca. 3 MV/m lokal erreicht wird, kommt es zu einer sog. Gasentladung. Zur Beurteilung der Zündwirksamkeit einer solchen Gasentladung wird die in der Gasentladung freigesetzte Energie mit der Mindestzündenergie des explosionsfähigen Gemisches verglichen.

Je nach Leitfähigkeit und Anordnung der aufgeladenen Objekte wird die ganze gespeicherte Energie oder nur ein Bruchteil davon in einer solchen Gasentladung freigesetzt. Es hat sich deshalb in der Praxis bewährt, die Gasentladungen in 6 verschiedene Entladungstypen einzuteilen, welchen unterschiedlich Zündwirksamkeiten zugeordnet werden können. Diese Entladungstypen sind in den Regelwerken und Richtlinien ausführlich beschrieben [1, 2].

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen geht es in erster Linie um den Nachweis für das Auftreten von sog. Büschelentladungen.

## **2. Auftreten von Büschelentladungen**

Büschelentladungen gehen typischerweise von hoch aufgeladenen elektrisch isolierenden Objekten wie Anlageteilen, Packmitteln, etc. aber auch von hoch aufgeladenen elektrisch isolierenden Flüssigkeiten, Schüttgütern, Staubwolken oder Tröpfchennebeln aus. Sie können auch nicht durch Erdungsmassnahmen verhindert werden.

Durch die hohe Aufladung werden hohe elektrische Felder erzeugt. Sobald die Feldstärke des homogenen Feldes ca. 100 kV/m erreicht, kann beim Einbringen von feldverzerrenden Einrichtungen (beispielsweise Einbauten in Reaktoren, Silos, Behältern oder beim Annähern eines Fingers an ein aufgeladenes isolierendes Packmittel, etc.) eine Büschelentladung ausgelöst werden.

Büschelentladungen weisen eine tiefe Energie Im Bereich von maximal wenigen Millijoules auf. Infolge der Energie Verteilung im Raum können Büschelentladungen aber dennoch keine reinen Stäube, auch solche mit einer Mindestzündenergie von einem Millijoule oder weniger in Abwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe zünden. Es ist aber erwiesen, dass Bü-

schelentladungen für brennbare Gase und Dämpfe oder hybride Gemische zündwirksam sind.

Bei verschiedenen in der Prozess Industrie durchgeführten Operationen wie beispielsweise

- Beim Eintrag von Schüttgütern in Reaktionskessel
- Beim Zerdüsen von Flüssigkeiten unter hohem Druck zu Reinigungszwecken
- Beim Eintragen von brennbaren Flüssigkeiten in Lagertanks oder andere Behälter
- Bei der Entstehung von Staubwolken

stellt sich oft die Frage, ob Büschelentladungen auftreten. Bei Kenntnis der Verteilung der Ladungen im Raum kann diese Frage entweder durch Computersimulationsrechnungen beantwortet werden oder man kann versuchen, durch eine geeignete Messtechnik Entladungen nachzuweisen oder auszuschliessen.

### 3. Antennenmesstechnik

Schon in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts als die ersten Autoradios auf den Markt gebracht wurden, machte man die unangenehme Erfahrung, dass bei laufendem Motor die Störgeräusche so laut waren, dass keine Sprache oder Musik gehört werden konnten. Sofort wurde vermutet, dass diese Geräusche durch die Zündkerzen des Motors verursacht werden. Trotz entsprechender Abschirmmassnahmen konnten diese Geräusche aber nicht beseitigt werden. Nach umfangreichen Untersuchungen hat man schliesslich herausgefunden, dass diese Störgeräusche durch Entladungen ausgehend von einer elektrostatischen Aufladung des aus isolierendem Material gefertigten Keilriemens verursacht werden. Basierend auf dieser Erfahrung wurde dann im letzten Jahrhundert versucht, Büschelentladungen durch das Knistern in Radioempfängern nachzuweisen. Heute sind PC-Oszilloskope auf dem Markt erhältlich, mit welchen auch hochfrequente Wechselspannungssignale verursacht durch elektromagnetische Wellen, welche von Entladungen ausgehen, auf den PC übertragen und aufgezeichnet werden können. Im Fall der Registrierung von Signalen ausgehend von Entladungen wird direkt eine Antenne als Signalgeber an das Oszilloskop angeschlossen.

### 4. Experimentelle Untersuchungen

In der industriellen Praxis ist nicht nur von Interesse, ob Entladungen stattfinden oder nicht, sondern auch die in den Entladungen freigesetzte Energie sollte gemessen werden können. Es wurden deshalb in einem ersten Schritt orientierende Messungen zur Beantwortung dieser Fragen durchgeführt. Hierzu wurden gezielt Funkenentladungen in einem sog. Hartmannrohr erzeugt und sowohl deren Energie, deren Abstand zur Antenne als auch die Orientierung der kreisförmigen Antenne variiert. Bild 1 zeigt die entsprechende Anordnung. Fun-

kenentladungen wurden gewählt, da diese gezielt in regelmässigen Zeitabständen durch Potentialerhöhung an einer Funkenstrecke erzeugt werden können und deren Energie einfach durch Variation der Spaltweite (Potential) und/oder Kapazität des aufgeladenen Kondensators verändert werden kann.

Einige Resultate aus den durchgeführten orientierenden Versuchen sind in den Bildern 2 bis 4 dargestellt

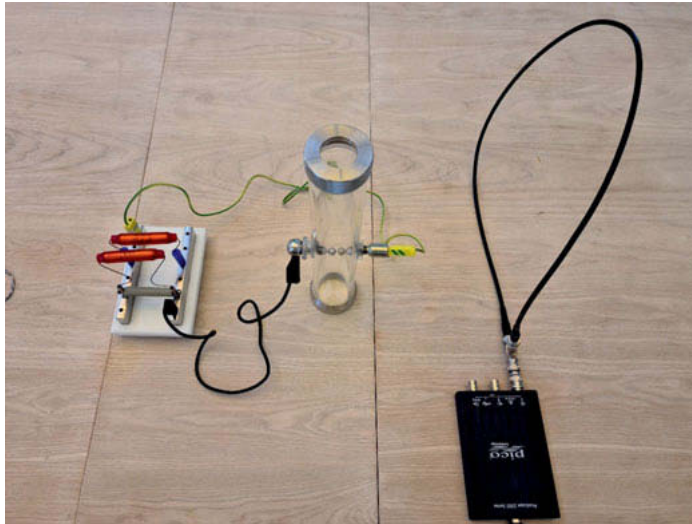


Bild 1: Anordnung der Funkenstrecke im Hartmannrohr, der kreisförmigen Antenne sowie der zusätzlichen Kondensatoren (Erhöhung der Funkenenergie)



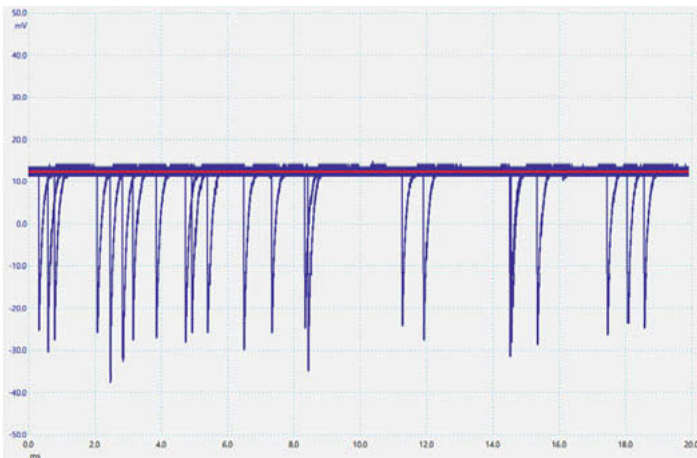


Bild 2: Signale der Funkenentladungen (Potential ca.18 kV, Kapazität ca. 200 pF, Energie ca. 30 mJ) bei einem Abstand zwischen Funkenort und Antenne von ca. 50 mm

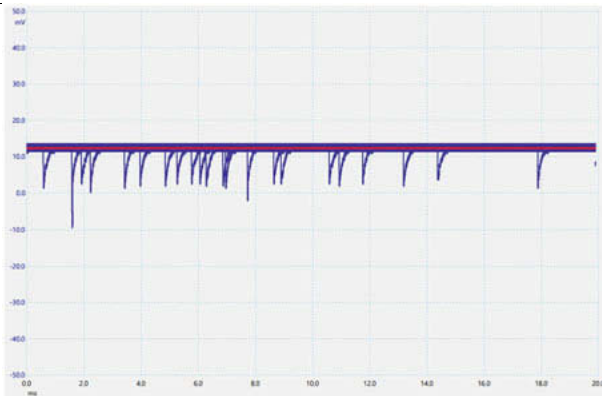


Bild 3: Signale der Funkenentladungen (Potential ca.18 kV, Kapazität ca. 50 pF, Energie ca. 7 mJ) bei einem Abstand zwischen Funkenort und Antenne von ca. 50 mm

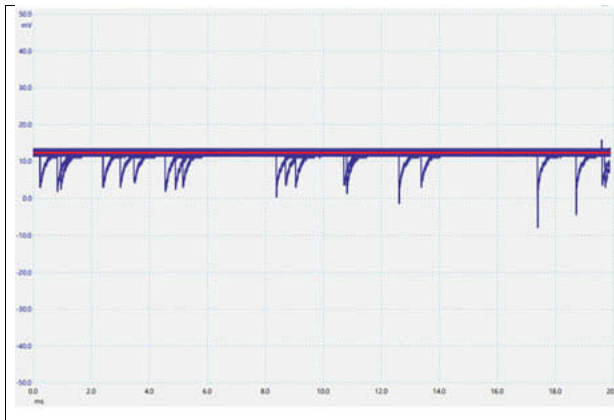


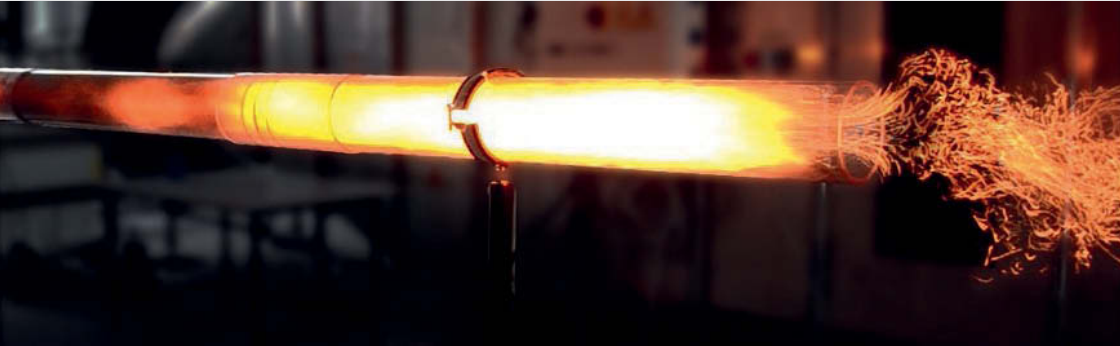
Bild 4: Signale der Funkenentladungen (Potential ca. 18 kV, Kapazität ca. 200 pF, Energie ca. 30 mJ) bei einem Abstand zwischen Funkenort und Antenne von ca. 2000 mm

Aus dem Vergleich der Bilder 2 und 3 lässt sich eine recht gute lineare Abhängigkeit zwischen der Funkenenergie und Signalstärke ableiten. Der Vergleich der Bilder 2 und 4 zeigt eine abnehmender Signalstärke mit zunehmender Distanz zwischen Funkenort und Antenne. Eine Gesetzmässigkeit kann daraus aber noch nicht abgeleitet werden, dazu sind weitere Untersuchungen erforderlich. Eine Abhängigkeit der Signalstärke von der Orientierung der ringförmigen Antenne konnte nicht festgestellt werden. Weitere experimentelle Untersuchungen werden folgen.

## 5. Literaturhinweise

- [1] Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 727 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, Deutschland, 1. Ausgabe, April 2016.
- [2] IEC/TS 60079-32-1, Technical Specification, Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance, Edition 1.0, 2013-08.





ISBN 978-3-18-092376-5

Bildquelle: © Steinbeis integrative Sicherheit GmbH