

VDI-Fachtagung mit
begleitender Fachaussstellung

Sichere Handhabung brennbarer Stäube 2017



VDI-Berichte 2314

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH

VDI-Fachtagung mit
begleitender Fachaussstellung
**Sichere Handhabung
brennbarer Stäube 2017**

Nürnberg, 24. und 25. Oktober 2017



VDI-Berichte 2314

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

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 978-3-18-092314-7

Vorwort

1

Rechtliche und Normative Rahmenbedingungen für Hersteller und Betreiber

<i>S. Radandt</i>	Neues aus der EU-Regelsetzung	3
<i>U. Aich</i>	Anforderungen und Umsetzung des betrieblichen Ex-Schutzes (GefStoffV) – Schnittstellen und rechtliche Zusammenhänge mit dem Produktsicherheitsrecht	11
<i>T. Wilrich</i>	Bestandsschutz oder Nachrüstungspflicht – Rechtliche Regelung für Altanlagen: Wie weit geht die Betreiberverantwortung?	23
<i>M. Glor</i>	Neuerungen in der TRGS 727 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (Nachfolge TRBS 2153)“	35

Grundlagen für die Beurteilung – Sicherheitstechnische Kenngrößen

<i>M. Beck, U. Hesener</i>	Kenngrößen von Stäuben unter nicht atmosphärischen Bedingungen und von hybriden Gemischen – Ergebnisse Forschungsvorhaben BGRCI	45
<i>U. Krause</i>	Explosionseigenschaften dreiphasiger hybrider Gemische	55
<i>A. Leksin, U. Barth</i>	Brennbarer Staub im quasi-stationären Zustand Auftreten – Ausmaß – Beurteilung	69
<i>R. Bunse</i>	Flammenlose Druckentlastung von Metallstäuben	77
<i>J. Lucas</i>	Explosionsereignisse an Entstaubungsanlagen	83
<i>M. Schmidt, P. Lüth</i>	Wie sicher ist die Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens großer Feststoffschüttungen? – Die Bedeutung von Ringversuchen zur Methodenvalidierung	95

Grundlagen für die Beurteilung – Zündquellen

<i>B. Liske, U. Barth</i>	Zündquelle Glimmnest: Mythos oder Realität? Erfahrungen – Wissen – Kenntnislücken	107
<i>M. Beyer</i>	Mechanisch erzeugte Zündquellen – Entstehung und Zündwirksamkeit	119

Risikobeurteilung mit Praxisbeispielen

<i>G. van Laar</i>	Findings at recent dust explosion incidents	131
<i>T. Molkens, A. Harmanny</i>	A collection of unexpected explosion accidents	141
<i>M. Reinecke</i>	Das Explosionsschutzkonzept – Erfahrungen aus der Prüfpraxis nach BetrSichV	147
<i>C. Blum</i>	Einsatz von explosionsgeschützten Staubsaugern in gasexplosionsgefährdeten Bereichen	159

Neues aus Forschung und Entwicklung

<i>B. Schmidt</i>	Untersuchung der Staubwolkenentstehungen durch Befüllvorgänge mit Holzpellets – Betrachtung des Staub- explosionsrisikos bei mechanischer Förderung stückigem, abrasiven Produkts	169
<i>K. Maiwald, P. Lerena, U. Barth</i>	Charakterisierung potentiell explosionsfähiger Gemische in unkonventionellen Sprühtrocknungsprozessen	181
<i>A. Harmanny, T. Molkens</i>	The effect of vent ducts on the reduced explosion pressure in vented vessels	193
<i>P. Schepp, M. Sippel</i>	Neue Erkenntnisse zum Einsatz von Systemen zur Explosions-Entkopplung an explosionsdruckentlasteten Behältern	207
<i>K. van Wingerden, M. Ghaffari, T. Skjold</i>	Simulation of dust explosions: new developments	221

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

der Schutz von Mensch, Umwelt und hochwertigen Sachgütern vor Brand- und Staubexplosionsgefahren sowie deren Auswirkungen ist eine Herausforderung, der sich Industrie, Forschungseinrichtungen der Sicherheitstechnik, benannte Stellen, Normungsausschüsse, Hersteller von Sicherheits- und Schutzeinrichtungen und Behörden im Rahmen eines ständigen Verbesserungsprozesses stellen müssen. Um die jeweils neuen Erkenntnisse und Fortschritte aus der Praxis und Forschung sowie die europäischen und nationalen Vorgaben aus dem Bereich Recht und Normung mit Bezug zur Sicherheit vorzustellen und zu diskutieren, veranstaltet der VDI seit 1970 in regelmäßiger Folge Fachtagungen und dokumentiert diese Ergebnisse in VDI-Berichten und teilweise in VDI-Richtlinien, die vielfach eine wichtige Grundlage für die europäische Normung bilden.

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 Möglichkeiten für Hersteller und Betreiber, die Explosionssicherheit intelligent zu gestalten, aber auch die diesbezügliche Verantwortung. Durch zahlreichen Anforderungen ergeben sich für Hersteller und Betreiber auch haftungsrechtliche Neuerungen. Experten aus der Praxis erläutern unter anderem an Hand von Fallbeispielen die zum Teil komplizierten Themenstellungen und zeigen Lösungswege auf.

Die Fachtagung führt Experten, die sich mit den Themen des Staubexplosions- und Brand-schutzes auseinandersetzen, zusammen und wird neuere Erkenntnisse und Erfahrungen aus Forschung und Praxis sowie Änderungen bei den Rahmenbedingungen gemeinsam diskutieren. Hochkarätige Experten informieren über aktuelle Entwicklungen und zukünftige Trends. Wir freuen uns, Sie in Nürnberg zu begrüßen.

Im Namen des Programmausschusses

Prof. Dr.-Ing. Siegfried Radandt, FSA GmbH, Mannheim

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth, Bergische Universität Wuppertal

Neues aus der EU-Regelsetzung

Prof. Dr.-Ing. **Siegfried Radandt**

Anpassung von Europäischen Richtlinien an den Neuen Rechtsrahmen (NLF)

2008 wurde der Rechtsrahmen für die Vermarktung von Produkten neu geregelt.

Die Überarbeitung förderte zwei Dossiers zu Tage, die den Rechtsrahmen im harmonisierten Bereich bilden.

1. Die Verordnung 765/2008 regelt die Akkreditierung, die Marktüberwachung und die CE Kennzeichnung.

2. Der Beschluss 768/2008, der Musterartikel für künftige europäische Rechtsvorschriften für die Vermarktung von Produkten enthält.

Die im Rahmen eines Maßnahmenpakets der EU über "Neue rechtliche Rahmenbedingungen (NLF - New Legislative Framework) zur Angleichung ihrer Rechtsvorschriften für Industrieprodukte" sind für sechs Maschinenbau-relevante **Richtlinien verbindlich anzuwenden**.

Auf eine harmonisierte **novellierte** Form sind folgende Richtlinien zu bringen:

Elektrische Betriebsmittel,

EMV,

Aufzüge,

ATEX RL und die MRL

Einfache Druckbehälter und Druckgeräte

Dies gilt für seit April bzw. Juli 2016 für erstmals in Verkehr gebrachte Produkte.

Die ATEX-Richtlinie 2014/34/EU ist das Ergebnis der Anpassung der vorherigen Richtlinie 94/9/EG an den Neuen Rechtsrahmen (NRR)

Insbesondere die Inhalte der Richtlinie 2014/34/EU, die sich – unter anderem – auf Begriffsbestimmungen und Verpflichtungen von Wirtschaftsakteuren, notifizierten

Stellen, Konformitätsbewertungsverfahren und Konformitätserklärungen beziehen, stammen direkt aus dem NRR-Beschluss als Ergänzungen und/oder Anpassungen der Terminologie.

Die Richtlinie 2014/34/EU enthält harmonisierte Anforderungen an elektrische und nichtelektrische Geräte, die für den Einsatz in Bereichen bestimmt sind, in denen aufgrund von Staub- oder Gasbildung Explosionsgefahr besteht, sowie für Schutzsysteme. Sicherheitsvorrichtungen

gen, die für den Einsatz außerhalb von explosionsfähigen Atmosphären bestimmt sind und in Bezug auf Explosionsrisiken zum sicheren Betrieb von Geräten oder Schutzsystemen erforderlich sind bzw. dazu

beitragen, sind ebenfalls eingeschlossen.

Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen für den Einsatz außerhalb von explosionsgefährdeten Bereichen, die jedoch im Hinblick auf Explosionsrisiken für den sicheren Betrieb von Geräten und Schutzsystemen erforderlich sind oder dazu beitragen, fallen auch in den Anwendungsbereich dieser Richtlinie.

Die wesentlichen Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen sind unverändert aus der bestehenden **ATEX-Richtlinie 94/9/EG** übernommen ebenso die Konformitätsbewertungsverfahren und die Liste der harmonisierten Normen.

Zertifikate, die unter der Richtlinie 94/9/EG ausgestellt wurden, gelten auch unter neuen Richtlinie weiter.

Es gibt in der neuen Richtlinie Pflichten für weitere Wirtschaftakteure, nämlich für Importeure und Händler.

So ist der Begriff „**dem Markt zur Verfügung stellen**“ in die Richtlinie eingeflossen und das ist mehr als „Herstellen“ oder „Inverkehrbringen“.

Der Begriff umfasst neben Herstellern auch Importeure und Händler aber auch – und das ist das Neue der Richtlinie 2014/34/EU – solche, welche als Betreiber im Eigenbau explosionsgeschützte Geräte selbst aus Komponenten, Baugruppen oder sonstigen selbstgefertigten oder zugekauften Einzelteilen herstellen.

Es wird die **EG**-Konformitätserklärung und die **EG**-Baumusterprüfung in Zukunft **EU**-Baumusterprüfung heißen.

Diese Richtlinie erfasst Produkte, die bei ihrem Inverkehrbringen neu auf dem Unionsmarkt sind.

Das heißt, diese sind entweder neue Produkte, die von einem in der Union niedergelassenen Hersteller hergestellt werden, oder neue oder gebrauchte Produkte, die aus einem Drittland eingeführt werden.

Diese Richtlinie soll für alle Arten der Lieferung gelten, einschließlich Fernverkäufe.

Altprodukte und Produkte aus zweiter Hand:

Unter "Altprodukt" ist ein Produkt zu verstehen, dass bereits vor Inkrafttreten der Richtlinie 2014/34/EU auf dem EU-Markt in Verkehr gebracht und innerhalb der EU in Betrieb genommen wurde.

Dieses Produkt erfüllte die zum damaligen Zeitpunkt geltenden Gesetzesvorschriften, und zwar je nach Datum nationale oder EU-Vorschriften (in Form der Richtlinie 94/9/EG, die vom 1. Juli 2003 bis zum 19. April 2016 in Kraft war). In diesem Fall ist die Richtlinie 2014/34/EU nicht anwendbar.

Altprodukte, die vor dem Datum des Inkrafttretens der Richtlinie 2014/34/EU in der EU in Verkehr oder im Einsatz waren, fallen nicht unter diese Richtlinie. Diese Produkte wurden in Übereinstimmung mit den zu der Zeit geltenden Vorschriften vermarktet und verwendet. Auf Altprodukte, die aus einem Nicht-EU-Land importiert und zum ersten Mal nach dem 20. April 2016 zum Zwecke des Vertriebs und/oder der Verwendung in der EU verfügbar gemacht wurden, findet die Richtlinie 2014/34/EU Anwendung.

Rekonfigurierte Produkte sind Altprodukte, die sich innerhalb der EU in Verkehr und Gebrauch befanden, deren Konfiguration jedoch durch das Hinzufügen (Funktions -oder Leistungserhöhung) oder das Entfernen (Funktions-oder Leistungsminderung) von einem oder mehreren Teil(en) (Komponenten, Teilbaugruppen wie Einschubkarten oder Module usw.) modifiziert wurde. Geschieht dies **ohne erhebliche Modifizierung**, gilt die Richtlinie 2014/34/EU nicht. Im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU umfasst eine erhebliche Modifizierung jegliche Modifizierung eines Produktes, die ein oder mehrere der durch die wesentlichen Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen abgedeckten gesundheits- und sicherheitsbezogenen Merkmal(e) (z. B. Temperatur) oder die Integrität einer Zündschutzart berührt. In diesem Falle muss die Richtlinie 2014/34/EU angewendet werden. Dies schließt die Anwendung anderer relevanter Richtlinien nicht aus.

Reparierte Produkte: Hierbei handelt es sich um Produkte, deren Funktionalität nach einem Fehler wiederhergestellt wurde, ohne dass neue Merkmale hinzugekommen sind oder irgendeine andere Modifizierung erfolgt ist.

Da die Reparatur erfolgt, nachdem das Produkt in Verkehr gebracht wurde und das Produkt nicht als neues Produkt verkauft werden soll, ist die Richtlinie 2014/34/EU in diesem Fall nicht anwendbar.

Die **Wirtschaftsakteure** sind dafür verantwortlich, dass die Produkte diese Richtlinie erfüllen, je nachdem welche Rolle sie jeweils in der Lieferkette spielen, damit ein hohes Niveau beim Schutz der menschlichen Gesundheit und Sicherheit, insbesondere von Arbeitnehmern, und gegebenenfalls beim Schutz von Haus- und Nutztieren und Gütern gewährleistet wird und ein fairer Wettbewerb auf dem Unionsmarkt sichergestellt ist.

„Wirtschaftsakteure“ sind: Hersteller, Bevollmächtigte, Einführer und Händler;

1. „Hersteller“: jede natürliche oder juristische Person, die ein Produkt herstellt bzw. entwickelt oder herstellen lässt und dieses Produkt unter ihrem eigenen Namen oder ihrer eigenen Marke vermarktet;
2. „Bevollmächtigter“: jede in der Gemeinschaft ansässige natürliche oder juristische Person, die von einem Hersteller schriftlich beauftragt wurde, in seinem Namen bestimmte Aufgaben wahrzunehmen;
3. „Einführer“: jede in der Gemeinschaft ansässige natürliche oder juristische Person, die ein Produkt aus einem Drittstaat auf dem Gemeinschaftsmarkt in Verkehr bringt;
4. „Händler“: jede natürliche oder juristische Person in der Lieferkette, die ein Produkt auf dem Markt bereitstellt, mit Ausnahme des Herstellers oder des Einführers;

Es sollen die **Einführer** sicherstellen, dass von ihnen auf den Markt gebrachte **Produkte** den **Anforderungen** dieser Richtlinie **genügen**, dass **Konformitäts-bewertungsverfahren** durchgeführt wurden und dass die **Produktkennzeichnung** und die von den Herstellern erstellten **Unterlagen** den zuständigen nationalen Behörden für Überprüfungs Zwecke **zur Verfügung stehen**.

Der Händler stellt ein Produkt auf dem Markt bereit, nachdem dieses vom Hersteller oder vom Einführer in Verkehr gebracht wurde, und er soll gebührende Sorgfalt walten lassen, um sicherzustellen, dass seine Handhabung des Produkts dessen Konformität nicht negativ beeinflusst.

Jeder Wirtschaftsakteur, der ein Produkt unter seinem eigenen Namen oder seiner eigenen Handelsmarke in Verkehr bringt oder ein Produkt so verändert, dass sich dies auf seine Konformität mit dieser Richtlinie auswirken kann, gilt als Hersteller und hat die Pflichten des Herstellers wahrnehmen.

Da Händler und Einführer dem Markt nahe stehen, sollen sie in Marktüberwachungsaufgaben der zuständigen nationalen Behörden eingebunden werden und darauf eingestellt sein, aktiv mitzuwirken, indem sie diesen Behörden alle nötigen Informationen zu dem betreffenden Produkt geben.

Vermutung der Konformität von Produkten:

1. Bei Produkten, die mit harmonisierten Normen oder Teilen davon übereinstimmen, deren Fundstellen im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht worden sind, wird eine Konformität mit den wesentlichen Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen gemäß Anhang II vermutet, die von den betreffenden Normen oder Teilen davon abgedeckt sind.
2. Sofern keine harmonisierten Normen vorliegen, treffen die Mitgliedstaaten die ihres Erachtens erforderlichen Maßnahmen, damit den Betroffenen die bestehenden nationalen Normen und technischen Spezifikationen zur Kenntnis gebracht werden, die für die sachgerechte Umsetzung der wesentlichen Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen gemäß Anhang II als wichtig oder hilfreich erachtet werden.

Gültigkeit der Maschinenrichtlinie bei einem Explosionsrisiko

Besteht das **Risiko einer explosiven Atmosphäre nur im Innern der Maschine**, gelten die Bestimmungen der Maschinenrichtlinie für das gesamte Konformitätsverfahren. Die grundlegenden Anforderungen, die in ATEX enthalten sind, können angewendet werden, da sie die allgemeinen Anforderungen des ersten Satzes des Abschnittes 1.5.7 konkretisieren.

Explosionen unter atmosphärischen und nichtatmosphärischen Bedingungen

Die Anforderung in Nummer 1.5.7 Absatz 1 bezieht sich auf die Explosionsrisiken, die durch den eigentlichen Maschinenbetrieb oder durch Werkstoffe oder Substanzen hervorgerufen werden, die von der Maschine verwendet oder erzeugt werden.

Allgemeine Spezifikationen für Bewertung, Vorbeugung und Schutz gegen Explosionsrisiken sind in der Norm EN 1127-1 enthalten. Nach dem zweiten Absatz in Nummer 1.5.7 unterliegen Maschinen, die für den Einsatz in oder im Zusammenhang mit explosionsgefährdeten Bereichen vorgesehen sind, den Bestimmungen der ATEX-Richtlinie.

Der dritte Absatz in Nummer 1.7.3 gilt für Maschinen, die zusätzlich zur Maschinenrichtlinie der ATEX-Richtlinie unterliegen.

Die CE-Kennzeichnung zeigt die Konformität der Maschine mit den anwendbaren EU-Richtlinien an, in denen die Anbringung dieser Kennzeichnung geregelt ist. Zusätzlich zur CE-Kennzeichnung ist in der ATEX-Richtlinie eine gesonderte Kennzeichnung für den Explosionsschutz festgelegt:

Der ATEX-Kennzeichnung ist das Symbol der Gerätegruppe und Kategorie nachgestellt.

Betrieblicher Explosionsschutz

Gefahrstoffabhängige Anforderungen an den Explosionsschutz sind aus der BetrSichV in die GefStoffV verschoben.

Die Gefährdungsbeurteilung nach GefStoffV betrachtet die Explosionsgefährdungen, die sich aus der Gesamtheit explosionsfähiger Gemische ergeben.

Die GefStoffV definiert das explosionsfähige Gemisch als Gemenge aus einem brennbaren Stoff mit einem (beliebigen) Oxidationsmittel, das nach Zündung mit einer sich selbstständig fortpflanzenden Flamme reagiert.

Nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) muss keine Zoneneinteilung mehr vorgenommen werden.

In Anhang I Nr. 1.6 Abs. 3 steht aber auch:

„Für die Festlegung von Maßnahmen und die Auswahl der Arbeitsmittel kann der Arbeitgeber explosionsfähige Bereiche nach Nummer 1.7 in Zonen einteilen und entsprechende Zuordnungen nach Nummer 1.8 vornehmen.“

Gefährdungsbeurteilung

Nach GefStoffV §6 (4) hat der Arbeitgeber Brand- und Explosionsgefahren zu ermitteln und zu bewerten.

Diese Forderung gilt für die Gesamtheit der explosionsfähigen Gemische und ist somit automatisch auch auf Atmosphären anzuwenden.

Die üblicherweise zur Bewertung herangezogenen Kenngrößen, z. B. untere und obere Explosionsgrenze UEG/OEG), Mindestzündenergie (MZE), Mindestzündtemperatur (MZT) usw. werden im Allgemeinen atmosphärisch ermittelt (und sind daher ohne Korrektur nicht auf Gemische übertragbar).

Basierend auf der Gefährdungsbeurteilung sind die erforderlichen Schutzmaßnahmen nach § 11 bzw. Anhang I Nr. 1.6 zu ergreifen. Diese basieren nach wie vor auf dem aus der Richtlinie 1999/92/EG bekannten Prinzip des integrierten Explosionsschutzes. In der immer noch gültigen Richtlinie 1999/92/EG wird dieses Schutzprinzip nur auf Atmosphären angewendet.

Es hat jedoch allgemeine Gültigkeit und wurde daher schon in der „alten“ GefStoffV auf alle Bereiche mit Brand- und Explosionsgefährdungen angewendet.

Aus der Gefährdungsbeurteilung folgt direkt, in welchen Bereichen Explosionsgefährdungen auftreten.

Nur die explosionsgefährdeten Bereiche sind nach den Kriterien der Richtlinie 1999/92/EG in Zonen einzuteilen.

Falls in der Gefährdungsbeurteilung nichts anderes festgelegt ist, sind ATEX-Geräte in einer Kategorie zu wählen, die sich nach Anhang IIB der Richtlinie in Abhängigkeit der Zone ergeben.

Im ATEX-Bereich ist die Zoneneinteilung Voraussetzung für die korrekte Anwendung des gerätetechnischen Zündschutzes mittels ATEX-Geräten.

Im „Nicht-ATEX-Bereich“ KANN die Zoneneinteilung hilfreich sein, geeignete Geräte zu finden.

Anforderungen und Umsetzung des betrieblichen Ex-Schutzes (GefStoffV)

Schnittstellen und rechtliche Zusammenhänge mit dem Produktsicherheitsrecht

Dipl. Ing. **Ursula Aich**, RP Darmstadt, Wiesbaden

Kurzfassung

Der Beitrag befasst sich mit Änderungen im Explosionsschutz durch die Novelle der BetrSichV 2015. Es wird beleuchtet, ob sich daraus Änderungen oder Verschärfungen der bisherigen gesetzlichen Anforderungen ergeben. Weiterhin wird auf die Schnittstelle mit dem Binnenmarktrecht eingegangen und die Ergebnisse des ABS zum Bestandschutz von Arbeitsmitteln und zur Ermittlung des Standes der Technik vorgestellt.

1. Übersicht über die rechtlichen Anforderungen nach GefStoffV und BetrSichV

Am 1.6.2015 ist die novellierte BetrSichV in Kraft getreten. Einhergehend mit der Novelle wurden die Anforderungen an Explosionsschutzmaßnahmen vollständig in die Gefahrstoffverordnung übernommen. Insgesamt sollten die Neuregelungen dazu dienen, dem Arbeitgeber, insbesondere den kleinen und mittleren Unternehmen die Anwendung der Arbeitsschutzregelungen zu erleichtern und den Arbeitsschutz zu verbessern. Mit den neuen rechtlichen Veränderungen sollten somit keine höheren Anforderungen gegenüber den bisherigen Anforderungen erfolgen.

Unterscheidung der explosionsfähigen Gemische

Bei den Brand- und Explosionsgefährdungen gemäß GefStoffV ist nach TRGS 400 zu unterscheiden zwischen:

1. Reaktionen explosionsfähiger Gemische in der Gasphase:

Eine Gefährdung besteht, wenn sich explosionsfähige Gemische aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder aufgewirbelten Stäuben mit Luft oder einem anderen Oxidationsmittel bilden. Chemisch instabile Gase, bei denen auch ohne Oxi-

dationsmittel gefährliche Reaktionen auftreten können, stehen explosionsfähigen Gemischen gleich. Für explosionsfähige Gemische gilt GefStoffV Anhang I Nummer 1.6.

Explosionsfähige Gemische bei denen Luft das Oxidationsmittel ist und die unter atmosphärischen Bedingungen vorliegen (Umgebungstemperatur von -20 °C bis +60 °C und Druck von 0,8 bar bis 1,1 bar), werden explosionsfähige Atmosphäre genannt. Die Beurteilung der Gefährdung durch gefährliche explosionsfähige Atmosphäre sowie zu ergreifende Maßnahmen sind in TRGS 720, 721, 722, 725 und 7272 beschrieben. Die TRGS 723 und TRGS 724 befinden sich noch in der Überführung vom bisherigen Regelwerk der TRB 2152 Teil 3 und Teil 4.

Für chemisch instabile Gase sind die dort beschriebenen Prinzipien des Explosionsschutzes ebenfalls zu beachten und soweit zutreffend anzuwenden. Die Beurteilung, ob ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch vorliegt, welche Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung und welche Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zu treffen sind, erfordert spezifische Informationen über die relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen des entsprechenden Gemischs bzw. chemisch instabilen Gases bei den entsprechenden Betriebsbedingungen. Sicherheitstechnische Kenngrößen, die für die Bewertung explosionsfähiger Gemische benötigt werden, wie z. B. Explosionsgrenzen, Sauerstoffgrenzkonzentration, Zündenergien, Zündtemperaturen und Explosionsdrücke hängen von der Zusammensetzung und den Betriebsbedingungen (insbesondere von Temperatur und Druck) ab und müssen daher individuell beschafft und bewertet werden, um die Schutzmaßnahmen entsprechend festzulegen.

2. Reaktionen energiereicher Stoffe oder Gemische in der kondensierten Phase:

Eine Gefährdung resultiert aus dem Vermögen fester, flüssiger, pastöser oder gelatinöser Stoffe und Gemische, sich auch ohne Beteiligung von Luftsauerstoff mit sprunghaftem Druck- und/oder Temperaturanstieg umzusetzen (Detonation, Deflagration oder thermische Explosion).

In der TRGS 400 wird deutlich gemacht, dass Reaktionen in der Gasphase und Reaktionen in der kondensierten Phase von der Art der Gefährdung her unterschiedlich sind und dementsprechend auch unterschiedliche Schutzmaßnahmen erfordern.

Explosionsgefährdete Bereiche – neuer Ansatz

Gemäß § 2 Absatz 14 GefStoffV ist ein explosionsgefährdeter Bereich der Gefahrenbereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann. Das Wort „kann“ bedeutet, dass die Möglichkeit des Auftretens gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre besteht.

Die Bewertung, ob ein explosionsgefährdeter Bereich vorliegt, erfolgt im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz und der Gefahrstoffverordnung (§ 6 Absatz 4), bevor Schutzmaßnahmen zur Vermeidung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre getroffen wurden. Denn entsprechende Schutzmaßnahmen resultieren ja erst aus der Feststellung, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann.

Wird im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung durch den Arbeitgeber festgestellt, dass keine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann, liegt kein explosionsgefährdeter Bereich im Sinne von § 2 Absatz 14 GefStoffV vor. Dies kann z. B. gegeben sein, wenn brennbare Stoffe in dauerhaft technisch dichten Rohrleitungen oder Behältern verwendet werden.

Stellt der Arbeitgeber im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung fest, dass gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann, liegt ein explosionsgefährdeter Bereich im Sinne von § 2 Absatz 14 vor. Als Folge kommen die Prüfregelungen des Anhang 2 Abschnitt 3 BetrSichV und die Schutzmaßnahmen nach § 11 und Anhang I Nummer 1 GefStoffV zur Anwendung.

Auch wenn gefährliche explosionsfähige Atmosphäre z. B. durch Lüftungsmaßnahmen nach § 11 und Anhang I Nummer 1.6 Absatz 1 GefStoffV beseitigt wird, bleibt es grundsätzlich beim explosionsgefährdeten Bereich gemäß § 2 Absatz 14 GefStoffV. Dies ist folgerichtig, denn solche Maßnahmen können ausfallen oder sich als ungeeignet oder als nicht ausreichend funktionierend erweisen. Es ist daher notwendig, dass die Maßnahmen gemäß Anhang 2 Abschnitt 3 BetrSichV entsprechend auf Eignung und Funktion bzw. Funktionsfähigkeit geprüft werden. Aus diesem Grunde wird in Anhang 2 Abschnitt 3 BetrSichV auf § 2 Absatz 14 GefStoffV Bezug genommen.

In Anhang I GefStoffV ist insbesondere Nummer 1.6 von Bedeutung.

- Gemäß Nummer 1.6 Absatz 1 hat der Arbeitgeber Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Beseitigung gefährlicher explosionsfähiger Gemische zu treffen.

Gelingt dies sicher, müssen keine weiteren Schutzmaßnahmen nach Nummer 1.6 Absätze 2 bis 5 getroffen werden.

- Kann das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre nach der Durchführung von Maßnahmen nach Nummer 1.6 Absatz 1 nicht sicher verhindert werden, sind gemäß Nummer 1.6 Absatz 3 Satz 1 Schutzmaßnahmen zu ergreifen, um eine Zündung zu vermeiden und Warnkennzeichnungen nach Anhang I Nr. 1.6 Abs. 5 anzubringen.
- Für die Festlegung von Maßnahmen zur Zündquellenvermeidung (Nummer 1.6 Absatz 3 Satz 1) kann der Arbeitgeber gemäß Nummer 1.6 Absatz 3 Satz 2 explosionsgefährdete Bereiche entsprechend Nummer 1.7 in Zonen einteilen und entsprechende Zuordnungen nach Nummer 1.8 vornehmen.
- Kann eine Explosion mit den Maßnahmen nach Nummer 1.6 Absatz 1 und Absatz 3 nicht sicher verhindert werden, sind nach Nummer 1.6 Absatz 4 Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zu ergreifen, um die Ausbreitung einer Explosion zu begrenzen und die Auswirkungen der Explosion auf die Beschäftigten so gering wie möglich zu halten.

Die nach Anhang 1 Nummer 1.6 getroffenen Maßnahmen unterliegen dabei immer den Prüfungen gemäß Anhang 2 Abschnitt 3 BetrSichV.

Dieser neue Ansatz des BMAS hat in der Praxis Fragen aufgeworfen, weil explosionsgefährdete Bereiche nicht in Zonen eingeteilt werden können, es aber auch die Möglichkeit gibt, ein alternatives Schutzmaßnahmenkonzept zu wählen. müssen. Wenn man die Begründung des BMAS mit in Betracht zieht, wonach keine Verschärfungen gewollt waren und die neuen Regelungen eine Erleichterung insbesondere auch für KMU darstellen sollen, kann es aber trotzdem grundsätzlich bei der bisher in der Praxis üblichen Vorgehensweise und den bekannten Schutzmaßnahmen bleiben.

Es wird die Aufgabe der Technischen Regeln sein, dies für die praktische Anwendung klarzustellen.

Explosionsschutz in der Betriebssicherheitsverordnung

In der Betriebssicherheitsverordnung sind die Anforderungen an die Arbeitsmittel und die Prüfungen geregelt. Auf Prüfungen wird in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen.

Der Arbeitgeber hat nach § 5 BetrSichV Arbeitsmittel zur Verfügung zu stellen, die unter Berücksichtigung der vorgesehenen Einsatzbedingungen bei der Verwendung sicher sind. Durch Verweis (§ 5 Absatz 3) auf die geltenden Rechtsvorschriften über Sicherheit und Gesundheitsschutz wird ein Mindestmaß an sicherheitstechnischen Merkmalen festgelegt. Zu beachten ist, dass die Festlegung von Art, Umfang und Fristen von nach der BetrSichV vorgeschriebenen Prüfungen von der Art (z. B. Qualität, Komplexität) der beschafften Arbeitsmittel abhängt. Dies gilt insbesondere dann, wenn Höchstfristen nach den Anhängen 2 und 3 ausgeschrieben werden sollen.

Der Beschaffungsprozess spielt sich an der Schnittstelle zwischen Bereitstellen auf dem Markt und dem Verwenden von Arbeitsmitteln ab. Hilfreich ist somit, die Pflichten der Hersteller zu kennen. Das ProdSG als die zentrale Rechtsgrundlage für die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt enthält Anforderungen an Hersteller, aber auch an Einführer und Händler, die relevant für den Beschaffungsprozess sind

2. Schnittstellen und Zusammenhänge zum Produktsicherheitsrecht

Im europäischen Rechtssystem ist eine generelle Harmonisierung im betrieblichen Bereich nicht vorgesehen, da die einzelnen Mitgliedsstaaten (MS) das Niveau des Schutzes selbst bestimmen wollen; es gibt aber in bestimmten Bereichen Mindestanforderungen, die dann aber von den MS ergänzt werden können. Für den Explosionsschutz sind die Mindestanforderungen europäisch in der Richtlinie 1999/92/EG vorgegeben, die in Deutschland über die Gefahrstoffverordnung umgesetzt ist. Die nationale Besonderheit in Deutschland ist, dass die „Ex-Anlagen“ auch den Anforderungen an den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen der Betriebssicherheitsverordnung unterliegen. In diesen Anlagen werden Maschinen und Geräte gemäß Maschinen- und ATEX-Richtlinien (2006/42/EG und 2014/34/EU) verwendet, die den Anforderungen des europaweit einheitlichen Binnenmarktrechts unterliegen]. Während die ATEX-Richtlinie für Geräte in bestimmten explosionsfähigen Bereichen die Einbindung einer notifizierten Stelle fordert, sieht die Maschinen-Richtlinie üblicherweise die Eigenverantwortung des Herstellers vor. Hinzu kommt, dass komplexe Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen auch eine Installation auf dem Gelände des Betreibers beinhaltet, die im Explosionsschutzdokument des Betreibers sicherheitstechnisch bewertet werden muss. Eine Abgrenzung der unterschiedlichen Rechtsbereiche stößt z.T. auf unterschiedliche Auffassungen der zuständigen Personen, die sich häufig auch anhand pragmatischer Erwägungen leiten lassen.

Für die ATEX-Richtlinie gelten als Produkte Geräte, Schutzsysteme und Komponenten. Als Geräte, die elektrisch oder nicht-elektrisch sein können, gelten Maschinen, Betriebsmittel oder Vorrichtungen, die einzeln oder kombiniert zur Verarbeitung von Werkstoffen eingesetzt werden und die eine eigene Zündquelle haben. Die ATEX-Leitlinien unterscheiden in Bezug auf Geräte die „kombiniert“ in den Verkehr gebracht werden (Zusammenbau von Geräten und Komponenten durch eine verantwortliche Person zu einer einzelnen funktionalen Einheit als Baugruppe) verschiedene Fallgestaltungen. Beim Bereitstellen auf dem Markt oder bei der Inbetriebnahme ist mittels einer Zündgefahrenbewertung der Baugruppe zu prüfen, ob bei dem Zusammenbau neue Zündgefahren entstehen. Im Ergebnis ist dann für die Baugruppe das zutreffende Konformitätsbewertungsverfahren entweder als elektrisches Gerät oder als nicht –elektrisches (mechanisches) Gerät durchzuführen. Wenn keine neuen Zündgefahren entstehen, kann die Baugruppe, ohne weitere Konformitätsbewertung in den Verkehr gebracht werden. Für solche Baugruppen als Produkt im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU stellt sich dann häufig die formale Frage, wie die Konformitätserklärung dieses Produktes auszusehen hat. Geräte und Baugruppen können gleichzeitig auch Maschinen im Rahmen der Maschinenrichtlinie sein.

Die Gesamtheit von Maschinen wird in der MRL Artikel 2 Buchstabe a 4. Gedankenstrich bestimmt. Durch ein Interpretationspapier des BMAS [4] wurde die Definition der „Gesamtheit von Maschinen“ in Deutschland konkretisiert. Durch die Bestimmung des Zusammenwirkens von Maschinen oder Maschinenteilen durch einen produktionstechnischen Zusammenhang und eine sicherheitstechnische Einheit wird eine Hilfestellung gegeben. Der Begriff „Gesamtheit von Maschinen“ umfasst daher nicht notwendigerweise eine komplette industrielle Anlage; sondern die Anlage kann auch in einzelne Gesamtheiten von Maschinen unterteilt werden.

Explosionsschutz in der Maschinenrichtlinie:

Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG regelt im Anhang I Abs. 1.5.7 die Gefahren durch Explosionen.

Zitat: „Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass jedes Explosionsrisiko vermieden wird, das von der Maschine selbst oder von Gasen, Flüssigkeiten, Stäuben, Dämpfen und anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Stoffen ausgeht. Hinsichtlich des Explosionsrisikos, das sich aus dem Einsatz der Maschine in einer explosions-

gefährdeten Umgebung ergibt, muss die Maschine den hierfür geltenden speziellen Gemeinschaftsrichtlinien entsprechen.“

Hieraus leitet der Leitfaden ab, dass nur Maschinen in oder im Zusammenhang mit explosionsgefährdeten Bereichen der ATEX-Richtlinie unterliegen. Wenn nur im Inneren der Maschine explosionsfähige Atmosphären auftritt oder bei nichtatmosphärischen Bedingungen, gilt die ATEX-Richtlinie für die Maschine nicht. Im Inneren der Maschine eingebaute Geräte (elektrisch oder nicht-elektrisch), die den Anforderungen der ATEX-Richtlinie genügen, können gemäß Leitlinie zur Maschinenrichtlinie verwendet werden (§ 91). § 228 fordert – im Einklang mit den ATEX-Leitlinien - für Geräte im Sinne der Richtlinie 2014/35/EU innerhalb der Maschine in Bereichen mit einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre die Erfüllung der Anforderungen der ATEX-Richtlinie, wobei neben den technischen auch die formalen Anforderungen verstanden werden sollte.

Die Verwendung von elektrischen ATEX-Geräten wird dabei als unproblematisch angesehen, weil diese als bereits ordnungsgemäß in den Verkehr gebrachte Produkte nach Richtlinie 2014/34/EU am Markt erhältlich sind. Demgegenüber ist eine Bewertung der nicht-elektrischen (mechanischen) Geräte zum Teil sehr problematisch, z.B. mechanisch bewegte Teile im Inneren von Maschinen und deren Zündgefahren. Dies betrifft z.B. dass Innere von Reinigungsanlagen mit Lösemitteln oder Fördereinrichtungen, in denen ständig oder langfristig explosionsfähige Atmosphäre vorliegt.

Hier ist in der Konsequenz auch eine unterschiedliche Vorgehensweise am Markt zu beobachten:

Hersteller 1 ermittelt im Zuge seiner Risikobetrachtung, dass im Inneren seiner Anlage ständig (Zone 0) oder langfristig explosionsfähige Atmosphäre vorhanden sein wird. Daher lässt er auch gemäß Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG, das im Inneren der Maschine eingebaute mechanische Gerät durch eine notifizierte Stelle prüfen.

Hersteller 2 hat dieselbe Ausgangssituation, ist aber der Auffassung, dass er auf eine Prüfung durch eine notifizierte Stelle verzichten kann, weil das mechanische Gerät mit einer geringen Umfangsgeschwindigkeit von $<1\text{m/s}$ bewegt wird und daher keine potentielle Zündquelle vorliegen kann. Dadurch erspart er sich die Kosten für die Prüfung durch die notifizierte Stelle.

Zur Vermeidung von Explosionsrisiken wird im Leitfaden zur Maschinen-Richtlinie der im Explosionsschutz übliche Ansatz (Richtlinie 99/92/EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können) erläutert:

- Explosionsfähige Gemische vermeiden
- Zündquellen vermeiden
- Folgen von Explosionen begrenzen

Die Maschinenrichtlinie sieht für die hier diskutierten Maschinen mit im Inneren explosionsgefährdeten Bereichen **nicht** die Einbindung einer notifizierten Stelle in das Konformitätsbewertungsverfahren vor.

Das Problem ist, dass nicht der Maschinehersteller für die Zoneneinteilung verantwortlich ist, sondern der Arbeitgeber. Die Herausforderung für alle Beteiligten besteht darin, für die Maschine ein tragbares Explosionsschutzkonzept nach den vorgenannten Prinzipien festzulegen.

3. Wie sieht es mit dem Weiterbetrieb von Altanlagen aus

Es wird zwar geregelt, dass Erlaubnisse für den Betrieb der erlaubnispflichtigen Überwachungsbedürftigen Analgen weitergelten, aber es gibt keinen „Bestandsschutz“ für Anlagen.

Der Arbeitgeber muss dafür sorgen, dass die Verwendung der Arbeitsmittel über die gesamte Verwendungsdauer nach dem Stand der Technik sicher ist. Es ist jedoch zu unterscheiden zwischen dem Stand der Technik in Bezug auf das Inverkehrbringen und dem Stand der Technik in Bezug auf die Verwendung eines Arbeitsmittels.

Der Stand der Technik bei der Verwendung von Arbeitsmitteln kann sich im Laufe der Verwendungsdauer zwar durch neue sicherheitstechnische Erkenntnisse verändern; daraus folgt aber nicht, dass z.B. das Fortschreiben einer Produktnorm zwangsläufig eine Nachrüstverpflichtung für den Arbeitgeber in Bezug auf die Beschaffenheit für bereits verwendete Arbeitsmittel nach sich zieht.

Welche Anpassungen erfolgen müssen ergibt sich aus dem Stand der Technik nach GefStoffV bzw. BetrSichV. Die Schutzmaßnahmen legt der Arbeitgeber nach dem T-O-P-Prinzip bei der Gefährdungsbeurteilung fest. Schon vor der BetrSichV 2015 war, gemäß Arbeitsschutzgesetz und der BetrSichV 2002, eine Gefährdungsbeurteilung im Hinblick auf die si-

chere Verwendung von Arbeitsmitteln durchzuführen, daraus die entsprechenden Schutzmaßnahmen abzuleiten und die Gefährdungsbeurteilung zu dokumentieren. Die Anforderungen zur Gefährdungsbeurteilung wurden bereits nach der BetrSichV 2002 durch die Technische Regel für Betriebssicherheit (TRBS) 1111 und, speziell im Explosionsschutz durch die TRBS/TRGS 720 ff konkretisiert.

Als Hilfestellung hat der ABS die Bekanntmachung BekBS 1114 „Anpassung an den Stand der Technik bei der Verwendung von Arbeitsmitteln“ erarbeitet; dieses Dokument wurde vom ABS in der dritten Berufungsperiode überarbeitet und als Empfehlung 1114 neu veröffentlicht.

4. Standpunkt des ABS zur Ermittlung des Standes der Technik

Gemäß Arbeitsprogramm des ABS für die Berufungsperiode 2015 – 2018 wurde im ABS einen Standpunkt des ABS zur Ermittlung des Standes der Technik bei der Verwendung von Arbeitsmitteln erarbeitet. Der ABS hat die Aufgabe, Regelungen zu erarbeiten, die sich an den Arbeitgeber richten, der Arbeitsmittel zur Verwendung zur Verfügung stellt. Ein Anlass auch im ABS einen Standpunkt zur Ermittlung des Standes der Technik zu erarbeiten, war auch die Verabschiedung der TRGS 460. Diese bezieht sich jedoch auf Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und kann nicht auf die Verwendung von Arbeitsmitteln übertragen werden.

Das dabei erarbeitete Dokument richtet sich an den ABS und soll als Hilfestellung bei der Ermittlung von technischen Regeln und Erkenntnisse im ABS und seinen Unterausschüssen dienen, welche Maßnahmen ein Arbeitgeber im Sinne der BetrSichV zu treffen hat.

Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme oder Vorgehensweise zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Stands der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind.

In dem Dokument wird zunächst der Unterschied zwischen der Inverkehrbringung und der Verwendung von Arbeitsmitteln verdeutlicht:

- Stand der Technik in Bezug auf das Inverkehrbringen von Arbeitsmitteln

Der Stand der Technik in Bezug auf das Inverkehrbringen von Arbeitsmitteln wird in Deutschland über das Produktsicherheitsgesetz und die zugehörigen Verordnungen geregelt (z.B. 14. ProdSV zur Umsetzung der DGRL 2014/68/EU). Die Anforderungen richten sich an den Hersteller eines Arbeitsmittels im jeweiligen Harmonisierungsbereich, der die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen der anzuwendenden Binnenmarkt-Richtlinien zu beachten hat. Die Binnenmarkt-Richtlinien erfahren ihre Konkretisierung durch harmonisierte technische Normen mit Vermutungswirkung. Die Binnenmarkt-Richtlinien beschreiben die vom Hersteller durchzuführenden Maßnahmen bei der von ihm vorgesehenen Verwendung des Produkts. Diese Anforderungen gelten für neue Produkte, die erstmalig in den Verkehr gebracht werden. Sie gelten nur für neue Produkte, nicht aber für die gesamte Lebensdauer des Produkts.

- Stand der Technik in Bezug auf die Verwendung von Arbeitsmitteln

Der Stand der Technik in Bezug auf die Verwendung von Arbeitsmitteln wird in Deutschland über § 2 Abs. 10 der Betriebssicherheitsverordnung geregelt. Die Anforderungen richten sich an den Arbeitgeber, der seinen Beschäftigten Arbeitsmittel zur Verwendung zur Verfügung stellt. Konkretisiert werden die Anforderungen in den vom Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) erarbeiteten Technischen Regeln zur Betriebssicherheit (TRBS), die den Stand der Technik in Bezug auf die Verwendung von Arbeitsmitteln beschreiben. Gemäß § 10 (1) BetrSichV muss der Arbeitgeber dafür sorgen, dass Arbeitsmittel während der gesamten Verwendungsdauer den für sie geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen entsprechen und in einem sicheren Zustand erhalten werden. Das bedeutet, dass der Stand der Technik bei der Verwendung eines einzelnen Arbeitsmittels nicht auf einen festen Zeitpunkt bezogen werden kann. Der Arbeitgeber hat zu prüfen und festzulegen, ob Anpassungen an den Stand der Technik in Bezug auf die Verwendung von Arbeitsmitteln notwendig sind. Zur Erreichung des Standes der Technik bei der Verwendung können sowohl technische, als auch organisatorische und / oder personenbezogene Maßnahmen zum Einsatz kommen. Das bedeutet für den Arbeitgeber nicht, dass z.B. das Fortschreiben einer technischen Norm zwangsläufig eine Nachrüstverpflichtung für bereits im Betrieb verwendete Arbeitsmittel nach sich zieht.

Ermittlung des Standes der Technik bei der Verwendung von Arbeitsmitteln durch den Arbeitgeber

Der ABS legt für die Ermittlung von Schutzmaßnahmen zur sicheren Verwendung von Arbeitsmitteln nach dem Stand der Technik folgende Reihenfolge fest:

1. Prüfung der vorhandenen Rechtsvorschriften im Anwendungsbereich der BetrSichV

Wurden die Gefährdungen identifiziert, für die der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen festlegen muss, ist zu prüfen, ob in der BetrSichV, den TRBS oder anderen Veröffentlichungen des ABS Schutzmaßnahmen (einschließlich Festlegungen zu Prüfungen) für diese Gefährdungen enthalten sind.

Dies gilt insbesondere, wenn es um die Verwendung von Arbeitsmitteln geht, für die in den Anhängen 1, 2 und 3 der BetrSichV (besondere Vorschriften für bestimmte Arbeitsmittel) konkrete Vorgaben enthalten sind, z.B.:

- mobile, selbstfahrende oder nicht selbstfahrende Arbeitsmittel
- Arbeitsmittel zum Heben von Lasten
- Arbeitsmittel bei zeitweiligem Arbeiten auf hoch gelegenen Arbeitsplätzen
- Aufzugsanlagen
- Druckanlagen

Für die verschiedenen Gefährdungen, die bei der Verwendung von Arbeitsmitteln entstehen können, gibt es TRBS, die ebenso wie andere Veröffentlichungen des ABS auf der Homepage der BAuA kostenlos abgerufen werden können.

TRBS lösen Vermutungswirkung aus, d.h. der Arbeitgeber kann davon ausgehen, dass er bei Berücksichtigung der TRBS den Stand der Technik und damit die Anforderungen der BetrSichV insoweit einhält.

Wenn die vom Arbeitgeber festgelegten Schutzmaßnahmen den Anforderungen der BetrSichV bzw. der zugehörigen TRBS entsprechen, darf er seinen Beschäftigten das Arbeitsmittel zur Verwendung zur Verfügung stellen.

Weicht der Arbeitgeber im Hinblick auf die Verwendung von Arbeitsmitteln hinsichtlich der getroffenen Schutzmaßnahmen von den Regeln und Erkenntnissen ab, muss er in der Do-

kumentation der Gefährdungsbeurteilung angeben, wie die Anforderungen dieser Verordnung eingehalten werden (gleichwertige Sicherheit).

2. Prüfung anderer Erkenntnisquellen

Wenn in den unter 1 genannten Rechtsvorschriften keine konkreten Anforderungen an Schutzmaßnahmen für die auftretenden Gefährdungen enthalten sind, muss der Arbeitgeber prüfen, ob es andere gesicherte Erkenntnisse gibt, die konkrete Hinweise auf geeignete Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik enthalten.

Dabei handelt es sich um DGUV- Regelwerke und Veröffentlichungen der einzelnen Unfallversicherungsträger, der Länder sowie der BAuA. Übernimmt der Arbeitgeber die dort empfohlenen Maßnahmenkonzepte, darf er davon ausgehen, dass die Schutzmaßnahmen insofern dem Stand der Technik entsprechen. Er kann seinen Beschäftigten das Arbeitsmittel zur Verwendung zur Verfügung stellen.

3. Fachkundige Bewertung durch den Arbeitgeber

Sofern es für das eingesetzte Arbeitsmittel weder in den vorhandenen Rechtsvorschriften nach Nr. 1 noch in den Erkenntnisquellen nach Nr. 2 konkrete Anforderungen an Schutzmaßnahmen gibt, muss der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen selbst fachkundig festlegen. Dabei kann er Maßnahmen, die sich in der Praxis bewährt haben (Veröffentlichungen von z.B. Industrieverbänden und Branchenstandards) und/oder interne oder externe Fachleute hinzuziehen. Bei der Festlegung der Schutzmaßnahmen für die sichere Verwendung des Arbeitsmittels ist stets die Rangfolge der Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

Fazit:

Damit hat der ABS die bewährte Vorgehensweise beschrieben, die insbesondere auch den bewährten Regeln der DGUV eine hohe Bedeutung einräumt. Damit kann sich der staatliche Ausschuss auf die unbedingt notwendigen Konkretisierungen beschränken und die betriebsbewährten Schutzmaßnahmenkonzepte branchenspezifisch durch die Berufsgenossenschaften erarbeitet werden.

Bestandsschutz oder Nachrüstungspflicht

Rechtliche Regelung für Altanlagen: Wie weit geht die Betreiberverantwortung?

Prof. Dr. Thomas Wilrich, Münsing

Was ist Bestandsschutz?

Der vorhandene Bestand soll geschützt = "abgeschirmt" werden gegen ...

1. ➤ **staatliche Behörden**, die (geändertes) Recht und Nach- oder Umrüstungen an der Anlage durchsetzen wollen → Öffentliches Recht
 - richtet sich an Bauherren bzw. (Anlagen-)Betreiber, nicht an seine Dienstleister
 - für beim Betreiber tätige Subunternehmer gilt Arbeitsschutzrecht VG Regensburg Füllziegelanlage Praxisleitfaden BetrSichV
2. ➤ **Nachbarn**, die sich gestört fühlen und gegen Anlage wehren
 - öffentlich-rechtlicher Nachbarschutz
 - zivilrechtlicher/privatrechtlicher Nachbarschutz
3. ➤ **Private**, die sich an Anlage **verletzt** haben und **Schadensersatz** wollen
 - zivilrechtliche Schadensersatzansprüche ab *einfacher* Fahrlässigkeit
 - **Versicherung**, die für Schaden Regress bei Verantwortlichem nimmt
 - z.B. Rückgriffsanspruch der BG nach Arbeitsunfall
 - bei *grober* Fahrlässigkeit (§ 110 SGB VII) bei "Haftungsprivileg"
 - bei *einfacher* Fahrlässigkeit (§ 116 SGB X)
4. ➤ **Staatsanwälte**, die nach Unfällen Verantwortliche **bestrafen** wollen
 - bestraft werden Individualpersonen
 - Deutschland hat (noch) kein Unternehmerstrafrecht

Gliederung

1. Öffentliches Recht:

Bestandsschutz bei Genehmigungsbescheid

→ Bauordnungen (BauO)

2. Öffentliches Recht:

Bestandsschutz bei Genehmigungsfreiheit

→ Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)

3. Zivilrecht: Bestandsschutz im Schadensersatzrecht

→ Anpassungsfrist an technische Normen?

4. Strafrecht: Bestandsschutz bei Strafverfolgung

→ Wer ist "Garant" und was ist "fahrlässig"?

Öffentlich-rechtlicher Bestandsschutz bei Genehmigung

Grundlage:

- Gestattungswirkung ("*gibt den Bau frei*") und Feststellungswirkung ("*alles i.O.*")
- Genehmigung = Unbedenklichkeitsbescheinigung = Legalisierungswirkung
- "Die Baugenehmigung garantiert den öffentlich-rechtlichen Bestand der baulichen Anlage in dem genehmigten Umfang und in der genehmigten Funktion"
Lechner, in: Simon/Busse, BayBO, 108. Lieferung 2012, Art. 68 Rn. 70, siehe auch Rn. 48
- "Bestandsschutz, den eine bauliche Anlage genießt, kann nicht dadurch entschädigungslos beseitigt werden, daß ein Gesetz rückwirkend auf die ursprüngliche materielle Legalität der Anlage Einfluß nimmt" BVerwG Juni 1980

Öffentlich-rechtlicher Bestandsschutz bei Genehmigung gilt nicht bei Sicherheitswidrigkeit

Grenze:

- **Art. 54 Abs. 4 BayBauO:** "Bei bestandsgeschützten baulichen Anlagen können Anforderungen gestellt werden, wenn das zur Abwehr von erheblichen Gefahren für Leben und Gesundheit notwendig ist"
- **§ 53 Abs. 3 HBO:** "An rechtmäßig bestehende ... bauliche oder andere Anlagen und Einrichtungen können nachträglich Anforderungen gestellt werden, soweit dies zur Abwehr von Gefahren für Leben und Gesundheit oder von schweren Nachteilen für die Allgemeinheit notwendig ist"
- allgemeiner Rechtsgedanke, konkrete Vorschrift braucht man nicht
Ulrich Battis, Öffentliches Baurecht und Raumordnungsrecht, 5. Aufl. 2006
- "Seit jeher ist anerkannt, daß die Baupolizei auch nachträgliche Auflagen anordnen kann"
Drews/Wache/Vogel/Martens, Gefahrenabwehr, 9. Aufl. 1986

Gliederung

1. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsbescheid
→ Bauordnungen (BauO)
2. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsfreiheit
→ Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
3. Zivilrecht:
Bestandsschutz im Schadensersatzrecht
→ Anpassungsfrist an technische Normen?
4. Strafrecht:
kein Bestandsschutz bei Straftaten gegen Leib und Leben
→ Wer ist "Garant" und was ist "fahrlässig"?

Bestandsschutz oder Nachrüstungspflicht bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen und Maschinen

Grundsatz:

- betriebsrelevante Gesetze sind ab erstem Geltungstag einzuhalten
- auch wenn dann nachgerüstet werden muss

Ausnahme:

- das Gesetz kann es anders regeln
- Bestandsschutz durch Übergangsfristen oder Nichtanwendungsregeln:

BetrSichV:

- früher: (Pseudo-)Bestandsschutz gemäß § 7 Abs. 2 BetrSichV:
- heute: keine Regelung für alte Arbeitsmittel / Anlagen

Ausgangspunkt – neuer Grundansatz:

- "die materiellen Anforderungen werden als Schutzziele formuliert", so dass
- "eine hohe Flexibilität für den Arbeitgeber erreicht" wird BR-Drs.
- Vorteil Flexibilität bedeutet auch Eigenverantwortung/weniger Rechtssicherheit

kein starrer Bestandsschutz

→ durch die Vorgabe von Schutzzielen sei "das Bestandsschutzproblem bei älteren Arbeitsmitteln gelöst" und es "entsteht für den Arbeitgeber Rechtssicherheit hinsichtlich des Bestandsschutzes" BR-Drs.

1. kein ausdrücklicher Bestandsschutz – anders § 7 BetrSichV alt

- BetrSichV "gilt für alte und neue Arbeitsmittel gleichermaßen" BR-Drs.
- keine "Festfrierung" auf einen bestimmten Stand der Technik

2. Bestandsschutz (nur) im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung

- "Arbeitgeber muss im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung eigenverantwortlich selbst entscheiden, ob ggf. Nachrüstmaßnahmen erforderlich sind" BR-Drs.

3. Bestandsschutz durch (erforderliche) Schutzmaßnahmen

- "Schutzziele der Verordnung sind zwar in jedem Fall einzuhalten und die Verwendung der Arbeitsmittel muss sicher sein. Dies kann jedoch z.B. bei älteren Arbeitsmitteln auch durch ergänzende Maßnahmen sichergestellt werden, so dass ältere Arbeitsmittel nicht ausgesondert werden müssen" BR-Drs.
- Bestandsschutz auch "durch ergänzende Schutzmaßnahmen" BR-Drs.

→ schwierige und verantwortungsvolle (Wertungs-)Frage

Stand der Technik – Wo gilt er?

- für die **Gefährdungsbeurteilung** § 3 Abs. 7 BetrSichV
 - "Gefährdungsbeurteilung ist regelmäßig zu überprüfen. Dabei ist der Stand der Technik zu berücksichtigen"
 - z.B. "Der gebrochene Schiffsmast auf dem Spielplatz" AG Offenbach Okt 2004:
 - "Man muss wenigstens wissen, was Stand der Technik ist, bevor man sich für oder gegen eine der zur Verfügung stehenden Methoden entscheidet"
- für die **Schutzmaßnahmen** § 4 Abs. 1 Nr. 2 BetrSichV
 - sie müssen "nach dem Stand der Technik getroffen" werden,
 - "nicht zwingend ist, dass das Arbeitsmittel selbst dem Stand der Technik entsprechen muss" BR-Drs.
- für die **Verwendung der Arbeitsmittel** § 4 Abs. 1 Nr. 3 BetrSichV
 - sie muss "nach dem Stand der Technik sicher" sein,
 - aber "insgesamt muss die Verwendung des Arbeitsmittels nach dem Stand der Technik sicher sein: dies kann auch durch ergänzende Schutzmaßnahmen gewährleistet werden"
- für die **Montage**, also "die Errichtung von Arbeitsmitteln, der Auf- und Abbau, die Erprobung sowie die **Instandhaltung und Prüfung** von Arbeitsmitteln"
 - sie müssen "nach dem Stand der Technik erfolgen und sicher durchgeführt werden" § 6 Abs. 3 Nr. 1 BetrSichV

Stand der Technik – Was ist er und wie / wo finde ich ihn?

- "Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme oder Vorgehensweise zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen gesichert erscheinen lässt" § 2 Abs. 10
- mittlerer Sicherheitsstandard zwischen anerkannten Regeln der Technik (Basissicherheit) und Stand von Wissenschaft und Technik (strengste Stufe)
- Maßstab ist "an die Front der technischen Entwicklung verlagert" (BVerfG): man muss "in die Meinungsstreitigkeiten der Techniker eintreten, um zu ermitteln, was technisch notwendig, geeignet, angemessen + vermeidbar ist"
- Stand der Technik ist sehr "unbestimmt" und die BetrSichV "sagt nichts darüber aus, welche Maßnahmen im Einzelfall geboten sein könnten, um den Stand der Technik einzuhalten" LG Bonn, Urteil aus 2004
 - ➔ Technische Regeln Betriebssicherheit (TRBS) "von großer Bedeutung"
- Arbeitgeber hat sie zu "berücksichtigen", darf aber abweichen, "wenn Sicherheit und Gesundheit durch andere Maßnahmen zumindest in vergleichbarer Weise gewährleistet werden" § 4 Abs. 3 BetrSichV



Nachrüstungspflicht?

LASI-Leitlinien BetrSichV A.7.6, 3. Aufl. 2008 – "Nachrüstforderungen":

"Durch die BetrSichV werden grundsätzlich keine Nachrüstforderungen erhoben, sofern die Gefährdungsbeurteilung unter Berücksichtigung der Vorbemerkung zu Anhang 1 der BetrSichV nichts anderes ergibt".

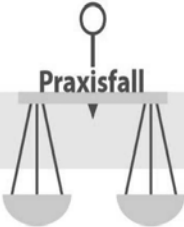
Fazit: immer muss in der Gefährdungsbeurteilung Anhang 1 BetrSichV berücksichtigt werden

Vorsicht: selbst wenn das *Öffentliche Recht* = BetrSichV keine Nachrüstung fordert, kann es das *Zivil- oder Strafrecht* anders sehen TRBS 1101 Nr. 1.2:

"Die Erfüllung der Anforderungen der **BetrSichV ist eine Grundvoraussetzung**, um im **Haftungsfall** ein regelkonformes Handeln nachweisen zu können. Im Haftungsfall ist dies aber ggf. nicht ausreichend. Wenn **trotz Einhaltung der sicherheitstechnischen Regeln Gefahren erkennbar** sind, haben Arbeitgeber oder Betreiber hierauf zu reagieren und **erforderlichenfalls weitere Maßnahmen** zu ergreifen"

Wann ist es nach Zivilrecht + Strafrecht "erforderlich", "Maßnahmen zu ergreifen"?

- wenn es "im Verkehr erforderliche Sorgfalt" erfordert (§ 276 BGB) ≠ Fahrlässigkeit
- wenn es in der der konkreten Situation (technisch) möglich und zumutbar ist, um Schaden zu vermeiden ≠ Verkehrssicherungspflichtverletzung



Praxisfall

Lizenziert für Herr Wilrich Thomas
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt

Unfallversicherung / Recht

in:

Wilrich, Praxisleitfaden
Betriebssicherheitsverordnung
– Fall 5

In dieser Rubrik stellt Ihnen Rechtsanwalt Prof. Dr. Thomas Wilrich Gerichtsurteile aus dem Sicherheits- und Arbeitsschutzrecht vor, die Grundaussagen mit hoher Relevanz für die betriebliche Praxis enthalten.

Thomas Wilrich

Der Sturz aus dem Parkhaus-Aufzug

Zu Bestandsschutz und Nachrüstungspflicht nach BetrSichV und zur haftungsbefreienden Übertragung von Instandhaltungspflichten auf externe Dienstleister

A. Sachverhalt:

Klägerin stürzte 2010 beim Verlassen eines 1989 errichteten Parkhaus-Aufzugs, weil die Kabine ca. 40 cm oberhalb des Bodenniveaus stoppte.

Der Aufzug entspricht nicht dem aktuellen Stand der Technik.

Urteil:

Der Aufzugsbetreiber haftet nicht,

1. weil er haftungsbefreiend die Instandhaltungspflicht auf einen Dienstleister übertragen hat und
2. weil der Aufzug insgesamt noch sicher genug war und ordnungsgemäß errichtet und gewartet wurde.

Gliederung

1. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsbescheid
→ Bauordnungen (BauO)
2. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsfreiheit
→ Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
- 3. Zivilrecht: Bestandsschutz im Schadensersatzrecht**
→ Anpassungsfrist an technische Normen?
4. Strafrecht: Bestandsschutz bei Strafverfolgung
→ Wer ist "Garant" und was ist "fahrlässig"?

Schadensersatzrecht und Strafrecht Verantwortlichkeit nach den allgemeinen Regeln

Zivilrechtliche Verkehrssicherungspflicht § 823 BGB

"Wer vorsätzlich oder fahrlässig das Leben, den Körper, die Gesundheit, die Freiheit, das Eigentum oder ein sonstiges Recht eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatz des daraus entstehenden Schadens verpflichtet".

- "Außerachtlassung der im Verkehr erforderlichen Sorgfalt" § 276 BGB
- "Alles in konkreter Situation Mögliche + Zumutbare zur Schadensvermeidung"
- "neminem laedere" = (Bitte) schädige niemanden !

Strafrechtliche Garantenpflicht § 13 StGB

"Wer es unterlässt, einen Erfolg abzuwenden, der zum Tatbestand eines Strafgesetzes gehört, ist nach diesem Gesetz nur dann strafbar, wenn er rechtlich dafür einzustehen hat, dass der Erfolg nicht eintritt".

"es kommt
darauf an"

- (sehr) unbestimmte Rechtsbegriffe → Einzelfallurteil
- Rechtspflicht zum Handeln? – BGH sagt im Urteil zu Bad Reichenhall:
Garantenstellung hängt "letztlich von den Umständen des konkreten Einzelfalles ab;
dabei bedarf es einer Abwägung der Interessenlage und des Verantwortungsbereichs der Beteiligten"

Spielplatzunfall an der Rutsche

Bundesgerichtshof (BGH), Urteil aus März 1988

Sachverhalt:

- 1964: Errichtung der Rutsche – ohne seitliche Absturzsicherung für kleinere Kinder an den seitlichen Holmen und mit Asphaltbeton als Bodenbelag im Bereich der Standfläche
- 1976: neue DIN 7926, die die Rutsche nicht erfüllt
- 1985: Unfall eines 1 ½ Jahre alten Jungen

Urteil: Verurteilung der Betreiberin zu DM 8.000,- Schmerzensgeld, denn

- DIN-Normen "spiegeln den Stand der für die betroffenen Kreise geltenden anerkannten Regeln der Technik wieder und sind somit zur Bestimmung des nach der Verkehrsauffassung zur Sicherheit Gebotenen in besonderer Weise geeignet"
- Bestandschutz wird nicht einmal erwähnt – nur:
 "Ob bei Einführung neuer DIN-Normen für eine Übergangszeit die bestehenden Einrichtungen ohne Veränderung weiterbetrieben werden dürfen, kann hier dahingestellt bleiben. Eine solche Anpassungszeit – ließe man sie zu – wäre jedenfalls längst verstrichen gewesen, als es mehr als acht Jahre nach Erlass der einschlägigen DIN-Norm zu dem Unfall kam"

Unfall an der Glastür

Bundesgerichtshof (BGH), Urteil aus März 2010

Sachverhalt: BGH Urteil aus März 2010

- 1996: Glastür in Bank = "Richtlinien für kraftbetätigte Fenster, Türen und Tore" ZH 1/494 HVBG
- 2005 Dezember: neue DIN 18650 Automatische Türsysteme = Sicherheitseinrichtungen zum Schutz gegen das Einklemmen bzw. Quetschen an den Hauptschließanten der Türflügel
- 2006 Oktober: Klägerin verletzt sich an der nicht der neuen DIN entsprechenden Tür

Urteil: → *Tue alles Zumutbare um andere nicht zu schädigen* (§ 823 BGB):

"Welche Sicherheit und welcher Gefahrenschutz im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht zu gewährleisten sind, richtet sich nicht ausschließlich nach den modernsten Erkenntnissen und nach dem neuesten Stand der Technik. Es kommt vielmehr maßgeblich auch auf die Art der Gefahrenquelle an. Je größer die Gefahr und je schwerwiegender die im Falle ihrer Verwirklichung drohenden Folgen sind, um so eher wird eine Anpassung an neueste Sicherheitsstandards geboten sein".

Nachrüstpflichten bei Normverschärfung?

BGH, Urteil aus März 2010

- "Soweit es sich um Gefahren handelt, die nicht so schwerwiegend und für den Verkehr im Allgemeinen erkennbar und mit zumutbarer Sorgfalt und Vorsicht beherrschbar sind, kann dem Verkehrssicherungspflichtigen im Einzelfall jedenfalls eine angemessene Übergangsfrist zuzubilligen sein"
 - "jedenfalls innerhalb des unter einem Jahr liegenden Zeitraums bis zum Unfall"
 - Fazit: Möglichkeit eines zeitlich begrenzten "Bestandsschutzes" durch Anpassungsfrist bei *technischen Regeln / Normen* (nicht bei Gesetzen)
 - Vorsicht vor Verallgemeinerungen:
"Frage einer Nachrüstpflicht für bestehende technische Anlagen im Falle einer Verschärfung von Sicherheitsbestimmungen *lässt sich nicht generell beantworten*, sondern richtet sich ebenfalls, ob sich vorausschauend für ein sachkundiges Urteil die nahe liegende Gefahr ergibt, dass durch die bestehende technische Anlage – ohne Nachrüstung – Rechtsgüter anderer verletzt werden können"
- Fazit: "Wer betreibt, muß sich auch vergewissern, daß sie den *jeweiligen*, nicht nur den *früheren* DIN-Vorschriften entsprechen, weil diese Normen auch den *jeweiligen* Stand des technischen Wissens darüber wiedergeben, was zur Gefahrenabwehr erforderlich ist"
- OLG Düsseldorf April 1984 – Ladengeschäft mit Schaufenstern und DIN 18056

Die Explosion der Flüssiggasanlage

Sachverhalt: OLG Düsseldorf Oktober 1998

- 1989: Hersteller errichtet Flüssiggasanlage
- 1990 Juni: Ministeriums-Runderlass vom 05.06.1990,
"wonach eine redundante, möglichst diversitäre Sicherheitseinrichtung vorhanden sein muss"
- 1990 November: Hersteller rüstet Anlage beim Betreiber um, dann einige Tage später
- einige Tage später: Unfall eines Betreiber-Mitarbeiters und Klage gegen Technischen Leiter des Herstellers (T)

Urteil: → *Tue alles Zumutbare um andere nicht zu schädigen* (§ 823 BGB):

1. Einwand: es gibt keine zwingende Norm – aber:
"Einhaltung geltender Normen befreit den Verkehrssicherungspflichtigen nicht ohne weiteres von der Haftung"
2. Einwand: Bestandsschutz – aber:
"zum Zeitpunkt des Unfalls war die Richtlinie in Kraft und eine Nachrüstung auch bestehender Anlagen ist vorgeschrieben"
3. Einwand: Anlagen "*hersteller*" hat keine "*Betreiber*"pflichten – aber:
Vertragliche Nebenpflichten (§ 241 BGB – "Treu und Glauben"):
T "hätte anlässlich der Umrüstung im November 1990 auf dieses Erfordernis hinweisen und eine solche Sicherung einbauen müssen". T "war derjenige, der die erforderliche Sachkunde besaß, und er hätte beraten müssen"
4. Einwand: Technischer Leiter ist nicht Vertragspartner – aber:
persönliche Mitarbeiterhaftung bei "herausgehobener + verantwortlicher Stellung"

Gliederung

1. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsbescheid
→ Bauordnungen (BauO)
2. Öffentliches Recht:
Bestandsschutz bei Genehmigungsfreiheit
→ Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
3. Zivilrecht: Bestandsschutz im Schadensersatzrecht
→ Anpassungsfrist an technische Normen?
4. **Strafrecht: Bestandsschutz bei Strafverfolgung**
→ Wer ist "Garant" und was ist "fahrlässig"?

"Der Brunnen Kump in Steinheim" LG Paderborn, Urteil aus März 1990

siehe auch in: Wilrich,
Sicherheitsverantwortung – Fall 6

Sachverhalt: Am 31.8.1984 fällt ein Kind in den Brunnen "Kump" in Steinheim. Der Bauausschuß der Stadt beschließt, Sicherungsmaßnahmen würden das Erscheinungsbild des Brunnens verschlechtern und unternimmt nichts. Die bauordnungsrechtlichen Vorschriften zu Umwehrungen seien eingehalten (was auch zutrifft)

Am 6.6.1989 stürzte ein 7-jährige Junge in den Brunnen und ertrank. Der Stadtdirektor der Stadt Steinheim wird wegen fahrlässiger Tötung (durch Unterlassen) angeklagt

Urteil: 70 Tagessätze zu je 80,- DM wegen fahrlässiger Tötung

1. Haftungsvoraussetzung: Pflichtverletzung: Stadt hat *Verkehrssicherungspflicht* verletzt
 - "Allein die Einhaltung der baurechtlich vorgeschriebenen Mindesthöhe für Umwehrungen genügte zur Sicherung der von dem Brunnen ausgehenden Gefahren nicht"
2. Haftungsvoraussetzung: Verschulden = Fahrlässigkeit = erkennbar + vermeidbar
 - Erkennbarkeit: "Dem Angeklagten war die Gefahr des Ertrinkens von Personen im Brunnen am Marktplatz sowie die Notwendigkeit von Sicherungsmaßnahmen bekannt"
 - Vermeidbarkeit: "Dem Angeklagten war es auch möglich, geeignete Maßnahmen zur Sicherung zu veranlassen. Da er dies nicht getan hat, hat er den Tod mitverursacht".
 - "Selbst wenn ihm eine argumentative Überzeugung des Bauausschusses nicht gelungen wäre, so hätte der Angeklagte den Beschluß beanstanden müssen".

Zusammenfassung und Empfehlungen zu Bestandsschutz und Nachrüstungsspflicht

Bestandsschutz

- hat seine eigentliche Bedeutung im öffentlichen (Bau-)Recht
 - als Verteidigung gegen Nachrüstforderungen der Behörden
- ist aber auch schon im Öffentlichen Recht eingeschränkt
 - und zwar bei Sicherheitsgefahren
- hat eine geringe Bedeutung im Zivil- und Strafrecht
 - denn es kommt immer auf die – schwer bestimmbare – **Zumutbarkeit** an

Wenn der Verschuldensvorwurf trotz Einhaltung der Gesetze bzw. Normen im Errichtungszeitpunkt gemacht wird, sollte man sich

- nicht (nur) mit dem – rechtlichen – Argument des Bestandsschutzes verteidigen,
- sondern mit dem – technischen – Argument der (weiteren) Angemessenheit der Sicherheitslage

Lieber: *"heute (noch ausreichend) sicher obwohl alt"* als
"seinerzeit gesetzeskonform, also sicher"

Fazit: Begründet werden muss primär die (aktuelle) Sicherheit,
 nicht die (vergangene) Gesetzeskonformität – das ist nur Zusatzargument

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



- tätig rund um Produktsicherheit, Produkt- und Führungskräftehaftung und Arbeitsschutz einschließlich der entsprechenden Betriebsorganisation, Vertragsgestaltung und Strafverteidigung
- monatlich eine Fallbesprechung in "Betriebliche Prävention" (BePr) und "sicher ist sicher" (sis)

Rechtsanwalt Prof. Dr. Thomas Wilrich
 Madeggerweg 13a, 82541 Münsing

E-Mail: info@rechtsanwalt-wilrich.de
 Internet: www.rechtsanwalt-wilrich.de

Neuerungen in der TRGS 727 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (Nachfolge TRBS 2153)“

Innovations in TRGS 727 “Avoidance of Ignition Hazards due to Electrostatic Charging (Follow-up TRBS 2153)”

Dr. Martin Glor,

Swiss Process Safety Consulting GmbH, Allschwil, Schweiz

Kurzfassung

Elektrostatische Aufladung als mögliche Zündquelle für explosionsfähige Atmosphären und Gemische aus brennbaren Stäuben, Gasen und Dämpfen sowie aus deren Kombination in Form von hybriden Gemischen dürfen in der industriellen Praxis nicht unterschätzt werden. Seit der letzten Ausgabe der Deutschen Elektrostatik Richtlinie TRBS 2153 im April 2009 wurden wesentliche neue Erkenntnisse zur sicheren Handhabung und Verarbeitung von Schüttgütern gewonnen. Diese werden in der neuen TRGS 727 beschrieben. Die neue TRGS 727 ersetzt die bisherige TRBS 2153 und schreibt sie fort. Zusammengefasst gaben im Wesentlichen folgende neue Erkenntnisse Anlass für die Fortschreibung der bisherigen TRBS 2153:

- Die bisherigen Anforderungen an die pneumatische Förderung von Schüttgütern sind nach aktuellen Forschungsergebnissen nicht ausreichend, um das Auftreten von Zündquellen sicher zu verhindern. Neue Anforderungen wurden hinzugefügt.
- Eine Anpassung an den Stand der Technik war erforderlich, wie z.B. die Aufforderung zur vermehrten Durchführung von wissenschaftlich fundierter Modellrechnungen zur Beurteilung der Zündgefahr bei der Handhabung und Verarbeitung von Schüttgütern sowie die Harmonisierung von Grenzwerten mit aktuellen internationalen Normen (insbes. IEC 60079-32-1:2013), etc.
- Neue Entwicklungen waren zu berücksichtigen, wie z. B. der Einsatz von Biokraftstoffen sowie eine neue Einteilung von Schlauchtypen für den Transfer von brennbaren Flüssigkeiten, etc.

- Häufig missverstandene Passagen der Regel wurden präzisiert sowie Klarstellungen, Konkretisierungen und physikalisch fundierte Erklärungen wurden vorgenommen.

–

Abstract

Charge build-up due to static electricity may represent an effective ignition source for explosive atmospheres and mixtures formed by flammable powders, gases and vapors as well as by their combination in form of hybrid mixtures. This ignition risk must not be underestimated in industrial practice. Since the last edition of the German Guidelines on Static Electricity TRBS 2153 in April 2009 important new insights concerning the handling and processing of solid bulk material have been gained. These new insights are described in TRGS 727. The new TRGS 727 replaces and updates the previous TRBS 2153. In summary, the following important new findings gave cause for updating the previous TRBS 2153:

- Based on new research results, previous requirements for the pneumatic transfer of solid bulk material are no longer sufficient to prevent the occurrence of incendive discharges. New requirements have been added.
- An adjustment of the state of the art was required, such as a demand for an increased realization of scientifically based model calculations for an assessment of the ignition hazard when handling and processing solid bulk material as well as a harmonization of limit values with present International Standards (particularly IEC 60079-32-1:2013), etc.
- New developments had to be considered, such as the use of biofuels as well as a new classification of types of hoses for the transfer of flammable liquids, etc.
- Specification of frequently misunderstood phrases as well as clarification, concretion and physically based explanations have been carried out.

1 Einführung

Elektrostatischen Aufladungen muss bei der Handhabung von brennbaren Stäuben, Gasen und Dämpfen sowie bei deren Kombination in Form von hybriden Gemischen besondere Beachtung geschenkt werden. Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten, Ereignisberichten und Richtlinien ereignen sich in der Prozessindustrie immer wieder Brände und Explosionen, welche durch elektrostatische Aufladungen als Zündquelle verursacht worden sind. Dies hat die unterschiedlichsten Gründe. Elektrostatische Aufladung von Stoffen und Geräten ist in vielen Fällen unmittelbar mit den betriebsmässigen Prozessen und Operationen verbunden.

Sie stellt eine Zündquelle dar, die im Normalfall, das heisst, ohne dass irgendeine Störung auftritt, aber auch bei Abweichungen wirksam werden kann. Oft werden verfahrenstechnische oder gerätetechnische Änderungen und Innovationen eingeführt, ohne dass die Konsequenzen bezüglich elektrostatischer Aufladungen berücksichtigt werden und den Zündgefahren durch Elektrostatik Rechnung getragen wird.

Durch die Einführung der sogenannten ATEX Richtlinien hat die Beurteilung der Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen in Europa an Bedeutung gewonnen. Dies gilt sowohl für die Hersteller von Geräten und Schutzsystemen als auch für die Betreiber von verfahrenstechnischen Anlagen. Gemäss der Richtlinie 2014/34/EU [1] müssen der Hersteller von Geräten und die Zertifizierungsstelle auch nichtelektrische Zündquellen wie die elektrostatische Aufladung hinsichtlich Ihrer Zündwirksamkeit beurteilen. Ausserdem muss gemäss der Richtlinie 1999/92/EG [2] - der Betreiber von Anlagen eine Risikoanalyse betreffend die Explosionsgefahren durchführen und die diesbezüglichen Gefahren und Massnahmen in seinem Explosionsschutzdokument festhalten. Hierbei müssen speziell auch die Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen beurteilt werden.

2 Geschichte und Vorgängerversionen

Richtlinien zum Vermeiden elektrostatischer Aufladungen als Zündquelle explosionsfähiger Atmosphären haben in Deutschland eine lange Tradition. Schon Mitte letzten Jahrhunderts veröffentlichte der damalige Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (Zentralstelle für Unfallverhütung und Arbeitsmedizin) Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (Richtlinien «Statische Elektrizität») unter dem Kürzel ZH 1/200 [3]. Die letzte Ausgabe stammt aus dem Jahr 1989.

Um die Jahrhundertwende wurden die bisherigen „Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen [Richtlinien „Statische Elektrizität“]“ (ZH 1/200) vom Oktober 1989 vollständig überarbeitet und in die berufsgenossenschaftliche Regel „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“ (BGR 132) überstellt. Die Erstausgabe der BGR 132 erfolgte im März 2003 [4].

Im Zuge der Erarbeitung eines einheitlichen und kohärenten Vorschriften- und Regelwerkes wurde die ehemalige berufsgenossenschaftliche Regel BGR 132 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“ im Jahr 2009 an die geänderte Rechtslage und an den fortentwickelten Stand der Technik angepasst und gleichzeitig in die gleichnamige TRBS 2153 [5] überführt.

Diese wurde im Jahr 2014 überarbeitet, wegen der Änderung der rechtlichen Anbindung wurde die Regel jedoch vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) nicht mehr

als TRBS veröffentlicht. Vielmehr wurde sie an den Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) zur Beschlussfassung als TRGS2 verwiesen, der sie 2015 verabschiedete. Sie wurde anschließend als TRGS 727 [6] (Ausgabe Januar 2016) vom BMAS bekannt gegeben.

Die Ausgabe der TRGS 727 vom August 2016 enthält marginale Änderungen gegenüber der Ausgabe Januar 2016 und gibt den aktuellen sicherheitstechnischen Stand zum Vermeiden von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen wieder.

3 Aufbau der Technischen Regel für Gefahrstoffe TRGS 727

Der Aufbau der Technischen Regel für Gefahrstoffe TRGS 727 ist identisch mit demjenigen der Technischen Regel Betriebssicherheit TRBS 2153. Wesentliche Änderungen wurden bei folgenden Themenkreisen vorgenommen:

- Hinweise zur vermehrten Verwendung von Modellrechnungen
- Neues Kapitel zu Rohren und Schläuchen für Schüttgüter mit weitergehende Erklärungen im Anhang
- Filterelemente in Staubabscheidern (das alte Kapitel Staubabscheider wurde vom übergeordneten Kapitel Schüttgüter in Abwesenheit von Lösungsmitteln in das übergeordnete Kapitel Schüttgüter in Gegenwart von LM verschoben)
- Hinweise für den Einsatz von Biokraftstoffen
- Neue Einteilung von Schlauchtypen für den Transfer von brennbaren Flüssigkeiten
- Harmonisierung von Grenzwerten mit aktuellen internationalen Normen (insbes. IEC 60079-32-1:2013 [7]):
 - Anforderungen und Grenzwerte für Fördergurte und Antriebsriemen in Abhängigkeit von Ex-Zone und Gurt-/Riemengeschwindigkeit
 - Höchstzulässige Kapazitäten nicht geerdeter kleiner Gegenstände
 - Grenze zwischen Flüssigkeiten mittlerer und hoher Leitfähigkeit neu 10 000 pS/m (alt 1 000 pS/m)
 - Grenze zwischen Flüssigkeiten tiefer und mittlerer Leitfähigkeit neu 50 pS/m für Kohlenwasserstoffe, 100 pS/m für sonstige Flüssigkeiten (alt 50 pS/m für alle Flüssigkeiten)

Entsprechend dem Themenfeld der aktuellen VDI Fachtagung wird in der vorliegenden Publikation im Folgenden nur auf wesentliche Änderungen bei der Handhabung und Verarbeitung von Schüttgütern und nicht von Flüssigkeiten eingegangen.

4 Wesentliche Neuerungen betreffend den Umgang und die Verarbeitung von Schüttgütern im Vergleich zur TRBS 2163 Ausgabe 2009

Modellrechnungen

In Kapitel 6.2.3 Behälter wird darauf hingewiesen, dass als Alternative zu Feldstärkemessungen vor Ort auch Modellrechnungen durchgeführt werden können. Dies wird im Anhang A3.6 durch die Aussage präzisiert, dass basierend auf der Raumladungsdichteverteilung und den entsprechenden Randbedingungen die Feldstärkenverteilung im entsprechenden Volumen mittels Modellrechnungen ermittelt werden kann. Daraus lässt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der verschiedenen Entladungsarten ableiten. Beispiele solcher Modellrechnungen zur Beurteilung des Auftretens von Schüttkegelentladungen in Silos oder von Gleitstielbüschelentladungen in Spiralschläuchen können verschiedenen Publikationen [8-10] entnommen werden.

Rohre und Schläuche für den Transfer von Schüttgütern

Beim Transport von Schüttgütern durch Rohre und Schläuche können sich sowohl das Schüttgut als auch die Rohre und Schläuche aufladen. Die Höhe der Aufladung hängt von den Stoff- und Materialeigenschaften sowie den Förderbedingungen ab. Je nach Aufbau und Widerstand des Wandmaterials können Korona-, Büschel-, Funken- und Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Diese Entladungen können eine Zündgefahr sowohl für das transportierte Schüttgut, als auch für die Umgebung der Rohre und Schläuche darstellen. An die Rohre und Schläuche werden unterschiedliche Anforderungen gestellt, je nachdem ob sie für die Aspiration oder den pneumatischen Transport bestimmt sind.

In der Regel wird davon ausgegangen, dass im Inneren von **Aspirationsleitungen** nur eine geringe Staubbeladung vorliegt und somit nur selten und kurzzeitig mit dem Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Staubatmosphäre zu rechnen ist, deshalb sind hierfür Rohre und Schläuche aus isolierenden Materialien zulässig. Bei Anwesenheit brennbarer Gase oder Dämpfe gelten jedoch dieselben Anforderungen wie für den pneumatischen Transport.

Beim **pneumatischen Transport** brennbarer Schüttgüter mit Luft ist im Allgemeinen im Inneren der zum Transport benutzten Rohre und Schläuche von explosionsfähiger Atmosphäre durch Feinstaub auszugehen. Je nach Einsatz kann auch in der Umgebung der Rohre und Schläuche explosionsfähige Atmosphäre vorliegen. Dementsprechend werden für die Vermeidung wirksamer Zündquellen an den Wandaufbau der Rohre und Schläuche verschiedene Anforderungen gestellt.

Rohre und Schläuche werden hinsichtlich ihres Wandaufbaues und der verwendeten Materialien unterschieden. Für eine Charakterisierung des Wandmaterials als leitfähig oder ableitfähig darf entgegen den einschlägigen Definitionen nur der Durchgangswiderstand (spezifische Widerstand) herangezogen werden. Eine Charakterisierung über den Oberflächenwiderstand allein ist nicht zulässig.

Hinweis: Bei Fallhöhen grösser 3 m kann auch eine Förderung mittels Schwerkraft einen stark ladungserzeugenden Prozess darstellen. In diesem Fall gelten dieselben Anforderungen wie für den pneumatischen Transport.

Explizit werden folgende Roh- und Schlauchtypen behandelt:

- Rohre und Schläuche mit homogenem leitfähigem Wandmaterial
- Rohre und Schläuche aus leitfähigem Wandmaterial mit Drahteinlagen
- Rohre und Schläuche mit Wänden aus mehreren Schichten
- Stützwendelschläuche

Insbesondere bei den **Stützwendelschläuchen** werden sehr detaillierte Anforderungen gestellt, solche Schläuche sind nur für den pneumatischen Transport zulässig, wenn sie alle nachfolgenden Eigenschaften besitzen:

- Als Stützwendel werden ausschließlich metallisch blanke, nicht isolierte, nicht ummantelte Drähte verwendet.
- Die Stützwendel ist beidseitig geerdet.
- Der Wendeldrahtdurchmesser liegt zwischen 1 mm und 2 mm.
- Der Abstand (Schichtdicke) der inneren Schlauchwandoberfläche zur Wendeldrahtoberfläche liegt zwischen 0,7 mm und 2 mm.
- Die Steigung der Wendel ist nicht größer als 30 mm.
- Die Wendel ist in ein homogenes Material mit einem spezifischen Widerstand von weniger als $2,5 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$ eingebettet.
- Der Innendurchmesser des Schlauches liegt zwischen 50 mm und 160 mm.
- Die relative Permittivität des Wandmaterials ist nicht größer als 5.

Für andere geometrische Anordnungen, höhere Werte der relativen Permittivität oder für mehrlagige Stützwendelschläuche kann der obere Grenzwert für den zulässigen spezifischen Widerstand des Wandmaterials durch Simulationsrechnungen unter Annahme einer Aufladestromdichte von 1 mA/m^2 berechnet werden.

Filterelemente in Staubabscheidern

Erfahrungsgemäss ist die Wahrscheinlichkeit für das Entstehen einer Staubexplosion in Staubabscheidern und Filteranlagen besonders hoch. Dies ist nicht erstaunlich, da hier definitionsgemäss der Feinstaubanteil gesammelt wird, welcher bekanntlich die grösste Zündempfindlichkeit (tiefste Mindestzündenergie) aufweist.

Filterelemente wie Filterschläuche, -patronen oder -kassetten bestehen i. d. R. aus Filtermaterialien, z. B. Papier, Gewebe oder Sintermaterial, und einer Rahmenkonstruktion. An Filterelementen in filternden Staubabscheidern kann es zu elektrostatischen Entladungen kommen. Beim Einsatz von filternden Abscheidern sind mehrere elektrostatische Zündgefahren zu beachten:

- Von isolierten leitfähigen Teilen können **Funkenentladungen** ausgehen.
- Isolierend beschichtete und staubberührte Flächen der Abscheider können zu zündwirksamen **Gleitstielbüschelentladungen** führen.
- Im Staubsammelraum kann es je nach Durchmesser des Staubsammelraumes und der Eigenschaften des Staubes zu zündwirksamen **Schüttkegelentladungen** kommen. Zur Beurteilung der Zündwirksamkeit ist die Äquivalentenergie zu bestimmen.
- Da gemäss heutigem Kenntnisstand Büschelentladungen unabhängig von der Mindestzündenergie des Staubes reine Stäube in Abwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe nicht entzünden können, sind **Büschelentladungen** nur dann zu beachten, wenn brennbare Gas/Luft-Gemische oder hybride Gemische vorhanden sind.

Alle leitfähigen Teile sind zu erden und alle ableitfähigen Teile der Filterelemente mit ausreichendem Erdkontakt zu versehen.

In filternden Abscheidern können die Erdverbindungen starken mechanischen Belastungen ausgesetzt sein. Daher sind die Erdung bzw. der ausreichende Erdkontakt wiederkehrend zu prüfen.

Die Verwendung von Filterelementen aus isolierendem Filtermaterial für die Abscheidung von brennbaren Stäuben ist nur zulässig, wenn dadurch die Erdung der leitfähigen oder ableitfähigen Teile des filternden Abscheiders nicht unterbrochen wird.

Bei Schüttgütern mit einer MZE ≤ 3 mJ sind ableitfähige Filtermaterialien mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8 \Omega$ oder leitfähige geerdete Filtermaterialien erforderlich.

Filtermaterialien aus Gewebe (z. B. Nadelfilze oder Vliese), die mit leitfähigen Fasern ausgerüstet sind, gelten als ableitfähig, wenn ihr Streifenwiderstand $R_{ST} \leq 10^8 \Omega$ beträgt.

Stäube können durch Büschelentladungen nicht gezündet werden. Bei den in Abscheidern auftretenden stark ladungserzeugenden Prozessen können jedoch auch sehr kleine isolierte leitfähige Teile so stark aufgeladen werden, dass sie für Stäube geringer Mindestzündenergie zündwirksame Funkenentladungen erzeugen. Beim Einsatz isolierender Filtermaterialien ist es sehr schwierig, sicherzustellen, dass auch kleinste leitfähige Bauteile in die Erdung eingebunden sind.

Leitfähige Schüttgüter können auf isolierenden Filteroberflächen nicht geerdete leitfähige Teilbereich bilden, welche zu Funkenentladungen führen. Deshalb ist bei leitfähigen Schüttgütern der Einsatz ableitfähiger Filtermaterialien mit einem Ableitwiderstand von $R_E \leq 10^8 \Omega$ oder leitfähiger geerdeter Filtermaterialien erforderlich.

Beim Auftreten hybrider Gemische in filternden Abscheidern ist der Einsatz ableitfähiger Filtermaterialien mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8 \Omega$ oder leitfähiger geerdeter Filtermaterialien erforderlich. Mit dem Auftreten hybrider Gemische muss gerechnet werden, wenn brennbare Gase oder Dämpfe mit einer Konzentration von mehr als 20% ihrer unteren Explosionsgrenze vorhanden sein können.

Schlussbemerkung

Diese Publikation erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Details sind der TRGS 727 [6] zu entnehmen.

5 Literaturangaben

- [1] Richtlinie 2014/34/EU vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung). Auch ATEX 95 genannt.
- [2] Richtlinie 1999/92/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999 über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können. Auch ATEX 137 genannt.
- [3] ZH 1/200, Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (Richtlinien «Statische Elektrizität») 1989.
- [4] BGR 132, Berufsgenossenschaftliche Regel „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“ 2003.
- [5] TRBS 2153, Technische Regel Betriebssicherheit 2153 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, Deutschland, Juni 2009.
- [6] TRGS 727 Technische Regeln für Gefahrstoffe 727, „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, Deutschland, Januar 2016.
- [7] IEC 60079-32-1, Technical Specification EXPLOSIVE ATMOSPHERES – Part 32-1: Electrostatic hazards, Guidance, 2013 August 1st Edition.
- [8] M. Glor, “Modelling of Electrostatic Ignition Hazards in Industry - too Complicated, not Meaningful or only of Academic Interest?”, Chemical Engineering Transactions Vol.31, 2013.
- [9] M. Glor, C. Blum, W. Fath and C.-D. Walther, “Electrostatic Ignition Hazards Associated with the Pneumatic Transfer of Flammable Powders through Insulating or Dissipative Tubes and Hoses”, Chemical Engineering Transactions Vol.31, 2013.
- [10] M. Glor and A. Pey, “Modelling of Electrostatic Ignition Hazards in Industry - Examples of Improvements of Hazard Assessment and Incident Investigation”, Journal of Electrostatics 71 (2013) 362-367.

Kenngößen von Stäuben unter nicht atmosphärischen Bedingungen und von hybriden Gemischen

Ergebnisse Forschungsvorhaben BGRCI

Dipl.-Ing. **Matthias Beck**, Dr.-Ing. **Ute Hesener**,
Dekra EXAM GmbH, Bochum

Kurzfassung

Bei der Auslegung explosionstechnischer Schutzmaßnahmen in der staubverarbeitenden Industrie sind genaue Kenntnisse der Eigenschaften der verarbeiteten brennbaren Stäube erforderlich. Sicherheitstechnische Kenngößen werden benötigt, um potenzielle Zündquellen zu bewerten oder konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen auslegen zu können. Auch um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Stäuben zu erreichen, werden sicherheitstechnische Kenngößen verwendet. Diese sollten in Laboren unter normierten Randbedingungen ermittelt werden. Bei der Anwendung der ermittelten Kenngößen auf die konkrete verfahrenstechnische Anlage ist immer zu beachten, dass die Kenngößen von verschiedenen Randbedingungen abhängen. Neben der Korngröße beeinflussen andere Umgebungstemperaturen oder Drücke sowie abweichende Sauerstoffvolumenanteile oder das Vorhandensein von Brenngasen die Kenngößen. Die DEKRA EXAM GmbH hat im Rahmen zweier von der BG RCI geförderten Forschungsvorhaben die vorhandenen veröffentlichten Erkenntnisse zu dem Thema zusammengefasst.

Abstract

When designing explosion protection measures for the dust-processing industry, exact knowledge of the properties of the processed combustible dusts is needed. Burning and explosion characteristics are essential in order to assess potential ignition sources or to design constructive explosion protection measures. So-called safety parameters are also used to establish the comparability between various types of dust, namely in laboratories under standardized boundary conditions. When applying the parameters thus established in the processing facility concerned, it must always be borne in mind that these parameters depend on various boundary conditions. Apart from the grain size, other ambient factors, such as the temperature or the pressure as well as deviating oxygen volume fractions or the existence of combustible gas, will influence the parameters. As part of two research projects sponsored by the Trade Association Raw Materials and Chemical Industry (BG RCI), DEKRA EXAM GmbH has summarized the existing and published findings on this subject.

1. Motivation & Methodik

Der sichere Umgang mit brennbaren Stäuben in der Industrie und die Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen setzt eine genaue Kenntnis über das Verhalten des Staubes voraus. Für die Charakterisierung des Staubverhaltens werden sicherheitstechnische Kenngrößen herangezogen. In Deutschland werden hierfür die folgenden Kenngrößen brennbarer Stäube herangezogen:

- Brennzahl
- Glimmtemperatur
- Selbstentzündungstemperatur durch Warmlagerung.
- Zündtemperatur
- Mindestzündenergie
- Untere Explosionsgrenze
- Sauerstoffgrenzkonzentration sowie
- Maximaler Explosionsdruck und K_{St} -Wert

Ermittelt werden die oben aufgeführten Kenngrößen in Staublaboren unter apparativen und versuchstechnischen Randbedingungen, die größtenteils in europäischen Normen beschrieben sind. Die gleichzeitige Anwesenheit brennbarer Stäube und brennbarer Gasen bzw. Lösemitteldämpfe (sog. hybride Gemische) wird in den o.g. Normen nicht betrachtet. Die europäischen Normen sind zu Zeit unter der Richtlinie 2014/34/EU harmonisiert (z. B. 14034-1 bis 4). Die Nutzung der im Labor ermittelten Kenngrößen in der Industrie bedingt immer eine Prüfung der Randbedingungen vor Ort. Die oben genannten Richtlinien sehen für die unter die Richtlinie fallenden Kenngrößen einen Geltungsbereich vor, in welchem diese nahezu konstant sein sollen. Der Geltungsbereich der Richtlinie 2014/34/EU umfasst dabei ein Temperaturintervall zwischen -20 °C und $+60\text{ °C}$, bei Drücken zwischen 800 mbar und 1100 mbar. Dieser Geltungsbereich wird auch unter dem Begriff der atmosphärischen Bedingungen zusammengefasst. Wird dieser Geltungsbereich verlassen, beispielsweise in Trocknungs- oder Mischprozessen, so muss der Anwender den Einfluss der veränderten Prozessbedingung auf die betrachtete Kenngrößen abschätzen. Im Auftrag der BG RCI wurden bei der DEKRA EXAM GmbH zwei Forschungsprojekte durchgeführt, welche es dem Anwender ermöglichen sollen, ausgehend von den bei atmosphärischen Bedingungen ermittelten Kenngrößen die in seinem Prozess vorliegenden Kenngrößen unter Betriebsbedingungen abzuschätzen. Im Rahmen beider Forschungsprojekte [1, 2] wurde die verfügbare Literatur gesichtet und zusammengefasst. Weiterhin wurden Empfehlungen für Abschätzungsmöglichkeiten der Einflussfaktoren Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil und

für hybride Gemische erarbeitet. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Ergebnisse anhand ausgewählter Beispiele vorgestellt und die Abschätzungsmöglichkeiten diskutiert werden.

2. Sicherheitstechnische Kenngrößen von abgelagerten Stäuben

Es ist allgemein bekannt, dass sich die Brennzahl eines Staubes bei erhöhter Staubtemperatur häufig zu kritischen Werten ändert. Der Versuchsaufbau hierzu ist in der VDI Richtlinie 2263 Blatt 1 grundsätzlich beschrieben. Die vorliegenden Untersuchungen dazu zeigen, dass die Brennzahl eines aufgeheizten organischen Staubes deutlich oberhalb der bei atmosphärischen Bedingungen bestimmten Brennzahl liegen kann. Bei höheren Staubtemperaturen befindet sich ein höherer Anteil an leicht flüchtigen Bestandteilen an der Phasengrenzfläche. Da Sauerstoff im Überschuss vorhanden ist, wird der höhere Anteil flüchtiger Bestandteile umgehend umgesetzt. Das Brennverhalten wird kritischer. Eine quantitative Abschätzungsmöglichkeit, wie sich die Brennzahl mit der Temperatur entwickelt, liegt bislang nicht vor. Zur Einschätzung wird empfohlen, den Laborversuch unter erhöhter Temperatur durchzuführen. Auch ist zu berücksichtigen, dass die ermittelte Brennzahl stark von der Durchführung des Tests abhängt (Art der Zündquelle, Einwirkdauer der Zündquelle, Art und Stärke der Überströmung (durch die die Sauerstoffzufuhr maßgeblich beeinflusst wird)).

Bezüglich Druckabhängigkeit liegen für die Brennzahl keine Untersuchungen vor. Für reduzierte Drücke kann angenommen werden, dass die bei atmosphärischen Bedingungen bestimmten Kenngrößen für die Brennzahl gültig bleiben, da ein eher unkritisches Verhalten zu erwarten ist. Bei erhöhten Drücken sind unterschiedliche Effekte zu berücksichtigen. Eine Erhöhung des Anfangsdrucks führt zu einer Erhöhung des Sauerstoffpartialdrucks. Dem Reaktionssystem steht mehr Oxidationsmittel zur Verfügung. Gleichzeitig führt die Erhöhung der Stoffmenge zu einer Erhöhung der volumenspezifischen Wärmekapazität. Zusätzlich erschwert ein höherer Anfangsdruck die Ausgasung flüchtiger Bestandteile aus dem Staubkorn. Welcher dieser einzelnen Faktoren ausschlaggebend für das Verhalten der Kenngrößen bei erhöhtem Druck ist, kann im Einzelnen zurzeit nicht abgeschätzt werden.

Auch zur Abschätzung des Einflusses der Sauerstoffkonzentration liegen keine Untersuchungen vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei Reduzierung der Sauerstoffkonzentration grundsätzlich ein unkritisches Verhalten der Brennzahl vorliegt. Als Anhaltspunkte können die Ergebnisse der Untersuchungen zum Selbstentzündungsverhalten herangezogen werden (siehe unten). Bei erhöhten Sauerstoffkonzentrationen ist von einem deutlich kritischen Verhalten auszugehen. Falls im Einzelfall eine Bewertung erforderlich ist, wird empfohlen, Laborversuche durchzuführen.

Zum Verhalten der Selbstentzündungstemperatur unter variierenden Sauerstoffvolumenanteilen liegen einige Veröffentlichungen vor. Zum Beispiel wurde von Schmidt und Lohrer (s. u.a. [1, 2]) die Selbstentzündungstemperatur diverser organischer Stäube innerhalb sauerstoffreduzierter Atmosphären durch isoperiboler Warmlagerung bestimmt. Hierzu sind in Bild 1 ausgewählte Versuchsergebnisse der Autoren aufgeführt.

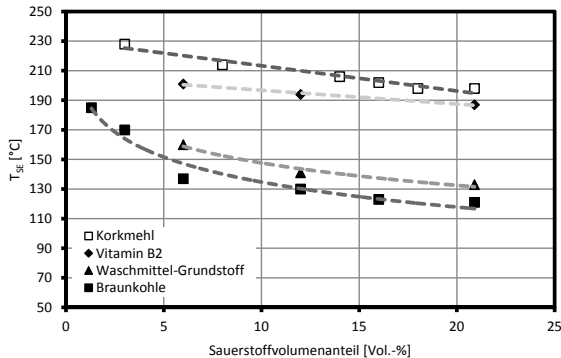


Bild 1: Ausgewählte Versuchsergebnisse von Schmidt und Lohrer

Diese Versuchsergebnisse zeigen, dass die Selbstentzündungstemperaturen der betrachteten Stäube bei abnehmenden Sauerstoffvolumenanteilen zunehmen. Durch den geringeren Anteil an Sauerstoff in der Atmosphäre sinkt die Oxidationsrate des Staubes an dessen freier Oberfläche. Dies führt zu einer geringeren freigesetzten Reaktionswärme. Allerdings ist erst bei geringen Sauerstoffvolumenanteilen mit einem signifikanten Anstieg zu rechnen. Es ist auch zu beachten, dass in der Schüttung selbst noch Sauerstoff vorhanden ist bzw. dass bei manchen Produkten auch chemisch gebundener Sauerstoff bei erhöhten Temperaturen freigesetzt werden kann. Beispielsweise wird bei der Warmlagerung von Erbsenmehl bei erhöhten Temperaturen Sauerstoff freigesetzt, so dass selbst bei Sauerstoffvolumenanteilen von 0 % in der Umgebung Selbstentzündung stattfinden kann. Wenn keine konkreten Daten vorliegen, empfiehlt sich, die bei atmosphärischen Bedingungen ermittelten Werte heranzuziehen. Weiterhin ist zu beachten, dass bei Stäuben, die unter inerten Bedingungen und erhöhter Temperatur gehandhabt werden, zwar im inertisierten Anlagenbereich bei sehr niedrigen Sauerstoffvolumenanteilen Selbstentzündung vermieden werden kann, dazu aber deutlich niedrigere Werte der Sauerstoffkonzentration erforderlich sind als sie sich z. B. durch die Sauerstoffgrenzkonzentration ergeben würden. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei erneutem Kontakt mit atmosphärischen Bedingungen (im nachgeschalteten, nicht inertisierten An-

lagenbereich) eine Entzündung sehr schnell eintreten kann, wenn im inertisierten Bereich Produkttemperaturen oberhalb der Selbstentzündungstemperatur bei atmosphärischen Bedingungen vorliegen können.

3. Sicherheitstechnische Kenngrößen von aufgewirbelten Stäuben am Beispiel der Mindestzündenergie

Die MZE eines aufgewirbelten Staubes gibt die minimale in einem Kondensator gespeicherte Energie an, welche gerade eben ausreicht, den Staub zu entzünden. Bestimmt wird diese entweder mit einer modifizierten Hartmann Apparatur oder einem MIKE 3 (s. Abbildung 2). Mit einigem apparativen Aufwand lassen sich in beiden Versuchsapparaturen höhere Temperaturen bzw. veränderte Sauerstoffvolumenanteile einstellen. Nicht möglich ist jedoch die Einstellung veränderter Drücke.

In einem MIKE 3 wurden von Glor und Schwenzfeuer [3] die Abhängigkeit der MZE vom Sauerstoffvolumenanteil untersucht. Hierbei konnten sie beobachten, dass die MZE für Sauerstoffvolumenanteile kleiner 21 Vol.-% ansteigt. Demgegenüber sinkt die MZE bei einer Erhöhung des Sauerstoffvolumenanteils. Ihre Beobachtungen fassten die beiden Autoren in einer empirischen Gleichung zusammen:

$$MZE(y_{O_2}) = MZE_{Fakt} \cdot \exp\left\{23,2 - \frac{23,2}{21} \cdot y_{O_2}\right\}$$

Der produktspezifische Faktor MZE_{Fakt} muss dabei im Labor ermittelt werden. Die Gleichung kann genutzt werden, um die Größenordnung der MZE in Systemen mit reduzierten Sauerstoffvolumenanteilen abzuschätzen. Eine endgültige Aussage kann aber nur auf der Basis von Versuchen getroffen werden.

Maßgebliche Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der MZE, welche auch heute noch angeführt werden, stammen von Glarner [4]. Dieser untersuchte in den 80'er Jahren des letzten Jahrhunderts die MZE verschiedener Stäube bei Temperaturen bis zu 200 °C in einer 20 l-Laborapparatur. Durch eine Regressionsrechnung postulierte Glarner, dass organische Stäube bei einer Temperatur von 1000 °C eine MZE von 0,088 mJ aufweisen. Mit Hilfe dieser Untersuchungen ist eine qualitative Abschätzung der Größenordnung der MZE, zumindest bis 200 °C, über die lineare Interpolation möglich. Die Abschätzung konkreter Werte, insbesondere im zündkritischen Bereich, wird ausdrücklich nicht empfohlen.

4. Sicherheitstechnische Kenngrößen für hybride Gemische

Mit der Anwesenheit explosionsfähiger hybrider Gemische ist immer dann zu rechnen, wenn in einem System gleichzeitig aufgewirbelter brennbarer Staub und brennbare Gase bzw. Lösemitteldämpfe vorliegen. Eine Definition des Begriffs des hybriden Gemisches findet sich in

der VDI 2263 Blatt 5 [5]. Demnach ist mit dem Vorhandensein eines hybriden Gemisches zu rechnen, wenn die Konzentration der Gas- bzw. Dampfphase $> 20 \%$ der unteren Explosionsgrenze beträgt. Für lösemittelfeuchte Stäube muss demnach mit einem explosionsfähigen hybriden Gemisch gerechnet werden, wenn die Lösemittelbeladung des Staubes mehr als $0,5 \text{ Gew.}\%$ beträgt. Dies gilt jedoch nur für Stäube, welche bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden. Allerdings wurde im Forschungsbeirat zu dem Forschungsvorhaben diskutiert, ob die in der o. g. Quelle diskutierte Quelle ausreichend konservativ ist. Zum Beispiel wird dieser Grenzwert in [6] in Frage gestellt. Daher wird im Forschungsbericht zu dem aktuellen Vorhaben empfohlen, bei Brenngaskonzentrationen ab 10% der unteren Explosionsgrenze zunächst grundsätzlich zu untersuchen, ob sich die Explosionskenngrößen der Stäube signifikant ändern.

Im Einzelfall kann es sogar sein, dass ein Staub unter Normbedingungen als nicht explosionsfähig eingestuft wird, durch die Zumischung geringer Mengen an Brenngasen eine Zündung des Gemisches möglich wird. Bemerkenswert an dieser Stelle ist zudem eine Untersuchung aus der Dissertation von Pellmont [9]. Dieser untersuchte zwei PVC Stäube mit unterschiedlichen Medianwerten ($125 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$). Der gröbere der Stäube gilt unter Standardbedingungen als nicht explosionsfähig. Bei den Untersuchungen in einem 1 m^3 Explosionsbehälter (10 kJ Zündenergie, 600 ms Zündverzögerungszeit) zeigte sich, dass durch die Zufuhr von Propangas auch dieser Staub explosionsfähig wurde. Diese Untersuchung zeigt, dass brennbare Stäube die als „nicht explosionsfähig“ gelten, durch die Zugabe von brennbaren Gasen bzw. Dämpfen ein explosionsfähiges hybrides Gemisch bilden können.

Dieser Zusammenhang ist in Bild 2 dargestellt. Hierin gilt die Bezeichnung „brennbar“ für Stäube, die oxidierbar sind.

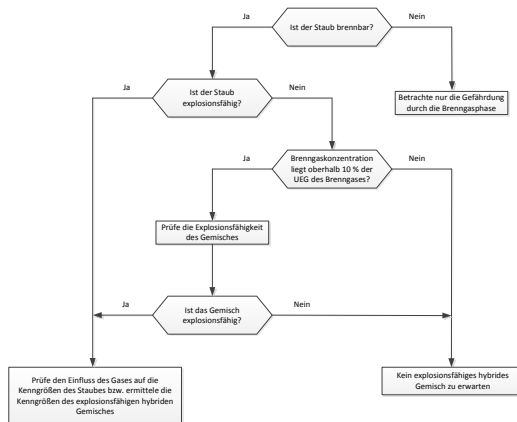


Bild 2: Entscheidungskriterien zum Vorliegen explosionsfähiger hybrider Gemische

Ist das Gemisch aus brennbarem Staub und Brenngas explosionsfähig, ist der Einfluss des Brenngases auf die Explosionskenngrößen im Einzelnen zu ermitteln.

Untersuchungen für die Mindestzündenergie wurden in den verschiedensten Versuchsaapparaturen durchgeführt. An dieser Stelle soll nun näher auf die Versuche von Pellmont [9] eingegangen werden. Pellmont führte in seiner Dissertation Versuchsreihen zur Bestimmung der Mindestzündenergie explosionsfähiger hybrider Gemische durch. Hierfür wurde ein 1m^3 Explosionsbehälter genutzt, die Zündquelle stellte eine Dreifach Elektroden Strecke dar. Unter anderem wurde von Pellmont ein hybrides Gemisch aus einem PVC Pulver (Median: $20\text{ }\mu\text{m}$) und Propangas genutzt. Der Brenngasgehalt variierte dabei zwischen 0 Vol.-% und 2,7 Vol.-%. Die Versuchsergebnisse hierzu sind in Bild 3 dargestellt.

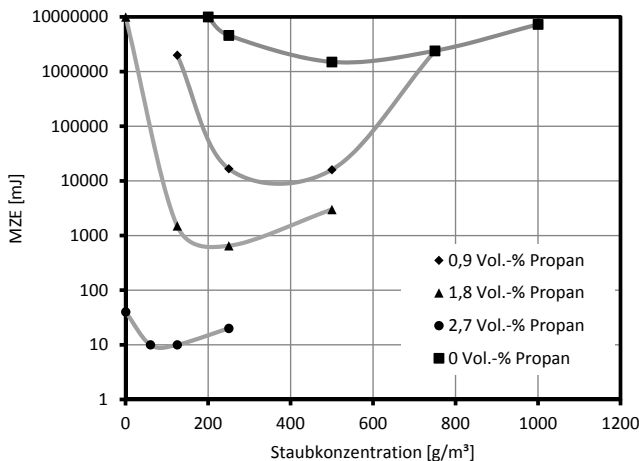


Bild 3: Versuchsergebnisse von Pellmont

In Bild 3 sind zwei Dinge gut zu erkennen. Durch die Zugabe des Brenngases sinkt die Mindestzündenergie des brennbaren Staubes rapide. Liegt sie für den reinen Staub bei Werten > 1.000.000 mJ, so sinkt sie durch die Zugabe von 0,9 Vol.-% Propan auf ca. 10.000 mJ und bei 2,7 Vol.-% Propan bei 10 mJ. Werden die weiteren von Pellmont durchgeführten Versuche in die Betrachtung mit einbezogen, so zeigt sich eine lineare Abnahme der Mindestzündenergie eines Staubes bei zunehmendem Brenngasgehalt. Weiterhin zeigt sich, dass durch die Zugabe des Brenngases die zündfreudigste Staubkonzentration abnimmt. Abgelesen werden kann diese in der obigen Abbildung am Tiefpunkt der eingezeichneten Parabel. Für die Mindestzündenergie eines Staubes fasste Pellmont seine Versuchsergebnisse in der nachfolgend aufgeführten Abschätzmethode zusammen.

$$MZE_H = MZE_{St} \cdot \left(\frac{MZE_G}{MZE_{St}} \right)^{\frac{y_G}{y_{G,St0}}}$$

Die Verifizierung dieser Gleichung mit der zur Verfügung stehenden Literatur zeigte für diese Gleichung, dass eine Berechnung der Mindestzündenergie in guter Abschätzung möglich ist. Generell gilt für die Mindestzündenergie eines explosionsfähigen hybriden Gemisches, dass bereits bei geringen Brenngaskonzentrationen mit einem Einfluss des Brenngases auf die Kenngröße gerechnet werden muss. Wie bereits bei der unteren Explosionsgrenze ist z.Z. noch ungeklärt ab welchem Brenngasgehalt konkret mit einem Einfluss gerechnet werden muss. Grundsätzlich ist daher zunächst anzunehmen, dass auch bei Brenngasgehalten klei-

ner 20 % der unteren Explosionsgrenze des Brenngases ein Einfluss auf die Mindestzündenergie des Staubes vorliegen kann.

Dies ist z. B. auch zu berücksichtigen, wenn Stäube in eine Lösemittelvorlage gegeben werden sollen. Auch wenn das Lösungsmittel Betriebstemperaturen aufweist, die unterhalb des um 15 K verminderten Flammpunkts liegen, sind Dampfkonzentrationen über der Flüssigkeit vorhanden. Dies kann dazu führen, dass die Mindestzündenergie des Staub/Dampf/Luft-Gemisches deutlich niedriger ist als die Mindestzündenergie des reinen Staub/Luft-Gemisches.

5. Zusammenfassung & Ausblick

Für die Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen und den sicheren Umgang mit brennbaren Stäuben muss der Anwender die sicherheitstechnischen Kenngrößen des gehandhabten Staubes genau kennen bzw. abschätzen. Die vorliegenden Erkenntnisse zeigen, dass das Verhalten der Kenngrößen bereits in dem definierten Geltungsbereich für atmosphärische Bedingungen nicht als konstant anzusehen ist. Leider liegen aus der Vergangenheit nur für die wenigsten Kenngrößen konkrete Werte außerhalb der atmosphärischen Bedingungen vor. Weiterhin zeigt sich, dass für die Bewertung von Kenngrößen des Staubes bei Vorhandensein von Brenngasen nicht in allen Fällen eine ausreichend konservative Abschätzungsmöglichkeit zur Verfügung steht. Auch ist z. Z. unbekannt, ab welcher Brenngaskonzentration ein wesentlicher Einfluss auf die jeweiligen Kenngrößen vorhanden ist. Der in der VDI Richtlinie genannte Grenzwert von 20 % der unteren Explosionsgrenze wird dabei vom Forschungsbeirat als nicht ausreichend konservativ angesehen. Vielmehr wird empfohlen, bereits ab 10 % der unteren Explosionsgrenze des Gases ein explosionsfähiges hybrides Gemisch vorzusetzen, wenn keine fundierten Erkenntnisse vorliegen.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen auch, dass nach wie vor Forschungsbedarf besteht, das Verhalten sicherheitstechnischer Kenngrößen von Stäuben außerhalb atmosphärischer Bedingungen näher zu untersuchen. In Zukunft gilt es zu untersuchen, inwieweit sich die Kenngrößen von Metallstäuben verändern und ab welchen Brenngaskonzentration mit einem explosionsfähigen hybriden Gemisch zu rechnen ist. Insbesondere bei der Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeiten für hybride Gemische sollte der Einfluss der Turbulenz näher untersucht werden, da zu erwarten ist, dass dadurch die Dimensionierung konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen maßgeblich beeinflusst wird.

6. Literaturangaben

- [1] M. Beck, U. Hesener und B. Kampe, „Das Verhalten sicherheitstechnischer Kenngrößen von Stäuben untern nicht-atmosphärischen Bedingungen,“ Bochum, 2014.
- [2] M. Beck und U. Hesener , „Forschungsbericht: Sicherheitstechnische Kenngrößen von hybriden Gemischen,“ 31.03.2016.
- [3] C. Lohrer, M. Schmidt und U. Krause, „Self-ignition of dust at reduced volume fractions of ambient oxygen,“ *Journal of Loss Prevention in the process industries*, Nr. 16, pp. 141-147, 2003.
- [4] M. Schmidt, M. Malow, Lohrer Christian und U. Krause, „Selbstentzündung von Stäuben bei vermindertem Sauerstoffgehalt,“ *Chemie Ingenieur Technik*, Nr. 74, pp. 1735-1737, 2002.
- [5] M. Glor und K. Schwenzfeuer, „Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Mindestzündenergie von Stäuben,“ *VDI Berichte*, Nr. 1272, pp. 119-134, 1996.
- [6] T. Glarner, Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube, Dissertation ETH Zürich, 1983.
- [7] VDI Richtlinie 2263 Blatt 5, „Staubbrände und Staubexplosionen Gefahren-Beurteilung- Schutzmaßnahmen Explosionsschutz bei Wirbelschichttrocknern,“ 2005.
- [8] S. Puttick und H. Gibbon, „Solvents in powder,“ *Symposium series*, Nr. 150, 2004.
- [9] G. Pellmont, Explosion- und Zündverhalten von hybriden Gemischen aus brennbaren Stäuben und Brenngasen, Dissertation, ETH Zürich, 1979.

Explosionseigenschaften dreiphasiger hybrider Gemische

Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Krause**, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg

Kurzfassung

Es wurde eine experimentelle Studie zu den Explosionseigenschaften von Gemischen aus brennbaren Stäuben, brennbaren Gasen und Sprays brennbarer Flüssigkeiten mit Luft unternommen. Solche Gemische treten z.B. in Extraktionsprozessen, bei der Reinigung von Metalloberflächen und in anderen industriellen Anwendungen auf. Standard-Versuchsapparaturen für brennbare Stäube wie die 20-Liter-Apparatur und der Godbert-Greenwald-Ofen wurden so modifiziert, dass Sprays sowie Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten zugeführt werden konnten bei gleichzeitiger weitgehender Beibehaltung des standardisierten Versuchsablaufs.

Als brennbare Stäube wurden Lycopodium und Braunkohle, als brennbare Gase Methan und Wasserstoff und als brennbare Flüssigkeiten Isopropanol und Azeton verwendet.

Eingehend berücksichtigt wurde die Bestimmung der unteren Explosionsgrenzen. Es zeigte sich, dass auch die Dreiphasen-Gemische bei Konzentrationen unterhalb der individuellen unteren Explosionsgrenzen gezündet werden konnten. Jedoch wurden auch Zusammensetzungen gefunden, bei denen eine Zündung nicht möglich war.

Die Daten wurden anhand einer neuen Art von Dreiecks-Diagrammen ausgewertet. Der Unterschied zu den bekannten Dreiecksdiagrammen zur Darstellung von Explosionsbereichen gasförmiger Stoffgemische besteht darin, dass die hier vorgeschlagenen nur den Bereich unterhalb der jeweiligen unteren Explosionsgrenzen erfassen und damit deutlicher den Effekt hybrider Gemische darstellen.

Abstract

An experimental study was performed on the explosion properties of mixtures of flammable dusts, flammable gases and sprays of flammable liquids together with air. Such mixtures occur e.g. in extraction processes, metal cleaning and other industrial applications. Existing standard test equipment for explosion characteristics of dusts like the 20-Litres explosion sphere and the Godbert-Greenwald furnace were modified to allow the injection of the spray

or vapour while the experimental procedure was kept as close as possible to the standard test.

Lycopodium and lignite coal dust were chosen as solid components, methane and hydrogen as gases and isopropanol and acetone as solvents.

Special emphasis was given to the determination of lower explosion limits. It could be shown that the mixtures could be ignited at compositions of the three flammable components below their individual lower explosion limits. However, ranges of concentrations were also found where an ignition was not possible.

The data were evaluated by creating a new kind of triangle diagrams in a form similar to the ones used to display explosible ranges of single-phase (gas) mixtures. The main difference lies in that the new diagrams display only the concentration range below the lower explosion limits of the individual substances, thus indicating the effect of hybrid mixing on the explosible range.

1. Einleitung

Als hybride Gemische wurden bisher vorwiegend solche mit gasförmigen und festen Brennstoffkomponenten untersucht [1], [2], [3]. Den Anlass erster Untersuchungen bildeten Schlagwetter im Kohlebergbau, bei denen Grubengas (vorwiegend Methan) und aufgewirbelter Kohlenstaub die Brennstoffkomponenten bilden [4]. Weitere hybride Gemische werden z.B. durch technische Stäube und Lösemitteldämpfe oder Nahrungsmittelstäube und Extraktionsmittel gebildet.

Seit langem ist bekannt, dass hybride Gemische, insbesondere solche aus brennbarem Gas und Staub, auch dann explosionsfähig sind, wenn die einzelnen Phasen in Konzentrationen unterhalb ihrer jeweiligen Explosionsgrenzen vorliegen [2]. Der vorliegende Beitrag nimmt diese Erkenntnis auf und erweitert sie um den Fall, dass zusätzlich zum Staub und zum Gas noch Sprays oder Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten vorliegen.

Zwei Arten von Versuchen wurden unternommen:

- Explosionsversuche in der 20-Liter-Explosionsapparatur entsprechend der DIN EN 14034-1 [5]. Aus diesen Versuchen wurden die unteren Explosionsgrenzen, die Explosionsüberdrücke und die zeitlichen Druckanstiege abgeleitet.
- Explosionsversuche in der Godbert-Greenwald-Apparatur (GG-Apparatur) nach der Norm DIN EN 50281-2-1 [6] zur Bestimmung der Mindestzündtemperatur der explosionsfähigen Gemische. In diesen Versuchen wurden Gemische aus brennbaren Stäuben, brennbaren Gasen und Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten verwendet.

Streng genommen handelte es sich nur bei den in der 20-Liter-Apparatur verwendeten Gemischen um echte Dreiphasen-Gemische, während die in der GG-Apparatur verwendeten Zwei-Phasen/Drei-Komponenten-Gemische waren.

2. Versuchsaufbauten und -durchführung

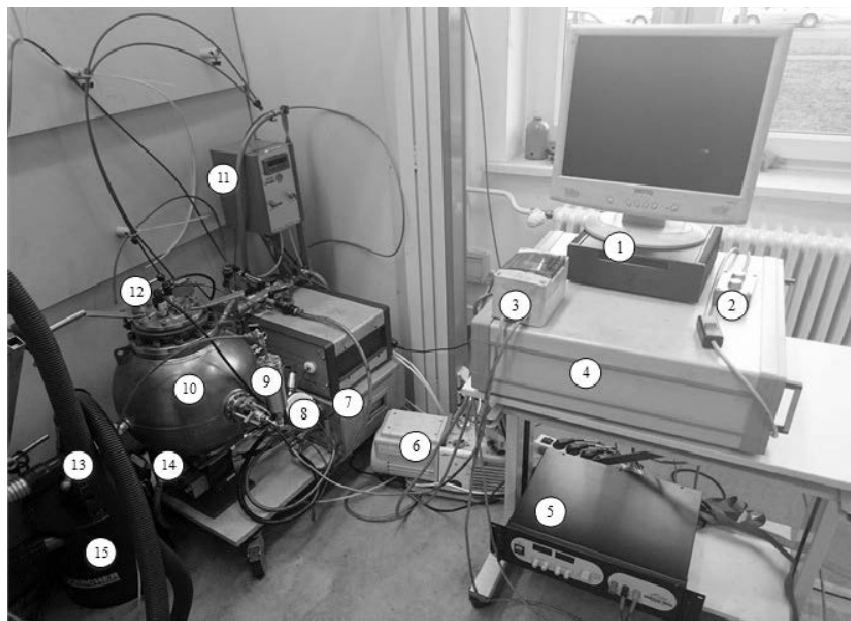
Beide verwendeten Versuchsaapparaturen mussten für die Zwecke der hier dargestellten Untersuchungen modifiziert werden. Ausführlich beschrieben sind diese Modifikationen in [7]. Die 20-Liter-Apparatur wurde zusätzlich zu der bestehenden Ausstattung mit einem System zur Spray-Eindüsung versehen. Dieses bestand aus einem Flüssigkeitsbehälter mit 300 ml Volumen, einer Einspritzdüse, wie sie auch zur Injektion in Verbrennungsmotoren verwendet wird und einer Steuereinheit für die Einspritzdauer. Der Aufbau ist in Bild 1 dargestellt.

Im Vergleich zum normgemäßen Versuchsablauf wurde dieser folgendermaßen modifiziert:

Die Evakuierung vor dem Eindüsen des Sprays sowie dem Einblasen des Staubes musste auf ein niedrigeres Niveau erfolgen (350 bis 380 mbar, je nach gewünschtem Brenngasanteil), um vor Aktivierung der Zündung einen Anfangsdruck von 1,0 bar zu gewährleisten. Anschließend erfolgte die Zugabe des Brenngases und dann des Sprays. Zuletzt wurde nach dem üblichen Staubverteilungsverfahren der Staub eingeblasen. Die Zündenergie von 2 kJ sowie die Zündverzögerungszeit von 60 ms wurden entsprechend dem Standardverfahren beibehalten. Dabei wurde unterstellt, dass die Sprayinjektion nicht zur merklichen Änderung der Turbulenzintensität im Moment der Zündung führte, weil der Strömungsimpuls der Staubeinblasung wesentlich stärker als der der Sprayinjektion war.

Zur Beurteilung, ob eine Zündung stattgefunden hat, wurde das Druckschwellenkriterium ($\Delta p_{\text{ex}} \geq 0,5$ bar über der durch die Zünder erzeugten Druckerhöhung) angewendet.

Für die zweite Versuchsserie wurde der GG-Ofen so modifiziert, dass in die Gaszuführungsleitung zwischen Gasvorratsbehälter und Staubprobenbehälter ein Flüssigkeitsreservoir von 100 ml Fassungsvermögen eingefügt wurde. Dieses war mit einer Heizung ummantelt, um die brennbare Flüssigkeit zu verdampfen. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2 gezeigt. Im Unterschied zur Standard-GG-Apparatur hatte der hier verwendete die doppelte Länge. In der Tendenz führt dies für Staub/Luft-Gemische zu geringfügig niedrigeren Mindestzündtemperaturen infolge der längeren Kontaktzeit bzw. häufigeren Kollisionen zwischen Partikeln und erhitzter Oberfläche.



- | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------|
| ① Data processing unit | ⑥ Vacuum pump | ⑪ Gas mixing unit |
| ② Air inlet unit | ⑦ Control system | ⑫ Safety valve |
| ③ Time controller for spray input | ⑧ Dust storage container | ⑬ Baller valve |
| ④ KIEP 310 | ⑨ Liquid chamber | ⑭ Water inlet |
| ⑤ Nozzle voltage regulator | ⑩ 20 liter vessel | ⑮ Dust cleaner |

Bild 1: Modifizierte 20 l-Explosions-Apparatur für die Bestimmung der Explosions-eigenschaften von Drei-Phasen-Brennstoff/Luft-Gemischen

Der Versuchsablauf wurde so vorgenommen, dass die vorgelegte Menge an brennbarer Flüssigkeit bei vollständiger Verdampfung der gewünschten Konzentration im Brenngas/Dampf/Staub-Luft-Gemisch ergab. Die gezeigten Absperrventile in der Zuführungsleitung wurden gleichzeitig betätigt, so dass das gewünschte Gasgemisch mit dem Dampf der brennbaren Flüssigkeit und der Staubprobe synchron in die GG-Apparatur eingetragen wurden. Einzelheiten zu Versuchsaufbau und -ablauf können [7] entnommen werden.

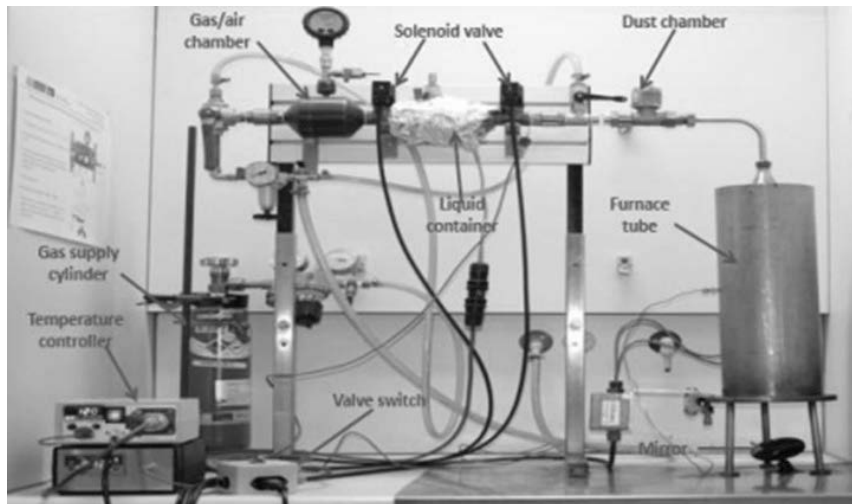


Bild 2: Godbert-Greenwald-Apparatur zur Bestimmung der Mindestzündtemperatur hybrider Gemische, Modifikationen: doppelte Länge und zusätzliches Flüssigkeitsreservoir

3. Experimentelle Ergebnisse

3.1 Explosionsüberdruck, zeitlicher Druckanstieg und untere Explosionsgrenze

Ergebnisse aus Explosionsversuchen in der 20-Liter-Apparatur mit zweiphasigen hybriden Gemischen (Gas/Staub und Gas/Spray) wurden in [7] und [8] berichtet. Für dreiphasige Gemische aus Methan, Isopropanol und Lycopodium sind die Abhängigkeiten des Explosionsüberdruckes und des zeitlichen Druckanstieges von der Staubkonzentration für verschiedene Beimengungen der anderen Komponenten in Bild 3 dargestellt.

Erwartungsgemäß verschiebt sich der zündfähige Konzentrationsbereich durch Beimengung der gasförmigen und der flüssigen Komponenten zu kleineren Staubkonzentrationen, wobei sowohl Brenngas als auch Spray unterhalb ihrer eigenen unteren Explosionsgrenze zugegeben wurden (4,2 % Volumen für Methan, 100 g/m³ für Isopropanol als Spray).

Der Einfluss der Beimischung der gasförmigen und der flüssigen Komponente auf den maximalen Explosionsüberdruck ist geringfügig. Das lässt sich damit erklären, dass sich der gesamte Energieumsatz in der Reaktion unter Annahme näherungsweise adiabater Verhält-

nisse nur wenig ändert. Für den Explosionsdruck gilt die aus einer Energiebilanz, unter Annahme einer isochoren (im konstanten Volumen ablaufenden) Zustandsänderung abgeleitete Beziehung

$$p_{ex} = p_0 \left[1 + \frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n \left(\varphi_i \frac{\Delta h_{R,i}}{M_i c_{p,i}} \right) \right] \quad (1)$$

Der unter dem Summenzeichen stehende Quotient aus molarer Reaktionsenthalpie und dem Produkt aus molarer Masse und spezifischer Wärmekapazität ist für Kohlenwasserstoffe nur wenig unterschiedlich.

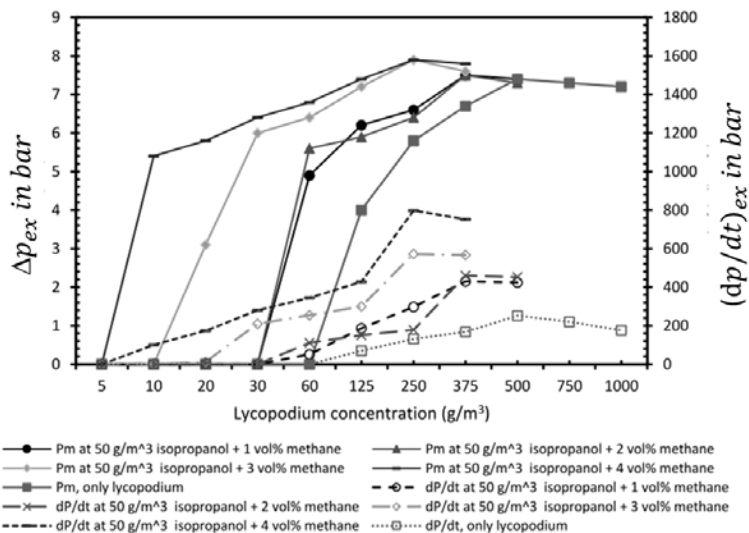


Bild 3: Explosionsüberdruck und zeitlicher Druckanstieg für Explosionen von Dreiphasen-Gemischen aus Lykpodiumstaub, Methan und Isopropanol in verschiedener Zusammensetzung

Es ergibt sich damit eine Abhängigkeit des Explosionsdruckes nur von den molaren Fraktionen der Brennstoffkomponenten, was zur in Bild 3 gezeigten Verschiebung der Maxima mit der Staubkonzentration, aber nur zu einer geringfügigen Änderung in der Höhe der Maxima führt.

Jedoch beeinflusst die Zugabe des Methan sowie des Spray von Isopropanol signifikant den zeitlichen Druckanstieg. Hier zeigte sich eine Steigerung des $(dp/dt)_{\max}$ -Wertes um etwa das

Vierfache für die Beimischung von 50g/m³ Isopropanolspray und 4 % Volumen von Methan verglichen mit dem für das Staub/Luft-Gemisch.

(Anmerkung: Die dargestellten Werte für dp/dt dienen nur dem Auffinden des Trends und dem Vergleich untereinander, da nicht die normgemäße Zündenergie von 10 kJ für die Bestimmung von dp/dt verwendet wurde).

Durch systematische Variation der Zusammensetzung des Dreiphasen-Dreikomponenten-Gemisches wurden Zustände gefunden, in denen keine Zündung beobachtet wurde. Trägt man diese Ergebnisse in ein Dreiecksdiagramm ein, in dem die Eckpunkte durch die jeweiligen unteren Explosionsgrenzen der einzelnen Komponenten gebildet werden, lässt sich der durch die Beimischung zusätzlich entstehende Explosionsbereich der Dreiphasengemische abbilden. Die Achseneinteilung bezieht sich auf Prozent der jeweiligen UEG.

Definitionsgemäß sollen die Eckpunkte des Dreiecks zum Bereich „Zündung“ gehören, denn sie bilden die jeweiligen unteren Explosionsgrenzen der drei Komponenten ab (auch wenn die Definitionen der UEG für Gase, DIN EN 1839, und für Stäube, DIN EN 14034-3, hier unterschiedliche Interpretationen enthalten).

Auch wenn für die gezeigten Stoffsysteme diese Explosionsbereiche der hybriden Gemische unterschiedlich ausgeprägt sind, zeigt sich ein nicht zündfähiger Bereich bei geringen Konzentrationen an Brenngas bei gleichzeitig relativ hohen Konzentrationen an Spray und geringen bis mittleren Konzentrationen an Staub.

Im System Braunkohlenstaub/Wasserstoff/Ethanol ergab sich noch ein nicht-zündfähiger Bereich bei Brenngaskonzentrationen zwischen 50 und 70 % der UEG, einer Staubkonzentration von 90 % der UEG und moderaten Konzentrationen des Sprays (30 bis 50 % der UEG).

Generell ergab sich eine beträchtliche Erweiterung des Explosionsbereiches für die untersuchten hybriden Dreiphasen-Gemische. Neben den hier vorgestellten wurden in [7] noch Lycopodium/Methan/Ethanol, Lycopodium/Wasserstoff/Ethanol, Lycopodium/Wasserstoff/Isopropanol, Braunkohle/Wasserstoff/Isopropanol, Braunkohle/Methan/Ethanol und Braunkohle/Methan/Isopropanol untersucht.

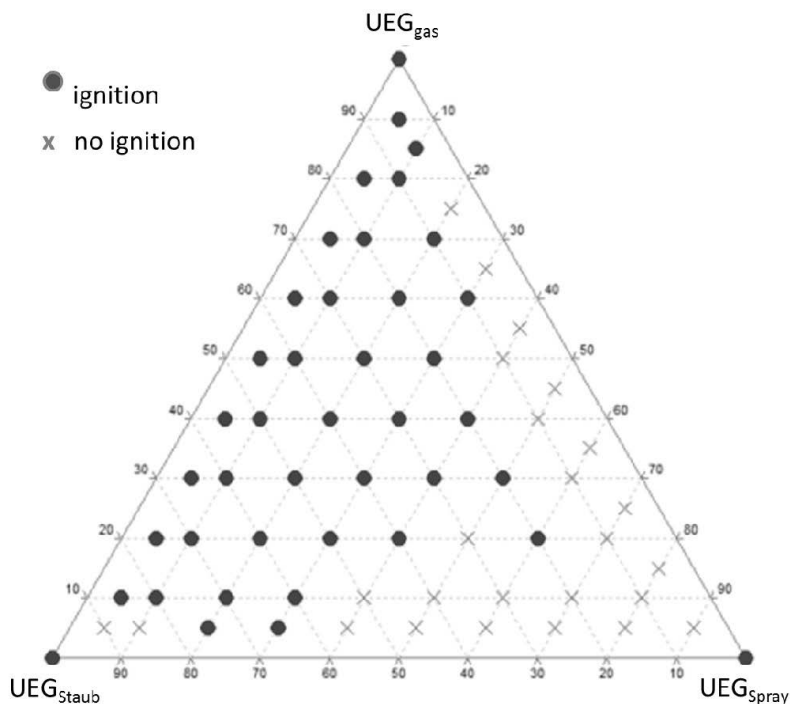


Bild 4: Darstellung des Explosionsbereiches hybrider Dreiphasen/Dreikomponenten-Gemische für das System Lycopodiumstaub/Methan/Isopropanol

3.2 Mindestzündtemperatur

Die Mindestzündtemperatur kennzeichnet die niedrigste Temperatur einer erhitzten Oberfläche, an der sich ein Gas/Luft-Gemisch (DIN EN 14552) bzw. ein Staub/Luft-Gemisch (DIN EN 50281-2-1) entzündet. Die Versuchsanordnung nach DIN EN 14522 ist ein beheizter Erlenmeyer-Kolben mit 200 ml Volumen. Für die Untersuchung von hybriden Gemischen ist diese Anordnung ungeeignet, da keine Möglichkeit besteht, Staubteilchen darin zu dispergieren. Jedoch kann die für Stäube genormte Apparatur nach DIN EN 50281-2-1 verhältnismäßig einfach mit einem wählbaren Anteil Brenngas gespült werden, wodurch sich hybride Gemische untersuchen lassen.

In einem ersten Untersuchungsschritt konnte gezeigt werden, dass für Brenngas/Luft-Gemische die Mindestzündtemperaturen in der modifizierten GG-Apparatur Übereinstimmung mit denen aus der genormten Apparatur innerhalb der experimentellen Unsicherheit zeigten [9].

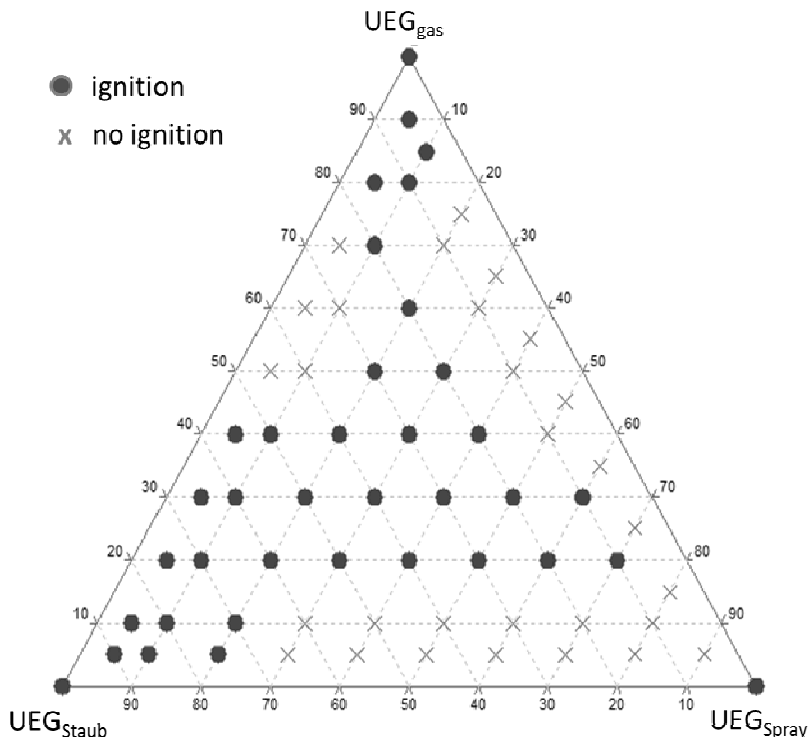


Bild 4: Darstellung des Explosionsbereiches hybrider Dreiphasen/Dreikomponenten-Gemische für das System Braunkohlenstaub/Wasserstoff/Ethanol

In Tabelle 1 sind zunächst die unteren Explosionsgrenzen der brennbaren Gase bzw. Stäube in Luft nach den Standardverfahren (nicht als hybride Gemische) dargestellt. In den Versuchen wurde zunächst nach der Konzentration des brennbaren Gases gesucht, bei der die Mindestzündtemperatur gemessen wurde. Dann wurden die jeweiligen brennbaren Stäube in Konzentrationen unterhalb ihrer UEG hinzugegeben und dieser Einfluss auf die Mindestzündtemperatur bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Nicht für alle Gase ist

der Einfluss der Beimengung von Staub ausgeprägt. bei Propan bewirkte die Zugabe von Staub nur eine Verringerung der Mindestzündtemperatur von etwa 20 K. Für Toluoldampf hingegen ergab sich eine Verminderung von bis zu 70 K, in diesem Fall durch Zugabe von Holzstaub. Für Methan ließ sich die Mindestzündtemperatur von 600 °C durch Zugabe von 30 g/m³ Tonerpulver auf 530 °C senken.

Für Hexan liegt die Mindestzündtemperatur des Dampfes bei lediglich 240 °C. Die Zugabe der verschiedenen Staubproben zeigte hier keinen messbaren Effekt.

Tabelle 1: Untere Explosionsgrenzen der verwendeten Gase und Stäube

Brenngas/Dampf	UEG (% Vol.)	Staub	UEG (g/m ³)
Methan	4.0	Maisstärke	145
Propan	2.0	Lycopodium	108
Wasserstoff	5.0	Holzstaub	217
Toluol	1.1	Toner	87
Ethanol	3.0	CN4 (Steinkohle)	304
Isopropanol	2.0	HD-PE	174
Hexan	1.6		

Durch zusätzliche Beimischung einer dritten Komponente, z.B. des Dampfes einer brennbaren Flüssigkeit, konnte keine wesentliche weitere Absenkung der Mindestzündtemperaturen der Gemische erreicht werden. Entsprechende Ergebnisse sind in Tabelle 2 für Dreikomponentengemische mit der „Leitkomponente“ Gas dargestellt.

Ebenfalls nur geringe Änderungen der Mindestzündtemperatur der Stäube ergaben sich durch Beimischung von brennbaren Gasen sowie in der Kombination brennbarer Gase und Dämpfe. Signifikant geringere Mindestzündtemperaturen, d.h. über die Messunsicherheit hinausgehend, ergaben sich lediglich durch Beimischung von Hexan. Erklärt werden kann dies damit, dass die Mindestzündtemperatur des Hexandampfes nur bei 240 °C und damit deutlich niedriger als für die anderen verwendeten Gase und Dämpfe liegt.

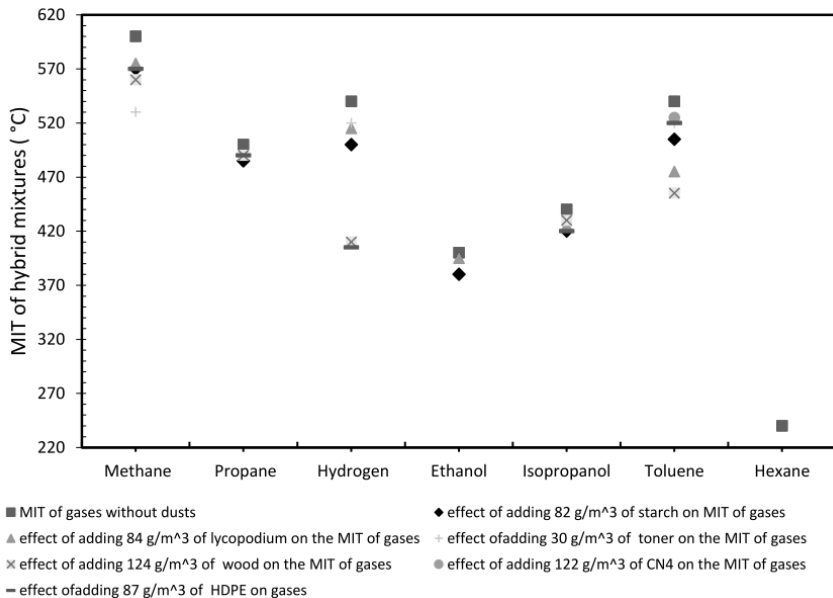


Bild 5: Einfluss der Beimengung von Staub auf die Mindestzündtemperatur von Gasen und Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten (GG-Ofen) [9]

4. Zusammenfassung

Hybride Dreiphasengemische zeigen einen sehr weiten zusätzlichen Explosionsbereich und nur einen relativ kleinen Bereich der Zusammensetzung, in denen keine Zündung zu erreichen ist. Letztere liegen vorwiegend bei kleinen Staubkonzentrationen längs verhältnismäßig hoher Brenngas- und Spraykonzentrationen, wobei sich natürlich alle Konzentrationen der Einzelkomponenten noch unterhalb ihrer jeweiligen individuellen UEG befinden.

Die Bereiche der „Nicht-Zündung“ sind für die verschiedenen Dreiphasengemische unterschiedlich ausgeprägt.

In Bezug auf den maximalen Explosionsdruck ergaben sich für die hybriden Gemische nur geringe Abweichungen von den Explosionsdrücken der Einzelkomponenten, wobei natürlich eine Verschiebung der Konzentration eintrat, für die p_{\max} beobachtet wurde. Der maximale zeitliche Druckanstieg erhöhte sich durch Beimischung einer zweiten bzw. dritten Komponente signifikant.

Weniger ausgeprägt zeigte sich der Einfluss der Beimischung einer zweiten und dritten Komponente zu den brennbaren Stäuben bei der Mindestzündenergie. Lediglich für den Fall, dass Hexan zugemischt wurde ergaben sich um etwa 20 K geringere Mindestzündtemperaturen als für den Staub allein. Wurde die Mindestzündtemperatur der Gase und Dämpfe betrachtet, wirkte sich die Zumischung von Staub stärker aus. Hier wurden Verminderungen der Mindestzündtemperatur von bis zu 70 K beobachtet.

Tabelle 2: Mindestzündtemperaturen hybrider Zwei- und Dreikomponenten-Gemische (Leitkomponente Brenngas) [7]

Gases	MIT of only gases	admixture of 0.8 vol% hexane on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE and 0.8 vol% hexane on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium and 0.8 vol% hexane on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch and 0.8 vol% hexane on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner and 0.8 vol% hexane on the MIT of gases
Methane	600	465	570	470	575	480	585	470	530	480
Propane	500	470	490	470	500	480	485	470	490	480
Hydrogen	540	530	510	490	515	500	505	495	540	515

Gases	MIT of only gases	admixture of 1.0 vol% isopropanol on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of gases
Methane	600	515	570	500	575	515	585	530	530	450
Propane	500	490	490	470	500	480	485	480	490	490
Hydrogen	540	530	510	500	515	515	505	495	540	520

Gases	MIT of only gases	admixture of 1.8 vol% ethanol on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE and 1.8 vol% ethanol on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium and 1.8 vol% ethanol on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch and 1.8 vol% ethanol on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner and 1.8 vol% ethanol on the MIT of gases
Methane	600	510	570	470	575	490	585	490	590	510
Propane	500	445	490	445	500	440	485	430	490	445
Hydrogen	540	525	510	495	515	505	505	495	540	515

Gases	MIT of only gases	admixture of 0.6 vol% toluene on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE on the MIT of gases	admixture of 87 g/m ³ HDPE and 0.6 vol% toluene on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium on the MIT of gases	admixture of 84 g/m ³ lycopodium and 0.6 vol% toluene on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch on the MIT of gases	admixture of 82 g/m ³ starch and 0.6 vol% toluene on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner on the MIT of gases	admixture of 30 g/m ³ toner and 0.6 vol% toluene on the MIT of gases
Methane	600	510	570	480	575	520	585	540	590	550
Propane	500	465	490	465	500	465	485	445	490	455
Hydrogen	540	540	510	510	515	515	505	505	540	540

Tabelle 3: Mindestzündtemperaturen hybrider Zwei- und Dreikomponenten-Gemische
(Leitkomponente Staub) [7]

Dust	MIT of only dusts	admixture of 0.8 vol% hexane on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane and 0.8 vol% hexane on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane and 0.8 vol% hexane on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen and 0.8 vol% hexane on the MIT of dusts
HDPE	340	325	340	325	340	320	340	300
Lycopodium	410	385	410	385	410	385	410	390
Starch	370	365	370	360	370	355	370	370
Toner	460	430	460	430	460	420	460	440

Dust	MIT of only dusts	admixture of 1.0 vol% isopropanol on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen and 1.0 vol% isopropanol on the MIT of dusts
HDPE	340	340	340	340	340	340	340	340
Lycopodium	410	410	410	410	410	410	410	410
Starch	370	370	370	370	370	370	370	370
Toner	460	445	460	445	460	435	460	440

Dust	MIT of only dusts	admixture of 1.8 vol% ethanol on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane and 1.8 vol% ethanol on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane and 1.8 vol% ethanol on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen and 1.8 vol% ethanol on the MIT of dusts
HDPE	340	340	340	340	340	340	340	340
Lycopodium	410	385	410	385	410	375	410	410
Starch	370	370	370	370	370	370	370	380
Toner	460	450	460	440	460	430	460	435

Dusts	MIT of only dusts	admixture of 0.6 vol% toluene on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane on the MIT of dusts	admixture of 2.0 vol% methane and 0.6 vol% toluene on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane on the MIT of dusts	admixture of 1.0 vol% propane and 0.6 vol% toluene on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen on the MIT of dusts	admixture of 3.0 vol% hydrogen and 0.6 vol% toluene on the MIT of dusts
HDPE	340	340	340	340	340	340	340	340
Lycopodium	410	410	410	410	410	410	410	410
Starch	370	370	370	370	370	370	370	370
Toner	460	460	460	460	460	450	460	460

Literatur:

- [1] Eckhoff R., Dust Explosions in the Process Industries, 3rd ed. Gulf Professional Publishing, Elsevier Science, (2003), pp. 25–141, 251–424.
- [2] Bartknecht W., Explosionsschutz, Springer Verlag, 1993, (in German)
- [3] Amyotte P., an Introduction to Dust Explosions: Understanding the Myths and Realities of Dust Explosions for a Safer Workplace. Elsevier, (2013), p. 46.
- [4] Humboldt F., Über die unterirdischen Gasarten und die Mittel, ihren Nachtheil zu vermeiden, Friedrich Vieweg, Braunschweig, 1799
- [5] DIN EN 14034-1:2004+A1:2011, Bestimmung der Explosionskenngößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{ax} von Staub/Luft-Gemischen; Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [6] DIN EN 50281-2-1:1999-11; Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub - Teil 2-1: Untersuchungsverfahren; Verfahren zur Bestimmung der Mindestzündtemperatur von Staub; Deutsche Fassung EN 50281-2-1:1998 + Corrigendum 1999
- [7] Addai E., Investigation of Explosion Characteristics of Multiphase Fuel Mixtures with Air, Dissertationsschrift, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016; urn:nbn:de:gbv:ma9:1-8351
- [8] Addai E., Gabel D., Krause U., Explosion characteristics of three-component hybrid mixtures, Proc. Safety Environ. Protection 98 (2015), 72-81, doi: 10.1016/j.psep.2015.06.013
- [9] Addai E.K., Gabel D., Haider A., Krause U., Minimum Ignition Temperature of Dusts, Gases, and Solvents Hybrid Mixtures, Combustion Science and Technology, Volume 188, 2016 - Issue 11-12, <http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2016.1211447>

Brennbarer Staub im quasi-stationären Zustand Auftreten – Ausmaß – Beurteilung

Dr.-Ing. **Alexey Leksin**, Prof. Dr.-Ing. **Uli Barth**,
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik,
Lehrstuhl Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung,
Bergische Universität Wuppertal, Deutschland

Kurzfassung

Im VDI-Bericht 2225 wurde 2014 das Ab-/Brandverhalten von Stäuben in Fließbetten, mit dem Resultat der möglichen Erhöhung der Brennzahl, vorgestellt. Die Autoren berichteten über eine für Fließbette modifizierte Prüfapparatur und die damit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Brennfähigkeit von Stäuben im quasi-stationären Zustand. Da die erlangten Forschungsergebnisse im Kontext zu den sicherheitstechnischen Kenngrößen von grundlegender Bedeutung für die betriebspraktische Durchführung der Brandgefährdungsbeurteilung sind, ist das Thema „quasi-stationärer Zustand“ in der aktualisierten VDI-Richtlinie 2263 berücksichtigt. Vorgesehen ist eine detaillierte Beschreibung der modifizierten Prüfapparatur und des Prüfverfahrens in der novellierten VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1. M.a.W., es ist eine Untersuchungsmethode zur Ermittlung einer neuen sicherheitstechnischen Kenngröße, der s.g. Brandverhaltenszahl im quasi-stationären Zustand (BVZ_{qs}) entwickelt worden, da sich das Ab-/Brandverhalten in der modifizierten Prüfapparatur nicht zweckmäßig mit den genormten Brennzahl-Definitionen beschreiben lässt. Ziel ist es, eine Bemessungsgrundlage zu schaffen mit der Betreiber bei bestimmten verfahrenstechnischen Prozessen bzw. Anlagen solche quasi-stationäre Zustände erkennen, entsprechend bewerten und geeignete Schutzmaßnahmen ableiten können. Im Folgenden berichten die Autoren über die zukünftige prüftechnische Bestimmbarkeit der Brandverhaltenszahl im quasi-stationären Zustand, sowie der Festlegung des Prüfverfahrens und der modifizierten Prüfapparatur.

Abstract

A description about the combustion behavior for dust in fluid beds with the result of an possible increase of the so-called combustible index was published in the VDI-Report 2225 in 2014. The authors reported about a modified burning test instrument for fluid beds and the experiments for the examination of the combustibility in the quasi-stationary state. Since the gained research results in the context to the safety characteristic of dusts are of fundamental

importance for the operational practice of the fire hazard assessment, the topic “quasi-stationary state“ in the updated VDI-Guideline 2263 deserves particularly mentioning. A detailed description of the modified burning test instrument and the test procedure is provided in the reworked VDI-Guideline 2263 Blatt 1. In other words a test method for the determination of a new safety characteristic of dust, the so-called “Brandverhaltenszahl“ in quasi-stationary state (BVZ_{qs}) is developed, because the combustion behavior in the modified burning test instrument for fluid beds cannot be described with the standardized combustion index definitions. The aim is to provide a basis of assessment for the user to recognize the quasi-stationary state in certain technical processes and plants which can be evaluate to take appropriate protective measures. In the following, the authors report about the future test-technical determinability of the combustion behavior in the quasi-stationary state, as well as the determination of the test method and the modified burning test instrument.

Auftreten

Der Begriff *fluidized bed* (englisch) oder Fließbett (auch Wirbelbett oder Wirbelschicht genannt) stammt aus dem Bereich der Wirbelschichttechnik für die industrielle Anwendung im Jahre 1922. Fließbette, in denen brennbare Stäube in einem quasi-stationären Zustand vorliegen, finden heutzutage in vielen Bereichen der Wirtschaft und der Verfahrenstechnik breite Anwendung. Aus Sicht des verfahrenstechnischen Prozesses umfassen die Wärme- und Stoffübertragungsprozesse die Trocknung feuchter Schüttgüter (Granulate, Agglomerate, Kristalle, Pulver) sowie deren alternativen Kühlung, als auch sämtliche Mehrphasenprozesse wie Röstung, Kalzinierung, Agglomeration, Aufbau-Granulierung oder auch Des-Agglomeration bis hin zur Beschichtung und Befeuchtung in Form einer Sprühgranulation und Coating. Der brennbare Staub tritt dabei als quasi-stationäre/s Wirbelschicht oder –bett auf. Dieser quasi-stationäre oder fluiddynamische Zustand kann als weitere Form zwischen der abgelagerten ruhenden Staubschicht und dem dynamischen Staubgemisch gesehen werden. Verfahrenstechnisch wird der Zustand beispielsweise dadurch erreicht, dass die Staubpartikel einer ruhenden Schüttung angeströmt (mit einer s.g. Lockerungsgeschwindigkeit), in den Schwebezustand gebracht werden und dann in diesem Zustand gehalten werden. Dieser Zustand wird als Fluidisierung bezeichnet. Zwei Phasen (Feststoff – Fluid) sind bei diesem Prozess beteiligt. Das entstandene Fließbett verhält sich thermodynamisch und strömungstechnisch analog wie eine Flüssigkeit. Infolge der großen Kontaktfläche zwischen den beiden Phasen werden Wärme- und Stofftransportprozesse zwischen den Staubpartikeln und Fluid sowie zwischen den Partikeln untereinander begünstigt.

Einige Prozessbeispiele in denen brennbarer Staub in einem quasi-stationären Zustand vorliegt, sind:

- ✓ Pharmazeutische Industrie mit Anwendung der Wirbelschichttrockner
- ✓ Agrarwirtschaft mit Anwendung von Kombination der Wirbelschicht-Agglomeration und Wirbelschicht-Sprühgranulations-Trocknung bei der Herstellung von Agrochemikalien
- ✓ Nahrungsmittelindustrie im Bereich der Herstellung von Trockenmilchpulvern, der Zuckerindustrie usw.
- ✓ Chemische Industrie, bei der Trocknung von in wassergelösten Polymeren (mit teilweise internen) und extern liegenden Fließbetten.

Im VDI-Bericht 2225 [1] wurde 2014 das Ab-/Brandverhalten von Stäuben im quasi-stationären Zustand vorgestellt. Die Intention der Untersuchungen kann auf zwei auslösende Gründe zurückgeführt werden. Zum einen ist das, im Rahmen der Erarbeitung der VDI-Richtlinie 2263 Blatt 7 und 7.1, identifizierte Wissensdefizit über die Brandgefahr in Fließbetten, besonders bei der Diskussion des damaligen Richtlinienarbeitskreises im Rahmen des benannten Defizits bei der Zoneneinteilung im Inneren von Fließbetten. Zum anderen ist das tatsächliche Auftreten von Bränden in industriellen Fließbetten. Ein Beispiel für derartige Schadensereignisse ist eine Staubexplosion im extern liegenden Fließbett während der Inbetriebnahme der Sprühtrocknungsanlage bei der Firma „Fuda und Serrahn“ [2]. Somit ist in diesem Zusammenhang nicht nur von einem theoretisch denkbaren oder möglichen Ereignis die Rede, sondern vielmehr von der Wahrscheinlichkeit solcher Brandereignisse.

Ausmaß

Ein systematischer Beurteilungsprozess im betrieblichen Explosions- und Brandschutz beginnt grundsätzlich mit der Ermittlung bestimmter sicherheitstechnischer Kenngrößen. Zur Ermittlung dieser Kenngrößen im Rahmen der Beurteilung des Vorhandenseins brennbarer Stoffe, wird als primärer Schritt zum Erkennen und Vermeiden von Explosions- und Brandgefahren, die sog. Brennzahl bestimmt. Im Hinblick auf einen quasi-stationären Zustand konfrontiert sich der Praktiker mit der Frage das Ab-/Brandverhalten seines Staubes in möglichst objektiver und auch für Dritte nachvollziehbarer Weise zu beurteilen, um daraus mögliche potenzielle Risiken zu erkennen.

In vorherigen Publikationen [1, 3] waren die vorgestellten Ergebnisse zu der Untersuchung des Ab-/Brandverhaltens im quasi-stationären Zustand mit der sicherheitstechnischen Kenn-

größe Brennzahl bewertet. Weitere labormaßstäbliche Untersuchungen und die Grundlagenforschung zum Ab-/Brandverhalten in Fließbetten führte zu dem Beschluss, dass sich diese mit den genormten Brennzahldefinitionen nach Richtlinie VDI 2263 Blatt 1 [4] nicht zweckmäßig beschreiben lassen. Daher wurde von Seite der beiden Autoren eine neue sicherheitstechnische Kenngröße die Brandverhaltenszahl im quasi-stationären Zustand (BVZ_{qs}) definiert. Eine Gegenüberstellung bzw. Vergleich zwischen den definierten BVZ_{qs} - Werten und den standardisierten Brennzahlwerten (BZ) ist im Bild 1 zu entnehmen.

Art der Reaktion bei Bestimmung der Brennzahl		Art der Reaktion bei Bestimmung der Brandverhaltenszahl	
	BZ		BVZ_{qs}
Kein Anbrennen	1	I	Kein Ab-/Brennen
Kurzes Entzünden und rasches Erlöschen	2	II	Örtliches Ab-/Brennen der Wirbelschicht oder Stichflamme bei Vorhandensein einer Zündquelle
Örtliches Brennen oder Glimmen mit höchstens geringer Ausbreitung	3		
Durchglühen ohne Funkenwurf (Glimmbrand) oder langsame flammenlose Zersetzung	4	III	Fortlaufendes Ab-/Brennen unter Flammenerscheinung (stehende Fackel)
Abbrennen unter Flammenerscheinung oder Funkensprühen	5		
Verpuffungsartiges Abbrennen oder rasche flammenlose Zersetzung	6	IV	Fortlaufendes Ab-/Brennen über die gesamte Länge oder rasches Ab-/Brennen

Bild 1: Gegenüberstellung der BZ und der BVZ_{qs}

Während sich ein nicht tolerierbares Risiko ab einer BZ 4 definieren lässt, was mit dem Ermitteln von zusätzlichen Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen verbunden ist, ist dieses mit einer BVZ_{qs} II bereits erfüllt. Identisch zu den klassischen Brennzahldefinitionen ist die Kritikalität mit zunehmender Brandverhaltenszahl zu erkennen.

Beurteilung

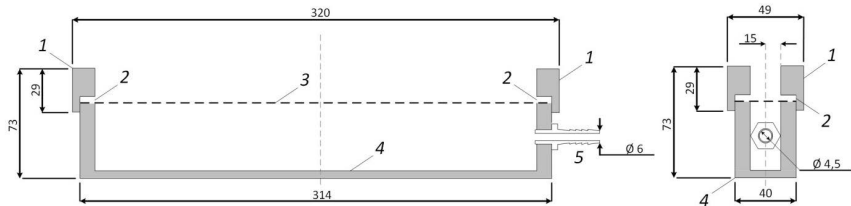
Es soll geprüft werden wie sich das Ab-/Brandverhalten im quasi-stationären Zustand von dem Brandverhalten eines abgelagerten Staubes unterscheidet. Es ist nicht Inhalt dieser Prüfung das Entzünden, aufgrund verschiedener Zündquellenarten zu prüfen, sondern ob der zu prüfende Staub in einem quasi-stationären Zustand intensiver und mit einer höheren Geschwindigkeit abbrennt. Mit Hilfe der Prüfung auf ein verändertes Ab-/Brandverhalten soll eine bessere Bewertung der Brandgefahr erreicht werden, sodass erforderliche Schutzmaßnahmen ermittelt werden können.

Die modifizierte Prüfapparatur besteht aus einem Metallkasten, der nach oben offen und mit einem speziellen Drahtgewebe abgedeckt ist. Oberhalb des Drahtgewebes wird ein Metallrahmen aufgesetzt und mit dem Metallkasten verschraubt. Dadurch wird zum einen das Drahtgewebe fixiert und zum anderen ein 30 [mm] x 300 [mm] großer Bereich definiert. Dieser Bereich bildet eine Anströmfläche von 90 Quadratcentimetern [cm²] oberhalb derer eine Bildung des quasi-stationären bzw. fluidodynamischen Zustandes stattfinden kann. Der Raum unterhalb des Drahtgewebes wird an eine Druckluftzuleitung (Trockenluft) angeschlossen. Da für verschiedene Stäube auch unterschiedliche Überdrücke benötigt werden, ist ein Regelventil eingebaut, das Eingangsdrücke zwischen 1 und 4 bar ermöglicht.

Zündquelle: Glühapparatur mit elektrisch beheiztem Platindraht von ca. 1.000 [°C] (Durchmesser 1 [mm], Länge 86 [mm], I= 30 [A]) oder Gasflamme Länge ca. 20 [mm], Durchmesser (Mitte) 2-3 [mm].

Besondere Erfahrungen mit der modifizierten Prüfapparatur:

- Ausführung des Anströmbodens. Die konkrete konstruktive Ausführung des Anströmbodens bestimmt wesentlich die Möglichkeit, den abgelagerten Staub zu fluidisieren und ein Fließbett zu erzeugen. Werden unterschiedliche Stäube verwendet, erfordert dies auch verschiedene Drahtgewebe (z.B. wird ein Drahtgewebe von 20 [µm] für Nahrungsmittelstäube, wie Trockenmilch oder Kaffeeweißer angewendet).
- Druckluftzufuhr und -regelung. Neben der Ausführung des Anströmbodens bestimmen Druckluftzufuhr und -regelung die Fluidisierung mit. Dies wirkt sich u.a. auf die „Gleichmäßigkeit“ des erzeugten Fließbettes über dessen Längsachse aus. Ferner hängt davon die Reproduzierbarkeit der Fließbette ab.



1 Metallrahmen, 2 Dichtung, 3 Drahtgewebe, 4 Metallkasten, 5 Druckluftzuleitung

Bild 2: Aufbau der modifizierten Prüfapparatur (© Leksin/Barth 2017)

Die Probe wird als Schüttung mit ca. 15-20 mm Höhe auf das Drahtgewebe aufgebracht und anschließend der vorab experimentell ermittelte Systemdruck angelegt. Nach Ausbildung eines konstanten quasi-stationären Zustandes, wird die Probe durch Zuführung des Platindrahtes oder der Gasflamme entzündet. In Zweifelsfällen gibt der experimentell ermittelte quasi-stationäre Zustand die Höhe der Schüttung vor.

Der heiße Platindraht oder die Gasflamme werden für ca. 2 Sekunden seitlich an dem Ende oberhalb des Druckluftanschlusses in die quasi-stationäre Schicht gebracht (Bild 3). Erfolgt keine Zündung, ist der Versuch mit derselben Probe 5-10 Mal zu wiederholen.

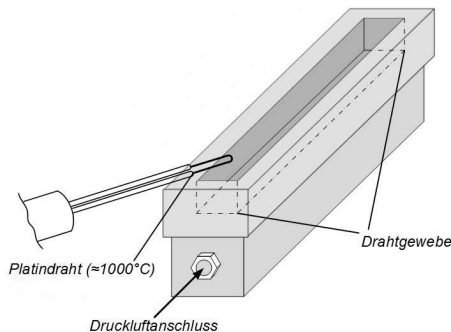


Bild 3: Prüfung auf das Ab-/Brandverhalten (© Leksin/Barth 2017)

Die Brennbarkeit des Produktes wird aufgrund des Ab-/Brandverhaltens durch die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) im quasi-stationären Zustand charakterisiert, Tabelle 1.

Tabelle 1: Definition der BVZ_{qs}

BVZ _{qs}	Art der Reaktion	
I	Kein Ab-/Brennen	
II	Örtliches Ab-/Brennen der Wirbelschicht oder Stichflamme bei Vorhandensein einer Zündquelle.	Keine Ausbreitung eines Brandes
III	Fortlaufendes Ab-/Brennen unter Flammenerscheinung (stehende Fackel).	Ausbreitung eines Brandes
IV	Fortlaufendes Ab-/Brennen über die gesamte Länge oder rasches Ab-/Brennen.	

Parallel zu den oben beschriebenen Erfahrungen mit der modifizierten Prüfapparatur (die Ausführung des Anströmbodens und der Druckluftzufuhr) haben ebenso die produktspezifischen Gegebenheiten einen Einfluss auf die Erzeugung des quasi-stationären Zustandes und somit auf das Ergebnis der Prüfung auf das Ab-/Brandverhalten. Stoffeigenschaften, wie die Partikelgröße, Dichte und Tendenz zur Hygroskopizität beeinflussen die Verteilung der Staubpartikel bzw., Wirbelschicht und dessen Höhe. Dabei beeinflusst die Hygroskopizität des Staubes die Ab-/Brandgeschwindigkeit oder die Brenngeschwindigkeit indirekt und hängt von der Luftfeuchtigkeit stark ab [5]. Dieses kann bei Stäuben mit einer starken Neigung zu Hygroskopizität auf das Ergebnis der bestimmten BVZ_{qs} haben und zu Abweichungen führen (z.B. eine BVZ_{qs} II statt eigentlich einer BVZ_{qs} III oder IV).

Diskussion

Für eine Angemessene Sicherheitsbeurteilung brennbarer Stäube im quasi-stationären Zustand wurde zunächst die aus der Beurteilung abgelagerten Staubes bekannte Brennzahl mit der entsprechenden Prüfapparatur erprobt. Dabei zeigte sich die Notwendigkeit eine neue Bemessungsgröße die Brandverhaltenszahl (BVZ_{qs}) im quasi-stationären Zustand einzuführen.

Im Zuge der Fortschreibung der VDI Richtlinie 2263 Blatt 1 [4] wird gegenwertig diskutiert die BVZ_{qs} zu berücksichtigen. Damit stünde dem Betreiber mit der sicherheitstechnischer Kenngröße BVZ_{qs} eine Bemessungsgrundlage zur Verfügung mit der er in objektiver Weise darüber befinden kann in wieweit Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Schrifttum

- [1] Leksin, A., Barth, U., Laudenbacher, S.: Ab-/Brandverhalten von Stäuben im Fließbett - Modifikation der Brennprüfung nach VDI 2263 Blatt 1. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. VDI-Berichte 2225. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2014, S. 1–15
- [2] MOZ.DE: Staubexplosion bei Fude und Serrahn in Gransee wird untersucht (28.01.2016), 2011. <http://www.moz.de/artikel-ansicht/dg/0/1/984973>
- [3] Barth, U., Bloching, M. u. Leksin, A.: Neueste Erkenntnisse aus dem IND EX® - Forschungsprogramm "Brand- und Explosionsverhalten von Stäuben in Fließbett-trocknern". 2. Deutscher Brand- und Explosionsschutz Kongress. Dortmund 2015
- [4] VDI 2263 Blatt 1: 1990-05 Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. Technische Regel, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [5] Bartknecht, W. & Zwahlen, G.: Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer Berlin, 1993.

Dankesnote

Für die informelle, teilweise auch für die finanzielle Unterstützung der Untersuchungen bedanken sich die Autoren bei folgenden Forschungspartnern:

- Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN),
- Dekra Exam GmbH,
- Deutsches Milchkontor GmbH (DMK), besonders bei Lars Dammann
- Intercontinental Association of Experts for Industrial Explosion Protection e.V. (IND EX),

Kontakt

Autoren: Dr.-Ing. Alexey Leksin, Dr.-Ing. Uli Barth
Homepage: www.msu.uni-wuppertal.de
E-mail: leksin@uni-wuppertal.de, barth@uni-wuppertal.de

Flammenlose Druckentlastung von Metallstäuben

Flameless Venting of Metal Dusts

Dipl.-Ing. **Roland Bunse**, REMBE® GmbH Safety + Control, Brilon

Kurzfassung

Metallstäube stellen aus explosionstechnischer Sicht seit je her eine Besonderheit dar. Extreme Kennwerte, insbesondere bei Leichtmetallstäuben, machen die Auswahl geeigneter Schutzkonzepte zu einer komplexen Aufgabe. Diesem Umstand wird bei der Beurteilung der flammenlosen Druckentlastungseinrichtungen in der Norm DIN EN 16009 Rechnung getragen. Umfassende Untersuchungen für solche Schutzkonzepte sind erforderlich, um den sicheren Einsatz in der industriellen Praxis zu garantieren. Selbst Metallstäube mit geringen K_{st} - und P_{max} -Werten können zu überraschenden Ergebnissen führen. Dieser Beitrag zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen von Metallstaubexplosion deutlich auf.

Abstract

Metal dusts show an extraordinary behavior from explosion protection point of view. It is a special task for the selection of protective measures because of extreme figures of the dusts, especially for light alloys. DIN EN 16009 takes this into account for the approval of flameless venting systems. For this kind of protection systems detailed approval procedures are required to ensure a safe use in industry. Metal dusts even with low values for K_{st} and p_{max} may lead to surprising results. These various effects of metal dust explosions are highlighted in this article.

1. Grundlagen zu Metallstaubexplosionen

Staubexplosion werden allgemein durch eine rasche Druckerhöhungsgeschwindigkeit und somit durch die schlagartige Freisetzung von thermischer Energie charakterisiert. Angetrieben wird der Prozess durch die Freisetzung der Verbrennungsenergie der eingesetzten Masse. Im Falle von Metallstaub oder gar Leichtmetallstaub sind die freigesetzten Energien um ein vielfaches höher als bei organischen Stäuben. Ein Indikator für diesen erhöhten Energiegehalt spiegelt sich im maximalen Explosionsdruck P_{max} wieder. Die erhöhte Reaktionsge-

schwindigkeit wird im K_{st} -Wert ausgedrückt, der absolute Zahlenwert kann bei Metallstäuben aber auch zu einer Fehleinschätzung führen

Deshalb sind bei der Beurteilung auch andere Kennwerte wie z.B. Heizwert, Mindestzündenergie, Korngrößenverteilung etc. zu berücksichtigen. Die nachfolgende Zusammenfassung zeigt die Bandbreite der Metallstaubeigenschaften auf:

Eigenschaften:	Reinstoff, Oxide, Legierungen
Vorkommen / Einsatz:	Automotive, Luft- & Raumfahrt, Chemie, Metallurgie, etc
Korngröße:	< 1µm bis mehrere cm
Brennzahl:	BZ 1 bis BZ 6
Verbrennungstemperatur:	von 2000°C bis > 3500°C
Mindestzündenergie:	1 mJ < MZE < 10.000 mJ
p_{max} :	3 bar < Pmax < 14 bar (teilw. bis 17,5 bar)
K_{st} -Wert:	0 < Kst < 750 bar x m / s (90 % der Stäube sind jedoch ST 1)

Anders als bei den organischen Stäuben sind die jeweiligen Eigenschaften bei den Metallen oftmals gegenläufig, sodass eine Einschätzung des Abbrandverhaltens ohne Durchführung von Explosionstests nicht vorhersagbar sind. So zu sehen an den nachfolgenden Beispielen:

Aluminium/Polyglykol (0682):	BZ 5, K_{st} -Wert: 77 bar x m / s p_{max} : 8,4 bar
------------------------------	--

Aluminium (Altmetall) (5086):	BZ 2 K_{st} -Wert: 330 bar x m / s p_{max} : 12,1 bar
-------------------------------	---

Nimmt man hier die Brennzahl des abgelagerten Staubes als Führungsgröße, die so gesehen ja auf eine hohe Reaktionsfreudigkeit hindeutet, würde man die Situation vermutlich falsch einschätzen. Andersherum schlicht über den p_{max} oder K_{st} -Wert auf eine Brandgefähr-

derung zurück zu schließen ist genauso falsch. Andere Kenngrößen zeigen ein ähnliches Verhalten und führen zu keiner eindeutigen Erkenntnis bei der Beurteilung eines Schutzsystems im Explosionsfall. Insbesondere flammenlose Druckentlastungssysteme, die ihre Funktionsweise der Flammenlöschung aus dem Wärmeübergang der Explosionsflamme in ein Absorptionsmaterial verdanken, sind so ohne konkreten Nachweis schwierig im Vorfeld zu beurteilen. Die gleiche Problematik gilt natürlich auch für Explosionsunterdrückungssysteme, die über Abkühlungseffekte einen Explosionsabbruch zu erzielen versuchen. Hier sind insbesondere große, entzündete Partikel die Herausforderung.

Flammenlose Druckentlastungssysteme sind in diesem Punkt weniger kritisch zu betrachten, müssen aber der gesamten freigesetzten Energie standhalten und dürfen sich thermisch nicht zu stark erhitzen. Das gesamte Anforderungsprofil ist in der Norm DIN EN 16009 formuliert.

2. Anforderungen der DIN EN 16009 [1] an flammenlose Druckentlastungssysteme

Im Kapitel 6.2 „Staub für die Funktionsprüfung“ der Norm wird explizit erläutert in welchen Anwendungsgrenzen das Schutzsystem hinsichtlich der Staubeigenschaften zu verwenden ist. Für die organischen Stäube sind dabei auch klare Vorgaben erwähnt. Wohl wissend um die Schwierigkeit, wurde dieser Punkt im Normungsgremium lange diskutiert und es wurde daher folgende Formulierung für den Einsatz bei Metallstäuben gewählt:

„Um die Anwendbarkeit einer flammenlosen Druckentlastung für einen Metallstaub zu bestätigen, muß diese Einrichtung mit dem betreffenden Staub in einem Volumen und bei einem Pred geprüft werden, das/der für diesen Einsatz repräsentativ ist.“

Hierzu heißt es weiter im Anhang C:

„Zu beachten ist, dass die Verbrennungswärme je Mol Sauerstoff für Aluminium (Metallstaub) etwa das Zweifache derer von typischen organischen Stoffen wie Stärke, aber auch von Kohle beträgt. Das entspricht der Erfahrung, dass die Flammentemperaturen von Metall im Vergleich zu denen von organischen Stäuben und Kohlen erheblich höher sind. Ist die Verbrennungswärme zu hoch, reicht die Menge an abgeführter Energie nicht mehr aus um eine flammenlose Druckentlastung zu ermöglichen und eine Flammenlöschung wird nicht erreicht.“

Insbesondere die Durchzündung in einem geschlossenen Betriebsraum kann verheerende Auswirkungen mit sich bringen, wie dem folgenden Kapitel entnommen werden kann.

3. Auswirkungen von Metallstaubexplosionen mit und ohne flammenlosen Druckentlastungssystemen

Die beschriebenen extrem hohen Verbrennungstemperaturen bei der Reaktion von (Leicht-) Metallstaub führen zu außergewöhnlichen Auswirkungen im Außenraum von druckentlasteten Explosionen. Selbst kleine Volumen führen zu heftigen Sekundärreaktionen, sofern diese nicht durch flammenlose Druckentlastungseinrichtungen unterbunden werden. Die extreme Energiedichte wird oftmals unterschätzt, wenn man die Schutzmaßnahme "Explosionsfeste Bauweise" anwendet und von Ereignissen im Behälterinnern nichts mitbekommt. Scheinbar unbemerkt wirkt der maximale Explosionsüberdruck P_{max} bei gleichzeitig erhöhter Temperatur von ca. 3000°C auf die Behälterstruktur und alle verwendeten Baugruppen wie Dichtungen, Wartungstüren, Schaugläser, Füllstandsmelder, etc. Beim Versagen auch nur einer Komponente bahnt die Explosion sich ihren Weg mit ähnlicher Wirkungsweise wie die eines Plasma-Schneidbrenners. Das kann beim „Abbrennen“ von Schrauben zum Desaster und Versagen des gesamten Behälters führen. Noch weitaus größere Belastungen wirken auf die zwingend erforderlichen Entkopplungseinrichtungen, die neben den ohnehin überhöhten thermischen Auswirkungen noch mit Druckspitzen von bis zu 30 bar beaufschlagt werden können. Auch für diese Schutzsysteme gelten besondere Anforderungen hinsichtlich des Einsatzes bei Metallstaubexplosionen.

Die Schutzmaßnahme Explosionsunterdrückung kann nur sehr limitiert für diese besondere Anwendung eingesetzt werden. Spezielle Löschpulver und bei weitem höhere Löschmittelkonzentrationen erlauben eine minimale Reduzierung des Explosionsereignisses, so dass zwar neueste Untersuchungen eine generelle Machbarkeit aufzeigen, diese aber wirtschaftlich derzeit nicht umsetzbar ist.

Die Auswirkungen werden in Form von Videoaufzeichnungen im Beitrag eindrucksvoll dargestellt.

4. Anwendungen in der Paxis

Anforderungen an die Metallverarbeitende Industrie zu immer mehr Gewichtseinsparungen, höheren Werkstofffestigkeiten bei geringerem spezifischen Gewicht, verlagern die Anwendung von klassischen Stahl-Eisen-Werkstoffen hin zu Leichtmetallen. Selbst Aluminiumwerkstoffe werden mehr und mehr durch noch leichtere und stabilere Magnesiumlegierungen ersetzt. In der Automobilbranche hat dieser Werkstoff in den letzten Jahren verstärkt Einzug gehalten. Dadurch gibt es Herausforderungen im Explosionsschutz an vielen unterschiedlichen Fabrikationsprozessen. Hier seien beispielhaft nur einige wenige genannt:

- Gießen von Magnesiumlegierungen und die Werkstücknachbearbeitung durch Entgraten, Schleifen und oder Polieren
- Oberflächenbehandlung durch Kugelstrahlen zur Oberflächen/Bauteil Härtung
- Recycling von Wertstoffen (Gelber Sack, Getränkedosen, KFZ-Karosserien, etc)
- Energieerzeugung durch Solarmodule (Silizium)
- Energiespeichersysteme (Lithium)
- Verbundwerkstoffe GFK/CFK/Alu/Magnesium

Die Industrie fordert unter wachsendem Kostendruck wirtschaftliche Schutzsysteme trotz der gestiegenen Sicherheitsanforderungen. Diese Schutzsysteme sollen natürlich kostengünstig, wartungsarm und maximal verfügbar sein. Flammenlose Druckentlastungssysteme sind seit je her bei organischen Stäuben in der industriellen Praxis aus diesen Gründen anerkannt und akzeptiert. Vorteile ergeben sich darüber dadurch, dass die Anforderungen an die mit eingesetzten Entkopplungsorgane erheblich geringer ausfallen können und damit preisgünstiger werden.

Entscheidend für den sicheren Umgang mit (Leicht-)Metallstäuben ist die umfassende Kenntnis der Besonderheiten dieser Werkstoffgruppe. Schutzsysteme müssen mit Augenmaß und nach gründlicher Abwägung für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt werden. Die Konformität der Schutzsysteme nach EN 16009 muß für den individuellen Einsatzfall vom Hersteller nachgewiesen sein.

[1] DIN EN 16009: Einrichtungen zur flammenlosen Explosionsdruckentlastung (2011)

Explosionsereignisse an Entstaubungsanlagen

Dipl.-Ing. **Joachim Lucas**,

IBExU Institut für Sicherheitstechnik GmbH, Freiberg

Kurzfassung

Anhand von 4 Explosionsereignissen an unterschiedlichen Entstaubungsanlagen wird erläutert, wie trotz vorhandener Explosionsschutzmaßnahmen z. T. beträchtliche Schäden aufgetreten sind bzw. weshalb die getroffenen Explosionsschutzmaßnahmen unzureichend waren. Die relevanten sicherheitstechnischen Staubkenngrößen helfen dabei hinsichtlich der Ursachenermittlung und spielen eine entscheidende Rolle bei der Festlegung spezifischer Schutzmaßnahmen.

1. Einleitung

Entstaubungsanlagen für brennbare Stäube zählen in den einzelnen Industriezweigen zu den am häufigsten von Explosionen betroffenen Anlagengruppen. Eine Analyse [1] von 555 bekannt gewordenen Staubexplosionsereignissen in der BRD bis 1995 sowie von 44 Staubexplosionen in der ehemaligen DDR ergab für Entstaubungsanlagen / Abscheider einen Anteil von 17,5 % an den insgesamt betrachteten Anlagengruppen, wobei dieser Anteil bei Betrachtung der letzten 10 Jahre (1985-1995) in [1] mit 23,1 % deutlich auf dem 1. Platz lag, noch vor den Silos / Bunkern mit einem Gesamtanteil von 19,4 %. Insbesondere bei der Staubgruppe Metalle war der Entstaubungsanlagen- / Abscheideranteil mit 44,1 % sehr hoch [1].

Entstaubungsanlagen können zwar in den meisten Fällen zündquellenfrei errichtet werden (Ausnahme: Elektroabscheider), jedoch sind u. a. das mögliche Einsaugen von Zündquellen, aus dem Staub heraus entstehende Zündquellen (exotherme Reaktion, Selbstentzündung), die oft hohe Staubfeinheit sowie die starke Ladungserzeugung beim pneumatischen Staubhandling zu berücksichtigen. Dementsprechend werden geeignete Entstaubungsanlagen ausgewählt (z. B. filternde Abscheider, Nass- oder Massenkraftabscheider) und die Explosionsschutzmaßnahmen angepasst. Relativ häufig ist konstruktiver Explosionsschutz erforderlich bzw. es sind auch spezielle Brandschutzmaßnahmen zu treffen. Hinsichtlich des Umfangs der zu treffenden Schutzmaßnahmen wird auf die neuen Ausgaben der VDI 2263, Blatt 6 [2] und 6.1 [3] verwiesen.

Die folgenden Beispiele von aufgetretenen Explosionen verdeutlichen u. a., dass mitunter kleine Unzulänglichkeiten bei der Anlagenplanung /-auslegung zu beträchtlichen Schäden führen können.

2. Zerstörung eines druckentlasteten Schlauchfilters bei einer Braunkohlenstaubexplosion

2.1 Technologie, Ereignisablauf

In einer Brikettfabrik wurden die Förderer für die getrocknete Braunkohle über einen trocken arbeitenden Schlauchfilter aspiriert. Das auf einen reduzierten Explosionsdruck von 0,4 bar (Ü) ausgelegte Filtergehäuse war mit Druckentlastungsklappen ausgerüstet. In der Rohgasleitung vor dem Filter befand sich ein Explosionsschlot zur Verhinderung von Flammenstrahlzündung und Vorkompression. Um ein Verdecken der Entlastungsfläche durch die Filterschläuche zu verhindern, war vor den Entlastungsöffnungen ein Schutzgitter angebracht. Ca. 20 Minuten vor der Braunkohlenstaubexplosion wurde an einem der entstaubten Förderer Funkenflug festgestellt und dieser daraufhin abgeschaltet. Die nachfolgenden Kontrollen ergaben auch an weiteren Förderern Brandgeruch. Daraufhin wurde der gesamte abgesaugte Bereich einschließlich der Schlauchfilteranlage (Ventilator) über „Alles Halt“ stillgesetzt. Einige Sekunden nach Betätigung der „Alles Halt“-Taste ereignete sich eine Explosion im Schlauchfilter. Das Schlauchfiltergehäuse ist dabei geplatzt (s. Bild 1). Dies führte auch zu Schäden im Bereich der benachbarten Gebäudewand. Die Filterschläuche wurden durch den Nachfolgebrand zerstört.

2.2 Ursachen für das Versagen des konstruktiven Explosionsschutzes

Die konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen waren entsprechend dem Stand der Technik ausgeführt und die Druckentlastung vorschriftsmäßig ausgelegt (u. a. Berücksichtigung des geringeren Wirkungsgrades der Druckentlastungsklappen). Da außerdem die Installation einer etwas größeren wirksamen Entlastungsfläche gegenüber der nach Berechnung erforderlichen Fläche erfolgte, war zunächst schwer zu verstehen, weshalb die konstruktiven Schutzmaßnahmen versagt hatten.

Da bei der Auslegung der Druckentlastung noch kein konkreter Filterstaub vorlag, wurde von einem maximalen Explosionsdruck von 9 bar und einem relativ hohen K_{St} -Wert von 160 bar·m/s für den betreffenden Braunkohlenstaub aus der Lausitz ausgegangen. Dieser K_{St} -Wert lag im Bereich des Maximums der zum damaligen Zeitpunkt bekannten Werte des BIA-Reports [4] (nur 2 Werte in [4] waren mit 170 bar·m/s und 176 bar·m/s etwas höher).

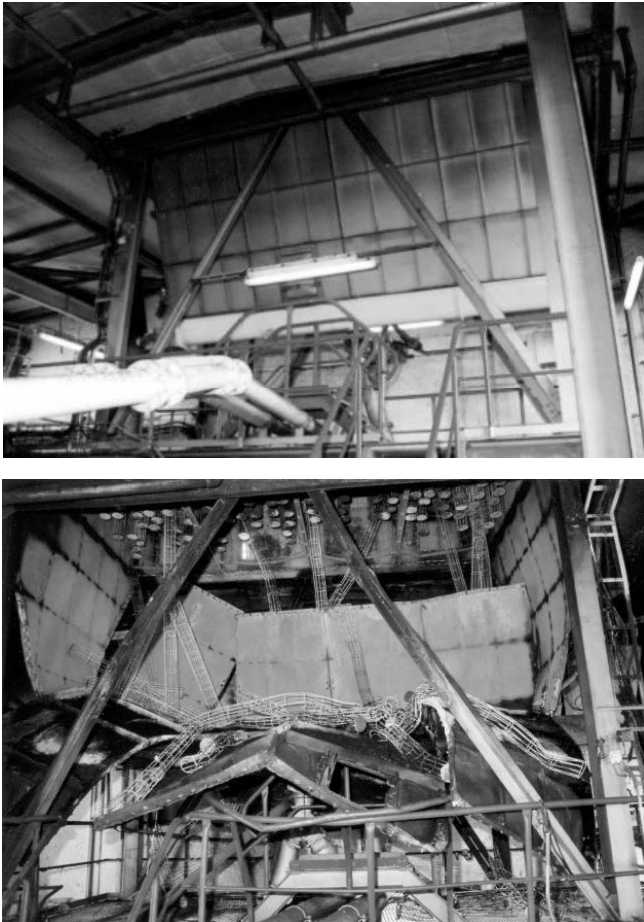


Bild 1: Intakter Filterkonus (oben) und zerstörter Konus nach der Explosion (unten)

Die nach der Explosion durchgeführte konkrete Prüfung des Filterstaubes ergab folgende Werte:

- Medianwert: $< 20 \mu\text{m}$ (90 Masse-% $< 20 \mu\text{m}$)
- maximaler Explosionsdruck: 8,5 bar
- K_{St} -Wert: 220 bar·m/s

Dieser ungewöhnlich hohe K_{St} -Wert von 220 barm/s für einen Braunkohlenstaub ist auf die äußerst hohe Staubfeinheit zurückzuführen. Zum damaligen Zeitpunkt [4] und auch in der aktuellen GESTIS-STaub-EX-Datenbank [5] waren / sind solch hohen K_{St} -Werte für Kohlenstäube nicht bekannt. Von IBExU durchgeführte Prüfungen weiterer sehr feinkörniger Braunkohlenstäube aus ostdeutschen Revieren bzw. aus dem Ausland (u. a. Australien, Indonesien) zeigen, dass K_{St} -Werte von über 200 barm/s (Staubexplosionsklasse St 2) möglich sind.

Nach der Explosion waren die Schutzgitter vor den Entlastungsöffnungen stark nach außen durchgebogen, was auf eine Behinderung der Druckentlastung durch die Filterschläuche hinweist. Der Art und Anordnung der Schutzgitter war zwar von einer anderen Fachstelle zugestimmt worden, jedoch ist man dabei auch von dem geringeren K_{St} -Wert von 160 barm/s ausgegangen. Bedingt durch die vorhandene höhere Explosionsheftigkeit hielten die Schutzgitter den aufgetretenen Belastungen nicht stand.

Eine Überprüfung des verfügbaren Strömungsquerschnitts im Filterinneren zeigte, dass selbiger vom Staubsammelraum zu den Explosionsklappen etwas geringer war als die Öffnungsfläche der Klappen. Dadurch wurde die Ableitung der Verbrennungsgase zu den Explosionsklappen insbesondere an der oberen Reihe behindert, was auch in gewisser Weise zur Erhöhung des reduzierten maximalen Explosionsdruckes beitrug.

2.3 Fazit, Schutzmaßnahmen

Entsprechend des unerwartet hohen K_{St} -Werts von 220 barm/s, der die Hauptursache für das Bersten des Filters darstellte, wurden folgende Maßnahmen zur Begrenzung der Explosionswirkungen getroffen:

- a) Versteifung und Modifizierung des Schutzgitters vor den Entlastungsöffnungen
- b) Entfernung einer Schlauchreihe vor den Entlastungseinrichtungen zur Vergrößerung der Strömungsquerschnitte für die Druckentlastung und zur Verminderung der Belastung der Schutzgitter
- c) Vergrößerung der Druckentlastungsfläche entsprechend des hohen K_{St} -Werts
- d) Verminderung des Ansprechdruckes am Explosionsschlot von 0,1 bar auf 0,05 bar durch Tausch der Druckentlastungsklappen gegen entsprechende Berstscheiben (Verminderung des Risikos einer Explosionsübertragung)
- e) Beseitigung von Schwachstellen hinsichtlich der Gehäusefestigkeit

3. Wiederholte Staubexplosionen beim Anfahren einer Schlauchfilteranlage

3.1 Technologie, Ereignisablauf

In einer Trocknungs- / Verarbeitungsanlage eines organischen Staubes wurden die Förderwege mit einem Schlauchfilter entstaubt (Aspiration). Der Schlauchfilter war mit konstruktivem Explosionsschutz ausgerüstet. Die Explosionsdruckentlastung entsprach den Vorschriften [6], [7].

Innerhalb von 2 Monaten ereigneten sich jeweils im Anfahrbetrieb (Leerlaufbetrieb) insgesamt 3 Staubexplosionen im Filter. Der konstruktive Explosionsschutz funktionierte dabei ohne Beanstandungen. Die Explosionsklappen am Filtergehäuse und am vorgeschalteten Explosionsschlot hatten geöffnet. Die Filterschläuche waren nachher aber verbrannt.

3.2 Brand-/Explosionsursache

Die Prüfung des Staubes ergab folgende sicherheitstechnische Kenngrößen:

- Mindestzündenergie (MZE): mit Induktivität: $10 \text{ mJ} < \text{MZE} < 30 \text{ mJ}$
ohne Induktivität: $30 \text{ mJ} < \text{MZE} < 100 \text{ mJ}$
- Zündtemperatur (Mindestzündtemperatur der Staubwolke): $380 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Glimmtemperatur (Mindestzündtemperatur einer 5 mm dicken Staubschicht): $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Selbstentzündungstemperatur bei $V = 400 \text{ cm}^3$: $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Brennverhalten: BZ 4

Vermeintliche Ursachen

Nach der 1. Explosion wurde ein Doppelmaulschlüssel in einem der entstaubten Förderer gefunden und dieser vom Betreiber als vermeintliche Zündursache (Schlagfunken) deklariert. Bei einer Masse des Doppelmaulschlüssels von ca. 10 kg und einem Fallweg von 0,5 m ergibt sich aber nur eine Funkenenergie von $\approx 50 \text{ J}$. Diese Energie liegt zwar zwischen den Grenzwerten von Kategorie-1D-Geräten (20 mJ) sowie 2D- und 3D-Geräten (jeweils 80 J), unterhalb deren Schlagfunken nicht als wirksame Zündquellen bei nicht funkenarmen Metallen (hier: Stahl) zu berücksichtigen sind [8], [9], eine Entzündung durch Stahl-Schlagfunken kann aber entsprechend den nach Bartknecht [10] diesbezüglich relevanten Staubkenngrößen (Mindestzündenergie mit Induktivität sowie Zündtemperatur) ausgeschlossen werden.

Die nach der 2. Explosion vermutete Falschluffansaugung in Strömungstoträumen mit dadurch verbundener Selbstentzündung konnte ebenfalls nicht als Zündquelle bestätigt werden (zu geringe Staubablagerungen, zu niedrige Temperaturen).

Eigentliche Explosionsursache

Erst eine eingehende Filteruntersuchung nach der 3. Explosion brachte die wahre Zündquelle zum Vorschein:

- Undichtigkeiten bis ca. 1 cm im Konusbereich des Filterrumpfes (unkontrollierte Luftströmung), s. Bild 2
- Eindringen von Staub in die Isolierung
- Staubkontakt mit Filterrumpfheizung, Temperatur in Anfahrphase bis 120 °C
- Erwärmung des Staubes durch die Heizung und anschließende Selbsterhitzung bis zur Entzündung, begünstigt durch Wärmestau aufgrund der Isolierung



Bild 2: Links: Spalt an einer Konusecke (Filter innen)
Rechts: abisolierter Filterrumpf mit Undichtheiten im Konusteil (roter Pfeil)

3.3 Fazit, Schutzmaßnahmen

Aus den hier dargestellten Ereignissen leiten sich folgende allgemeine Schlussfolgerungen ab, die insbesondere bei selbstentzündlichen Stäuben zu berücksichtigen sind:

- a) Verhinderung des Staubeintrittes in die Isolierung/Heizung (im speziellen Fall: Verschweißen der mit verschraubten Flanschverbindungen versehenen Gehäusebleche)
- b) Vermeidung von Toträumen / Taupunktunterschreitungen
- c) Vermeidung unkontrollierter Luftströmungen insbesondere bei der Gefahr von Staubbagerungen

4. Brand / Explosion in einem Trockenfilter einer Entstaubungsanlage beim Titan-schleifen

4.1 Technologie, Ereignisablauf

Der beim Schleifen von Titanwerkstücken in geringer Menge anfallende Staub wurde einem trocken arbeitendem Patronenfilter zugeführt. Der Patronenfilter war mit konstruktivem Explosionsschutz versehen (Druckentlastung über Berstscheibe). Zur Verminderung des Brand- und Explosionsrisikos erfolgte die Vorlage eines inertisierend wirkenden Staubes (Al-Oxid) in den Staubsammelbehälter und ein periodisches Einsaugen (1 x pro Woche bis 1 x pro Monat) dieses Precoatierungsmittels in den Patronenfilter.

Am Patronenfilter traten 2 Brände auf. Der letzte Brand (s. Bild 3) führte auch zu einer Explosion (Ansprechen der Berstscheibe), die durch einen Druckluft-Abreinigungsimpuls (zeitgesteuert) oder durch eine phasenweise auftretende Staubverwirbelung während der Brandwirkung (z. B. bei der Zerstörung von Filterpatronen) ausgelöst wurde.



Bild 3: Patronenfilter während und nach dem Brand

4.2 Brand-/Explosionsursache

Die Screening-Prüfung des Filterstaubes ergab folgende sicherheitstechnische Kenngrößen:

- Mindestzündenergie (MZE) mit Induktivität: 100 mJ < MZE < 300 mJ
- Glimmtemperatur: 380 °C
- Brennverhalten: BZ 5

Die Entzündungen bei der Mindestzündenergiebestimmung in der modifizierten Hartmann-Apparatur traten erst bei sehr hoher Staubeinwaage (Staubkonzentration) auf. Bei den als Nichtzündungen (keine Flammenerscheinungen) zu bewertenden insgesamt 25 Versuchen wurden durch das Zündinitial (Funkenentladung) zwar stets glimmende / glühende Funken des Filterstaubes in unterschiedlicher Größe und Anzahl hervorgerufen, eine Entzündung des nach dem Versuch sedimentierten Staubes (Brand in der Ablagerung) erfolgte jedoch nicht. Nur bei einer der 3 aufgetretenen Staub/Luft-Gemisch-Zündungen (Flamme) war nachher noch ein Glimmbrand im sedimentierten Staub zu verzeichnen.

Die beim Schleifen der Werkstücke auftretenden Titanfunken waren als relativ kleine Einzel-funken zu beobachten, die relativ schnell verlöschen. Ein Eintrag von Titanfunken als wirk-same Zündquelle bis in den Patronenfilter erschien deshalb und auf Grund der vorhandenen langen Rohgasleitung ($> 10\text{ m}$) sowie entsprechend den Beobachtungen bei der Mindest-zündenergieermittlung wenig wahrscheinlich (Funken beim Eintritt in den Filter vermutlich verlöschen bzw. schon auf niedrige, ungefährliche Temperaturen abgekühlt). Eine nähere Prüfung von Filterstaubproben zeigte jedoch faserförmige, z. T. verfilzte Bestandteile, die ein deutlich längeres Brennen/Glimmen der Fasern aufwiesen gegenüber den Titanfunken. Die vom Schleifwerkzeug (Schleifband) stammenden Fasern bestehen häufig aus Baumwollge-webe mit Kunstharzbindung und werden dann mit abgerieben, wenn die Schleifkörnung schon weitgehend verbraucht ist.

Insbesondere wenn die faserförmigen Schleifbandanteile als Faserknäuel, die auch Titans-taubanhaftungen aufwiesen, durch die Titanfunken entzündet und abgesaugt werden, ist von einer wirksamen Zündquelle in der Filteranlage auszugehen.

4.3 Fazit, Schutzmaßnahmen

Anstelle des trocken arbeitenden Patronenfilters wird jetzt ein Nassabscheider verwendet. Bei diesem werden eingesaugte Funken / Glimmnester durch das Einleiten des Rohgas-stroms ins Wasserbad gelöscht und der abgesaugte Staub mit Wasser gebunden (siehe z. B. VDI 2263, Blatt 6.1 [3]).

Die Verwendung eines trocken arbeitenden filternden Abscheiders ist auch möglich. Diese erfordert aber spezielle Schutzmaßnahmen. Zur Vermeidung eines Zündquelleneintrages in den Filter sollte dann eine wirksame Funkenfalle oder eine automatische Funkenerkennung und –löschung in der Rohgasleitung eingesetzt werden.

Bei einer automatischen Funkenerkennung und –löschung ergeben sich keine Bedenken hinsichtlich einer Löschung mit Wasser (keine bzw. vernachlässigbar geringe Wasserstoffbil-dung bei der Funkenlöschung und außerdem entsprechende Verdünnung der H_2 -

Konzentration durch den abgesaugten Luftstrom). Voraussetzung ist allerdings, dass keine gefährlichen Staubablagerungen in der Rohgasleitung auftreten (keine Brandausbreitung in einer Titanstaubablagerung entlang der Rohgasleitung bis zur Wassereindüsungsstelle zulässig).

5. Staubexplosionsversuche an einem Trockenabscheider bei reingasseitiger Druckentlastung

Filterelemente der Fa. Herding GmbH Filtertechnik wurden im eingebauten Zustand in den Jahren 2016 und 2017 durch IBExU erfolgreich einer Prüfung als Flammendurchschlagsicherung (Volumendeflagrationsendsicherung als Schutzsystem nach ATEX) für brennbare Dämpfe und Gase der Explosionsgruppe IIB3 mit einer Normspaltweite von $\geq 0,65$ mm unterzogen. Diese Filterelemente wurden auch bei Staubexplosionsversuchen mit rohgasseitiger und alternativ reingasseitiger Druckentlastung an einer Filteranlage Herding FLEX getestet. Vorversuche mit Druckentlastung auf der Reingasseite, die ohne Bestäubung der Filterelemente und nur mit versuchsbedingter Staubverwirbelung im Trichter der Filteranlage erfolgten, zeigten relativ geringe resultierende Explosionsdrücke. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde daraufhin - zur Reduzierung der Versuchszahl - sofort zum „worst case“ übergegangen:

- Entfernung jedes zweiten Filterelements
- Bestäubung der Filterelemente vor dem Versuch
- Druckluftabreinigung der Filterelemente während der Explosion

Beim ersten Versuch mit diesen Parametern war der Ventilator abgeschaltet und der resultierende Explosionsdruck lag etwas unterhalb des Auslegungsdrucks des Filtergehäuses ($p_{\text{red}} = 0,7$ bar). Der nächste Versuch bei identischen Versuchsbedingungen aber mit laufendem Ventilator (Saugbetrieb) ergab einen deutlich höheren Explosionsdruck von $p_{\text{red}} = 1,1$ bar. Damit war die bei der Konstruktion ausgelegte Explosionsfestigkeit der Filteranlage überschritten und die Anlage riss an den Wartungstüren auf (siehe Bild 4).

Die Ursachen für diesen hohen Explosionsdruck waren die reduzierte Filterfläche und die beim Saugbetrieb eintretende Erhöhung des Druckverlustes über die Filterelemente, wodurch jeweils die Ableitung der Explosionsrestgase über die reingasseitige Druckentlastung behindert wurde. Inzwischen weiter geführte Versuche zeigten, dass bei ausreichender Filterfläche - bezogen auf das freie Explosionsvolumen in der Filteranlage - die reingasseitige Druckentlastung bei Staubexplosionen an Herding Filteranlagen erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Herding Sinterlamellenfilter wirken dabei - ebenso wie bei den brennbaren Dämpfen und Gasen – erfolgreich als Schutzsystem nach ATEX (zünddurchschlagsicheres

Explosions-Entkopplungssystem). Über die einzelnen Ergebnisse der Prüfungen wird an anderer Stelle berichtet.

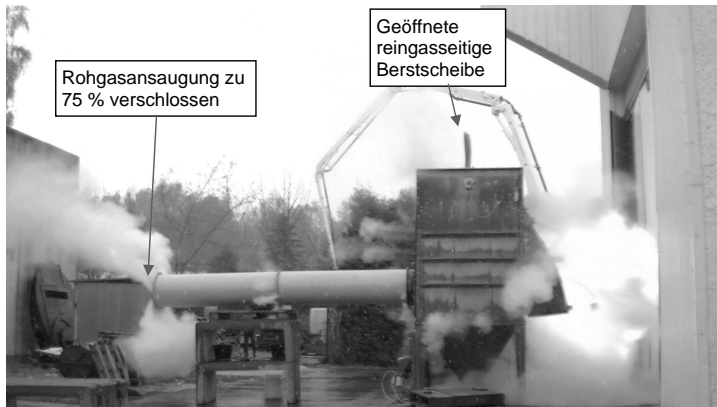


Bild 4: Explosionsflammenaustritt aus den aufgerissenen Wartungstüren (rechts)

6. Zusammenfassung

Die Ereignisbeispiele zeigen, dass unterschiedlichste Ursachen für das Auftreten von Bränden / Explosionen an Entstaubungsanlagen in Frage kommen. Bei der Planung des erforderlichen Brand- und Explosionsschutzes sollten deshalb sämtliche relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen bekannt sein und ggf. selbige nach Inbetriebnahme von Entstaubungsanlagen auf ihre Gültigkeit hin überprüft werden. Bei Anwendung des konstruktiven Explosionsschutzes ist eine korrekte Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen bzw. ausreichende Gehäusefestigkeit erforderlich.

7. Literaturverzeichnis

- [1] BIA-Report 11/97: Dokumentation Staubexplosionen, Analyse und Einzelfalldarstellung
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, Dez. 1997
- [2] VDI 2263, Blatt 6: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen, August 2017
- [3] VDI 2263, Blatt 6.1: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen; Brand- und Explosionsschutz an Entstaubungsanlagen, Beispiele, August 2017
- [4] BIA-Report 12/97: Brenn- und Explosionskenngößen von Stäuben
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, Nov. 1997
- [5] Datenbank Brenn- und Explosionskenngößen von Stäuben „GESTIS-STaub-EX“ (<http://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-staub-ex/index.jsp>)
- [6] VDI 3673, Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen, Nov. 2002
- [7] DIN EN 14491: 2012-10: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen; Deutsche Fassung EN 14491:2012
- [8] DIN EN 13463-1:2009-07: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen, Teil 1: Grundlagen und Anforderungen, Deutsche Fassung EN 13463-1:2009
- [9] DIN EN ISO 80079-36:2016-12: Explosionsfähige Atmosphären - Teil 36: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären - Grundlagen und Anforderungen (ISO 80079-36:2016); Deutsche Fassung EN ISO 80079-36:2016
- [10] Bartknecht, W.: Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken und heißen Oberflächen in Staub/Luft- und Brenngas/Luft-Gemischen,
VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 3, Nr. 180, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989

Wie sicher ist die Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens großer Feststoffschüttungen?

Die Bedeutung von Ringversuchen zur Methodenvvalidierung

Dr.-Ing. **M. Schmidt**, Dr. rer. medic. **P. Lüth**,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
Abteilung 2 „Chemische Sicherheitstechnik“, Berlin

Kurzfassung

Für die Klassifizierung sowie die sichere Handhabung und Nutzung von Chemikalien und anderen Stoffen wurden spezielle standardisierte Testmethoden entwickelt, die weltweit zum Einsatz kommen. Die Ableitung von Sicherheitsmaßnahmen durch Experten erfordert, dass aus diesen Untersuchungen verlässliche Daten gewonnen werden. Ringversuche sind ein wesentliches Element bei der Methodenentwicklung (-validierung) und für die Qualitätssicherung von Laboratorien.

Die Testmethode DIN EN 15188:2007 dient der Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Schüttgütern und Stäuben. Experimentelle Grundlage für die Beschreibung des Selbstentzündungsverhaltens eines bestimmten Materials ist die Bestimmung der Selbstentzündungstemperaturen (T_{SE}) von Proben verschiedener Größen mit Hilfe isoperiboler Warmlagerungsversuche (Lagerung bei konstanten Umgebungstemperaturen und -bedingungen) in kommerziell erhältlichen Laboröfen. Die so ermittelten Versuchsdaten ergeben die Abhängigkeit der Selbstentzündungstemperaturen vom Lagervolumen [1]. Zweck einer schrittweise aufgebauten Serie von Ringversuchen und interner Labortests war die Identifizierung von Schwächen der bestehenden Methode bzw. von in der Laborpraxis auftretenden Mängeln bei der Anwendung der Methode, die Validierung der modifizierten und verbesserten Methode sowie die Bestimmung einer allgemeingültigen (Mess-)Unsicherheit dieser modifizierten Methode.

Abstract

For the classification as well as safe handling and use of chemicals, special standardized testing procedures have been developed and are used world-wide. Safety experts must be able to fully rely on the precise execution of the respective laboratory tests and assessments. In this context interlaboratory tests (round robin tests, interlaboratory comparisons / inter-

comparisons) are a crucial element for method development (validation) and of a laboratory's quality system.

The test method DIN EN 15188:2007 is applied to characterize the self-ignition behaviour of combustible bulk materials and dusts. The experimental basis for describing the self-ignition behaviour of a given material is the determination of the self-ignition temperatures (T_{SI}) of differently-sized volumes of dust samples by isoperibolic hot storage experiments (storage at constant oven temperatures) in commercially available ovens. The results thus measured reflect the dependence of self-ignition temperatures upon dust volume [1]. Aim of a stepwise built up series of interlaboratory tests and internal laboratory investigations was to identify weaknesses of the existing test method respectively deficits in the practical execution in the laboratory, to validate a modified and improved method and to determine a universally valid (measurement-) uncertainty of the modified method.

1. Einleitung

Die Testmethode DIN EN 15188:2007 [1] dient der Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Schüttgütern und Stäuben. Experimentelle Grundlage für die Beschreibung des Selbstentzündungsverhaltens eines Materials ist die Ermittlung der Selbstentzündungstemperaturen (T_{SE}) von verschiedenen Testvolumina eines Materials mit Hilfe isoperiboler Warmlagerungsversuche (Lagerung bei konstanten Umgebungsbedingungen und -temperaturen) in kommerziell erhältlichen Laboröfen. Da es nicht möglich ist, das Selbstentzündungsverhalten großvolumiger technischer Schüttungen direkt zu bestimmen, werden die Ergebnisse von Laboruntersuchungen, die in der Regel bis zu Probenvolumina von einigen Litern durchgeführt werden, mit Hilfe verschiedener Methoden auf in der betrieblichen Praxis relevante Schüttungsgrößen extrapoliert. Eine häufig angewandte empirische Methode ist die Auftragung des Logarithmus des Volumen/Oberflächen-Verhältnisses der Schüttung ($\lg(V/A)$, V/A in m) über der reziproken T_{SE} (T_{SE} in K) im sogenannten Pseudo-Arrhenius Diagramm.

Untersuchungen und Vergleichstests zwischen verschiedenen Prüflaboratorien ergaben erhebliche Unterschiede zwischen den jeweiligen laborspezifischen Ergebnissen der Warmlagerungsversuche.

Bild 1 zeigt die Ergebnisse von acht Laboratorien eines 2002 von der BAM initiierten Ringversuches im Pseudo-Arrhenius Diagramm. Als Testmaterial diente Lycopodium.

Für die Untersuchungen wurden hierbei unterschiedliche Laboröfen und Probenbehälter verwendet. Bild 1 zeigt deutlich, dass in dieser Testreihe keine reproduzierbaren und akzeptablen Ergebnisse ermittelt werden konnten. Die Extrapolation auf ein Schüttungsvolumen

von 100 m³ ergibt für diese Schüttungsgröße Selbstentzündungstemperaturen von ca. 0 °C bis über 40 °C; für eine Schüttungsgröße von 1000 m³ weitet sich der Bereich noch erheblich auf. Dies macht deutlich, dass bei Vorlage des Ergebnisses nur eines Labors eine verlässliche Auslegung sicherer Lagerbedingungen nicht möglich war.

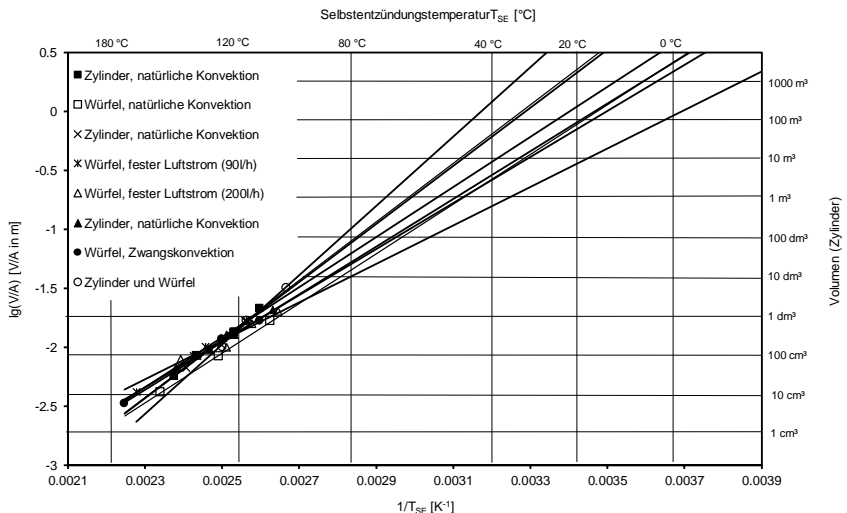


Bild 1: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche 8 verschiedener Laboratorien (Lycopodium)

Unterschiede in den Versuchsaufbauten wurden als mögliche Gründe für diese erheblichen laborspezifischen Unterschiede vermutet, wie z.B.:

- Luftführung im Laborofen (natürliche Konvektion, Zwangskonvektion),
- Ofengröße,
- Aufbau der Probenbehälter,
- Strahlungseinflüsse,
- Messgenauigkeit,
- Position der Thermoelemente zur Bestimmung der Ofentemperatur,
- Größe der Probenbehälter.

Um den Effekt durch Unterschiede in den Versuchsaufbauten zu kompensieren und somit laborspezifische Differenzen zwischen den Messergebnissen zu reduzieren, wurde in EN 15188:2007 empfohlen, eine feste Innenkammer in die Laboröfen zu installieren und mit

einem festgelegten Volumenstrom vorgewärmter Luft zu umspülen. Auf diese Weise sollte erreicht werden, für die Messung besser vergleichbare Bedingungen in der Umgebung der Probe zu gewährleisten und zwar unabhängig von der Art des im jeweiligen Labor verwendeten Laborofens. Dieser Versuchsaufbau weist jedoch Nachteile in der Versuchsführung auf; zudem wurde dessen Eignung nicht validiert. Mit Hilfe eines mehrstufigen Prozesses sollte die Methode daher weiterentwickelt und auf Eignung überprüft werden.

2. Ringversuchsprogramm zur Überarbeitung der EN 15188:2007

Ringversuche dienen unterschiedlichen Zwecken, z.B. der Methodenvvalidierung und der Qualitätssicherung von Laboratorien (Leistungstests). Ringversuche zur Methodenvvalidierung ermöglichen, Aussagen über die Güte der Prüfmethode durch Ermittlung der Wiederhol- und der Vergleichsstandardabweichung zu gewinnen. Die Untersuchung erfolgt in der Regel an identischen Proben unter Verwendung standardisierter Prüfverfahren. Aufgrund der unter Abschnitt 1 aufgeführten Ergebnisse musste man jedoch davon ausgehen, dass die Beschreibung der Prüfmethode zur Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Schüttgütern und Stäuben unzureichend war und demnach nicht zu vergleichbaren Ergebnissen führen konnte.

Ziel musste es daher zunächst sein, vorhandene Unzulänglichkeiten der Methode zu ermitteln und einen Vorschlag für eine verbesserte Methode zu erarbeiten. Dieser erste Schritt erfolgte über ein Kooperationsprogramm der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und dem Syngenta Huddersfield Manufacturing Centre, UK, im Rahmen des CEN/TC 305 „Potentially explosive atmospheres – Explosion prevention and protection, WG 01 „Test methods for determining the flammability characteristics of substances“. Als Ergebnis dieses Untersuchungsprogramms wurde ein modifizierter Versuchsaufbau vorgeschlagen, welcher - unter Verwendung von Laboröfen verschiedenster Bauart - vergleichbare Testbedingungen ermöglichen sollte. Der Focus lag hierbei auf der Installation einer zusätzlichen Drahtnetzabschirmung um die Probe sowie der Verwendung einheitlicher doppelwandiger Probenbehälter mit einem festgelegten Volumenverhältnis.

2.1. Methodenvvalidierung

Der Nachweis der Eignung der modifizierten Methode erfolgte über einen Ringversuch mit 18 Teilnehmern aus 6 europäischen Ländern. In Anlehnung an die zukünftig in der Norm vorgesehene Versuchsdurchführung wurden Instruktionen zum Ablauf der Untersuchungen vorgegeben. Die Untersuchungen erfolgte an einem auf hinreichende Homogenität überprüften Versuchsmaterial. Alle eingegangenen Ergebnisse wurden auf Plausibilität überprüft.

Bild 2 zeigt das Pseudo-Arrhenius Diagramm des Ringversuches 2010/11 [2] (Teilschritt 3, Wiederholungsversuch). Insbesondere im Vergleich mit Bild 1 wird deutlich, dass die Modifizierung der Methode in Kombination mit einer genaueren Beschreibung der Versuchsdurchführung zu einer wesentlich geringeren Streuung der Versuchsergebnisse geführt hat. Die vorgeschlagene Methode kann daher als geeignet angesehen werden.

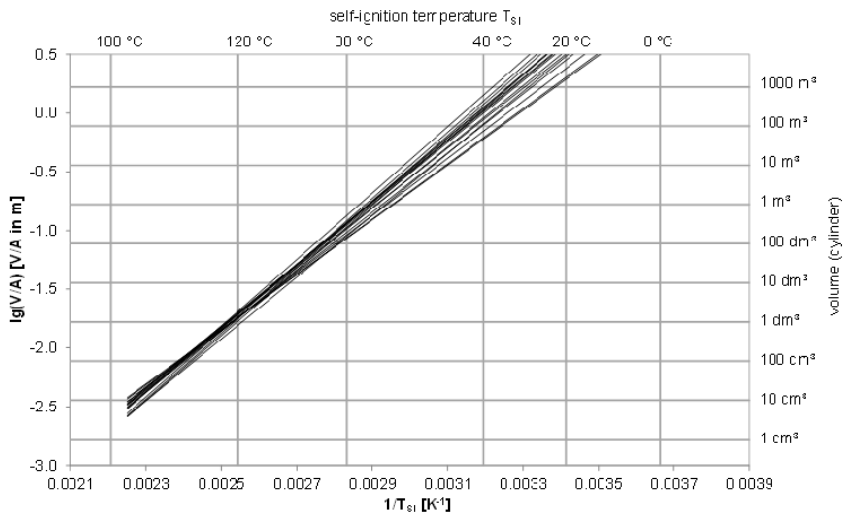


Bild 2: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche Ringversuch 2010/2011, 16 Laboratorien, Aktivkohle [2].

Neben dem Hauptziel des Nachweises der Eignung der vorgeschlagenen Methode erfolgte die Überprüfung auf Faktoren, die einen wesentlichen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse haben könnten. Hierzu zählten:

- Ofenbauart (Hersteller, natürliche oder Zwangskonvektion),
- Ofengröße,
- Größe der zusätzlichen Abschirmung,
- Stabilität der Ofentemperatur, Signalrauschen.

Die aufgeführten Faktoren wiesen in den im Rahmen des Ringversuches aufgetretenen Schwankungsbreiten keinen Einfluss auf die ermittelten Selbstentzündungstemperaturen auf.

Die Auswertung des Ringversuches ermöglichte die Angabe einer (Mess-)Unsicherheit für die mit dem gewählten Material durchgeführte Testreihe (Aktivkohle). Dies ist sowohl für die Ableitung sicherer Lagerparameter als auch für die Ermittlung von Kriterien zur Gefahrguteinstufung von wesentlicher Bedeutung. Für die auf technische Schüttungsgrößen extrapolierten Selbstentzündungstemperaturen ergibt sich die (Mess-)Unsicherheit U wie folgt:

$$U = 2 \cdot \text{Reproduzierbarkeit (volumenabhängig), Vertrauensniveau 95 \% (k = 2)}$$

$$\text{Laborergebnis} = \text{extrapolierte } T_{SE} \pm U$$

Für auf verschiedene Volumina extrapolierte T_{SE} ergeben sich folgende Unsicherheiten:

$$\text{Lagervolumen 27 m}^3: \text{Laborergebnis} = \text{Extrapolierte } T_{SE} \pm 8.0 \text{ K (k=2)}$$

$$\text{Lagervolumen 100 m}^3: \text{Laborergebnis} = \text{Extrapolierte } T_{SE} \pm 8.8 \text{ K (k=2)}$$

$$\text{Lagervolumen 1000 m}^3: \text{Laborergebnis} = \text{Extrapolierte } T_{SE} \pm 9.8 \text{ K (k=2)}$$

Voraussetzung für die Anwendung dieser Unsicherheiten ist, dass die Selbstentzündungstemperaturen gemäß der modifizierten Methode bestimmt wurden und das jeweilige Labor auf geeignete Weise nachgewiesen hat, dass es eine korrekte Messung durchführen kann. Dies kann z.B. durch erfolgreiche Teilnahme an einem Ringversuch (Leistungstest) erfolgen. Die hier angegebenen Unsicherheiten gelten jedoch nur für das untersuchte Material bzw. Materialien mit vergleichbarem Reaktionsverhalten.

Detaillierte Informationen sind dem Ringversuchsbericht [2] zu entnehmen.

2.2. Bestimmung einer allgemeingültigen Messunsicherheit

Die in 2.1. beschriebene Methodvalidierung erfolgte an nur einem Versuchsmaterial. Dadurch war es nicht möglich, eine von der Art des zu untersuchenden Materials unabhängige, allgemeingültige (Mess-)Unsicherheit der Prüfmethode anzugeben. In einem weiteren, abschließenden Schritt der Ringversuchsreihe erfolgte daher die Untersuchung von vier verschiedenen Materialien durch 12 ausgewählte Prüflaboratorien, d.h. diejenigen, die in der ersten Ringversuchsreihe erfolgreich teilgenommen hatten. Für den anschließenden Schritt der Ringversuchsserie wurden Materialien ausgewählt, die einen möglichst weiten, typischen Bereich im Selbstentzündungsverhalten aufwiesen (Aktivierungsenergien, Selbstentzündungstemperaturen). Ausgewählt wurden Magermilchpulver, Braunkohlenstaub, Erbsenmehl sowie Holzpellets.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Bildern 3 - 6 dargestellt. Die dunkelgrauen Linien repräsentieren den Vertrauensbereich (Vertrauensniveau 95 %).

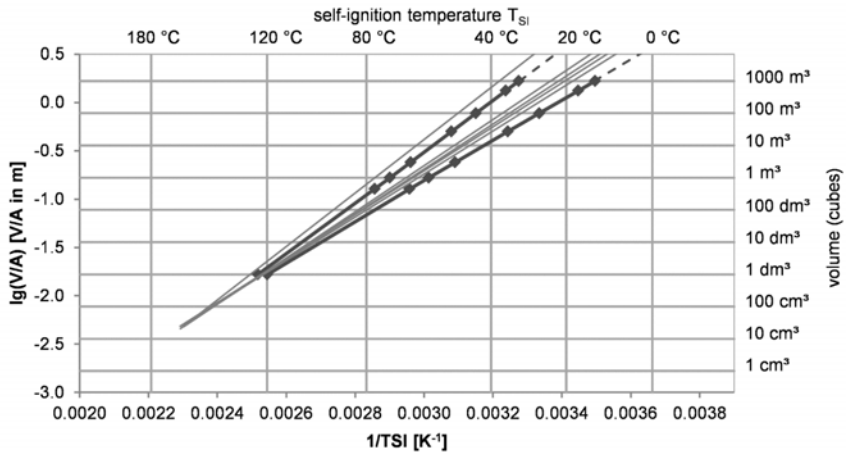


Bild 3: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche Ringversuch 2015/2016, Magermilchpulver [3].

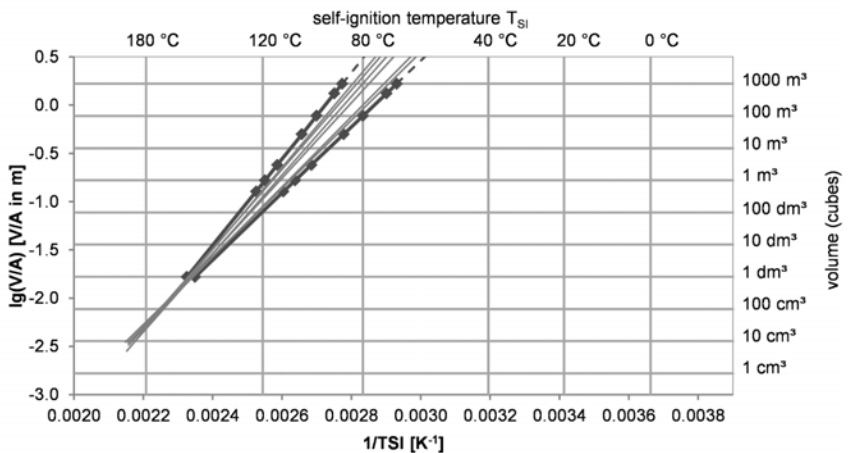


Bild 4: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche Ringversuch 2015/2016, Erbsenmehl [3].

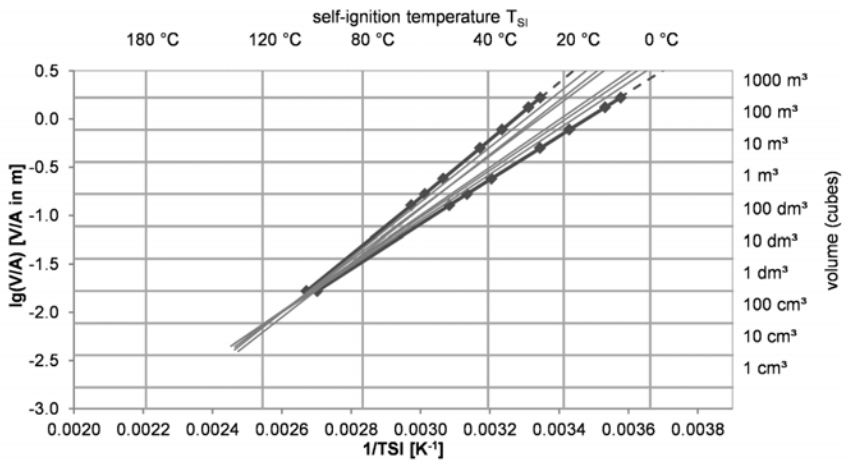


Bild 5: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche Ringversuch 2015/2016, Braunkohlenstaub [3].

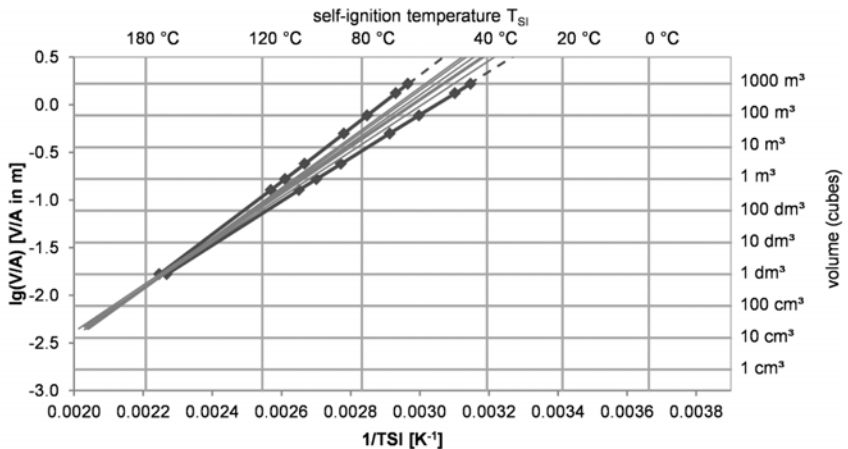


Bild 6: Pseudo-Arrhenius Diagramm, Warmlagerungsversuche Ringversuch 2015/2016, Holzpellets [3].

Die sich aus diesen Ergebnissen ergebenden Unsicherheiten für die extrapolierten Selbstentzündungstemperaturen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Unsicherheit der extrapolierten T_{SE} ($k=2$) für 7 Volumina

Lagervolumen (Würfel) [m³]	Unsicherheit der extrapolierten T_{SE} ($k=2$) [K]
0.45	6.0
1	6.5
3	7.1
27	8.2
100	8.8
500	9.4
1000	9.7

Für den Fall, dass nur ein einziges Probenvolumen untersucht und das Ergebnis direkt und ohne Extrapolation zur Auslegung sicherer Umgebungstemperaturen verwendet werden soll, kann die Messunsicherheit direkt angegeben werden. Für ein Versuchsvolumen von 0.001 m³ (10 cm Würfel) ist diese in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Reproduzierbarkeit und Messunsicherheit ($k=2$) für einen 10 cm Probenwürfel

Testvolumen (Würfel) [m³]	Reproduzierbarkeit [K]	Messunsicherheit U ($k=2$) [K]
0.001	1.0	2.0

Voraussetzung für die Anwendung und Angabe der obig angegebenen (Mess-)Unsicherheiten ist wiederum, dass die Selbstentzündungstemperaturen gemäß der modifizierten Methode bestimmt wurden und das jeweilige Labor auf geeignete Weise nachgewiesen hat, dass es eine korrekte Messung durchführen kann (z.B. durch erfolgreiche Teilnahme am Ringversuch zum Leistungstest).

Detaillierte Informationen sind dem Ringversuchsbericht [3] zu entnehmen.

3. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen am Beispiel des Selbstentzündungsverhaltens von Schüttgütern und Stäuben machen deutlich, dass die in der Vergangenheit etablierten Prüfmethode nicht in jedem Fall zu vergleichbaren und reproduzierbaren Ergebnissen führen. Für die Ableitung von Sicherheitsmaßnahmen durch Experten müssen jedoch verlässliche Daten (Prüfergebnisse aus dem Laborversuch) vorliegen. Eine effektive Möglichkeit, die Schwächen einer Prüfmethode aufzudecken sowie, daraus schlussfolgernd, verbesserte Prüfmethode zu validieren, ist mit der Durchführung von Ringversuchen bzw. Ringversuchsserien gegeben. Die kritische Überprüfung bestehender Methoden sowie die Einleitung von Maßnahmen zu deren Verbesserung sollte durch die verantwortlichen Stellen für Normen und Gesetzgebung erfolgen.

Im aufgeführten Beispiel der Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Schüttgütern und Stäuben ermöglichten die Ringversuche eine nachweisliche Verbesserung der Prüfmethode und final die Angabe einer allgemeingültigen (Mess-)Unsicherheit. Aufgrund des Aufbaus der Ringversuche zur Methodenvalidierung konnten neben der Modifizierung des Versuchsaufbaues zusätzlich Unzulänglichkeiten in der Beschreibung des Versuchsaufbaues und von weiteren Versuchsparametern ermittelt werden. Dies wurde durch umfangreiche Plausibilitätskontrollen der eingegangenen Versuchsergebnisse und Rohdaten der Versuche ermöglicht.

Alle Ergebnisse der Ringversuche fließen in die momentan stattfindende Überarbeitung der DIN EN 15188 ein. Die Ableitung von Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Bränden durch Selbstentzündung wird damit wesentlich verbessert; ebenso das Ermitteln von Kriterien zur Einstufung bzw. Freistellung von Schüttgütern und Stäuben als selbsterhitzungsfähiger Feststoff.

4. Ringversuchsprogramm CEQAT-DGHS

Die hier genannten Ringversuche zur Prüfmethodevalidierung wurden vom CEQAT-DGHS "Centre for quality assurance for testing of dangerous goods and hazardous substances" begleitet, welches seit 2007 von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin in Zusammenarbeit mit der QuoData Gesellschaft für Qualitätsmanagement und Statistik mbH, Dresden, und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, geführt wird. CEQAT-DGHS unterstützt die Fortentwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen durch ein Ringversuchsprogramm zur Ermittlung physikalischer Gefahren von Chemikalien, durch Schulungen und Veranstaltungen. Weitere Informationen sind auf

der Homepage der BAM unter Fachportale/ „Referenzmaterialien, Referenzverfahren, Referenzorganismen, Ringversuche und Eignungsprüfungen“ zu finden.

Literatur

- [1] DIN EN 15188:2007 Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations, Beuth Verlag, Berlin

- [2] Kunath K, Lüth P, Schmidt M, Simon K, Uhlig S (2013) Evaluation of the interlaboratory test 2010-2011 on the method DIN EN15188:2007 "Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations" Final report, BAM, Berlin.
ISBN 978-3-9815748-4-5
Publikationsserver der BAM: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/home>

- [3] Frost K, Lüth P, Schmidt M, Simon K, Uhlig S (2016) Evaluation of the interlaboratory test 2016-2016 on the method DIN EN15188:2007 "Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations" Final report, BAM, Berlin.
ISBN 978-3-9818270-0-2
Publikationsserver der BAM: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/home>

Zündquelle Glimmnest: Mythos oder Realität? Erfahrungen – Wissen – Kenntnislücken

Ing. **B. Liske**, M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. **U. Barth**,
Bergische Universität Wuppertal, Deutschland
Fachgebiet Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung

Kurzfassung

Bei staubführenden Prozessen mit brennbaren Stoffen ist die Zündquelle Glimmnest ein ereignisauslösendes Moment, zu dem noch viele Fragen offen sind. Des Weiteren liefern retrospektive Ereignisanalysen häufig zwar Erkenntnisse, dass die Zündquelle Glimmnest in den Schadensfällen die Ursache bildet, aber aufgrund der Schadensbilder ist eine Charakterisierung der Glimmnester äußerst schwierig. Daher sind nur bedingt Kenntnisse über Glimmnester vorhanden. In der Vergangenheit wurden primär Untersuchungen hinsichtlich der Zündwirksamkeit jener Glimmnester durchgeführt. Damit die Zündquelle besser beherrscht werden kann, sollte sie so früh wie möglich verhindert werden, weshalb die Bildung, die Mobilität und die Zündwirksamkeit der Glimmnester einen wesentlichen Untersuchungsschwerpunkt in Zukunft ausmachen sollten. Des Weiteren zeigt eine systematische Betrachtung der Zündquelle, dass die Glimmnestbildung und das damit einhergehende Brandereignis ein häufiges Primäreignis und die Zündung eines Staub/Luft-Gemisches ein Sekundäreignis darstellt. Dieser Umstand unterstreicht die Notwendigkeit, dass Explosions- und flankierender Brandschutz in einem kohärenten Kontext zu betrachten sind. Versuchsergebnisse und theoretische Überlegungen verdeutlichen zudem, dass Glimmnester unter bestimmten Bedingungen als zündwirksam anzusehen sind. Eine Glimmnestbildung ist von vielen stofflichen und prozessbedingten Parametern determiniert, was einen komplizierten Einfluss auf die Zündwirksamkeit haben kann. In diesem Beitrag wird zunächst das Wissen über Glimmnester zusammenfassend aufgezeigt. Im weiteren Verlauf erfolgt eine systematische Einordnung der Zündquelle Glimmnest, inklusive Systemmodellierung. Auf Grundlage des gebildeten Systems werden punktuelle Erfahrungen seitens des Verfassers geschildert. Abschließend erfolgen eine Diskussion und ein Ausblick, indem auch Kenntnislücken und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

Abstract

In dust-carrying processes with combustible substances, the ignition source glowing nest is an event-triggering possibility, with different lacks of knowledge. Furthermore, retrospective

analyses often provide evidence that the glowing nests are the cause of the damage, but a characterisation of the glowing nests is often not possible. In the past investigations were conducted with regard to the ignition efficiency of these glowing nests. To prevent the glowing nests in an early state it is necessary to investigate the formation, mobility and ignition efficiency of the glowing nests. Furthermore, a systematic consideration of the ignition source shows that the formation of glowing nests is a frequent primary event and the ignition of a dust/air mixture is a secondary event. This fact underlines the need for explosion safety and flanking fire safety to be assessed in a coherent context. Experimental results and theoretical considerations also show that glowing nests can be regarded as ignitable under certain conditions. The formation of a glowing nest is determined by many material and process-related parameters, which can have a complicated influence on the ignition efficiency. In this article, the knowledge about glowing nests is summarised. Furthermore, a systematic classification of the ignition source, including a model, takes place. On the basis of the educated model, the author draws up a range of experiences. Finally, a discussion and an outlook take place.

1. Problemstellung

Glimmnester stellen ein ereignisauslösendes Moment im staubführenden Prozess dar. Aufgrund verschiedenster Ursachen, z.B. durch Selbsterwärmung, oder durch erwärmte Fremdkörper können Glimmnester im Prozess gebildet und weitertransportiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die Glimmnester in den Prozess eingetragen werden. Explosions- und Brandereignisse sind die Folge, vgl. [1]. Glimmnester lassen sich zwar häufig als Ursache identifizieren, eine detaillierte retrospektive Einschätzung über die Ausprägung der Glimmnester, in beispielsweise Größe, Festigkeit und Wärmefreisetzungsrate sind aber aufgrund der Schadensbilder in vielen Fällen nicht mehr möglich, vgl. [2]. Diese aufgezählten Umstände erschweren die Zündquellenbetrachtungen in staubführenden industriellen Anlagen. Auch die Zündquellenvermeidung gestaltet sich im Falle der Zündquelle Glimmnest als äußerst kompliziert. Zusammenfassend müssen die Phasen der Glimmnestbildung, die Mobilität (inkl. Ein- und Austrag in und aus dem Prozess) sowie die Zündwilligkeit betrachtet werden.

2. Wissenschaftliche Untersuchungserkenntnisse

Die Zündwirksamkeit der Glimmnester ist ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt in wissenschaftlichen Betrachtungen. So berichten Alfert et al. bereits 1988 [2] über diverse Forschungsvorhaben, die das Zündverhalten von Glimmnestern in Verbindung mit einem Staub/Luft-Gemisch beispielsweise im freien Fall und in Rohrleitungen untersuchten. Als

eine wesentliche Erkenntnis wurde festgestellt, dass Glimmnester in einem pneumatischen Fördersystem effektiv heruntergekühlt wurden und keine Staubexplosion initiieren konnten. Ähnliche Aussagen konnten auch über Glimmnester im freien Fall getroffen werden. In diesem Szenario wurde die Zündwirksamkeit der Glimmnester durch das Aufbrechen effektiv gesteigert. Holzstaub, Korkstaub und Holzkohle wurden in den Versuchen als Materialien für die Glimmnester verwendet. Jedoch wurden unterschiedliche Materialien als Staub/Luft-Gemisch verwendet, was die Einordnung der Ergebnisse erschwert. Gummer und Lunn [3] haben 2003 ähnliche Untersuchungen zur Zündwirksamkeit durchgeführt und gezeigt, dass eine große Differenz zwischen der Mindestzündtemperatur des Staub/Luft-Gemisches und der Glimmnesttemperatur bestehen muss, um eine Zündung des Staub/Luft-Gemisches zu ermöglichen. Jaeger [4] untersuchte 1988 ebenfalls die Zündwirksamkeit von Glimmnestern in der 20 Liter Laborapparatur. Dabei zeigte er, dass Glimmnester eine Oberflächentemperatur von 400 °C bis 700 °C aufweisen und unter Einfluss einer leichten Luftanfachung bis zu 900 °C aufbringen können. Zusätzlich konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Oberfläche der Glimmnester und dem Zündverhalten festgestellt werden. Gegenüber anderen konventionellen Zündquellen benötigten sie eine längere Zeit, die Zündung des Staub/Luft-Gemisches zu initiieren. Zockoll [5] zeigte 1988 mit Fallversuchen, dass Glimmnester aus Magermilchpulver nur unter bestimmten Bedingungen in der Lage sind, aufgewirbeltes Magermilchpulver zu entzünden. Zündungen konnten erst im Temperaturbereich von 1200 °C festgestellt werden.

Fundiertes Wissen über die Zündwirksamkeit der Glimmnester hilft, das tatsächliche Risiko durch Glimmnester besser einzuschätzen. In erster Linie ist ein Wissen über die Glimmnestbildung wichtig und kann einen wesentlichen Beitrag zur Zündquellenvermeidung aufbieten, vgl. [5]. Hinsichtlich der Glimmnestbildung wurde auch im BIA Report [1] berichtet, dass durch Reib- und Schleifvorgänge erzeugte heiße Oberflächen in vielen Fällen eine Ursache für ein Glimmnest und nachfolgend ein größeres Schadensereignis darstellen können. Krause und Schmidt [6] zeigten 2001 in diesem Zusammenhang, dass in eine Staubschüttung eingebrachte Fremdkörper mit einer Temperatur von ca. 435 °C einen Schmelbrand initiieren konnten.

3. Betriebliche Erfahrungen

3.1 Systematische Betrachtung

Es wurde festgestellt, dass Glimmnester die Folge einer gekoppelten Ursachen-Wirkungskette sind und folglich als Zündquellen im Sinne des Explosions- und Brandschutzes fungieren können. Aufgrund dessen wurde eine systematische Betrachtung der Zünd-

quelle Glimmnest durchgeführt. In Bild 1 ist das daraus entwickelte Erkenntnismodell dargestellt. Die Grundlage der Glimmnestbildung bildet in der Regel eine unerwünschte Begebenheit im Prozess, wie eine Abweichung von Prozessparametern. Die große Vielzahl an Variationsmöglichkeiten stofflicher und anlagentechnischer Einflussgrößen erlaubt lediglich eine grobe Unterteilung der Bildungsszenarien. Hinsichtlich der potentiellen Zündquellen sind die 13 Zündquellen nach DIN 1127-1 [7] zur Initiierung eines Glimm- oder Schwelbrandes zu betrachten. So kann zwischen der Fremdzündung und der Selbstentzündung eines abgelagerten Staubes differenziert werden. Als wesentliche wirksame Zündquellen zur Glimmnestbildung können durch Schleif- und Reibvorgänge erzeugte heiße Oberflächen, die Selbsterwärmung oder erwärmte Fremdkörper dienen, vgl. [6] und [8]. Die beschriebenen Zündquellen können als primäre Zündquellen angesehen werden. Das Vorhandensein eines brennbaren Materials und eines Oxidationsmittels bilden die klassischen Rahmenbedingungen in der Glimmnestbildung. Exotherme Reaktionen in Form von Schwel- und Glimmreaktionen erzeugen die notwendige Zündenergie im aktiven Glimmnest, die eine Zündung eines aufgewirbelten Staub/Luft-Gemisches als sekundäres Ereignis ermöglicht.

Zum Aufrechterhalten der Verbrennungsprozesse muss dem Glimmnest weiterhin eine geringe Menge an Sauerstoff zur Verfügung stehen. Dem Glimmnest bieten sich im Anschluss drei Möglichkeiten der Zündung. Durch einen direkten Kontakt mit einem aufgewirbelten Staub kann das Glimmnest eine Staubexplosion verursachen und fungiert so als sekundäre Zündquelle. Der Kontakt mit abgelagertem Brennstoff kann ebenfalls eine Folge darstellen. Im abgelagerten Staub kann sich die heterogene Verbrennung ausbreiten und so ein größeres Brandereignis in dem Prozess erzeugen. Als dritte Möglichkeit kann sich das Glimmnest mit Hilfe von mechanischen Beanspruchungen, wie beispielsweise Vibrationen, Schwingungen oder anderen Beanspruchungsarten lösen und mobilisiert werden. Ein pneumatischer Transport wäre ebenso denkbar, wie der Transport über einen Elevator oder ähnliches. In diesem Fall liegt das Glimmnest wieder als Zündquelle im nachgelagerten Prozessschritt vor. Im Bild 1 sind zusätzlich Barrieren abgebildet, die eine mögliche Intervention seitens der Betriebssicherheit ermöglichen. Dabei wären beispielsweise klassische Maßnahmen des inhärenten, kausal- und final-orientierten Explosions- und Brandschutzes denkbar.

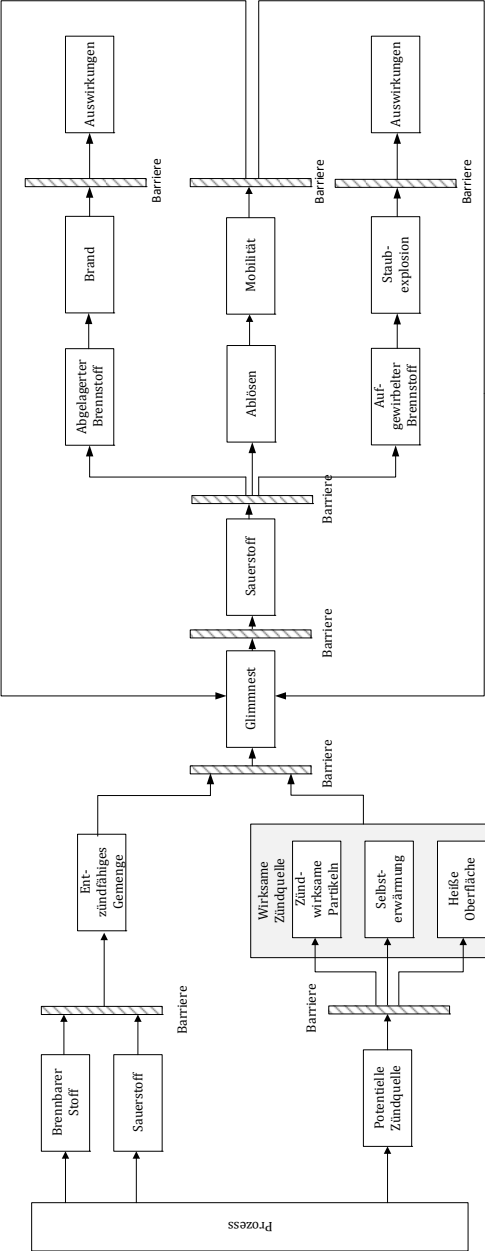


Bild 1: Erkenntnismodell der Zündquelle Glimmnest, in Anlehnung an [9]

3.2 Bildung von Glimmnestern

Wie im Bild 1 dargestellt ist die Glimmnestbildung ein essenzieller Schritt, der die Ausprägung der Glimmnester und folglich die Zündwirksamkeit beeinflussen kann. Der initiale Schritt erfolgt durch die Entzündung eines brennbaren Feststoffs mittels wirksamen Zündquellen. Als typische Zündquellen gelten zündwirksame Partikeln, Selbstentzündung sowie heiße Oberflächen.

Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass bereits erwärmte metallische Körper mit einer Oberflächentemperatur von 550 °C - hier in Form von Kugeln - eine Entzündung einer abgelagerten Staubschicht aus Buchenstaub bewirken können. Dabei nimmt die Zündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fremdkörpergröße und Temperatur zu, vgl. [8]. Dem entgegen führten erwärmte Metallkugeln, die bei einer Ofentemperatur von 900 °C in Milchpulver und Kaffeeweißer gelegt wurden, nicht zu einem selbstständig voranschreitenden Schwelbrand. Es wurde vielmehr ein kugelförmiges Agglomerat aus Milchpulver um die Metallkugel gebildet, vgl. [10].

Besonders in Trocknungsprozessen, wie bei der Sprühtrocknung von Milch kann es zu exothermen Reaktionen kommen, die eine Selbsterwärmung und folglich eine Selbstentzündung einleiten können. Dazu muss die Wärmeproduktionsrate der exothermen Reaktionen das Wärmeabfuhrvermögen der Staubschüttung übersteigen. Die geometrische Formgebung ist auch hier vom entsprechenden Bildungsszenario abhängig, vgl. [11]. So sind im Sprühtrockner Wandablagerungen durch Milchpulver möglich, die eine plattenförmige Ablagerungsschicht zur Folge haben können. Dabei wirkt die Wandung des Sprühtrockners als heiße Oberfläche und fördert die Bildung von Ablagerungen durch Schmelzvorgänge und weiterhin auch einer Erwärmung der abgelagerten Schicht. Dem entgegen können Leckagen an den Düsen eine kugelförmige Ablagerung bewirken.

Untersuchungen zum Selbstentzündungsverhalten mit Milchpulver und Buche haben gezeigt, dass die Feuchtigkeit des Materials einen direkten Einfluss auf den Temperaturverlauf im Milchpulver aufweist. Dazu wurde destilliertes Wasser in eine Milchpulverschüttung in einem 200 ml Drahtnetzkorb injiziert und anschließend in einen überkritisch temperierten Warmlagerschrank mit einer Temperatur von 200 °C gestellt. Entgegen dem Milchpulver war beim Buchenholz kein markanter Einfluss der Feuchtigkeit auf die Exothermie erkennbar, vgl. [12]. Die Erkenntnisse deuten auf eine Reaktion hin, die durch Feuchtigkeit unterstützt wird. Durch thermische Analysen mittels gekoppelter Thermogravimetrie (TGA) und Differential Scanning Calorimetry (DSC) konnten Hinweise auf die Maillard-Reaktionen als die einleitende Reaktion in der Selbsterwärmung von Milchpulver gefunden werden, vgl. [13]. Die Maillard-Reaktionen werden durch die Feuchtigkeit beeinflusst, was die erhöhten Reaktions-

raten in den Versuchen erklärt, vgl. [14]. Diese Beobachtungen zeigen bereits, dass die Thematik „Glimmnest“ nachhaltig von stofflichen und prozessbedingten Einflussparametern determiniert wird und die Materialien individuell hinsichtlich des Zersetzungsverhaltens untersucht werden müssen. Als eine bewährte Methode können TGA/DSC Untersuchungen unter verschiedenen Atmosphären, möglichst inert und luft-ähnlich, gewertet werden. Beispiele finden sich in [11].

3.3 Zündmechanismus von Glimmnestern

Des Weiteren stellt sich die Frage, wie Glimmnester als Zündquelle fungieren können. Dabei unterscheidet sich die Zündwirksamkeit zwischen Glimmnestern und beispielsweise konventionellen heißen Oberflächen. Letztgenannte Zündquellen zeichnen sich vornehmlich durch eine konstante Wärmefreisetzung über die Oberfläche aus. Glimmnester bilden chemisch betrachtet ein eigenes Reaktionssystem, wobei das sichtbare Glimmen immer an der Oberfläche des Glimmnests und in örtlicher Abhängigkeit zur Luftströmung keine konstante Wärmefreisetzungsrates aufweist. Bei einer längeren Betrachtung der Glimmnester wird die Oberflächentemperatur durch den zugeführten Sauerstoff in das Reaktionssystem determiniert. Somit kommt es lokal zu erhöhten Temperaturen der Glimmnester. An deren Oberfläche, zwischen Feststoff und Umgebungsluft, bildet sich eine reaktive Grenzschicht. Durch den Verbrennungsvorgang wird Asche als festes Reaktionsprodukt gebildet, welche sich an der Glimmnestoberfläche ablegt. Wird dieser Effekt in Relation zu einem aufgewirbelten Staub/Luft-Gemisch betrachtet, kann an den glimmenden Bereichen der Glimmnester mit einer erhöhten Zündwirksamkeit gerechnet werden. Jedoch erhöht sich andererseits durch das Glimmen und gemäß der van't Hoffschen Regel auch die Reaktionsgeschwindigkeit [15] und es werden an diesen Stellen mehr gasförmige Produkte aber auch Asche als Folgeprodukte gebildet. Jene Asche kann wiederum eine energetische Barriere bilden und die lokale Zündwirksamkeit des Glimmnests reduzieren. Diese Theorie erklärt auch die Beobachtungen von [2], [3] und [5]. Schematisch kann die Entzündung eines aufgewirbelten Staub/Luft-Gemisches mit dem folgenden Modell in Bild 2 nachvollzogen werden. Die einzelnen Partikeln begeben sich in die reaktive Grenzschicht des Glimmnests. Die seitens des Glimmnests bereitgestellte Energie, in Form von Wärme muss zwangsläufig das Wärmeabfuhrvermögen der aufgewirbelten Staubpartikeln weit überschreiten. Es erfolgt ein Wärmetransport zwischen Glimmnest und Partikel. Durch die hohe Wärmedifferenz zwischen Glimmnest und Partikeln wird eine schnelle Zersetzung und nachfolgend Verbrennung der Partikeln initiiert. Als Folge der schlagartigen Zersetzung werden gasförmige Brandzersetzungsprodukte gebildet, die sich an dem Glimmnest entzünden und eine Flamme bilden. Benachbarte aufge-

wirbelte Partikeln werden von der Flamme erfasst und es erfolgt ebenfalls eine Zersetzung. Durch eine dominoartige Ausbreitung der Phänomene erfolgt schließlich eine Staubexplosion. Versuche zeigten, dass labormaßstäbliche Glimmnester nicht zwingend zündwirksam sind. Dieser Umstand wurde mit einem Glimmnest aus Milchpulver in der Hartmannapparatur untersucht. Das Glimmnest wies eine Temperatur von $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Durch die Hartmannapparatur konnte unter Variation der Staubkonzentration eine reproduzierbare Dispersion des Staubes erzeugt werden. Obwohl die Mindestzündtemperatur (MZT) des Milchpulvers $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt, konnte mit den erzeugten Glimmnestern keine Entzündung des Staub/Luft-Gemisches beobachtet werden. Vielmehr kühlten die auf das Glimmnest auftreffenden Partikeln die Oberfläche des Glimmnestes ab, vgl. [16]. Die Partikeln verschmolzen mit dem Glimmnest und deckten so die Oberfläche ab, sodass die Reaktionszone der Glimmnester gehemmt wurde. Ähnliche Erkenntnisse lieferte auch Zockoll, vgl. [5]. Eine zu geringe Zündenergie der Glimmnester könnte eine mögliche Ursache darstellen.

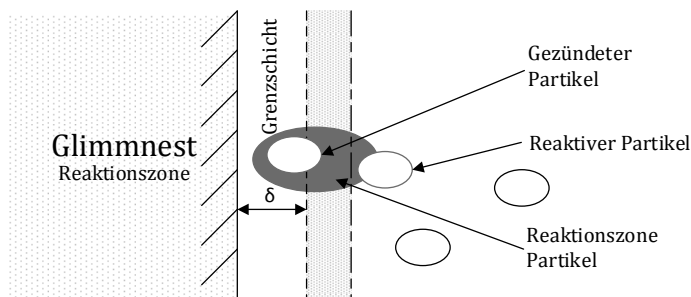


Bild 2: Schematische Darstellung der Zündung eines Partikels durch ein Glimmnest

3.4 Mobilität von Glimmnestern

Die pneumatische Förderung von Stäuben ist eine bewährte und häufig anzutreffende Transportmethode in staubführenden Anlagen. Aufgrund von mechanischen Beanspruchungen, wie beispielsweise Vibrationen, Schwingungen oder Luftströmungen, ist ein Ablösen der Glimmnester möglich. Des Weiteren sind diese Ablagerungen aufgrund der geringen Masse transportfähig. Mit Hilfe einer Versuchsapparatur wurde das Verhalten von Glimmnestern in pneumatischen Förderanlagen untersucht. Die Versuchsapparatur bestand aus einer 3 m langen Rohrleitung mit einem Rohrdurchmesser von 150 mm. Die Rohrleitung war mit einem Sichtfenster aus Makrolon ausgerüstet. Die Strömung mit einer durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit von ca. 16 m/s wurde durch einen Ventilator am Ende der Rohrlei-

tung initiiert. Als Materialien wurden Glimmnester aus Buchenholzstaub und Milchpulver in einem Muffelofen erzeugt.

Im Zuge der Versuche konnte festgestellt werden, dass die Glimmnester aus Buchenholzstaub zwar agglomerierten, aber anschließend ein lockeres Gefüge erzeugten. Dem entgegen bildete das Milchpulver ein festes Gefüge. Dieser Umstand zeigte sich ebenfalls im pneumatischen Fördersystem. Die Glimmnester aus Buchenholzstaub zerstäubten in der Strömung und bildeten einen Schwarm an glimmenden Teilchen, vgl. Bild 3. Auch nach Verlassen des Fördersystems konnte eine Aktivität der glimmenden Teilchen im Auffangbehälter mittels Wärmebildkamera nachgewiesen werden. Ein nachträglicher Versuch mittels nachgestellten glimmenden Holzpartikeln (ca. 2 mm Kantenlänge) zeigte eine hohe Zündwirksamkeit dieser Glimmpartikeln in einer abgelagerten Holzstaubschüttung. Dem entgegen zeigten die Glimmnester aus Milchpulver ein anderes Verhalten. Im Auffangbehälter konnten diese Glimmnester als ganze Stücke aufgefunden werden. Jedoch besteht beispielsweise durch eine Kollision des Glimmnests an der Rohrwandung eines 90 ° Winkels die Möglichkeit des Absplittens oder sogar des Aufbrechens. Mit Glimmnestern aus Milchpulver wurde ebenfalls die Zündwirksamkeit auf einer Milchpulverschüttung überprüft. Zusammenfassend konnte keine Brandausbreitung in der Schüttung festgestellt werden, vgl. [17].

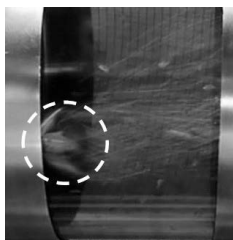


Bild 3: Strömendes Glimmnest Buchenstaub, Strömungsrichtung von links nach rechts, [17]

4. Diskussion und Ausblick

Trotz des durch Zockolls seinerzeit veröffentlichten Beitrags [5] und den in diesem Bericht ausgeführten Erkenntnissen, muss der Zündquelle „Glimmnest“ auch rund drei Dekaden später eine sehr hohe Zündwirksamkeit unterstellt werden. Statistische Ausführungen belegen dies ebenfalls mit Häufigkeiten, vgl. [1, 19]. Sofern keine günstigen Bedingungen für eine direkte Staubexplosion bestehen, kann die Glimmnestbildung ein möglicher kausaler Zwischenschritt sein, der anschließend final dennoch eine Staubexplosion oder einen Feststoffbrand verursacht. Daher können Glimmnester häufiger als Zündquelle fungieren, als bisher angenommen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den Brandschutz kausal mit dem

Explosionsschutz zu verknüpfen und beispielsweise die Ansätze, bei Lottermann [20] nachzulesen, zur kohärenten Explosions- und Brandsicherheit weiter auszuarbeiten. Durch den Begriff der sekundären Zündquelle ist eine weitere Verbindung zwischen Explosions- und Brandschutz ersichtlich und erleichtert die phänomenologische Beschreibung. Der Zusammenhang ist in Bild 4 exemplarisch unter Anwendung von Ursache-Wirkungsketten nach Compes [21] dargestellt.

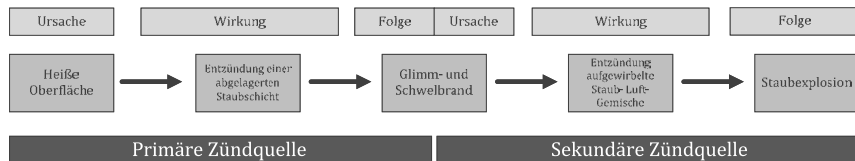


Bild 4: Beispielhafte Ursache-Wirkungskette zur Veranschaulichung der primären und sekundären Zündquellen

Aufgrund der Tatsache, dass die Zündquelle Glimmnest direkt von den brennbaren Materialien, deren Bestandteilen und dem Prozess abhängig ist, ist eine realitätsnahe labortechnische Nachbildung oder Simulation der Glimmnester äußerst komplex. Aufgrund dessen sollten zukünftig Methoden ermittelt werden, welche die Glimmnestbildungsfähigkeit von Materialien einordnen können. Dazu könnte neben der von Jaeger [4] benannten Brennzahl und den sicherheitstechnischen Kenngrößen eine mikroskopische, reaktionstechnische Bewertung sinnvoll sein. Außerdem könnten thermische Analysen dazu wertvolle Erkenntnisse liefern. Aufgrund der vielseitigen Bildungs- und Wirkungsmöglichkeiten ist das ausgehende Risiko von Glimmnestern nahezu nicht zu greifen. Jedoch kann die aufgezeigte Systematisierung eine Unterstützung darstellen, sodass das Risiko durch Glimmnester betrachtet werden kann. Durch die aufgezeigten Barrieren können potentielle Interventionsmöglichkeiten direkt zugeordnet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Zündquelle Glimmnest keinen Mythos, sondern häufig Realität in staubführenden Anlagen darstellt.

Literaturangaben

- [1] Jeske, A. u. Beck, H.: Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V. 1997
- [2] Alfert, F., Eckhoff, R. K. u. Fuhre, K.: Zündwirksamkeit von Glimmnestern und heißen Gegenständen in industriellen Anlagen. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988, S. 303–319
- [3] Gummer, J. u. Lunn, G.: Ignitions of explosive dust clouds by smouldering and flaming agglomerates. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 16 (2003) 1, S. 27–32
- [4] Jaeger, N.: Zündwirksamkeit von Glimmnestern in Staub/Luft-Gemischen. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988, S. 263–294
- [5] Zockoll, C.: Zündwirksamkeit von Glimmnestern in Staub/Luft-Gemischen. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988, S. 295–301
- [6] Krause, U. u. Schmidt, M.: Untersuchungen zur Zündung und Ausbreitung von Schwelbränden in Stäuben und Schüttungen. Sichere Handhabung brennbarer Stäube. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001, S. 397–410
- [7] DIN Norm 1127-1; 2011. Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz Teil 1 Grundlagen und Methodik
- [8] Bechem, J., Liske, B. u. Vespermann, N.: Ignition Source: Hot Particle. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag. Magdeburg 2017
- [9] Markowski, A.: exLOPA for explosion risks assessment. *Journal of Hazardous Materials* 142 (2007) 3, S. 669-676
- [10] Schmidt, S.: Brandtechnologische Untersuchungen von Verbrennungsvorgängen in abgelagerten Stäuben, Bergische Universität Wuppertal Bachelor-Thesis, Betreuer Barth U. und Maiwald K., Wuppertal 2016
- [11] Liske, B.: Analyse der chemischen und physikalischen Selbsterwärmungsprozesse von Milchpulverablagerungen. Ein Phänomen in Sprühtrocknungsanlagen, Bergische Universität Wuppertal Master-Thesis, Betreuer Barth U. und Maiwald K., Wuppertal 2016
- [12] Engels, L.: Analyse potentieller Einflussfaktoren auf das Selbstentzündungsverhalten von Feststoffschüttungen, Bergische Universität Wuppertal Bachelor-Thesis, Betreuer Barth U. und Liske B., Wuppertal 2017
- [13] Liske, B., Maiwald, K., Lerena Eskenazi, P. u. Barth, U.: The Relationship between a Thermal Analysis and a Safety-Relevant Problem. *Hazards* 27. 2017

- [14] Belitz, H.-D., Grosch, W. u. Schieberle, P.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Mit 634 Tabellen. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer 2008
- [15] Mortimer, C. E. u. Müller, U.: Chemie. Das Basiswissen der Chemie ; 520 Formelbilder, 126 Tabellen. Stuttgart: Thieme 2007
- [16] Berghaus, C.: Reproduzierbarkeit der Glimmnestherstellung zur Untersuchung des Verhaltens in partikelbeladenen Strömungen, Bergische Universität Wuppertal Bachelor-Thesis, Betreuer Barth U. und Maiwald K., Wuppertal 2016
- [17] Drost, D.: Qualitative und sensorische Beurteilung von Glimmnestern in pneumatischen Fördersystemen, Bergische Universität Wuppertal Bachelor-Thesis, Betreuer, Barth U. und Liske B., Wuppertal 2017
- [18] Jeske, A. u. Beck, H.: Dokumentation Staubexplosion. Analyse und Einzelfalldarstellung. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V. 1987
- [19] Bartknecht, W. u. Zwahlen, G.: Explosionsschutz. Grundlagen und Anwendung, Bd. 1993. Berlin: Springer Berlin 2013
- [20] Lottermann, J. W.: Ansätze zur integrierten Brand- und Explosionssicherheit. Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staubführender Anlagen. Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2012. Berlin: Pro Business 2012
- [21] Gesellschaft für Sicherheitswissenschaften (Hrsg.): Risiken komplizierter Systeme - ihre komplexe Beurteilung und Behandlung. Wuppertal 1979

Mechanisch erzeugte Zündquellen

Entstehung und Zündwirksamkeit

Dr.-Ing. **Michael Beyer**,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Kurzfassung

Beim Betrieb von mechanischen Geräten in explosionsgefährdeten Bereichen können Kontakte mit Trockenreibung auftreten, z. B. bei Schmiermittelverlust oder bei Lagerschäden. Dies kann zu zündwirksamen heißen Oberflächen führen, abhängig von den beteiligten Materialien, der Relativgeschwindigkeit, dem Reibungskoeffizienten, der Kontaktfläche und der Kontaktkraft. Darüber hinaus können heiße Partikel abgelöst werden (mechanisch erzeugte Funken), die bei Überschreitung einer Temperaturschwelle mit dem Luftsauerstoff verbrannt werden, und damit ebenfalls zündwirksam werden können. Sie können die explosionsfähigen Atmosphären direkt zünden oder in abgelagerte Staubschichten fallen und Glimmnester bilden, aus denen sich wiederum Zündquellen entwickeln können. In neueren Studien haben sich die heißen Oberflächen bei Trockenreibung im Vergleich zu den Funken als sehr zündfähig erwiesen [1]. Dies wurde in einem mehrjährigen Projekt untersucht [2-7]. Hier werden die wichtigsten Erkenntnisse über die Entstehung und Zündwirksamkeit von heißen Oberflächen vorgestellt, ohne in wissenschaftliche Details zu gehen.

Abstract

When using mechanical equipment in potentially explosive atmospheres, dry friction contacts may occur, e. g. in case of lubricant loss or bearing damage. These can become the ignition source "hot surface", depending on the materials involved, the relative velocity, the coefficient of friction, the contact area and the contact force. In addition, hot particles may be separated (mechanically generated sparks) which, when a temperature threshold is exceeded, are combusted with the atmospheric oxygen and thus could also become an effective ignition source. They can directly ignite the explosive atmospheres or fall into deposited dust layers and form smouldering nests from which ignition sources can develop. In recent studies, the hot surfaces have been found to be very ignitable in the case of dry friction compared to the sparks [1]. This has been examined in a multi-year project [2-7]. Here the most important

findings on the formation and ignition efficiency of hot surfaces are presented without going into scientific details.

1. Einleitung

Mechanische erzeugte Zündquellen sind neben den elektrischen Zündquellen wegen der Vielzahl der Anwendungen die wichtigste potenzielle Zündquelle in explosionsgefährdeten Bereichen. Als mechanisch erzeugte Zündquellen gelten durch Reib- oder Schlagvorgänge entstehende heiße Oberflächen sowie abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur (mechanisch erzeugte Funken). Dazu kommt in staubexplosionsgefährdeten Bereichen noch die Entstehung von Glimmnestern, wenn die oben genannten heißen Partikel in abgelagerte Staubschichten fallen.

Explosionssgeschützte Geräte und Komponenten müssen nach der Explosionsschutz-Richtlinie 2014/34/EU (ATEX) während ihrer gesamten Lebensdauer das Wirksamwerden potenzieller Zündquellen wie heiße Oberflächen oder mechanisch erzeugte Funken sicher vermeiden. Dies ist vom Gerätehersteller in einer Zündgefahrenbewertung in Abhängigkeit von den Fehlerzuständen detailliert darzulegen. Auch Betreiber von solchen Geräten gelten als Hersteller, wenn sie die Geräte wesentlich verändern oder selbst Geräte für ihren speziellen Bedarf erstellen.

Typische mechanische Geräte mit potentiellen Zündquellen sind alle Maschinen bzw. Maschinenelemente mit Relativbewegungen der einzelnen Bauteile zueinander. Typische Fehlerzustände mit Reibkontakt sind z.B. Lagerschäden, Vibrationen, Gehäuseverformungen, Überlast, Schmiermittelverlust oder Fremdkörpereintrag [8].

Mechanische Geräte für gasexplosionsgefährdete Bereiche wurden u. a. im Projekt NAMEX (Normative Anforderungen zur sicherheitsgerechten Konstruktion explosionsgeschützter mechanischer Geräte) untersucht. Hier gibt es etliche Ergebnisse, z.B. zur Entstehung von heißen Oberflächen in Reibkontakten, die auf Geräte in staubexplosionsgefährdeten Bereichen übertragbar sind. Andere Ergebnisse, wie z.B. das Zündverhalten des explosionsfähigen Gemisches, können dagegen nicht von Gasen und Dämpfen auf Stäube übertragen werden. Darüber hinaus gibt es auch Geräte, die typischerweise nur in staubverarbeitenden Betrieben eingesetzt werden, z.B. Förderbänder, Becherwerke, Mischer oder Zellenradschleusen. Sie enthalten in der Regel eine große Anzahl potentieller mechanischer Zündquellen. Anders als in gasexplosionsgefährdeten Bereichen können diese Zündgefahren je nach Anwendung zu einem deutlich größeren Anteil bereits im Normalbetrieb auftreten, z.B. bei Mahlvorgängen.

2. Aktueller Stand der Forschung

Die aus Veröffentlichungen bekannten Ergebnisse sind unten aufgeführt. In den folgenden Kapiteln sollen dann einige Punkte näher erläutert werden.

- 1.) Es existiert ein grundlegender physikalischer Unterschied zwischen Schlag- und Reibfunken, der zu verschiedenen Zündkriterien und Grenzbedingungen führt [9]. Eine Bewertung der Zündwahrscheinlichkeit sollte für Schlagfunken über die Energie und für Reibfunken über die flächenbezogene Leistungsdichte erfolgen [1].
- 2.) Die Entstehung von Reibfunken erfordert das Erreichen einer Einsetztemperatur, die für niedrig legierten Stahl (1.0038) etwa bei 400 °C und für hoch legierten Stahl (1.4541) etwa bei 650 °C liegt [10, 11]. Bei Reibvorgängen abgetrennte heiße Partikel, die nicht zu brennen beginnen, kommen als Zündquelle für explosionsfähige Atmosphären nicht in Betracht [12].
- 3.) Im Widerspruch zur Literatur [13, 14] entstehen bereits unterhalb von Relativgeschwindigkeiten von 1 m/s und insbesondere auch bei den als funkenarm eingestuften Edelstählen schon bei relativ kleinen Leistungen mechanische Funken und heißen Oberflächen [1]. In der Praxis treten unterhalb von 1m/s in der Regel dennoch keine Zündungen auf, weil die Reibzeiten zu kurz sind oder die Zündquelle und das explosionsfähige Gemisch zeitlich oder örtlich nicht aufeinandertreffen oder treffen können [15].
- 4.) Der kritische Zündmechanismus bei Reibkontakten in gasexplosionsgefährdeten Bereichen ist die entstehende heiße Oberfläche [1], da die Zündgrenzkurve für heiße Oberflächen signifikant unterhalb der Grenzkurve für Funkenentstehung liegt. Es ist zu erwarten, dass die heißen Oberflächen auch in Staub/Luft-Gemischen zündwirksam sind.
- 5.) Die Zündwirksamkeit heißer Oberflächen hängt von der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials ab [4, 15]. Schlechte Wärmeleiter, wie rostfreie Edelstähle, bieten deshalb bei Reibbeanspruchung - im Gegensatz zu den Schlagbeanspruchungen - keinerlei Schutzfunktion [15].
- 6.) Repetierende Reibkontakte erwärmen sich bei gleicher Leistungsdichte weniger schnell als kontinuierliche, erreichen aber die gleichen Maximaltemperaturen. Bei der sicherheitstechnischen Bewertung kann diese Erkenntnis jedoch nicht ausgenutzt werden, da die Unterschiede zu gering sind [15].
- 7.) Der dominierende Turbulenzeinfluss macht sich dadurch bemerkbar, dass die realen Zündtemperaturen deutlich oberhalb der Kenngröße Zündtemperatur liegen und die Zündempfindlichkeit der Gemische sich unter diesen Bedingungen nicht nach den Zündtemperaturen sondern nach den MESG-Werten gruppiert [3, 15].

3. Die Reibapparatur der PTB

Der Versuchsaufbau entspricht der Reibapparatur in [2-7]. Die Reibkraft wird über einen Stift erzeugt, der mit einer konstanten Anpresskraft auf die Oberfläche einer rotierenden Reibscheibe gedrückt wird (Bild 1).

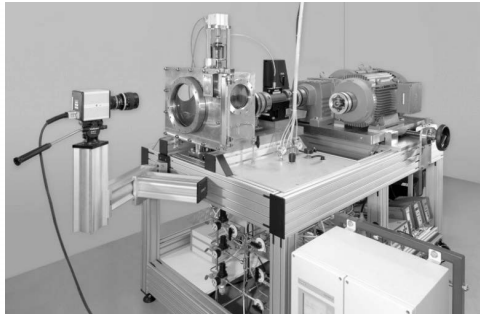
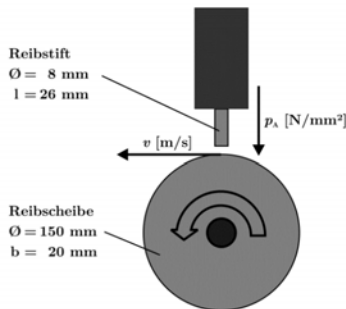


Bild 1: Versuchsaufbau (PTB-Reibapparatur)

Die flächenbezogene Leistungsdichte $q = v \cdot p_A \cdot f$ ist charakteristisch für den Reibungsprozess [1]. Die Drehfrequenz und das Drehmoment der Reibscheibe werden mit einem Drehmomentsensor bestimmt. Die Relativgeschwindigkeit v wird dann aus der Drehfrequenz und dem Umfang der Reibscheibe berechnet. Die Geschwindigkeit wird mittels eines elektronischen Frequenzumformers konstant gehalten. Die Kraft, die durch den Pneumatikzylinder aufgebracht wird, einschließlich des Gewichtes der sich bewegenden Komponenten der Hebevorrichtung, werden mit einem piezoelektrischen Kraftsensor gemessen. Die Flächenpressung p_A ergibt sich durch Division mit dem Stiftquerschnitt. Aufgrund der tribologischen Prozesse in der verschleißenden Fläche verändert sich der Reibkoeffizient f mit der Zeit. Die Ermittlung des Reibkoeffizienten erfolgt durch Mittelwertbildung aus den zeitlich aufgelösten Einzeldaten der Versuche. In den Diagrammen wird ein konstanter Reibkoeffizient $f = 1$ verwendet. Bei konstantem Reibkoeffizient ist die flächenbezogene Leistungsdichte zeitunabhängig.

Die Leistungsdichte wurde durch Änderung von Relativgeschwindigkeit und Kontaktdruck variiert. Die Vorrichtung ist in eine druckfeste Explosionskammer eingebaut, die mit einem Brennstoff/Luft-Gemisch beliebiger Konzentration gefüllt werden kann. Um die Prozesse in der Kontaktzone zu beobachten, werden die Zündversuche mit einer Hochgeschwindigkeits-

kamera aufgezeichnet. Aus der Auswertung der Videosequenzen ergeben sich dann Art und Ort der Zündquelle und der Zündzeitpunkt.

Für die Untersuchungen zur Zündquellenentstehung wurden neben Thermoelementen auch zwei Quotientenpyrometer und eine Thermokamera verwendet. Die Typ-K-Thermoelemente wurden bei ausgewählten Versuchen im Inneren des Stiftes in der Mitte der Kontaktfläche und/oder an drei Positionen auf der Mantelfläche des Reibstiftes aufgebracht. Durch das Thermoelement im Stift, das sich über die Versuchszeit mit dem Stift abreibt, kann die Temperatur direkt in der Reibstelle gemessen werden. Die Thermoelemente auf der Mantelfläche ermöglichen zusammen mit den Thermobildern Rückschlüsse auf die Wärmeentwicklung im Stift. Quotientenpyrometer wurden eingesetzt, um die Temperatur des aus der Stiftfläche herausgedrückten Materials zu bestimmen.

4. Zeitliche Entwicklung der Zündquelle

Die zeitliche Entwicklung der bei Reibkontakt entstehenden heißen Oberflächen wurde in Abhängigkeit von den Parametern der verwendeten Konstruktionswerkstoffe bei kritischer Wärmesenke beschrieben. Die Versuche haben folgendes gezeigt: Je größer die Leistungsdichte, desto schneller ist der Temperaturanstieg und desto höher liegen die Maximaltemperaturen (Bild 2). Temperaturentwicklung in der Reibstelle ist signifikant von der Wärmeleitfähigkeit der Reibpartner abhängig. Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit desto größer ist die maximale Temperatur in der Reibstelle. Die Aufteilung der Wärme in Stift und Scheibe ist dabei stark von der Relativgeschwindigkeit abhängig [15]. Bei konstanter flächenbezogener Leistungsdichte haben die Abmessungen der Reibpartner keinen signifikanten Einfluss auf die Temperaturentwicklung.

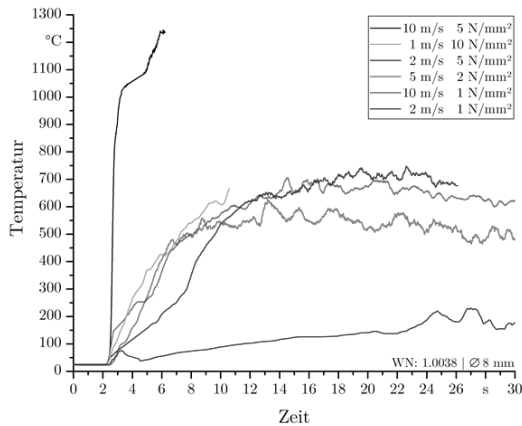


Bild 2: Zeitliche Temperaturentwicklung im Reibstift (WN: 1.0038) in Abhängigkeit von der eingebrachten Leistungsdichte bei 50, 10 und 2 W/mm²

Für repetierende Kontakte kann die Versuchseinrichtung nur einen begrenzten Untersuchungsbereich abbilden. Folgende Erkenntnisse konnten aus diesen Versuchen gewonnen werden: Repetierende Reibung erzeugt bei gleicher Leistungsdichte niedrigere Maximaltemperaturen. Im Falle vergleichsweise langer Kontakt- und Pausenzeiten zeigen die gewonnenen Temperaturkurven eine charakteristische Sägezahnkurve mit den Aufheiz- und Abkühlphasen (Bild 3).

Je länger die Kontakt- und Pausenzeiten andauern, desto größer ist die Amplitude der Temperaturschwankung. Verändert man das Verhältnis zwischen Kontaktzeit und Pausenzeit, so variiert sowohl die Steilheit des Temperaturanstiegs, als auch die erreichte Durchschnittstemperatur. Je größer die Kontaktzeit gegenüber der Pausenzeit, desto steiler verläuft der Temperaturanstieg und desto höher liegt die erreichte Durchschnittstemperatur. Dahingegen zeigt die Durchschnittstemperatur bei gleicher Leistungsdichte aber verschiedenen Kontakt/Pause-Verhältnissen einen annähernd gleichen Wert.

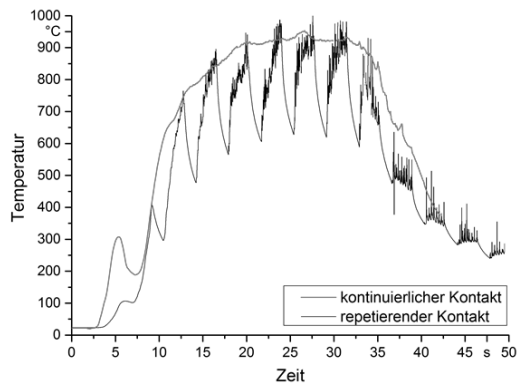


Bild 3: Vergleichende Darstellung der Versuche mit kontinuierlicher Reibung und repetierender Reibung bei angepasster Leistungsdichte

5. Zündwirksamkeit

Durch Zündversuche in explosionsfähigen Gemischen wurde die Zündwirksamkeit in Abhängigkeit der relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen untersucht, um die Zündwirksamkeit entsprechend der Temperaturklassen und Explosionsgruppen zuordnen zu können (Tab. 1). Aus den Ergebnissen der Zündversuche wurden Zündgrenzkurven für verschiedene explosionsfähige Atmosphären erstellt (Bild 4). Die zugehörigen Grenzleistungsdichten sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Daten der für die Zündversuche verwendeten Stoffe und Grenzleistungsdichte für eine Zündung (vgl. auch Bild 4)

Untersuchte Stoffe	Zündtemperatur in °C	Temperaturklasse	MESG in mm	Explosionsgruppe	Grenzleistungsdichte in W/mm ²
n-Pentan	260	T3	0,93	IIA	11,8
Propan	470	T1	0,92	IIA	10,0
Diethylether	175	T4	0,81	IIB	9,4
Ethen	440	T2	0,65	IIB	7,6
Wasserstoff	560	T1	0,29	IIC	2,1

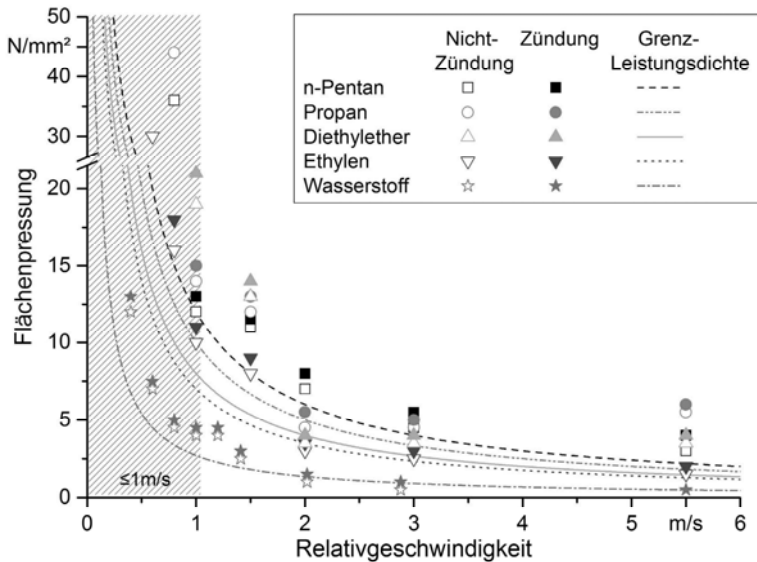


Bild 4: Zündgrenzkurven der untersuchten Brennstoff/Luft-Gemische (Edelstahl 1.4541)

Die Zündgrenze für die Zündung durch heiße Oberflächen liegt unterhalb der Grenzkurve der Funkenentstehung. Wirksame Zündquelle bei Edelstahl ist nahezu immer die heiße Oberfläche (vgl. auch [1]). Die Zündgrenzen bei repetierender Reibung und bei größeren Stiften (12mm Durchmesser) unterscheiden sich nicht signifikant von den Ergebnissen des Worst-Case, sodass eine sicherheitstechnische Ausnutzung wohl nicht möglich ist. Die Grenzbedingungen für eine Zündung durch die Reibkontakte korrelieren mit dem MESG-Wert, nicht aber mit der Zündtemperatur. Das mag daran liegen, dass die Zündung in der turbulenten Umgebung der Reibstelle eher dem MESG-Experiment gleicht als dem der Zündtemperaturbestimmung, wo ein größeres, wenig bewegtes Volumen über längere Zeit aufgeheizt wird. So muss die Zündtemperatur der Brennstoffe zwar von der heißen Oberfläche überschritten werden, den entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der Zündwirksamkeit hat sie darüber hinaus aber nicht. Die Zeit bis zum Wirksamwerden der Zündquelle hängt im wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes und der eingetragenen Leistung ab (vgl. Bild 2).

Wie schon in [1] wurde hier noch einmal deutlich, dass ein Bewertungskriterium wie „bei Berühren mechanischer Bauteile mit einer Relativgeschwindigkeit unter 1 m/s besteht keine Zündgefahr“ nicht haltbar ist. Der Grenzwert ist keinesfalls auf der sicheren Seite und reicht zur Bewertung allein nicht aus. Es zeigt auch, dass es aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge schwierig ist, einfache bzw. mäßig komplexe allgemeingültige Bedingungen und Grenzwerte zu definieren. Es gibt zu viele unterschiedliche Einflussfaktoren. Für konkrete Reibsituationen, in denen die Komplexität reduziert ist, gibt es jedoch Ansatzpunkte für eine Bewertung, wenn ein Kontakt mit Trockenreibung nicht auszuschließen ist: Begrenzung der Leistungsdichte; Begrenzung der Relativgeschwindigkeit; Begrenzung der Flächen-pressung bzw. Kraft; Begrenzung des Drehmomentes; Begrenzung der Kontaktzeit; da somit die Erwärmung limitiert wird und Kurzzeit-Reibfunken (analog den Schlagfunken) bei höherer Leistung als Reibfunken zündwirksam werden; Werkstoffe mit niedrigem Schmelzpunkt; Werkstoffe mit einer Wärmeleitfähigkeit deutlich oberhalb von 50 W/m·K; Differenzierung zwischen Ex-Gruppe IIC und anderen brennbaren Stoffen. Diese Zusammenhänge sind nur für Gase die Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten nachgewiesen, es ist jedoch naheliegend, dass dies grundsätzlich auch für Stäube gilt, wenn auch die entsprechenden Zündgrenzen noch nicht untersucht wurden.

7. Fazit

Mechanische Funken in Reibkontakten dürfen nicht alleinstehend betrachtet werden. In der Praxis wird heute noch in vielen Fällen davon ausgegangen, dass unterhalb einer Relativgeschwindigkeit von 1 m/s keine Funken entstehen und deshalb keine wirksame heiße Oberfläche vorliegen kann. Diese Schlussfolgerung ist nicht zulässig, da die Voraussetzung unter keinen Umständen haltbar ist und die Relativgeschwindigkeit für die Bewertung allein nicht hinreicht. Gleichwohl ergibt sich in solchen Anwendungsfällen zumeist keine wirksame Zündquelle. Dies liegt jedoch an den häufig sehr kurzen Reibzeiten. Darüber hinaus ließe sich auch die fehlende Gleichzeitigkeit der transienten heißen Oberfläche mit dem explosionsfähigen Gemisch geeigneter Zusammensetzung anführen. Repetierende Reibkontakte sind bei gleicher Leistungsdichte hinsichtlich der Entstehung heißer Oberflächen etwas weniger gefährlich als kontinuierliche Reibkontakte. Die Unterschiede sind jedoch zu klein, um sie sicherheitstechnisch für verringerte Anforderungen ausnutzen zu können. Durch die Überlagerung von Schlag und Reibung bei repetierenden Kontakten können zusätzlich auch Schlagfunken erzeugt werden. Folglich sollten heiße Oberflächen, die aufgrund mechanischer Kontaktvorgänge entstehen, bei der Zündgefahrenbewertung explosionsgeschützter Geräte auf eine andere Weise als bisher berücksichtigt werden. Ansätze zur Entwicklung von

Bewertungsanforderungen liegen vor. Weiterführende Untersuchungen der Zündgrenzbedingungen in Staub/Luft-Gemischen sind nötig.

8. Literatur

- [1] Welzel, F.: Die Entstehung von Zündquellen durch mechanische Reibvorgänge und deren Zündwirksamkeit in explosionsfähigen Gas/Luft-Atmosphären. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2014
- [2] Meyer, L., Lange, P., Gramse, G., Beyer, M.: Temporal Development of Hot Surfaces in Frictional Steel Contacts as a Function of Thermal Conductivity. In: Proceedings of the 24th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Taipeh, Taiwan, 2013, S. 125 – Poster #268
- [3] Meyer, L., Pfeifer, M., Gramse, G., Beyer, M.: Zündfähigkeit metallischer Reibkontakte in Abhängigkeit der Temperaturklasse und Explosionsgruppe. 11. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit, Köthen, 7.-8.11.2013
- [4] Meyer, L., Gramse, G., Beyer, M.: Hot surfaces generated by sliding metal contacts and the effectiveness of their ignition source. of Loss Prevention in the Process Industries 36 (2015) 532-538, (doi: 10.1016/j.jlp.2015.02.013)
- [5] Meyer, L., Beyer, M., Krause, U.: Comparison of the formation of ignition sources due to continuous and repetitive metallic friction. 25th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 2-7.8.2015, Paper #180
- [6] Meyer, L., Thedens, M., Beyer, M.: Incendivity of aluminium bronze in mechanical friction contact. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Available online 9 February 2017 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.003>)
- [7] Meyer, L., Thedens, M., Beyer, M., Krause, U.: Mechanically triggered ignition at repetitive friction contacts. Proc. of the 11th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (11th ISHPMIE), July, 24-29, 2016, Dalian, China, Paper #144
- [8] Träger, R., Beyer, M., Grote, K.-H.: Aspekte des Explosionsschutzes bei der Konstruktion von mechanischen Geräten. In: 4. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Shaker Verlag, Aachen, 2006, 47-63
- [9] Welzel, F., Grunewald, T., Grätz, R., Beyer, M., Klages, C.-P.: Mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken im Vergleich. In: 12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik (2010), S. 32–36

- [10] Ott, T., Welzel, F., Beyer, M., Klages, C.-P., Bitterlich, S., Gerlinger, W.: Criteria for the Formation of Sparks in Wear Points. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. St. Petersburg, Russland, 2008, S. 54–60.
- [11] Ott, T., Welzel, F., Beyer, M., Klages, C.-P., Bitterlich, S., Gerlinger, W.: Temperaturen und Funkenentstehung bei Trockenreibung zwischen metallischen Reibpartnern. In: Chemie Ingenieur Technik, Bd. 81 (2009), S. 159–165
- [12] Beyer, M., Markus, D.: Ignition of explosive atmospheres by small hot particles: Comparison of experiments and simulations. In: Science and Technology of Energetic Materials, Vol. 73 (2012), No. 1, 1–7
- [13] Ritter, K.: Die Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Funken gegenüber Gas/Luft und Staub/Luft-Gemischen, Universität Fridericiana Karlsruhe, Dissertation, 1984
- [14] Bartknecht, W.: Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken und heißen Oberflächen. In: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1989
- [15] L. Meyer: Die Entstehung von heißen Oberflächen in metallischen Reibsituationen und ihr Zündwirksamkeit (Arbeitstitel), laufendes Promotionsverfahren der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Findings at recent dust explosion incidents

Gerard van Laar, M.Sc., Inburex GmbH, Hamm

1. Abstract

Several recent dust explosions will be described, with circumstances and possible ignition sources that have lead to these incidents. Next it will be discussed how the risks can be reduced.

2. Introduction

In spite of 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 that our knowledge is not sufficient or do the plant designers and users have not enough been informed about hazards?

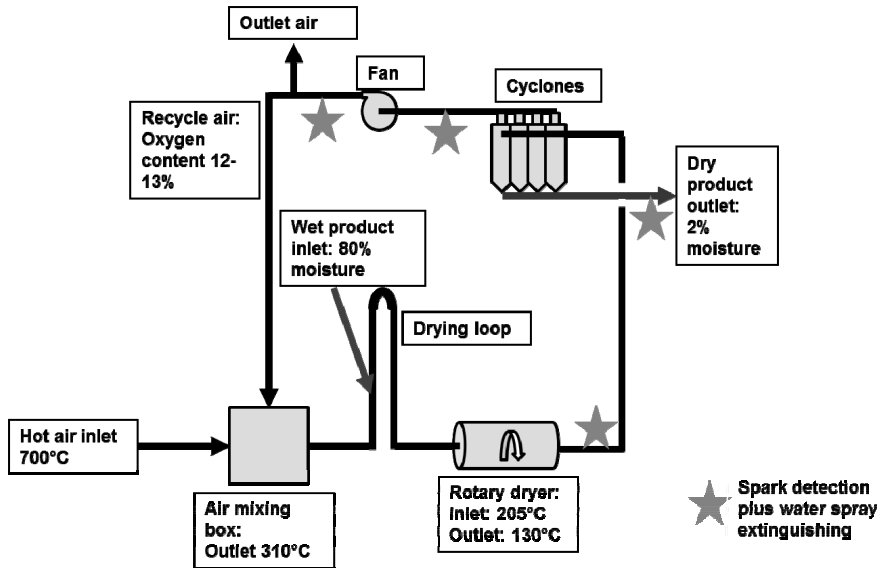
It is in fact true that not all phenomena are clearly understood by most users: why for instance wood dust still leads to fires and explosions or why do hoses, used for pneumatic transport, sometimes lead to the very hazardous propagating brush discharges even when the reinforcement spirals have been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

Hereafter three explosions will be discussed shortly with analysis of why it went wrong in order to pin point what has been overseen in design, selection of equipment and safety procedures. For each incident guidance is given what could be done to prevent the incident or reduce the effects of explosions to acceptable levels.

3. Wood fiber dust explosions: Particle board plant

Description

In this installation particle board is produced. See the schematic flow chart.

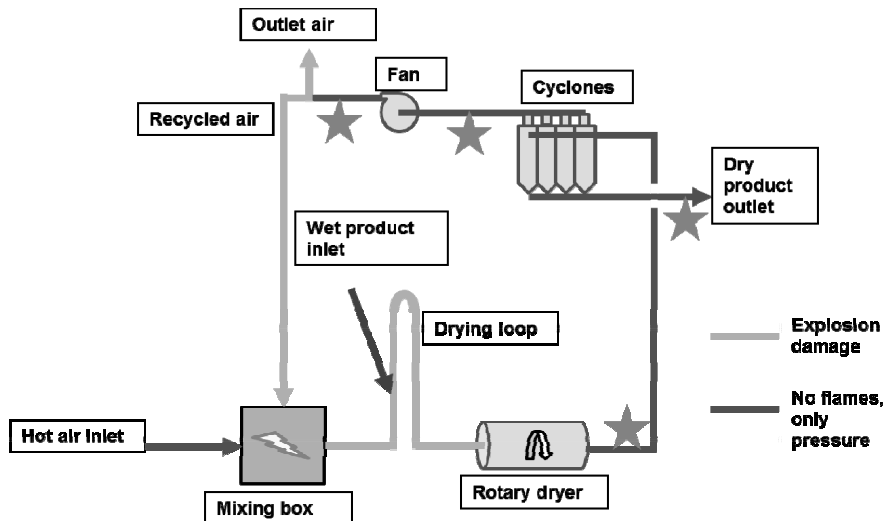


The safety philosophy was the following:

- The main base of safety was prevention of explosive mixtures by partial inerting to about 12-13% Oxygen, using flue gases:
 - The limiting oxygen content of wood particles is about 10%.
 - Corrected for about 100°C it drops to a value of about 8.9%.
- Spark detection with water deluge was installed:
 - Outlet of rotating dryer
 - Clean outlet of the dryer cyclones
 - About 1 m down-stream of the recycle fan
- Cyclone product outlet
- Explosion panels were installed on the dirty side of the cyclones and on the outlet product conveyor of the dryer cyclones.

Explosion

The explosion occurred during a shut-down. The shut-down was necessary, since the dryer systems needed to be cleaned.



Most likely cause

- During shut-down procedures the lower oxygen content of about 12-13% rises to normal atmospheric levels.
- But no particle feed anymore: therefore in principle no explosive dust clouds.
- But there were large deposits in the cyclones and air return duct.
- A large deposit falls off during shut-down procedure, disintegrates into small particles and causes a dust cloud being blown towards the air mixing box.
- Hot spots still are present inside the air mixing box: valve connected to the burner may had a surface temperature of about 475°C and
- Smouldering nests likely have been present in the mixing box.
- The incoming dust cloud explodes in the mixing box
- Down-stream there are no explosive mixtures so no further propagation: up-stream the opposite situation...

Guidance

Prevent explosion:

- Prevent formation of deposits: ensure good heat insulation so that condensation causing deposits is prevented.
- Maybe cleaning must be carried out more frequently.
- Faster cooling down by longer feeding of wet product.
- At shut down use cooled flue gases to continue partial inerting.

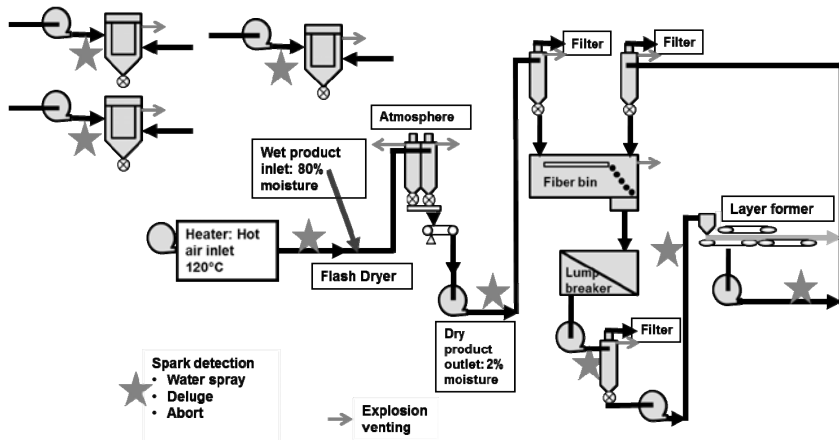
And mitigate the effects:

- Additional constructional measures are strongly recommended:
- Install certified explosion vents:
 - On the air mixing box
 - On the drying loop
 - On the ducting to the cyclones

4. Wood fiber dust explosions: MDF board plant

Description

In this installation MDF board is produced. See the schematic flow chart.



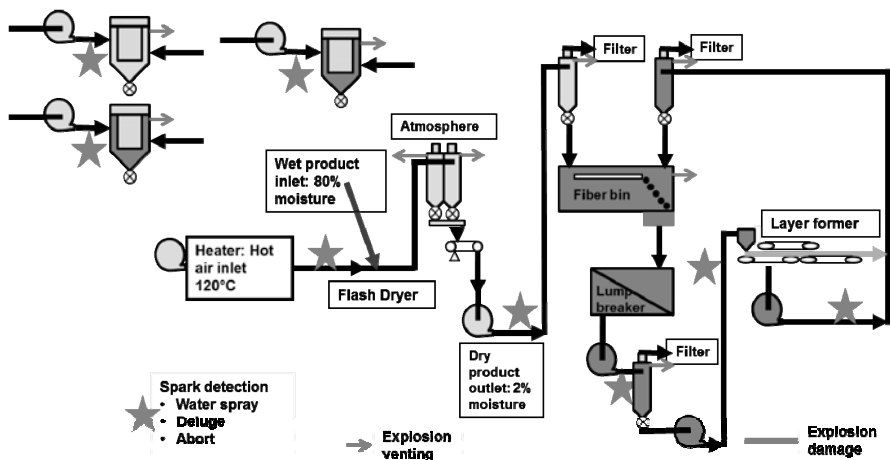
The safety philosophy was the following:

- Main base of safety was prevention of ignition sources:
 - Limited drying temperatures
 - Spark detection with water spray/abort of product stream to a safe location was installed on many locations.
 - Manual trigger for water deluge on several vessels.
- Explosion mitigating measures. Explosion panels were installed on:
 - The dirty side of all cyclones, but some were closed later.
 - All filters (poor design, however).
 - Fiber bin

Explosions

What happened:

- Spark detection alarms activated in the feed to fiber bin plus water spray actions.
- After check no fire was found and plant was restarted.
- Small explosion in fiber bin: stop of process.
- After discussion it was decided to flood the fiber bins.
- **At deluge a massive explosion occurred** in the fiber bin that propagated all the way to the former installations and filters.
- The installation was a total loss.
- Luckily no one got hurt and thanks to clean work area no secondary explosions in work area.



Most likely cause

Deposits in dryer system most likely self-heated and caught fire triggering the spark detection systems.

- But likely some could reach the fiber bin, causing the first small explosion.
- The water deluge triggered a more powerful explosion in the fiber bin.
- The powerful explosion could propagate to all connected installations leading to extensive damage.

Guidance**Prevent explosion:**

- Prevent formation of deposits: ensure good spraying of resin on fibers
- Prevent high temperatures in dryer and cyclone during production stop: no hot air to dryer.
- More frequent cleaning of dryer and cyclones in relation to deposits.
- More spark detection with water spray/deluge and abort functions.

Mitigate the effects.

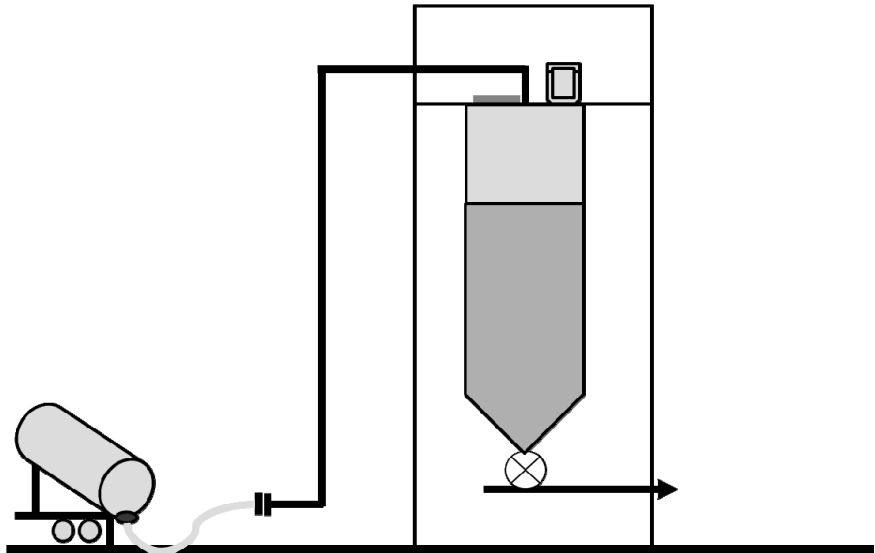
Explosion suppression on:

- Most cyclones
- Most filters
- Fiber bins
- Delumper vessel
- Former vessels

5. Silo explosion during pneumatic delivery by road tanker

Description

In this process step a silo located inside a building is being filled pneumatically by road tanker via a plastic hose. See the schematic flow chart.

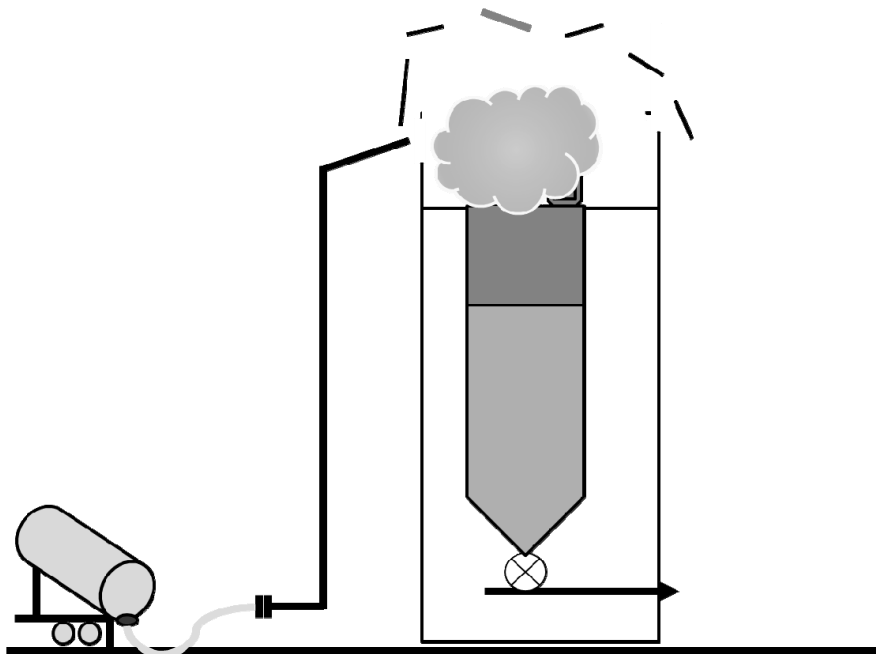


Short description:

- Silo was filled pneumatically.
- Product was vegetable protein powder.
- All systems were well earthed and bonded.
- Hose was made out of Poly-Urethane with static wire connecting the two flanges.
- Silo was protected by and 370 kg “explosion door” fixed on the silo by plastic breaking bolts and retained from flying away with chains.

Incident

- During unloading of the road tanker to the silo, this silo exploded: a 50 m high fire ball was seen.
- The manhole lid plus the explosion door were blown off through the building roof (in fact roof of silo deck).
- They flew about 300 m high And fell back through the roof of a loading bay for road tankers.
- The silo fire could be swiftly extinguished by water
- Nobody was hurt.
- Large damage:
 - Silo roof was damaged, but silo cylinder intact.
 - Spot filter also collapsed.
 - Silo deck was blown out/damaged up to about 20 m around the silo.



Most likely cause

- Road tanker compressor was OK, product contained no glowing particles, was not hot or burning during delivery. Also no stray objects in product.
- Electrical installations in silo were all ATEX 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 layer in the ducting and silo inside walls were not able to create so-called propagating brush discharges with energy <1000 mJ: break-down voltages of paint layers tested to be <4 kV.
- The MIE of the product is 300-1000 mJ without induction: Cone discharges had too low energy to ignite the product.
- The hose was investigated for possibility of creating propagating brush discharges:
 - The hose inside surface, however, had a resistance to earth of >2 10¹³ Ohm and thus much more than the limit of 108 Ohm (IEC/TS 60079-32-1 Ed. 1.0: 2013-08). This means propagating brush discharges are possible!
 - Breakdown voltage was > 20.000V and thus above 4 KV: This means propagating brush discharges are possible!

Conclusion: Propagating brush discharges were the most likely ignition source.

Guidance**Prevent explosion:**

- Use internally conductive hoses conform the IEC code of practice IEC/TS 60079-32-1 Ed. 1.0: 20¹³-08: resistance to earth at all locations inside the hose at its surface of less than 10⁸ Ohm or use other specifications guaranteeing sufficient conductivity.

How to mitigate the explosion effects if things still go wrong:

- Venting via vent ducts is not possible here so it was decided to let the things as before, but the explosion door was secured better
- Silo deck is a no go area during filling of a silo.

A collection of unexpected explosion accidents

Ir. **Tom Molkens**, Ir. **Ake Harmanny**, ISMA NV, Kontich, Belgium

Abstract

Over the years ISMA has been involved in many explosion incident investigations. Although in many situations the result of the investigation was more or less as to be expected, sometimes the results were surprising. A number of such cases were presented at the previous VDI Tagung (VDI-Berichte Nr. 2225; 2014). Since then, other interesting cases have occurred which will be shared in this paper.

Introduction

The message of this paper, as the previous one, is to keep an open mind when investigating an explosion incident and never take the obvious ignition source for granted. In addition, the lessons learned from such incident investigations need to be taken into account when designing new installations.

One case of the previous paper was regarding the combination of combustible and inert dusts. When the large majority of a dust cloud is inert, no explosion will arise, which was confirmed in testing. However, an explosion did arise in a filter where the inert dust segregated from the combustible dust as the latter was much finer. The first case in this paper is again related to this risk.

The second case is about an explosion in a dust filter. This is not very unexpected, where it not that it was on the clean air side.

The remaining cases are all related to electrostatic discharges.

1. When ppm's become significant

An explosion occurred during packing of rubber beads in cardboard boxes. This explosion was highly unexpected as the ignition energy of dust from the rubber beads had been tested and was beyond 1000mJ. In a test after the explosion, the sample could not even be ignited by a 5 kJ ignitor.

After production, the beads are coated. The amount of coating is small, only 400 to 1800 ppm. Dust of this coating is much more sensitive than the rubber beads, a minimum ignition energy between 10 and 25 mJ. After coating, the beads are pneumatically conveyed towards buffer bins. During coating and during pneumatic conveying, there may be some dust formation, which will mainly consist of coating material.

The coated beads can of course not be ignited as these are too coarse. Ground beads can neither be ignited, or are at least very difficult to ignite, as these contain less than 1% of coating. However, if only the outer layer of the beads is eroded, the resulting dust cloud is most likely explosive. Although 400 to 1800 ppm seems low, it does equal a total amount of 4 to 18 grams in 10 kg of beads. With such an amount, a volume of 100 litres can already be filled with an explosive mixture. A cardboard box to pack 10kg of beads is smaller, explosive mixtures are certainly possible.

In the risk analysis of the process, downstream the coater, the relevant MIE is that of the pure coating material. In other situations, the possibility of separation of sensitive products from non-homogeneous particles or mixtures should always be considered.

2. Filter explosion on the clean air side

Unfortunately, filter explosions are rather common in industry. Most filters are therefore protected, usually by explosion venting. For the design of the explosion venting, typically only the dirty part of the filter is taken into account. During the investigation of a recent filter explosion, witnesses reported a large fireball erupting from the top of this filter. The failed top was on the clean air side.

A first inspection of the filter revealed that the filter plate (the separation between dirty and clean part) was deformed downwards. Meaning: the pressure in the clean part must have been higher than in the dirty part.

When inspecting the filter into detail, it was found that the filter cloth was mainly intact. It only displayed some traces of fire and two filter elements had small holes of a few cm² each. This means that dust must have been present in the clean air side before the explosion. Dust on this side of the filter is not unusual. Most filter cloth does leak some fine dust and in case of small leaks, some dust will likely settle in the chamber instead of being blown out with the air.

It is strange that the cloth hardly showed damage. This observation, amongst others, led to the conclusion that the explosion started on the clean air side.

The involved dust has a very low MIE and, within each filter element, there is a rotating element for cleaning. Besides a spark discharge, also mechanical sparks may have been created in the clean air side which may have caused the explosion.

Although explosions in clean air parts of filters are rare, these do occur. These parts should also be treated in the risk analysis, and the various ignition sources need to be prevented here as well. Protection of the clean air side seems exaggerated. In general, a zone 22 is defined which means that ignition sources should not occur during normal operation. By adequate design and maybe some preventive measures, it should be possible to achieve a safe situation.

Propagation of flames from the dirty to the clean side is possible. In such cases, the protection of the dirty side will cover the additional pressure. In case of venting, the vents are already open and will equally be able to vent the clean air side. In case of suppression, the explosion is quenched and should not propagate to the clean air side.

3. Unlikely scenarios

When the explosion risk analysis is conducted for a silo, the risk of explosive mixtures is typically based on the situation during filling. The actual dust concentration that may arise in the silo during filling depends on the product characteristics and the way of filling, but in most situations, explosive mixtures may arise. During emptying of a silo, however, the probability of explosive mixtures is generally considered to be low. Also ignition sources, especially those related to electrostatic charging, typically arise during filling of a silo. Therefore, if there is a silo explosion, it is usually during filling.

ISMA was involved in an investigation of a vented silo explosion which did not occur during filling. The latest filling had been finalized several days before the incident. Any charge built-up inside the silo would have leaked away or would have caused a discharge much earlier. On top of that, the dust cloud had settled long before the explosion.

An explosion did arise however, hence there had to be an explosive mixture and an ignition source. The silo was being unloaded at the time of the explosion. The amount of product in

the silo could not be verified since the level measurement showed a very unstable behavior, already for several hours. As the product concerned is rather prone to clogging, it was concluded that there must have been bridge formation in the silo. During bridge formation, the product level will not change, although product is unloaded. Upon collapse of such a bridge, a dust cloud is generated which will also disturb the level measurement. Bridge formation in silos is not unusual. The main question remained which ignition source had caused the explosion?

During the initial investigation, only one ignition source was found to be possible, albeit very unlikely: smouldering product. All other ignition sources were found to be basically impossible. However, a critical design aspect of the silo design was overlooked.

The silo concerned was inspected visually after the incident and appeared to have no coating. After emptying of the silo, it was found that the bottom part was in fact coated. The upper part had likely been coated as well, but the coating layer eroded away in time or burnt during the explosion. This observation clearly points in the direction of a propagating brush discharge due to collision of product bridges.

This investigation is a good illustration that a risk analysis needs to combine all aspects. Besides experience and knowhow on how to conduct an explosion risk analysis, it is important to use the relevant explosion characteristics, understand the process details and have the design details. If one of these items is missing or incorrect, false conclusions may be drawn.

4. Cone discharges during gravity feeding

In general, the risk of cone discharges is mainly with pneumatic feeding, especially when conveying rather coarse products with a low conductivity. ISMA was recently involved in an investigation where a cone discharge has likely caused an explosion in a gravity filled FIBC.

The FIBC concerned is gravity filled with resin flakes from a vibratory feeder, through a short chute. The minimum ignition energy had been tested many years ago and was below 3mJ (with inductance). To investigate the likelihood of electrostatic discharges in the FIBC, field strength measurements were carried out during filling. At a pre-defined filling rate, the charging level was not more than 5 kV. If the filling rate was doubled, the charging level increased to 20 kV. Therefore, it was recommended to maintain the filling rate and only use earthed type C FIBC's.

Recently, an explosion did occur in the FIBC. After the incident, the earthing clamp was still in place on the FIBC which was of type C. Other ignition sources were investigated and could all be excluded except one: a cone discharge.

Since the MIE was tested many years ago and it was conducted with inductance, a new test was conducted resulting in MIE without inductance between 1 and 3 mJ. The theoretical energy content of a cone discharge in this FIBC was calculated to be 10 times beyond this MIE (based on the formula in IEC/TS 60079-32-1). If a cone discharge would arise, it could certainly ignite an explosive dust cloud.

As the pre-defined filling rate was still maintained and the process was not changed, charging levels would still be below 5kV. Higher levels (20 kV) are required to create cone discharges. There must have been an additional charging mechanism. This was found to be due to the design and the way of feeding:

- The valve feeding the silo is controlled by the load cells of the FIBC.
- The FIBC filling neck is not positioned straight underneath the chute resulting in a bended entry.

If there would be considerable product accumulation in the bend, the inlet of the FIBC is more or less blocked and there will be hardly any flow into the FIBC. As a consequence, the valve in the chute will automatically open completely. Once the accumulated product does slide into the FIBC, a high flow rate arises and due to the fully opened valve, the high rate is maintained for some time. In this way, it was found possible to cause a hazardous cone discharge.

5. To continue on electrostatic discharges

Over the past years, ISMA has investigated multiple explosion incidents in non-conductive silos or silos coated with a non-conductive layer. These incidents all occurred during pneumatic feeding from a bulk truck. The materials involved were all medium to poorly conductive, and included products such as polymer resins, modified starch or the notorious maltodextrin.

Based on the product characteristics and the design of the installation, most ignition sources could always be excluded: mechanical sparks, hot surfaces, electromagnetic waves ... Smouldering product can usually not be excluded completely but appeared to be very unlikely for the various explosions.

The remaining ignition sources were solely due to electrostatics. Adequate earthing was checked thoroughly and found to be sufficient. There were no thunderstorms at the time of the incidents. Brush discharges are not sufficiently incendive. This leaves only cone and propagating brush discharges.

In some cases, it was found that the flexible hose, used to connect the truck to the silo, was not antistatic or had only an antistatic surface treatment that had eroded. Hence, propagating brush discharges were the most likely ignition source for those incidents. In other incidents, the flexible appeared to be suitable.

Propagating brush discharges across the silo wall were not considered possible or hazardous in the incidents concerned. Hence, a cone discharge must have been the cause. In one case, the calculated energy content of a cone discharge was indeed beyond the MIE. In another case, however, the calculated energy content was insufficient.

Based on these various explosion incidents in non-conductive silos, which could not all be explained based on current knowledge, ISMA wonders whether there are no more powerful electrostatic phenomena occurring in such silos. Evidence or research of discharges in non-conductive silos is rare.

Das Explosionsschutzkonzept – Erfahrungen aus der Prüfpraxis nach BetrSichV

Matthias Reinecke M.Sc., DEKRA EXAM GmbH, Bochum

Kurzfassung

Zwei Jahre nach der Neustrukturierung der gesetzlichen Anforderungen zum Explosionsschutz in Deutschland liegen erste Erfahrungen hinsichtlich der Auswirkungen der novellierten Prüfanforderungen nach BetrSichV für überwachungsbedürftige Anlagen vor. Vor allem die novellierten Anforderungen zur Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes für überwachungsbedürftigen Anlagen vor Inbetriebnahme und wiederkehrend spätestens alle 6 Jahre stellen die Industrie augenscheinlich vor neue Herausforderungen hinsichtlich der Definition des notwendigen Prüfumfangs und knapper Übergangsfristen bei begrenzten Personalressourcen mit ausreichender Fachkenntnis. Der vorliegende Artikel gibt einen zusammenfassenden Überblick zu den aktuellen gesetzlichen Prüfanforderungen und stellt die für die Praxis relevanten Änderungen der letzten Jahre heraus. Es werden die gemäß den gesetzlichen Änderungen erforderlichen Anpassungen der bestehenden Dokumentation zum Explosionsschutzkonzept aufgezeigt sowie Empfehlungen für die betriebliche Praxis ausgesprochen. Ferner werden in der Praxis häufig auftretenden Defizite bei der Umsetzung der gesetzlichen Anforderungen aus Sicht der Prüfpraxis aufgezeigt, so dass sich daraus Handlungsempfehlungen für den Arbeitgeber ableiten lassen.

1. Die Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes nach der novellierten BetrSichV – alles neu?

Im Rahmen der Neustrukturierung der GefStoffV [1] und BetrSichV [2] zum 03. Februar 2015 wurden u. a. die Prüfanforderungen zum Explosionsschutz für überwachungsbedürftige Anlagen angepasst. Zur Übersicht der aktuellen Prüfanforderungen dient die nachstehende Tabelle 1. Von den Änderungen betroffen sind unter anderem Anlagen, in welchen staubexplosionsfähige Feststoffe gehandhabt werden und gemäß der nach GefStoffV [1] durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung explosionsgefährdete Bereiche im Sinne von § 2 Nr. 30 f) ProdSG [3] eingeteilt sind.

Tabelle 1: Übersicht zu den gesetzlichen Prüfanforderungen nach BetrSichV

Art und Inhalt der Prüfung	Gegenstand der Prüfung	Prüffrist	Zur Prüfung befugte Instanz oder Institution			
			Zugelassene Überwachungsstelle	Zur Prüfung befähigte Person nach Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 3.1 BetrSichV	Zur Prüfung befähigte Person mit besonderem Kenntnis nach Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 3.3 BetrSichV	Zur Prüfung befähigte Person mit behördlicher Anerkennung nach Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 3.2 BetrSichV
Prüfung vor Inbetriebnahme und vor Wiederinbetriebnahme nach prüfpflichtigen Änderungen	Anlagen, welche explosionsgefährdete Bereiche aufweisen, inkl. des Explosionsschutzkonzeptes	vor Inbetriebnahme bzw. Wiederinbetriebnahme gemäß § 15 BetrSichV in Verbindung mit Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 4.1 BetrSichV	✓		✓	
Prüfung nach Instandsetzung	Instandgesetzte Geräte, Schutzsysteme, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU	vor Wiederinbetriebnahme nach Instandsetzung gemäß § 15 BetrSichV in Verbindung mit Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 4.2 BetrSichV	✓			✓
Wiederkehrende Prüfung	Anlagen, welche explosionsgefährdete Bereiche aufweisen, inkl. des Explosionsschutzkonzeptes	spätestens alle 6 Jahre gemäß § 16 BetrSichV in Verbindung mit Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 5.1 BetrSichV	✓		✓	
Wiederkehrende Prüfung	Geräte, Schutzsysteme, Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU mit ihren Verbindungseinrichtungen als Bestandteil von überwachungsbedürftigen Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit anderen Anlagenteilen	spätestens alle 3 Jahre gemäß § 16 BetrSichV in Verbindung mit Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 5.2 BetrSichV	✓	✓	✓	
Wiederkehrende Prüfung	Lüftungsanlagen, Gaswarneinrichtungen und Inertisierungseinrichtungen als Bestandteil von Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen	spätestens jährlich gemäß § 16 BetrSichV in Verbindung mit Anhang 2 Abschnitt 3 Nr. 5.3 BetrSichV	✓	✓	✓	

Der Arbeitgeber ist unbenommen der gesetzlichen Änderungen verpflichtet die erforderlichen Schutzmaßnahmen für den sicheren Betrieb dieser Anlagen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung fachkundig zu ermitteln, so dass Brand- und Explosionsrisiken wirksam reduziert werden können. Die zur Explosionssicherheit der Anlagen getroffenen technischen und organisatorischen Maßnahmen sind durch den Arbeitgeber gemäß § 6 (9) der GefStoffV im Sinne eines Explosionsschutzkonzeptes zu dokumentieren. Der Begriff Explosionsschutzkonzept umfasst dabei nach GefStoffV alle Vorkehrungen, die seitens des Arbeitgebers getroffen wurden, um die Ziele des Explosionsschutzes zu erreichen. Sinngemäß muss aus

dem im Explosionsschutzdokument beschriebenen Explosionsschutzkonzept eine nachvollziehbare Darlegung aller technischen und organisatorischen Explosionsschutzmaßnahmen hervorgehen. Die Darlegung des Explosionsschutzkonzepts im Explosionsschutzdokument sollte vom Arbeitgeber daher inhaltlich so erfolgen, dass daraus die für den Explosionsschutz relevanten Schutzmaßnahmen detailliert, insbesondere für das Betriebspersonal, jedoch auch für Dritte, wie bspw. Fremdfirmen, zur Prüfung befähigte Personen bzw. zugelassene Überwachungsstellen und Behörden, verständlich hervorgehen. Unter Anderem beinhaltet dieses eine Beschreibung der umgesetzten Zuverlässigkeit der einzelnen Explosionsschutzmaßnahmen und deren Beitrag zum gesamtheitlichen Explosionsschutzkonzept, was erfahrungsgemäß nicht überwiegend in der Praxis berücksichtigt ist. Darüber hinaus hat der Arbeitgeber die zur Vermeidung der Brand- und Explosionsgefahren notwendigen Prüfungen zu bewerten und ein entsprechendes Prüfkonzept im Rahmen der schriftlichen Dokumentation der Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung in Form des Explosionsschutzdokuments darzulegen. Damit sind die inhaltlichen Vorgaben zur Dokumentation des Explosionsschutzkonzepts für den Arbeitgeber eindeutig aus der BetrSichV und GefStoffV zu entnehmen.

Bei der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung sowie des daraus resultierenden Explosionsschutzkonzepts im Explosionsschutzdokument existieren erfahrungsgemäß in der Praxis nach wie vor Unsicherheiten hinsichtlich der Erfüllung dieser inhaltlichen Vorgaben, obgleich von unterschiedlichen Anspruchsträgern, wie z. B. Unfallversicherungen, Berufsgenossenschaften oder Industrieverbänden, grundsätzlich geeignete Mustervorlagen als Basis zur Verfügung stehen. Als Basis zur Bewertung des Brand- und Explosionsrisikos sowie zur Festlegung von erforderlichen Schutzmaßnahmen sind an erster Stelle die Technischen Regeln zur GefStoffV oder BetrSichV heranzuziehen, da für diese die Vermutungswirkung gilt. Zur Umsetzung von verfahrenstechnischen Lösungen sind diese Regeln aber wenig konkret. Hilfestellung bieten da z.B. die DGUV Regel 113-001 oder die VDI Richtlinien-Reihe 2263 sowie europäische Normen zur Konkretisierung der Richtlinie 2014/34/EU.

Aus Sicht der Prüfpraxis bringen die gesetzlichen Änderungen zum Explosionsschutz lediglich eine neue Begriffsdefinition zum Explosionsschutzkonzept mit sich. Aus fachlicher Sicht und im Hinblick auf den Stand der Technik im Explosionsschutz resultieren aus der Novellierung der BetrSichV und GefStoffV keine gravierenden Neuerungen.

Die Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes ist explizit über die aktuelle BetrSichV vor Inbetriebnahme, nach prüfpflichtigen Änderungen sowie wiederkehrend gefordert, was formal gesehen einen Mehraufwand für den Arbeitgeber bedeutet. Die Prüfung der Explosionssicherheit vor erstmaliger Nutzung von Arbeitsplätzen in explosionsgefährdeten Bereichen war nach alter Gesetzeslage gemäß Anhang 4A Nr. 3.8 BetrSichV gefordert und ist fachlich ge-

sehen im Sinne einer guten ingenieurmäßigen Prüfpraxis mit den aktuellen Anforderungen zur Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes vor Inbetriebnahme vergleichbar. Demnach ist festzuhalten, dass der Arbeitgeber, welcher die den Explosionsschutz betreffenden gesetzlichen Anforderungen an seine Bestandsanlage seit je her erfüllt hat, infolge der novellierten Gesetzeslage keinen gravierenden Mehraufwand zur gesetzeskonformen Dokumentation und Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes zu erwarten hat.

2. Die Struktur des Explosionsschutzkonzeptes

Der Explosionsschutz und die inhaltliche Konzeptionierung von Schutzmaßnahmen sind im europäischen Raum über den Artikel 3 der Richtlinie 1999/92/EG vorgegeben. Das primäre Ziel des Explosionsschutzes muss es demnach sein, die Bildung explosionsfähiger Atmosphäre zu vermeiden. Wenn dieses aufgrund des Prozesses nicht hinreichend sicher möglich ist, ist die Zündung explosionsfähiger Atmosphäre zu verhindern und ggf. die schädlichen Auswirkungen einer Explosion so abzuschwächen, dass die Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer gewährleistet ist.

Basierend auf dieser Vorgabe ist das Explosionsschutzkonzept durch den Arbeitgeber zu strukturieren. Grundvoraussetzung für die Erarbeitung eines Explosionsschutzkonzeptes ist eine ausreichende Kenntnis über den verfahrenstechnischen Prozess sowie zu den im Prozess gehandhabten Stoffen inkl. deren sicherheitstechnischer Kenngrößen. Anhand der Bewertung des Brenn- und Explosionsverhaltens der zu verarbeitenden Rohstoffe, der anfallenden Zwischenprodukte sowie der hergestellten Produkte unter den jeweils gegebenen Prozessrandbedingungen ist zu Beginn der Gefährdungsbeurteilung und Erarbeitung des Explosionsschutzkonzeptes die Bildung explosionsfähiger Atmosphäre zu bewerten. Auf Basis dieser Bewertung lassen sich bereits Maßnahmen ableiten, über welche eine Bildung explosionsfähiger Atmosphäre vermieden bzw. deren Auftretenswahrscheinlichkeit reduziert werden kann. Lässt sich das Auftreten einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre nicht gänzlich ausschließen, sind anhand der sicherheitstechnischen Kenngrößen und Prozessrandbedingungen weiterführende Maßnahmen zur Vermeidung einer Entzündung der gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre festzulegen. Darüber hinaus können zusätzlich Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes zur Begrenzung der schädlichen Auswirkungen einer nicht im Sinne des akzeptierten Restrisikos zu vermeidenden Explosion erforderlich werden, deren Auslegung wiederum auf Basis der sicherheitstechnischen Kenngrößen und Prozessparameter herzuleiten ist.

Aus der Prüfpraxis ist herzuleiten, dass die novellierten Regelungen zur Transparenz der Anforderungen an den Arbeitgeber, welche überwachungsbedürftige Anlagen betreibt, ge-

führt haben und weniger als Verschärfung der technischen Anforderungen an den Explosionsschutz zu sehen sind. In der Praxis stellt die Konzeptionierung der Explosionsschutzmaßnahmen in der Regel keinen idealisierten Ablaufprozess, sondern einen iterativen Prozess dar, der solange zu führen ist, bis die Kombination aus technischen und organisatorischen Maßnahmen zur hinreichenden Risikoreduzierung geführt hat. Diese Vorgehensweise ist z.B. der TRGS 725 zu entnehmen und vereinfacht im nachstehenden Bild 1 dargestellt.

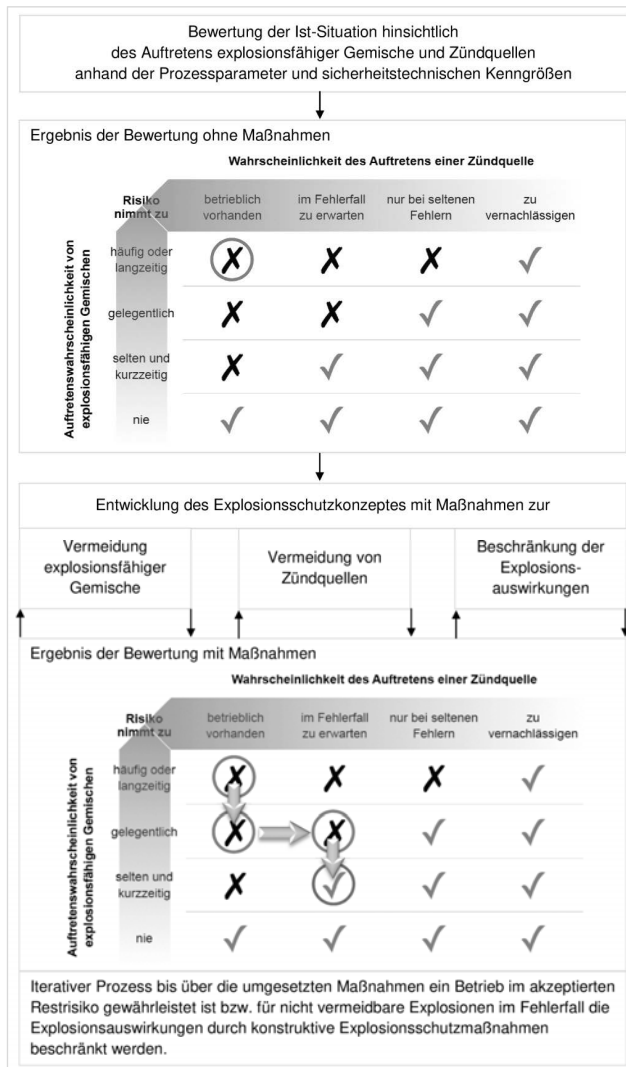


Bild 1: Schematische Darstellung zur Konzeptionierung von Explosionsschutzmaßnahmen

Insbesondere die Darlegung des Beitrages der einzelnen Schutzmaßnahmen zum gesamtheitlichen Explosionsschutzkonzept wird anhand der in der Praxis vorzufindenden Explosionsschutzkonzepte überwiegend nicht eindeutig klargestellt. Die Betrachtung der Fehlerto-

leranz und des Ausfallverhaltens von Schutzmaßnahmen stellt zumindest in den technischen Regeln zum betrieblichen Explosionsschutz, wie z.B. in der TRGS 725 [4], einen vergleichsweise neuen Aspekt dar, der in der Praxis teilweise auf Unverständnis bei unterschiedlichen Interessensvertretern, wie den Arbeitgebern, zuständigen Behörden oder zur Prüfung befähigten Personen, stößt. Daher ist es für den Arbeitgeber zur Vermeidung von Reibungsverlusten umso wichtiger, diesen Aspekt im Explosionsschutzkonzept transparent zu beleuchten.

Zur orientierenden Hilfestellung bzgl. der strukturierten Dokumentation des Explosionsschutzkonzeptes im Explosionsschutzdokument dient das nachstehende Bild 2.

Explosionsschutzkonzept	Beschreibung der Anlagen- und Arbeitsbereiche ⇒ Prozessbeschreibung mit den für den Explosionsschutz relevanten Parametern
	Beschreibung der vorhandenen brennbaren Stoffe ⇒ Aufführung sämtlicher Rohstoffe, Zwischenprodukte und Produkte mit Angabe der sicherheitstechnischen Kenngrößen
	Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung ⇒ Explosionstechnische Bewertung der vorhandenen Stoffe ⇒ Bewertung der Häufigkeit und Dauer des Auftretens explosionsfähiger Gemische ⇒ Bewertung der Zündquellen hinsichtlich Wirksamkeit und Häufigkeit des Auftretens
	Beschreibung der technischen Explosionsschutzmaßnahmen ⇒ Maßnahmen zur Vermeidung explosionsfähiger Gemische, wie z.B. technische Dichtheit, Inertisierung, technische Be- und Entlüftung ⇒ Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen, wie z.B. geeignete Ausführung von elektrischen und nicht elektrischen Geräten zum Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen ⇒ Maßnahmen zur Beschränkung der Explosionsauswirkungen, wie z.B. die explosionsfeste Bauweise und explosionstechnische Entkopplung
	Beschreibung der organisatorischen Explosionsschutzmaßnahmen ⇒ Betriebsanweisung, wie z.B. zum Verhalten im Fehlerfall ⇒ Anweisungen zur Benutzung von Arbeitsmitteln ⇒ Unterweisung und Qualifizierung von Mitarbeitern ⇒ Maßnahmen zur Koordinierung von betriebsfremden Personal ⇒ Regelungen zur Arbeitsfreigabe in explosionsgefährdeten Bereichen ⇒ Maßnahmen zur Instandhaltung und Überprüfung sowie Prüfung ⇒ Maßnahmen zur Kennzeichnung und Zugangsbeschränkung von explosionsgefährdeten Bereichen ⇒ Regelungen zum Änderungsmanagement
	Betriebliche Regelungen zu den Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten ⇒ Festlegung von Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten

Bild 2: Struktur des Explosionsschutzkonzeptes

3. Erfahrungen aus der Prüfpraxis

Erfahrungsgemäß sind Defizite in der Darlegung und Umsetzung des Explosionsschutzkonzeptes sowohl bei den technischen als auch bei den organisatorischen Explosionsschutzmaßnahmen in der Praxis wiederzufinden.

Bei den technischen Maßnahmen erfolgt vor allem bei der Umsetzung und Gewichtung des Beitrages der Maßnahmen zur Vermeidung des Auftretens explosionsfähiger Gemische, wie z.B. der Inertisierung, eine mangelhafte konzeptionelle Darstellung im Explosionsschutzdokument. Wird eine Inertisierung als Explosionsschutzmaßnahme angewandt, so ist diese auf Basis der stofflichen und verfahrenstechnischen Randbedingungen auszulegen. Hierzu ist die Sauerstoffgrenzkonzentration als sicherheitstechnische Kenngröße für die gehandhabten Stoffe und das verwendete Inertgas heranzuziehen und in Kontext zu den Betriebsparametern, wie z. B. Temperatur und Druck, zu setzen. Darauf basierend ist die höchstzulässige Sauerstoffkonzentration im Prozess festzulegen. Folglich ist die Alarmkonzentration in Abhängigkeit der gewählten Überwachungsmaßnahmen und Reaktionszeiten für das Wirksamwerden von Schutzmaßnahmen bei Erreichen der Alarmkonzentration festzulegen, um anschließend die betriebliche Sollsauerstoffkonzentration ableiten zu können. Nach der inhaltlichen Beschreibung dieser Bewertung ist die technische Umsetzung des Inertisierungsverfahrens, wie z.B. Druckwechsel- oder Spülmethode, sowie die Inertisierungsüberwachung mit Angabe von Grenzwerten und Schaltfunktionen im Explosionsschutzkonzept zu beschreiben. Weiterhin ist in Abhängigkeit des Ausfallverhaltens der Explosionsschutzeinrichtung die erzielte Reduzierung der Auftretenswahrscheinlichkeit explosionsfähiger Gemische, z.B. von Zone 20 auf Zone 21 bei Umsetzung der Maßnahme in einer Klassifizierungsstufe K1 nach TRGS 725, im Explosionsschutzkonzept darzulegen.

Zur Vermeidung von Zündquellen kommen in der Praxis häufig Überwachungseinrichtungen, wie z.B. Temperaturmessungen, zum Einsatz, für welche eine Beschreibung und Bewertung der detaillierten Ausführung sowie der notwendigen und umgesetzten Zuverlässigkeit häufig nicht in dem Maße im Explosionsschutzkonzept erfolgt, dass dieses auch für Dritte verständlich nachvollziehbar ist. Entsprechend der bereits erläuterten Systematik sind auch bei der Zündgefahrenvermeidung zur Auslegung von Schutzmaßnahmen die stofflichen und verfahrenstechnischen Randbedingungen als Basis heranzuziehen. Am Beispiel der Temperaturüberwachung ist der Grenzwert basierend auf der niedrigsten Zünd- und Glimmtemperatur der gehandhabten Stoffe abzuleiten. Weiterhin sind bei der Grenzwertsetzung Einflüsse, wie der verfahrenstechnisch bedingte maximale zeitliche Temperaturanstieg sowie die Trägheit und Anordnung der Überwachungseinrichtung im Prozess, zu berücksichtigen und im Explosionsschutzkonzept zu beschreiben.

Ferner muss die von der Überwachungseinrichtung zu erfüllende Anforderung im Hinblick auf die funktionale Sicherheit (z. B. Klassifizierungsstufe) aus dem Explosionsschutzkonzept zu entnehmen sein. Handelt es sich zum Beispiel um eine Wellenlagerung außerhalb eines

Behälters, die im zu erwartenden Fehlerfall eines Lagerschadens über Wärmeleitung zur Zündquelle durch heiße Oberflächen im Behälterinneren mit Zone 20 werden kann, so ist gemäß der im Bild 1 gezeigten Systematik eine Klassifizierungsstufe K2 durch die Explosionsschutzeinrichtung zur Vermeidung der heißen Oberfläche im zu erwartenden Lagerschaden zu erfüllen. Kann der Eintritt eines Lagerschadens durch regelmäßige Wartung und einen vorzeitigen Austausch vor Erreichen der für den Anwendungsfall ermittelten Lagerlebensdauer so reduziert werden, dass dieser basierend auf den organisatorisch zu regelnden Maßnahmen nur noch bei seltenen Fehlern eintreten kann, so ist von der technischen Überwachungseinrichtung nur noch eine Klassifizierungsstufe K1 zu erfüllen. Zur Veranschaulichung der Systematik dient Bild 3.

		Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Zündquelle			
Auftretenswahrscheinlichkeit von explosionsfähigen Gemischen	Risiko nimmt zu	betriebl. vorhanden	im Fehlerfall zu erwarten	nur bei seltenen Fehlern	zu vernachlässigen
	häufig oder langfristig	X	X	X	✓
	gelegentlich	X	Organisatorische Maßnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit eines Lagerschadens		Temperaturüberwachung am Lager in K1
	selten und kurzzeitig	X			✓
	nie	✓	✓	✓	✓

Bild 3: Beispiel Überwachungseinrichtung

Bei der Darlegung der Erfüllung der Anforderungen zur Zuverlässigkeit von Überwachungseinrichtungen werden in der Praxis häufig Zertifikate bzw. Bescheinigungen für die funktionale Sicherheit einzelner Bauteile der Überwachungseinrichtung, z.B. die Sensoren, herangezogen, was jedoch nicht aussagekräftig für die i.d.R. vorhandene Funktionseinheit bestehend aus Sensorik, Logik und Aktorik ist. In Abhängigkeit des gewählten technischen Standards zur Umsetzung der funktionalen Sicherheit sind entsprechende Berechnungsmethoden zur Nachweisführung anzuwenden und im Explosionsschutzkonzept zu dokumentieren. Ein Beispiel hierzu ist die Nachweisführung unter Anwendung der freizugänglichen Software SIS-TEMA der DGUV, über welche die funktionale Sicherheit von Funktionseinheiten nach ISO 13849-1 berechnet und dokumentiert werden kann.

Bei den Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen einer nicht hinreichend vermeidbaren Explosion, wie z. B. durch die explosionsfeste Bauweise in Verbindung mit der Explosionsdruckentlastung, treten in der Praxis ebenfalls mangelhafte Darlegungen des Explosionsschutzkonzeptes auf. Häufig fehlt bereits eine Beschreibung der Dimensionierungsgrundlage für die Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes in Form der sicherheitstechnischen Kenngrößen, wie z.B. maximaler Explosionsüberdruck und maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit. Des Weiteren werden die zur plausiblen Beschreibung des Konzeptes relevanten Parameter, wie z.B. die wirksame Druckentlastungsfläche, das zu entlastende Volumen oder die Explosionsfestigkeit des Behälters, häufig nicht im Explosionsschutzdokument dargelegt. Auch die Maßnahmen zur Vermeidung von Gefahren durch Flamme und Druck im Außenbereich um Druckentlastungseinrichtungen sowie der zu berücksichtigende Wirkbereich werden regelmäßig nicht im Explosionsschutzkonzept erfasst, so dass diese Defizite bei einer Prüfung zu bemängeln sind.

4. Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

Zusammenfassend ist zwei Jahre nach der Neustrukturierung der gesetzlichen Regelungen zum Explosionsschutz in Deutschland festzustellen, dass die novellierten Anforderungen zur Erstellung, Dokumentation und Prüfung des Explosionsschutzkonzeptes bei den Arbeitgebern noch immer zu Unsicherheiten bei der Festlegung und Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen führen.

Aus dem vorliegenden Artikel geht zusammenfassend die seit Jahrzehnten bekannte Systematik zur Konzeptionierung von Explosionsschutzmaßnahmen unter Bezug auf die Neuerung in der gesetzlichen Begriffsdefinition hervor. Anhand der dargestellten Empfehlungen wird verdeutlicht, dass für den Arbeitgeber klare Handlungshilfen existieren und keine systematischen Änderungen in der Auslegung von Explosionsschutzmaßnahmen und der zugehörigen Dokumentation im Vergleich zu den abgelösten gesetzlichen Regelungen zum Explosionsschutz zu berücksichtigen sind.

Anhand der im Beitrag zur VDI-Fachveranstaltung gezeigten Beispiele aus der Prüfpraxis wurden häufig auftretende Defizite in der Konzeptionierung und Darlegung von Explosionsschutzmaßnahmen sowie praktikable Lösungen zur Umsetzung von dem Stand der Technik entsprechenden Explosionsschutzkonzepten aufgezeigt.

5. Literatur

- [1] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV), Bundesministerium für Arbeit und Soziales, zuletzt geändert durch Artikel 148 der Verordnung vom 29. März 2017
- [2] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (BetrSichV), Bundesministerium für Arbeit und Soziales, zuletzt geändert durch Artikel 147 der Verordnung vom 29. März 2017
- [3] Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG), zuletzt geändert durch Artikel 435 der Verordnung vom 31.08.2015
- [4] TRGS 725 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Mess-, Steuer- und Regelungseinrichtungen im Rahmen von Explosionsschutzmaßnahmen“, Ausgabe Januar 2016 mit Berichtigung vom 29.07.2017

Einsatz von explosionsgeschützten Staubsaugern in gasexplosionsgefährdeten Bereichen

Dr.-Ing. **Carsten Blum**, DEKRA EXAM GmbH, Bochum

Kurzfassung

Das Aufsaugen brennbarer Stäube in gasexplosionsgefährdeten Bereichen ist in der Regel nicht zulässig, da sich die Stäube elektrostatisch aufladen können. Die daraus resultierenden Büschelentladungen können für gleichzeitig auftretende explosionsfähige Gas/Luft- oder Lösemitteldampf/Luft-Gemische zündfähig sein. Im Rahmen dieses Beitrages wird veranschaulicht, dass an einem bestimmten Staubsaugertyp nicht mit dem Auftreten von Büschelentladungen zu rechnen ist.

Hierzu ist jedoch ein messtechnischer und ein theoretische Nachweis erforderlich, um zu beurteilen, dass die eingesaugte Staubmenge nicht gefährlich hoch aufgeladen wird.

1. Problemstellung

Das Aufsaugen von brennbaren Stäuben mittels Industriesauger oder der pneumatische Staubtransport sind Prozesse, bei denen betriebsmäßig mit dem Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemischen zu rechnen ist. Hierbei kann nicht nur der Sauger wirksame Zündquellen aufweisen, sondern auch durch den Saugprozess selbst können wirksame Zündquellen entstehen.

Insbesondere sind neben elektrischen Funken und mechanischen Funken auch elektrostatische Entladungen zu beachten.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ausschließlich die Zündquelle Elektrostatik bei Saugprozessen an Staubsaugern hinsichtlich geräteeigener und betrieblicher Zündgefahren näher betrachtet. Weitere Zündgefahren durch andere Zündquellen wie mechanische Funken oder die Eignung elektrischer Bauteile sind im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen.

2. Elektrostatische Entladungen an Staubsaugern

Grundsätzlich ist beim Strömen von Staubpartikel in Rohren und Schläuchen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten mit elektrostatischen Aufladungen infolge von Ladungstrennprozessen beim Kontakt der Partikel mit der Schlauch- bzw. Rohrwand stattfinden (sog. triboelektrische Aufladung) zu rechnen. Dies ist bei Staubsaugern betriebsbedingt der Fall. Die Höhe der Aufladung hängt dabei von mehreren Parametern ab, z. B. elektrischer Widerstand des Schlauchmaterials, Fördergeschwindigkeit, spezifischer Widerstand des Staubes, Partikelgröße des Staubes, Art der Förderung bzw. Konzentration des Staubes im Förder Schlauch, etc.. Eine elektrostatische Zündgefahr kann sich dann sowohl vom aufgeladenen Produkt, als auch durch aufgeladene Bauteile des Staubsaugers ergeben.

Grundsätzlich sind bei der Beurteilung von elektrostatischen Zündgefahren an Staubsaugern die nachfolgend aufgeführten unterschiedlichen Entladungsarten zu betrachten, die sich hinsichtlich ihrer freigesetzten Energie und somit auch hinsichtlich ihrer Zündwirksamkeit gegenüber Brennstoff/Luft-Gemische unterscheiden:

Funkenentladungen:

Funkenentladungen können sowohl für explosionsfähige Staub/Luft- als auch für Gas/Luft- bzw. Lösemitteldampf/Luft-Gemische zündfähig sein. Von aufgeladenen, gegen Erde isolierten leitenden Bauteilen können sogenannte Funkenentladungen ausgehen. Daher müssen alle leitenden Teile des Saugers elektrisch untereinander verbunden sein. Bei Einbindung des Saugers in den betrieblichen Potenzialausgleich ist dann nicht mit dem Auftreten von Funkenentladungen zu rechnen.

Gleitstielbüschelentladungen:

Gleitstielbüschelentladungen sind sehr energiereich. Sie können ebenfalls sowohl für explosionsfähige Staub/Luft- als auch für Gas/Luft- bzw. Lösemitteldampf/Luft-Gemische zündfähig sein. Gleitstielbüschelentladungen können bei stark ladungserzeugenden Prozessen an dünnen isolierenden Schichten auftreten. Beim saugenden Transport sind solche energiereichen Entladungen an Saugschläuchen bekannt, wenn das Schlauchmaterial nicht ausreichend ableitfähig ist. Hier kann während des Förderprozesses ein elektrischer Durchschlag durch das isolierende Wandmaterial zur geerdeten Drahtspirale erfolgen (sog. pin-holing). Durch die Verwendung eines geerdeten Spiralschlauchs, der mit einem leitenden Kunststoff ausgerüstet ist, kann das Auftreten von Gleitstielbüschelentladungen vermieden werden.

Büschelentladungen

Von aufgeladenen isolierenden Gehäuseteilen oder von der aufgeladenen Staubschüttung im Sammelbehälter des Saugers können infolge des Förderprozesses Büschelentladungen ausgehen. Büschelentladungen können für explosionsfähige Gas/Luft- bzw. Lösemittel-

dampf/Luft-Gemische zündfähig sein. Explosionsfähige Staub/Luft-Gemische können durch Büschelentladungen nicht gezündet werden. Wenn das Auftreten explosionsfähiger Gas/Luft- bzw. Lösemitteldampf/Luft-Gemische nicht ausgeschlossen werden kann, müssen Büschelentladungen vermieden werden. Was dabei zu beachten ist, wird im Folgenden beschrieben.

3. Elektrostatische Zündgefahren beim Saugen von Staub in gasexplosionsgefährdeten Bereichen (Zone 1 und 2)

Aus der oben erläuterten Zündwirksamkeit der unterschiedlichen Entladungsarten wird deutlich, dass das Aufsaugen von Staub in gasexplosionsgefährdeten Bereichen (Zone 1 und 2) ein deutlich höheres Zündrisiko aufweist als das Aufsaugen von abgelagertem brennbaren Staub ohne Anwesenheit von Brenngasen oder Lösemitteldämpfen. Grund hierfür ist die höhere Zündempfindlichkeit der Brenngase und Lösemitteldämpfe. Daher müssen zur Vermeidung von Büschelentladungen in Zone 1 und Zone 2 alle Kunststoffteile und das Filtermaterial ableitfähig ausgeführt sein. Zusätzlich entsteht beim Saugen von Stäuben bei gleichzeitiger Anwesenheit brennbarer Gas/Luft- bzw. Lösemitteldampf/Luft-Gemischen eine grundsätzliche prozessbedingte Zündgefahr:

Während des Saugprozesses können Ladungstrennungen zwischen einem isolierenden Schüttgut und der Schlauchwand stattfinden (Kontaktaufladung). Ebenso ist beim Eintrag in den Staubsammelbehälter mit elektrostatischen Trennprozessen zu rechnen. Im Staubsammelbehälter werden die Ladungen des isolierenden Schüttgutes infolge der vorausgegangenen Kontaktaufladungen akkumuliert. Von dem eingetragenen hoch aufgeladenen, isolierten Schüttgut können analog zu isolierten Kunststoffoberflächen Büschelentladungen ausgehen, die für Gas/Luft- bzw. Lösemitteldampf/Luft-Gemische zündfähig sind. Dieses Zündrisiko besteht unabhängig davon, ob die aufzusaugenden Stäube selbst explosionsfähig sind oder nicht.

Im Bereich der Vakuumfördertechnik ist dies schon länger bekannt. Der Transport von Stäuben aus einem explosionsgefährdeten Bereich der Zone 1 oder Zone 2 ist nur zulässig, wenn der Staub ausreichend ableitfähig (z.B. Metallstaub) ist. Sollen isolierende Stäube aus einem explosionsgefährdeten Bereich der Zone 1 oder Zone 2 mittels Vakuumförderer transportiert werden, muss die Zone 1 oder die Zone 2 durch eine wirksame und ausreichend zuverlässige Inertisierung verhindert werden, oder es sind konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen zu ergreifen.

Im Vakuumförderer wird in der Regel mit einem höheren Unterdruck und mit längeren Förderleitungen gearbeitet als bei einem mobilen Staubsauger, so dass bei dem Vakuumförderer mit intensiveren Reibprozessen zwischen der Innenwand des Förderschlauches und des zu fördernden Produktes zu rechnen ist. Daher ist zunächst grundsätzlich davon auszugehen, dass die Aufladung des aufzusaugenden Schüttgutes im mobilen Staubsauger nicht so hoch sein wird wie beim pneumatischen Transport im Vakuumförderer. Trotzdem muss zunächst angenommen werden, dass auch in mobilen Staubsaugern zündwirksame Büschelentladungen auftreten können.

4. Förderversuche an Saugern

Um eine Aussage zu treffen, ob beim Saugvorgang an einem bestimmten Staubsauger tatsächlich Büschelentladungen generiert werden können, wurden Saugversuche an zwei Staubsaugern unterschiedlicher Größe der Firma Ruwac Industriesauger GmbH durchgeführt. Hierbei sollte ermittelt werden, wie hoch Schüttgüter durch den Saugprozess in den beiden Saugertypen tatsächlich aufgeladen werden.

Ziel der Versuche war es, einen Maximalwert für die spezifische Aufladung (Ladung pro kg eingesaugtem Produkt [$\mu\text{C}/\text{kg}$]) eines isolierenden Schüttgutes zu ermitteln. Bei Kenntnis der Schüttdichte des eingesaugten Produktes und des Volumens des Staubsammelbehälters des Saugers lässt sich dann ermitteln, wie hoch die Aufladung des eingesaugten Schüttgutes sein wird, wenn der Staubsammelbehälter maximal gefüllt ist.

Als zu untersuchende Produkte im Rahmen einer worst-case Betrachtung wurden Polypropylen-Granulat und Polypropylen-Staub (Korngröße $< 250 \mu\text{m}$) ausgewählt, da diese Polyolefine einen hohen spezifischen Widerstand aufweisen (ca. $10^{14} \Omega\text{m}$) und dazu tendieren, sich hoch aufzuladen.

Die Versuche erfolgten gemäß IEC 60079-32-2 (siehe [2]) im trockenen Prüfklima bei 23°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) und einer relativen Feuchte von 30 % ($\pm 5\%$).

4.1 Versuchsaufbau

Zur Ermittlung der maximalen spezifischen Aufladung des eingesaugten Produktes wurden die Sauger für die Versuche so modifiziert, dass die ableitfähigen Teile (Unterteil, Staubwanne und Saugschlauch) gegen Erde isoliert wurden, damit die Ladungen der bei den Saugversuchen aufgesaugten Partikel nicht zur Erde abfließen können. Das ableitfähige Gehäuseoberteil mit dem Motor und der Steuerung wurde durch einen roten isolierenden Zwischen-

ring vom ableitfähigen Unterteil und der Staubwanne getrennt (siehe <Bild 1 und 2), damit keine Ladungen über das ableitfähige Gehäuseoberteil, den Motor und den Netzanschluss abfließen konnten. Zusätzlich wurden die Rollen des Saugers auf hochisolierende Folien gestellt, um einen Ladungsabfluss über die Rollen und den Fußboden zu verhindern.



Bild 1: Sauger mit isolierendem Zwischenring



Bild 2: Rollen, durch Folie isoliert

Auch der Saugschlauch mit den jeweils verwendeten Düsen war gegen Erde isoliert. Die Person, die den Schlauch oder die Düse festhielt, war an der Hand ebenfalls gegen den Versuchsaufbau isoliert.

Im elektrischen Sinne stellt das elektrisch leitende Unterteil mit der Saugwanne, dem Schlauch und der Düse einen Kondensator dar, der gegen Erde isoliert ist. Durch den Eintrag von aufgeladenem Schüttgut wird ein solcher Kondensator aufgeladen.

Die Ladungsmenge eines solchen aufgeladenen Kondensators hängt von der Kapazität des Kondensators und der Spannung ab:

$$Q = C \cdot U$$

Q...Ladung [C]

C Kapazität [F]

U...Spannung [V]

Zur Ermittlung der Ladungshöhe des eingesaugten Produktes musste somit zunächst die Kapazität des Gehäuseunterteils, das leitend mit der Saugwanne, dem Schlauch und der Düse verbunden ist (im Folgenden Versuchseinrichtung genannt), bestimmt werden. Dies erfolgte mittels eines Kapazitätsmessgerätes.

Vor dem Beginn der Saugversuche wurde die aufzusaugende Menge des Schüttgutes abgewogen (1 kg oder 2 kg), um die spezifische Ladung pro kg Produkt ermitteln zu können.

Um die Ladungsmenge Q bei bekannter Kapazität zu ermitteln, wurde gemäß o.g. Gleichung die Spannung U an der Versuchseinrichtung gemessen. Das Unterteil wurde hierzu an ein Influenz-E-Feldmessgerät angeschlossen, welches mit einem Spannungsmesskopf ausgerüstet war und somit als statisches Voltmeter diente. Mit einem PC Oszilloskop und einer Auswertesoftware konnten die zeitlichen Spannungsverläufe bei den Saugversuchen aufgezeichnet werden. Der Aufbau der Messtechnik ist in Bild 3 dargestellt:

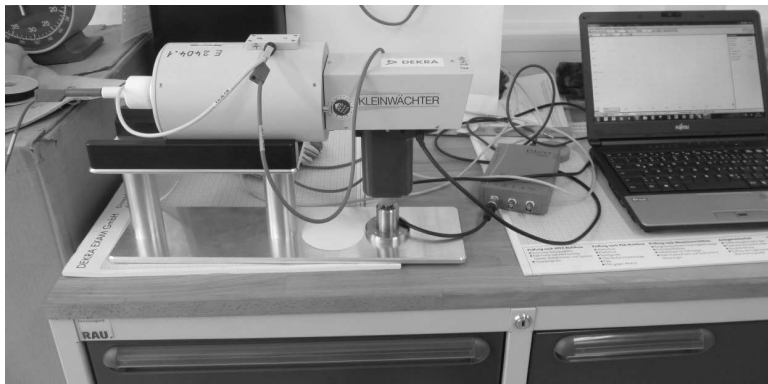


Bild 3: Messwerterfassung

4.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Es wurden mehrere Saugversuche durchgeführt. Hierbei wurden folgende Versuchsparameter variiert:

Saugertyp:	DS 1220 oder DS 1400
Produktkörnung:	PP-Granulat oder PP-Feinstaub
Düsengeometrie:	Bodendüse oder Fugendüse
Saugwanne:	Mit und ohne Entsorgungswanne
Art des Aufsaugens:	Aufsaugen vom Boden oder aus einer Schüttung

Die höchste gemessene Aufladung betrug $1,0 \cdot 10^{-1} \mu\text{C/kg}$. In der TRBS 2153 [1] wird für den pneumatischen Transport eine spezifische Aufladung für ein Schüttgut von $10^{-1} \mu\text{C/kg}$ bis $10^3 \mu\text{C/kg}$ angegeben. Durch die Versuche bestätigte sich somit die Vermutung, dass die spezifische Aufladung des eingesaugten Produktes durch den Saugprozess in den beiden Staubsaugern am unteren Ende des Bereichs der Literaturwerte für den pneumatischen Transport liegt.

4.3 Explosionstechnische Beurteilung der elektrostatischen Zündgefahren

Zur Abschätzung der Zündgefahr, welche mit dem Saugen der Feststoffe einhergeht, muss zunächst die sich einstellende Feldstärke der aufgeladenen Schüttung im Staubsammelbehälter abgeschätzt und in das Verhältnis zur Durchschlagspannung (Durchschlagfestigkeit) von Luft gesetzt werden. Beträgt die Feldstärke der Schüttung weniger als die Durchschlagfestigkeit der Luft von ca. 30 kV/cm, so können generell Gasentladungen und somit auch Büschelentladungen ausgeschlossen werden. Zur Abschätzung der Feldstärke der Schüttung im Staubsammelbehälter des Saugers kann dem Ansatz nach [3] gefolgt werden. Hierbei wird das elektrische Feld in kV/m für einen zylindrischen Körper nach folgender Gleichung berechnet.

$$\vec{E} = \frac{r \cdot q \cdot \rho_{Sch}}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon}$$

r ... Radius des zylindrischen Körpers in m

q ... spezifische Aufladung durch den Saugprozess in C/kg

ρ_{Sch} ... Schüttdichte in kg/m³

ϵ_0 ... elektrische Feldkonstante in As/Vm

ϵ ... relative Permittivität des Feststoffes

Der Radius r des für diese Modellbetrachtung heranzuziehenden zylindrischen Behälters ist über die Geometrie des Staubsammelbehälters gegeben. Hier ist der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Behälters und dem kürzesten Abstand zur nächstgelegenen Wand maßgeblich.

Dies gilt unter der Voraussetzung, dass sich keine Einbauten mit einem engen Krümmungsradius, wie Füllstandssensoren im Nahbereich der Schüttung bzw. des Staubsammelbehälters befinden.

Die relative Permittivität ε beschreibt die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder. Die relative Permittivität von Polypropylen beträgt ca. 1,45.

Dieser Wert ist recht gering und somit konservativ im Vergleich zu anderen Materialien. Werden in der betrieblichen Praxis Stoffe mit höheren relativen Permittivitäten eingesetzt, verringert sich die elektrische Feldstärke, da die relative Permittivität im Nenner der o.g. Gleichung steht.

Errechnet man nun die elektrische Feldstärke der Schüttung innerhalb des Saugers bei einer maximalen Füllhöhe mittels der oben aufgeführten Gleichung, so ergibt sich ein maximaler Wert von **1,8 kV/cm**. Dieser Maximalwert liegt mehr als das 10-fache unterhalb des Grenzwertes der Durchbruchfeldstärke von 30 kV/cm. Daher kann davon ausgegangen werden, dass bei den verwendeten Saugern zündwirksame Gasentladungen für Gase und Dämpfe, ausgehend von der elektrostatisch aufgeladenen Schüttung, nicht auftreten.

4.4 Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf andere Staubsaugertypen

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um eine allgemeingültige Aussage für den Einsatz von Staubsaugern in explosionsgefährdeten Bereichen handelt. Wie einleitend erwähnt hängt die Höhe der Produktaufloadungen von vielen Parametern ab und lässt sich nicht ohne Messung vorhersagen. Die hier getroffenen Aussagen gelten nur an den konkret untersuchten Prüfmustern mit der bei den Versuchen verwendeten Ausstattung. Für einen abweichenden Prüfaufbau sind aufgrund der Vielzahl der Einflussmöglichkeiten keine Aussagen möglich, sondern es sind erneut Messungen zur Nachweisführung erforderlich.

Auch die einzuhaltenden formalen Aspekte zum Inverkehrbringen von Saugern oder hinsichtlich der Beurteilung nach GefStoffV und Prüfung nach BetrSichV sind zusätzlich zu beachten.

- [1] TRBS 2153 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS), Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Ausgabe April 2009
- [2] “Transfer of powders into flammable solvents overview of explosion hazards and preventive measures”, Dr. Martin Glor, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19, 2006
- [3] IEC 60079-32-2: “EXPLOSIVE ATMOSPHERES – Part 32-2: Electrostatics hazards – Tests”, 2015

Untersuchung der Staubwolkenentstehungen durch Befüllvorgänge mit Holzpellets

Betrachtung des Staubexplosionsrisikos bei mechanischer Förderung stückigem, abrasiven Produkts

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

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird ein Versuchsstand aufgebaut, mit dem die praxisnahe mechanische Förderung stückigem Produktes, in diesem Falle zunächst Holzpellets der Klassen EN B (Industriepellets) und ENplus-A1 (Haushaltspellets), durchgeführt werden kann. Im Silo wird, in drei Ebenen verschiedener Höhe, an jeweils zwei bis drei Messpunkten gleichzeitig, die zeitliche Entwicklung der Staubkonzentration während der Pelletförderung und der Zeit danach gemessen. Weiterhin werden in weiteren Versuchsreihen Zündversuche durchgeführt. Hintergrund dieser Versuche ist die Untersuchung der Fragestellung, ob bei der praxisnahen Förderung von stückigen Schüttgütern, in ein Silo, gefährliche Staub- / Luftgemische hinsichtlich Staubexplosionen entstehen können. Variiert wird dabei die Pelletart, die Förderleistung in das Silo sowie die Füllhöhe im Silo vor Versuchsbeginn.

Für den Versuchsaufbau, der auf dem Testgelände der BGN/FSA in Kappelrodeck im Schwarzwald realisiert wird, findet ein dort vorhandenes 11 m³ Silo Verwendung, welches über einen Becherelevator bzw. eine Förderschnecke beschickt wird.

Die sicherheitstechnischen Explosionskenngrößen des Pelletabriebs beider Pelletsorten werden im Staublabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel bestimmt. Die Konzentration der unteren Explosionsgrenze beträgt für die EN B Pellets $c_{UEG, B} = 125 \text{ g / m}^3$ und für die Haushaltspellets $c_{UEG, A1} = 60 \text{ g/m}^3$. Die Staubungszahl ist $S_B = 8,80$ und $S_{A1} = 8,20$ (Staubungsgruppe 3). Damit gehört der Holzpelletabrieb zu den mäßig staubenden Schüttgütern.

Es werden mehrere Versuchsreihen für beide Pelletarten durchgeführt und die Ergebnisse sind im Rahmen der üblichen Streuung bezogen auf die unterschiedlichen Pelletsorten reproduzierbar.

Basierend auf den Staukonzentrationsmessungen zeigt sich, dass die untere Explosionsgrenze an keinem Messpunkt überschritten wurde. Weiterhin wird festgestellt, dass die absolute Staubkonzentration innerhalb im Silo stark abhängig ist von dem Feinstaubanteil und der Förderleistung und des Füllstands des Silos.

Bei der Förderung der Industriepellets, lässt sich auf der untersten Ebene eine Erhöhung der Staubkonzentration, von der vertikalen Symmetrieachse des Silos zur Silowand hin, feststellen. Auf der mittleren und oberen Messebene lässt sich allerdings leichte Erhöhung der Staubkonzentration von der Wand zum Silozentrum hin erkennen.

Für die Haushaltspellets lässt sich feststellen, dass diese auf der untersten Ebene eine starke Konzentrationserhöhung von der Silomitte zur Silowand hin aufweisen. Diese Erhöhung ist auch auf der mittleren Messebene festzustellen, ist hier allerdings nicht so stark ausgeprägt. Auf der obersten Messebene lässt sich keine Abhängigkeit der Staubkonzentration zum Messort feststellen.

Um die Konzentrationsmessungen zu verifizieren werden mit den Haushaltspellets Zündversuche durchgeführt. Hierbei kam es bei einem Versuch zu einer Zündung, welche allerdings nur eine Druckerhöhung von 10 mbar verursachte.

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 Ex-

plosionsschutz), 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 beinhaltet.

Beschreibung des zu untersuchenden Produkts

Zunächst werden zwei unterschiedliche Arten Holzpellets untersucht. Bei Holzpellets handelt es sich um kleine, zylindrische Körper, die aus Holzspänen unter hohem Druck gepresst werden. Bei den verwendeten Pellets handelt es sich um Industriepellets der Klasse EN B und Haushaltspellets der Klasse ENplus - A1. Diese unterscheiden sich laut Norm [1] in den in **Tabelle 1** dargestellten Eigenschaften.

Weiterhin verfügen die verwendeten Industriepellets laut Herstellerangaben über einen Bindemittelanteil von 2,0%. Die Haushaltspellets hingegen sind bindemittelfrei. Wie aus **Tabelle 1** ersichtlich ist, müssen die Industriepellets eine niedrigere Anforderungen hinsichtlich ihrer Festigkeit erfüllen. Durch die geringere Festigkeit der EN B Pellets, neigen diese zur stärkeren Abriebbildung, als Pellets der Klasse ENplus - A1. Zudem verfügen die Industrieholzpellets über einen Feinanteil ($x_p < 3\text{mm}$) von 30%, während die Haushaltspellets in gesiebter Form vorliegen. Somit ist zu erwarten, dass bei der Verwendung von Industriepellets eine höhere Konzentration gemessen werden kann.

Tabelle 1: Unterschiede der Eigenschaften der verwendeten Holzpellets laut Norm

Eigenschaft	Einheit	ENplus - A1	EN B
Mechanische Festigkeit	[%]	≥ 97,5	≥ 96,5
Untere Explosionsgrenze ¹⁾	[g/m³]	60	125

¹⁾ Nicht Bestandteil der Norm.

Konzentrationsmessung im 11m³ Silo – Versuchsaufbau und Durchführung der Versuche

Für die Untersuchungen wird ein Silo mechanisch mit Holzpellets befüllt und die sich dabei einstellende Staubkonzentration im inneren des Silos an definierten Messpunkten gemessen. Hierbei werden unter anderem 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. Nach der Ermittlung des Konzentrationsprofils werden an der Stelle, an der im Silo die höchsten Konzentrationen gemessen wurden, Zündversuche durchgeführt. Hierfür wird ein 10 kJ Zünder in das Silo eingebracht und zu dem Zeitpunkt, an dem sich für den zeitlichen Anstieg der Staubkonzentration ein Plateau einstellt, gezündet. Zeitgleich wird auf den drei Ebenen des Silos der Druck gemessen und über Flammensensoren eine eventuelle Flammenausbreitung detektiert. Um im Nachhinein eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Flammenausbreitung und der Druckanstieg durch eine Explosion verursacht, oder doch nur durch den 10 kJ Zünder hervorgerufen wurde, wird zunächst nur der Zünder innerhalb des Silos gezündet ohne dabei die Fördereinrichtung in Betrieb zu nehmen.

Das verwendete Silo verfügt über ein Volumen von $V_S = 11,04 \text{ m}^3$ und einem 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° 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 Holzpellets wurde zu Beginn des Projektes über einen Elevator realisiert, später wurde sich dazu ent-

schieden aus praktikablen Gründen 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 $\dot{m}_P = 4 - 5 \text{ t/h}$ 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 Untersuchung bei denen der Füllstand variiert wird ein konstanter Volumenstrom von $\dot{m}_P = 10 \text{ t/h}$ 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 die drei Messebenen verteilt, sodass auf jeder Ebene 2 Messgeräte in unterschiedlich radialer Tiefe den lokalen zeitlichen Verlauf der Staubkonzentration messen (siehe Abbildung 1).

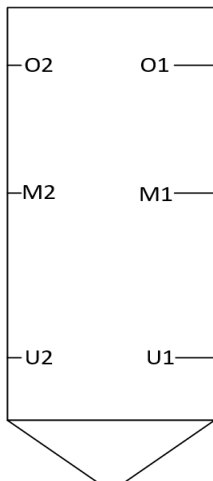


Bild 1: Messstellenskizze des Versuchsaufbaus, Indizes 1: 100 mm Wandabstand, Indizes 2: 400 mm Wandabstand.

Die Tiefe der einzelnen Messköpfe sowie deren Wichtung wurden nach dem Schwerelinien-Verfahren bestimmt [2,3].

Messergebnisse

Zeitlicher Verlauf der Staubkonzentration

In Abbildung 2 ist beispielhaft anhand des Versuchs C6 (Haushaltspellets die mit $\dot{m}_P = 10 \text{ t/h}$ in das leere Silo gefördert werden) der zeitliche Konzentrationsverlauf gezeigt, welcher an der Messstelle M2 aufgezeichnet wurde. Es ist zu sehen, dass die Staubkonzentration zu Beginn der Förderung bei $t_0 = 0 \text{ s}$ degressiv ansteigt und gegen Ende der Förderung bei $t_e = 216 \text{ s}$ ein Plateau erreicht hat. Die maximale Konzentration die an dieser Stelle lokal gemessen wurde liegt bei ca. $c_{\max} = 9 \text{ g/m}^3$.

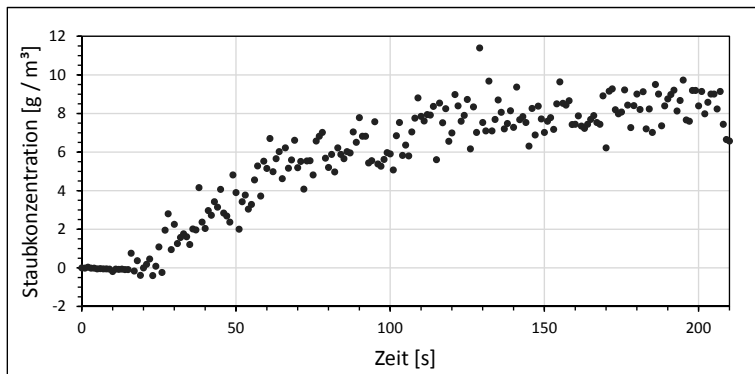


Bild 2: Beispielhafte Darstellung des zeitlichen Konzentrationsverlaufs des Versuchs C6 an der Messstelle M2

Abhängigkeit der Staubkonzentration vom Messort

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der Staubprofile welche sich durch die unterschiedlichen Holzpelletsorten ausbilden, wenn mit einer Förderleistung von $\dot{m}_P = 10 \text{ t/h}$ 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 $\bar{c}_{\max} = 22 \text{ g/m}^3$.

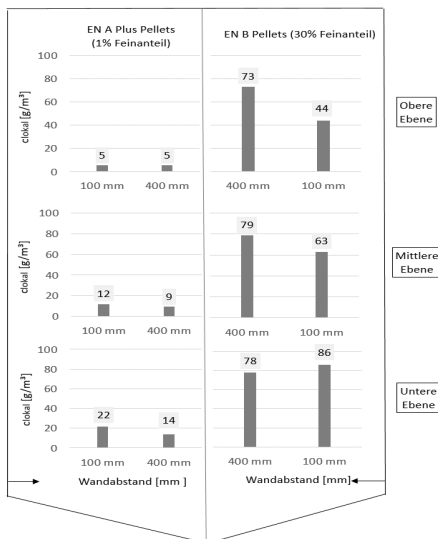


Bild 3: Vergleich der Staubprofile die durch die Haushaltspellets (links) und die Industriepellets (rechts) verursacht werden

Diese verringert sich in Richtung Silozentrum. Auf der mittleren Ebene ist ebenfalls eine Verringerung der Staubkonzentration von der Silowandung in Richtung Silozentrum zu erkennen. 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. Um die beiden Staubprofile qualitativ miteinander zu vergleichen, werden die lokalen Staubmaxima auf die mittlere Gesamtkonzentration im Silo normiert. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt. Es zeigt sich für Haushaltspellets, dass auf der unteren Ebene der Einfluss des Messortes signifikant für die Höhe der lokalen Staubkonzentration ist. Auch ist zu erkennen, dass die Staubkonzentration vom Siloboden zum Silokopf hin abnimmt. Auf der mittleren und oberen Ebene zeigt sich kein signifikanter Einfluss des Messortes zur Staubkonzentration. Zu den Industriepellets hingegen lässt sich sagen, dass die lokalen Staubkonzentrationen bezogen auf die mittlere Staubkon-

zentration im Silo, auf der unteren und mittleren Ebene eher unbeeinflusst von den radialen als auch axialen Koordinaten sind. Auf der obersten Ebene ist die Abhängigkeit der Staubkonzentration vom Messort am höchsten.

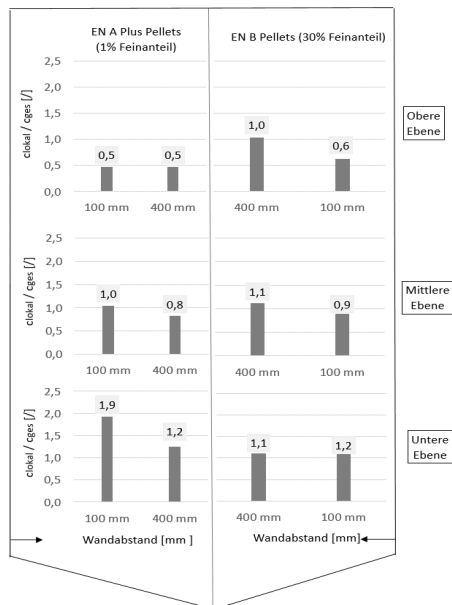


Bild 4: Vergleich der auf die Gesamtkonzentration normierten lokalen Staubkonzentrationen ($\bar{c}_{ges,A1} = 11 \text{ g/m}^3$, $\bar{c}_{ges,B} = 69 \text{ g/m}^3$)

Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Förderleistung

Abbildung 5 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Staubkonzentration im Silo von der Förderleistung. Als Normwert wird die mittlere Staubkonzentration der Förderleistung bei $\dot{m}_P = 10 \text{ t/h}$ verwendet. Es ist für beide Pelletsorten zu erkennen, dass sich die mittlere Staubkonzentration im Silo bei einer Verringerung der Förderleistung von $\dot{m}_P = 10 \text{ t/h}$ auf $\dot{m}_P = 5 \text{ t/h}$ ebenfalls verringert. Bei den Haushaltspellets stellt sich eine Verringerung auf 52% ein. Die Industriepellets liegen mit 38% in einem ähnlichen Bereich. Unterschiede lassen sich bei der Erhöhung der Förderleistung erkennen. Die Staubkonzentration welche sich durch

die Förderung der Haushaltspellets einstellt, verringert sich bei einer Erhöhung der Förderleistung von $\dot{m}_p = 10$ t/h auf $\dot{m}_p = 14$ t/h um 48%. Die Staubkonzentration, verursacht durch die Industriepellets, verringert sich gerade mal auf 97% des Ausgangswertes. Es scheint für diese Silogeometrie eine Förderleistung zu existieren oberhalb der die mittlere Staubkonzentration nicht mehr mit der Förderleistung weiter wächst.

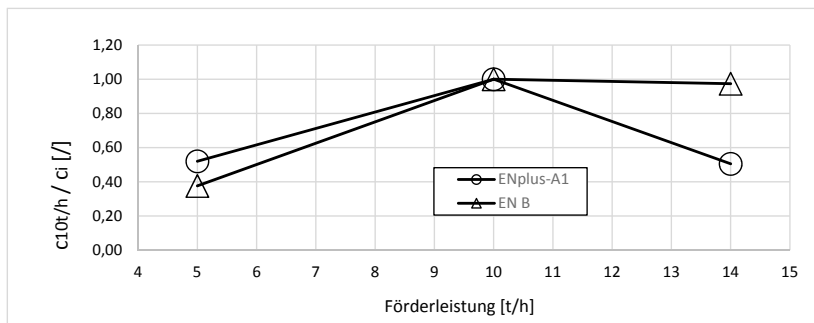


Bild 5: Änderung der mittleren Staubkonzentration im Silo in Abhängigkeit der Förderleistung.

Einfluss des Füllstands

Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Staubkonzentration im Silo vom Füllstand.

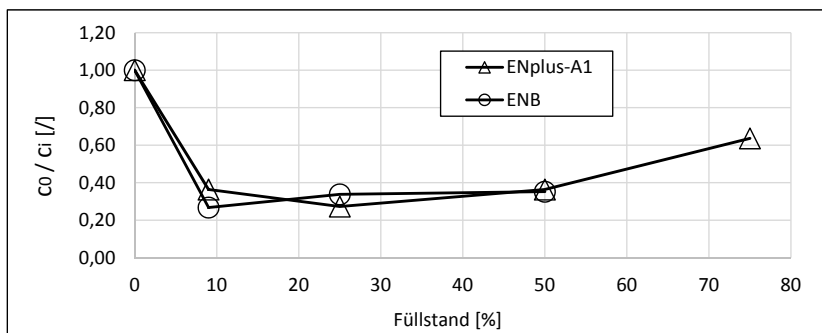


Bild 6: Änderung der mittleren Staubkonzentration im Silo in Abhängigkeit des Füllstands.

Als Normwert wird die mittlere Staubkonzentration verwendet, die sich einstellt, wenn mit einer Förderleistung von $\dot{m}_p = 10 \text{ t/h}$ in das leere Silo gefördert wird. Der Füllstand von 75% wurde nur mit Haushaltspellets untersucht, da die Menge an Industriepellets für die benötigte Vorlage nicht ausreichte. Den Messergebnissen ist zu entnehmen, dass, unabhängig von der Pelletart, im unbefüllten Silo die mittlere Staubkonzentration den höchsten Wert annimmt. Wird das Silo nun bis auf einen Füllstand von 9% gefüllt, verringert sich die mittlere Staubkonzentration bei der Verwendung von Haushaltspellets auf 36% und bei der Verwendung von Industriepellets auf 27%. Bei Füllständen von 25% und 50% bleibt die Änderung der mittleren Staubkonzentration auf diesem Niveau und steigt erst bei einem Füllstand von 75% wieder auf 64% des Ausgangswertes an. Der Grund dafür, dass die höchste Konzentration bei der Förderung in das leere Silo erzielt wird, ist vermutlich der harte Aufprall der Holzpellets auf der Silokonuswand. Hierbei entsteht feiner Abrieb, der die sich einstellende Staubkonzentration begünstigt.

Zündversuche

Da die höchste Konzentration im unteren Bereich, des zu Beginn der Förderung ($\dot{m}_p = 10 \text{ t/h}$) leeren Silos, in Wandnähe gemessen wurde, wird hier auch der Zünder für die Zündversuche eingebracht. Die Zündversuche wurden bis zum jetzigen Stand nur mit Haushaltspellets durchgeführt. Bei 5 der 6 durchgeführten Zündversuche erfolgte keine Zündung der Staubatmosphäre. Bei einem Versuch allerdings wurden eine leichte Druckerhöhung und eine anstehende Flamme detektiert. Abbildung 7 zeigt die Messergebnisse an den Messstelle p1 respektive F1 (selbe z-Koordinate wie die Messstellen U1 und U2) des Vorversuchs ohne in Betrieb genommene Förderung und des Zündversuchs. Die Zündung erfolgte bei $t_z = 0 \text{ s}$. Der durch den Zünder hervorgerufene Druck beträgt ca. $p_z = 3,5 \text{ mbar}$ und das durch den Zünder bedingte Flammensignal steht ca. $t_f = 50 \text{ ms}$ an. Bei dem Zündversuch C1 wurde ein maximaler Druck von $p_{\max} = 13,5 \text{ mbar}$ gemessen. Zudem stand die Flamme ca. $t_f = 230 \text{ ms}$ an. Die Messergebnisse der Druckmessstellen im mittleren und oberen Bereich des Silos zeigen einen identischen Verlauf. Der maximale Druck entspricht hier ebenfalls $p_{\max} = 13,5 \text{ mbar}$. In der mittleren Messebene stand die Flamme ebenfalls $t_f = 230 \text{ ms}$ an. Allerdings ließ sich an der oberen Messstelle keine Flamme detektieren.

Ein Zündung der Staubatmosphäre die durch die Haushaltspellets hervorgerufen wird wurde zunächst nicht erwartet, da die maximal gemessene Staubkonzentration ($c_{\max} = 22 \text{ g/m}^3$)

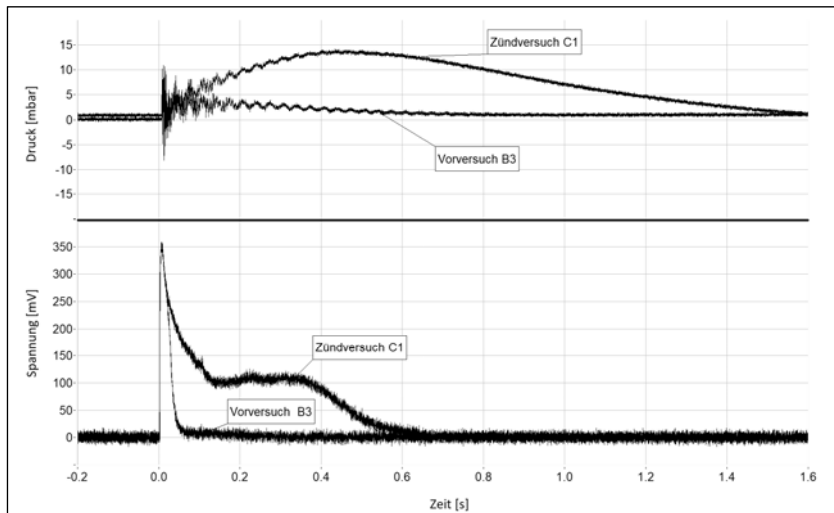


Bild 7: Messwerte der Messstellen p1 und F1

unterhalb der bestimmten unteren Explosionsgrenze ($c_{UEG, A1} = 60 \text{ g/m}^3$) liegt. Eine Erklärung für die Zündung könnte im Zündort verankert liegen. Das Staubkonzentrationsmessgerät in Wandnähe verfügt über einen Wandabstand von 100 mm, während der Zünder in unmittelbarer Nähe zur Wand gezündet wurde. Aus den Messergebnissen der Staubkonzentrationsmessung mit Haushaltspellets ableitend, ist sichergestellt, dass sich die Staubkonzentration vom Zentrum des Silos zur Wand hin erhöht. Somit lässt sich die Annahme treffen, dass die Staubkonzentration unmittelbar an der Wand etwas höher ist, als an dem Messgerät in Wandnähe. Da während der Zündversuche keine Staubkonzentration gemessen wurde, um die Konzentrationsmessgeräte im Falle einer stärkeren Explosion nicht zu beschädigen, lässt sich nur vermutend herleiten, dass der für diesen Versuch verwendete Big Bag einen größeren Feinanteil aufwies.

Zusammenfassung

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 die durch die Industrieholzpellets hervorgerufene maximale Staubkonzentration den vierfachen Wert der Konzentration annahm, welche durch die Haushaltspellets verursacht wurde. Weiterhin ließ sich feststellen, dass die Staubkonzentration bei beiden Holzpelletarten im unteren Bereich des Silos in der Nähe der Wandung den größten Wert annimmt. In Richtung Silokopf schwächt sich dieser Effekt allerdings ab. Für die Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Förderleistung wurde für beide Pelletsorten festgestellt, dass die Staubkonzentration im Bereich zwischen $\dot{m}_P = 5\text{--}10\text{ t/h}$ stark mit der Förderleistung zunimmt. Ab einer Förderleistung von $\dot{m}_P = 10\text{ t/h}$ lässt dieser Einfluss allerdings nach. Die Förderung in das leere Silo erzeugte für beide Pelletsorten eine höhere Staubkonzentration, als die Förderung in das zuvor teilbefüllte Silo. Es zeigt sich ferner eine Tendenz, dass die Staubkonzentration mit steigender Füllhöhe zunimmt. Bei den Zündversuchen kam es in einem Fall zur Zündung. Allerdings beträgt die hierdurch hervorgerufene Druckerhöhung gerade mal 10 mbar und eine Flamme wurde auch nur in der unteren und mittleren Ebene detektiert. Es stehen zurzeit noch Explosionsversuche mit Industrieholzpellets aus, da diese höhere Absolutwerte bezüglich der Staubkonzentration aufweisen. Abschließend lässt sich zum jetzigen Stand des Projekts sagen, dass die Förderung von Holzpellets Staubkonzentrationen verursacht, welche recht nah an der unteren Explosionsgrenze des Feinanteils der Pellets zu liegen scheinen.

- [1] DIN EN ISO 17225, Blatt 2: Klassifizierung von Holzpellets. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] VDI / VDE 2640, Blatt1: Netzabmessungen in Strömungsquerschnitten. Allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [3] VDI / VDE 2640, Blatt 3, Netzabmessungen in Strömungsquerschnitten. Bestimmung des Gassstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring. Oder Rechtequerschnitt. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Charakterisierung potentiell explosionsfähiger Gemische in unkonventionellen Sprühtrocknungsprozessen

Ing. **K. Maiwald**, M.Sc., Dr.-Ing. **P. Lerena**,
Nestec Ltd., Nestlé Research Konolfingen, Powder Engineering,
Schweiz;
Univ.-Prof. Dr.-Ing. **U. Barth**,
Bergische Universität Wuppertal, Deutschland
Fachgebiet Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung

Kurzfassung

Die Frage über das Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches in Sprühtrocknungsanlagen der Nahrungsmittelindustrie kann über die Berechnung der mittleren Staubkonzentration in grober Näherung quantifiziert werden. Dieser Algorithmus geht von einer homogenen Verteilung im Bemessungsvolumen aus und bezieht Ablagerungen und Produkt-rückführungen insofern ein, dass eine Aufkonzentrierung um den Faktor zwei bis drei zu berücksichtigen ist. Doch selbst die dabei maximal determinierte Staubkonzentration von 250 g/m³ spiegelt nicht zwingend den tatsächlichen Zustand moderner unkonventioneller Sprühtrocknungsprozesse wieder. Die vorliegende Untersuchung setzt sich mit der Güte der Näherung gegenüber tatsächlichen Werten auseinander. Aktuelle Inline-Messungen basierend auf dem Messprinzip der Rückstreuung (Backscatter) zeigen, dass durch Rezirkulierungen und Pulverrückführung im Turm während des laufenden Prozesses lokal eine um das 15fach höhere Konzentration auftreten kann. Die Ergebnisse erlauben des Weiteren das Aufzeigen von dynamischen Teilvolumina gefährlicher explosionsfähiger Gemische im vertikalen und horizontalen Turmquerschnitt, die im gesamten Bemessungsvolumen lokal stark begrenzt sind und im späteren Verlauf in den Kontext weiterer Prozess- und Stoffparameter sowie wirksamer Zündquellen zu stellen sind. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse gelten ausschließlich für die angegebenen Prozessbedingungen im Falle einer Monoanlage, d.h. Anlagen, deren Produktion sich auf ein Produkt beschränkt.

Abstract

The presence of potential explosion atmospheres in spray drying towers is only roughly characterized by the calculation of the mean dust concentration. This algorithm comes from a homogenous distribution in the whole volume of the tower and take lumps and returns in so

far into account, that a summation by the factor two or even three is to be made. But even the maximum concentration of 250 g/m³ cannot guarantee to build up real conditions. Inline-measurements based on the backscatter measuring principle show that recirculation and the return of dust into the tower while running normal operation effects in a substantial increase of concentration measures. The given measuring results allows a clustering of the vertical and horizontal cross section of the tower in potentially explosive and not explosive. Only in a partial and restricted locally volume of the whole chamber a dangerous quantity of explosive atmosphere is given. These facts have to be evaluated in the context of further parameters of process and product in combination with potential ignition sources. The current contribution applies only for the described conditions in case of a so called mono-production.

1. Einleitung

Um eine Anlage hinsichtlich ihrer Explosions- und Brandgefahren sicher beurteilen zu können, ist es bewährte Praxis, dem Vorgehen des sogenannten Duktus zu folgen, vgl. [1, 2]. Dies schließt die Prüfung der Maßnahmen-Rangfolge gemäß ATEX RL 1999/92/EG [3] ein, wobei erst nach Beurteilung der explosionsfähigen Atmosphäre - bzw. bei nicht atmosphärischen Bedingungen der explosionsfähigen Gemische - sowie wirksamer Zündquellen ein konstruktiver Schutz vor möglichen Auswirkungen von Bränden und Explosionen vorzunehmen ist. Demnach sind die Sicherheitsmaßnahmen vorrangig vor den Schutzmaßnahmen zu treffen.

Im Falle von Sprühtrocknungsprozessen stellt sich die Beurteilung der vorherrschenden Gemische insofern als Herausforderung dar, dass das Innere einer Apparatur oft durch die mittlere Staubkonzentration grob charakterisiert wird. Dieser Zustand trägt jedoch nicht der Gegebenheit Rechnung, dass keine homogene Verteilung des dispergierten Staubes vorliegt und mit dem Vorhandensein von Wandanhaftungen, Rückführung oder Zumischung im Turm eine Aufkonzentrierung der mittleren Staubkonzentration einhergeht. Rückführung und Zumischung in die Trocknungskammer stellen in der modernen Sprühtrocknung keine Seltenheit mehr dar, da die Rezepturen etwa für Instantprodukte und deren Qualität sich in den vergangenen Jahren stark weiterentwickelt haben. Die Lebensmitteltechnologie eilt somit dem Stand der Sicherheitstechnik voraus, da diese Produktentwicklung auch Einfluss auf die mit der Anlage verbundenen Explosions- und Brandgefahren nehmen kann.

Ziel und angestrebtes Ergebnis dieser laufenden Studie des Fachgebiets Methoden der Sicherheitstechnik/Unfallforschung in Kooperation mit Nestlé Research Konolfingen ist es demnach aufzuzeigen, mit welchen Mitteln der Prozessanalytik das potentiell explosionsfähige

ge Gemisch im Inneren einer Trocknungskammer charakterisiert werden kann, um somit im bilateralen Kontext von Wissenschaft und Praxis einen Wissenszugewinn über den Prozess und insbesondere die Staubverteilung in Trocknungskammern zu erhalten. Durch Inline-Messungen sollen räumlich und zeitlich vorherrschende Teilvolumina gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre eruiert werden, um in weiteren Beurteilungsschritten in den Kontext wirksamer Zündquellen gestellt zu werden. Zeitgleich können aus einem Vergleich kalkulierter und gemessener Parameter Bedingungen für einen sicheren Anlagenbetrieb abgeleitet werden, wobei auch der Einfluss von Unsicherheiten und Abweichungen ebendieser Parameter nicht zu vernachlässigen ist.

2. Stand der Technik - Explosionsfähige Gemische in konventionellen versus unkonventionellen Sprühtrocknungsprozessen

Bei der Beurteilung der Explosions- und Brandgefahren von Sprühtrocknungsprozessen wird nicht nur zwischen konventionellen und unkonventionellen Sprühtrocknungsprozessen unterschieden. Dies ist in der Nahrungsmittelindustrie vielmehr auch eine Frage der anlagentechnischen Weiterentwicklung und der qualitativen Verbesserung von Instantprodukten, vgl. [4]. Demnach sind unkonventionelle Sprühtrockner heute mehr und mehr gängige Praxis und tatsächlich nicht mehr derart „unkonventionell“ im Sinne des Wortes. Auf Grundlage bisheriger Veröffentlichungen zum Stand der Technik soll diese Terminologie im Rahmen dieses Beitrages jedoch beibehalten werden.

Bisherige Erkenntnisse den Explosions- und Brandschutz von Sprühtrocknungsanlagen betreffend, finden sich in den VDI-Richtlinien 2263, Blatt 7 und 7.1 [5, 6] wieder. Nach diesem derzeitigen Stand der Technik ist in konventionellen Sprühtrocknungsprozessen eine Reduzierung des Gesamtvolumens der Trocknungskammer zur Auslegung der konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen möglich, vgl. [7]. Dies setzt nach Siwek [8, 9] voraus, dass die mittlere Staubkonzentration stets unterhalb der bestimmten unteren Explosionsgrenze (UEG) gefahren wird, kein innenliegendes Fließbett vorliegt und von den Abscheidern keine Rückführung zum Prozess gegeben ist. Wie in [5] aufgezeigt, gibt es Anlagentypen, die derartige Voraussetzungen nicht gewährleisten. Nach Grund et al. [10, 11] sind für moderne Anlagentypen zur Erreichung der qualitativen Erfordernisse innenliegende Fließbetten und Feinpulverrückführung nach der Abscheidung keine Ausnahmen mehr. Durch Abluftkanäle im Turmdeckenbereich verändert sich zudem das Strömungsbild, da eine Umkehr, respektive Rezirkulierung der Strömungsluft über dem Fließbett herbeigeführt wird, vgl. [11 bis 13]. Nachzeitigem Forschungsstand kann damit einhergehend das Vorhandensein eines ex-

plosionsfähigen Gemisches im gesamten Turm während des Trocknungsprozesses nicht ausgeschlossen werden und eine konstruktive Schutzlösung des gesamten Turmvolumens ist notwendig. Siwek [8] bezeichnet dies als Vollschutz der Anlage.

3. Bewertungsparameter

Dass verschiedenste Einflussgrößen den Beginn und Verlauf einer Staubexplosion sowohl hinsichtlich Zündmechanismus als auch hinsichtlich Auswirkungen beeinflussen, gilt als hinlänglich belegt. Derartige Einflüsse können stoffspezifisch und umgebungsbedingt vorliegen. Auf Seiten der stoffspezifischen Einflussfaktoren haben sich nicht nur die Größe der Partikeln und deren Verteilung als signifikant erwiesen, sondern auch deren Feuchteanteil sowie Sauerstoffgrenz- und Staubkonzentration. Untersuchungen zum Einfluss von Umgebungsfaktoren zeigen auf, dass neben der Umgebungstemperatur auch Umgebungsdruck, Behältergeometrie und auftretende Turbulenzen den Staubexplosionsbeginn und -verlauf maßgeblich beeinflussen, vgl. [14].

Nachdem sich das im Rahmen dieser Studie exemplarisch gewählte Milchpulver-Produkt nicht zuletzt bereits aufgrund seiner Partikelgrößenverteilung und des geringen Feuchteanteils als explosionsfähig herausstellte, wurden die nachstehenden Folgeuntersuchungen angestellt. Für die Beurteilung eines sicheren Anlagenzustandes von Sprühtrocknungsprozessen hinsichtlich Staubverteilung sind nach aktuellem Stand der Technik die mittlere Staubkonzentration in Anlehnung an die jeweilige Massenbilanz und die untere Explosionsgrenze des zu produzierenden Stoffes zu bestimmen. Diese benannten Größen dienen als Vergleichsgrößen und somit als Bewertungsparameter zur Gemischbeurteilung für die Prozessanalytik, mit Hilfe derer in Form von Inline-Messungen tatsächliche Staubkonzentrationen, Feuchtigkeit und Temperaturen ermittelt werden.

Eine inhärente Maßnahme des Explosionsschutzes, und damit einher vorrangig zu ergreifende Maßnahmen gemäß Rangfolge der festzulegenden Maßnahmen, ist unter anderem die Reduzierung des explosionsfähigen Gemisches auf eine nicht gefahrdrohende Menge. Die hierbei relevante Größe ist die produktspezifische untere Explosionsgrenze (UEG) bzw. der Explosionsbereich, d.h. der Konzentrationsbereich des Staubes mit Luft innerhalb dessen Explosionen möglich sind.

Die Bestimmung der UEG in der exemplarischen Betrachtung dieser Studie wurde mittels 20l-Apparatur bei 125 g/m³ („tel quel“) [15] ermittelt. Eine Umrechnung der ermittelten UEG auf die nicht-atmosphärischen Bedingungen der Sprühtrocknung gemäß Algorithmus (1) bei einer Durchschnittstemperatur von 80° C ergibt eine reduzierte UEG von ca. 105 g/m³.

$$UEG(T) = UEG(T_0) \times [1 + \alpha \times (T - T_0)] \quad (1)$$

$$UEG(80^\circ C) = 125 \frac{g}{m^3} \times [1 - 0,0027 \times (80^\circ C - 20^\circ C)] = 104,75 \frac{g}{m^3}$$

Eine grobe Abschätzung der Staubkonzentration im Turm zum Zeitpunkt der Messungen kann mittels folgendem Algorithmus (2) abgebildet werden (Rückführung/Zumischungen nicht inbegriffen):

$$\bar{c} = \frac{\text{massflow of dust } (\frac{kg}{h})}{\frac{\text{massflow of air } (\frac{kg}{h})}{\rho(\text{air}(f(T))) \frac{kg}{m^3}}} \quad (2)$$

$$\bar{c} = \frac{175 \frac{kg}{h}}{5834 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1}{0,969 \frac{kg}{m^3}}} = 0,02923 \frac{kg}{m^3} = 29,23 \frac{g}{m^3} \approx 30 \frac{g}{m^3}$$

Im exemplarischen Anwendungsfall ergibt der Quotient aus Massenstrom des Staubes und Massenstrom der Luft im Verhältnis zur temperaturbedingten Dichte eine gemittelte Staubkonzentration von ca. 30 g/m³, was für viele Produkte nahe, bzw. sogar unterhalb der unteren Explosionsgrenze liegt. Diese gemittelte Konzentration spiegelt zwar typische Produktionsparameter wieder, liegt jedoch aufgrund der möglichen Ausschöpfung im wirtschaftlichen Sinne deutlich unter dem Durchschnitt und entspricht eher der unteren Leistungsgrenze des für die Versuche verwendeten Turmvolumens. Für den vorliegenden Trocknungsprozess scheint somit ein sicherer Anlagenbetrieb vorzuliegen. Selbst nach einer theoretischen Anpassung der gemittelten Staubkonzentration aufgrund inhomogener Staubverteilung, Ablagerungen und Rückführungen um den Faktor drei und einer resultierenden Summe von $\bar{c} = 90$ g/m³ gilt die temperaturkorrigierte UEG weiterhin als unterschritten. Dies trifft jedoch lediglich für die Betrachtungen von Monoanlagen nach Definition [6] zu, da andernfalls auch geringere Explosionsgrenzen nicht auszuschließen sind, bzw. für jeden Einzelfall zu bestimmen sind.

4. Staubkonzentrationsmessungen

Zur Prozessanalytik hinsichtlich der Parameterbestimmung im Sinne des Explosionsschutzes wurden neben den bewährten Offline-Messungen, z.B. zur Partikelgrößenverteilung und zum Feuchtigkeitsanteil, auch Inline-Messungen zur Bestimmung von Staubkonzentration, ggf. deren Verteilung sowie Temperatur im Bemessungsvolumen durchgeführt. Diese ergänzen demnach die vorab (Kapitel 3) theoretisch angestellten Vergleichsbedingungen um die Abbildung realer Zustände. Des Weiteren wurden auch Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen, die in der folgenden Versuchsbeschreibung und –auswertung jedoch nicht weiter einfließen.

Für die vorgestellten Messungen wurde ein exemplarischer unkonventioneller Sprühtrocknungsturm der Nahrungsmittelindustrie in Anlehnung an die gemäß der in Kapitel 2 aufgeführten Definition gewählt. Für den speziellen Fall bedeutet dies, dass im Design die Bedingungen der deckennahen Abluftpositionierung, der Rückführung und sogar der Zumischung in einem Turmvolumen von ca. 75 m³ zu berücksichtigen sind. Die Messungen wurden im laufenden Normalbetrieb vorgenommen; An- und Abfahrprozesse ausgeschlossen.

4.1 Versuchsaufbau

Für die simultanen Messungen von Temperatur und Konzentration (sowie Geschwindigkeit) wurde als Messgerät das sogenannte Labasys 100® der MSE Meili AG [16] verwendet. Das Messprinzip basiert auf der Rückstreuung des von Laserdioden mittels Glasfaser geführten Lichts. Das resultierende Spannungssignal wird mittels Lambert-Beerschen Gesetz in die Feststoffvolumenkonzentration umgerechnet, vgl. [16]. Die räumliche Datenerfassung erfolgte an jeder Messstelle über ein Zeitfenster von 50 Sekunden mit einer Abtastrate von 20 kHz. Durch die Wahrscheinlichkeit auftretender Produktanhaftungen am Sensor aufgrund von Partikelfeuchtigkeit, ist eine Reinigungsfunktion mittels Druckluft im Messsystem integriert. Der gesamte Versuchsaufbau inklusive angedeuteter Messpositionen ist dem Bild 1 zu entnehmen.

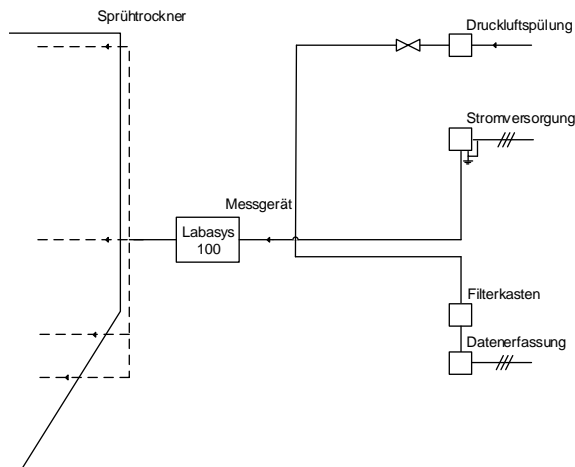


Bild 1: Versuchsaufbau

Es wurden insgesamt drei Messbereiche erfasst: Turmdecke, Turmzylinder und Turmkonus. Der Messerfolg im horizontalen Querschnitt ist durch die Länge der Lanze auf 2,2 m Eindringtiefe begrenzt, was im Konus jedoch ein vollständiges Abtasten in 0,2 m Schritten erlaubte.

Entgegen der übrigen Positionen ist für den Deckenbereich zu beachten, dass die Lanze und somit die Messsonde nicht in Richtung Zentrum, respektive der Eindüsung geführt wurde, sondern seitlich versetzt in Richtung der Abluft. Für die Datenerfassung im zylindrischen Turmbereich kann ein Einfluss der Zumischung nicht ausgeschlossen werden, da hierbei für Messsonde und Zumischung der selbige Flansch genutzt wird, wobei die Messsonde in einem Winkel von 10° angebracht wurde, um in Richtung Turmzentrum zu vermessen.

4.2 Versuchsergebnisse und Vergleich der Bewertungsparameter

Die Grafiken (Bild 2 und 3) sind von links nach rechts zu lesen, wobei links der Wandungsbereich und rechts der maximale Einschub der Lanze wiedergegeben wird. Diese ist wie angegeben auf 2,0 m begrenzt und ermöglicht inkl. Messsonde Messungen bis 2,2 m Tiefe. Dies entspricht einer Messtiefe über die Turmmitte (1,75 m bei $d = 3,5$ m) hinaus.

Die Vergleiche von mittlerer Staubkonzentration, unterer Explosionsgrenze und Staubkonzentrationsmessungen werden in allen Messpunkten angestellt und hinsichtlich der Existenz eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches geprüft. Bei dem angestellten Vergleich wurde die UEG nicht lediglich auf die nicht-atmosphärischen Bedingungen korrigiert, sondern zusätzlich um einen Unsicherheitsfaktor von 0,5 reduziert. Dieser erscheint recht hoch, doch Unsicherheiten im Bestimmungsverfahren durch Übertragung von z.B. Turbulenz, Geometrie und Zündenergie auf die realen Prozessbedingungen rechtfertigen diese Annahme vorerst. Für Stäube ist dies bisher nur eine Annahme, wobei für Gase eine Unterschreitung der UEG von 20 Vol% empfohlen wird, vgl. [17].

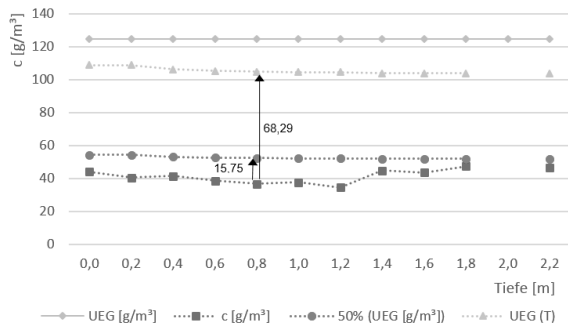


Bild 2: Vergleich UEG - c, Turmdecke

Bild 2 zeigt die Resultate der Konzentrationsmessungen (c) im Deckenbereich mit einer ausreichenden Unterschreitung der UEG. Alle Messwerte unterschreiten die rechnerisch ermittelte mittlere und korrigierte Staubkonzentration von $\bar{c} = 90 \text{ g/m}^3$ um durchschnittlich ca. 50 g/m^3 . Zudem ist anhand dieses Beispielsprodukts die deutliche Unterschreitung der temperaturkorrigierten UEG hervorzuheben. Auch der eingeräumte Unsicherheitsabstand (50% (UEG)) ist in allen Punkten unterschritten.

Der konische Teil der Trocknungskammer zeigte im Vergleich einen ähnlichen Trend in Richtung eines sicheren Anlagenzustandes hinsichtlich der Bildung explosionsfähiger Gemische. Hierbei lagen die Werte der Konzentrationsmessungen durchschnittlich sogar bei lediglich 10 g/m^3 .

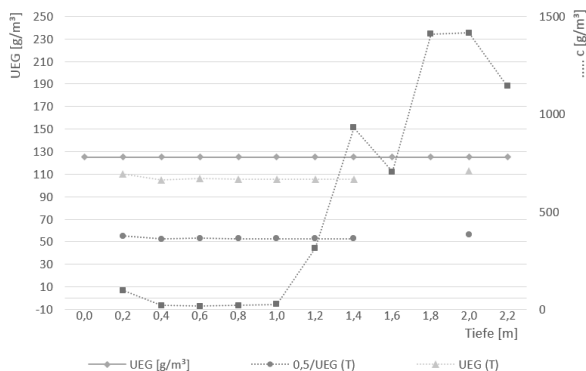


Bild 3: Vergleich UEG - c, Zylindermite

Demgegenüber sind in Bild 3 die Messergebnisse im mittleren Turmzylinder dargestellt. Hier zeigt die grafische Gegenüberstellung markante Abweichungen im Verhältnis der Vergleichsparameter. Während bis zu einer Einschubtiefe von 1 m die UEG und sogar der 50 %ige Unsicherheitsabstand noch deutlich unterschritten sind, weisen die Folgewerte einen extremen Anstieg auf bis zu 1400 g/m^3 auf. Die Staubverteilung im Bemessungsvolumen befindet sich demnach für dieses Teilvolumen im Explosionsbereich. Herstellerangaben des Messsystems zur Folge [18] ist in diesem Bereich hoher Konzentrationen und insbesondere Verschmutzungen der Sensoren dennoch mit einer maximalen Ungenauigkeit von lediglich 30 % auszugehen, was bei Maximalwerten um 1400 g/m^3 noch immer einer lokale Aufkonzentrierung auf 1000 g/m^3 bedeutet.

5. Diskussion

Bis auf die lokale Aufkonzentrierung im mittleren zylindrischen Turmbereich weisen die Resultate der Messungen eine durchschnittlich geringe Staubkonzentration auf. Dies gilt sogar für Bereiche, in denen erfahrungsgemäß mit höheren Werten zu rechnen ist, wie z.B. Konus und Wandungsnähe aufgrund des rezirkulierenden Staubes. Hierzu sei auf den während der Versuche geltenden Massenstrom verwiesen, der vergleichsweise gering ausfällt und eher der unteren Leistungsgrenze einer Trocknungskammer dieser Dimensionierung entspricht. Aufgrund der Flanschlösung (s. Kapitel 4.1) im Zylinder konnte für diesen Bereich der Einfluss der Zumischung ermittelt werden. Ausgehend von der Messreihe in Bild 3 kann festgehalten werden, dass die lokale Aufkonzentrierung eher durch die Rezirkulierung als auf besagte Zumischung zurückzuführen ist.

Wie die bisherigen Ergebnisse aufzeigen, herrschen bereits im Normalbetrieb Gemischbeeinflussende Bedingungen. Gleiches gilt auch und insbesondere für Störungen. Diese Beeinflussung kann zur Aufkonzentrierung, respektive Reduzierung der Konzentration führen oder zur Abweichung der idealisierten Verteilung im Bemessungsvolumen.

Im Normalbetrieb spielt neben den Prozessbedingungen (Temperatur, Druck etc.) auch das Anlagendesign eine entscheidende Rolle. Zu den bereits erwähnten Faktoren von Abluft und Rückführung sind auch deren Positionierung sowie die Positionen und Produkteigenschaften von Zumischungen entscheidend für die Staubverteilung und deren Charakterisierung. Dies erhöht gleichzeitig die Gesamtmassenbilanz. Hinzu kommt der Einsatz von Einrichtungen zur Abreinigung der Wandungen von Ablagerungen im laufenden Normalbetrieb, z.B. mittels mechanisch gesteuerter Klopfer. Klimatische Umgebungsbedingungen beeinflussen die Aus-

legung des zu trocknenden Massenstroms zusätzlich, insofern kein Lufttrockner zum Einsatz kommt.

Im Falle einer Störung sorgt der herbeigeführte Notstop binnen Sekunden für eine Unterbrechung aller Zu- und Abluftströme; der dispergierte Staub kommt zum Erliegen. Demgegenüber sorgen Druckveränderungen im Turm, ob durch Aufhebung des Unterdrucks oder aufgrund von Ereignissen in benachbarten Anlagenteilen, für eine Abweichung des idealisierten Strömungsbildes.

6. Fazit und Ausblick

Die beschriebenen Messergebnisse sind einzig für die vorgegebenen Prozessbedingungen und den Turmbautyp geltend und lassen eine allgemeine Aussage hinsichtlich gefährlicher explosionsfähiger Teilvolumina nur für diesen Geltungsbereich zu. Von einer Verallgemeinerung für generelle unkonventionelle Sprühtrocknertypen ist daher zum derzeitigen Erkenntnisstand abzusehen.

Im Hinblick auf die benannte Zielstellung zeigen die vorgestellten Ergebnisse sowie Recherchen früherer Projekte jedoch auf, dass sich das vorgestellte Verfahren bzw. Messprinzip zur Beurteilung der Gemische in nicht einsehbare Sprühtrocknungsprozesse als geeignet herausstellte. In Zukunft ist demnach das Vermessen variierender Prozessbedingungen, Betriebszustände sowie differenzierender Sprühtrocknertypen und Volumina denkbar. Damit könnte eine allgemein gültige Aussage über den hier vorgestellten Geltungsbereich hinaus erwirkt werden.

Die aufgeführten Messergebnisse liefern außerdem erklärende Indizien dafür, dass Ereignisse in staubführenden Anlagen der Sprühtrocknung nicht noch häufiger vorkommen und auch in der Schwere ihrer Auswirkungen vergleichsweise geringer ausfallen können: Die räumliche und zeitliche Koinzidenz von explosionsfähigen Gemischen und effektiver Zündquelle ist nur für Teilvolumina der Trocknungskammer gegeben. In Abhängigkeit von Bautyp und Prozessbedingungen über die Betriebslaufzeit kann zudem ein dynamisches Verhalten dieser Teilvolumen nicht ausgeschlossen werden.

Bezugnehmend auf die numerische Modellierung von Verfahrensprozessen sind derartige Messungen nicht nur für die Validierung existierender Simulationen hilfreich, sondern gewährleisten eine qualitative Verbesserung künftiger Modellierungen, (auch abweichender) Bedingungen. Es liegt daher nahe, dass kostenintensive Prozessanalytik in ihrer Anzahl gering gehalten werden können, insofern zur weiterführenden numerischen Modellierung ausreichend valide Daten verfügbar sind.

Für eine weitere Beurteilung des vorliegenden Anlagenbeispiels in Kombination mit der exemplarischen Produktauswahl, ist gemäß Abfrageschema des Duktus die Zündquellenbewertung hinsichtlich vorherrschender Explosionsgefahren zu erbringen. Es ist festzustellen, ob im Teilvolumen der gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre eine wirksame Zündquelle vorhanden ist.

Für eine allumfassende Einteilung der Trocknungskammer im Hinblick auf geltende Explosionsgefahren sind somit auch die weiteren in diesem Beitrag unberücksichtigten Parameter heranzuziehen, die bekanntermaßen Einfluss auf die Explosionsinitiierung und das Explosionsverhalten nehmen können (siehe Kapitel 3). Möglicherweise sind die Kriterien eines erfolgreichen Zündmechanismus nicht nur aufgrund fehlender Konzentration, sondern auch aufgrund von Feuchtigkeitsanteil und Geschwindigkeit als nicht erfüllt anzusehen. Die bisherige Einteilung der Trocknungskammer ausgehend von Bild 2 und 3 ist somit um weitere Parameter zu ergänzen und hinsichtlich Zündquellenwirksamkeit zu untersuchen.

Literaturangaben

- [1] TRBS 2152 Teil 1; 2006. Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Beurteilung der Explosionsgefährdung.
- [2] Maiwald, K., Liske, B. u. Barth U.: The "Duktus" for the Assessment of Explosion Hazards. A Methodical Toolbox for Application. Tagungsband Hazards27. 2017
- [3] EU Parlament: Richtlinie 1999/92/EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch Richtlinie 1999/92/EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können. Richtlinie, Bd. 1999. 1999
- [4] Maiwald, K.: Erfahrungen in der Beurteilung von Brand- und Explosionsgefährdungen unkonventioneller Sprühtrocknungsprozesse. 11. Brandschutzsymposium „Sicherheit vor Staubbränden und -explosionen“. Hannover 2016
- [5] VDI-Richtlinie 2263 - 7; 07.2010. Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen, Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen
- [6] VDI-Richtlinie 2263 - 7.1; 03.2013. Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen, Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen, Beispiele

- [7] Siwek, R., van Wingerden, K. u. Hansen, O. R. et al: Dust Explosion Venting and Suppression of Conventional Spray Dryers. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 11th International Symposium. 2004
- [8] Siwek, R.: Explosionsschutz an Zerstäubungstrocknern. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 2000 (2000) Nr. 3
- [9] Siwek, R.: Brand- und Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. Technische Sicherheit Bd. 2 (2012) Nr. 6 - Juni, S. 16–18
- [10] Grund, S. u. Gehrke, M.: Praxisorientierte Explosionsschutzkonzepte für Sprühtrocknungsanlagen in der Nahrungsmittelindustrie. sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell 2011 (2011), S. 284–287
- [11] Grund, S., Wenzel, M. u. Gehrke, M.: Explosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen. Praxisorientierte Umsetzung von Explosionsschutzkonzepten in der Nahrungsmittelindustrie, S. 1–14
- [12] Dammann, L.: Brand- und Staubexplosionsschutz von Sprühtrocknungsanlagen der Milchindustrie. Umsetzung eines anlagentechnischen sowie organisatorischen Brand- und Explosionsschutz. VDI-Fachtagung mit Ausstellung Sichere Handhabung Brennbarer Stäube. Nürnberg, 21. und 22. Oktober 2014. VDI-Berichte, Bd. 2225. Düsseldorf: VDI-Verl. 2014, S. 61–67
- [13] Dammann, L.: Brand- und Staubexplosionsschutz an Sprühtrocknungsanlagen der Milchindustrie. REMBE Fachtagung. Entwicklungen und Trends im (konstruktiven) Explosionsschutz. 2015, S. 77–97
- [14] Stommel, K.: Einflussgrößen auf den Verlauf von Staubexplosionsereignissen, Bergische Universität Wuppertal Best Practice, betreut von Maiwald, K. und Barth, U. Wuppertal 2016
- [15] Pellmont, G.: Prüfbericht 16/014. unveröffentlichtes Dokument. Basel 2016
- [16] MSE Meili AG - Multiphase Systems Engineering: LABASYS 100. Messsystem für Konzentration & Geschwindigkeit. Schaffhausen, Switzerland
- [17] Bartknecht, W.: Explosionsschutz. Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer Berlin 2013
- [18] Meili, R.: Persönliche Mitteilung. Schaffhausen, Switzerland 2017

The effect of vent ducts on the reduced explosion pressure in vented vessels

Ir. Ake Harmanny, Ir. Tom Molkens, ISMA NV, Kontich, Belgium

Abstract

In this paper the effect of a vent duct on vented dust explosions is investigated, in order to verify whether it is the length or the length-to-diameter ratio of the vent duct which is decisive. A proposal is included to modify EN14491 (and VDI 3673).

Introduction

In the current EN14491 (ed. 2012) the effect of a vent duct on the reduced explosion pressure is given by the following formula:

$$p'_{\text{red,max}} = p_{\text{red,max}} \times (1 + 17,3 \times (A \times V^{-0,753})^{1,6} \times l)$$

Hence: the increase in reduced explosion pressure (from $p_{\text{red,max}}$ to $p'_{\text{red,max}}$) depends on:

- The vessel volume V
- The vent area A
- And the length l of the vent duct.

The same formula was already included in VDI3673:2002. In edition 2006 of EN14491, the length l of the vent duct had been replaced by l/d (the length-to-diameter ratio).

Also in other publications on the effect of vent ducts, the effect of a vent duct is assumed to depend on the l/d ratio and not on the length only of the vent duct. A well-known example is the study of Lunn, published by Barton [1].

During the revision of EN14491 (into ed. 2012) it was stated that the formula using l was in better agreement with the available test result. As there was insufficient time to do any further investigations, it was decided to switch back to the initial formula (with l instead of l/d).

In this paper an attempt will be made to clarify this issue. Also other phenomena of vent ducts will be discussed.

2. Description of the phenomena that arise in a vent duct

If an explosion is allowed to propagate into all directions flame velocities are a few m/s only and will basically remain constant. This occurs when a dust explosion ignites in the centre of a spherical or cubical vessel.

If the explosion, however, is forced into one single direction, flame accelerations will arise, which may even end up into a detonation with flame velocities of several km/s. This occurs in elongated vessels or in ducts.

Due to such flame accelerations an increased reduced explosion pressure will arise in vented elongated vessels. The vent area can be increased to compensate.

In a more or less cubical vessel, vented via a vent duct, following will happen.

- Initially the flame will propagate rather slowly and the overpressure inside the vessel will slowly increase.
- When the overpressure exceeds the vent opening pressure, the vent will open. Now there are essentially 2 options:
 1. The ignition source was rather close to the vent. When the vent opens, the flame is vented into the vent duct. For such a situation, apart from the friction inside the duct, the vent duct will hardly affect the reduced explosion pressure.
 2. The explosion did not start close to the vent. When the vent opens, initially a dust-air-mixture is blown into the vent duct. Once the flame does reach the vent, it will propagate into the duct, filled with a dust cloud: flame accelerations will arise. This will also result into an increased overpressure inside the vent duct, which will obstruct the venting process. The reduced explosion pressure inside the vessel will increase considerably.

Since usually it is impossible to predict the location of the ignition, for design calculations it is typically assumed that the explosion will not start close to the vent (option 2). This situation will also be assumed in the further analysis in this paper.

For a better understanding, following questions need to be answered:

1. Is it realistic to assume that the whole vent duct is filled with a dust-air mixture? Is it not more likely that, after some distance, the flame has passed the dust cloud and enters an empty duct (in front of the dust cloud).
2. According to EN 14491 there is a fixed duct length, beyond which there is no further increase in reduced explosion pressure. What is the explanation?

3. If the vent duct is very long: would it be possible to end up with a detonation? How would this affect the reduced explosion pressure?

1. Completely filled?

When the vent opens, a dust-air mixture is blown into the vent duct. The air velocity in the vent duct depends on the overpressure inside the vessel and the friction along the vent duct. If friction is neglected¹, at an overpressure of 0,1 bar, this velocity is already at 194 m/s (Mach 0,57). With increasing overpressure the velocity will increase until the speed of sound is reached at about 1 bar: a further increase in overpressure will not cause a further increase in air velocity.

The flame velocity inside the vessel before vent opening is typically below 10 m/s. Only with very high K_{st} -values or inside vessels with large H/D ratio higher velocities are possible. The opening of the vent will cause increased turbulence inside the vessel and therefore an increased flame velocity, typically up to 50 m/s. Since these velocities are still much lower than the air velocities inside the vent duct, the vent duct may be filled with a dust-air-mixture over a considerable length, when the flame will finally arrive.

As an example: suppose the vent opening pressure is 0,1 bar and after vent opening the flame has to propagate 1 m with a speed of 50 m/s before it reaches the vent. Before the flame reaches the vent, the dust cloud has already travelled a distance of $194/50 \times 1 = 3,88$ m into the vent duct. Actually this distance might be more, since the overpressure (and therefore the air velocity) usually increases after vent opening. Inside the vent duct the flame will propagate rather fast: the overall flame velocity is now the air velocity in the duct + the burning velocity of the flame (= the flame velocity relative to the surrounding air). The flame will also immediately start to accelerate. Suppose the average burning velocity will be 100 m/s and the air velocity remains at 194 m/s than the flame front will finally outreach the dust cloud at a distance of $3,88 + 3,88 \times 194/100 = 11,4$ m. Although it is certainly possible that the flame would outreach the dust cloud, this example demonstrates that this will only arise after a rather long distance.

2. Maximum vent duct length?

In order to affect the venting process, a pressure pulse needs to propagate backwards along the vent duct. Such pressure pulses propagate with the speed of sound. Once the air velocity

¹ The effect of friction is discussed in chapter 7

inside the vent duct has reached the speed of sound, such pulses will not reach the vented vessel anymore. As a consequence, there is no further effect of the length of the vent duct to be expected, when the air velocity has reached 340 m/s. Remarks:

- The decisive air velocity is not the velocity at the entrance into the vent duct, but the air velocity at the flame front. Due to the flame accelerations, the flame front will be accompanied by a pressure wave, which causes local increased air velocities.
- According to EN14491 there is no further effect of the length of the vent duct once the flame velocity in the vent duct has reached the speed of sound, which will happen at a distance l_s . *Strictly speaking: this is not correct, since the flame velocity is always higher than the air velocity (air velocity + burning velocity). But, since burning velocities initially are rather low in the vent duct, the flame velocity (which is easy to measure) could be used as a first approximation for the air velocity.*
- This does certainly not mean that, after this length, the vent duct can be closed without affecting the venting process. Such a closure would cause a shock wave. The velocity at which shock waves propagate can be higher. For example: a shock wave with an overpressure of 0,1 bar would propagate at a velocity of 342 m/s whereas a shock wave with an overpressure of 1 bar would propagate at about 450 m/s. Therefore, this reflected shock wave will certainly reach the vented vessel.

3. Detonation in vent duct?

A model, for flame accelerations in long ducts with ignition at the closed end was developed by Gert Degeest [2]. Based on the analysis of several experiments he concluded that flame accelerations can be described by assuming a uniform accelerating flame, where the acceleration is a function of dust characteristics (P_{\max} and K_{st}) and the diameter of the duct. Based on his model, it can be concluded that a detonation would arise when the flame speed exceeds 680 m/s which would theoretically happen at a distance of 4 times the distance where sound speed is obtained. According to EN14491, l_s is at least 3,5 m, meaning detonations might arise with a vent duct length > 14 m. Within the limits of application of EN14491, vent ducts may be up to 10m, no detonations are to be expected.

If a detonation would arise in a vent duct, the detonation wave will propagate at several km/s away from the vented vessel, and should therefore hardly affect the venting process. However, the very high detonation pressure will likely cause failure of the vent duct!

3. Cubic law

The 1979 edition of VDI3673 was based on the cubic law. The cubic law implicates that “everything” can be scaled geometrically:

- $K_{st} = (dp/dt)_{max} \times V^{1/3}$
- $A (:) V^{2/3}$
- $l (:) V^{1/3}$

As an example: suppose that, for a given dust in a 1 m³ vessel, 0,1 m² vent area is required to obtain a certain reduced explosion pressure. According to the cubic law, for the same dust and reduced explosion pressure, on a volume of 8 m³ a vent area of 0,4 m² is required. And, if adding a 1 m vent duct would cause a specific increase in the reduced explosion pressure inside the 1 m³ volume, according to the cubic law the same increase would be expected with a 2 m vent duct on the 8 m³ vessel.

The cubic law therefore implicates that the effect of a vent duct is defined by the l/d ratio of the vent duct, not by the length l only.

However, it is known since many years that venting test results for rather small volumes deviate from the cubic law. Therefore, in the more recent standards the basic relation for the vent area was modified:

- $A (:) V^{0,753}$

The main reason for this deviation is that part of the combustion heat is absorbed by heating up of the vessel walls. In large vessels the heat absorption is almost negligible, while in small volumes a considerable amount of heat is absorbed, which will cause a reduction of the overpressures generated during the explosion. As a result, for small volumes less vent area is required, because of cooling.

Remark: the choice for an exponent of 0,753, instead of some reduction factor for small volumes, implicates that, for large volumes, an increased vent area is required, without any physical reason: for a 1000 m³ vessel the vent area must almost be doubled! For very large silos (e.g. wood pellets storage), it may even become impossible to fit sufficient vent area.

As a consequence, it is expected that, for large diameter vent ducts, the effect can be described by the cubic law and will depend on the l/d ratio of the vent duct, whereas for small

diameter vent ducts cooling along the wall will reduce flame accelerations and the effect will deviate from the cubic law.

4. Verification with test results: VDI/EN

The current guidance in EN14491 on the effects of vent ducts is based on several tests, see for example the overview provided by Hattwig [3].

Most of the tests were with vent ducts having diameters of 0,4 to 0,8 m. Hattwig also refers to tests with 0,2 m vent duct diameter and to some (non published) tests by Scholl with 1,4 m diameter.

Based on those tests it was concluded that the maximum reduced explosion pressure due to a vent duct depends on the length of the duct, not on the l/d ratio.

5. Guidance in NFPA68

NFPA 68 includes guidance which can be used to evaluate the influence of larger duct diameters. Based on Figure 1, the maximum allowable distance L for an explosion in a smooth pipe to prevent detonation can be determined as a function of the pipe diameter D . It is not known to which extent this graph is based on testing.

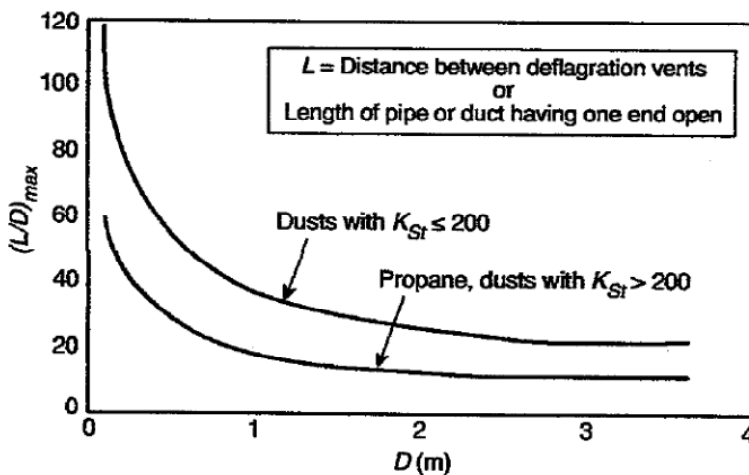


Fig. 1: Maximum allowable distance to prevent detonation (source: NFPA 68)

Since detonations in such ducts are due to flame accelerations, this figure might help to get a better understanding on the effect of duct dimensions on flame accelerations.

In this graph, 3 regions can be distinguished.

For diameters beyond 2 m, the graph is more or less horizontal: flame accelerations depend on the L/D ratio of the pipe only.

For diameters below 0,1 m, the graph is almost vertical: flames will not accelerate into a detonation. This information is confirmed by tests from Vogl [4]: for ducts with diameters below 100 mm, explosion propagation is possible, but there are limited flame accelerations.

For intermediate diameters the graph is curved, there is an influence of both the length and the diameter. Tests used for the formula in EN14491 are for vent duct diameters within these limits.

From the graph the $(L/D)_{\max}$ and L were determined for a pipe with D ranging from 0,2–1,0 m. The results are summarised in Table 1.

Table 1: Calculation of maximum distance L based on Figure 1.

D (m)	$K_{st} \leq 200$		$K_{st} > 200$	
	$(L/D)_{\max}$	L (m)	$(L/D)_{\max}$	L (m)
0,2	80	16	46	9
0,4	63	25	34	14
0,6	50	30	26	16
0,8	43	34	20	16
1,0	37	37	19	19

From the result it can be concluded that, in the test range of EN14491 the value of L is almost constant for $K_{st} > 200$ and rather constant for $K_{st} \leq 200$. Therefore, it is not surprising that, for vent ducts in this diameter range, the length l to reach a certain reduced explosion pressure is also more or less a constant.

6. Verification with test results: Barton

The graphs included in Barton are based on the work of Lunn et al [5].

Lunn did both large and small scale testing:

- Large scale testing was in a 18,5 m³ vessel, with vent diameter typically 1 m

- Small scale testing was a in a modified 20 litre sphere, with vent diameter typically 0,1 m.

Hence the large scale test can be (roughly) considered as a geometric upscale of the small scale test, with a factor 10.

Tests have been done with straight and bended vent ducts. Some of the test results for straight vent ducts are presented in Figures 2 and 3.

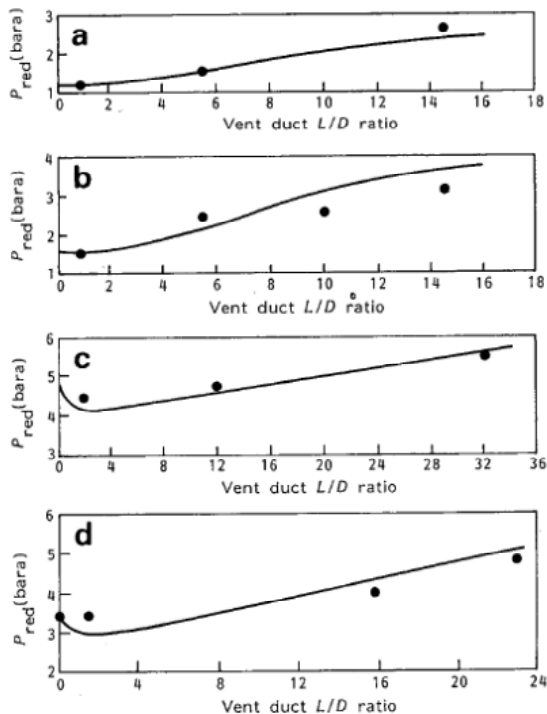


Fig. 2: Test results from Lunn et al. in a 18,5m³ vessel:

- a. coal dust; vent diameter 1,1m; vent area 0,95m²; opening pressure 1,2 bara
- b. aspirin dust; vent diameter 1,1m; vent area 0,95m²; opening pressure 1,0 bara
- c. coal dust; vent diameter 0,5m; vent area 0,196m²; opening pressure 1,5 bara
- d. aspirin dust; vent diameter 0,7m; vent area 0,385m²; opening pressure 1,1 bara

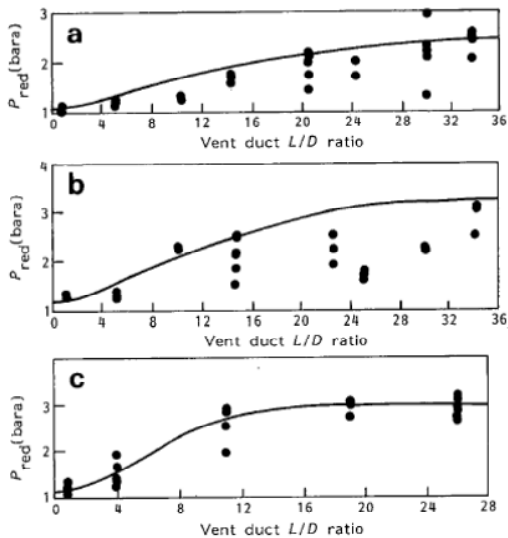


Fig. 3: Test results from Lunn et al. in a modified 20 litre vessel:

a. coal dust; vent diameter 0,1m; vent area 0,00786m²; opening pressure 1,0 bara

b. aspirin dust; vent diameter 0,1m; vent area 0,00786m²; opening pressure 1,0 bara

c. toner dust; vent diameter 0,128m; vent area 0,129m²; opening pressure 1,0 bara

The relevant results for the 18,5 m³ vessel are in good agreement with EN14491 tests.

Remark: only the data points for a vent duct below 10 m in graphs a and b were verified.

The data points for the 20 litre vessel display a very wide scatter.

If the data points from large and small scale tests are compared, this is only possible for graphs a and b (same products). However, for graph a care is required, since the vent opening pressure in the large scale tests was 1,2 bara, compared with 1,0 bara for the small scale tests. For graph b opening pressures were both 1,0 bara. Hence the comparison will focus on graphs b.

In Figure 4, the data (graph b) from large and small scale tests are combined. It is clear that the reduced explosion pressures in the small scale test are always lower. This is a confirmation that, for small diameter vent ducts, the cubic law does not apply. There is a significant cooling effect and therefore the reduced explosion pressure is lower.

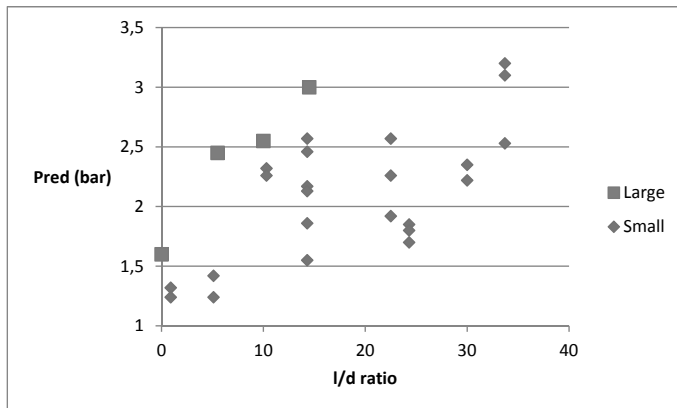


Fig. 4: Large and small scale test results from Lunn et al. combined

The combined test data can also be represented as a function of the length l of the vent duct: Figure 4. Then it is found that the reduced explosion tests in the small scale test:

- are lower for a vent duct length < 2
- but are higher for a vent duct length > 2 m

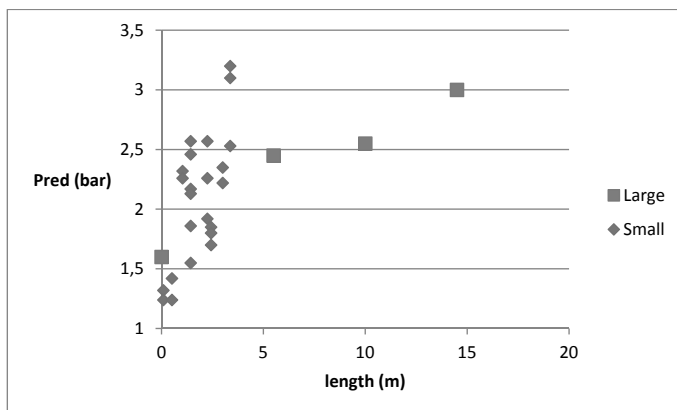


Fig. 5: Large and small scale test results as a function of vent duct length l

In conclusion, for small diameter vent ducts: the method based on l/d ratio will overestimate the results, but the method based on l only may underestimate the results considerably!

7. Effect of small diameter vent duct

In a vent duct with a diameter $\leq 0,1$ m, no detonations are expected (see Figure 1) and there are hence only limited flame accelerations. With very small diameters, such as in flame arrestors, no flame propagation is possible, due to the cooling effect of the walls.

It could therefore be falsely concluded that, for diameters $\leq 0,1$ m, there is hardly any increase of reduced explosion pressure due to the vent duct. Actually there is a considerable effect of the vent duct on the reduced explosion pressure (see Figure 3).

At least part of the effect will be due to friction. There are well established methods to calculate the air resistance of a straight duct, see for example [6]. Based on these methods, it can be calculated that, for a 0,1 m pipe, with an air flow at 340 m/s and an overpressure of 1 – 2 bar, the pressure drop along 3,6 m duct is about 0,5 bar. If this is compared to the small scale test results from Lunn (see Figure 3) it is clear that friction only is insufficient to explain the reduced explosion pressures.

A duct diameter of 0,1 m, is far from sufficient to stop flame propagation: a flame arrestor would require much smaller diameters. Although no detonations are expected, flame accelerations may still arise. According to [2] additional overpressures in the order of 1-2 bar may result.

In a vent duct with diameter 0,1 m therefore the increased reduced explosion pressure is partly due to friction, but mainly due to flame accelerations.

From [6] it can also be derived that, for a given overpressure and air velocity in the duct, the pressure drop is proportional to $l/d^{1,3}$. For vent ducts with the same l/d ratio, the pressure drop will hence increase with decreasing diameter. For vent ducts having the same length, the pressure drop increases rather fast with a decreasing diameter of the duct. Therefore, for very small vent ducts (diameter far below 0,1 m) it is to be expected that the increase in reduced explosion pressure will be mainly due to friction. This is the main reason that flameless venting devices have a rather low venting efficiency.

It is not possible to present a calculation model for the effect of small vent ducts (diameters of 0,1 m or less). In practice, however, this hardly poses a problem:

- very small vent diameters would typically be required for very small vessels, where the EN14491 relations for explosion venting are not valid anymore (lower limit is 0,1 m³).
- if a very small vent would be required for a larger vessel (for example due to a very low K_{st} -value) it is typically opted for flameless venting. Or, as an alternative, it could be decided to oversize the vent (and obtain a larger diameter vent duct).

8. Conclusions and recommendations

From the analysis following can be concluded:

- It is indeed to be expected that, beyond a certain length of a vent duct, there is no further increase in reduced explosion pressure. This limit is reached when the air velocity is at speed of sound.
- Detonations may arise in a long vent duct. But within the range of application of EN14491 this is not expected. Detonations will likely destroy the vent duct.
- For large vent duct diameters (> 1,0 m) the effect is dominated by flame accelerations. Therefore the l/d ratio of the vent duct will determine the effect on the reduced explosion pressure.
- For medium size vent ducts (0,4 m to 0,8 m) flame accelerations are lower due to cooling effects of the walls. Here, it is found that the effect on the reduced explosion pressure is determined by the length l of the vent duct.
- For small vent duct diameters (about 0,1 m), flame accelerations are even lower but there is more friction along the wall. For such small vent ducts, a calculated reduced explosion pressure, based on the length l of the vent duct may seriously underestimate the actual reduced explosion pressure.

It is therefore recommended to adapt the guidance in EN14491:2012 on the effect of the vent duct:

- For vent ducts with diameters < 1 m the existing formula (17) can be used.
- For vent ducts with diameters > 1 m it is recommended to replace l by l/d in the formula.
- Formula (18) to determine l_s should be adapted in the same way: replace l by l/d for diameters > 1 m.
- The limitation of the length of the vent duct ($l \leq 10$ m) could be increased to 34m for diameters > 1m.

- Add a low limit on the diameter of the vent duct: $d \geq 0,2 \text{ m}$, since 0,2 m was the smallest diameter involved in the EN/VDI testing and at lower diameters reduced explosion pressures may be higher than the formula predicts.

Finally, it is recommended for the next revision of EN14491 to apply $V^{2/3}$ instead of $V^{0,753}$ to calculate the reduced explosion pressure in large volumes. If the same approach as for vent ducts is applied, it is expected that the cooling effect on the wall becomes negligible at vessel diameters beyond 1 m, based on a maximum L/D of the vessel of 20 this equals a maximum vessel volume of 15 m³. Beyond this volume, $V^{2/3}$ can be used safely.

References

- [1]: J. Barton: Dust explosion prevention and protection: A practical guide. Institution of Chemical Engineers, 2002.
- [2]: G.J. Degeest: The course of duct explosions in elongated vessels. Europex Newsletter, edition 19; 1992
- [3]: M. Hattwig: Die VDI Richtlinie 3673 "Druckentlastung von Staubexplosionen" und besondere Probleme bei ihrer praktischen Anwendung. VDI Berichte 304, 1978.
- [4]: A. Vogl, S. Radandt: Explosionsübertragung durch dünne Rohrleitungen. VDI Berichte 1601, 2001.
- [5]: G. Lunn, D. Crowhurst & M. Hey: The effect of vent ducts on the reduced explosion pressures of vented dust explosions. J. Loss Prev. Process Ind., 1988, Vol. 1.
- [6]: M. Carello, A. Ivanov, L. Mazza: Pressure drop in pipe lines for compressed air: comparison between experimental and theoretical analysis. Transactions on Engineering Sciences vol. 18, 1998 WIT Press.

Neue Erkenntnisse zum Einsatz von Systemen zur Explosions-Entkopplung an explosionsdruckentlasteten Behältern

New Findings for the Application of Systems for Explosion-Isolation connected to vented Vessels

Dipl.-Ing. **Peter Schepp**, FSA GmbH, Mannheim;
Dr.-Ing. **Michael Sippel**, DEKRA EXAM GmbH, Bochum

Kurzfassung

Systeme zur Explosions-Entkopplung wie bspw. Explosionsschutzventile oder Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung sind Schutzsysteme, die die Übertragung einer Explosion (Explosionsdruckwelle und Flamme) vom Entstehungsort in andere Teile oder Bereiche der Anlage über die verbindenden Rohrleitungen verhindern sollen. Neueste Erkenntnisse aus Explosionsversuchen mit Systemen zur explosionstechnischen Entkopplung, die mit explosionsdruckentlasteten Behältern verbunden waren, weisen darauf hin, dass diese Systeme einen Einfluss auf den Ablauf der Explosion im Behälter haben und zu höheren reduzierten Explosionsüberdrücken in diesem führen können. Da die Dimensionierung explosionsdruckentlasteter Behälter gemäß Europäischer Normen diese Verstärkungseffekte nicht berücksichtigt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Einzelfall die Schutzmaßnahmen für den verbundenen Behälter nicht ausreichend dimensioniert sind. In einem Forschungsprojekt der FSA werden deshalb derzeit umfangreiche explosionstechnische Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, das beobachtete Phänomen besser zu verstehen und Algorithmen zu erarbeiten, die es erlauben, die auftretenden Effekte besser zu berücksichtigen.

Parallel dazu wurde bei DEKRA EXAM basierend auf Daten aus den Explosionsversuchen erste numerische Untersuchungen mit einem speziellen CFD-Code durchgeführt, die den Ablauf einer Explosion in derartigen Systemen in einem vereinfachten Modell abbilden und die den Schluss zulassen, dass die beobachteten Effekte theoretisch auch in Verbindung mit anderen Systemen zur Explosions-Entkopplung auftreten können.

Die vorliegenden Untersuchungen beschreiben beispielhaft die bei den Explosionsversuchen beobachteten Effekte. Außerdem werden erste Ergebnisse der numerischen Simulation vorgestellt, die für zukünftige systematische Untersuchungen der Phänomene hilfreich sein

könnten. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass weitere experimentelle und numerische Untersuchungen erforderlich sind.

Abstract

Explosion isolation systems like fast-acting valves or explosion isolation flap valves are protective systems which shall avoid transmission of flames and explosion pressure waves via connecting pipes into other parts of apparatus or plant areas.

Latest findings from explosion tests with explosion isolation systems connected to explosion vented vessels suggest that these devices might have an impact on the explosion course in the vessel and lead to an increased explosion overpressure in the connected vessel. As the dimensioning of pressure vented vessels according to harmonized European standards does not consider these pressure enhancing effects, a dangerous inappropriate design of the explosion vented vessel cannot be ruled out in particular cases.

Currently FSA carries out a research project with extensive explosion tests, with the aim of understanding more about the observed phenomena and of developing algorithms which allow to consider the occurring effects better.

In parallel DEKRA EXAM carried out numerical studies with a special CFD-code (CFD-Computational Fluid Dynamics) showing the course of the explosion inside these systems in a simplified model lead to the conclusion that these effects are possible and can theoretically be expected with other explosion isolation systems.

The present study describes the observed effects of the explosion tests in an exemplary way. Furthermore, first results from numerical simulations are described which can help the systematically study of the phenomenon in the future. The present publication derives additional need for research from the findings so far.

1. Einleitung

Systeme zur Explosionsentkopplung sind schon seit vielen Jahren auf dem Markt und ihre Funktionsfähigkeit wurde sowohl in der Prüfung solcher Systeme als auch im praktischen Einsatz vielfach nachgewiesen. Bislang waren diese Systeme in der Regel für hohe Explosionsdrücke ausgelegt. Gemäß EN 15089, die vorschreibt, dass der Prüfaufbau für eine Explosionsprüfung zum Nachweis der Funktionalität eines solchen Systems die bestimmungsgemäße Verwendung abbilden muss, wurden zu prüfende Entkopplungseinrichtungen folglich über Rohrleitungen entsprechender Länge mit "geschlossenen", also nicht druckentlasteten Explosionsbehältern verbunden. Als Worst-Cases für den Nachweis der Funktionalität galten zum einen Versuche bei maximalem Explosionsdruck und maximaler Druckanstiegs-

geschwindigkeit im Explosionsbehälter gemäß bestimmungsgemäßer Verwendung. Zum anderen wurde der Tatsache, dass Explosionen abhängig von den Startbedingungen auch schwächer ablaufen können, dadurch Rechnung getragen, dass auch Versuche mit geringerer Explosionsheftigkeit durchgeführt wurden. Diese Versuche wurden in der Regel mit nicht druckentlasteten Prüfbehältern durchgeführt.

In jüngerer Zeit erscheinen jedoch immer häufiger Explosionsentkopplungseinrichtungen auf dem Markt, die nicht für den maximalen Explosionsdruck ausgelegt sind, sondern eine weit aus geringere Druckstoßfestigkeit aufweisen. Sie sind für die Verwendung in Kombination mit druckentlasteten oder durch Explosionsunterdrückungssysteme geschützten Gehäusen gedacht. Dabei handelt es sich in erster Linie um Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung, von denen man sich erwartete, dass sie als vergleichsweise einfache und preiswerte Systeme insbesondere in Anlagen geringer Druckstoßfestigkeit (z.B. in der Holz- oder Lebensmittelindustrie) einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit leisten könnten.

2. Anlass für die vorliegenden Untersuchungen

Die EU-Baumusterprüfung dieser Systeme folgt den Anforderungen der EN 16447, die - zumindest was das vereinfachte alternative Prüfverfahren für eingeschränkte Anwendungen anbetrifft - den in der EN 15089 beschriebenen Anforderungen für die übrigen Entkopplungssysteme weitestgehend entspricht. Allerdings wurden diese Prüfungen nunmehr in Kombination mit explosionsdruckentlasteten Behältern durchgeführt; der in Vorversuchen zu ermittelnde sogenannte reduzierte Explosionsüberdruck, der im druckentlasteten Behälter ohne Rohrleitung und ohne Entkopplungseinrichtung bestimmt wurde, richtete sich nach der bestimmungsgemäßen Verwendung, die der Hersteller für seine Systeme festgelegt hatte. Dies hatte zur Folge, dass nunmehr erstmals in größerem Umfang Explosionsversuche mit der Kombination *druckentlasteter Behälter + Rohrleitung + Entkopplungseinrichtung* durchgeführt wurden. Dabei trat ein bislang nicht beschriebenes Phänomen auf: Der im druckentlasteten Explosionsbehälter auftretende reduzierte Explosionsüberdruck nahm erheblich höhere Werte an, sobald eine Rückschlagklappe über eine Rohrleitung mit dem Behälter verbunden war. Bild 1 zeigt beispielhaft den Vergleich der zeitlichen Druckverläufe eines derartigen. 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.

Die Druck/Zeit-Kurven dieser Versuchsreihe zeigen eindrucksvoll den Einfluss der Rückschlagklappe. P1 ist das Signal des Drucksensors im unteren Drittel des Prüfbehälters. Aus dem Signal der Zündspannung kann der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem die Explosion startet; ebenfalls aufgetragen ist ein Drehgebersignal, welches die Klappenstellung signalisiert.

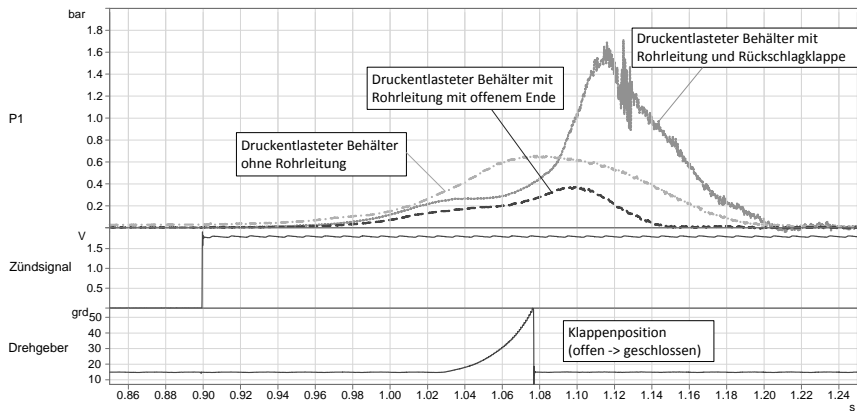


Bild 1: Beispielhafte Druck/Zeit-Kurven der gemessenen reduzierten Explosionsüberdrücke im Prüfbehälter (10 m³-Explosionsbehälter + Rohrleitung DN 800 der Länge 6 m)

Die strichpunktuelle Linie zeigt den typischen Druckverlauf einer Staubexplosion in einem druckentlasteten Behälter. Im Unterschied dazu verläuft die Druck/Zeit-Kurve des Versuchs mit offener Rohrleitung flacher und auch der Maximalwert des reduzierten Explosionsüberdrucks fällt niedriger aus. Die bei diesem Versuch angeflanschte offene Rohrleitung wirkt als zusätzliche "Entlastungsfläche". Der zeitliche Druckverlauf von Versuch des Versuchs mit Rückschlagklappe ähnelt in der Anfangsphase stark demjenigen mit offener Rohrleitung. Das geringfügig höhere Niveau erklärt sich aus der Versperrung durch die (noch geöffnete bzw. sich schließende) Rückschlagklappe. Wenige Millisekunden vor dem Ende des Schließvorgangs der Klappe beginnt der Druck jedoch zunehmend steiler anzusteigen und zwar auf einen Wert, der dem 4,4-fachen Maximalwert aus dem Versuch ohne Rohrleitung und Rückschlagklappe entspricht.

Diese Effekte hätten nicht nur weitreichende Folgen für die Prüfung von derartigen Entkopplungseinrichtungen, sondern insbesondere auch für die praktische Anwendung: Die Auslegung der Druckentlastung eines zu schützenden Behälters erfolgt in der Regel nach den

einschlägigen Normen auf der Grundlage der staubspezifischen Kenngrößen K_{St} und p_{max} . Damit wird sichergestellt, dass ein definierter reduzierter Explosionsüberdruck in diesem Behälter nicht überschritten wird. Wenn aber nun eine explosionstechnische Entkopplung der mit diesem Behälter verbundenen Rohrleitung erfolgt, müsste im schlechtesten Fall mit signifikant höheren reduzierten Explosionsüberdrücken im Behälter gerechnet werden – eine erhebliche Gefahrenquelle, wenn dabei die Druckstoßfestigkeit des Behälters überschritten wird.

3. Experimentelle Untersuchungen

Diese Beobachtungen veranlassten FSA GmbH ein Forschungsprojekt aufzulegen, 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 gerätspezifische Parameter. Mit Hilfe von explosionstechnischen Untersuchungen soll ergründet werden, ob für die beobachteten Effekte das Prinzip der Entkopplung allgemein, bestimmte Formen der Entkopplung oder bestimmte Betriebsbedingungen ursächlich sind.

Für die erste Projektstufe wurde folgender Versuchsaufbau gewählt (Bild 2):

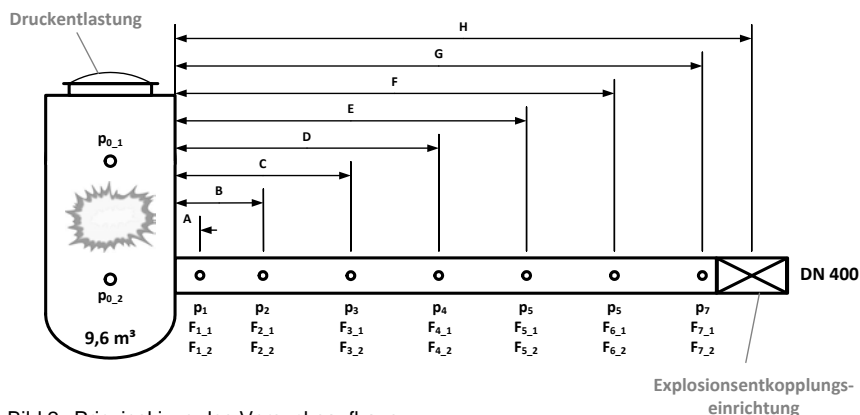


Bild 2: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

In drei ausführlichen Vorversuchsreihen mit dem druckentlasteten Behälter (Druckentlastung über die Behälterdecke, ohne angeflanschte Rohrleitung) wurden diejenigen Versuchspara-

meter ermittelt, die benötigt wurden, um die gewünschten Wertepaare (p_{red} , K_{St}) darzustellen. Ziel war es, drei unterschiedliche "Zustände" einzustellen:

- Weizenmehl $K_{\text{St}} = 70 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (bestimmt im 1 m^3 gemäß EN 14034-2),
- getrocknete Maisstärke $K_{\text{St}} = 230 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (bestimmt im 1 m^3 gemäß EN 14034-2),
- getrocknete Maisstärke $K_{\text{St}} = 70 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (simuliert durch Verlängerung der Zündverzögerungszeit, d. h. Reduzierung der Turbulenz vor Gemischzündung).

Mit letzterem Zustand wurden langsam anlaufende Explosionen eines Staubes mit einem hohen K_{St} -Wert erzeugt. Auch wenn ein Staub unter Standardbedingungen bei der Kennzahlermittlung eine hohe Druckanstiegsgeschwindigkeit aufweist, so verringert sich diese signifikant, wenn die Zündung bei niedriger Turbulenz erfolgt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Vorversuche zur Ermittlung der Versuchsparameter
Druckentlasteter 9,6 m³-Explosionsbehälter ohne Rohrleitung

Staub	K_{St} -Wert (Mittelwert) [$\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	p_{red} (Mittelwert) [mbar]	Konzentration c_{St} [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Entlastungs- fläche A_E [m^2]	statischer Ansprechdruck p_{stat} [mbar]
Weizenmehl	70	190	750	0,300	~120
Maisstärke	70	250	750	0,300	~100
Maisstärke	230	540	750	0,493	~100

Zur Schaffung einer soliden Referenz-Datenbasis wurden außerdem Versuche mit angeflanschten Rohrleitungen unterschiedlicher Länge (3,0 / 4,5 / 6,0 m), sowohl mit offenem Rohrende als auch blindgeflanscht, durchgeführt.

Erste Versuchsreihen wurden mit zwei Explosionsentkopplungseinrichtungen durchgeführt, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten:

- EE1: Entkopplungseinrichtung nach dem Klappenprinzip,
- EE2: passives Explosionsschutzventil.

Beide Entkopplungseinrichtungen wurden in einem Versuchsaufbau gemäß Bild 2 bei drei unterschiedlichen Einbauabständen (3,0 / 4,5 / 6,0 m) und mit allen drei Ausgangszuständen im Explosionsbehälter gemäß Tabelle 1 untersucht. Die Ergebnisse der 60 bisher durchgeführten Versuche bestätigen die beobachteten Effekte reproduzierbar, wie Bild 3 eindrucksvoll zeigt. Aufgetragen sind die Maximalwerte der gemessenen Explosionsüberdrücke einer jeden Versuchsreihe, und zwar normiert mit dem Referenzwert aus den Vorversuchen mit dem druckentlasteten Behälter ohne Rohrleitung ($p_{\text{red},0}$)

- Maximalwerte der gemessenen Explosionsüberdrücke im Explosionsbehälter,

- Maximalwerte der gemessenen Explosionsüberdrücke unmittelbar vor EE.

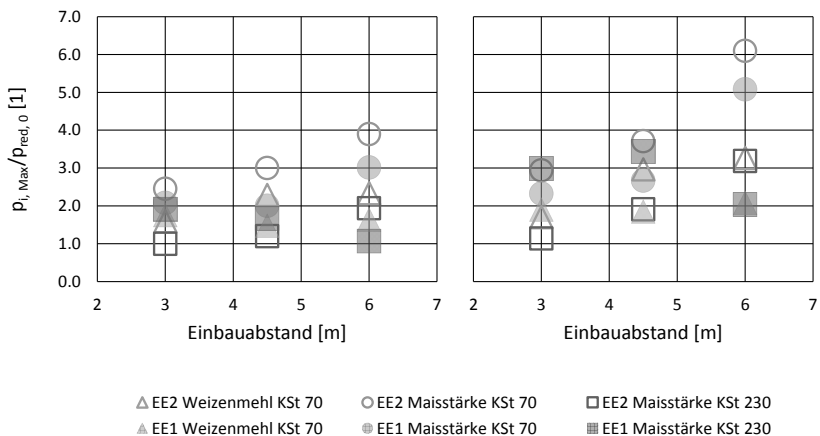


Bild 3: Ergebnisse der ersten Versuchsreihen

Normierte gemessene maximale Explosionsüberdrücke $p_{i, \text{Max}}/p_{\text{red}, 0}$

Linkes Diagramm: Explosionsbehälter, rechtes Diagramm: unmittelbar vor EE

Im druckentlasteten Explosionsbehälter in Verbindung mit einer Entkopplungseinrichtung traten maximale reduzierte Explosionsüberdrücke auf, die bis zu einem Faktor 4 höher lagen als ohne Entkopplungseinrichtung. Unmittelbar vor der Entkopplungseinrichtung wurden Drücke erreicht, die bis zum 6-fachen des ursprünglichen reduzierten Explosionsüberdrucks im Behälter betrugen. Für die bisher untersuchten Parametervariationen bestätigten sich somit die eingangs beschriebenen Effekte grundsätzlich - zumindest für passive Systeme, und zwar unabhängig vom Wirkprinzip (Rückschlagklappe, Explosionsschutzventil).

Auffällig sind die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsreihen mit Maisstärke: Während bei den Versuchen mit Maisstärke $K_{\text{St}} = 230 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ die Rückwirkung mit zunehmender Rohrleitungslänge abnimmt, verstärkt sie sich bei den Versuchen mit der bei geringerer Turbulenz gezündeten Maisstärke erheblich. Eine erste Interpretation dieses Ergebnisses könnte lauten: Im Falle hoher Druckanstiegsgeschwindigkeiten der anlaufenden Explosion schließt die EE frühzeitig; bei größeren Einbauabständen entspricht diese Situation dann eher dem Fall einer blindgeflanschten Rohrleitung: Die in die Rohrleitung laufende Explosion wird frühzeitig abgebremst. Bei einer langsam anlaufenden Explosion schließt die EE erst, wenn die Explosionsfortpflanzung in die Rohrleitung schon weiter fortgeschritten ist. In der Rohrleitung erhöhen sich dann der Turbulenzzustand des Staub/Luft-Gemischs und damit

auch die Druckanstiegsgeschwindigkeit. Außerdem könnten auch geometrische Effekte eine Rolle spielen: Die Rückwirkungseffekte scheinen umso stärker ausgeprägt zu sein, wenn die Explosionsfront der EE sehr nahe kommt, bevor diese vollständig geschlossen ist.

Zur weiteren Absicherung der Ergebnisse und zum besseren Verständnis der beobachteten Phänomene müssen allerdings noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu gehören unter anderem Versuche mit aktiven Entkopplungseinrichtungen ebenso wie Variationen der räumlichen Zuordnung von Rohrleitung und Druckentlastungsfläche.

3. Numerische Simulationen

In Ergänzung zu den Explosionsversuchen wurden numerische Simulationen angewendet, um die verschiedenen Einflussfaktoren für die beobachteten Phänomene zu identifizieren. Durch die DEKRA EXAM GmbH, Bochum, wurden deshalb auf der Grundlage der Messdaten der beschriebenen Versuchsreihe Berechnungen mittels eines CFD-Simulationsmodells (CFD – Computational Fluid Dynamics) durchgeführt.

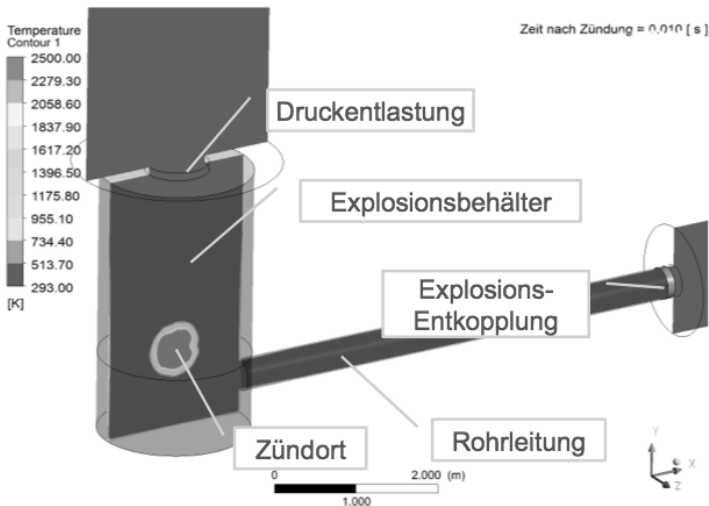


Bild 4: Übersicht der Modellgeometrie

Das verwendete CFD-Modell bildet den Explosionsvorgang innerhalb der oben beschriebenen Prüfanordnung vereinfacht ab. Das Modell berücksichtigt folgende physikalischen Effekte, vgl. [9], [10], [11] und [12]:

- Dreidimensionale, turbulente Strömung in der Prüfanordnung,

- Transport des Staub/Luft-Gemisches durch erzwungene oder natürliche Konvektion,
- Wärmetransportprozesse einschließlich Strahlungswärmeaustausch,
- Chemische, exotherme Reaktion des Brennstoffs mit Luftsauerstoff,
- Einfluss geometrisch induzierter Turbulenz auf den Reaktionsablauf,
- Einfluss einer Druckentlastung auf den Reaktionsablauf und den sich einstellenden reduzierten Explosionsdruck,
- Einfluss einer im Rohr eingebauten Einrichtung zur Explosions-Entkopplung auf den Reaktionsablauf.

Das Schließen der Explosions-Entkopplung in Form eines Explosionsschutzventils, -schiebers oder einer Rückschlagklappe wird im Modell entweder vergleichbar zu einem schlagartigen und vollständigen Verschluss der Rohrleitung abgebildet oder der Rohrquerschnitt wird abschnittsweise durch einzelne Segmente in einem benutzerdefinierten Zeitablauf verschlossen. Das Öffnen einer Druckentlastung in Form einer Berstscheibe wird jeweils vergleichbar zu einem schlagartigen Öffnen modelliert. Zur vereinfachten Modellierung des Schließverhaltens von passiven Explosions-Entkopplungssystemen wie Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung oder passiven Explosionsschutzventilen wurde entsprechend der in [12] beschriebenen Vorgehensweise eine Schließzeit von 50 ms gewählt.

Es wurden folgende Fälle berechnet:

- Ohne angeschlossene Rohrleitung und dementsprechend ohne angeschlossenes Explosions-Entkopplungssystem,
- mit angeschlossener und am Ende geschlossener Rohrleitung mit einer Länge von 6 m,
- mit angeschlossener Rohrleitung mit einer Länge von 6 m und mit angeschlossenem Explosions-Entkopplungssystem und einem Startzeitpunkte von 40 ms nach Gemischzündung,
- mit angeschlossener Rohrleitung mit einer Länge von 6 m und mit angeschlossenem Explosions-Entkopplungssystem und einem Startzeitpunkte von 40 ms nach Gemischzündung. In Abweichung zu den Explosionsversuchen wurde für die Berechnungen mit einer Rohrleitung im Vergleich zur Berechnung ohne Rohrleitung eine zusätzliche Brennstoffmasse eingebracht. Vor Gemischzündung wurde für das Innere der Rohrleitung eine Staubkonzentration definiert, die der Hälfte des anfänglichen Wertes im Explosionsbehälter entspricht.

Die für alle Berechnungen ansonsten identischen Modellparameter sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Modellparameter für alle drei Berechnungen

Größe	Wert
Volumen des Explosionsbehälters	9,6 m ³
Geometrische Druckentlastungsfläche	0,49 m ²
Entlastungsfähigkeit E_f gem. EM 14491:2012	1
Länge / Durchmesser-Verhältnis des Explosionsbehälters	1,8
Einbauabstand zwischen Behälteranschluss und Explosions-Entkopplungssystem	6 m
Umgebungstemperatur	25 °C
Anfangsdruck	1 bar (abs)
Durchmesser der angeschlossenen Rohrleitung	400 mm
Maximaler Explosionsüberdruck P_{\max} gem. EN 14034-1	Ca. 10 bar
Maximaler zeitlicher Druckanstieg K_{St} gem. EN 14034-2	Ca. 230 bar·m·s ⁻¹

Bild 5 zeigt für die Druck/Zeit-Verläufe im Explosionsbehälter aller Berechnungsfälle.

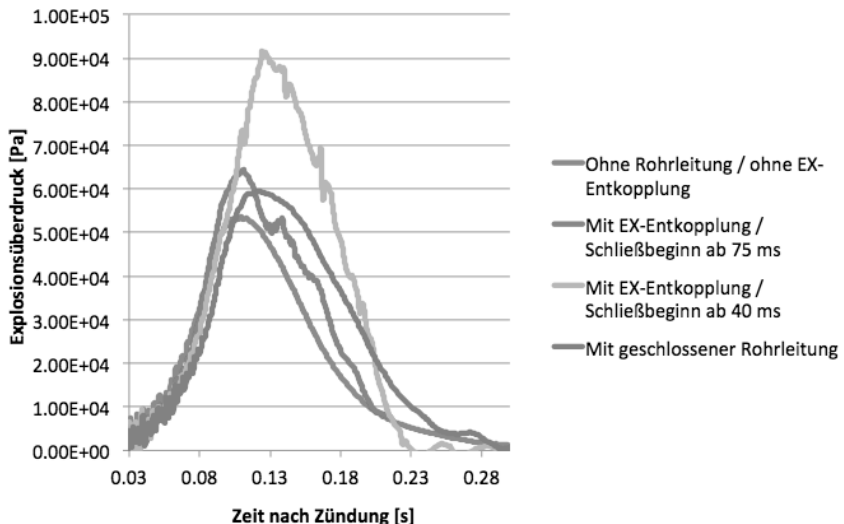


Bild 5: Berechnete Druck/Zeit-Verläufe im Explosionsbehälter

Im Vergleich zur Variante „ohne Rohrleitung“ erkennt man in Bild 5 eine Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks für alle weiteren Berechnungen. Man erkennt eine relativ geringe Erhöhung, wenn die am Behälter angeschlossene Rohrleitung an einem Ende verschlossen

wird. Die geringfügige rechnerische Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks im druckentlasteten Explosionsbehälter resultiert im Wesentlichen aus der zusätzlichen Brennstoffmasse im Rohr, die im Verlauf der Explosion gezündet wird und zur Volumenexpansion und Druckerhöhung beiträgt. Die Explosion läuft hier jedoch gegen das geschlossene Ende, ein freies Abströmen der verbrannten Gase findet nicht statt. Eine nennenswerte Explosionsbeschleunigung mit hohen Druckauswirkungen ist nicht erkennbar.

Bei den Fällen mit angeschlossenem Explosions-Entkopplungssystem fällt die Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks unterschiedlich hoch aus. Beim Fall „Schließbeginn ab 75 ms“ ergibt sich ein Erhöhungsfaktor von ca. 1,2. Wird der Zeitpunkt des Schließbeginns früher gelegt „Schließbeginn ab 40 ms“, ergibt sich eine Druckerhöhung um den Faktor 1,7. Der reduzierte Explosionsdruck im Explosionsbehälter steigt von ca. 540 mbar auf einen Wert von über 900 mbar. Aus den Berechnungsergebnissen ist ableitbar, dass ein frühzeitiger Beginn des Schließvorgangs des Explosions-Entkopplungssystems auch zu einer frühzeitigen Beeinflussung und Verstärkung des bis zu diesem Zeitpunkt kaum fortgeschrittenen Explosionsablaufs im druckentlasteten Explosionsbehälter stattfindet.

Ein mutmaßlich ähnlicher Effekt ist ebenfalls in Bild 3 für den Staub mit einem K_{St} -Wert von $230 \text{ bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ zu erkennen: Der Erhöhungsfaktor des reduzierten Explosionsdrucks im Behälter steigt mit abnehmender Rohrleitungslänge. Je kürzer die Leitungslänge, desto früher ist bei einem passiven Explosions-Entkopplungssystem besonders bei Stäuben mit hohen Druckanstiegsgeschwindigkeiten der Ansprechdruck für den Beginn des Schließvorgangs erreicht. Bei Stäuben mit niedrigen Druckanstiegsgeschwindigkeiten (z. B. Weizenmehl gem. Bild 3) scheint die Beeinflussung des Explosionsablaufs im Behälter durch den Zeitpunkt des Beginns des Schließens des Explosions-Entkopplungssystems geringer zu sein. Hier schließt ggf. das Explosions-Entkopplungssystem in einer langen Rohrleitung relativ spät, der Explosionsablauf im Behälter ist jedoch auch noch nicht weit fortgeschritten. Eine Beeinflussung mit nachfolgender Druckerhöhung im Explosionsbehälter zeigt sich dann im weiteren Verlauf der Explosion in der Rohrleitung, die während des Schließvorgangs des Explosions-Entkopplungssystems zunehmend beschleunigt wird. Die gilt, wie bereits oben erwähnt, insbesondere auch dann, wenn die Flamme dem noch nicht vollständig geschlossenen Explosions-Entkopplungssystem nahe kommt und somit in einen Bereich hoher Turbulenz hineinläuft. Für diese Bereiche führt die lokal hohe Turbulenz im Berechnungsmodell zu einer deutlichen Anhebung der Brenngeschwindigkeit. Die dann einsetzende Druckreflexion am schließenden bzw. geschlossenen Explosions-Entkopplungssystem setzt sich bis in den druckentlasteten Behälter fort und führt je nach Reflexionsablauf zur Erhöhung des reduzierten Explosionsdrucks im Behälter.

4. Zusammenfassung

Die Explosions-Entkopplung ist ein wichtiger Bestandteil konstruktiver Explosionsschutzmaßnahmen. Sie dient dazu, ausgehend von dem Anlagenteil in dem die Explosion ihren Anfang nimmt, eine unkontrollierte Explosionsausbreitung in andere Anlagenteile zu unterbinden.

Neueste Erkenntnisse aus Explosionsversuchen mit Systemen zur explosionstechnischen Entkopplung, die mit explosionsdruckentlasteten Behältern verbunden waren, weisen darauf hin, dass diese Systeme einen Einfluss auf den Ablauf der Explosion im Behälter haben und zu höheren reduzierten Explosionsüberdrücken in diesem führen können. Da die Dimensionierung explosionsdruckentlasteter Behälter gemäß Europäischer Normen diese Verstärkungseffekte nicht berücksichtigt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Einzelfall die Schutzmaßnahmen für den verbundenen Behälter nicht ausreichend dimensioniert sind.

Die vorliegenden experimentellen und numerischen Untersuchungen beschreiben bzw. bestätigen beispielhaft die bereits in früheren Untersuchungen aufgetretenen Effekte. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse konnten erste Schlussfolgerungen bzgl. des Einflusses der explosionsschutztechnischen Kenngrößen der Stäube wie maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Zeitpunkt des Einsetzens des Schießvorgangs passiver Explosions-Entkopplungssysteme wie Explosionsschutzventile oder Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung gezogen werden. Hierbei ergab sich besonders bei einem Staub mit hohem maximalem Druckanstieg eine relativ starke Beeinflussung durch den Zeitpunkt ab dem das Explosions-Entkopplungssystem mit dem Schließvorgang beginnt. Eine Beeinflussung des Reaktionsablaufs im Explosionsbehälter und damit auch eine Beeinflussung des reduzierten Explosionsdrucks scheint hingegen bei Stäuben mit niedriger Druckanstiegsgeschwindigkeit eher durch explosionsverstärkende Effekte beim Durchgang durch die am Behälter angeschlossene Rohrleitung stattzufinden.

Die Schlussfolgerungen müssen im Rahmen weiterer experimenteller und numerischer Untersuchungen verifiziert bzw. präzisiert werden.

5. Literaturangaben

- [1] TRBS 2152 Teil 4:2012, Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken
- [2] DIN EN 14460, Juli 2007: Explosionsfeste Geräte
- [3] DIN EN 14034-1:2011, Bestimmung der Explosionskenngößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{max} von Staub/Luft-Gemischen
- [4] DIN EN 14034-2:2011, Bestimmung der Explosionskenngößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $(dp/dt)_{max}$ von Staub/Luft-Gemischen
- [5] DIN EN 14491:2012, Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen
- [6] DIN EN 14460:2007, Explosionsfeste Geräte
- [7] DIN EN 16447:2014, Rückschlagklappen zur explosionstechnischen Entkopplung
- [8] DIN EN 15089:2009, Explosions-Entkopplungssysteme
- [9] ANSYS Inc., Canonsburg, PA15317: ANSYS CFX-Solver, Release 17.0: Theory, 2015
- [10] Sippel, M.: Anwendungen der Strömungssimulation zur Berechnung von Explosionsabläufen in großtechnischen Anlagen, Technische Sicherheit Bd. 1, Nr. 3 – September 2011
- [11] Sippel, M., Wörsdörfer, K.: Barth, U.: Physikalische Experimente und numerische Methoden im Explosionsschutz. Chemie Ingenieur Technik, 81: 111–118. doi: 10.1002/cite.200800152, 2009
- [12] 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
- [13] 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

Simulation of dust explosions: new developments

Dr.-Ing. **K. van Wingerden**, **M. Ghaffari**, Dr. **T. Skjold**,
Gexcon, Bergen, Norway

Abstract

To be able to predict the consequences of dust explosions or to design protective measures for dust handling equipment which due to its construction or due to the turbulence and flow conditions prevailing in the equipment fall beyond the conditions assumed in current guidelines available for e.g. design of explosion vents, suppression and isolation, Computational Fluid Dynamics (CFD) tools may offer an alternative solution. The current paper describes FLACS DustEx (formerly known as DESC), examples of its validation and current developments ongoing to improve its ability to simulate dust explosions.

1. Introduction

To design dust explosion protection measures such as explosion venting, explosion suppression or explosion isolation one generally relies on guidelines and simple models developed based on experiments performed. These experiments were generally performed in idealized geometries on often a relatively small scale (exceptions regarding scale include those reported by (Bartknecht, 1985), (Eckhoff, 1984) and (Eckhoff, 1987)). Idealized, worst case turbulence conditions were chosen assuring a homogeneous dust cloud (an exception to is the work presented by (Siwek, 1989) involving explosion venting of pneumatically filled cubical vessels). In addition, several experimental campaigns have been ongoing in realistic dust handling equipment such as bucket elevators (Vogl, 2011), mills (van Wingerden, 2011), bag filters (Eckhoff, 1988) and spray dryers (Siwek, 2004) resulting in special guidance for explosion venting of these equipment items (and suppression for spray dryers (Siwek, 2004)).

There are several conditions deviating from those used during the experiments mentioned above. These can be related to the shape of the equipment, the turbulence and flow conditions prevailing at the moment of ignition, the location of the vent or use of multiple vent openings, dimensions of obstructions inside the dust handling equipment such as the buckets inside elevators, etc. The guidelines developed from the experiments are often conservative or limited with respect to their application range. If one wants to be able to take deviating

conditions into account or extrapolate to conditions beyond the application range of the developed guidelines more advanced models are available. One of them is the dedicated CFD-tool FLACS DustEx (formerly known as DESC). FLACS DustEx was developed on the basis of the gas explosion simulation tool FLACS and the first version was released in 2007 (Skjold, 2007). Ever since the release the tool has been applied for multiple applications both for the design of protective measures and for prediction of external effects. The tool has been validated against a large number of large-scale experiments.

The validation, experimental research and the application of the tool have also revealed the need for improvements. The current document describes the tool, some of the more recent validation exercises performed and improvements carried out and planned in the near future.

2. Description of FLACS DustEx

FLACS DustEx (Skjold, 2007) is a CFD-based tool for simulating industrial dust explosions in complex geometries. The key challenges for any CFD code for dust explosions are the description of particle-laden turbulent flow, heterogeneous combustion, and realistic description of large-scale complex geometries. The main changes compared to FLACS is the combustion model and the representation of the dust cloud itself.

The purpose of a combustion model for premixed combustion is twofold: to define the reaction zone (i.e. the position of the flame), and to specify the rate of conversion from reactants to products (i.e. the rate of energy release). The default flame model adopted in both FLACS and FLACS DustEx is the so-called β model (Arntzen, 1998), where the flame is about three grid cells thick, and the turbulent burning velocity S_T follows from an empirical correlation:

$$S_T = 15.1 \cdot S_L^{0.784} \cdot u'_{rms}{}^{0.412} \cdot l_t^{0.196}$$

where S_L is the laminar burning velocity, u'_{rms} is the root-mean-square of the fluctuating velocity component, and l_t is the turbulent integral length scale (Arntzen, 1998).

(Bradley, 1988) suggested that a similar correlation could be valid for maize starch/air mixtures. Provided suitable correlations for turbulent burning velocity exist for any dust/air mixture, in principle it could be possible to simulate flame propagation through clouds of finely dispersed dust by similar methods as those used for gas explosions. The approach adopted in FLACS DustEx involves extracting the lacking combustion parameters from pressure-time histories measured in constant volume explosion vessels, assuming the validity of the certain correlations for turbulent burning velocity (Skjold, 2007). The largest available database for such data is pressure-time histories measured in the standardised 20-litre vessel (CEN, 2011).

The modelling of particle-laden flow in FLACS DustEx is quite simple. It treats the dust cloud as an equilibrium mixture where dispersed particles are in dynamic and thermal equilibrium with the gaseous phase (Crowe, 1998). This corresponds to an Eulerian approach in the limiting case when the Stokes number approaches zero.

3. Examples of validation exercises

The tool has been validated against a number of experiments. Some examples are presented here.

Effects of vent ducts

Vent ducts are used to vent combustion gases out of equipment placed inside a building but not directly near an outer wall. Experiments performed in an 18 m^3 vessel provided with vents and vent ducts and reported by (Hey, 1999) and (Lunn, 1988) were simulated.

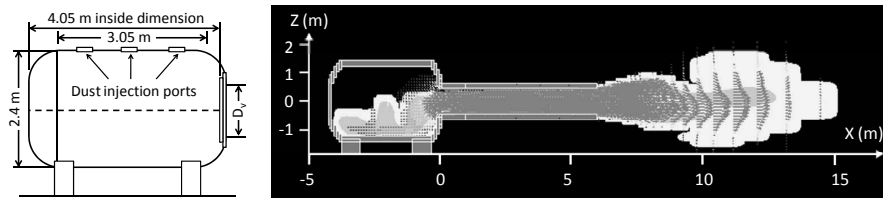


Fig. 1: Schematic of the 18.5 m^3 vessel (left) and an example of the geometry and coordinate system implemented in FLACS DustEx.

The dust dispersion system was modeled as three transient jets impinging on porous panels in order to imitate the actual dispersion nozzles. The ignition was activated 760 ms later.

The overall results are summarized in Fig. 2 showing general good agreement between experiment and simulation independent from initial conditions.

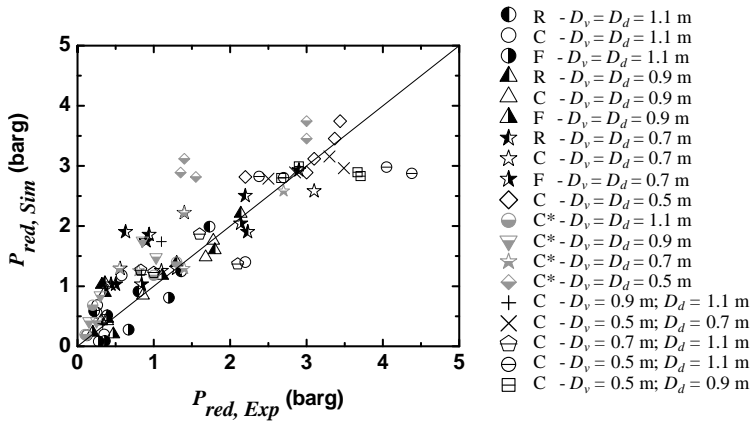


Fig. 2: Comparison of simulated ($P_{red, Sim}$) and experimental ($P_{red, Exp}$) results for experiments to investigate the effects of vent ducts on the effects of vented dust explosions reported by (Hey, 1999) for rear (R), center (C) and front (F) ignition, and by (Lunn, 1988) for center (C*) ignition. D_v = diameter vent opening, D_d = diameter duct. Results from (Castellanos, 2013).

Another result is shown in Fig. 3. The effects of moving the ignition position inside the vessel on P_{red} were analyzed. The point of ignition was moved along the center line of the vessel (x axis). The analysis was performed for a vent opening and vent duct diameter of $D_v = D_d = 1.1$ m. The length of the vent duct was 16 m. As shown in Fig. 3 the P_{red} is reduced as the ignition position is moved towards the vent opening. The experimental results indicate a limitation in current prediction methods where the ignition position is not taken into account, and center ignition is generally considered the worst case scenario. The FLACS DustEx tool reproduces the experimental results and the trend seen very well.

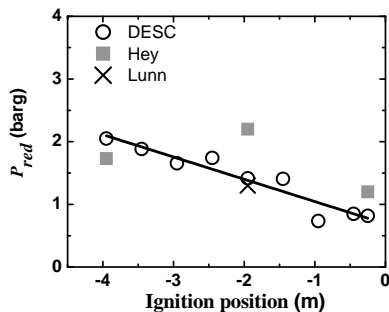


Fig. 3: Influence of ignition location on P_{red} for coal dust explosions in a 18.5 m³ vessel. Ignition position relative to position of burst disc. Configurations with a duct length of 16 m and vent diameter equal to duct diameter, $D_v = D_d = 1.1$ m. Results from (Castellanos, 2013).

Interconnected vessels

Another set of experiments simulated involve dust explosions performed in two interconnected vessels of 2 m³ and 20 m³. Ignition was always effected in the 20 m³ vessel (Holbrow, 2004) (Holbrow, 2005). Three ignition source locations were used (Ign. 1, ign. 2 and ign. 3; see Fig. 4). Both vessels were vented and the interconnection was effected by a 5m long pipe with a sharp 90° bend. The pipe had a diameter of 0.25 m or 0.5 m. Four different dusts were used silicon, coal and two types of potato starch. Explosions did not always transmit and more readily using a 0.5 m diameter pipe. When transmission did not occur, the quenching occurred near the bend.

Experimental results for coal are reproduced in

Table 1: Summary of explosion experiments performed with coal dust (Holbrow, 2004)
(Holbrow, 2005).

Test no.	20 m ³ vessel					Connecting pipe			2 m ³ vessel			
	A _v (m ²)	Ign. pos.	P _{stat} (bar)	P _{CH-1} (bar)	P _{CH-2} (bar)	D _{pipe} (m)	P _{CH-5'} (bar)	P _{CH-6} (bar)	A _v (m ²)	P _{CH-3} (bar)	P _{CH-4} (bar)	Explo. trans.
13	0.9	1	0.11	0.52	0.56	0.5	1.85	2.10	0.19	2.84	2.86	1
34	0.9	2	0.10	0.38	0.41	0.5	0.39	0.30	0.19	0.34	0.25	0
33	0.9	3	0.11	0.11	0.13	0.5	0.09	0.10	0.19	0.10	0.10	1
22	0.9	1	0.09	0.35	0.38	0.25	0.28	0.16	0.19	0.07	0.06	0
27	0.9	2	0.11	0.36	0.38	0.25	0.36	0.18	0.19	0.05	0.05	0
28	0.9	3	0.11	0.11	0.11	0.25	0.09	0.07	0.19	0.04	0.04	0
10	1.5	1	0.09	0.14	0.16	0.5	0.14	0.11	0.33	0.15	0.16	0
18	1.5	1	0.07	0.11	0.12	0.25	0.11	0.06	0.33	0.05	0.06	1
19	1.5	1	0.12	0.12	0.14	0.25	0.10	0.08	0.33	0.05	0.05	0

The ignition point was moved by 0.6 m towards the rear wall (ign. point 1a), 0.6 m towards the vent opening (1b) and 0.6 m downwards (1c). The simulations show that the influence of small changes of the ignition point is considerable and partly can explain the difference between simulations and experiments: hot particles launched by the chemical igniter used during the experiments can ignite the mixture at other locations than the original position of the ignition source. A more detailed discussion of these experiments can be found in (Skjold, 2010)

Table 2: Summary of some of the simulations performed with FLACS DustEx.

Sim. No.	Test no.	Ign. pos.	20 m ³ vessel		Connecting pipe		2 m ³ vessel	
			P _{CH-1}	P _{CH-2}	P _{CH-5}	P _{CH-6}	P _{CH-3}	P _{CH-4}
1	13	1	0.63	0.64	0.53	1.69	2.12	2.13
2	34	2	0.40	0.40	0.48	0.82	0.87	0.87
3	33	3	0.60	0.62	1.06	2.24	2.19	2.18
6	13	1a	0.64	0.67	1.36	1.96	2.85	2.86
7	13	1b	0.46	0.49	0.57	1.43	1.31	1.30
8	13	1c	0.79	0.80	1.13	2.69	2.33	2.31

4. New developments

Particle representation

Work has been performed to improve the representation of particles in FLACS DustEx. The approach adapted entails the implementation of an Algebraic Slip Mixture Model (ASMM) in the CFD solver. The ASMM accounts for the interfacial forces, including the convective accelerations and drag force, to estimate the slip velocity as a closure for the diffusion velocity between the mixture and the dispersed phase. The slip velocity at each grid cell is calculated using a single particle equation. The implemented model was compared to experiments.

One of set of experiments used were those described by (Hardalupas, 1989). The experiments concern the behaviour of particle laden air jets with were performed with glass beads of different size classes: 165-255, 60-95 and 37-44 μm , for convenience referred to as 200, 80 and 40 μm , respectively. The jet was pointing downwards. Among the different particle sizes used in this experiment, the particle diameters 40 and 80 μm are within the range applicable for the dust explosion consequence studies. In this experiment, the jet diameter was 15 mm and the exit velocity was 13 m s^{-1} .

The results are presented in Fig. 5. There is a clear deviation between the experiments and the simulation. Not having excluded interfacial forces in our implementation may explain the pronounced deviation from the experiments.

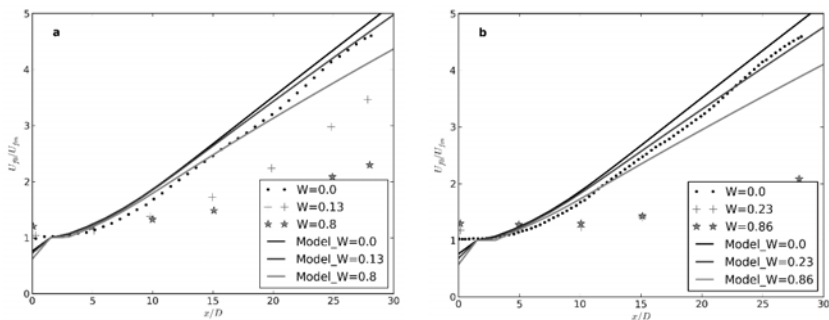


Fig. 5: Fluid axial velocity decay (compared to the initial velocity at nozzle discharge) along the jet central axis for different mass loadings for particle sizes of: (a) 40 μm ; and (b) 80 μm .

Future work will include further development and validation of the ASMM in FLACS-DustEx.

Burning velocity

The combustion theory used for extracting burning velocities from 20 l sphere experiments assumes a thin spherical flame, and does not account for the effect of the in reality significant flame thickness or volumetric combustion. According to (Wolanksi, 1996) the flame thickness of dust flames is typically 1-1.5 m. This was confirmed by balloon experiments reported by (Skjold, 2013). Their results show flame thicknesses of the dusts investigated (lycopodium and maize starch) in the order of the size of the balloon (0.5 m) as can also be seen in Fig. 6 showing islands of burning material throughout the entire balloon. A clear distinct flame front cannot be recognised.

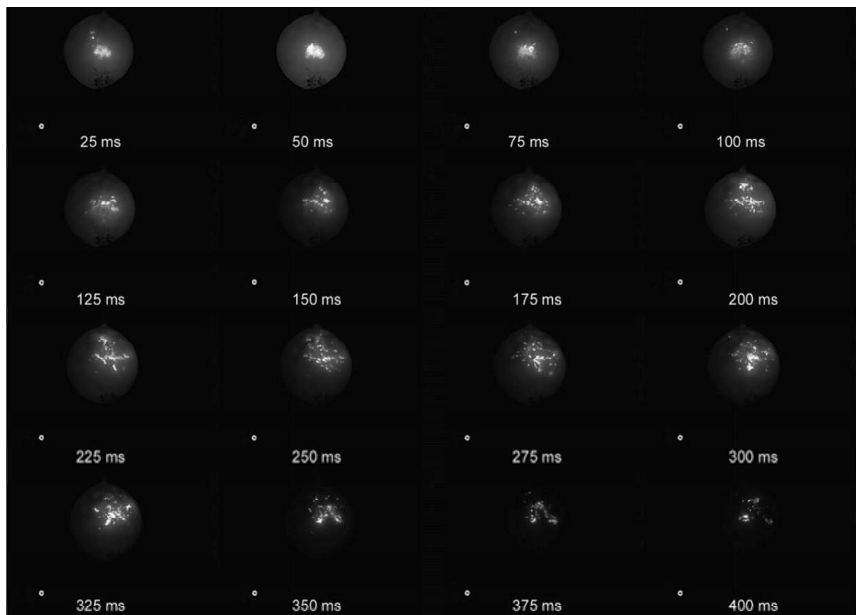


Fig. 6: Selected frames from a test with *Lycopodium clavatum*, ignited by a 40 J chemical igniter under turbulent condition, nominal dust concentration 140 g/m^3 . (Skjold, 2013)

A possible solution involves taking into account the very thick dust explosion flame by fitting an integral balance model to the measured pressure-time curve (Dahoe, 1996). This approach is somewhat limited since it requires a relatively weak ignition source instead of the

chemical igniter used in the 20-l sphere. Nevertheless, this a way forward to improve the abilities of the tool

5. References

Arntzen B.J. Modelling of turbulence and combustion for simulation of gas explosions in complex geometries [Report]. - [s.l.] : PhD Thesis Norwegian University of Science and Technology, 1998.

Bartknecht W. Druckentlastung von Staubexplosionen in Grossbehältern [Report]. - Bonn : Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1985.

Bradley D., Chen, Z., and Swithenbank, J. R. Burning rates in turbulent fine dust-air explosions [Conference] // 22nd Symposium (International) on Combustion. - 1988. - Vols. 1767-1775.

Castellanos D., Skjold, T., van Wingerden, K., Eckhoff, R.K. and Mannan, M.S. Validation of the DESC code in simulating the effect of vent ducts on dust explosions [Article] // Ind. Eng. Chem. Res.. - 2013. - 6057-6067 : Vol. 52.

CEN Determination of explosion characteristics of dust clouds - Part 1: Determination of the maximum explosion pressure p_{max} of dust clouds [Report]. - [s.l.] : European Committee for Standardisation, 2011.

Crowe C., Sommerfeld, M., Tsuji, Y. Multiphase flows with droplets and particles [Book]. - Boca Raton : CRC Press, 1998.

Dahoe A.E., Zevenbergen, J.F., Lemkowitz, S.M. and Scarlett, B. Dust explosions in spherical vessels: the role of flame thickness in the validity of the 'cube-root law' [Article] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 1996. - Vols. 9, 33-44.

Eckhoff R. K., Alfert, F. and Fuhre, K. Venting of dust explosions in a 5.8 m³ bag filter under realistic conditions of dust cloud generation [Journal] // VDI-Berichte. - 1988. - pp. 701, 695-722.

Eckhoff R. K., Fuhre, K. and Pedersen, G.H. Dust explosion experiments in a vented 236 m³ silo cell [Journal] // Journal of Occupational Accidents. - 1987. - pp. 9, 161-175.

Eckhoff R.K. and Fuhre, K. Dust explosion experiments in a vented 500 m³ silo cell [Journal] // Journal of Occupational Accidents. - 1984. - pp. 6, 229-240.

Hardalupas Y., Taylor, A.M.K.P. and Whitelaw, J.H. Velocity and particle-flux characteristics of turbulent particle-laden jets [Article] // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. - 1989. - 426. - 1870.

Hey M., Pressure relief of dust explosions through large diameter ducts and effects of changing the position of the ignition source [Article] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 1999. - 4. - 4 : Vols. 217-222.

Holbrow P. DESC: Interconnected vented explosion tests. Report EU/04/30 [Report]. - Buxton : Health and Safety Laboratory, 2004.

Holbrow P. DESC: Phase 2 interconnected vented explosion tests. Report EU/04/72 [Report]. - Buxton : Health and Safety Laboratory, 2005.

Lunn G., D. Crowhurst, and M. Hey, The effect of vent ducts on the reduced explosion pressures of vented dust explosions [Article] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 1988. - 1. - 4 : Vols. 182-196.

Siwek R. Druckentlastung von Staubexplosionen beim pneumatischen Befüllen von Behältern [Journal] // VDI-Berichte. - 1989. - pp. 701, 129-140.

Siwek R., van Wingerden, K., Hansen, O.R., Sutter, G., Kubainsky, Chr., Schwartzbach, Chr., Giger, G. and Meili, R. Dust explosion venting and suppression of conventional spray dryers [Conference] // 11th Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. - Prague : Institution of Chemical Engineers, 2004. - pp. 3326-3336.

Skjold T. Flame propagation in dust clouds: challenges for model validation, ISH-048 [Conference] // 8th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. - Yokohama : [s.n.], 2010.

Skjold T. Review of the DESC project [Journal] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 2007. - pp. 20, 291-302.

Skjold T., Olsen, K.L. and Castellanos, D. A constant pressure dust explosion experiment [Article] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 2013. - Vols. 26, 562-570.

van Wingerden K., Pedersen, G., Wilkins, B., Berg, M. and Findsen Nielsen, N.O. A full-scale experimental and modelling investigation of dust explosions in a roller mill [Journal] // Process Safety Progress. - 2011. - pp. 30 (1), 87-96.

Vogl A. and Radandt, S. Neue Erkenntnisse für den konstruktiven Explosionsschutz von Becherelevatoren [Journal] // Technische Sicherheit. - 2011. - pp. 1, 15-19.

Wolanski P. Dust explosions [Article] // KONA. - 1996. - Vols. 14, 144-152.

