

Fachveranstaltung „ Erfahrungsaustausch betrieblicher  
Explosionsschutz“ am 24./25.03.2025 in Nümbrecht



# Besonderheiten zum Explosionsschutz bei Metallstäuben



**Marc Scheid und Georg Suter**

FireEx Consultant GmbH • CH-9056 Gais • Switzerland • [m.scheid@fireex.ch](mailto:m.scheid@fireex.ch)

# Sind Metalle brennbar?

- Alle Metalle können oxidiert werden gemäss:  $2x \text{ M} + y \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ M}_x\text{O}_y$
- Edelmetalle wie Gold und Platin reagieren aber nur unter extremen Bedingungen mit Sauerstoff
- Alle übrigen Metalle bilden an der Luft innert kürzerer oder längerer Zeit Oxidschichten, die danach den Kontakt zur Luft unterbrechen und die Oxidation stoppen

# Sind Metalle brennbar?

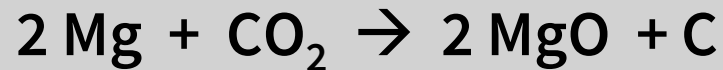
- Alle Metalle können oxidiert werden gemäss:  $2x \text{ M} + y \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ M}_x\text{O}_y$
- Edelmetalle wie Gold und Platin reagieren aber nur unter extremen Bedingungen mit Sauerstoff
- Alle übrigen Metalle bilden an der Luft innert kürzerer oder längerer Zeit Oxidschichten, die danach den Kontakt zur Luft unterbrechen und die Oxidation stoppen
- Alkali und Erdalkalimetalle lassen sich auch in makroskopischer Form anzünden

# Sind Metalle brennbar?

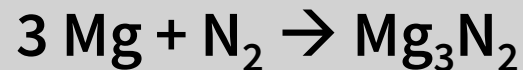
- Alle Metalle können oxidiert werden gemäss:  $2x \text{ M} + y \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ M}_x\text{O}_y$
- Edelmetalle wie Gold und Platin reagieren aber nur unter extremen Bedingungen mit Sauerstoff
- Alle übrigen Metalle bilden an der Luft innert kürzerer oder längerer Zeit Oxidschichten, die danach den Kontakt zur Luft unterbrechen und die Oxidation stoppen
- Alkali und Erdalkalimetalle lassen sich auch in makroskopischer Form anzünden
- Viele Metalle werden pyrophor, wenn die Teilchengrösse sehr klein wird. Auch Metalle wie Kupfer, die üblicherweise nicht staubexplosionsfähig sind, können, wenn sehr fein(Nanostäube) in Luft aufgewirbelt explosionsfähig sein

# Inertisierung

Gewisse Metallstäube (Mg, Al, Ti) können mit CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O bei hohen Temperaturen oxidiert werden, d.h. sie brennen in Kontakt mit diesen Gasen/Dämpfen, die bei organischen Stäuben zur Inertisierung verwendet werden können



Bei hohen Temperaturen reagieren Mg und Ti auch mit Stickstoff unter Bildung der Nitride



# Explosion Aluminium Staub- Vorführung IFA

# Hayes Lemmerz international, Huntington (USA) - 2003

# Aluminiumstaubexplosion in Kunshan 2014

- Eine der schwersten bekannten Staubexplosionskatastrophen
  - 146 Tote, 114 Verletzte
  - Schaden: 351 Millionen Yuan (ca. 45 Mio. Euro)
- Operation: Polieren von Aluminiumlegierungen

Übersetzer Ausschnitt aus: G. Li, H.-X. Yang, C.-M. Yuan and R.K. Eckhoff : “A catastrophic aluminium-alloy dust explosion in China” in Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 39, January 2016, Pages 121-130



# Aluminiumschleiferei Velbert

## Verfahrens- und Anlagenbeschreibung

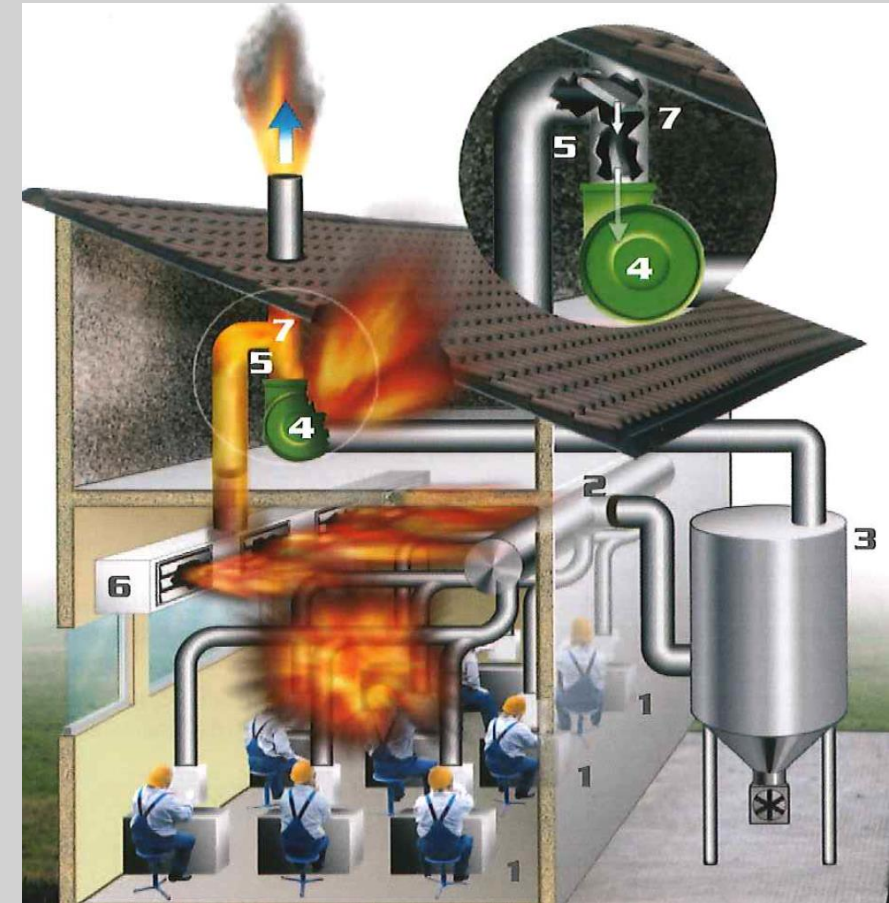
- Bearbeiten (Schleifen, Polieren) von Werkstücken aus Aluminiumguss (1)
- Zentrale Entstaubungsanlage (2) für die verschiedenen Schleifplätze (Schleifböcke) (1)
- Nassabscheider (3) ausserhalb des Gebäudes mit nachgeschaltetem Ventilator (4) und teilweiser Luftrückführung (5)
- Rückluftkanal (6) über die ganze Stirnseite der Schleiferei unterhalb der Decke

## Schadenablauf

- Erste Explosion im Ventilatorbereich (4), ausgelöst durch die in den Ventilator (4) hineingefallene Fortluftklappe (7)
- Explosionsübertragung in den Rückluftkanal (6)
- Aufwirbeln des in grossen Mengen im Rückluftkanal (6) abgelagerten Feinstaubes durch die Druckwelle
- Bildung eines grossvolumigen explosionsfähigen Staub/Luft-Gemisches im Schleifraum, das durch die nacheilende Flammenfront entzündet wurde

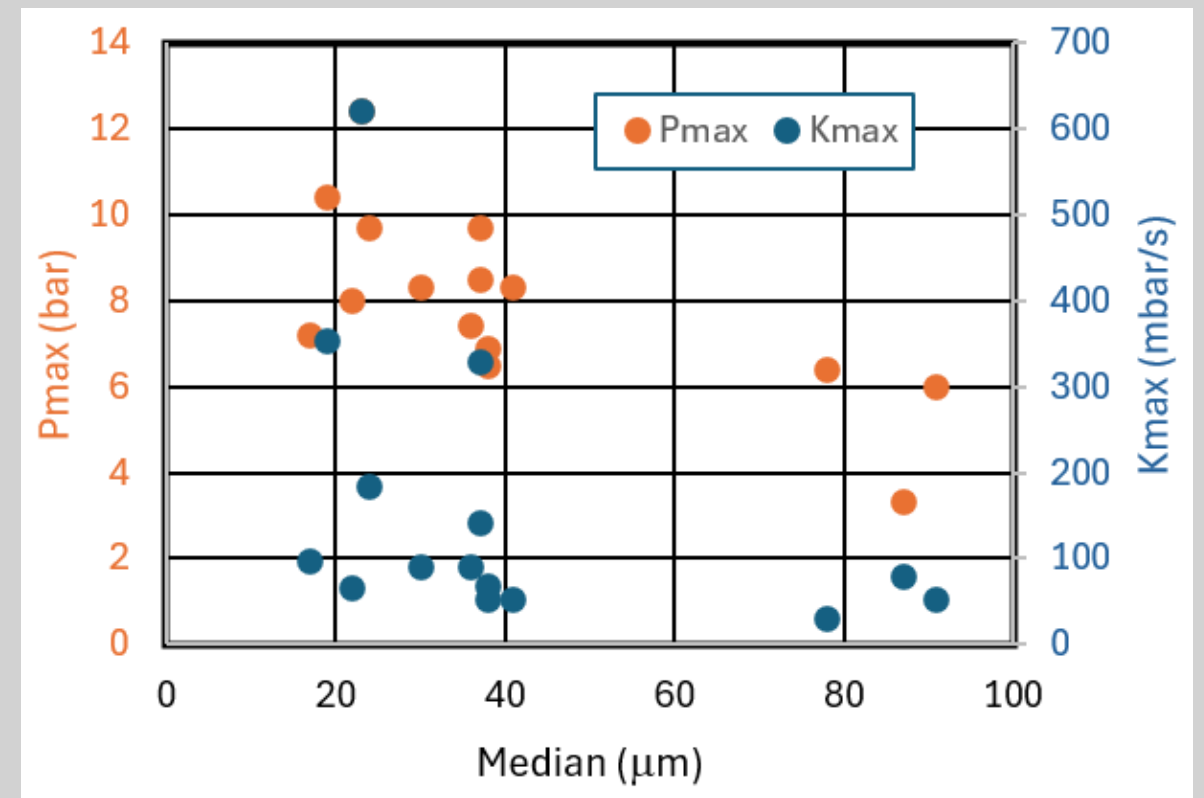
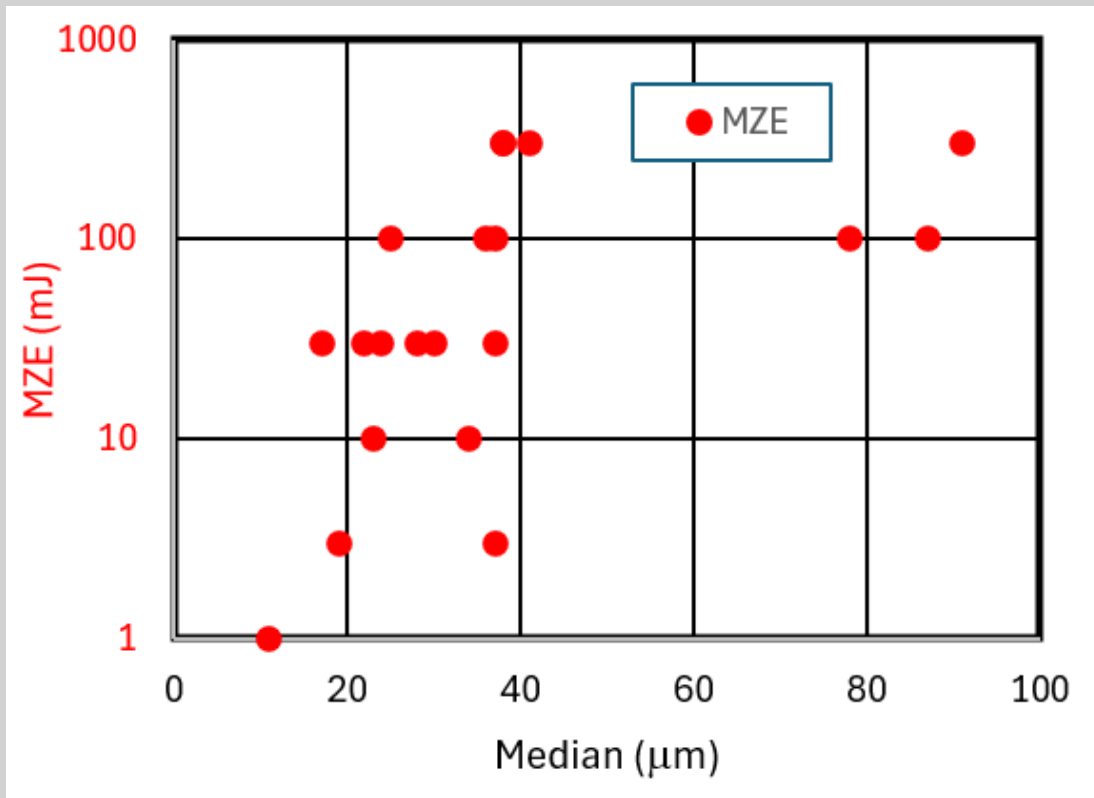
## Schadenausmass:

- Alle acht im Schleifraum tätigen Personen wurden vom Feuerball erfasst. Sechs verstarben noch am Unfallort, zwei erlagen in den folgenden Tagen ihren schweren Brandverletzungen.
- Die Schleiferei wurde vollständig zerstört.



Quelle: IVSS Broschüre Staubexplosionsereignisse

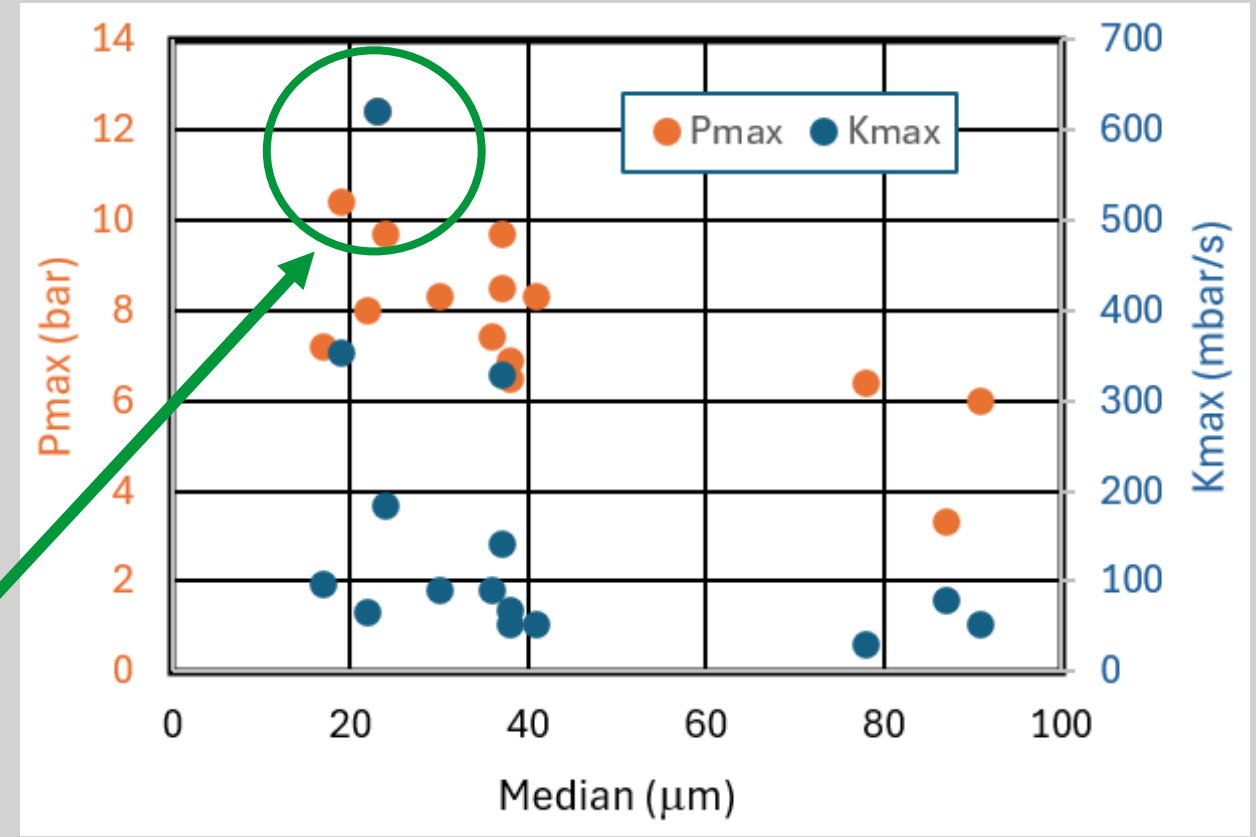
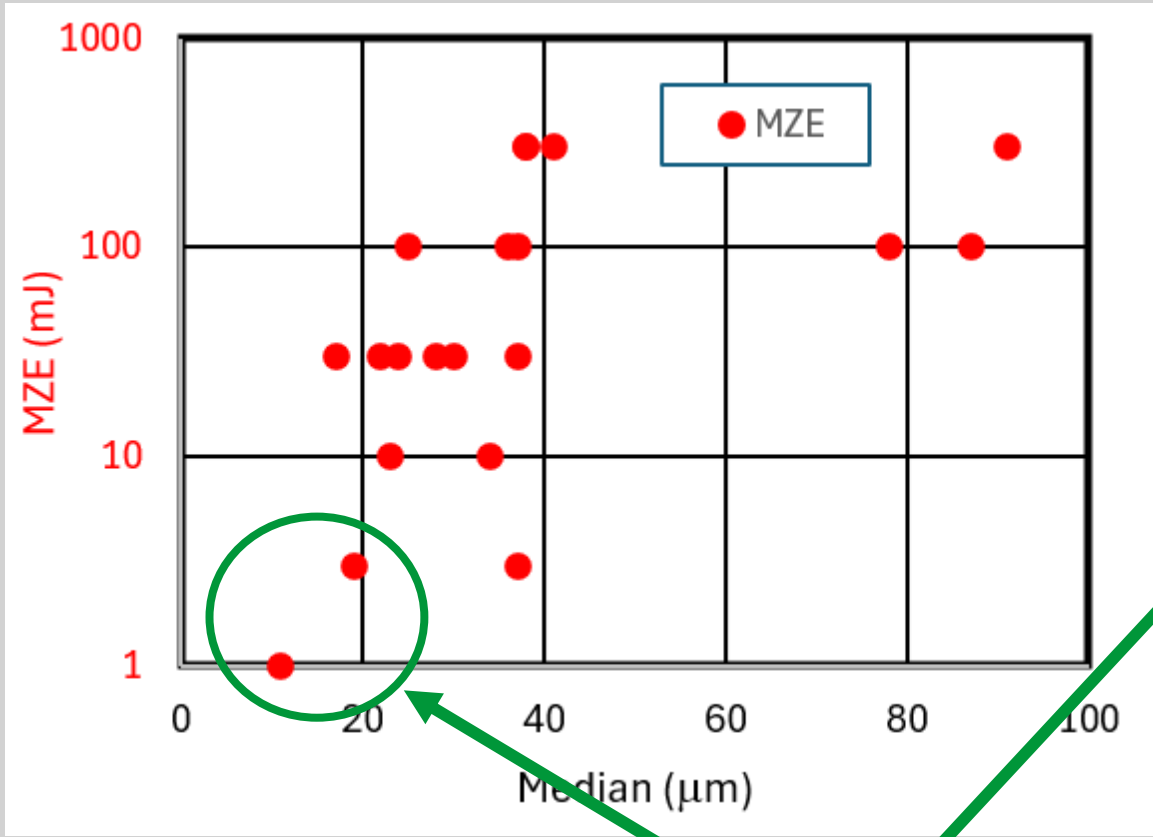
# Kenngrossen



## Daten von Aluminium aus der GESTIS-Staub-Ex-Datenbank

- Tabellendaten zeigen grosse Abweichungen auf
- Einflusseffekte :
  - Oxidschicht
  - Anteil oxidiertes Material und andere Stoffe

# Kenngrößen



Daten von Aluminium aus der GESTIS-Staub-Ex-Datenbank

Kenngrößen können auf **extrem grosse Explosionsrisiken** hinweisen:

- In der Regel nicht für konservative Abschätzung nutzbar (ausser man hat feines Alupulver mit frischer Oberfläche)

# Kenngrossenbestimmung

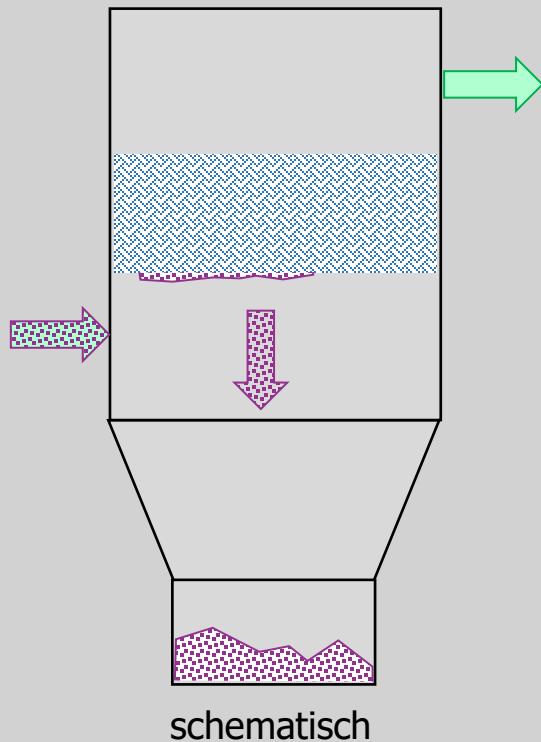
Passivierung/Oxidation von Staub hat sehr grossen Einfluss auf Kenngrossen (Herkunft und Behandlung der Probe sind wichtig):

- Sicherstellen, dass Probe wenn diese im Prüflabor ankommt noch repräsentativ für den Zustand in der Anlage ist
- Muster daher unmittelbar an Prüflabor schicken und mit Labor vorab abstimmen, dass Probe zeitnah untersucht wird
- Labor darauf hinweisen, dass Oxidation/Passivierung von Produkt auf die Kenngrossen haben kann
- Sauerstoffgehalt im Gebinde mit Probenmaterial so gering wie möglich halten
  - fast vollständig gefüllte Gebinde
  - Inertgasüberlagerung oder
  - Vakuumieren des Musters
- Feine Metallstäuben (wenige  $\mu\text{m}$  oder Nanostäube) können teilweise nicht oder nicht so einfach in Prüfapparaturen wie der 20-l-Kugel untersucht werden da diese sich z.B. bereits beim Eindüsen entzünden können

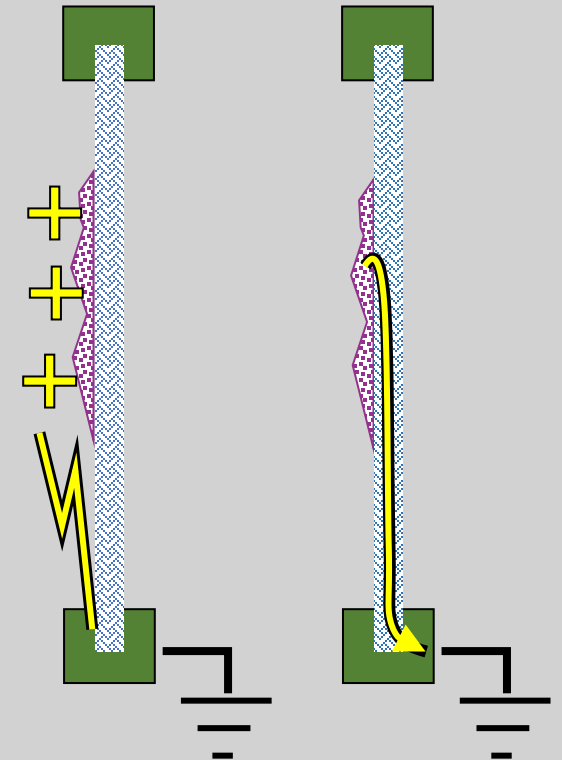
Bei sehr feinen Leichtmetallpulvern extrem hohe K-Werte und Temperaturen möglich !!!

- Schäden an Versuchsaappareturen möglich, da nicht dafür ausgelegt (sowohl Temperatur als auch Druck)

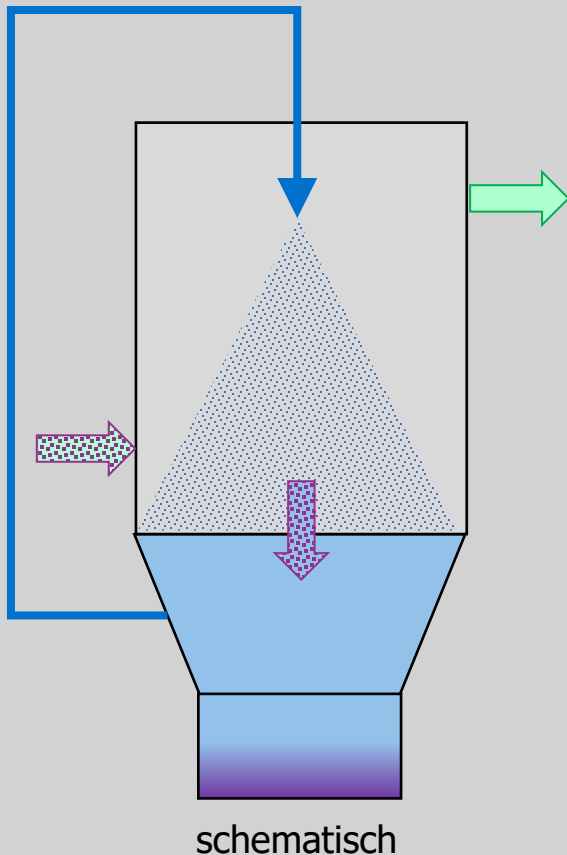
# Trockenabscheider



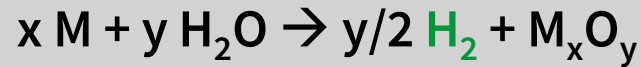
- Bei pneumatischer Förderung können sich Metallpulver aufladen
- Daher müssen Filtermaterialien zur Abscheidung von Metallstäuben ableitfähig und geerdet sein (insbesondere bei zündempfindlichen Stäuben wichtig)
- Siehe hierzu auch TRGS 727 (Deutschland) Kapitel 6.5 und IEC TS 60079-32-1 Kap. 9.4.3



# Nassabscheider



In Nassabscheidern kann sich **Wasserstoff** bilden nach:



- Diese Reaktion ist umso effektiver je «unedler» das Metall ist
- Dies führt zu einem erheblichen Explosionsrisiko an Stellen in der Anlage, wo kein Luftwechsel stattfindet, z.B. in Lagerbehältern mit metallhaltigem Abfallschlamm oder in Bereichen der Anlage in den sich H<sub>2</sub> anreichern kann

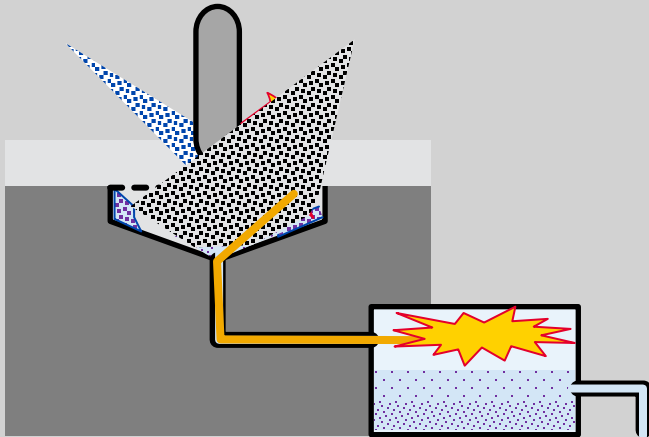
Massnahmen:

- Nassabscheider sowie angeschlossene Anlagenteile immer mit Abströmeinrichtungen für den entstehenden Wasserstoff auszurüsten
- Ausserdem sind Überwachungseinrichtungen erforderlich, die die Funktion bzw. den Wasserfüllstand überwachen, um ein Verschleppen von Staub in den Reingasbereich zu vermeiden (Ereignis Velbert)
- Zusätzlich wird ein regelmässiges Überprüfen und ggf. Reinigen von Rückluftleitungen empfohlen (geringerer Abscheidegrad Nassabscheider)
- Metallstäube können sich bei geringer Feuchte bzw. beim Trocknen der abgeschiedenen Schlämmen selbst erhitzen und sogar selbst entzünden (entsprechend lagern)

# Ereignis Wasserstoffbildung

Beim Schleifen von Magnesiumussteilen an einer Bandschleifmaschine im Trockenschleifverfahren kam es zu einem Brand mit nachfolgender Explosion.

Ein Schwer- und zwei Leichtverletzte, erhebliche Sachschaden.



## Ablauf

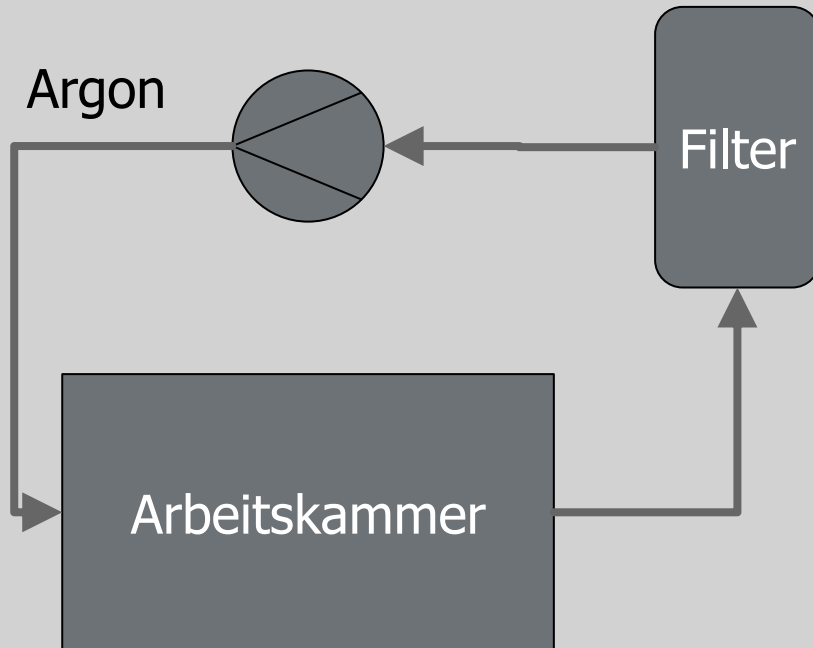
- Entzündung von Staubanbackungen im Auffangbehälter durch mechanischen Funken
- Erfolgreicher Löschversuch mit Sand
- Explosion im Schlammbekken, das nicht zwangsentlüftet war, weshalb sich Wasserstoff ansammeln konnte.

Quelle: VdS 3537: 2015



# Explosion Anlage Schleifen von Magnesium (vermutlich H<sub>2</sub>-Bildung auf Basis Auswirkungen)

# Laserbearbeitung



Inerte Atmosphäre

Keine Brandgefahr

- **ABER:**  
Keine Passivierung der Teilchen

- **DAHER:**  
Selbstentzündungsgefahr beim Filterwechsel

- **Ähnliche Gefahren auch beim Schutzgasschweißen wegen fehlender Passivierung**

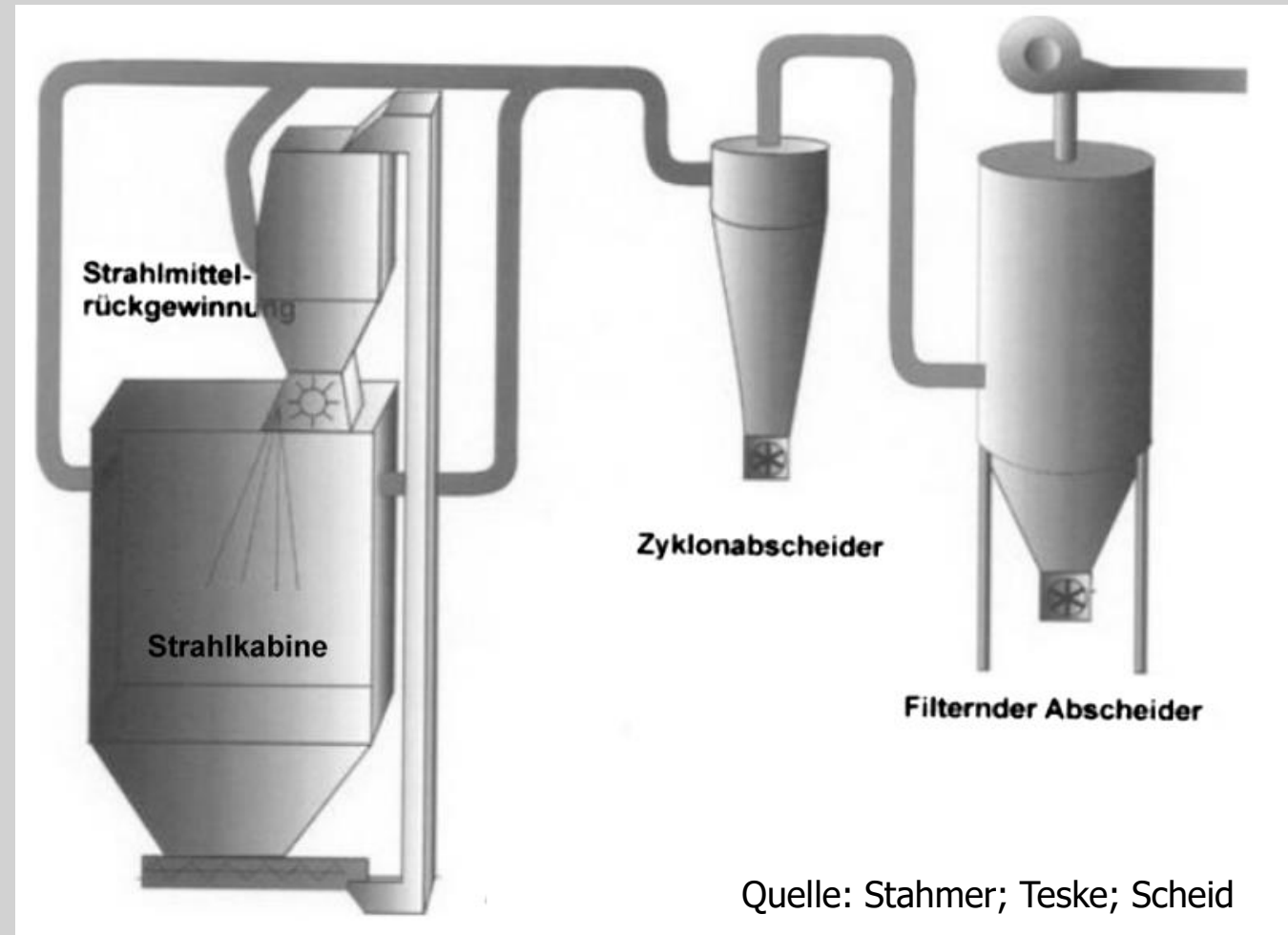
- **Auch nicht inerte Filter durch Absaugung mehrerer Prozesse beachten**

# Strahlanlagen/Strahlstaub

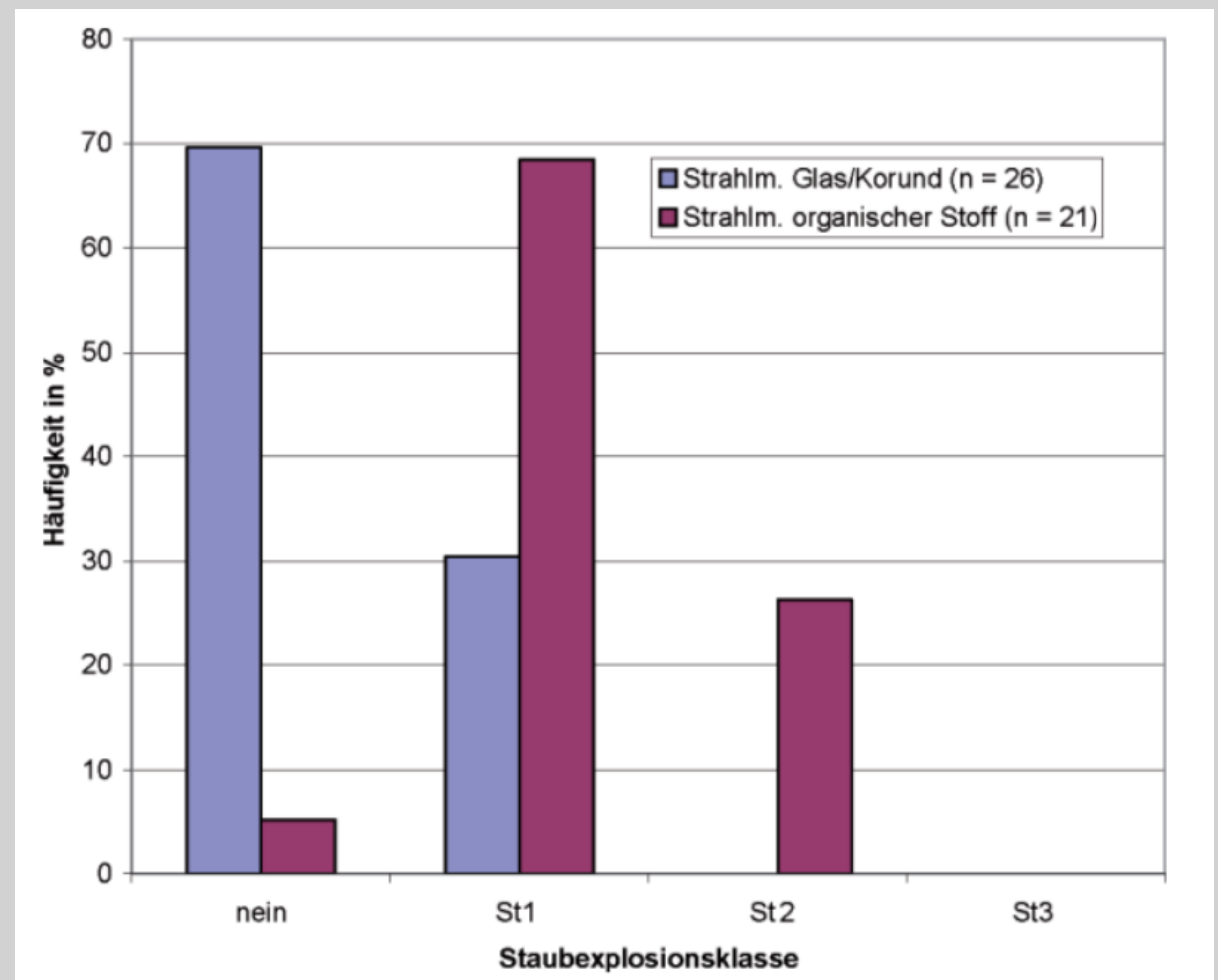
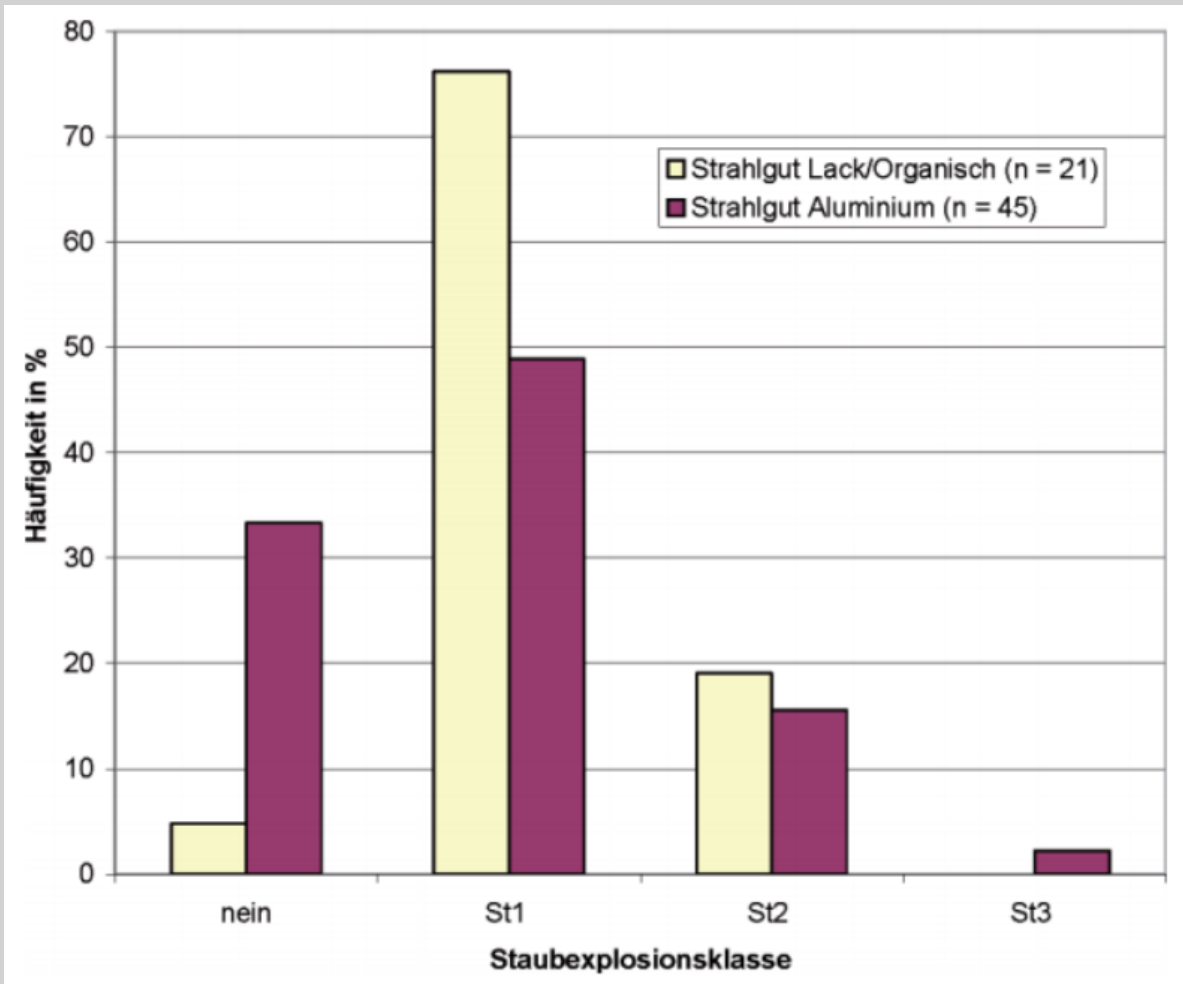
Gemische von Abrieb Produkt und Strahlmittel

## Strahlmittel:

- Anorganisch, nicht brennbar wie Glas, Korund
- Metalle
- Organisch z.B. brennbar wie Nussschalen
- **Abrieb:**
- Metall, Zunder (Metalloxid), Lack, Sand



# Strahlstaub



# Selbstentzündungsgefahren auch bei Stahlstäuben

- Gefahren
  - in Filteranlagen
  - Lagerung Produkt
  - Entsorgung

# Strahlstaub

Kenndaten	
UEG	15 ... 1000 g m <sup>-3</sup>
P <sub>max</sub>	1.4 ... 10.5 bar
MZE	10 < MZE < 1000 mJ
MZT <sub>cloud</sub>	270 ... 540 °C
MZT <sub>layer</sub>	190 ... 480

- Auch bei Verwendung nichtbrennbarer Strahlmittel kann Brand- und Explosionsgefahr bestehen
- Kenngrößen können extrem variieren
- Wichtige Massnahmen
  - Ablagerungen in Leitungen vermeiden
  - Zur Reduzierung der Gefahr von Selbstentzündungen kann Zugabe von inerten Stoffen wie Kalksteinmehl hilfreich sein
  - Diese schwächt auch Zündempfindlichkeit und Heftigkeit von Explosionen ab.
  - In der Regel aber nicht ausreichend für vollständige Inertisierung
  - Oft auch bei < 10 -20% Metallanteil noch explosionsfähig
  - Daher normalerweise experimentelle Untersuchungen erforderlich
  - Zoneneinteilung in allen Bereichen mit Staub
  - Vermeiden von Zündquellen
    - Anlage erden
    - Keine isolierenden Auskleidungen in Leitungen/nichtleitfähige Anlagenteile
    - Leitfähige Filterelemente bei leitfähigen Stäuben
    - Ausführung in erforderlicher ATEX Gerätekategorie

# Stahlstaub

- Strahlstäube müssen nicht zwangsläufig Leichtmetalle enthalten, um staubexplosionsfähig zu sein
  - Auch Stahl-Strahlstäube oder Strahlstäube die Stahlanteile enthalten, können brennbar und in Luft aufgewirbelt explosionsfähig sein
  - Besonders kritisch waren bei Untersuchungen Stäube mit vergleichsweise hoher Brennzahl (BZ > 3)
  - Gerade bei Anlagen mit einem Vorabscheider und folglich sehr feinem Staub im nachgeschalteten filternden Abscheider war ein besonders kritisches Verhalten zu beobachten
  - In solchen Anlagen kommt es regelmässig zu Bränden durch Selbstentzündung
- Empfehlung:  
Entsprechende Anlagen mit Konstruktivem Explosionsschutz und Brandlöschung auszurüsten bzw. Massnahmen ergreifen, die Zündempfindlichkeit des abgeschiedenen Staubes reduzieren (z.B. durch Interstaubzugabe)

# Konstruktive Explosionsschutzmassnahmen

- Metallstaub/Luft-Gemischen besitzen im Vergleich zu organischen Stäuben wesentlich höhere Verbrennungstemperaturen
- Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass für organische Stäube zertifizierte Schutzsystem bei Metallstäuben, insbesondere bei Leichtmetallstäuben versagen
- Dies gilt ganz besonders für die Explosionsunterdrückung sowie für Systeme in denen Flammen zurückgehalten werden oder eine Flammenausbreitung gestoppt werden soll, wie flammenlose Druckentlastung oder explosionstechnische Entkopplungssysteme
- Zum Schutz von Anlagen in denen reine Metallstäube gehandhabt werden oder mit Stoffgemischen mit einem hohen Anteil an explosionsfähigen Metallen sollten daher in der Regel auch für Metallstäube zertifizierte Schutzsysteme eingesetzt werden
- Ausserdem Einschränkungen hinsichtlich maximaler K-Werte und bei Entkopplungssystemen Grenzspaltweite (bei Stäuben aus MZE und ZT abgeschätzt) beachten – Kann sein, dass es für Randbedingungen keine zugelassenes Schutzsystem gibt - Einzelfallbetrachtung
- Für Gemische aus Metallstäuben und organischen Stäuben oder inerten Stäuben ist beim Einsatz von nicht für Metallstäube zertifizierten Schutzsystemen in jedem Fall eine Einzelfallbetrachtung erforderlich





# Zu beachten: Unterschiede organische – und Metallstäube

Charakteristik	Organische Stäube	Metallstäube
Kennzahlen allgemein	Abhängig von Teichengröße und Feuchtigkeit	<b>Zusätzlich</b> sehr stark abhängig vom Ursprung und der Vorbehandlung der Probe (Oxidschicht, instabile Passivschichten, Zusammensetzung); wenn feucht Bildung H <sub>2</sub> möglich; feine Produkte können thermisch instabil und sogar pyrophor sein; können sehr hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten haben und dadurch sehr starke Beschleunigung der Flamme möglich (aber nicht immer); teilweise Anhaften Öl und Kühlschmierstoffe
Verbrennungstemperatur	um 2000°C	Bis 3000°C ! (Stahl schmilzt bei 1800°C)
Mindestzündenergie	1 – 1000 mJ	1 – 300 mJ
O <sub>2</sub> -Grenzkonzentration	9–13% (Ausnahmen 5-9%)	Aluminium 5% (ESCIS 3), Magnesium 3% (GESTIS)
Inertisierung mit	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Oxidation mit CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O möglich
P <sub>max</sub> , K <sub>max</sub>	≤10bar, ≤300mbar/sec	Fallweise bis 12 bar, >500mbar/sec
Löschmittel	Wasser	Wasser ungeeignet

## Ausserdem zu beachten /Zusammenfassung

- Bei der Ermittlung von Kenndaten ist streng darauf zu achten, dass die geprüften Proben repräsentativ sind für den Prozess. Dabei muss die «Alterung» (=Bildung von Oxidschichten) zwischen Probenahme und Prüfung verhindert werden
- Für die Inertisierung kommen in der Regel nur N<sub>2</sub> oder Ar in Frage
- Bei der Aufhebung der Inertisierung kann es zur Selbstentzündung kommen
- Beim Einsatz konstruktiven Schutzmassnahmen muss darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Schutzsysteme wirklich für Metallstäube mit entsprechend hohen P<sub>max</sub> und K<sub>max</sub>- bzw. K<sub>St</sub>-Werten zertifiziert worden sind (teilweise keine geprüften Systeme erhältlich und Einzelfallbetrachtung erforderlich bzw. Kombination von Schutzsystemen)
- Filtermaterialien in Staubabscheidern müssen ableitfähig und geerdet sein
- Auch Stahl-Strahlstäube aus Filteranlagen können brennbar und staubexplosionsfähig sein und es kann bereits bei Umgebungstemperatur zur Selbstentzündung kommen. Dies ist insbesondere bei Optimierung von Anlagen, Lagerung (z.B. im Keller) und Entsorgung von Strahlstäube zu beachten
- Die Schwere der gezeigten Explosionen war massgeblich durch in Betriebsbereichen, Absaugleitungen und Luftrückführleitungen abgelagerten Staub beeinflusst. Bei den gezeigten Ereignissen kam ein Grossteil der Personen, sich beim Ereignis im Gebäude befunden haben ums Leben. Daher ist es gerade bei Metallstäuben besonders wichtig, dass entsprechende Anlagen- und Betriebsbereiche frei von nennenswerten Staubablagerungen gehalten werden.

# Vielen Dank!

-  11.-12.11.2025 + 13.11.2025 (optional): FireEx ATEX Basisausbildung – Erlernen Sie alle Grundlagen zum Explosionsschutz – mit vielen praktischen Übungen!  
<https://lnkd.in/dbKwDVxg>
-  13.11.2025 : FireEx-Seminar: Konstruktiver Explosionsschutz – Tiefgreifende Einblicke in Explosionsschutzschutzmassnahmen!  
<https://lnkd.in/dFEQq96w>