



issa

INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT | IVSS

Sektion für *Prävention in der chemischen Industrie*
Sektion für *Maschinen- und Systemsicherheit*

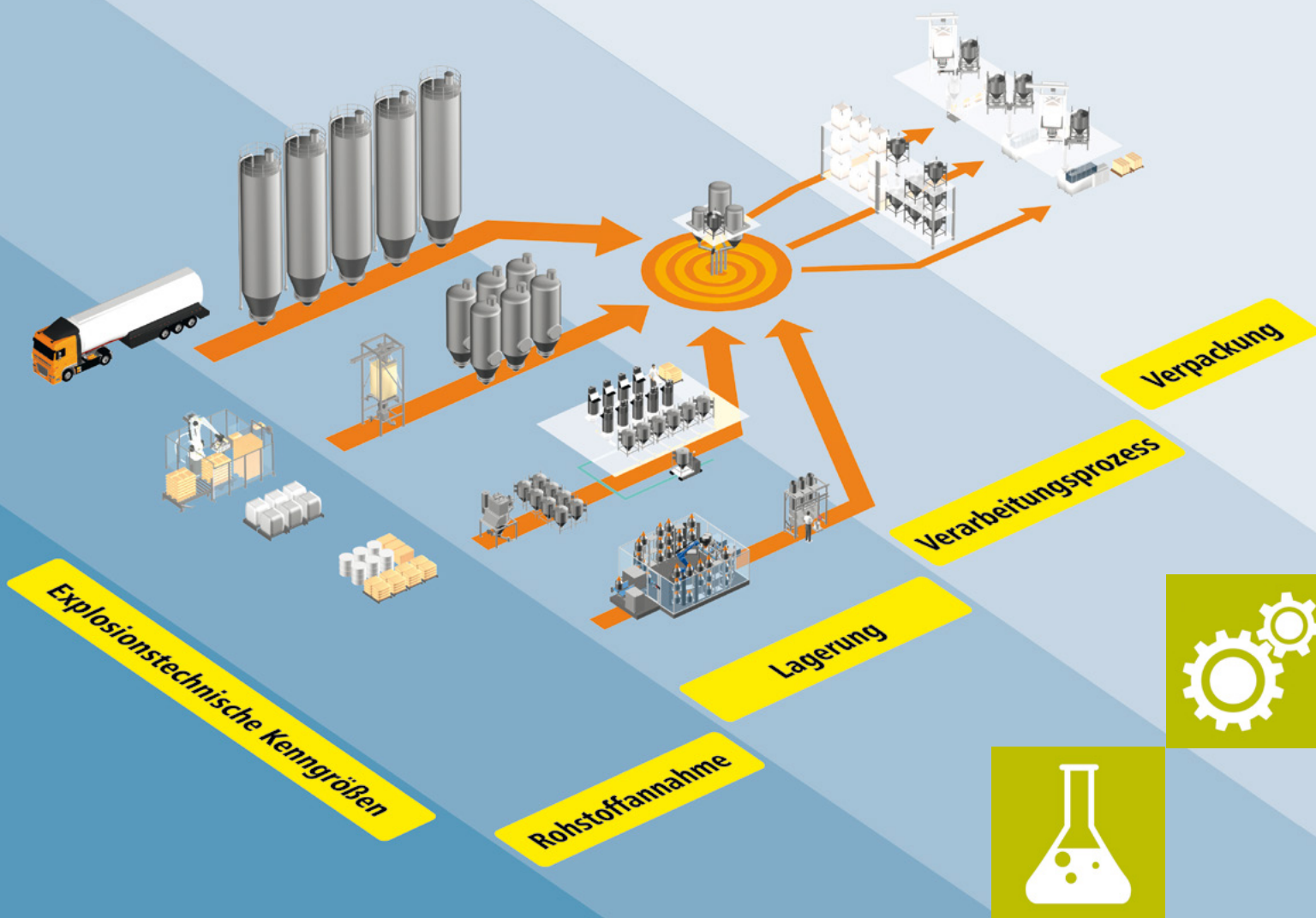


Explosionssicherheit von Schüttgutanlagen

Modul: Lagerung

4/2025

Prozessschritte





IVSS Sektion Maschinen- und Systemsicherheit

Dynamostraße 7–11
68165 Mannheim
Deutschland
Telefon: +49 (0) 621 4456 2213
www.safe-machines-at-work.org
Email: info@ivss.org



IVSS Sektion Chemie

Kurfürstenanlage 62
69115 Heidelberg
Deutschland
Telefon: +49 (0) 6221 5108 11002
ww1.issa.int/de/prevention-chemie
Email: issa.chemistry@bgrci.de

Ausgabe 04/2025
ISBN 978-92-843-8131-9

Copyright © IVSS 2025
Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Genehmigung

Download der Broschüren
<https://safe-machines-at-work.org/explosion-protection>
<https://ww1.issa.int/prevention-chemistry/publications>



Explosionssicherheit von Schüttgutanlagen

Modul: Lagerung

In den Rechtsvorschriften wird sowohl vom Arbeitgeber als auch vom Unternehmer gesprochen. Beide Begriffe sind nicht völlig identisch, weil Unternehmer/innen nicht notwendigerweise Beschäftigte haben. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Thematik ergeben sich daraus keine relevanten Unterschiede, sodass diese Begriffe synonym verwendet werden.

Um die Lesbarkeit zu erleichtern gelten in dieser Broschüre die für die personenbezogenen Bezeichnungen (z. B. Arbeitgeber, Unternehmer) gewählten Formen für beide Geschlechter.

Inhalt

	Vorwort	5
1	Einleitung	6
2	Prozessbeschreibung	9
	2.1 Beispiele für die Silolagerung	9
	2.2 Befüllen der Silos mit Schüttgütern	10
	2.3 Lagern von Schüttgütern	17
	2.4 Entleeren	20
3	Sicherheitstechnische Kenndaten	30
4	Risikoanalyse	32
	4.1 Explosionsrisiko in Silos	32
	4.2 Zoneneinteilung	39
	4.3 Beurteilung der Zündquellen	43
	4.4 Risikobeurteilung	43
	4.5 Schutzmaßnahmen	48
	4.5.1 Vorbeugend	48
	4.5.2 Konstruktiv.....	50
	4.5.3 Organisatorisch	60
	4.5.4 Flankierender Brandschutz.....	60
	4.6 Schnittstellen zu anderen Prozessschritten	63
	Abbildungsverzeichnis.....	66
	Index	68
	Schriftenreihe der IVSS (Explosionsschutz)	73
	Die IVSS	74



Vorwort

Der Einsatz komplexer Systeme/Anlagen erfordert eine geeignete Risikobeurteilung für jedes einzelne Explosionsrisiko.

Für diese IVSS-Broschüren „Modulare Struktur“ wurde ein Konzept erarbeitet, das es erleichtert, die Beurteilung für eine Anlage hinsichtlich des Explosionsrisikos in kleinere Einheiten, sogenannte „Module“ aufzuteilen. Neben einer übersichtlichen Gestaltung ist damit eine gezielte und prozessorientierte Betrachtungsweise möglich. Damit können einzelne Beurteilungen von Maschinen aus den IVSS-Beispielsammlungen „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten“ Teil 1 und Teil 2 und von Prozessen/Modulen aus dieser Serie von IVSS-Broschüren genutzt werden und am Ende miteinander für die Gesamt-Anlagen-Risikobeurteilung verknüpft werden.

Einzelne Prozessschritte oder Maschinen können besser bewertet werden. Am Ende sind nur noch die einzelnen Schnittstellen zu betrachten, um das Gesamtkonzept der Risikobeurteilung zu erhalten.



Thomas Köhler
Präsident der Sektion Chemie



Jürgen Schulin
Präsident der Sektion Maschinen- und Systemsicherheit

1 Einleitung

In dem Prozess-Schritt „Lagerung“ werden brenn- und staubexplosionsfähige Schüttgüter in Hallen, Bunkern und Behältern gelagert. Silos aus Metallen, Beton, Kunststoff oder flexiblen Geweben werden ebenso verwendet.

Ist nichts anderes vermerkt, wird davon ausgegangen, dass das Schüttgut frei von brennbaren Lösemitteln und die Umgebung des Produktes frei von brennbaren Gasen und Dämpfen ist (siehe Modul: sicherheitstechnische Kenngrößen).

Das Modul besteht aus:

- Befüllen von Hallen, Bunkern, Behältern oder Silos mit Schüttgütern
- Be- und Entlüften über Filter
- Lagern in Hallen, Bunkern, Behältern oder Silos
- Messen von Prozessdaten (z. B. Füllstand, Temperatur)
- Austragen von Schüttgütern



Bild 1:
Siloanlage mit Außensilos (AZO GmbH & Co. KG)



Bild 2:
Lagersilo mit Befüllvorrichtung für Silofahrzeuge (AZO GmbH & Co. KG)

Die Lagerung von Schüttgütern ist nicht immer der erste Verfahrensschritt. Daher sind die Produkteigenschaften (einschließlich Explosionskenngrößen) von vorherigen Schritten zu übernehmen. Explosionskenngrößen sollten durch den Lieferanten des Schüttgutes bereitgestellt werden.

Eingangs- und Qualitätskontrolle, klare Identifikation des verwendeten Schüttgutes und dessen Eigenschaften (Grob-/Feinstaub, Fremdkörper, Feuchtigkeit, Glimmnester) sind notwendig.

Schüttgüter können sich durch vorherige Prozessschritte verändern (z. B. durch Abrieb, Temperaturerhöhung, etc.) und damit evtl. mehr Feinstaub enthalten. Auch die Zündempfindlichkeit gegenüber dem davorliegenden Prozessschritt kann sich ändern.



2 Prozessbeschreibung

2.1 Beispiele für die Silolagerung

Zweck von Siloanlagen

In einem Produktionsprozess hergestellte oder verarbeitete Schüttgüter werden oft als Rohstoffe bevorratet, als Zwischenprodukte gepuffert oder als Fertigprodukte gelagert.

Aus dem jeweiligen Lagerbehälter wird das Schüttgut ausgetragen und meist, mittels mechanischer Förderer, dem nachgeschalteten Prozess zugeführt.

Einzelgeräte wie Lagerbehälter, Austrags- und Förderorgane müssen in ihren Eigenschaften dem Schüttgut und den Prozessanforderungen gerecht werden.

Diese Geräte sind verfahrenstechnisch in der Regel aufeinander abgestimmt.

Häufig haben Silozellen große Volumina und/oder eine langgestreckte Form.

Silozellen können im Freien aufgestellt oder Teile von Gebäudekomplexen sein. Sie können mit Füll- und Entleerverfahren eine Einzelanlage darstellen, sie können aber auch in „Batterien“ zusammengefasst sein und durch vielfältige Transport- und Entstaubungseinrichtungen miteinander verbunden sein.



Bild 3:
Außensilo mit verfahrenstechnischer Prozessanlage



Bild 4:
Abscheider mit Druckentlastungsklappe auf
Pufferbehälter



Bild 5:
Silobefüllung über Zyklonabscheider (mit seitlicher
Explosionsdruckentlastung)

Silos und Behälter für Lagerung von Schüttgütern sind in ihrer typischen Konstruktionsweise staubdicht. Filter- und Überdruckventil-Abluft sollten bei Innensilos mit einer Leitung ins Freie geführt oder mittels einer guten Reinigungspraxis sauber und funktionstüchtig gehalten werden. Organisatorische Maßnahmen, wie eine gute Reinigungspraxis, verhindern Staubablagerungen in Gebäuden. Hierdurch kann die Ausweisung einer Zone für explosionsfähige Atmosphäre in der Umgebung der Lagerbehälter vermieden werden (siehe auch 4.5.3 Organisatorische Maßnahmen).

2.2 Befüllen der Silos mit Schüttgütern

Schüttgüter werden z. B. mittels Schwerkraft (aus Abscheidern) oder mit Förderelementen (siehe IVSS Broschüre Beispielsammlung Teil 2 Stetigförderer, Übergabestellen und Empfangsbehälter) in die Behälter/Silos eingebracht.

Das Eintragen von möglichen Zündquellen beim Befüllen aus dem vorgeschalteten Prozess ist zu vermeiden.



Bild 6:
Silobefüllung über
Sackeinfülltrichter
(AZO GmbH & Co. KG)

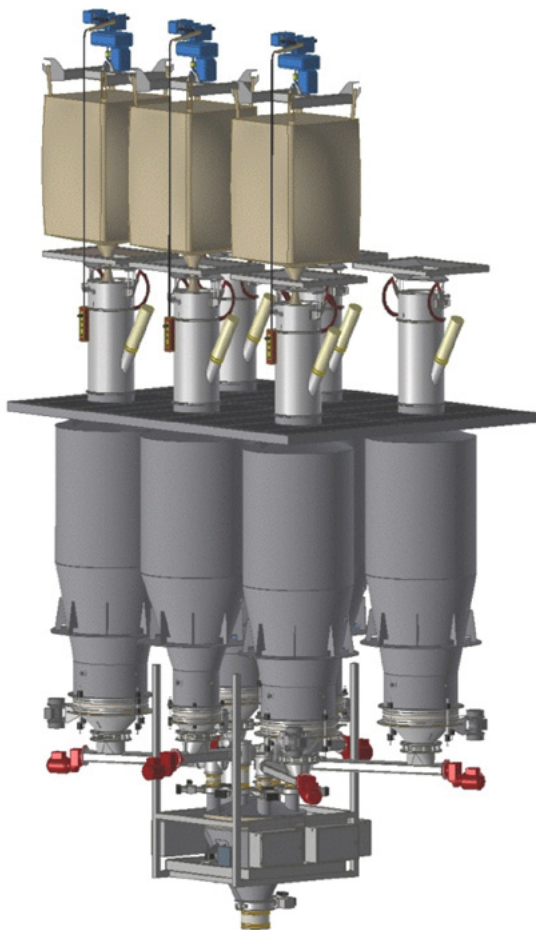


Bild 7:
Silobefüllung aus FIBCs, Entleerung der FIBCs
mittels Schwerkraft (AZO GmbH & Co. KG)



Bild 8:
Silobefüllung über Drehrohrverteiler
(AZO GmbH & Co. KG)

2.2.1. Übergabestellen durch Befüll- einrichtungen

Die mechanischen Beschickungsanlagen in Bild 9 zeichnen sich durch sehr hohe Produktdurchsätze und kleine Antriebsleistungen aus. Sie benötigen allerdings sehr viel Platz und werden bei verzweigten Produktionslinien sehr kompliziert.

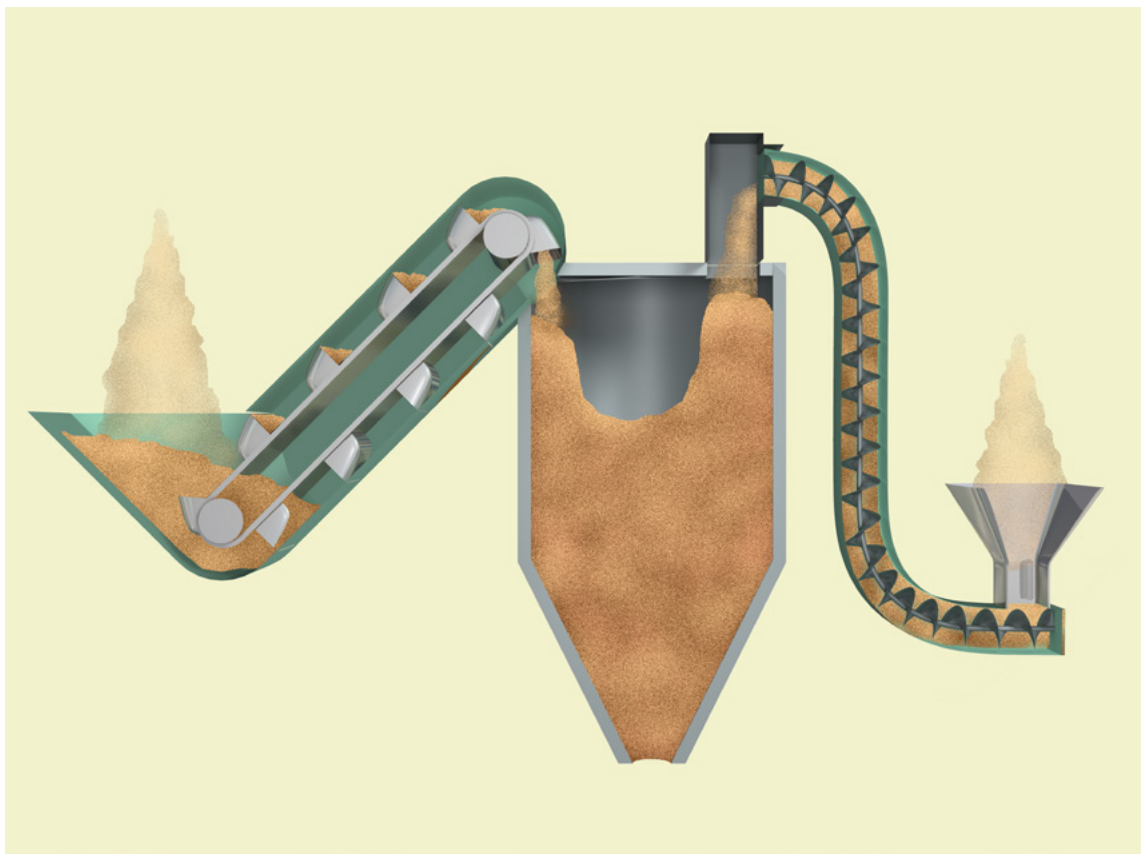


Bild 9:
Systembild zur Verdeutlichung zweier Befüllmethoden
Links: Produkteintrag über ein mechanisches Becherförderwerk,
Rechts: Produkteintrag über eine flexible Schnecke



Pneumatische Förderanlagen sind die am häufigsten eingesetzten Beschickungseinrichtungen. Bei der Schüttgutherstellung kommen dabei die Anordnungen gemäß Bild 10 und 11 in Betracht. Die Förderanlage mit einer Anzahl von Zweige-

Weichen nach Bild 10 gestattet bei relativ eng zusammenstehenden Silos eine einfache Leitungsführung. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Abluftleitungen der einzelnen Behälter miteinander verbunden werden können, so dass nur an einem Silo ein Staubfilter installiert werden muss.

- 1 Ansaugfilter
- 2 Verdichter / Gebläse
- 3 Funkensperre
- 4 Rückschlagklappe
- 5 Einschütt-Trichter
- 6 Filter für Einfülltrichter
- 7 Einfüllöffnung für das Produkt
- 8 Ventilator für Besaugung
- 9 Austragsschleuse
- 10 Förderleitung „Druck“
- 11 Rohrweiche
- 12 Silo
- 13 Silo-EntlüftungsfILTER
- 14 Austragsvorrichtung
- 15 Austragsschleuse
- 16 Saugförderleitung

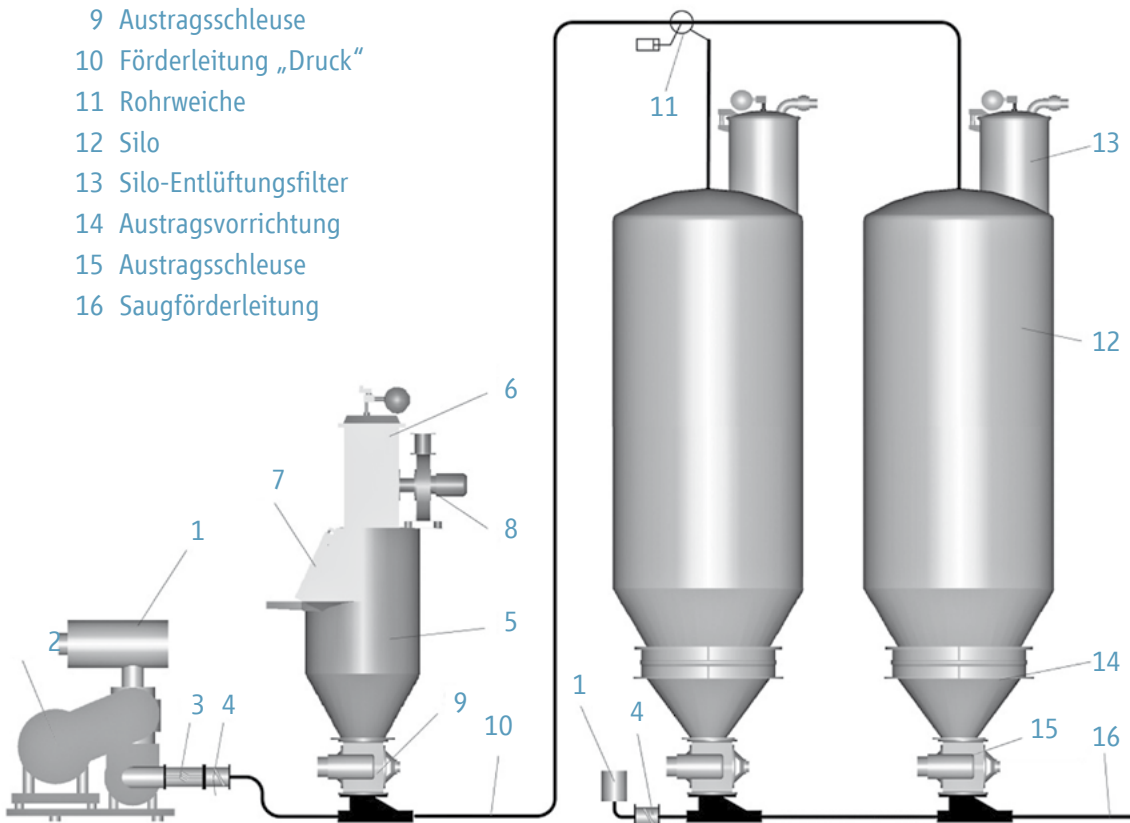


Bild 10:
Beispiel einer pneumatischen Druckförderung für die Befüllung
(Die Entleerung erfolgt über Saugförderung.) (AZO GmbH & Co. KG)

Die pneumatische Druckförderung ist immer dann von Vorteil, wenn von einer Aufgabestelle aus mehrere Empfangsbehälter befüllt werden sollen.

Die in Bild 11 dargestellte Saugförderanlage benötigt nur ein Sauggebläse, um das Schüttgut von mehreren Silos auf eine Abgabestelle zu transportieren.

Bevorzugt sollten leitfähige Rohrleitungen verwendet werden. Wenn flexible Leitungen (z. B. Schläuche aus Kunststoff oder Gummi) eingesetzt werden, müssen diese den einschlägigen Anforderungen bezüglich Ableitfähigkeit (In Deutschland: TRGS 727) entsprechen.

- 1 Ansaugfilter
- 2 Rückschlagklappe
- 3 Rohrweiche
- 4 Silo
- 5 Silo-Entlüftungsfilter
- 6 Austragsvorrichtung
- 7 Austragsschleuse
- 8 Saugförderleitung
- 9 Filternder Abscheider
- 10 Filter
- 11 Reinluftleitung
- 12 Sekundärfilter
- 13 Vakuumpumpe
- 14 Abschlussklappe
- 15 Mischer

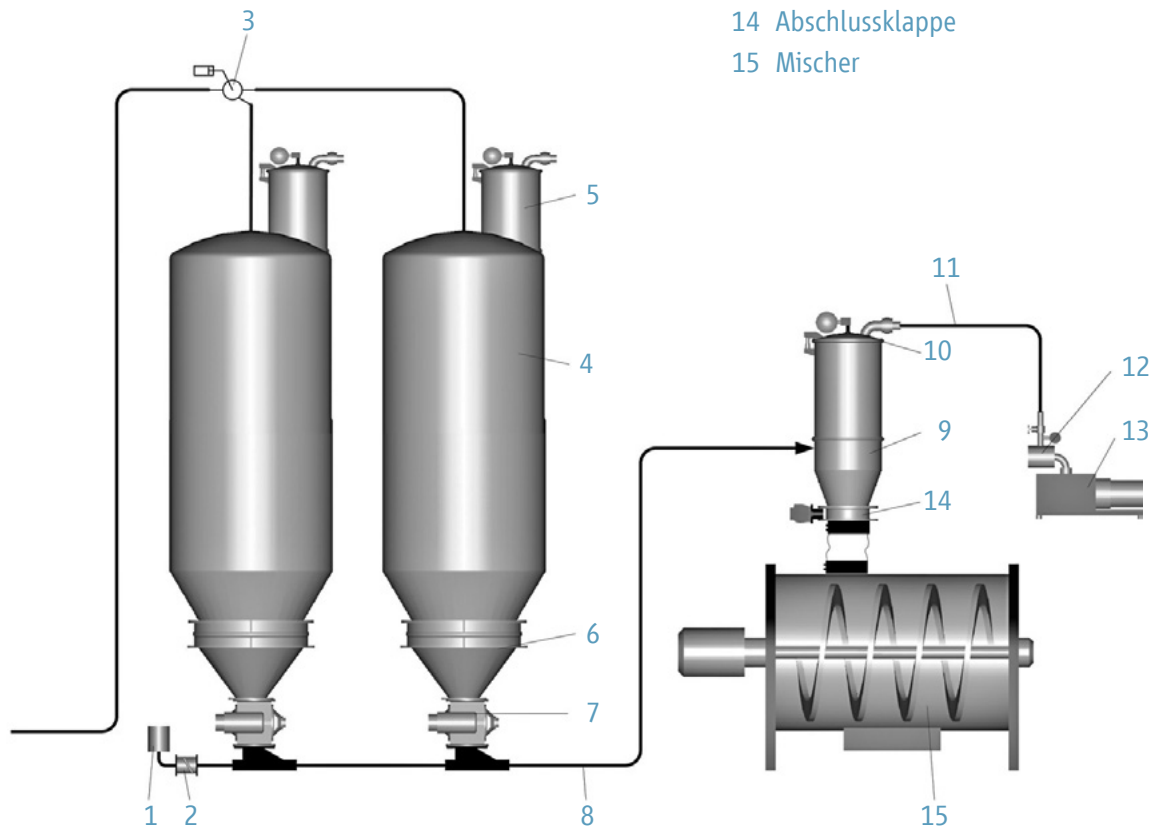


Bild 11:
Beispiel einer pneumatischen Saugförderung. (AZO GmbH & Co. KG)



Die nachfolgenden Bilder 11, 12 und 13 zeigen Praxisbeispiele bei denen aus Silofahrzeugen stationäre Silos mittels pneumatischer Druckförderung befüllt werden.

Silos oder Behälter werden bei der pneumatischen Druckförderung in der Regel durch Rohrleitungen NW 80 bis 100 entweder aus Silo-LKW mit eigenen Kompressoren, durch stationäre Gebläse oder Sendergefäße befüllt. Erdung des Silofahrzeuges ist zwingend erforderlich.



Bild 13:
Silofahrzeug in Kippstellung zur Befüllung der Lagersilos. (AZO GmbH & Co. KG)



Bild 12 :
Silofahrzeug angeschlossen an Befüllleitungen der Lagersilos. (AZO GmbH & Co. KG)



Bild 14:
Stationäres Gebläse mit integrierter Funksperre und nachgeschaltetem Kühler zur Aufbereitung der Förderluft. (AZO GmbH & Co. KG)

Um Selbstentzündung zu vermeiden sind Lüftungs- und Kühlaggregate notwendig (siehe auch Bild 14).

Bei runden Behältern wird die Füllleitung in den meisten Fällen tangential knapp unterhalb des Dachabschlusses eingeführt, womit ein rotationsförmiger Materialeintritt mit „vorabscheidender“ Wirkung verbunden ist.

Nachteilig ist bei dieser Art des Befüllens, dass die Silo- oder Behälterwand selbst direktem Verschleiß ausgesetzt wird, dem nur dadurch begegnet werden kann, dass entsprechende Verschleißplatten eingebaut werden. Die Auswechslung dieser Platten ist allerdings sehr zeit- und kostenaufwendig.

Wesentlich zweckmäßiger ist es, auf der Silodecke, z. B. auch bei eckigen Behältern oder Mehrkammersilos, einen sogenannten Einblasdom zu montieren, der in wartungstechnischer Hinsicht

entschieden einfacher zu handhaben ist. Ein solcher Einblasdom hat typischerweise einen Durchmesser von etwa 600 - 800 mm bei entsprechender Bauhöhe.

Die Montage eines Einblasdoms auf der Silodecke hat den großen Vorteil einer relativ geringen Luft-, Material- und Austrittsgeschwindigkeit in den Behälter. Wesentlich reduziert wird damit auch die Turbulenz im oberen Teil des Silos und damit die Staubbeladung für ein aufgesetztes Filter. Im Falle einer Explosion reduzieren diese Einflüsse die Explosionsheftigkeit erheblich.



Bild 15:
Silo Be- und Entlüftungsfiler als Spülluftfilter ausgeführt (A, B: Schlauchfilter, C: Taschenfilter)
(A, B: AZO GmbH & Co. KG, C: WAM GmbH)



Beim pneumatischen Befüllen von Silos werden die Abluftfilter mit zunehmendem Staubgehalt und abnehmender Korngröße sehr stark belastet. Die Dimensionierung der Entlüftungsfilteranlage ist abhängig von:

- der Förderluftmenge,
- den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Produktes,
- dem Tankwagenvolumen,
- dem sogenannten Endsfall und
- der Anordnung und Länge der Füllleitung

Für Silo- oder Lagerbehälterentlüftungen kommen Filter mit mechanisch/motorischer wie auch druckluftabreinigender Technik in Betracht.

2.3 Lagern von Schüttgütern

Für das Lagern von Schüttgütern kommen einzelne geschlossene Behälter und Silos als auch offene und geschlossene Lagerhallen zum Einsatz. Die nachfolgenden Bilder (Bild 16) stellen eine Übersicht möglicher Lagerzellen dar.



17



Bild 16:

Geschlossene Lagerbehälter aus unterschiedlichen Wandmaterialien

A: Außensilos Aluminium/Edelstahl B: Innensilos Edelstahl C: Innensilos flexibel
(AZO GmbH & Co. KG)



Bild 17:
Flachbodensilos mit integrierten Ausräumschnecken

Die Ausräumschnecke darf beim Befüllvorgang nicht betrieben werden. Sie muss sicherheitstechnisch verriegelt sein. Im Fehlerfall kann es durch innenliegende Lager zu heißen Oberflächen kommen. Diese stellen eine potenzielle Zündquelle dar, die in der Folge zu einem Brand oder einer Explosion führen kann.

Umlagerung von Schüttgütern ist evtl. erforderlich, wenn die Schüttgüter z. B. zu einer Zeitverfestigung oder zu einer Selbsterwärmung neigen. Anbackungen und Brückenbildung werden durch Umlagern verhindert, die Selbsterwärmung signifikant vermindert.

Bei offenem Schüttgutumschlag ist mit verstärkter Staubwolkenbildung zu rechnen. Bei brennbaren Schüttgütern müssen explosionsgeschützte Beschickungs- und Entladegeräte verwendet werden.



19

Bild 18:
Halle mit loser Lagerung



Bild 19:
Staubwolkenbildung bei offenem Schüttgutumschlag

2.4 Entleeren

2.4.1 Funktionsbeschreibung

Die Schüttgüter werden von oben ins Silo eingebracht. Sie füllen den Siloraum von unten nach oben bis zum Vollmelder komplett auf. Der Vollmelder verhindert ein Überfüllen des Silos. Die verdrängte Luft und die evtl. von pneumatischer Förderung eingebrachte Luft entweicht gereinigt über das Filter.

Schüttgüter haben unterschiedliche Fließeigenschaften, die mit dem ff_c -Wert ($ff_c < 1$ nicht fließend, bis $ff_c > 10$ freifließend) angegeben werden und die sich in unterschiedlichen Fließprofilen (Massenfluss oder Kernfluss) darstellen lassen (siehe Bild 22).

Das Bestimmen des ff_c -Wertes erfolgt durch Scherversuche nach dem Prinzip von A. W. Jenike mit Messungen der Druckfestigkeit σ_c über der jeweiligen Verfestigungsspannung σ_1 (siehe Bild 20).

Basierend auf den Ergebnissen der Scherversuche werden die erforderlichen Silogeometrien (Konuswinkel, Auslaufdurchmesser etc.) festgelegt.

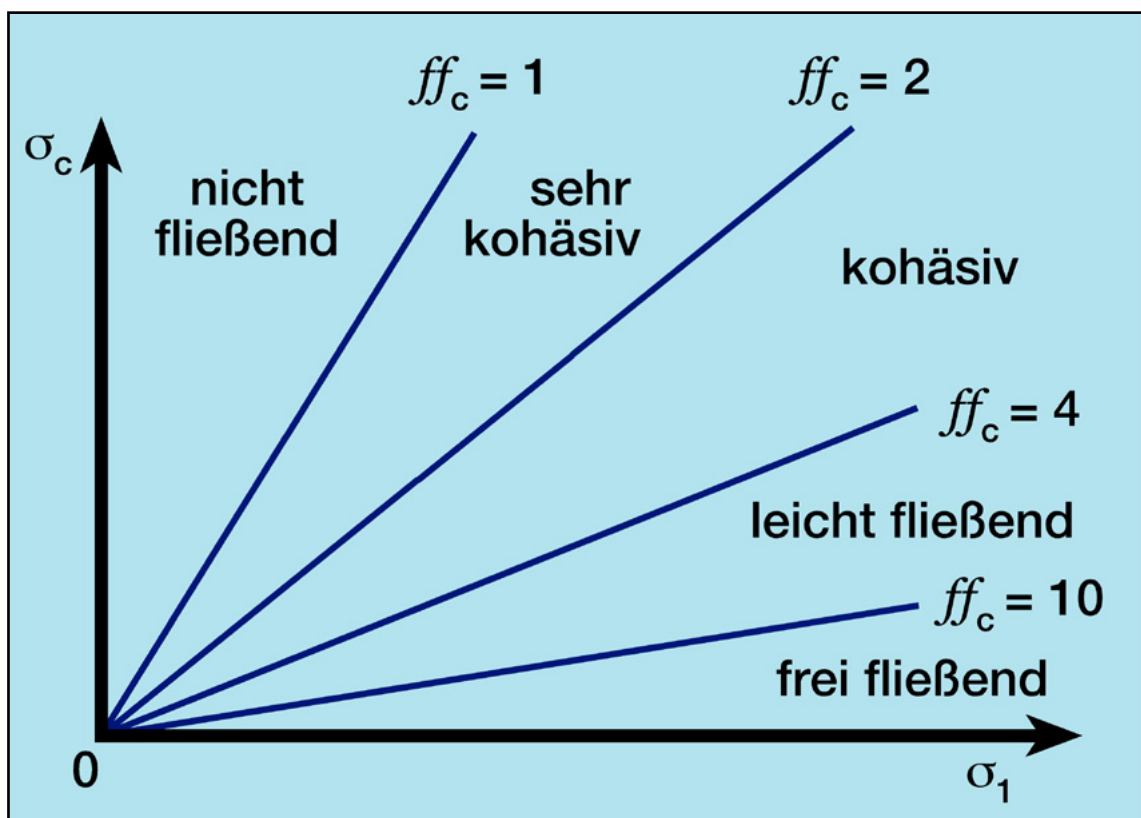


Bild 20:
Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeit ff_c im σ_c , σ_1 -Diagramm



Schüttgut	Schüttdichte (kg/l)	Fließfähigkeitsfaktor ff_c
Maisstärke	0,64	10
Cellulose	0,32	3
Malzstaub	0,22	6
Puderzucker	0,60	2
Milchpulver	0,56	4
Holzmehl	0,23	5
Weizenmehl	0,54	3
Kristallzucker	0,85	9
Getreide	0,70	11

Bild 21:
Fließfähigkeitsfaktor ff_c für typische Schüttgüter

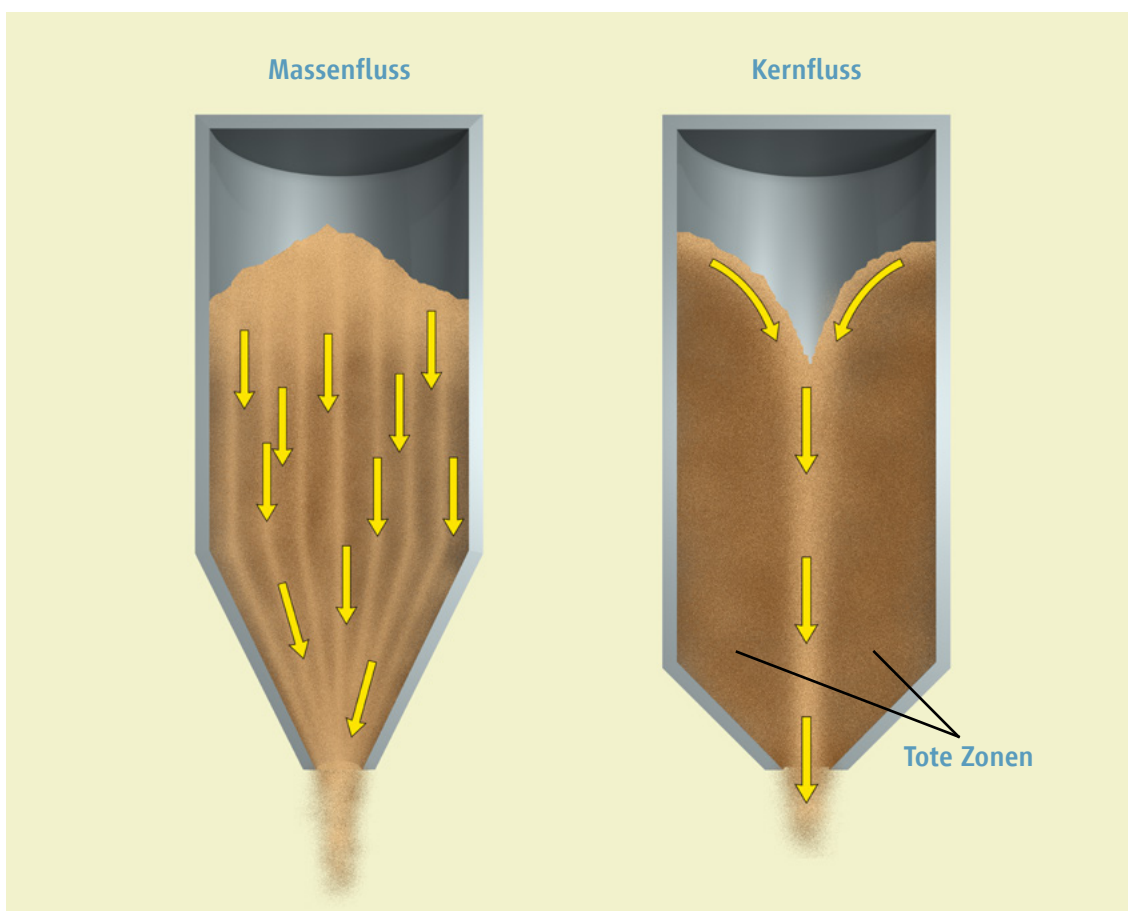


Bild 22:
Fließprofile von Schüttgütern

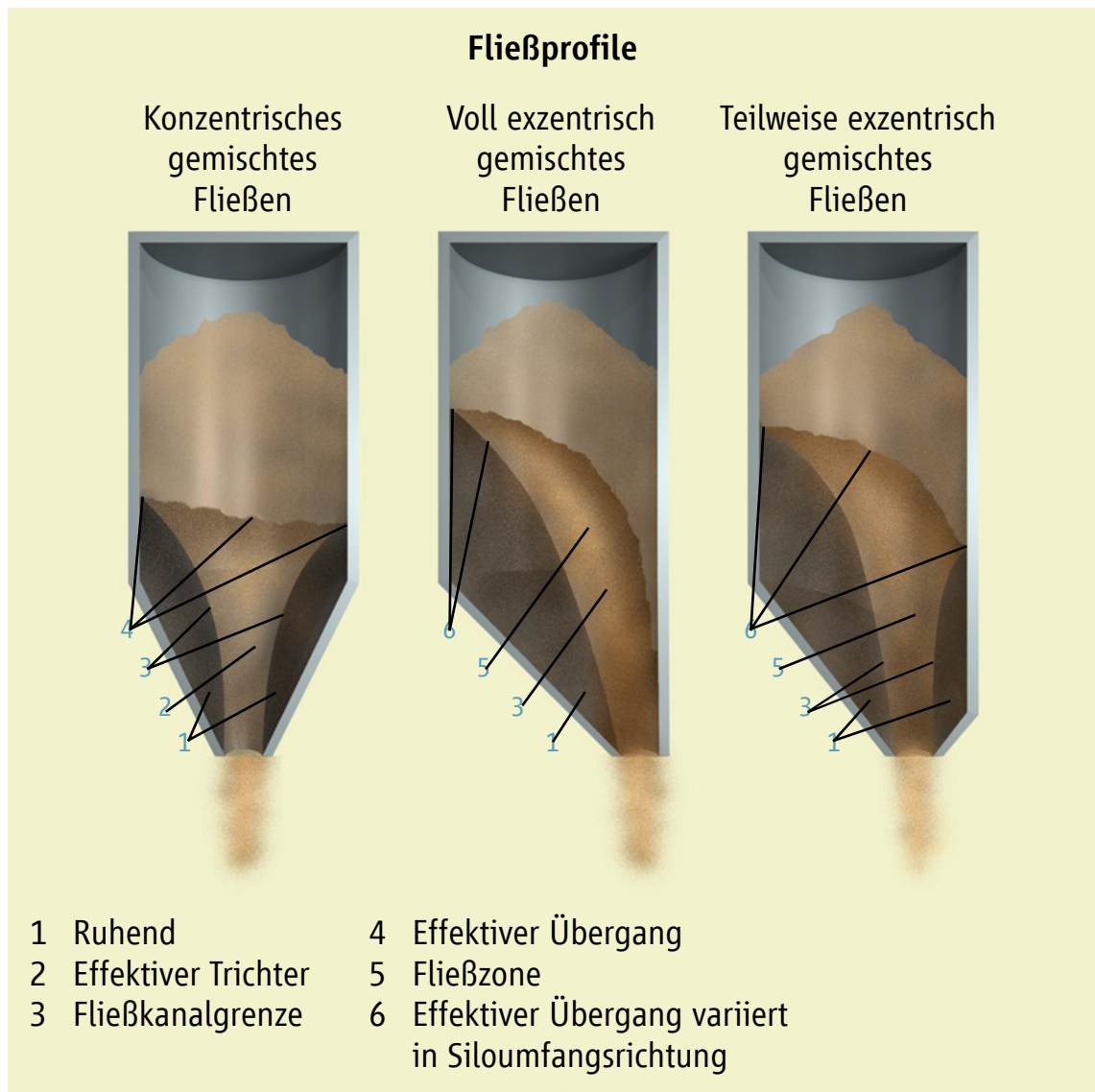


Bild 23:
Fließbilder von schlecht fließenden Schüttgütern

Bei schlecht fließenden Schüttgütern (z. B. kohäsive, Feuchtigkeit enthaltende oder sehr unterschiedliche Korngrößenverteilungen aufweisende Schüttgüter), können negative Fließsituationen in Form von Brückenbildung oder Schachtbildung (siehe Bild 23) während des Austragens entstehen.

Insbesondere in toten Zonen besteht, bei Produkten, die zur Selbstentzündung neigen, die Gefahr des Erwärms mit anschließender Selbstentzündung.

Bei Kernfluss- bzw. Schachtbildung ist eine explosionstechnische Entkopplung durch die Maßnahme „Produktvorlage“ nicht geeignet.



2.4.2. Übergabestellen Austragung



Bild 24:
A): Siloentleerung über ein Verladeteleskop
(AZO GmbH & Co. KG)



B): Verladeteleskop im Detail

Entleer- und Verladeeinrichtungen

Für die hier dargestellten Entleer- und Verladeeinrichtungen können deren Explosionsrisiken der Broschüre „Beispielsammlung, Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten, Teil 2“ entnommen werden. Auch die Maßnahmen zum Vermeiden von Explosionsrisiken finden sich in dieser Broschüre.

Das Austragen mittels Schwerkraft, gemäß Bild 24, wird vorwiegend zum Befüllen von Silofahrzeugen benutzt.

Zum Füllen von Silofahrzeugen werden in Europa fast ausschließlich die sog. Verladeteleskope nach Bild 24 verwendet, mit denen Höhendifferenzen der einzelnen Silofahrzeuge bis ca. 1 m ausgeglichen werden können.

Schneckendosierer (siehe Bild 25 und Bild 27) sowie Vibrationsförderer (siehe Bild 26) werden eingesetzt, wenn ein definierter Schüttgutstrom ausgetragen werden muss.



Bild 25:
Schneckendosierer (links: AZO GmbH & Co. KG)

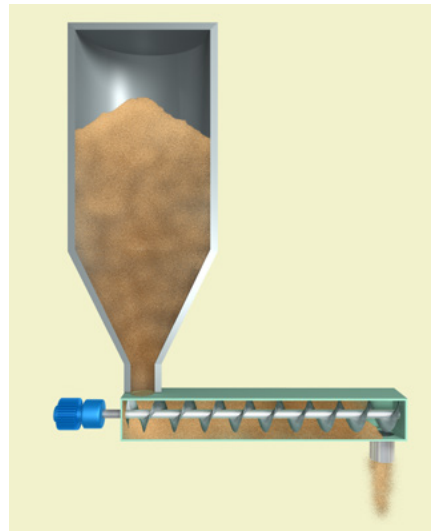
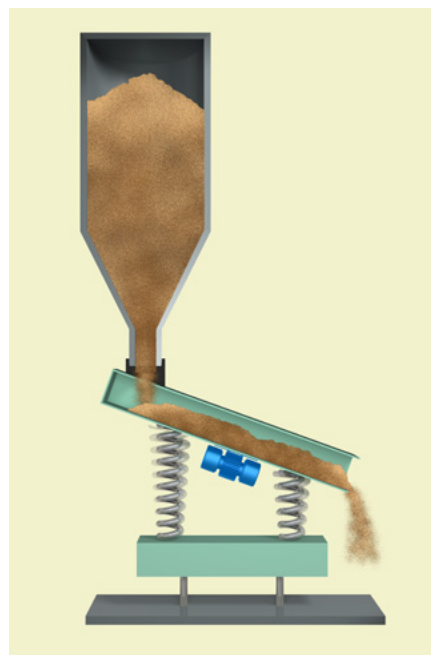


Bild 26:
Siloentleerung über eine Vibrationsrinne
(links: AZO GmbH & Co. KG)



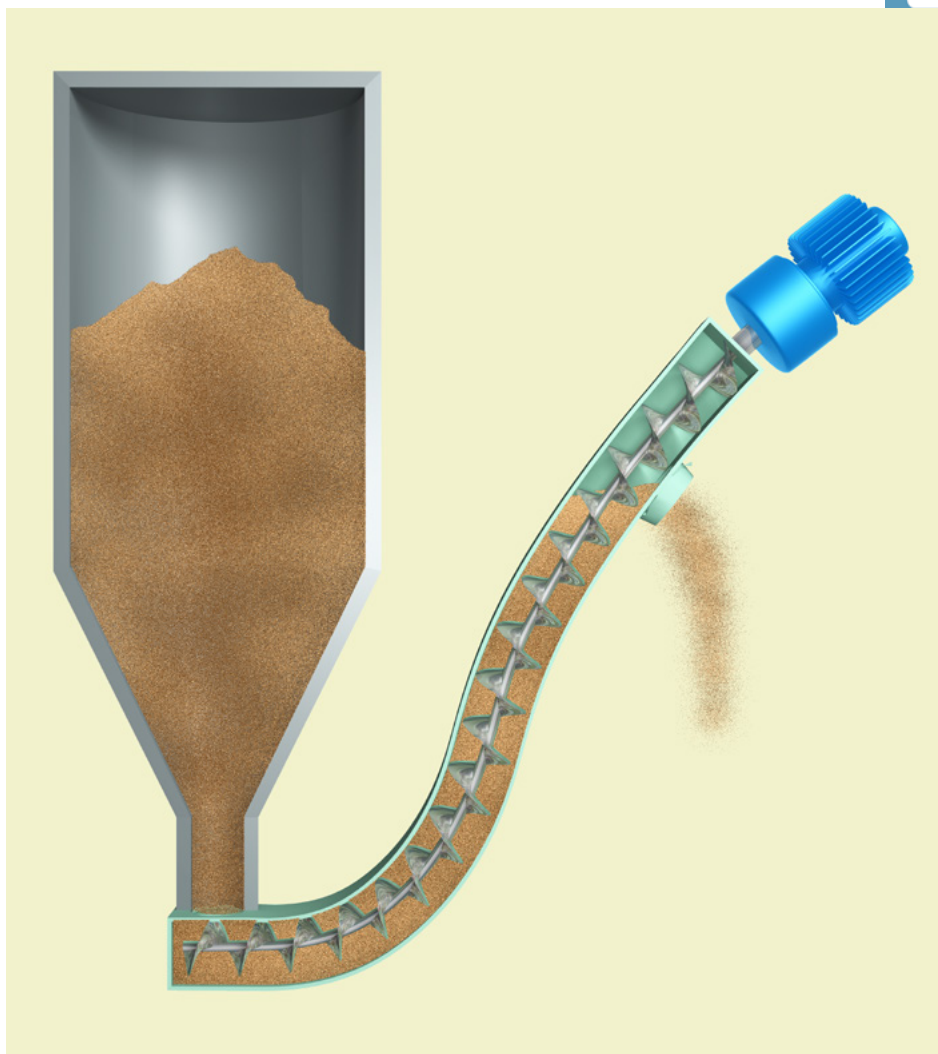


Bild 27:
Siloentleerung mittels flexibler Schrägschnecke

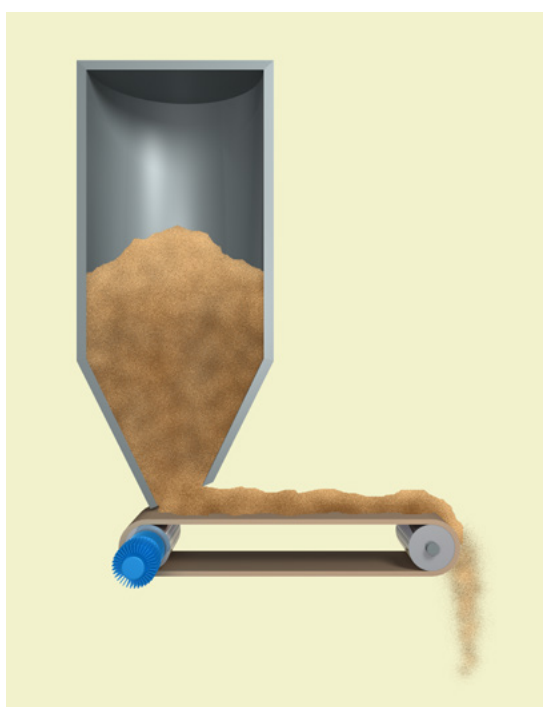


Bild 28:
Bandförderer zum Transport großer Produktmengen über weite Strecken

Die in Bild 28 und Bild 29 dargestellten Gurtbandförderer und Trogkettenförderer kommen zum Einsatz, wenn sehr große Produktdurchsätze über weite Strecken transportiert werden müssen.



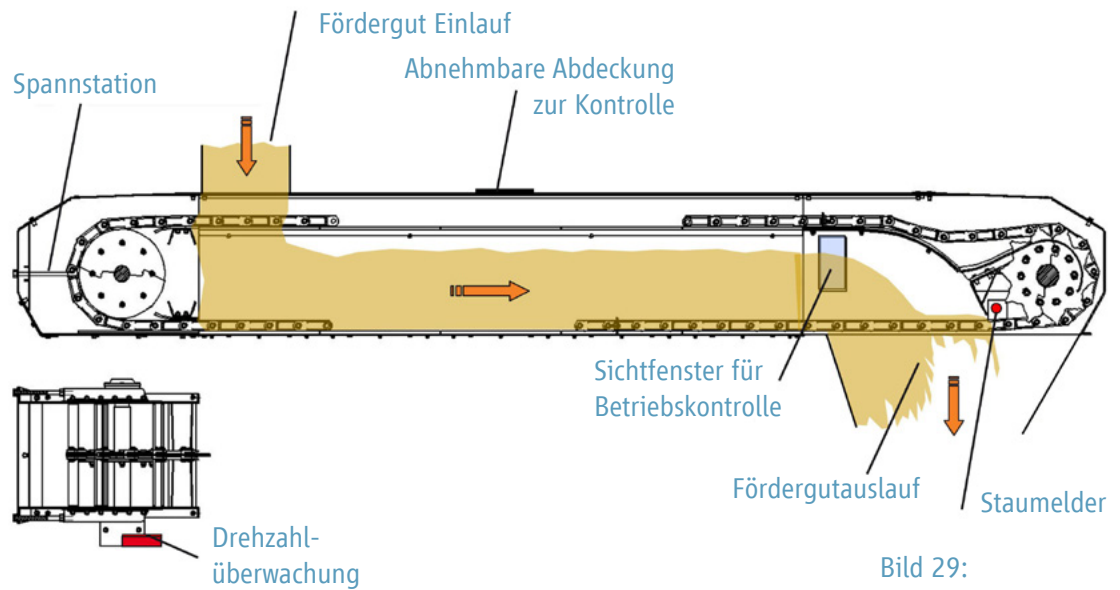


Bild 29:
Schema eines Trogkettenförderers

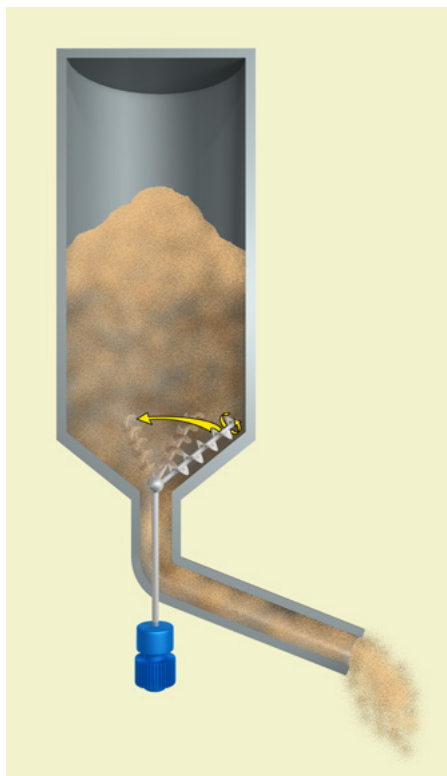
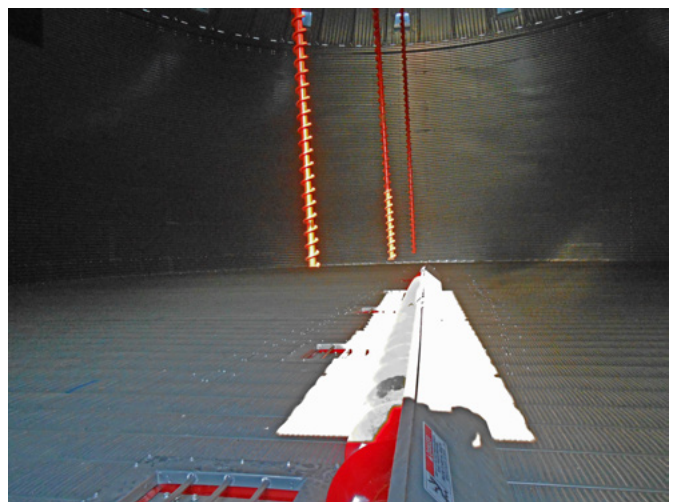


Bild 30:
Ausräumschnecken



Manchmal werden bei sehr schwach geneigten Siloböden oder auch bei Flachbodensilos mit großen Durchmessern Räum- bzw. Ausräumschnecken (siehe Bild 30) eingesetzt.



Zur Vermeidung von Zündquellen müssen beim Füllvorgang die vertikalen Ausräumschnecken ausgeschaltet sein. Die horizontale Schnecke darf nur laufen, wenn sie mit ausreichend Produkt bedeckt ist.

Die wohl am häufigsten verwendete Entleereinrichtung ist die Zellenradschleuse (siehe Bild 31) bei der die umlaufenden Kammern vom Silo aus durch Schwerkrafteinwirkung befüllt und auf der Austragsseite entleert werden.



Bild 31:
Siloreihe mit Austragung in pneumatische Förderleitungen mittels Zellenradschleuse (AZO GmbH & Co. KG)

Pneumatische Siloentleereinrichtungen

Stehen die zu entleerenden Behälter in einer Reihe dicht zusammen, kann man eine gemeinsame, pneumatische Entleerleitung unter allen Austragsöffnungen verlegen und das Einspeisen des Schüttgutes wechselweise von Silo zu Silo über Zellenradschleusen steuern.

Stehen die zu entleerenden Silos relativ weit auseinander, dann empfiehlt sich die im Druckbetrieb arbeitende, pneumatische Förderanlage

(siehe Bilder 10 und 11). Nachteilig ist jedoch, dass für jeden Förderstrang ein eigener Luftverdichter erforderlich ist. Dieser Nachteil kann durch die Installation einer Saugförderanlage vermieden werden.

Bei Förderstrecken bis zu ca. 30 m und Schüttgütern mit Korngröße zwischen ungefähr 20 und 500 µm können auch Fließbrinnen zum Entleeren der Silos eingesetzt werden.

Austragshilfen für schwerfließende Schüttgüter

Viele Schüttgüter mit Korngrößen unter ca. 10 µm sowie grobe, faserige Produkte neigen in Silos zur Brückenbildung.

Der kleinstmögliche Durchmesser eines Siloauslaufs, bei dem ein störungsfreies Entleeren ohne Brückenbildung möglich ist, wird kritischer Durchmesser genannt. Muss der Silokonus auf einen kleineren Durchmesser gezogen werden, sind Austragshilfen erforderlich, von denen die wichtigsten in den folgenden Abbildungen zusammengestellt sind.

Die Vibrationsböden (siehe Bild 32) sind sehr verbreitet, haben aber den Nachteil, dass sie das im Silo befindliche Schüttgut zusätzlich verdichten können, sollte die nachträglich angeordnete Austragsvorrichtung nicht richtig dimensioniert sein.

Beim Vibrationsrost werden nur unwesentliche Vertikalkräfte in die Schüttung übertragen. Die Verdichtung ist daher zu vernachlässigen.



Bild 32:
Siloaustragung mit Vibrationsboden und Zellenradschleuse (AZO GmbH & Co. KG)

Bei den pneumatischen Austragshilfen wird Luft (siehe Bild 33) kontinuierlich über poröse Platten oder stoßweise durch den Auslaufkonus in das Schüttgut geleitet.

Bei den „Luftkanonen“ wird eine komprimierte Luftmenge aus kleinen Vorratsbehältern schlagartig in das Silo entspannt.



Bild 33:
Belüftungsboden (AZO GmbH & Co. KG)

Eine weitere Austragshilfe ist die Austragsschnecke. Unter einem Silo mit exakt berechnetem Schlitzauslauf lässt sie keine Brückenbildung zu. Die meisten Schüttgüter lassen sich einwandfrei entleeren, vorausgesetzt die Schüttguteigenschaften wurden beim Festlegen des Neigungswinkels des Konus genügend berücksichtigt.

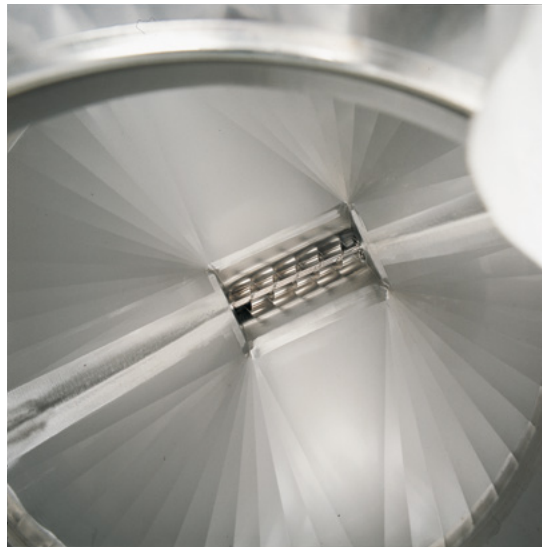
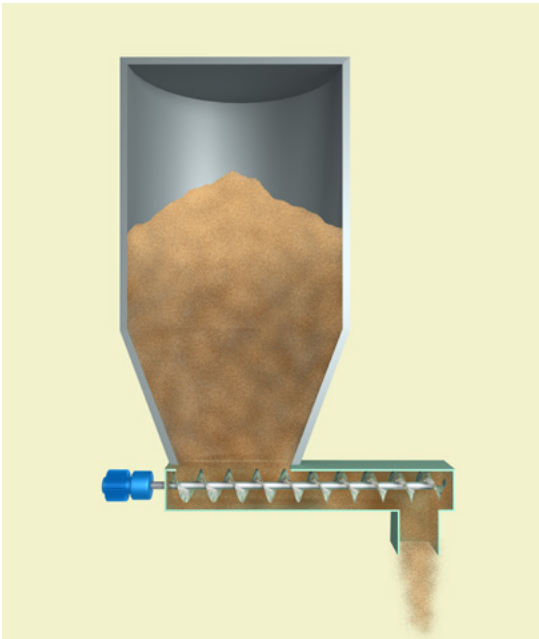


Bild 34:
Silokonus mit waagerechter Räumschnecke (rechts: AZO GmbH & Co. KG)

In der Regel müssen für ein bestimmtes Schutzkonzept bzw. eine sichere Auslegung von Silos nicht alle Kenngrößen bestimmt werden. Es bedarf allerdings etwas Erfahrung welche Kenngrößen erforderlich und wie diese richtig anzuwenden sind.

Sicherheitstechnische Kenngrößen von Stäuben sind sehr von der Beschaffenheit des Staubes, wie Partikelgrößenverteilung, Partikelform, Feuchte sowie Zusammensetzung, abhängig. Daten, die nicht explizit von einer repräsentativen Probe des gehandhabten Produktes generiert wurden, sind nur mit Vorsicht zu verwenden. Dies gilt insbesondere für Daten aus Sicherheitsdatenblättern oder Datenbanken, bei denen Informationen zum Produkt in der Regel nicht detailliert ausgeführt werden.

Neben der Korngröße, die u. a. von Zerkleinerungsprozessen und anderen mechanischen Beanspruchungen abhängig ist, können klimatische Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Produktfeuchte, eine wesentliche Rolle spielen.

Mit zunehmender Produktfeuchte muss mehr Wärmeenergie für das Verdampfen des Wassers im Produkt aufgebracht werden. Ein Reduzieren der Verbrennungsgeschwindigkeit und damit im Explosionsfall des zeitlichen Druckanstiegs ist die Folge. Für die Praxis besonders bedeutsam ist jedoch das damit verbundene Anheben der Zündtemperatur und der Mindestzündenergie, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer Entzündung reduziert wird. Ein weiterer Effekt der höheren Produktfeuchte besteht in der schlechteren „Aufwirbelfähigkeit“ des Staubes und damit einer geringeren Ausbreitung explosionsfähiger Staubwolken. Auf der anderen Seite können höhere Feuchtegehalte bei organischen Stäuben auch zu einem kritischeren Selbstentzündungsverhalten führen.

Im Folgenden findet sich eine Übersicht welche Kenngrößen in der Regel für welche Schutzkonzepte benötigt werden.



Vorbeugender Explosionsschutz	
Maßnahmen	Erforderliche Kenngröße
Vermeiden brennbarer Stäube	Brennverhalten/Brennzahl, Explosionsfähigkeit, Korngrößenverteilung, Feuchte
Konzentrationsbegrenzung	Untere Explosionsgrenze, Staubungsneigung
Inertisieren	Sauerstoffgrenzkonzentration, Explosionsfähigkeit (bei Feststoffinertisierung)
Vermeiden von Zündquellen (Abhängig von der Staubart und den Prozessbedingungen sind nicht immer alle aufgeführten Kenngrößen erforderlich)	Mindestzündenergie, Mindestzündtemperatur, einer Staubschicht (Glimmtemperatur), Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur), Selbstentzündungsverhalten, exotherme Zersetzung, Schwelpunkt, Brennzahl Schüttgutwiderstand

Konstruktiver Explosionsschutz	
Maßnahmen	Erforderliche Kenngröße
Explosionsfeste Bauweise	Maximaler Explosionsüberdruck
Explosionsdruckentlastung	K_{st} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck
Explosionsunterdrückung	K_{st} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck, Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur)
Explosionstechnische Entkopplung	K_{st} -Wert und maximaler Explosionsüberdruck, Mindestzündtemperatur einer Staubwolke (Zündtemperatur)

Weiterführende Informationen über die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind dem Modul „Sicherheitstechnische Kenngrößen von Stäuben“ zu entnehmen.

4.1 Explosionsrisiko in Silos

Explosionen in Silozellen können nach verschiedenen Mustern ablaufen. Sie hängen ab von den Kenndaten der Stäube, vom Ort der Zündung, von der Verteilung der Staubkonzentration innerhalb der Zelle, vom Füllstand, vom Füllverfahren, von der Art der Entlastungseinrichtungen und vom Höhen/Durchmesser-Verhältnis der Silozellen.

Wichtig für die Auswahl und die Auslegung von Schutzmaßnahmen ist auch die Beurteilung, ob eine Explosion über Fördereinrichtungen oder Aspirationsleitungen eingetragen werden kann. Bei einer Zündung im Bereich der Füllöffnungen der Silozelle ist die Flammenausbreitung in das Siloinnere hinein sehr stark von der Staub/Luft-Konzentration abhängig.

Wird eine Silozelle nur teilweise mit Staub/Luft-Gemisch ausgefüllt - bleibt die Staubwolke z. B. auf weniger als 1/4 des unteren Silobereiches begrenzt - dann sind Druck und Druckanstiegsgeschwindigkeit bei einer Zündung im Siloauslauf deutlich geringer, als wenn sich die Staubwolke über das ganze Volumen ausgebreitet hat.

Hat der Füllvorgang begonnen breitet sich nicht nur die Staubwolke aus. Zudem steigt die Schüttung und das freie Volumen verringert sich. Zwangsläufig wird bei konstanter Druckentlastungsfläche der reduzierte Explosionsdruck immer geringer.

Dabei spielen zwei Einflussfaktoren eine bedeutende Rolle, nämlich die Volumenverkleinerung und die Änderung des Höhen/Durchmesser-Verhältnisses.

Bei Füllvorgängen in der Praxis hat man es oft mit Mechanismen der Staubwolkenerzeugung zu tun, bei denen die Konzentrationen der Staubwolken „inhomogen“ verteilt sind. Dies beeinflusst den Explosionsdruck.

Versuche haben gezeigt, dass die Explosionsabläufe ganz deutlich von der Füllmethode beeinflusst werden.

Explosionsversuche, bei denen das Silo über Zyklon oder Zellenradschleuse durch Fallrohre befüllt wurde, haben gezeigt, dass gegenüber der pneumatischen Flugförderung eine deutliche Minderung der Explosionsheftigkeit eintritt. Beim pneumatischen Befüllen kann das Bilden von Staubwolken durch tangentialen Förderleitungseintritt verringert und damit auch die Explosionsheftigkeit reduziert werden.

Beim Silieren von Getreide mit geringem Feinstaubanteil wird die untere Explosionsgrenze selten erreicht. Die daraus resultierenden Explosionsdrücke im Falle einer Explosion fallen deutlich niedriger aus. Teilweise ist keine Explosion mehr möglich.

Die Bildungsmechanismen von Staubwolken bei Füllvorgängen haben auch Konsequenzen für die Zoneneinteilung. Die Staubwolken-Charakteristik ist dabei abhängig von den Staubeigenschaften eines Produkts und den Methoden der Staubwolkenbildung (z. B. Füllmethoden). Die Unterschiede zeigen sich in Homogenitäten und Inhomogenitäten, Konzentration und Turbulenzen der Staubwolken.

Die Staubeigenschaften und das Sedimentationsverhalten bestimmen die Staubwolkenbildung und Dauer der explosionsfähigen Phase. Dies hat Einfluss auf

- die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung im Sinne der Zonendefinition (Zoneneinteilung),
 - die Auswahl und Zuordnung von Explosionsschutzmaßnahmen,
 - die Explosionsabläufe (unterschiedliche Explosionsdrücke und Druckanstiegsgeschwindigkeiten, Dimensionierung der Entlastungsflächen)
 - die Explosionsauswirkungen
- und ist nachfolgend maßgebend für das Explosionsrisiko verantwortlich.



Explosionsgefahren

Beim Befüllen von Silos besteht die Gefahr des Entzündens eines eventuell vorhandenen Staub/Luft-Gemisches durch z. B. eingeschleppte Glimmnester, Entladungen statischer Elektrizität, mechanische Zündquellen oder Explosionsübertragungen.

Auch beim Entleeren, z. B. durch Einstürzen von Schüttgutbrücken in Verbindung mit Schwel-/Glimmbränden, besteht Explosionsgefahr.

Silozellen können bei entsprechenden Schüttguteigenschaften und Selbstentzündungsprozessen bei längerer Lagerung durch einen nachfolgenden Brand gefährdet sein. Die heute üblichen Methoden zum Bekämpfen von Bränden und möglicher Folgeexplosionen durch Inertisieren erfordern Öffnungen bzw. Anschlussstutzen am Silo.

Für den Ernstfall sind entsprechende Notfallpläne auszuarbeiten und den Mitarbeitern durch Unterweisung zu vermitteln (siehe auch Kapitel 4.5.3).

Weitere mögliche Schutzmaßnahmen sind:

- Brand- und Temperaturüberwachung
- Erdung
- Vermeiden von zündwirksamen Schüttkegelentladungen
- Notfallmanagement
- Inertisierungsmöglichkeit im Brandfall mit Anschluss am Siloauslauftrichter und den anschließenden Trogkettenförderern
- Druckentlastung, wird typischerweise eingesetzt zum Schutz von großen Silos. Bei kleineren Silos sind auch druckfeste Bauweise oder Explosionsunterdrückung möglich.
- Für besonders zündempfindliche Produkte kann auch Inertisierung oder Phlegmatisierung (Reduktion des Sauerstoffgehalts, siehe auch Modul „Sicherheitstechnische Kenngrößen“) eingesetzt werden.

Auch Silokeller, Verbindungsgänge, Treppenhäuser usw. können als Nachbarräume von Silozellen gefährdet sein. Offene Bandförderer liefern dabei das entsprechende Staubangebot.

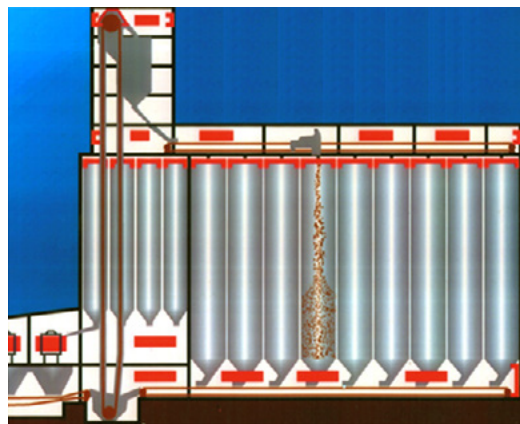


Bild 35:
Entlastung von Silogebäuden. Die Lage der Entlastungsöffnungen sind rot markiert



Bild 36:
Silogebäude aus Stahlbeton ohne Aspiration, Explosionsdruckentlastung in den Außenbereich des Silogebäudes geführt



Bild 37:
Silos mit Maschinengebäude und Druckentlastungsflächen

Einschränkungen durch bauliche Vorgaben

Für Silos kann aufgrund der baulichen Vorgaben in vielen Fällen die Explosionsdruckentlastung nur über die Silodecke erfolgen. Aufgrund des Platzbedarfes für Fördereinrichtungen, Aufsatzfilter u. ä. steht oft nicht einmal der gesamte Querschnitt zur Verfügung. Damit ergeben sich für Silos hohe Mindestexplosionsfestigkeiten, die abhängig sind von:

- der Art der Staubwolkenbildung (homogen/inhomogen),
- dem Ansprechdruck der Druckentlastungseinrichtung,
- dem maximalen Explosionsdruck,
- dem K_{St} -Wert,
- dem zur Verfügung stehenden Querschnitt und vor allem
- dem Höhen /Durchmesser-Verhältnis (H/D).

Räume, die mit Silos in Verbindung stehen

Müssen Silozellen in „Wetterschutzräume“ (nicht Betriebsräume), z. B. Siloböden, explosionsdruckentlastet werden, so müssen diese Wetterschutzräume ebenfalls explosionsdruckentlastet werden. Außerdem können Silokeller, Verbindungsgänge, Treppenhäuser usw. als Nachbarräume von Silozellen gefährdet sein.



Bild 38:
Notausstieg aus einem Silokeller, der gleichzeitig als Druckentlastung dient.



Räume unterhalb der Silos

Silokeller / Silozarge:

Da erfahrungsgemäß trotz Reinigung gelegentlich mit gefährdenden Staubablagerungen zu rechnen ist, sollten diese Bereiche als Zone 22 definiert werden.

Gefahren:

Insbesondere bei Instandhaltungsarbeiten ist mit einer Entzündung von Staubaufwirbelungen zu rechnen.

Mögliche Schutzmaßnahmen:

- Organisatorische Maßnahmen
- Druckentlastung



Bild 39:
Übergang mit Gitterboden.

Vorteil von Gitterbodenkonstruktionen

(siehe Bild 39)

Die Gitter dienen als Explosionsdruckentlastung. Zudem können Staubablagerungen ausgeschlossen sowie Flammenübertragungen verhindert werden.

Die Entlastungsöffnungen sind möglichst in der Nähe potentieller Zündquellen anzuordnen. Ansonsten sollten sie gleichmäßig über die Raumbooberfläche verteilt werden.

Der maximal zulässige Überdruck p_{bem} ergibt sich aus der statischen Last, die der schwächste Teil der Struktur schadlos überstehen kann. Dabei sind alle Bauteile, wie Wände, Fenster, Decken, Zwischendecken und Dächer in die statische Berechnung mit einzubeziehen.

Zur Beurteilung älterer Anlagen ist der aktuelle Zustand der Anlage heranzuziehen und nicht ihr Planungszustand. Für die Montage von Entlastungsflächen muss eine unversperrte Öffnung vorhanden sein.

Lassen sich in der Anlage die notwendigen Entlastungsflächen nicht bereitstellen, müssen die belasteten Strukturelemente verstärkt werden, um einem erhöhten Druck standzuhalten. Der neue Auslegungsdruck errechnet sich in Abhängigkeit zur vorhandenen Entlastungsfläche.

Druckentlastungskonstruktionen für Räume und Gebäudeteile

Der Ansprechdruck von Entlastungskonstruktionen besitzt eine statische und dynamische Komponente. Die statische Komponente entspricht der Bruchlast bei statischer Beanspruchung. Geometrische Parameter, Materialkennwerte und Lagerungsbedingungen beeinflussen die Höhe der Bruchlast. Die dynamische Komponente resultiert aus der Bewegung der Druckentlastungskonstruktionen oder deren Teile und ist vor allem vom Trägheitsverhalten (Masse) und vom Luftwiderstand abhängig.

Druckentlastungskonstruktionen können grundsätzlich in wieder verwendbare und sich bei der Druckentlastung zerstörende unterschieden werden.

Nach dem Prinzip der Öffnung der Druckentlastungseintichtung können Druckentlastungskonstruktionen des weiteren in

- Aufklapp-,
- Berst-,
- Abreiß- und
- Abwerfkonstruktionen unterteilt werden.

Aufklappkonstruktionen

sind fast ausschließlich vertikale Druckentlastungskonstruktionen, die bei einer plötzlichen Druckerhöhung im Gebäude, durch Öffnen von Flügeln oder ähnlichen Bauteilen, einen Druckausgleich ermöglichen.

Berstkonstruktionen

sind Druckentlastungskonstruktionen, die bei einer plötzlichen Druckerhöhung durch Zerstören öffnungsschließender Elemente (Berstelemente) eine Öffnung freigeben. Sie können vertikal und horizontal angeordnet sein.

Abwerfkonstruktionen

sind horizontale Druckentlastungskonstruktionen, die bei einer plötzlichen Druckerhöhung aus der Druckentlastungsöffnung herausgeschleudert werden.

In der Regel ergeben sich für zerstörbare Druckentlastungskonstruktionen höhere Ansprechdrücke als für wieder verwendbare. Mit höheren Ansprechdrücken und mit dem Prinzip der Öffnung der Druckentlastungskonstruktionen ist eine höhere Gefährdung der Umgebung verbunden.



Druckentlastungs-konstruktionen	Beispiele
Aufklappkonstruktionen	Druckentlastungsflügel
Berstkonstruktionen	Leichte Konstruktionen mit Berstplatten und Elementen z. B.: • Glas • Sicherheitsglas • Metallplatten • Holzplatten • Gipskarton • Verschiedene z. B. glasfaserverstärkte Platten • Holzschalung mit bituminöser Dachhaut
Abreißkonstruktionen	Abreißende Elemente • Aluminiumblech • Stahlblech (Trapezprofile) • leichte Mehrschichtelemente (z.B. Stahl-PUR, Al-PUR) • Kunststofffolie • beschichtete Textilien
Abwerfkonstruktionen	• Frei aufliegende Dachelemente (Fertigteile) mit Fugen in der Dachhaut, deren Lage mit den Fugen der Dachelemente übereinstimmt (Gesamtmasse $m < 120 \text{ kg/m}^2$) • Ziegeldeckung

Räume über den Silos (Siloböden):

In Siloböden, in denen technisch dichte Anlagen installiert sind, muss, wenn sich durch häufiges Reinigen keine gefährlichen Staubablagerungen bilden können, keine Zone definiert werden.

Trotzdem können sich um Einstiegsöffnungen Staubablagerungen bilden, wodurch räumlich begrenzt, eine Zone 22 vorliegen kann.

Die Siloböden sind bei Druckentlastung der Silos gefährdet und dürfen deshalb während des Betriebes nicht begangen werden.



Bild 40:
Siloboden mit Förderband und splitterfreien Fensterelementen als Druckentlastung

Gebäudereaktion auf Explosionsdruck

Staubexplosionen können erfahrungsgemäß ungefähr als statische Belastung betrachtet werden, deren Auswirkung dem maximalen Explosionsüberdruck entspricht.

Die folgende Tabelle zeigt typische Festigkeiten von Gebäudeteilen; bei diesen experimentell ermittelten Drücken wird die Struktur unter normalen Bedingungen beschädigt.

Bemerkung:

Die Auslegung von Gebäuden erfolgt in der Regel für Nutz-, Wind- und Schneelasten und nicht auf Explosionsfestigkeiten; sie haben deshalb häufig eine niedrige Druckfestigkeit. Wenn eine hohe Druckfestigkeit erforderlich ist, werden typischerweise Stahlbetongebäude mit kleinen verstärkten Fenstern verwendet.



Gebäudeteil	Mindestdruckfestigkeit
Fensterscheiben, Türen, leichte Trennwände und leichte Dächer	0,01 - 0,03 bar
Freistehende Backsteinwände oder unbewehrte Betonwände (20 cm stark)	0,17 - 0,25 bar
Industriegebäude in leichter Metallgerippebauweise	0,01 - 0,03 bar
Industriegebäude in schwerer Metallgerippebauweise	> 0,1 bar

4.2 Zoneneinteilung

Beispiel einer Anlage mit Schüttgütern, die explosionsfähigen Feinstaub enthält.

Prozessbedingt liegen im Inneren der Silos staubexplosionsfähige Atmosphären vor. Diese Mengen sind als gefährdend anzusehen und führen somit zur folgenden Zoneneinteilung.

Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Innern von Silos Zoneneinteilung an Hand typischer Beispiele		
Anlagenteil	Zone	Bemerkungen
Abluft-Filter	20	Rohgasraum in unmittelbarer Nähe der Filterschläuche und Silokopfbereich bei kontinuierlicher Beschickung
	21	Rohgasraum in Filter und Silokopfbereich bei seltener Befüllung (z. B. < 2 mal pro Woche)

Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Innern von Silos Zoneneinteilung an Hand typischer Beispiele		
Anlagenteil	Zone	Bemerkungen
Silozellen, innerhalb	20	Bei kontinuierlichem Betrieb (d. h. Füllen und Entleeren > 2 mal pro Woche) und Beim vertikalen pneumatischen Befüllen mit reinen staubförmigen Stoffen oder beim Siloaustrag mit Luftauflockerung oder sog. Luft- kanonen zur Austragsunterstützung
	21	Bei seltenem Befüllen und Entleeren (< 2 mal pro Wo- che) oder beim vertikalen pneumatischen Befüllen mit grobkörni- gen Produkten oder beim Befüllen mit staubförmigen Stoffen mit geringer Staubungsneigung über Fallrohre und u. ä. oder beim pneumatischen tangentialen Befüllen mit staub- förmigen Stoffen (mit höherer Staubungsneigung) Beim pneumatischen tangentialen Befüllen mit grob- körnigen Produkten Bei Siloaustrag mit Luftauflockerung oder sog. Luftka- nonen zur Austragsunterstützung
	22	Beim pneumatischen tangentialen Befüllen mit grob- körnigen Produkten



Auftreten explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische im Innern von Silos Zoneneinteilung an Hand typischer Beispiele		
Anlagenteil	Zone	Bemerkungen
Schüttgut- hallen, Siloböden und Siloauf- stellungs- räume	21	An Abwurfstellen
	22	Im übrigen Lagerbereich sind in der Regel Staubabla- gerungen vorhanden, die durch Aufwirbeln explosions- fähige Atmosphären erzeugen können.
	Keine	Im übrigen Lagerbereich ohne sichtbare Staubablage- rungen
Austrags- vorrichtung z. B. Zellen- radschleuse oder Schnecke	21	Im Allgemeinen
	22	Bei grobkörnigen Produkten

Sehr feine Stäube oder auch Feinanteile von grobkörnigen Schüttgütern neigen zum Anbacken an Silowänden oder Einbauten. Diese können durch Herunterfallen unregelmäßig Aufwirbelungen erzeugen, die je nach Häufigkeit zu einer kritischen Zoneneinteilung führen können.

Zu vermeiden sind Staubablagerungen in den Räumen und auf Anlagenteilen (z. B. Maschinenoberflächen, Rohrleitungen, Klimakanälen, Kabeltrassen, etc.).

Ziel ist es, den Staubeintritt und aufwirbelbare Staubablagerungen in den Räumen weitestgehend zu beseitigen und die Bereiche, die betriebsmäßig durch explosionsfähige Staub-/Luftgemische belastet sind, so weit wie möglich zu reduzieren.

Hierzu dienen insbesondere folgende Schutzmaßnahmen, die auf ein Verhindern des **Staubaustrittes aus Anlagenteilen** ausgerichtet sind:

- Staubdichtes Gestalten und Betreiben der Anlagenteile
- Betrieb der Anlage im Unterdruck
- Absaugen des Staubes an der Entstehungsstelle

Sowie Maßnahmen, die die **Staubablagerungen und die Staubausbreitung in den Räumen** verhindern. Dazu gehören u. a.:

- Glatte Wände
- Abschrägen von Mauervorsprüngen, Trägern, Dachkonstruktionen, Leuchten, rillen- und fugenlose Böden
- Geeignete Staubsauger; wobei alle Staubablagerungsflächen zu erfassen sind, wie Fußböden, Wände, Konsolen, Simse, Träger, Tragkonstruktionen, Maschinen, Rohrleitungen, Kabel, Leuchten

Staubabblassen mit Druckluft ist als Reinigungsmaßnahme ungeeignet, da es die Raumverstaubung eher verschlimmert.



4.3 Beurteilen von Zündquellen

Die unter 4.2 genannten Maßnahmen zum Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre (Zoneneinteilung) werden durch das Verhindern wirksamer Zündquellen flankiert.

Bei den betrachteten Anlagen sind prinzipiell die 13 Zündquellen nach EN 1127-1 zu berücksichtigen. Meist sind jedoch bei dem Prozess-Schritt „Lagerung“ nur die im Folgenden aufgeführten Zündquellen für Stäube relevant.

- Heiße Oberflächen
- Flammen und heiße Gase
- Mechanisch erzeugte Funken
- Elektrische Anlagen
- Statische Elektrizität
- Ultraschall (z. B. Ultraschallmesstechnik)
- Blitzschlag
- Glimmnester und Selbstentzündung

Wo und unter welchen Bedingungen sie wirksam werden können, wird nachfolgend aufgeführt.

Wirksamwerdens der entsprechenden Zündquelle auch die Auftrittswahrscheinlichkeit von explosionsfähiger Atmosphäre, also die jeweils vorliegende Zone ein. Ergibt sich ein zu hohes Risiko, werden zudem Gegenmaßnahmen mit den entsprechenden Lösungen aufgeführt.

In der linken Spalte der Tabelle sind die Wahrscheinlichkeiten *W* des Auftretens eines unerwünschten Ereignisses ohne Maßnahmen angegeben. Es gilt:

- A häufig
- B gelegentlich
- C selten

4.4 Risikobeurteilung

Neben den Maßnahmen zum vorbeugenden Explosionsschutz (Vermeiden von Zündquellen und Vermeiden von explosionsfähiger Atmosphäre) werden evtl. Maßnahmen zum konstruktiven Explosionsschutz eingesetzt; diese sind dann durch die explosionstechnische Entkopplung und die explosionsdruckstoßfeste Bauweise in Verbindung mit Explosionsdruckentlastung oder als Explosionsunterdrückung ausgeführt.

Zur Abschätzung der Gefährdungen werden in unten stehender Tabelle Auswirkungen einer möglichen Explosion und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens angegeben. In diese Wahrscheinlichkeit geht neben der Wahrscheinlichkeit des

Zündquellenanalyse: Lagersilos für Schüttgüter; allgemeines Beispiel			
W	Unerwünschtes Ereignis	Zündquelle	
C	Brand/Explosion in einem oder mehreren Silos	Glimmnesteintrag	
C	Brand und nachfolgend Explosion in einem oder mehreren Silos	Selbstentzündung	
B	Explosion in einem oder mehreren Silos	Elektrostatische Entladung (Funkenentladung, Gleitstielbüschelentladung, Schüttkegelentladung)	
C	Entzündung eines Staub/Luft-Gemisches im vorgeschalteten Prozess-Schritt oder im Aufstellungsraum	Mechanischer Schaden in oder an der Druckluftherzeugung der Förderluft bei gleichzeitiger Übertragung in die Förderung. Staubkonzentration >UEG	



Zündquellenanalyse: Lagersilos für Schüttgüter; allgemeines Beispiel

	Auswirkung	Gegenmaßnahmen
	Bei Explosion mit Silobeteiligung kann Gebäudestatik gefährdet sein, bei Silobrand immer auch Explosionsgefahr durch Schwelgase oder einbrechende Produktbrücken	1. Zündquellen vermeidende Maßnahmen s. o. 2. Entsprechende Gestaltung der Lieferantenverträge 3. Wareneingangskontrolle 4. Verbot von offenem Feuer, Feuerarbeiten nur mit Freigabe 5. Rauchverbot
	Bei Explosion mit Silobeteiligung kann Gebäudestatik gefährdet sein, bei Silobrand immer auch Explosionsgefahr durch Schwelgase oder einbrechende Produktbrücken	1. Vorgelagerte Prozesse mit Temperaturbelastung entsprechend überwachen 2. Vermeiden von Wassereintrag in die Silos (Umlagerung, gemäß Arbeitsanweisung vorgehen)
	Bei Explosion mit Silobeteiligung kann Gebäudestatik gefährdet sein	1. Erdung aller Anlagenteile 2. Verzicht auf isolierende Beschichtungen mit Durchschlagspannungen oberhalb von 4 kV 3. beim Einsatz nichtleitfähiger Materialien (z. B. Kunststoffsilos) Expertenrat einholen
	Schäden an oder Zerstörung der Rohrleitung, evtl. Explosionsübertragung in den Aufstellungsraum bzw. in nachfolgende Anlagenteile z. B. in das Silo	1. Wartung und Instandhaltung 2. Bedingungen vorgeben, dass UEG unterschritten wird 3. Raumreinhaltung 4. Verbot von offenem Feuer, Feuerarbeiten nur mit Freigabe, Rauchverbot

Zündquellenanalyse: Lagersilos für Schüttgüter; allgemeines Beispiel			
W	Unerwünschtes Ereignis	Zündquelle	
C	Produkt entzündet sich an der Misch-Schnecke oder einem mechanischem Austragsorgan durch heiße Oberfläche	Im Silo vorhandener verkeilter Fremdkörper	
B	Entzündung eines Staub/Luft-Gemisches im Filter	Elektrostatische Entladung (Funkenentladung)	
B	Entzündung eines Staub/Luft-Gemisches im Silo durch Schüttkegel-Entladung Aufstellungsraum	Elektrostatische Entladung (Schüttkegelentladung bei isolierendem Produkt)	



Zündquellenanalyse: Lagersilos für Schüttgüter; allgemeines Beispiel

Auswirkung		Gegenmaßnahmen
	Brandentwicklung mit Explosionsgefahr im Silo und nachfolgenden Anlagenteilen	1. Niedrig eingestellte Motorschutzauslösung 2. Vorgeschaltete Fremdkörperabscheidung 3. Lagertemperaturüberwachung an Welle 4. Langsam laufende Misch-Schnecken oder Austragsrührer einsetzen ($U < 1\text{m/s}$) 5. Keine Innenlager bei Rührern oder Misch-Schnecken
	Schäden an oder Zerstörung des Filters und evtl. Explosionsübertrag in die aspirierten Aggregate bzw. in den Aufstellungsraum	1. Dauerhaft sichergestellte Erdung des Filters und aller Einbauteile 2. Druckentlastung des Filters 3. Vorgeschalteter Entlastungsschlot 4. Raumreinhaltung
	Bei Explosion mit Silobeteiligung kann Gebäudestatik gefährdet sein, bei Silobrand immer auch Explosionsgefahr durch Schwelgase oder einbrechende Produktbrücken Übertragung in angeschlossene Aggregate.	1. Konstruktive Schutzmaßnahmen wie Druckentlastung oder Explosionsunterdrückung in Verbindung mit druckstoßfester Bauweise 2. Explosionstechnische Entkopplung angeschlossener Aggregate 3. Einbau von geerdeten Elektroden zum Reduzieren der Energie von Schüttkegelentladungen (Mehrere Stäbe oder Seile) 4. Inertisieren/Phlegmatisieren

4.5 Schutzmaßnahmen

4.5.1 vorbeugende Maßnahmen

Heiße Oberflächen

Sind in Lagersilos keine drehenden Einbauteile vorhanden treten normalerweise keine heiße Oberflächen auf. Bei Mischsilos mit drehenden Einbauteilen können heiß laufende Wellenlagerungen und/oder Abdichtungen nicht ganz ausgeschlossen werden. Diese sind durch entsprechende Überwachungen zu schützen. Durch Sperrluft kann bei Dichtringen ein Eindringen von Produkt in den Dichtbereich oder das Lager verhindert werden. Zusätzlich kann eine Lager-temperaturüberwachung oder Temperaturüberwachung der Abdichtstelle notwendig sein.

Alternativ können Glimmbrände durch Brandgas-melder zur Brandfrüherkennung (GSME-Melder) detektiert werden.

Folgende mögliche Gefahrenquellen, die zu heißen Oberflächen führen, sind zu beurteilen:

- Fremdkörpereintrag ist zu vermeiden
- Innenliegende Wellenlagerungen sind zu vermeiden (ist dies nicht möglich müssen sie überwacht werden)
- Bewegliche Einbauten, wie Rührwerkzeuge oder Mischschnecken, sind mit geringer Antriebsleistung und Umfangsgeschwindigkeit (in der Regel unter $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) zu betreiben. Die Obergrenze der Umfangsgeschwindigkeit ist durch technische Maßnahmen abzusichern.
- Betriebsmäßige heiße Oberflächen, wie z. B. Heizungen, sind zu vermeiden

Flammen und heiße Gase

Prozessbedingt sind diese Zündquellen bei der Lagerung selbst nicht relevant, jedoch bei direkten Feuerungsprozessen, wie z. B. Rückschlagen von heißen Gasen und Flammen in die vorgelagerten Bunker.

Sollten die folgenden Zündquellen

- Aufflammen von Glimmnestern,
- Entzünden von Schwelgasen,
- einlaufende Explosionen von angrenzenden Anlagenteilen

nicht zu verhindern sein, sind weitere Maßnahmen zu treffen.

Flammen und heiße Gase (z. B. durch Schweiß-, Schneid- und andere heiße Oberflächen erzeugende Arbeiten, Rauchen) sind durch organisatorische Maßnahmen als mögliche Zündquelle auszuschließen.

Mechanisch erzeugte Funken

Durch Reib- und Schlagvorgänge erzeugte Funken sind mögliche Zündquellen, jedoch für die Mehrzahl der Stäube nicht direkt zündwirksam. Sie können jedoch in der Staubschüttung bei Stäuben mit einer temperaturabhängigen Brennzahl ≥ 3 zu Glimmnestern führen.

Elektrische Anlagen

Elektrische Betriebsmittel sind mit entsprechender Eignung einzusetzen. Für Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre der Zone 20, 21 oder 22 sind die Gerätekategorien 1D, 2D oder 3D notwendig.

Statische Elektrizität

Vorzugsweise sind leitfähige Werkstoffe ($< 10^4 \Omega \text{m}$) zu verwenden und alle leitfähigen Teile zuverlässig und dauerhaft mit einem Erdableitwiderstand $RE < 10^6 \Omega$ zu erden.

Bei Verwenden von ableitfähigen Werkstoffen ($< 10^9 \Omega \text{m}$) müssen diese mit Erde in Verbindung stehen.

(Für Schläuche und flexible Manschetten siehe die Beispielsammlung der IVSS, „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten“, Teil 2, Kapitel 6.3, „Zündquellen und Schutzmaßnahmen“)



- An Orten hoher Staubaufprallgeschwindigkeit (stark ladungserzeugender Prozess) dürfen keine isolierenden Beschichtungen mit einer Durchschlagsspannung größer als 4 kV verwendet werden. Stark ladungserzeugende Prozesse können dort zu zündwirksamen Gleitstielbüschelentladungen führen.
- Bei Produkten mit tiefem Schmelzpunkt oder beim Befüllen unter erhöhter Temperatur: Produktanhaftungen, die durch einen Sinterungs- oder Schmelzprozess eine isolierende Schicht mit einer Durchschlagsspannung größer als 4 kV bilden, sind zu vermeiden.
- Durch mechanische oder pneumatische Förderung werden Schüttgüter statisch aufgeladen. Dadurch können Büschelentladungen auftreten, die Staubwolken in Abwesenheit von Gasen oder Dämpfen nicht entzünden können. Aufgeladenes Schüttgut kann dazu führen, dass elektrisch isolierte Teile durch Influenz aufgeladen werden. Daher ist immer eine vorschriftsmäßige Erdung aller leitfähigen Teile erforderlich, um gefährliche Funkenentladungen zu vermeiden (siehe „Statische Elektrizität, Zündgefahren und Schutzmaßnahmen“, IVSS, Heidelberg 1995, ISBN 92-843-7091-4).
- Ausgehend vom hochaufgeladenen Schüttgut können Schüttkegelentladungen im Inneren von Silos auftreten (siehe „Statische Elektrizität, Zündgefahren und Schutzmaßnahmen“, IVSS, Heidelberg 1995, ISBN 92-843-7091-4). Ob diese zündwirksam werden, hängt von vielen Einflussgrößen (z. B. Silodurchmesser, Teilchengrößenverteilung und Mindestzündenergie) ab. Liegt der spezifische Schüttgutwiderstand oberhalb $10^{10} \Omega\text{m}$, können Schüttkegelentladungen, ausgehend vom Schüttgut selbst, in einem leitfähigen geerdeten Behälter/Silo ohne isolierende Innenbeschichtungen nicht ausgeschlossen werden.

Diese Entladungen sind schwierig zu vermeiden. Sie können durch Unterteilung der Silozellen mit leitfähigen geerdeten Elektroden (Seile oder Stäbe), Inertisierung oder Phlegmatisierung zündunwirksam gemacht werden.

Ultraschall

Füllstandsmessgeräte mit Ultraschallwellen sind nur mit entsprechender Eignung einzusetzen (Gerätekategorie 1D oder 2D je nach Zonendefinition im Silo).

Ultraschall kann bei extrem hohen Intensitäten zu heißen Oberflächen führen, die gegebenenfalls als Zündquelle zu bewerten sind. Im Allgemeinen sind solch hohe Intensitäten jedoch nicht vorhanden.

Blitzschlag

Außensilos sind in die Blitzschutzmaßnahmen des Fundaments oder des Gebäudes mit einzubinden.

Glimmnester und Selbstentzündung

- Der Eintrag von heißen Fremdkörpern und Glimmnestern ist zu vermeiden.
- Erhöhte Feuchtigkeit und Lagertemperaturen können zu exothermen biologischen und chemischen Reaktionen führen.
- Lange Lagerzeiten sind zu vermeiden.

Beim Auftreten von Selbsterhitzungs- und Selbstentzündungsprozessen ist häufig mit dem Auftreten von Gasen (z. B. CO) zu rechnen. Diese können schon in geringen Mengen detektiert und erkannt werden.

Bei temperaturempfindlichen Schüttgütern, die zur Selbstentzündung neigen, ist evtl. das Lagersilo zu isolieren, um das Schüttgut vor erhöhtem Wärmeeintrag zu schützen.

Können die beschriebenen Zündgefahren nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, müssen zusätzliche konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen angewendet werden.

4.5.2. Konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen

Folgenden Möglichkeiten kommen als Explosionsschutzmaßnahmen in Betracht:

- Druckfeste oder druckstoßfeste Bauweise für den maximalen Explosionsüberdruck $p_{\max}$ (möglich bei kleineren Silos)
- Druckstoßfeste Bauweise für den reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} in Verbindung mit Explosions-Druckentlastung (gegebenenfalls auch flammenlose Druckentlastung)
- Druckstoßfeste Bauweise für den reduzierten Explosionsüberdruck p_{red} in Verbindung mit Explosionsunterdrückung (möglich bei kleineren Silos)

Bedingungen, die für die Konzeption von Schutzsystemen maßgebend sind:

Anlagenkonfiguration:

Behältervolumina, Höhen/Durchmesser-Verhältnis, Rohrleitungslängen und -durchmesser, Art der Fördereinrichtungen, etc.

Prozessbedingungen

Staubverteilungen, Volumenströme, Prozesstemperaturen, Prozessdrücke, Strömungsgeschwindigkeiten und dergleichen.

Umgebungsbedingungen

Temperaturen, Luftfeuchtigkeit (z. B. Kondenswasser)

Produkteigenschaften

(explosionstechnische Kenngrößen)

Muss die Übertragung einer Explosion von einem Anlagenteil zu einem anderen verhindert werden, sind zusätzlich zu den o. g. konstruktiven Schutzmaßnahmen, Entkopplungseinrichtungen notwendig. Diese lassen sich in passive und aktive Systeme unterteilen.

- Die passiven Systeme wirken selbsttätig, ohne dass eine Steuereinheit notwendig ist. Das Schließen erfolgt durch die Druckwelle während des Explosionsablaufs. Jedes System benötigt einen Mindestdruck zum Schließen.
- Bekannte passive System sind der Entlastungsschlot und das Explosionsschutzventil. Aber auch die Zellenradschleuse kann zu den passiven Elementen gezählt werden, muss allerdings im Explosionsfall stillgesetzt werden. Auch Produktvorlagen in Verbindung mit Förderelementen, z. B. Rohrschnecken, können der explosionstechnischen Entkopplung dienen.
- Die aktiven Systeme benötigen für ihre Auslösung geeignete Steuereinrichtungen. Über diese Steuereinrichtungen wird dann im Explosionsfall die für die Betätigung der aktiven Systeme notwendige Energie freigesetzt. Zwischen dem Einbauort des Detektors und dem Einbauort des Entkopplungsmechanismus muss ein vorgeschriebener Abstand eingehalten werden, der sich aus der Ansprechzeit und dem Explosionsverhalten ergibt.
- Zu den aktiven Systemen gehören der Schnellschlussschieber, das angesteuerte Explosionsschutzventil und die Löschmittelsperre.
- Die Löschmittelsperre kann in Verbindung mit einem Unterdrückungssystem auch die Druckentlastungseinrichtung ersetzen.

Risiken bei einer Explosionsübertragung

Bei der Übertragung einer Explosion von einem auf einen anderen Behälter kommt es zu einer Drucküberhöhung im Sekundärbehälter. Diese ist besonders ausgeprägt, wenn der nachgeschaltete Behälter kleiner ist. Eine explosionstechnische Entkopplung verhindert die Übertragung. Durch den Schließvorgang der Entkopplung erhöht sich jedoch der Explosionsdruck im Primärbehälter. Dieser Druck kann bis zu 3 mal höher sein, als der berechnete reduzierte Explosionsdruck.

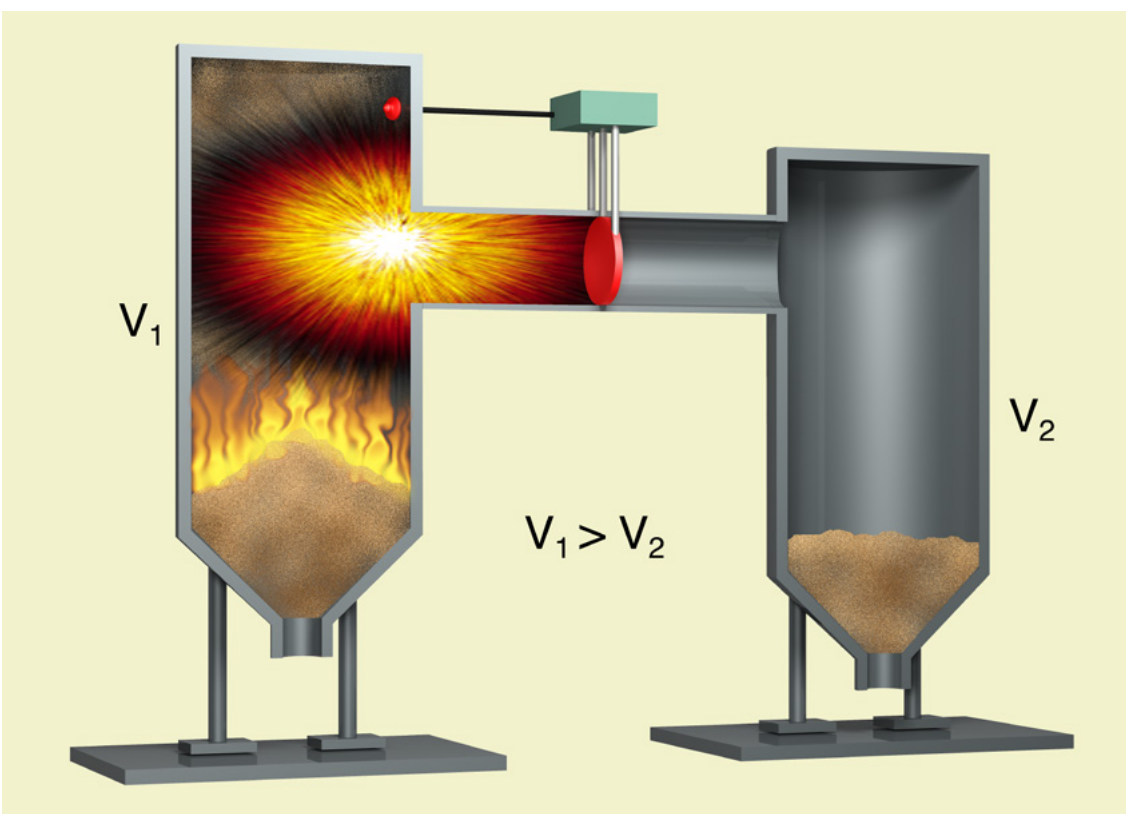
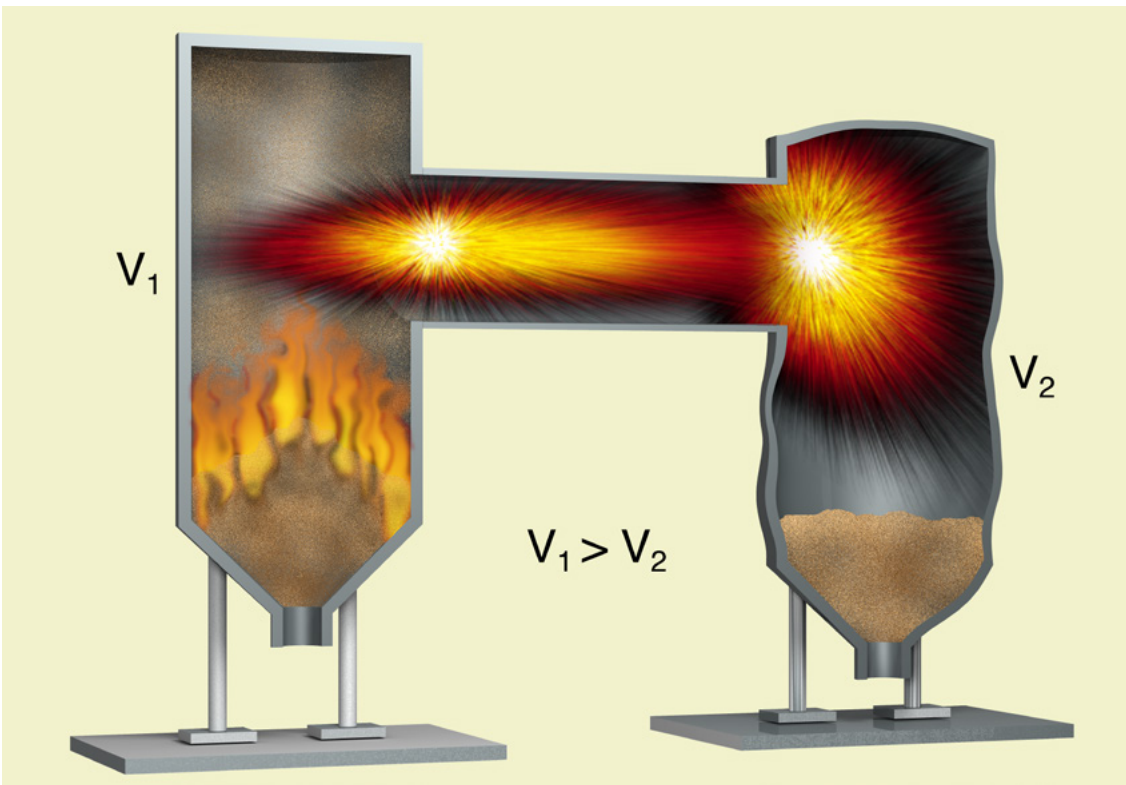


Bild 41:
Explosionsübertragung durch Rohrleitungen und notwendige Entkopplung

Entlastungsschlote

Das Ausbreiten von Staubexplosionen über verbindende Rohrleitungen lässt sich in vielen, aber nicht allen Fällen, durch den Einbau eines Entlastungsschlotes unterbinden. So kann eine staubfördernde Leitung über einen Entlastungsschlot in den nachgeschalteten Abscheider, z. B. eine Filteranlage, geführt werden. Der Entlastungsschlot zeichnet sich durch eine spezielle Leitungsführung aus, in der eine Umkehr der Förderrichtung um 180° erfolgt.

Entlastungsschlote können praktisch in beide Richtungen eine Explosionsübertragung verhindern. Allerdings zeigen die experimentellen Untersuchungen, dass dieses nicht immer gegeben ist. So ist die Wahrscheinlichkeit einer Explosionsübertragung vom äußeren in das innere Rohr höher als umgekehrt. Ferner wird eine Explosionsübertragung begünstigt, wenn auf der, von der Explosion abgewandten Seite, hohe Unterdrücke anliegen. Insbesondere bei langsam ablaufenden Explosionen mit niedrigen Druckäußerungen, bei denen die Druckentlastungseinrichtungen nicht ansprechen, muss mit einer Explosionsübertragung gerechnet werden.

Zellenradschleusen

Zellenradschleusen können bei Ausführung als Schutzsystem das Ausbreiten von Explosionsflammen unterbinden. Auch eine schlagartige Druckbeanspruchung nachgeschalteter Systeme unterbleibt weitestgehend. Zellenradschleusen eignen sich zur Absicherung von Produkteintritts- und -Austrittsöffnungen an Behältern und Apparaten. Durch ihren Einsatz an den Produktübergabestellen kann eine Entkoppelung zwischen den vor- und nachgeschalteten Anlagenbereichen erreicht werden.

Eng verknüpft mit der Flammen- bzw. Zünddurchschlagsicherheit einer Zellenradschleuse ist natürlich auch ihre ausreichende Festigkeit gegenüber der zu erwartenden Explosionsbelas-

tung. Um hier einen möglichst weiten Bereich der in der Praxis zu erwartenden Explosionsbelastungen durch Staubexplosionen abdecken zu können, werden Zellenradschleusen im Allgemeinen für einen Überdruck von 10 bar ausgelegt. Beide Eigenschaften, aber insbesondere die der Zünddurchschlagsicherheit, müssen durch explosionstechnische Untersuchungen nachgewiesen sein.

Explosionsschutzventil

Explosionsschutzventile eignen sich vornehmlich für den Einbau in Rohrleitungen mit niedrigen Staubbeladungen. Typische Einsatzbeispiele finden sich auf der Reinluftseite von Filteranlagen, wo diese Ventile zum Schutz der reinluftseitig angeordneten Ventilatoren vor unzulässig hohen Druckbelastungen bei Explosionen in vorgeschalteten Filter eingesetzt werden. Das Ventil wird durch die kinetische Energie der Druckwelle geschlossen (passives System). Bei Explosionen mit schwachen Druckauswirkungen können Flammen jedoch durchlaufen.

Schnellschlussschieber

Schnellschlussschieber haben gegenüber den Explosionsschutzventilen den Vorteil, dass sich ihr Schließelement im offenen Zustand außerhalb des Rohrleitungsquerschnittes befindet. Der Rohrleitungsquerschnitt bleibt somit frei und kann taschenlos und ohne tote Ecken ausgeführt werden, so dass sich kein Staub ablagern kann. Aus diesem Grunde können Schnellschlussschieber unabhängig von der Staubbeladung in Rohrleitungen verwendet werden. Es kann sowohl Flammen- oder Druckdetektion angewendet werden.

Löschmittelsperre

Wird eine Flammenfront detektiert, öffnen geprüfte Ventile von Löschmittelbehältern und treiben Löschmittel in die Rohrleitung. Dadurch



wird die Flamme gelöscht. Zwischen Einbauort des Detektors und dem Einbauort der Löschdüse muss der vorgeschriebene Abstand eingehalten werden, der sich aus Ansprechzeit und Explosions-/Flammengeschwindigkeit ergibt. Durch den Löschvorgang wird die sich ausbreitende Druckwelle nicht gestoppt. Die Festigkeit der Rohrleitung ist auf den zu erwartenden Explosionsdruck abzustimmen. Es ist Flammendetektion anzuwenden.

Explosionserkennung

Zum Auslösen von aktiven Schutzsystemen ist eine geeignete Detektion erforderlich. Grundsätzlich kann eine Detektion über Druck oder Flamme erfolgen.

Bei der Druckdetektion kann zwischen mechanischen und elektronischen Detektoren unterschieden werden.

Mechanische Detektoren (Membranen)

- + Unempfindlich gegen Verschmutzung
- Schwingungsempfindlichkeit (wird z. B. durch zwei um 90° versetzte Detektoren vermieden)
- Nachjustierung erforderlich

Elektronische Detektoren

- + Reaktion auf statische Druckwerte und auf Druckanstiegsgeschwindigkeiten
- + Keine Gefahr durch Resonanzschwingungen

Flammdetektion

Insbesondere bei schwachen Explosionsabläufen notwendig

- + kurze Ansprechzeit < 2 ms
- Überwachen der Sichtfähigkeit

Entkopplung durch Produktvorlage

Bei druckentlasteten Silos kann die explosions-technische Entkopplung am Produktauslauf durch eine Produktvorlage realisiert werden.

Die Produktschüttung muss durch zwei Füllstandsmelder abgesichert werden.

Beide Melder werden in UND-Schaltung hartverdrahtet miteinander gekoppelt und auf den Antrieb des Austragsorgans (z. B. pneumatisch betätigte Klappe) geführt, so dass nur ausgetragen werden kann, wenn beide Melder Produkt melden.

Die Füllstandsmelder müssen für den Einsatz in explosionsfähiger Atmosphäre zugelassen sein.

Die Mindesthöhe der Produktschüttung (H) ist abhängig von der Schüttdichte (SD) des eingelagerten Produktes und dem Durchmesser der Austragsöffnung (D) und errechnet sich wie folgt:

$$\text{Schüttdichte } SD \geq 1 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3} \quad H = D$$

$$\text{Schüttdichte } SD < 1 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3} \quad H = \frac{D}{SD}$$

Zahlenwertgleichung: H [m], D [m], SD [kg · dm⁻³]

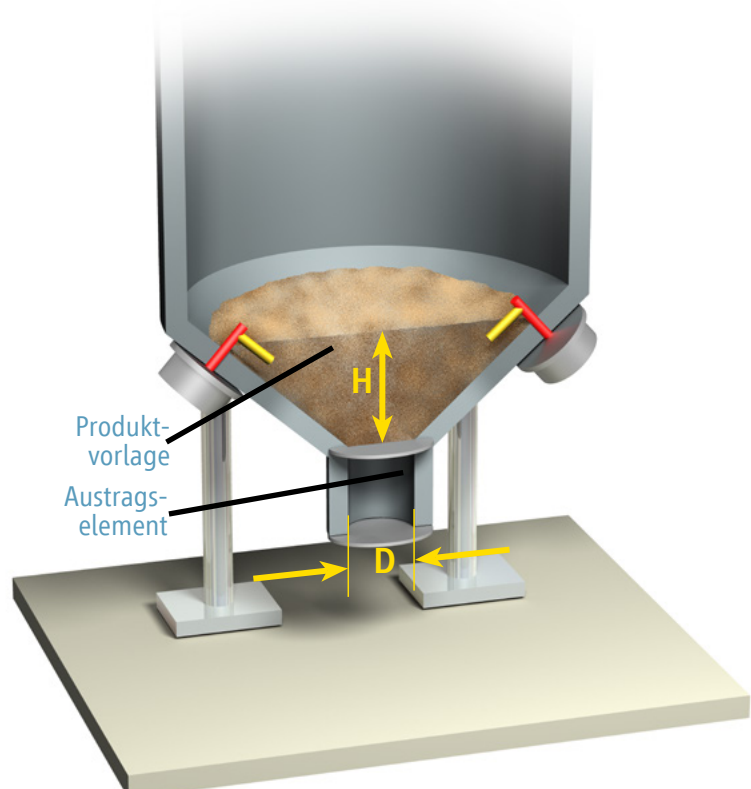


Bild 42:

Explosionstechnische Entkopplung am Produktauslauf, realisiert durch eine Produktvorlage

Beim Anwenden der Entkopplungs-Maßnahme „Produktvorlage“ ist für das Entleerungsverhalten im Lagersilo immer der Massenfluss zwingend notwendig. Andernfalls kann es innerhalb der Materialsäule zu Hohlräumen oder Schachtbildungen kommen, die kein ausreichendes Abdecken mit Schüttgut oberhalb der Austragsöffnung gewährleistet (siehe hierzu auch Kapitel 2.4.1 Funktionsbeschreibung sowie Bild 22 und 23). Durch Scherversuche (nach A. W. Jenike oder Schulze) kann mit dem jeweiligen Rohstoff ermittelt werden, ob im Silo Massenfluss oder evtl. nur Kernfluss vorliegt. Besonders schlecht fließende oder kohäsive Produkte mit Fließfaktoren $ffc \leq 4$ erreichen nur bei einer korrekten Siloauslegung Massenfluss und sind nur dann für diese explosionstechnische Entkopplungsmaßnahme geeignet.

Entkopplung durch Rohrförderschnecke

Rohrförderschnecken werden mit einem Füllungsgrad zwischen 30 % und 50 % betrieben. Dadurch ist der obere Teil des Schneckenrohres nicht mit Produkt befüllt. Um hier produkttechnisch einen Verschluss zu erzielen, werden einzelne Schneckengänge kurz vor dem Schneckenauslauf entfernt. Damit erreicht man ein Aufstauen des Produktes zu einem Produktpfropfen. Das Aufstauen des Produktes ist abhängig von dessen Fließfähigkeit.

Eine Entkopplung ist mit und ohne Pfpfen, abhängig von den Produkteigenschaften möglich.

Die wesentlichen Voraussetzungen der Schneckenentkopplung sind:

- Im Leerlauf verbleiben an den fehlenden Schneckenängen Schüttgutpfropfen, wenn der Fließfähigkeitsfaktor $ffc < 5$ ist (z. B. Cellulose, Puderzucker, Milchpulver, Holzmehl, Weizenmehl)
- Ohne Schüttgutpfropfen keine Flammenübertragung bei Stäuben, deren Mindestzündenergie $MZE \geq 100 \text{ mJ}$ beträgt; (MZE gemessen mit Induktivität; Referenz: Holzmehl)
- Mit Schüttgutpfropfen keine Flammenübertragung bei Stäuben, deren Mindestzündenergie $MZE \geq 10 \text{ mJ}$ beträgt (MZE gemessen mit Induktivität; Referenz: Cellulose)
- Keine Flammenübertragung bei Stäuben, deren $MZE \geq 5 \text{ mJ}$ und $ffc < 10$ beträgt, wenn
 - „Leerfahren“ technisch ausgeschlossen wird
 - 2 Schneckengänge entfernt sind
- Gültigkeitsbereich (für alle vier o. g. Voraussetzungen)
 - max. Durchmesser der Rohrförderschnecke: $d = 200 \text{ mm}$
 - Mindestabstand von Produkteinlauf bis -auslauf: $l_{\min} = 1,80 \text{ m}$
 - Maximale Spaltweite zwischen Schneckenängen und Gehäuse: $s = 7 \text{ mm}$
 - Explosionsdruck $p_{\text{red}} = 0,2 \text{ bar bis } 2 \text{ bar}$

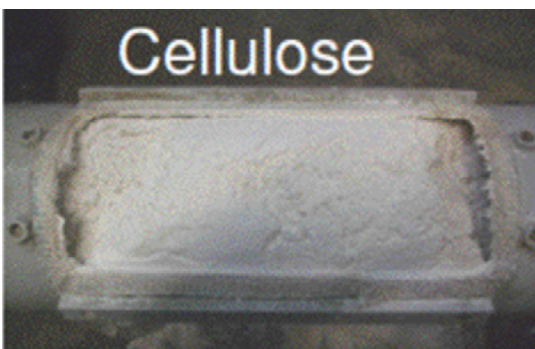


Bild 43:

Zustand des Produktpfropfens nach dem Leerfahren der Schnecke für die drei Produkte Weizenmehl (teilweise Pfropfen), Maisstärke (kein Pfropfen) und Cellulose (voller Pfropfen)

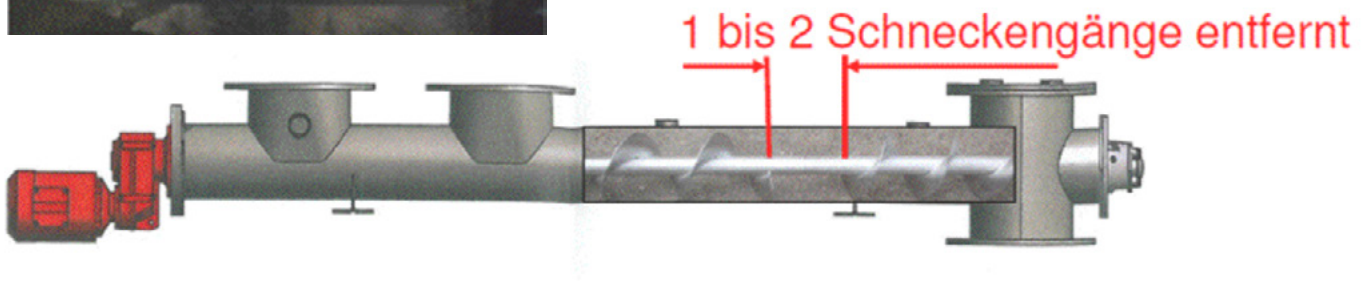


Bild 44:

Verwenden einer Rohrförderschnecke zur explosionstechnischen Entkopplung

Erzeugen eines Schüttgutpfropfens durch Entfernen von 1, 1½ oder 2 Wellengängen der Schnecke. Der Pfropfen soll möglichst auch dann bestehen bleiben, wenn beim Leerfahren kein Schüttgut mehr zugeführt wird.

Beispiele von Silos mit Explosionsdruckentlastung und explosionstechnischer Entkopplung

Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für ein mit Explosionsdruckentlastung ausgerüstetes Silo. Es wird pneumatisch aus einem Silofahrzeug beschickt. Wichtige vorbeugende Maßnahmen sind insbesondere das Verwenden von:

- Kompressoren mit integrierter Funkensperre und nachgeschaltetem Kühler, der die Luft auf ca. 70° C herunterkühlt sowie
- Förderschläuchen mit leit- oder ableitfähiger Innenwand
- durchgängige Erdungen

Eine Explosionsübertragung vom Silo in das Silofahrzeug ist wenig wahrscheinlich. Für eine Explosion im Silo ist ein explosionsfähiges Gemisch erforderlich. Dies kann sich nur während des Befüllvorgangs bilden. Während des Befüllvorgangs liegt eine hohe Staubbelastung in der Befüllleitung vor. Erfahrungsgemäß finden in Rohrleitungen mit kleinen Durchmessern keine Rückzündungen bei hoher Staubbelastung (Blockadeffekt) statt.

Entkopplungseinrichtung

Zellenradschleuse

Druck in der Silofüllleitung ca. 2,0 bar Überdruck.
Aufgrund der Druckentlastung und des höheren Förderdruckes als p_{red} ist kein Rückschlag von Flammen entgegen der Förderrichtung zu erwarten.

Folgende Kenngrößen sind zu beachten:

Mindestzündenergie: $MZE \geq 1 \text{ mJ}$ $K_{St}\text{-Wert} \leq 300 \text{ bar} \cdot \text{s}^{-1}$

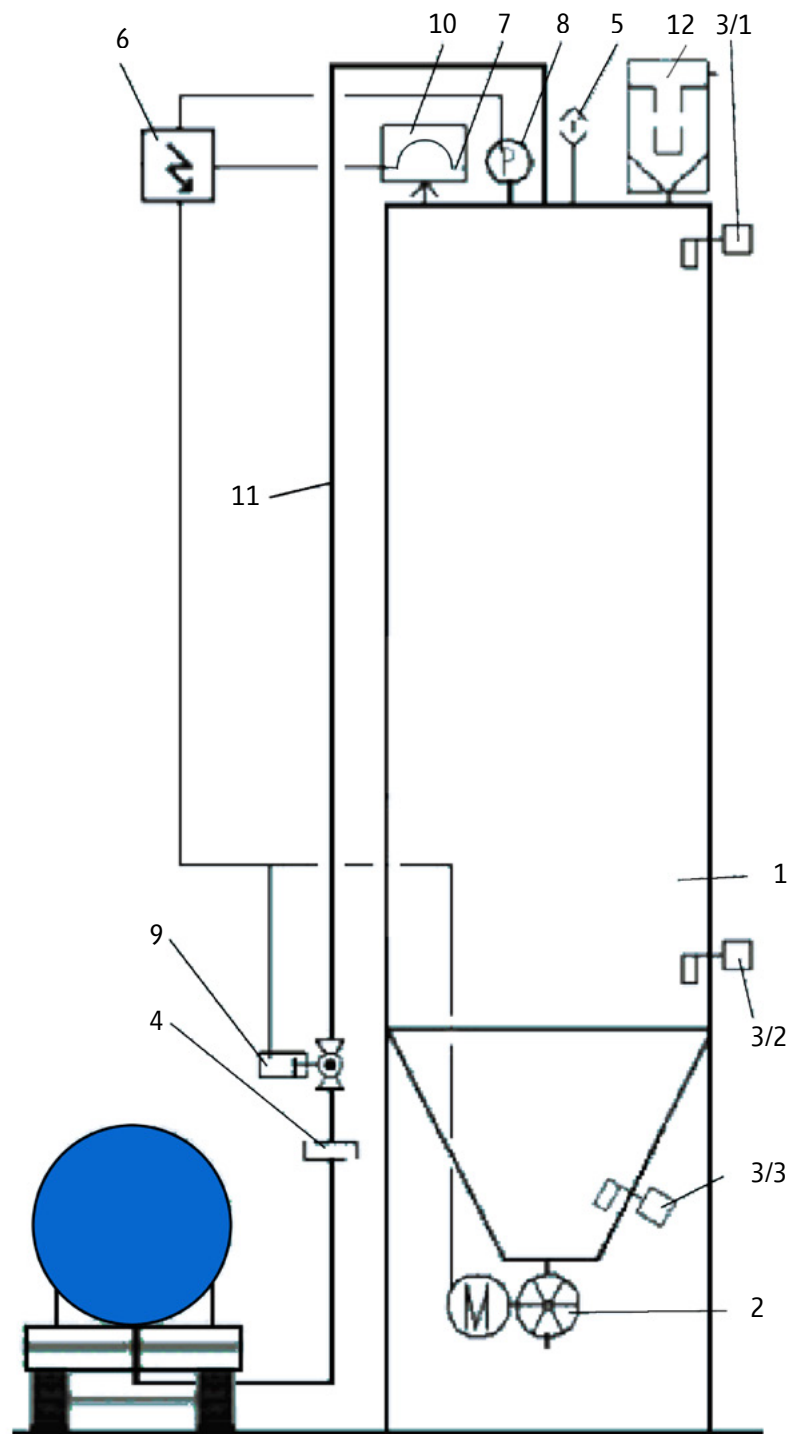


Bild 45:
Anforderungen an ein Außensilo mit Explosionsdruckentlastung und Entkopplung über Schleuse für die Austragung. (AZO GmbH & Co. KG)



1	Silo	Druckstossfest für p_{red}
2	Zellenradschleuse	Druckstossfest für p_{red} flammendurchschlagsicher (fds)
3	Füllstandsmelder	Voll-, Anforderungs-, Leermelder Druckstossfest für p_{red}
4	Kupplung	Druckstossfest für p_{red}
5	Unter-/Überdruckventil	Ansprechdruck -5/+45 mbar
6	Steuerung	Hartverdrahtung
7	Schalter an Druckentlastung	
8	Druckschalter	Druckstossfest für p_{red}
9	Kugelhahn	Druckstossfest für p_{red}
10	Entlastungseinrichtung	Berstscheibe
11	Silofüllleitung	Druckstossfest für p_{red}
12	EntlüftungsfILTER	Druckstossfest für p_{red} keine zusätzliche Entlastung für den Filter notwendig

Schaltmatrix				
Schalter von	Sicherheitsrelevante Abschaltung		Funktionale Abschaltung	
	Schalten	Bemerkungen	Schalten	Bemerkungen
7	Zellenrad-schleuse 2	stillsetzen	Vibrationsböden	falls vorhanden stillsetzen
7	Filterreinigung	stillsetzen		
7	Belüftungs-düsen/-boden	falls vorhanden stillsetzen		
7	Füllstands-melder	stillsetzen		
7	Kugelhahn 9	stillsetzen		
4			Vollmelder 3/1	wird aktiviert
4			Kugelhahn 9	öffnet
8			Kugelhahn 9	Kugelhahn schließt bei 45 mbar

Entkopplungseinrichtung

Austragsschnecke mit Produktpolster

Druck in der Silofüllleitung ca. 2,0 bar.

Aufgrund der Druckentlastung und des höheren Förderdruckes als p_{red} ist kein Rückschlag von Flammen entgegen der Förderrichtung zu erwarten.

Folgende Kenngrößen sind zu beachten:

Mindestzündenergie: $MZE \geq 1 \text{ mJ}$ $K_{St}\text{-Wert} \leq 300 \text{ bar} \cdot \text{s}^{-1}$

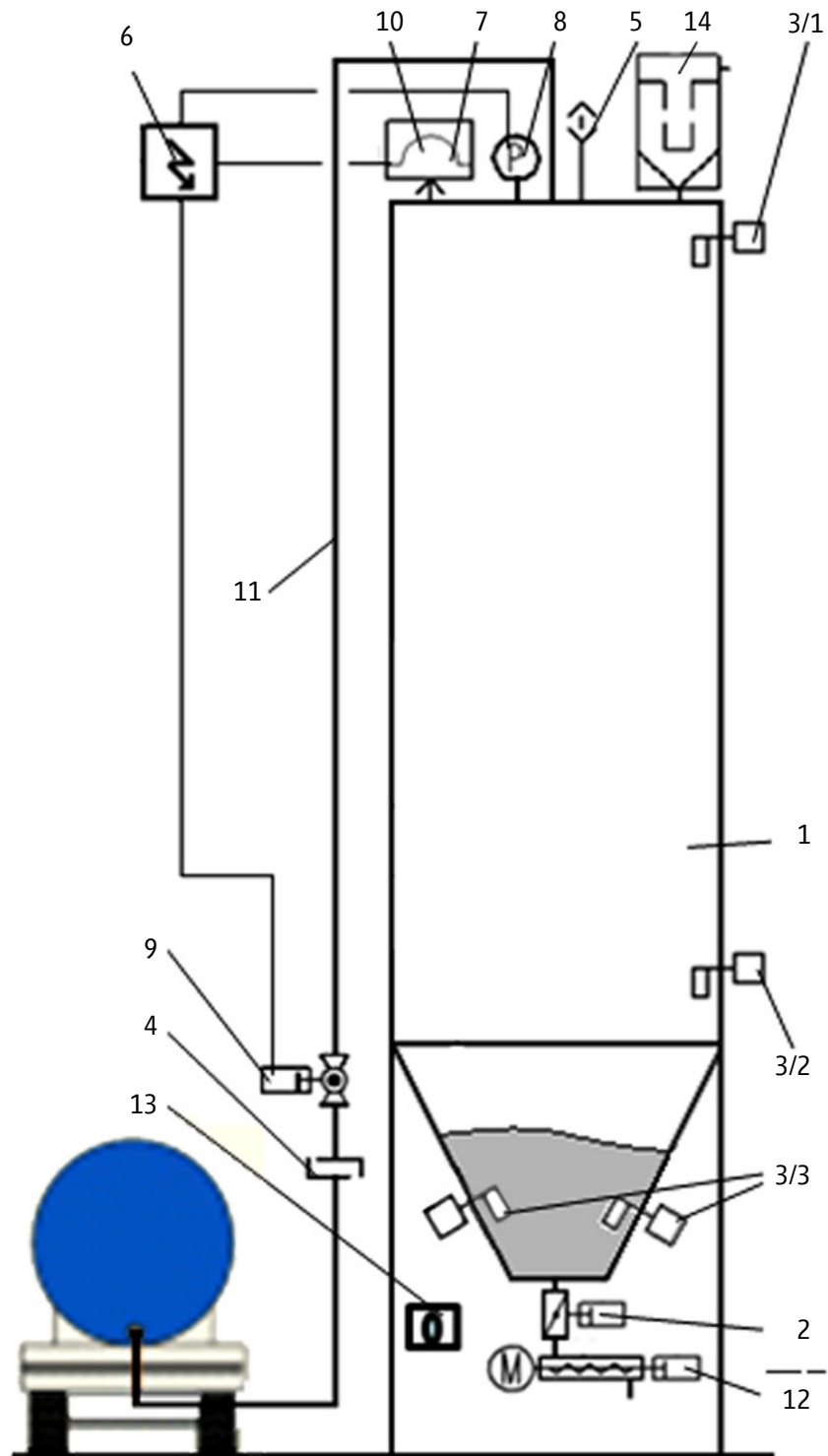


Bild 46:
Anforderungen an ein Außensilo mit Explosionsdruckentlastung und Entkopplung über Schleuse für die Austragung. (AZO GmbH & Co. KG)



1	Silo	Druckstossfest für p_{red}
2	Absperrklappe pneumatisch	Druckstossfest für p_{red} und flammendurchschlagsicher
3	Füllstandsmelder 2 x Melder 3/3 als Sicherheitsmelder mit UND-Schaltung ausgeführt	Voll-, Anforderungs-, Leermelder Druckstossfest für p_{red}
4	Kupplung	Druckstossfest für p_{red}
5	Über-/Unterdruckventil	Ansprechdruck -5/+45 mbar
6	Steuerung	Hartverdrahtung
7	Schalter an der Druckentlastung	
8	Druckschalter	Druckstossfest für p_{red}
9	Kugelhahn	Druckstossfest für p_{red}
10	Entlastungseinrichtung	Berstscheibe
11	Silofüllleitung	Druckstossfest für p_{red}
12	Dosierschnecke (z. B.)	
13	Schlüsselschalter	
14	EntlüftungsfILTER	Druckstossfest für p_{red} keine zusätzliche Entlastung für den Filter notwendig

Schaltmatrix				
Schalter von	Sicherheitsrelevante Abschaltung		Funktionale Abschaltung	
	Schalten	Bemerkungen	Schalten	Bemerkungen
7	Absperrklappe 2	schließen	Vibrationsböden	falls vorhanden stillsetzen
7	Filterabreinigung	stillsetzen		
7	Belüftungsdüsen/-boden	falls vorhanden stillsetzen		
7	Füllstandsmelder	stillsetzen		
7	Kugelhahn 9	stillsetzen		
4			Vollmelder 3/1	wird aktiviert
4			Kugelhahn 9	öffnet
8			Kugelhahn 9	Kugelhahn schließt bei 45 mbar
2 x 3/3	Absperrklappe 2	schließen	Schnecke 12	nach 6 Sek. stillsetzen
13	Kugelhahn 9	schließen		
13	Absperrklappe 2	öffnen 3/3 wird überbrückt		

4.5.3. Organisatorische Maßnahmen

- Die organisatorischen Maßnahmen ergänzen das Explosionsschutzkonzept und sind wichtige Elemente beim Vermeiden von Explosionen.
- Vor der erstmaligen Nutzung von Arbeitsplätzen in explosionsgefährdeten Bereichen muss die Explosionssicherheit der Arbeitsplätze einschließlich der vorgesehenen Arbeitsmittel und der Arbeitsumgebung sowie Maßnahmen zum Schutz von Dritten überprüft und festgestellt sein. Sämtliche zur Gewährleistung des Explosionsschutzes erforderlichen Bedingungen sind aufrechtzuerhalten. Diese Überprüfung ist von einer befähigten Person durchzuführen, die über besondere Kenntnisse auf dem Gebiet des Explosionsschutzes verfügt.
- Explosionsgefährdete Bereiche sind an ihren Zugängen zu kennzeichnen.
- Die Anlage darf nur bestimmungsgemäß, mit den für die Anlage vorgesehenen Produkten, verwendet werden.
- An der Anlage darf nur geeignetes und entsprechend eingewiesenes Personal arbeiten.
- Das Betreten von explosionsgefährdeten Bereichen durch Unbefugte ist zu verbieten.
- Lager und Wellen, die im Störfall heiße Oberflächen erzeugen können, sind regelmäßig zu überprüfen.
- Für alle Anlagenteile gilt, dass sie in intaktem bzw. technisch einwandfreiem Zustand betrieben werden und durch sorgfältige Wartung betriebssicher bleiben.
- Unterweisung der Beschäftigten durch schriftliche Anweisungen, verantwortliche Personen und evtl. Arbeitsfreigabescheine.
- Zündquellen vermeiden (z. B. durch Rauchverbot, Benutzen von geeigneten Werkzeugen und handgeführten Geräten).
- Regelmäßiges und gründliches Reinigen aller Räume. Schon geringe Staubablagerungen (einige Zehntel Millimeter) können beim Aufwir-

beln zu einer explosionsfähigen Atmosphäre führen. Es ist erforderlich, dass besonders die Betriebsräume und darin aufgestellte Anlagen regelmäßig inspiziert und sauber gehalten werden. Staubablagerungen auf Fußböden und Oberflächen von Apparaten, Kabelkanälen, Rohrleitungen, Trägern usw. sind möglichst zu vermeiden bzw. zu reinigen. Störungsbedingte Staubablagerungen müssen sofort entfernt werden. Die Staubdichtheit der Anlagenteile ist deshalb regelmäßig zu überprüfen, besonders die Dichtheit der Filterelemente.

- **Flucht- und Rettungswege kennzeichnen.**
Nach Wartungs- und Reinigungsarbeiten ist die korrekte Funktionsfähigkeit und Erdung der Anlagenteile wieder herzustellen und zu prüfen (Ableitwiderstand $< 10^6 \text{ Ohm}$).

4.5.4 Flankierender Brandschutz

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Maßnahmen ergänzen und flankieren die Explosionsschutzmaßnahmen. Diese sind notwendig, da brennbare Feststoffe in den Silos gelagert werden. Aus brennbaren Feststoffen können die beiden Schadensereignisse Explosionen und Brände entstehen. Brände sind als primäres Ereignis möglich, gefolgt von einer Explosion. Explosionen sind ebenfalls als primäres Ereignis möglich, gefolgt von einem Brand. Brände kommen aber auch als einzelnes Schadensereignis (ohne Folgeexplosion) vor. Die folgenden Brandschutzmaßnahmen beziehen sich auf die Sicherheit von Personen, den Schutz der Umwelt sowie auf Sachen mit großem Wert (Anlage, Gebäude).



Bauliche Vorkehrungen und Maßnahmen

Nationales Baurecht ist zwingend anzuwenden. Es soll nicht durch die vorliegenden Empfehlungen beeinträchtigt oder außer Kraft gesetzt werden. Insbesondere folgende Aspekte sind wichtig:

- Zu- und Abfahrt sowie Arbeits-/Aufstellfläche (z. B. Feuerwehr, Inertgasversorgung) sind frei zu halten.
- Abstände/Abtrennungen zwischen Silos bzw. Silos und Gebäude einhalten.
- Silobau-/Werkstoffe: nichtbrennbare Materialien sind vorzuziehen.
- Erforderliche verschließbare Öffnungen zum Befahren der Silos (z. B. Ausräumen von brennendem oder verbranntem Produkt) geschlossen halten.
- Angemessene Blitzschutzeinrichtungen installieren.

Anlagentechnische Vorkehrungen und Maßnahmen

- Eine frühe Branddetektion erfordert ein geeignetes Detektionskonzept (z. B. Sensorart, Redundante Ausführung, Robustheit, Positionierung) und eine Alarmierung in deren Folge weitere Maßnahmen (z. B. Abschalten der Produktzufuhr) ausgelöst werden können.
- Detektion zündwirksamer Partikel (z. B. mechanisch erzeugte Funken) in der Eintragseinrichtung, sofern mit einem Einschleppen aus vorgeschalteten Anlagenbereichen zu rechnen ist
- Schnittstellen an Silos sind so auszuführen, dass sie im Brandfall gasdicht verschlossen werden können.
- Anschlüsse und notwendige Steigleitungen sind vorzusehen, über die a) Messsonden zur Erkundung des Brandes eingeführt werden können und b) Löschmaßnahmen (z. B. Inertgaszufuhr) möglich sind.
- Im Ereignisfall muss die Verfügbarkeit von Elektrizität (z. B. Notstrom) und Löschmitteln gegeben sein.

Organisatorische Vorkehrungen und Maßnahmen

- Vorkehrungen und Maßnahmen zum Zweck des Brandschutzes sind durch dazu befähigte Personen zu prüfen, Instand zu halten (Wartung, Inspektion, Instandsetzung) und zu optimieren.
- Brandbekämpfungsmaßnahmen sollen durch eine fachkundige Person des Unternehmens (z. B. einem Koordinator) begleitet werden.
- Beschäftigte des Betreibers sind regelmäßig zu unterweisen.
- Betreiber und zuständige Feuerwehr sollten gemeinsam ein objektspezifisches, einsatztaktisches Konzept erstellen, wiederkehrend überprüfen, fortschreiben und üben.

Abwehrende Vorkehrungen und Maßnahmen

- Brandbekämpfung mit Löschwasser im Silo ist zu vermeiden (Produkt, das zum Aufquellen neigt, erhöht das Risiko der Brückenbildung).
- Brandbekämpfung durch Ausräumen: ausgeräumtes Material vorsichtig ablöschen (weicher Sprühstrahl).
- Lagerbedingungen, die zu Brückenbildungen neigen, erhöhen das Risiko einer Folgeexplosion; deshalb Brandbekämpfung mittels Inertgas (Eignung und Verfügbarkeit von Inertgas, Arbeitssicherheit beachten).
- Brandbekämpfung mit Löschschaum (Eignung und Verfügbarkeit von Löschschaum).
- Bei der Wahl des Brandbekämpfungskonzeptes ist die Standsicherheit des Silos zu berücksichtigen.
- Bei der Zufuhr von Löschmitteln ist darauf zu achten, dass das Silo durch Überdrücke nicht unzulässig belastet wird.
- Kühlen des Silos von außen.
- Bei Löschmaßnahmen konstruktive Explosionschutzmaßnahmen (z. B. Schutzabstände vor Druckentlastungsöffnungen, Berstscheiben, Wetterschutzabdeckungen) beachten!

Die in einem Betrieb objektspezifisch gewählten Vorkehrungen und Maßnahmen des Brandschutzes sind gegenüber den dort getroffenen Vorkehrungen und Maßnahmen des Explosionsschutzes auf unerwünschte Wechselwirkungen zu überprüfen.

Beispiel zum Bekämpfen des Brandes eines Getreidesilos

Das Entstehen von Bränden in Silozellen kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist der Eintrag von Zündquellen, z. B. heißer Fremdkörper oder glimmender Produktzusammenbackungen (sogenannte Glimmnester), möglich. Innerhalb von Schüttungen reicht der zur Verfügung stehende Luftsauerstoff üblicherweise nur zur Ausbildung eines örtlich begrenzten Schwel- oder Glimmbrandes aus. Dieser kann sich unbemerkt im Inneren des Schüttgutes weiter fortentwickeln und ausdehnen.

Zum anderen können Brände in Staubschüttungen durch Selbstentzündungen, auf Grund von Oxidationsprozessen oder mikrobiologischen Vorgängen ausgelöst werden. Dies gilt insbesondere bei Schüttgütern mit hohem Feuchtigkeitsgehalt ($> 15,5\%$).

Durch die schlechte Wärmeableitung aus der Schüttung kann sich das Schüttgut bis zur Selbstentzündung erwärmen.

Bei zur Selbstentzündung neigenden Produkten sind die Lagerzeiten kurz zu halten. In manchen Fällen kann ein Begrenzen der Lagerzeit auf 2-3 Tage notwendig sein.

Zum Bekämpfen eines eventuellen Brandes im Silo gibt es die Möglichkeit, im Auslaufbereich Inertgas über genormte Anschlüsse (die am Silo vorhanden sein müssen) einzuleiten und Möglichkeiten zur gefahrlosen Schüttgutentleerung im unteren Bereich der Silos vorzusehen.

Um Brandnester aus den Silos ausräumen zu können, muss im Bereich der Siloaustragung entsprechende Zugänglichkeit geschaffen wer-

den. Eine Austrageeinrichtung (z. B. ein mobiles Förderband) und eine entsprechende Freifläche müssen vorhanden sein. Durch den Prozess der Selbstentzündung können sich in Silozellen Schüttgutbrücken bilden, die durch Anbackungen des Produktes an der Silowand entstehen. Wird nun ein Teil des Schüttgutes durch den Siloauslauf abgezogen, entsteht unter der Schüttgutbrücke ein Hohlraum. Bringt man die Produktbrücke, z. B. durch Löscharbeiten zum Einsturz, wird Staub aufgewirbelt, der eine explosionsfähige Staubwolke bilden kann. Dieser Staub ist in der Regel in Form von Ablagerungen bei Getreide vorhanden.

Eine explosionsfähige Staubwolke kann auch beim Versuch, einen Silobrand mit Wasser zu löschen, entstehen. Trifft der von oben kommende Vollstrahl auf die Staubschüttung kann dadurch Staub aufgewirbelt werden.

Bei Schüttgutbränden, können durch Pyrolyse brennbare Schwelgase entstehen, wenn organische Schüttgüter hohen Temperaturen, wie man sie im Umfeld von Schwelbränden vorfindet, ausgesetzt sind. Schwelgase bestehen aus einer Vielzahl brennbarer organischer Verbindungen. Zumeist besitzen sie eine höhere Dichte als Luft, sind also schwerer und sammeln sich in Schüttungen bzw. an deren Oberfläche an. Durch Vermischen mit Luft kann es zu einer explosionsfähigen Atmosphäre oberhalb der Schüttung kommen. Solche explosionsfähigen Gemische können bei Zündung durch einen Schwelbrand oder eine andere Zündquelle eine Explosion erzeugen.

Silobrände sind am zuverlässigsten und sichersten durch Inertisieren zu bekämpfen. Als Inertgase eignen sich Stickstoff (N_2), Edelgase oder auch Kohlendioxid (CO_2). Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz der beteiligten Personen (wegen Erstickungsgefahr) sind dabei erforderlich. Inertgas sollte am Siloauslauf in das Silo eingebracht werden, um Hohlräume unter einer möglichen Produktbrücke zu erreichen. Das Aufgeben von



CO₂ (schwerer als Luft) von oben über die Einstiegsdeckel ist nur bei feinkörnigem Material, das von unten nicht mit dem Inertgas durchdrungen werden kann, sinnvoll. Beim Durchströmen einer Schüttung mit CO₂ von unten kann der Brand zusätzlich angefacht werden.

Um das Entweichen des Inertgases bzw. die Sauerstoffzufuhr von oben zu verhindern, kann ein Schaumteppich auf die Schüttgutoberfläche gelegt werden. Durch längeres Inertisieren wird der offene Brand gelöscht; ein restloses Ablöschen der Glutnester ist damit jedoch meist nicht zu erreichen.

Eine Brandwache ist unbedingt einzurichten, die wieder aufflammende Glimmbrände erkennt und Gegenmaßnahmen einleiten kann.

Um nach dem Ablöschen eines vorhandenen offenen Brandes die eventuell verbleibenden gefährlichen Glutnester abzulöschen und dadurch ein erneutes Aufflammen zu vermeiden, muss der Siloinhalt unter weiterhin vorhandener Inertgasatmosphäre gefahrlos ausgetragen werden können. Sollte keine geeignete Möglichkeit über den normalen Auslauf bestehen, sind ausreichend dimensionierte Notaustragsöffnungen notwendig. Durch diese Notaustragsöffnungen muss das Schüttgut vorsichtig - ohne Staub aufzuwirbeln - am besten über offene Transportbänder ausgetragen werden.

Beim Austragen ist das Produkt auf noch vorhandene Glimmnester zu überprüfen, um ein erneutes Anfachen des Brandes außerhalb des Silos zu verhindern. Zur Sicherheit kann das Produkt auf dem Band zusätzlich mit einem feinen Sprühstrahl aus Wasser benetzt werden, ohne dass Staub aufgewirbelt wird.

Für die Feuerwehr, den Inertgaslieferanten und den ggf. notwendigen Verdampfer sind geeignete Stellplätze vorzusehen.

4.6. Schnittstellen

Als Schnittstellen sind die Einrichtungen zum Befüllen und Entleeren der Silos, Bunker und Lagerhallen sowie die Prozessanschlüsse (z. B. Belüftungs- oder Heiz- und Kühlleitungsanschlüsse) zu sehen. Wichtig sind beim Befüllen und Entleeren die Produkteigenschaften (explosionstechnische Kenngrößen und mechanische Schüttguteigenschaften) der Schüttgüter. Auch bei körnigen Schüttgütern kann durch mechanische oder pneumatische Förderverfahren Abrieb in Form von Feinstaub entstehen. Deshalb ist insbesondere bei Anlagen, die mehrere Verarbeitungsschritte (z. B. Produktannahme, Reinigen und Fördern) beinhalten, möglicherweise mit unterschiedlichen Produktzuständen zu rechnen. Des weiteren können sich durch z. B. Trocknungs- oder Kühlprozesse evtl. unterschiedliche Lagertemperaturen ergeben.

Beispiele von Schnittstellen

- Befüllen von Silozellen über Stetigförderer: pneumatische Fördereinrichtung über Rohrleitung
- Zyklon bzw. Abscheider (z. B. mit Zellenradschleuse)
- Trogkettenförderer, Förderschnecken, Förderbänder und Elevatoren

Befüllen von Silozellen über freien Fall:

- Schüttgasse
- Entleerstation für flexible Schüttgutbehälter
- Entleerstation für Container

Für das jeweils angeschlossene Gerät an der Schnittstelle zur Lagerung gilt:

Resultierend aus der Zündgefahrenbewertung sind die notwendigen Schutzmaßnahmen festzulegen. Die Zündquellen, die im angeschlossenen Gerät selbst nicht ausgeschlossen werden können, sind besonders zu berücksichtigen. Für die Zündgefahrenbewertung siehe z. B. „Beispiel-

sammlung – Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten, Teil 2, Stetigförderer, Übergabestellen und Empfangsbehälter, IVSS Beispielsammlung Nr. 2057, ISBN 978-92-843-7182-2“

Befüllen von Räumen

- Radlader, LKW
- Förderband oder Förderschnecke
- Schüttgasse
- pneumatische Fördereinrichtung über Rohrleitung (z. B. Holzpellets in Lagerraum)

Hier gelten die Aussagen zum Befüllen von Silozellen mit angeschlossenen Stetigförderern (s. Kapitel 2.2.1). Zusätzlich sind Zündquellen von mobilen Geräten, wie Radladern, LKW (z. B. heiße Oberflächen, heiße Abgase, mechanische Funken, Entladungen statischer Elektrizität) aufgrund auftretender Staubwolken zu berücksichtigen.

Entleeren von Silozellen über Stetigförderer

- Zellenradschleuse oder Dosierrührwerk
- Förderband oder Förderschnecke
- Trogkettenförderer oder Elevator

Entleerung von Silozellen mittels Schwerkraft

- Abschlussklappe oder Flachschieber
- Dosierschieber oder Flügelklappen

Von der Silozelle können an das jeweils angeschlossene Gerät Zündquellen übertragen werden (z. B. Glimmnester, elektrostatische Ladung, Fremdkörper, heißes oder brennendes Produkt). Diese möglichen Zündquellen sind in der Risikobeurteilung zu betrachten und Maßnahmen zu deren Vermeidung zu treffen sowie nachfolgende Anlagenteile entsprechend zu schützen.

Entleeren von Räumen

- Radlader, LKW
- Räumschnecke, Schubboden
- Förderband

Hier gelten die Aussagen zum Befüllen von Räumen (s. o.). Zusätzlich sind Zündquellen von mobilen Geräten wie Radladern (z. B. heiße Oberflächen, heiße Abgase, mechanische Funken, Entladungen statischer Elektrizität) aufgrund auftretender Staubwolken zu berücksichtigen.

Prozessanschlüsse

- Aspirationsleitungen
- Belüftungsleitungen
- Trocknungsleitungen
- Heiz- und Kühlleitungen
- Begasungsleitungen
- Probennehmer
- Sperrluft (z. B. für Lagerabdichtung)
- Druckluft (z. B. für Filterspülung)

Die Prozessanschlüsse mit ihren Medien (z. B. Luft, Gas, heiße Flüssigkeit) sind in die Risikobewertung der Lagerzellen einzubeziehen. Üblicherweise auftretende Zündquellen sind heiße Gase, heiße Oberflächen, Entladungen statischer Elektrizität, mechanische Funken (z. B. Probennehmer).

Das Entstehen explosionsfähiger Atmosphäre durch das Aufwirbeln von Staub, bedingt durch das Einbringen von Luft über Lagerabdichtungen oder Belüftungseinrichtungen, ist zu berücksichtigen.



Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Siloanlage mit Außensilos (AZO GmbH & Co. KG)	7	Bild 15: Silo Be- und EntlüftungsfILTER als Spülluftfilter ausgeführt (Bild A und B: AZO GmbH & Co. KG; Bild C: WAM GmbH)	16
Bild 2: Lagersilo mit Befüllung von Silofahrzeug (AZO GmbH & Co. KG)	8	Bild 16: geschlossene Lagerbehälter aus unterschiedlichen Wandmaterialien (AZO GmbH & Co. KG)	17
Bild 3: Außensilo mit verfahrenstechnischer Prozessanlage	9	Bild 17: Flachbodensilos mit integrierten Ausräumschnecken.....	18
Bild 4: Abscheider mit Druckentlastungsklappe auf Pufferbehälter	10	Bild 18: Halle mit loser Lagerung.....	19
Bild 5: Silo mit seitlicher Explosionsdruckentlastung, Befüllung über Zyklonabscheider	10	Bild 19: Staubwolkenbildung bei offenem Schüttgutumschlag.....	19
Bild 6: Silobefüllung über Sackeinfülltrichter (AZO GmbH & Co. KG)	10	Bild 20: Bereiche unterschiedlicher Fließfähigkeit ffc	20
Bild 7: Silobefüllung aus FIBC's, Entleerung der FIBC's mittels Schwerkraft (AZO GmbH & Co. KG)	11	Bild 21: Fließfähigkeitsfaktor ffc für typische Schüttgüter	21
Bild 8: Silobefüllung über Drehrohrverteiler (AZO GmbH & Co. KG).....	11	Bild 22: Fließprofile von Schüttgütern.....	21
Bild 9: Systembild zur Verdeutlichung zweier Befüllmethoden.....	12	Bild 23: Fließbilder von schlecht fließenden Schüttgütern.....	23
Bild 10: Beispiel einer pneumatischen Druckförderung	13	Bild 24: Siloentleerung über ein Verlade teleskop (A), Verladeteleskop im Detail (B) (AZO GmbH & Co. KG)	23
Bild 11: Beispiel einer pneumatischen Saugförderung.....	14	Bild 25: Schneckendosierer (links: AZO GmbH & Co. KG).....	24
Bild 12: Silofahrzeug angeschlossen an Befüllleitungen der Lagersilos (AZO GmbH & Co. KG)	15	Bild 26: Siloentleerung über eine Vibrationsrinne (links: AZO GmbH & Co. KG).....	24
Bild 13: Silofahrzeug in Kippstellung zur Befüllung der Lagersilos (AZO GmbH & Co. KG)	15	Bild 27: Siloentleerung mittels flexibler Schrägschnecke.....	25
Bild 14: stationäres Gebläse mit integrierter Funkensperre (AZO GmbH & Co. KG)	15	Bild 28: Bandförderer zum Transport großer Produktmengen über weite Strecken.....	25
		Bild 29: Schema eines Trogkettenförderers.....	26
		Bild 30: Ausräumschnecken	26



Bild 31: Siloreihe mit Austragung in pneumatische Förderleitungen mittels Zellenradschleuse (AZO GmbH & Co. KG)	27
Bild 32: Siloaustragung mit Vibrationsboden und Zellenradschleuse (AZO GmbH & Co. KG)	28
Bild 33: Belüftungsboden (AZO GmbH & Co. KG)	28
Bild 34: Silokonus mit waagerechter Räumschnecke (rechts: AZO GmbH & Co. KG).....	29
Bild 35: Entlastung von Silogebäuden aus Stahlbeton ohne Aspiration	33
Bild 37: Silos mit Maschinengebäude und Druckentlastungsflächen	34
Bild 38: Notausstieg aus dem Silokeller	34
Bild 39: Übergang mit Gitterboden	35
Bild 40: Siloboden mit Förderband und splitterfreien Fensterelementen als Druckentlastung	38
Bild 41: Explosionsübertragung durch Rohrleitungen und notwendige Entkopplung	51
Bild 42: Explosionstechnische Entkopplung durch Produktvorlage	53
Bild 43: Zustand des Produktpfropfens nach dem Leerfahren der Schnecke	55
Bild 44: Verwendung einer Rohrförderschnecke zur explosions-technischen Entkopplung	55
Bild 45: Außensilo mit Explosionsdruckentlastung und Entkopplung über Schleuse für die Austragung (AZO GmbH & Co. KG)	56
Bild 46: Außensilo mit Explosionsdruckentlastung und Entkopplung über Produktvorlage in Verbindung mit einer Austrags- und Dosierschnecke (AZO GmbH & Co. KG)	58

Index

A

Ableitfähigkeit.....	15
Abluftfilter	17
Abluftleitungen	13
Abreißkonstruktionen	37
Anbacken	42
Ansprechdruck.....	34, 35
Aspirationsleitungen.....	32
Aufwirbelungen	42
Ausräumschnecken	18
Außensilos	17
Austragshilfen	24, 28
Austragsschnecke	28

B

Bandförderer	25, 33
Baurecht	61
befähigte Personen.....	61
Belüftungsboden	33
Berstkonstruktionen.....	36
Blitzschlag.....	43, 49
Blitzschutzeinrichtungen	61
Brand- und Temperaturüberwachung.....	33
Brandbekämpfung.....	61
Branddetektion	61
Brandgasmelder	48
Brandschutzmaßnahmen	60
Brennzahl	31, 48
Brückenbildung	22, 27, 28
Büschelentladungen	49

D

Druckanstiegsgeschwindigkeit.....	32
Druckentlastung	34, 35, 47
Druckentlastungsfläche.....	32, 37
Druckentlastungsöffnung	36
Druckfeste Bauweise	33, 50
Druckförderung	13, 14, 15
Druckstoßfeste Bauweise.....	50
Durchgangsspannung	36
Durchschlagsspannung	49

E

Einstiegsöffnungen	37
Elektrische Anlagen	43, 48
Entkopplung durch Produktvorlage	53, 54
Entkopplung durch Rohrförderschnecke.....	54
Entkopplungseinrichtungen	56
Entlastungseinrichtungen	32
Entlastungsflächen	32, 35
Entlastungsöffnungen.....	35
Entlastungsschlote.....	50, 52
Erdung.....	15, 49, 60
exotherme Zersetzung	31
Explosionsdruckentlastung....	10, 34, 35, 43, 55
Explosionserkennung	53
Explosionsfeste Bauweise	31
Explosionsgefährdete Bereiche.....	60
Explosionsgrenze	31
Explosionsheftigkeit.....	32
Explosionsschutzventil	50, 52
explosionstechnische Entkopplung.....	22, 43, 50, 53, 54, 55
Explosionsübertragung	50, 52
Explosionsunterdrückung	43, 50

F

Feinstaubanteil.....	8, 32
Fensterscheiben.....	39
Feuchtigkeit	8, 22, 49
Filteranlagen.....	52
Flachbodensilos.....	17
Flammen.....	52
Flammenübertragung	35, 54
Flankierender Brandschutz.....	60
Fließeigenschaften	20
Fließprofile	20
Fließbrinnen	27
Flucht- und Rettungswege.....	60
Fremdkörpereintrag	48
Füllleitung	16, 17
Füllungsgrad	54
Funkensperre	15, 55

**G**

Gebäudereaktion	38
Gebäudestatik	45, 47
Gebläse	15
Geräteklasse	49
Gleitstielbüschelentladungen	44
Glimmnester	8, 43, 49
Glimmtemperatur	31

H

heiße Gase	43, 48, 64
heiße Oberflächen	43, 48, 64
Heizungen	48

I

Inertgas	61, 62, 63
Inertisierung	33, 49
Inhomogenität	32
Innensilos	10, 17
isolierende Beschichtungen	49

K

Kernfluss	20
kohäsiv	22
Konstruktive	
Explosionsschutzmaßnahmen	49, 50
Konzentrationsbegrenzung	31
Korngrößenverteilung	31
kritischer Durchmesser	27
K _{st} -Wert	31, 34
Kühlaggregate	14

L

Lagertemperaturüberwachung	47, 48
leitfähige Werkstoffe	48
Löschmittel	53
Löschmittelsperre	50, 52
Löschschaum	61
Löschwasser	61
lose Lagerung	19
Luftkanonen	28

M

Massenfluss	20, 54
Maximaler Explosionsüberdruck	31
Mechanisch erzeugte Funken	43, 48, 61
Mindestzündenergie	30, 49, 54
Mindestzündtemperatur	31
Mischsilos	48

N

Notausstieg	34
Notaustragsöffnungen	63
Notfallmanagement	33
Notfallpläne	33

O

Organisatorische Maßnahmen	10, 35, 48, 60
----------------------------------	----------------

P

Partikelform	30
Partikelgrößenverteilung	30
Phlegmatisierung	33, 49
Pneumatische Förderanlagen	13
Pneumatische Siloentleereinrichtungen	27
Produkthanftungen	49
Produktpfropfen	55
Produktvorlage	22, 53, 54
Prozessanschlüsse	63, 64

R

Rauchverbot	45, 60
Räumschnecke	29
reduzierter Explosionsdruck	32
Reinigungspraxis	10
Risikobeurteilung	5, 43, 64
Rohgasraum	39

S

Sauerstoffgrenzkonzentration	31
Saugförderung	13, 14
Schachtbildung	22
Schneckendosierer	24
Schnellschlussschieber	50, 52
Schrägschnecke	25
Schüttgutbrücke	33
Schüttguthallen	42
Schüttkegelentladungen	33, 49
Schwelgase	45, 62
Schwelpunkt	31
schwerfließende Schüttgüter	27
Sedimentationsverhalten	32
Selbstentzündung	16, 22, 49, 62
Siloböden	34, 37, 38
Silofahrzeug	13, 23, 55
Statische Elektrizität	33, 43, 48
Staubablagerungen	35, 37, 42
Staubsauger	42
Staubungsneigung	31, 40
Staubverteilungen	50
Staubwolken	32, 64
Stetigförderer	10, 63, 64

T

tote Zonen	22
Trogkettenförderer	25, 63, 64

U

Überdruckventil	10
Überfüllen	20
Ultraschall	43, 49
Unterweisung	33, 60

V

Verbrennungsgeschwindigkeit	30
verdrängte Luft	20
Verladeteleskop	23
Vermeiden brennbarer Stäube	31
Vermeiden wirksamer Zündquellen	71
Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre	43
Verschleiß	16
Vibrationsböden	27, 28
Vibrationsförderer	24
Vollmelder	20
Vorbeugender Explosionsschutz	31

W

Wellenlagerungen	48
Wetterschutzräume	34

Z

zeitlicher Druckanstieg	30
Zellenradschleuse	27, 29, 32, 50, 52, 63
Zoneneinteilung	32, 39, 43
Zünddurchschlagsicherheit	52
Zündquelle	18, 48, 49, 62
Zweigege-Weichen	13
Zyklon	10, 32, 63







Schriftenreihe der IVSS (Explosionsschutz)



IVSS Sektion Chemie



IVSS Sektion für Maschinen- und Systemsicherheit

- Staubexplosionen – Schutz vor Explosionen durch brennbare Stäube, ISSA-32 IVSS Sektion Chemie, Stand 2002, 2. Auflage (PDF in deutscher, englischer und italienischer Sprache)
- Staubexplosionseignisse, ISSA-43 IVSS Sektion Chemie, Stand 2005, 1. Auflage (PDF in deutscher und englischer Sprache)
- Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen, Festlegen von Maßnahmen Teil 7 Gefährdungen durch Explosionen, ISSA-42 IVSS Sektionen Chemie und Maschinen- und Systemsicherheit, Stand 2021, 2. Auflage (PDF in deutscher Sprache), ISBN 978-92-843-0156-0
- Gasexplosionen – Schutz vor Explosionen durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel im Gemisch mit Luft, ISSA-34 IVSS-Sektion Chemie, Stand 1999 (in Überarbeitung)
- Vermeiden wirksamer Zündquellen in explosionsgefährdeten Bereichen, ISSA-40 IVSS Sektionen Chemie und Maschinen- und Systemsicherheit, Stand 2013 (in Überarbeitung), 1. Auflage (PDF in deutscher und französischer Sprache), ISBN 978-92-843-7184-6
- Beispielsammlung „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten“, Teil 1: Mühlen, Brecher, Mischer, Abscheider, Siebmaschinen, ISSA 38 IVSS Sektionen Maschinen- und Systemsicherheit und Chemie, Stand 2021 (PDF in deutscher Sprache), ISBN 978-92-843-2182-7
- Beispielsammlung „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten“, Teil 2: Stetigförderer, Übergabestellen und Empfangsbehälter, ISSA 39 IVSS Sektionen Maschinen- und Systemsicherheit und Chemie, Stand 2014 (in Überarbeitung, PDF in deutscher und englischer Sprache), ISBN 978-92-843-7182-2
- Das PAAG-/HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden, Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit, ISSA-01 IVSS Sektion Chemie, Stand 03/2020, 5. Auflage (PDF in deutscher Sprache), ISBN 92-843-7037-X

Die IVSS

Soziale Sicherheit schaffen

Die IVSS, die Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit, ist die weltweit führende Dachorganisation für Institutionen, Regierungsstellen und Behörden, die sich mit dem Thema soziale Sicherheit befassen.

Soziale Sicherheit bedeutet im engeren Sinne Schutz vor den Folgen „sozialer Risiken“. Dazu zählen neben der Erwerbsminderung durch Arbeitsunfall, Berufskrankheit und Berufsunfähigkeit auch Krankheit, Arbeitslosigkeit, Übernahme von Familienlasten, Altern und Tod von Erwerbstätigen. Im weiteren Sinne umfasst soziale Sicherheit auch eine aktive Arbeitsmarktpolitik, ein öffentliches Bildungswesen sowie eine ausgleichende Steuerpolitik.

Die IVSS wurde 1927 von 17 europäischen Nichtregierungsorganisationen als „Internationale Zentralstelle der Sozialversicherungsträger“ gegründet. Heute zählt die IVSS rund 350 Institutionen, Regierungsstellen und Behörden in über 150 Ländern auf allen Kontinenten und ist bei der Internationalen Arbeitsorganisation ILO der Vereinten Nationen in Genf angesiedelt. Die inhaltliche Arbeit erfolgt in 13 Fachausschüssen, unter anderem zu den Schwerpunktthemen Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten, Gesundheitsleistungen und Krankenversicherung, Beschäftigungspolitik und Arbeitslosenversicherung sowie Familienleistungen und Hinterbliebenenversicherung.

Arbeitsrisiken vorbeugen

Eine wichtige Rolle innerhalb der IVSS spielt der „Besondere Ausschuss für Prävention“. Dieser besteht aus 14 internationalen Sektionen und befasst sich mit arbeitsbedingten Risiken in verschiedenen Branchen wie chemische Industrie, Bergbau, Elektrizität und Transportwirtschaft, aber auch mit Querschnittsthemen wie Maschinen- und Systemsicherheit, Information und Präventionskultur. Der Besondere Ausschuss koordiniert die gemeinsamen Tätigkeiten der internationalen Sektionen für Prävention im Bereich Risiken sowie weitere Präventionstätigkeiten der IVSS.

Als eine der ersten Sektionen des Besonderen Ausschusses wurde im Juni 1970 in Frankfurt am Main die Internationale Sektion für Prävention in der chemischen Industrie gegründet. Sie engagiert sich für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen und verwandten Industrie, insbesondere in den Bereichen Kunststoffe und Gummi, Lacke und Farben, Pharmazeutik und Kosmetik sowie Spezialchemikalien und Mineralölverarbeitung. Vorsitz und Sekretariat liegen bei der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie in Heidelberg.

1975 wurde die Internationale Sektion der IVSS für Maschinen- und Systemsicherheit gegründet. Sie hat die Zielsetzung, auf dem Gebiet der Maschinen- und Systemsicherheit weltweit Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit zu erhöhen. Vorsitz und Sekretariat liegen bei der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe in Mannheim.



Chemische Industrie



Maschinen- und Systemsicherheit



Transportwesen



Bauwirtschaft



Information



Bergbau



Landwirtschaft



Fachwissen kommunizieren

Ein besonderer thematischer Schwerpunkt in vielen Industriezweigen, z. B. der chemischen Industrie und Nahrungsmittelindustrie, ist der Umgang mit Explosionsrisiken. 1978 wurden daher bei der Sektion Chemie die Arbeitsgruppen „Gefährliche Stoffe“ und „Explosionsschutz“ gebildet. Um Synergieeffekte auszuschöpfen und die Effizienz zu erhöhen, fusionierte die Arbeitsgruppe „Explosionsschutz“ im Jahre 2008 mit dem entsprechenden Arbeitskreis der Sektion Maschinen- und Systemsicherheit.

In den Arbeitsgruppen werden intensive informelle Diskussionen geführt, darüber hinaus werden Broschüren und Unterweisungsmedien erarbeitet sowie Workshops organisiert, um den internationalen Erfahrungsaustausch unter Fachleuten zu fördern und für bestimmte Probleme zielführende Lösungen zu erarbeiten.

Die Sektionen Chemie und Maschinen- und Systemsicherheit möchten auf diesem Weg einen Beitrag zu einem hohen und unter Industrieländern vergleichbaren Stand der Technik leisten und ihr Wissen auch den industriell noch weniger entwickelten Ländern weitergeben.

Autoren

Dr. A. Arnold, Mannheim (D)
Prof. Dr. U. Barth, Wuppertal (D)
Dr. M. Glor, Allschwil (CH)
A. Harmanny, Kontich (B)
Dr. Z. Kramar, Ljubljana (SI)
M. Mayer, Osterburken (D)
G. Nied, Osterburken (D)
Dr. R. Ott, Meggen (CH)
Prof. Dr. S. Radandt, Brühl-Rohrhof (D)
Dr. M. Scheid, Frick (CH)
G. Van Laar, Hamm (D)

Mitarbeit

Dr. H.-J. Bischoff, Mannheim (D)
M. Bloch, Altfortville (F)
Dr. S. Causemann, Sankt Augustin (D)
Dr. M. Gschwind, Luzern (CH)
K. Kopia, Wien (A)
Dr. Oswald Losert, Heidelberg (D)
F. Marc, Paris (F)
J. Parra, Münchwilen (CH)
Dr. G. Pellmont, Binningen (CH)
B. Poga, Heidelberg (D)
F. Pera, Roma (I)
B. Sallé, Paris (F)
R. Siwek, Kaiseraugst (CH)
M. von Arx, Luzern (CH)

Grafik

D. Settele, Mannheim (D)



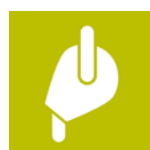
Arbeitsschutz
im Gesund-
heitswesen



Elektrizität,
Gas, Wasser



Forschung



Eisen-
und Metallin-
dustrie



Präventions-
kultur



Erziehung
und Ausbil-
dung



Handel



issa

INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT | IVSS

Sektion für *Prävention in der chemischen Industrie*
Sektion für *Maschinen- und Systemsicherheit*

Explosionssicherheit von Schüttgutanlagen

Modul: Lagerung

Diese IVSS-Broschüre „Lagerung“ ist ein Modul der Serie „Modulare Struktur“ zur Explosionssicherheit von Schüttgutanlagen. Für diese IVSS-Broschüren „Modulare Struktur“ wurde ein Konzept erarbeitet, das es erleichtert, die Beurteilung für eine Anlage hinsichtlich des Explosionsrisikos in kleinere Einheiten, sogenannte „Module“ aufzuteilen. Neben einer übersichtlichen Gestaltung ist damit eine gezielte und prozessorientierte Betrachtungsweise möglich. Damit können einzelne Beurteilungen von Maschinen aus den IVSS-Beispielsammlungen „Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten“, Teil 1 und Teil 2 und von Prozessen/Modulen aus dieser Serie von IVSS-Broschüren genutzt und am Ende miteinander für die Gesamt-Anlagen-Risikobeurteilung verknüpft werden.

Ausgabe 04/2025
ISBN 978-92-843-8131-9