



Statische Elektrizität

*Zündgefahren
und Schutz-
massnahmen*



**Internationale Sektion der IVSS
für die Verhütung von Arbeitsunfällen
und Berufskrankheiten in der
chemischen Industrie**

**Kurfürsten Anlage 62
D-69115 Heidelberg
Deutschland**



DIE INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT (IVSS)

hat über 300 Mitglieder (Regierungsbehörden und Anstalten) in mehr als 120 Staaten, von denen sich die Hälfte mit der Arbeitssicherheit befassen. Sitz der IVSS ist Genf, beim Internationalen Arbeitsamt. Ihr Hauptziel ist die Förderung und der Ausbau der SOZIALEN SICHERHEIT in allen Teilen der Welt.

Zur Intensivierung der Arbeitssicherheit in den Betrieben ist seit 1970 für den Bereich der chemischen Industrie einschliesslich der Kunststoff-, Sprengstoff-, Mineralöl- und Gummiindustrie die



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS FÜR DIE VERHÜTUNG VON ARBEITSUNFÄLLEN UND BERUFSKRANKHEITEN IN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE

gebildet worden. Vorsitz und Sekretariat liegen bei der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, D-69115 Heidelberg.

Zur Verbesserung der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes in den Betrieben wurde 1975 die



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS FÜR MASCHINENSICHERHEIT

gegründet. Sie behandelt Fragen zur Sicherheit von Maschinen, Anlagen und Systemen. Vorsitz und Sekretariat: Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, D-68165 Mannheim.

Statische Elektrizität

Zündgefahren und Schutzmassnahmen

Kompendium für die Praxis

Herausgeber

Internationale Sektion für die Verhütung von Arbeitsunfällen und
Berufskrankheiten in der chemischen Industrie der
Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS)
Kurfürsten Anlage 62
D-69 115 Heidelberg
Deutschland

Vorwort

Die Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS) hat sich zum Ziel gesetzt, durch fachlich orientierte Sektionen die Risiken, die in der sozialen Sicherheit wahrgenommen werden, wie Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten, durch Informationsaustausch, Veröffentlichungen und Kolloquien aufzuzeigen und Vorschläge zu deren Verhütung zu machen.

Der Vorstand der «Sektion Chemie» der IVSS hat eine »Arbeitsgruppe Explosionschutz« eingesetzt, um den internationalen Erfahrungsaustausch unter Fachleuten zu fördern und für bestimmte Probleme gemeinsame Lösungen zu erarbeiten. Sie will auf diesem Weg einen Beitrag zu einem hohen und unter Industrieländern vergleichbaren Stand der Technik auf dem Gebiet leisten. Sie ist gewillt, ihr Wissen den industriell noch weniger entwickelten Ländern weiterzugeben.

Dieses Kompendium - das in enger Zusammenarbeit mit der Sektion »Maschinensicherheit« der IVSS erarbeitet wurde - soll projektierenden Ingenieuren, Betriebsleitern, Sicherheitsfachkräften usw. die Möglichkeit geben, ohne spezielle Kenntnisse auf dem Gebiet der statischen Elektrizität im eigenen Betrieb oder beim Bau, bei der Ausrüstung und Aufstellung von Anlagen zu beurteilen, ob Zündgefahren durch statische Elektrizität entstehen können. Zur Lösung der Frage, ob Schutzmassnahmen erforderlich und möglich sind, ist das Kompendium nicht gedacht, da aufgrund der sehr unterschiedlichen nationalen Vorschriften häufig keine verbindlichen Aussagen gemacht werden können. Es werden vielmehr die Probleme aufgezeigt und Lösungen zur Erfüllung der Schutzziele formuliert.



Lauer
Vorsitzender des Vorstandes
der Sektion Chemie

Mitarbeiter und Autoren

Vorsitz

Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA)
Dr. R. J. Ott

Unter Mitarbeit von

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Wien	(A)
Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg	(D)
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN), Mannheim	(D)
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA), St. Augustin	(D)
Ciba-Geigy AG, Basel	(CH)
Directoraat-Generaal van de Arbeid, Den Haag	(NL)
Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Paris	(F)
Pellmont Explosionsschutz, Binningen/Basel	(CH)
Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Luzern	(CH)
Stazione Sperimentale per i Combustibili (SSC), San Donato Milanese/Milano	(I)
Stichting Sereb, Geldermalsen	(NL)

Autoren

Dipl.-Ing. H. Beck, St. Augustin	(D)	Dipl.-Ing. P. C. Parlevliet,	
Prof. Dr. A. Fiumara, Milano	(I)	Den Haag	(NL)
Dr. M. Glor, Basel	(CH)	Dr. G. Pellmont, Binningen/Basel	(CH)
Dipl.-Ing. K. Isselhard, Heidelberg	(D)	Ing. J.-M. Petit, Paris	(F)
Ing. J. P. M. M. Meissen,		Prof. Dr. S. Radandt, Mannheim	(D)
Geldermalsen	(NL)	Dr. H. Rainbauer, Wien	(A)
Dr. R. J. Ott, Luzern	(CH)	Dr. L. Rossinelli, Luzern	(CH)
		Dipl. Chem. F. Scheller, Luzern	(CH)

Gestaltung und Grafik

Dr. M. Glor, Basel	(CH)
Dr. R. J. Ott, Luzern	(CH)
Dipl.-Designer D. Settele, Mannheim	(D)

Inhalt

Explosionsgefahr und elektrostatische Aufladung - Übersicht	8
Entstehen elektrostatischer Aufladungen (Ladungstrennung)	16
Ladungsanhäufung und Ladungsableitung	20
Entladungsarten und Zündfähigkeit	26
Massnahmen gegen Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen	46
Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten und Gasen	51
Umgang mit Suspensionen und Emulsionen brennbarer Flüssigkeiten	60
Umgang mit brennbaren Schüttgütern ohne brennbare Gase und Dämpfe	62
Umgang mit Schüttgütern, die brennbare Lösemittel enthalten	66
Literatur	68
Index	69
Schriftenreihe IVSS - Explosionsschutz	73

Explosionsgefahr und elektrostatische Aufladung Übersicht

Wann besteht Explosionsgefahr?

Explosionsgefahr kann bestehen, wenn im Betrieb brennbare Gase, Flüssigkeiten oder Stäube hergestellt, gelagert oder verarbeitet werden und dabei Gase, Dämpfe, Nebel (Flüssigkeitströpfchen) oder Stäube im Gemisch mit Luft (explosionsfähiges Gemisch) auftreten (siehe IVSS Broschüren «Gasexplosionen» und «Staubexplosionen»).

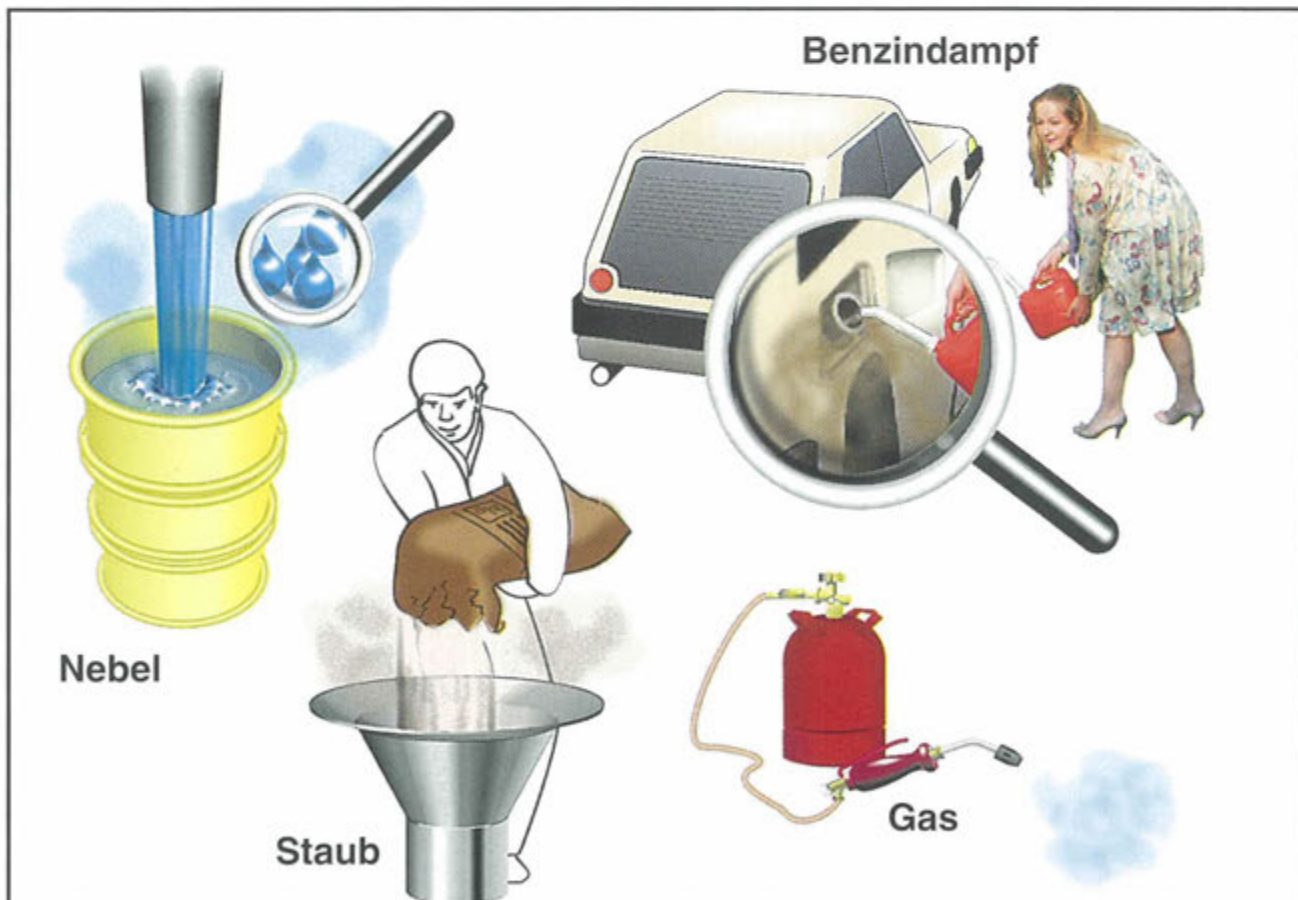


Abb. 1: Beispiele für das Freisetzen von brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln und Stäuben

Was ist ein explosionsfähiges Gemisch?

Ein explosionsfähiges Gemisch liegt dann vor, wenn brennbare Gase, Dämpfe, Nebel oder Stäube in solchen Mengen in Luft vorliegen, dass sich nach erfolgter Entzündung eine selbständige Flammenausbreitung ergibt (Explosion).

Wann kommt es zu einer Explosion?

Zu einer Explosion kann es kommen, wenn gleichzeitig und am selben Ort

- Brennstoff (Gas, Dampf, Nebel oder Staub) in hinreichender Menge und Verteilung und
- für die Verbrennung ausreichend Sauerstoff (in der Regel Luft) und
- eine wirksame Zündquelle vorliegen.

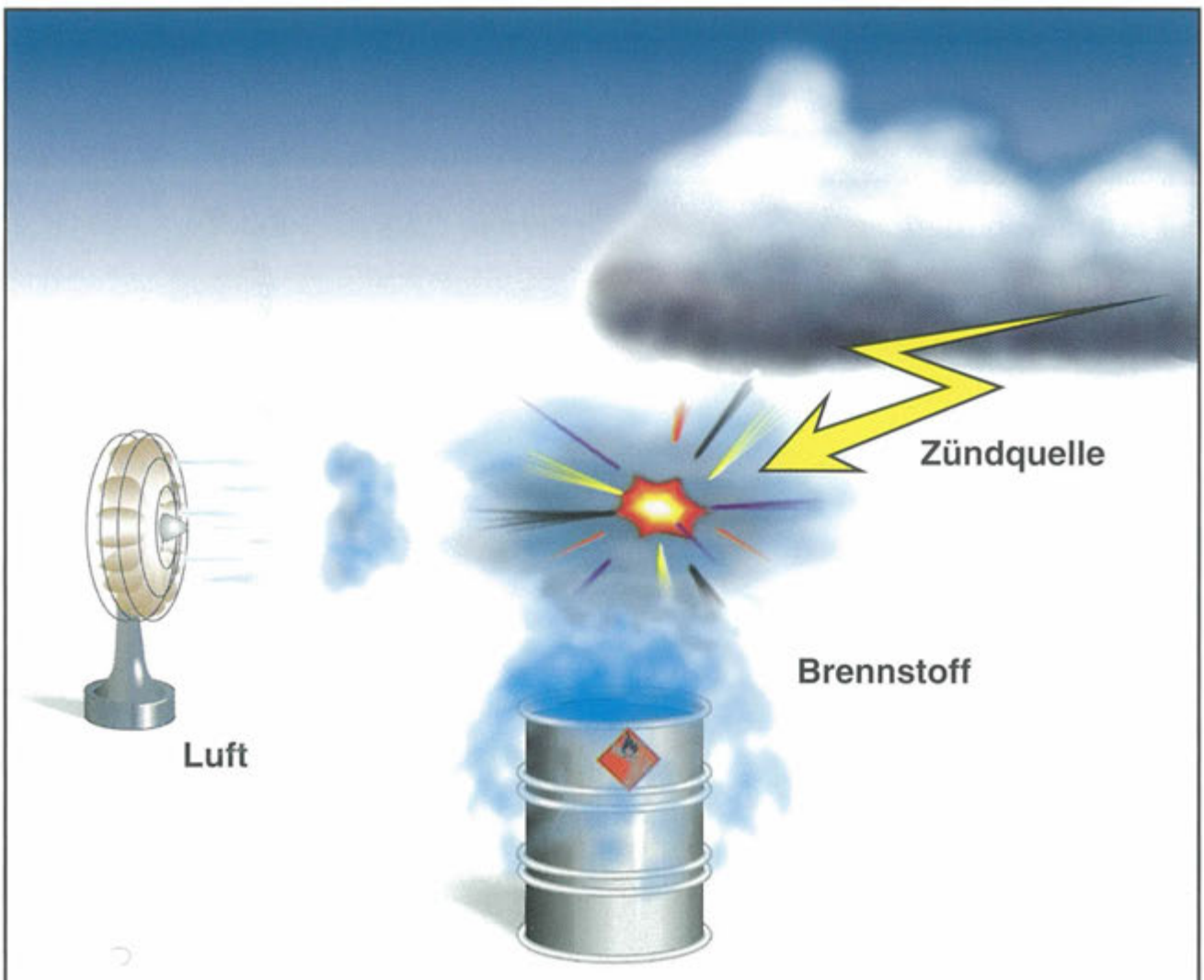


Abb. 2: Voraussetzungen für das Zustandekommen von Explosionen

Was sind wirksame Zündquellen?

Es gibt in der Praxis eine Vielzahl von verschiedenen Zündquellen (z.B. heiße Oberflächen, Feuer, Flammen, Glut, mechanisch oder elektrisch erzeugte Funken und Entladungen statischer Elektrizität), welche sich u.a. aufgrund ihrer Energie voneinander unterscheiden. Auch sind die explosionsfähigen Gemische unterschiedlich zündempfindlich.

Nicht jede Zündquelle ist energiereich genug, um alle Arten explosionsfähiger Gemische zu entzünden, d.h. nicht jede Zündquelle ist in einer gegebenen Situation zündwirksam.

In der Regel ist es notwendig, die Zündquellen näher zu untersuchen, um die Zündgefahr in Verbindung mit den zu erwartenden explosionsfähigen Gemischen zu beurteilen.

Im folgenden werden unter diesen Gesichtspunkten ausführlich die Entladungen infolge elektrostatischer Aufladungen behandelt.

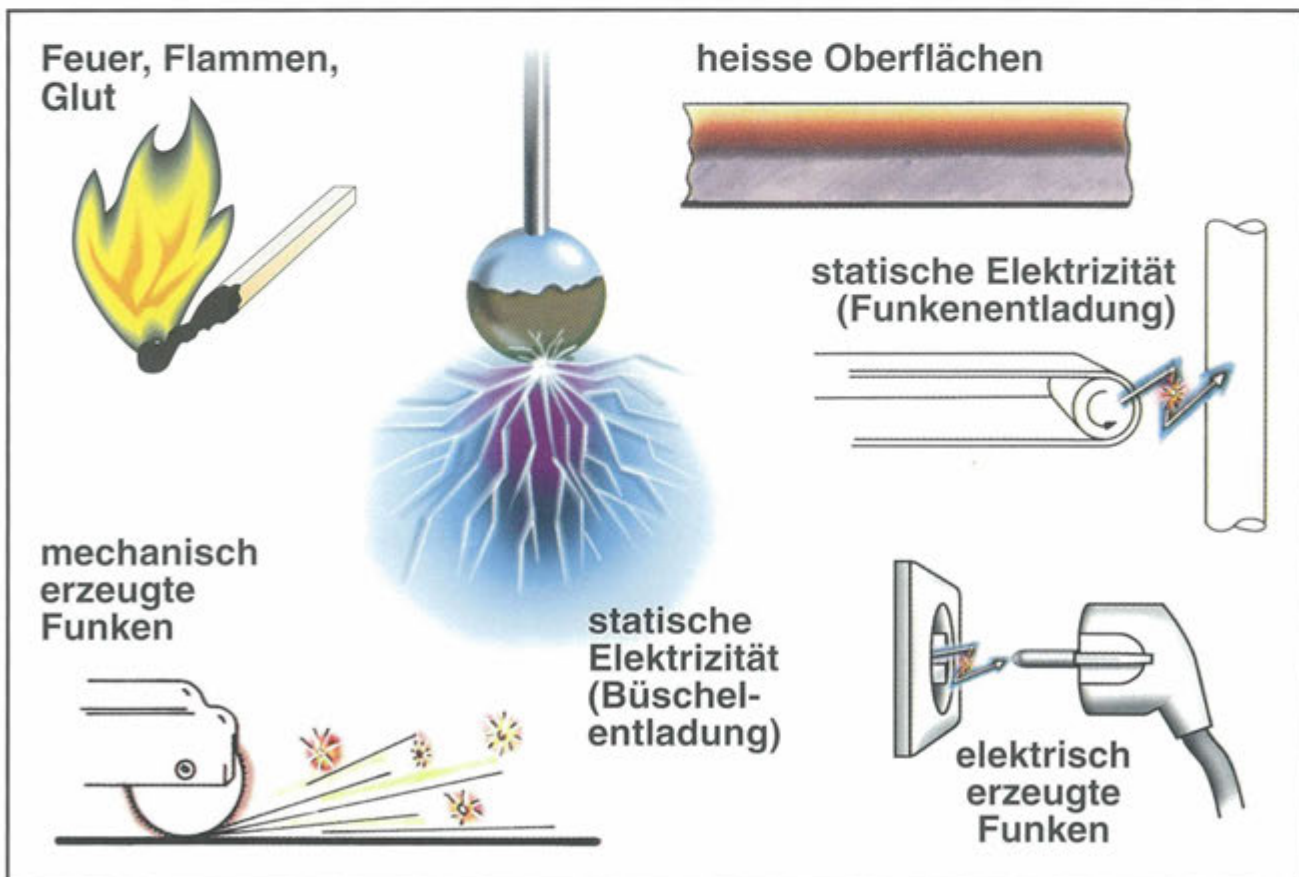


Abb. 3: Beispiele von möglichen Zündquellen

Wann wird eine elektrostatische Aufladung zur Zündgefahr?

Eine elektrostatische Aufladung allein stellt nicht notwendigerweise eine Zündgefahr dar. Erst wenn die Aufladung so hoch wird, dass infolge des hohen elektrischen Feldes Entladungen auftreten, kann Zündgefahr bestehen.

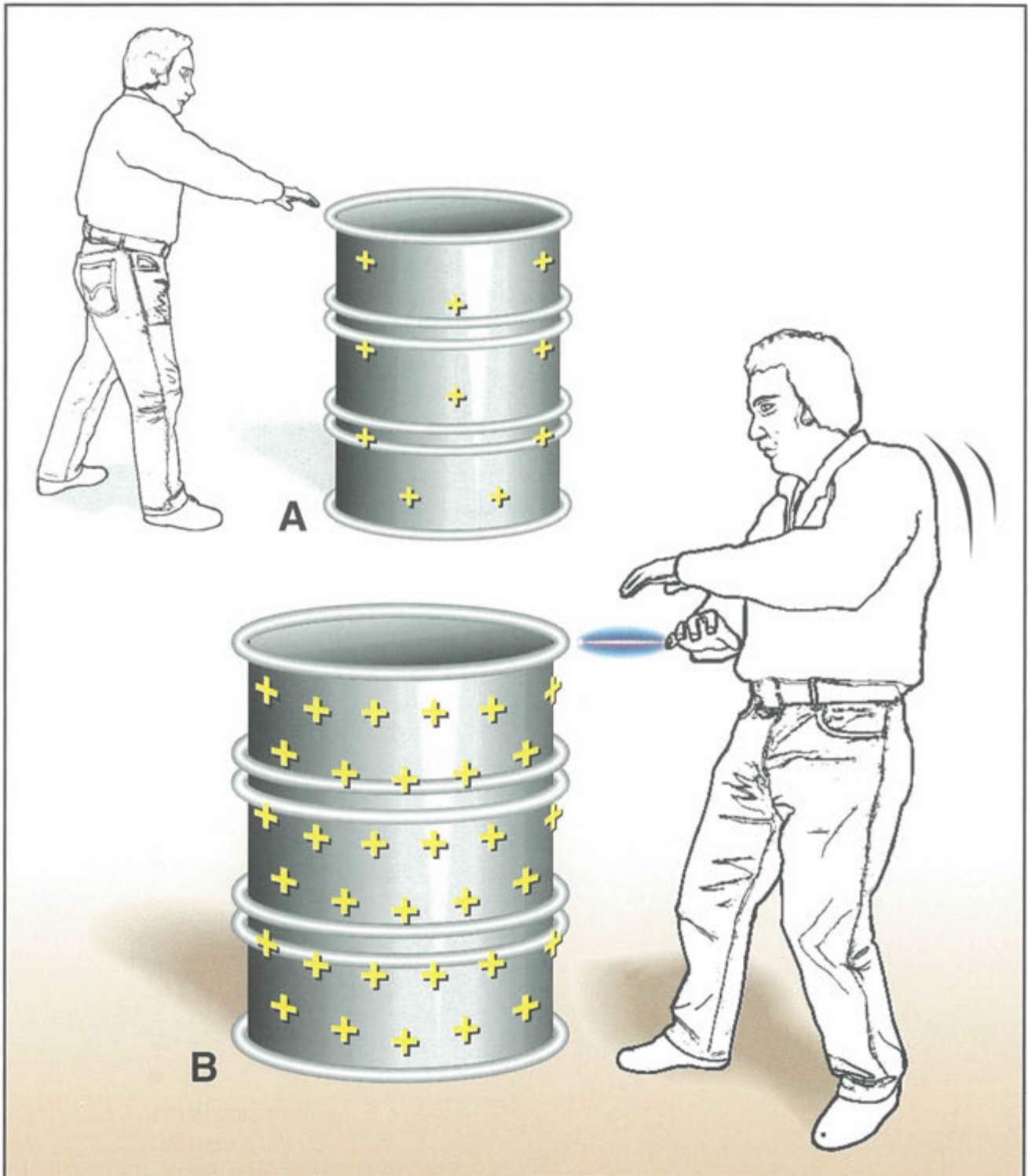


Abb. 4: Ladungsanhäufung - A: geringe Aufladung \Rightarrow keine Entladungsfunken
B: hohe Aufladung \Rightarrow Entladungsfunken (Zündgefahr)

Wann kommt es zu einer Entladung statischer Elektrizität?

Die einzelnen Schritte, die zum Auftreten einer Entladung führen, sind grundsätzlich immer die selben:

- **Ladungstrennung:** Durch Trennprozesse (meistens zwischen Produkt und Anlageteilen) werden die in Kontakt stehenden Oberflächen aufgeladen.
- **Ladungsanhäufung:** Auf Produkten, Anlageteilen, Packmitteln, Personen usw. können Ladungen angesammelt werden.
- **Ladungsableitung:** Sofern von den Orten der Ladungsanhäufung eine Erdverbindung mit hinreichender Leitfähigkeit vorhanden ist, kann die Ladung gefahrlos auf Erde abfließen.
- **Entladung:** Wird die Ladungsanhäufung immer höher, weil die bei Trennprozessen entstehenden Ladungen nicht oder nicht genügend schnell auf Erde abfließen können, tritt beim Erreichen der Durchbruchfeldstärke eine Entladung auf.

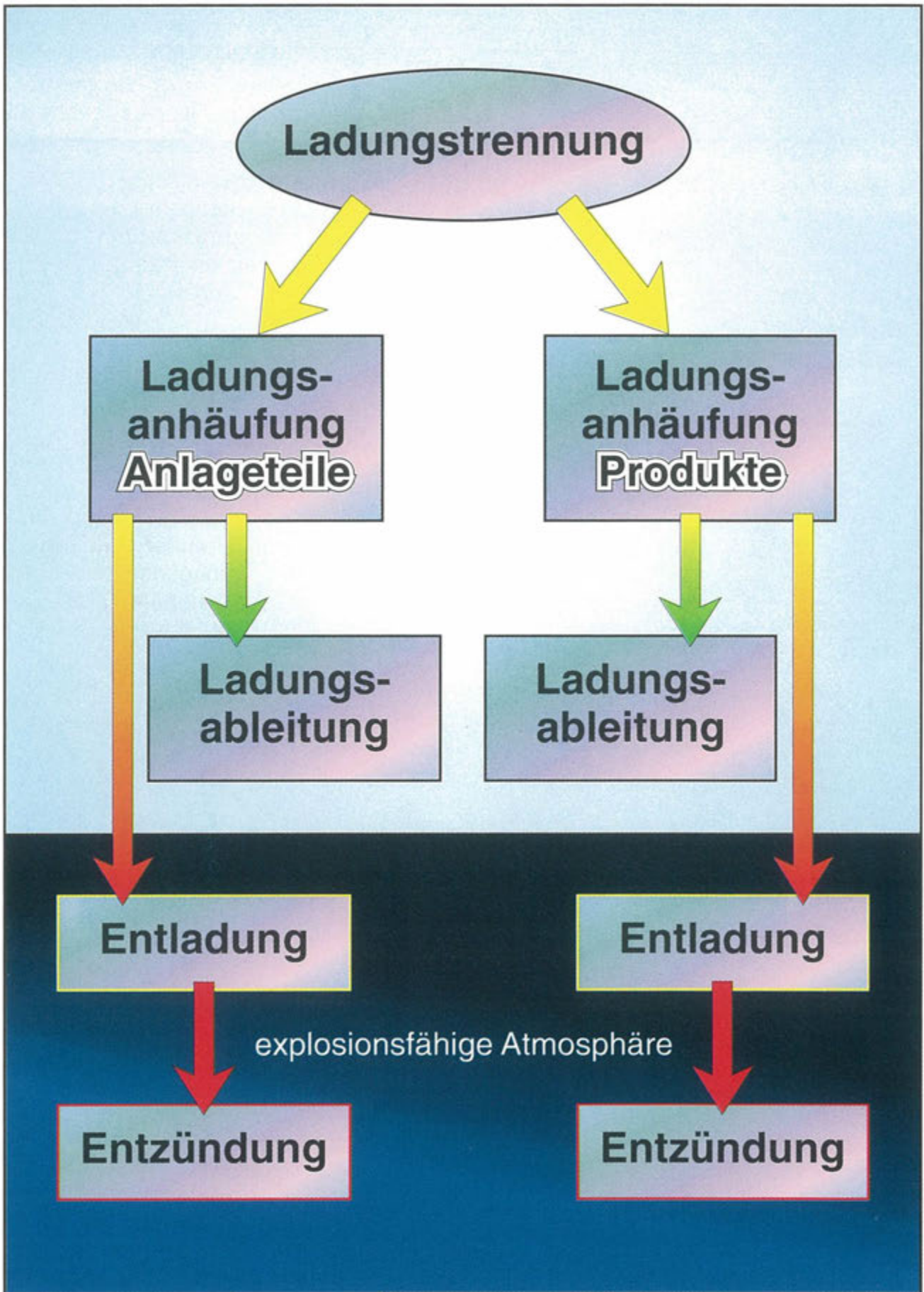


Abb. 5: Grundschemata der Elektrostatik: von der Ladungstrennung bis zur möglichen Entzündung einer explosionsfähigen Atmosphäre (Explosion)

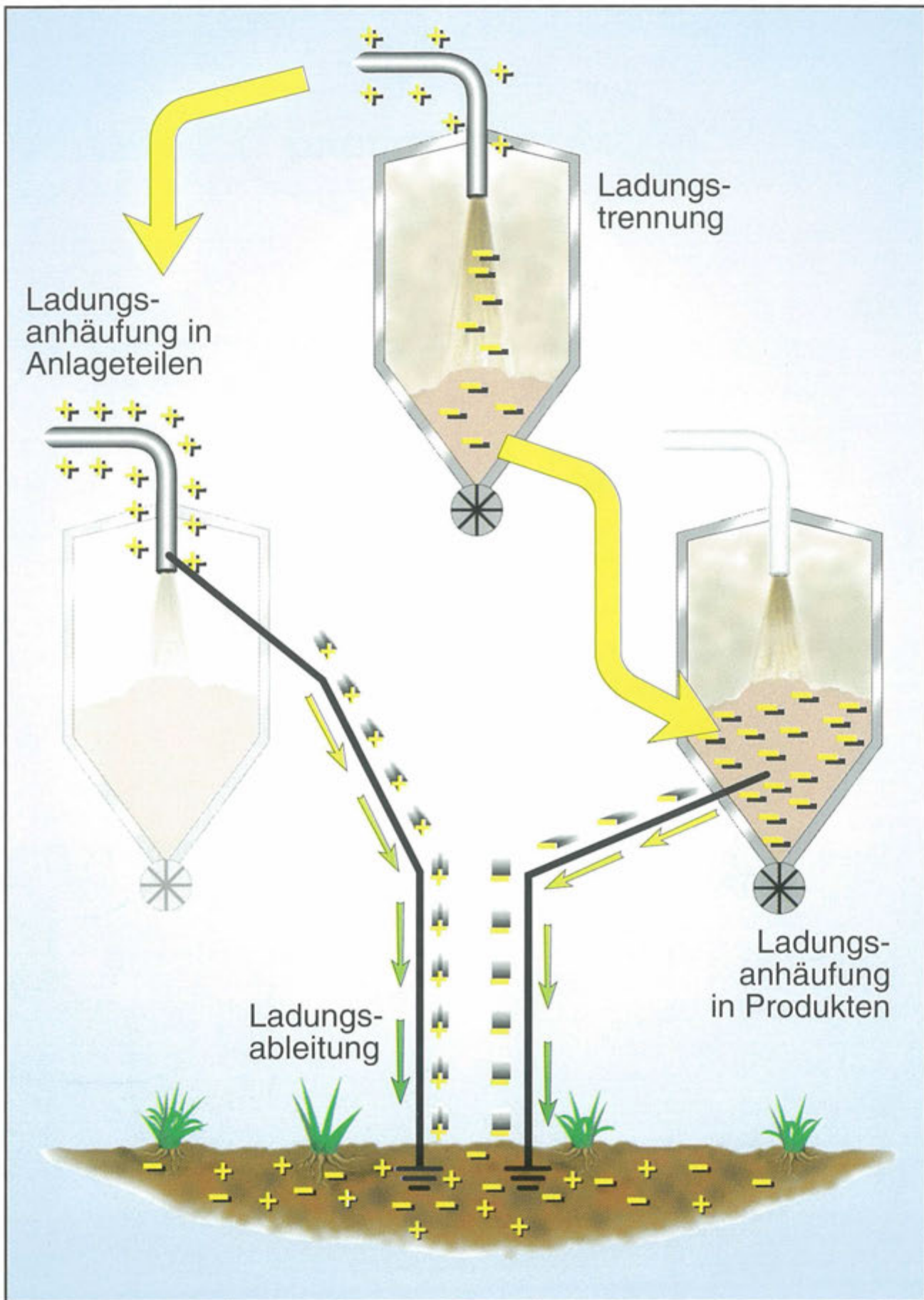


Abb. 6: Grundschemata der Elektrostatik: bildliche Darstellung der Schritte Ladungstrennung, Ladungsanhäufung, Ladungsableitung

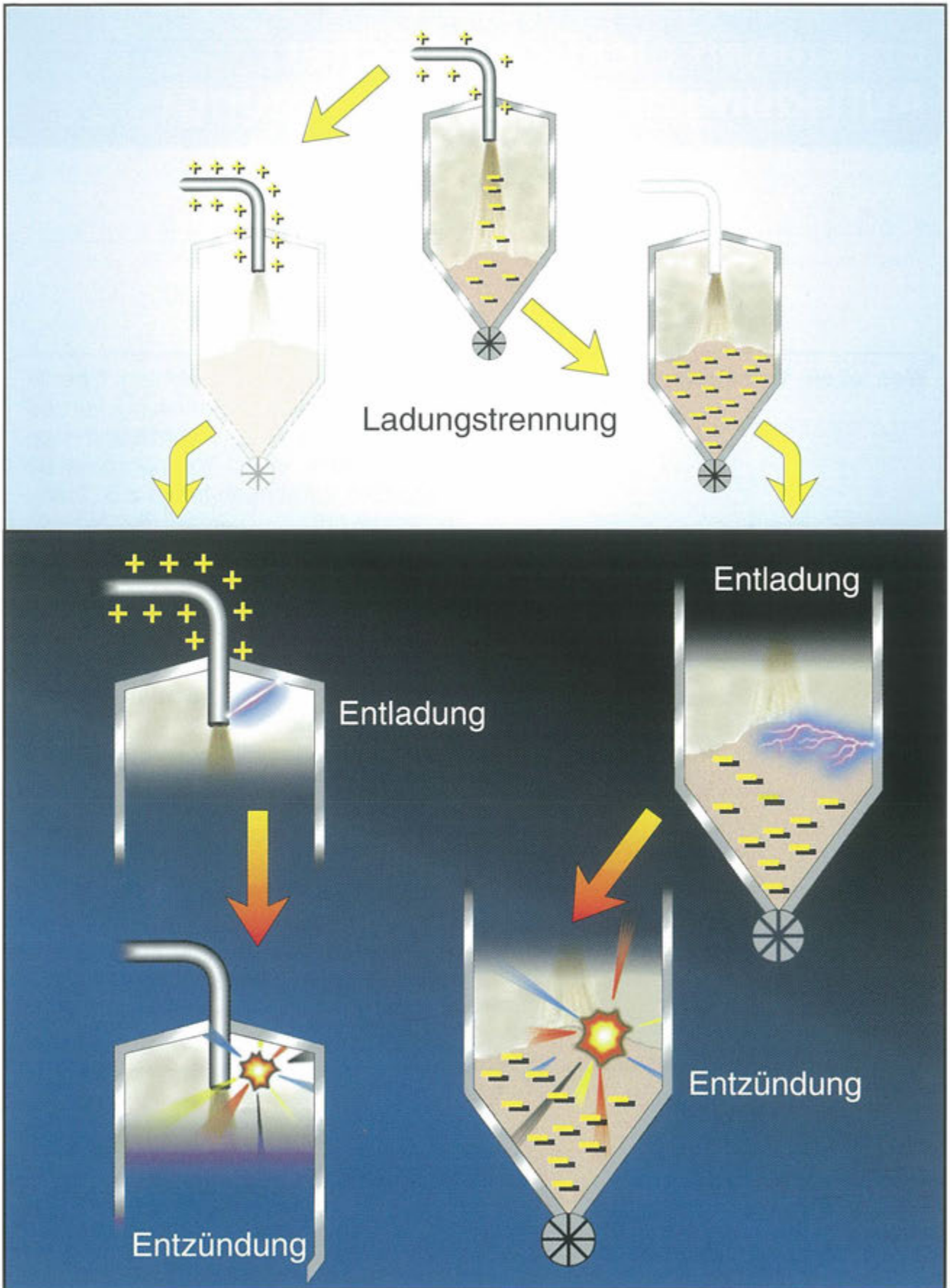


Abb. 7: Grundschemata der Elektrostatik: bildliche Darstellung der Schritte Ladungstrennung, Ladungsanhäufung, Entladung, Entzündung einer explosionsfähigen Atmosphäre (Explosion)

Entstehen elektrostatischer Aufladungen (Ladungstrennung)

Was ist ein Trennprozess?

Jeder Vorgang, bei welchem Oberflächen, die miteinander (auch nur kurzzeitig) in Kontakt stehen, voneinander getrennt werden, ist ein Trennprozess. Bei folgenden Vorgängen treten z.B. Trennprozesse auf:

- Umfüllen von Produkten
- Gehen des Menschen auf dem Fußboden
- Abrollen einer Folie
- Bewegen eines Förderbandes über eine Umlenkrolle
- Strömen einer Flüssigkeit durch eine Rohrleitung
- Filtrieren einer Suspension
- Zerdüsen oder Versprühen einer Flüssigkeit
- Ausschütten eines Schüttgutes aus einem Sack oder Behälter
- pneumatisches Fördern eines Schüttgutes durch eine Rohrleitung
- Aufprallen von Staubteilchen auf die Wand eines Abscheiders

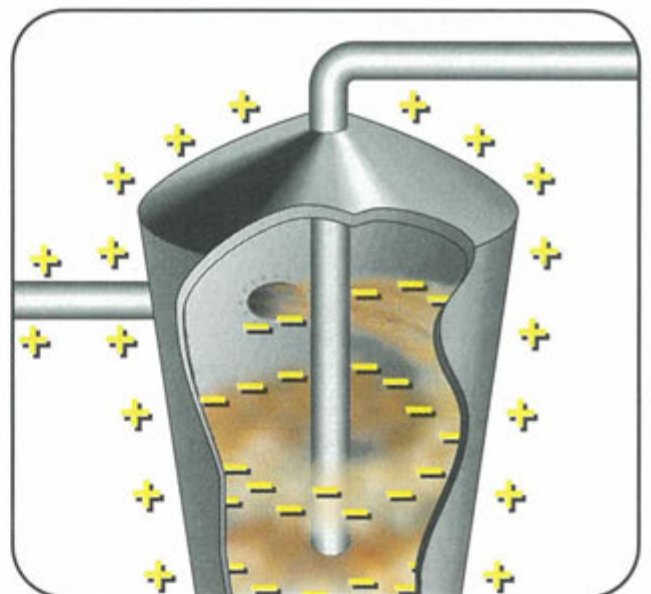
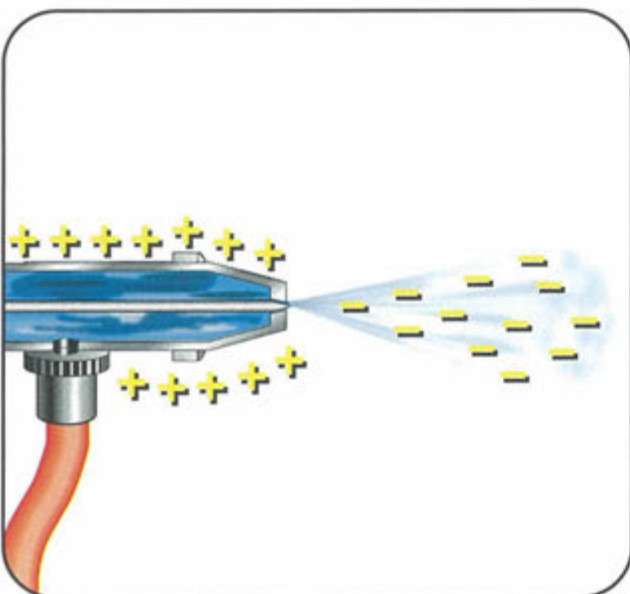
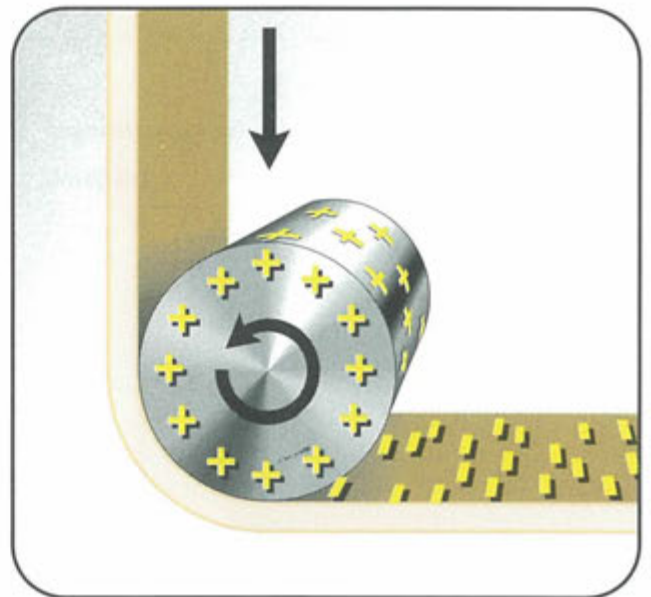
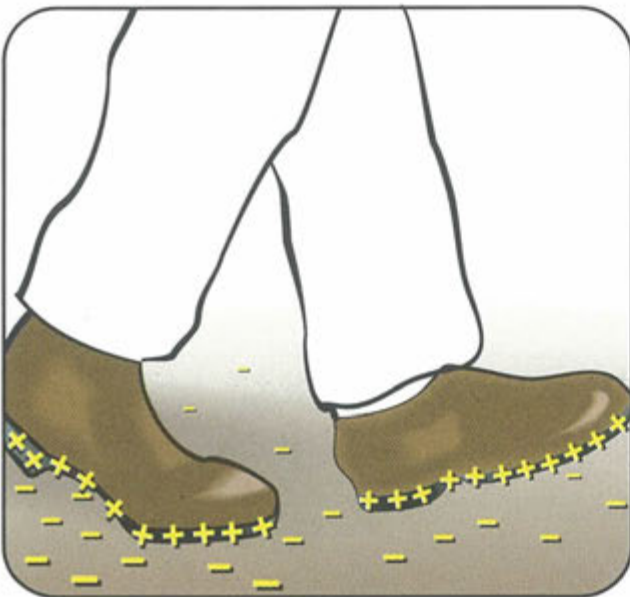
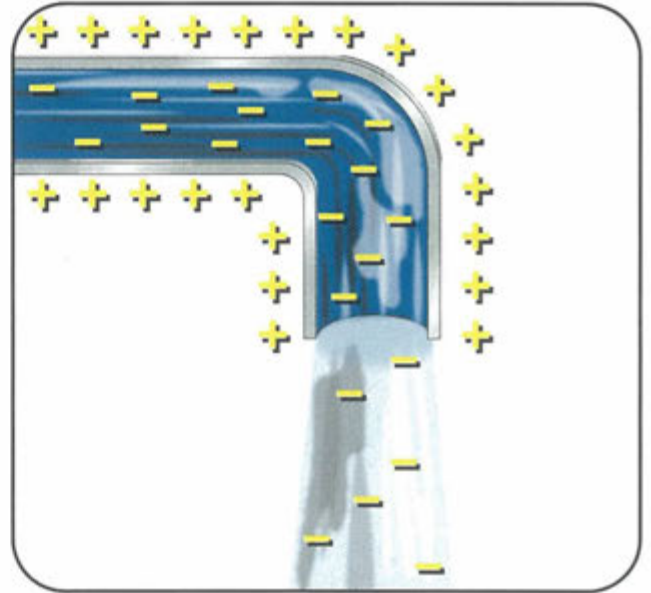
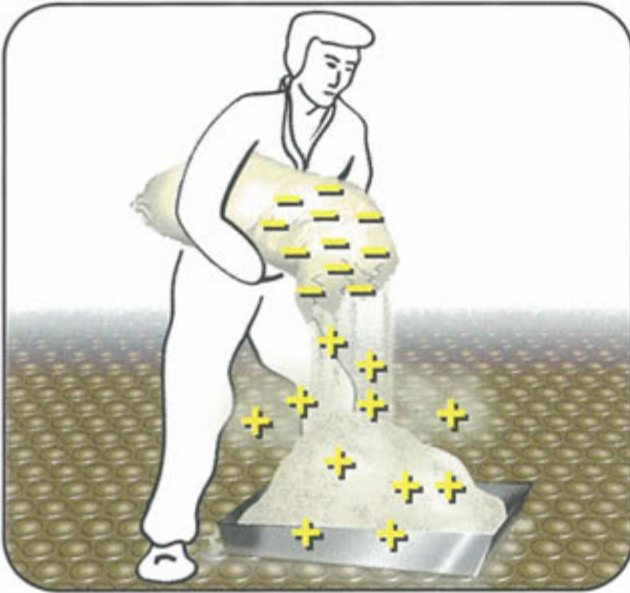


Abb. 8: Beispiele von Trennprozessen

**Wann ist ein Stoff
isolierend (nichtleitfähig)?**

Die Isolationseigenschaften von Feststoffen, Schüttgütern und Flüssigkeiten werden durch Messung des elektrischen Widerstandes bestimmt.

- Typische isolierende Feststoffe sind praktisch alle Kunststoffarten wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polytetrafluorethylen (PTFE). Aber auch andere trockene organische Produkte können isolierend sein.
- Typische isolierende Flüssigkeiten sind beispielsweise Kohlenwasserstoffe wie Hexan, Heptan, Benzin, Toluol, Xylol.

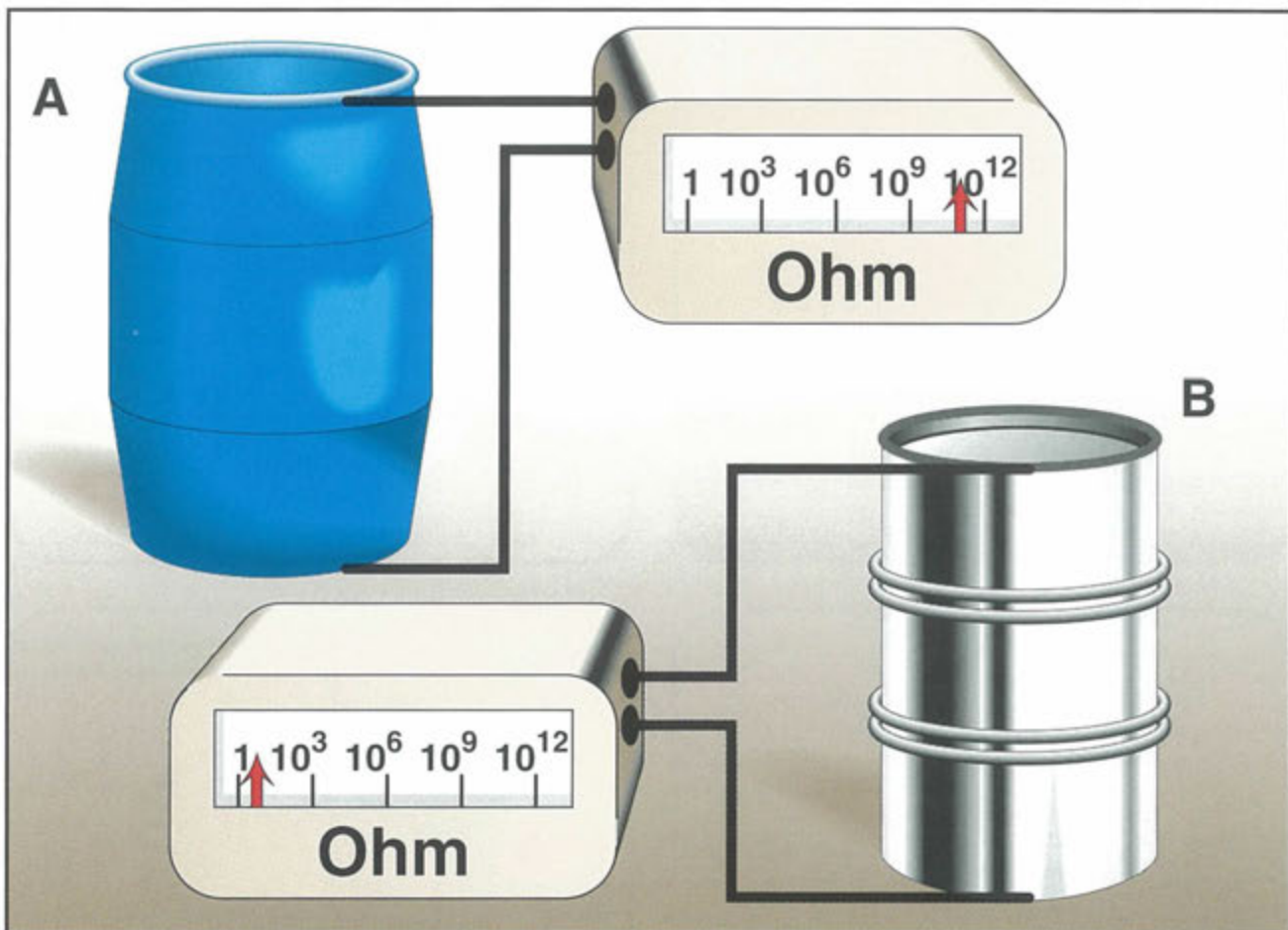


Abb. 9: Charakterisierung der Isolationseigenschaften durch Messen des elektrischen Widerstandes - A: Kunststoffbehälter (isolierend, nichtleitfähig)
B: Metallfass (leitfähig)

Mit elektrostatischer Aufladung muss bei Trennprozessen immer gerechnet werden, sobald zumindest ein Kontaktpartner elektrisch isolierend ist.

Gibt es ausser Trennprozessen noch andere Auflademechanismen?

Ein Auflademechanismus, bei welchem Trennprozesse nicht von Bedeutung sind, ist die **Influenz**. Sie ist ein physikalisches Phänomen, das dadurch gekennzeichnet ist, dass Ladungen auf einer leitfähigen Oberfläche durch die Wirkung von Ladungen auf einer benachbarten Oberfläche (elektrisches Feld) derart bewegt werden können, dass eine Aufladung erfolgt. Typisches Beispiel: Person mit isolierenden Schuhen in der Nähe eines aufgeladenen Kunststoffsacks.

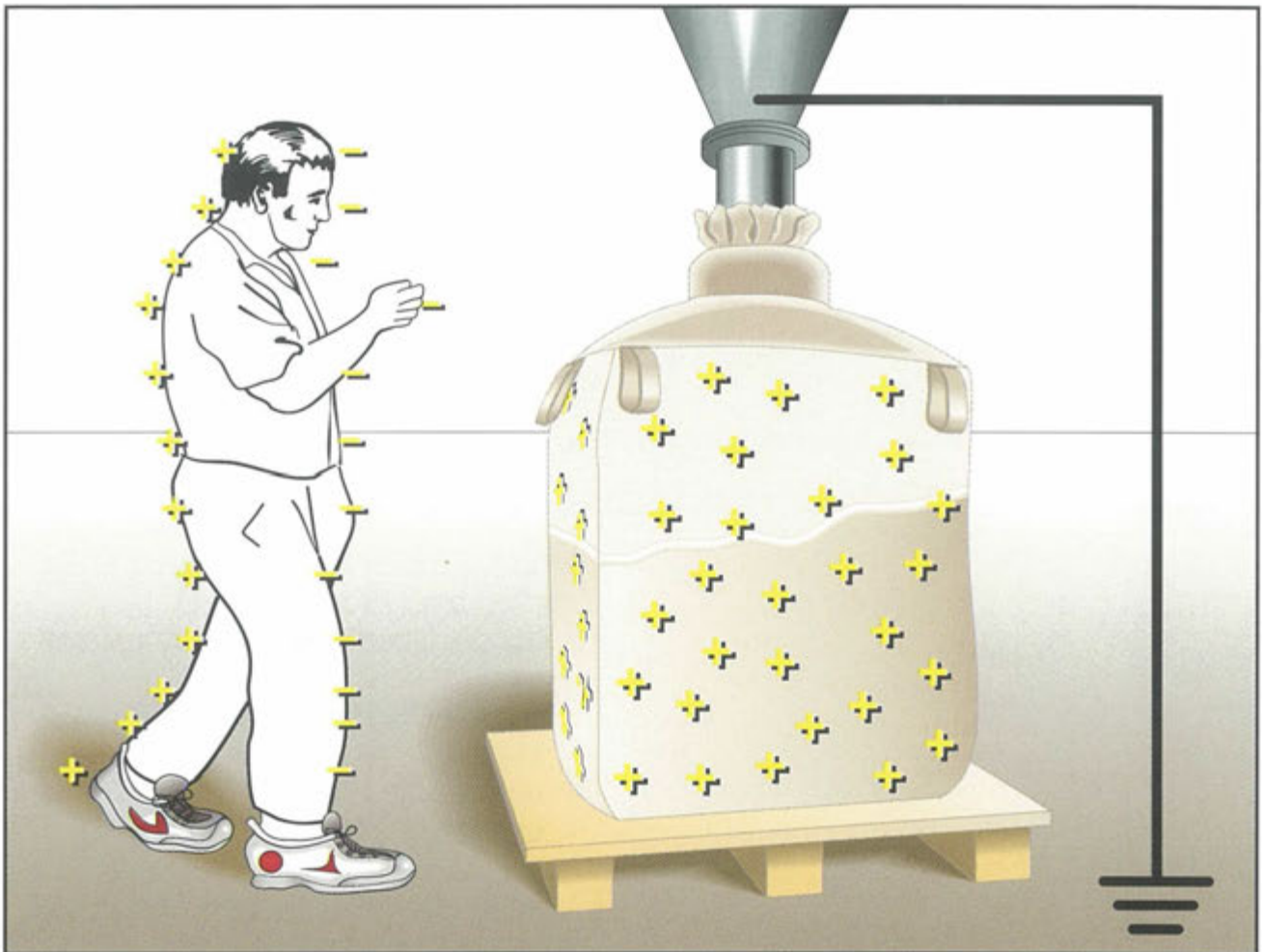


Abb. 10: Aufladung einer von Erde isolierten Person (nichtleitfähige Schuhe) durch Influenz

Nicht geerdete Metallteile und Personen können auch durch Influenz aufgeladen werden.

Ladungsanhäufung und Ladungsableitung

Wo können Ladungen angehäuft werden?

Ladungen können angehäuft werden auf/in

- leitfähigen, aber von Erde elektrisch isolierten Teilen, z.B.
 - auf dem menschlichen Körper, wenn isolierendes Schuhwerk getragen wird oder der Boden nicht ableitfähig ist,
 - auf einem Metallrohr, das durch nichtleitfähige Dichtungen isoliert ist,
 - auf einem Metallfass, das auf isolierender Unterlage steht,
 - auf Metallpulver, das in ein isolierendes Gebinde abgefüllt wird,
- Oberflächen von isolierenden Werkstoffen oder Produkten, z.B.
 - auf der Oberfläche eines Kunststoff-sackes,
 - auf der Oberfläche einer Kunststoffleitung,
 - auf der Oberfläche eines isolierenden Filtertuches,
- isolierenden Flüssigkeiten, Suspensionen und Emulsionen,
- abgelagerten isolierenden Schüttgütern,
- Wolken von aufgeladenen Staubteilchen und/oder Tröpfchen.

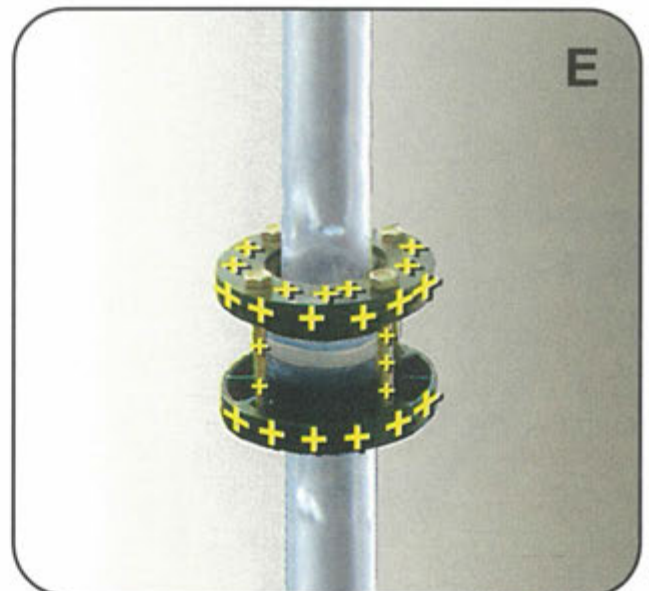
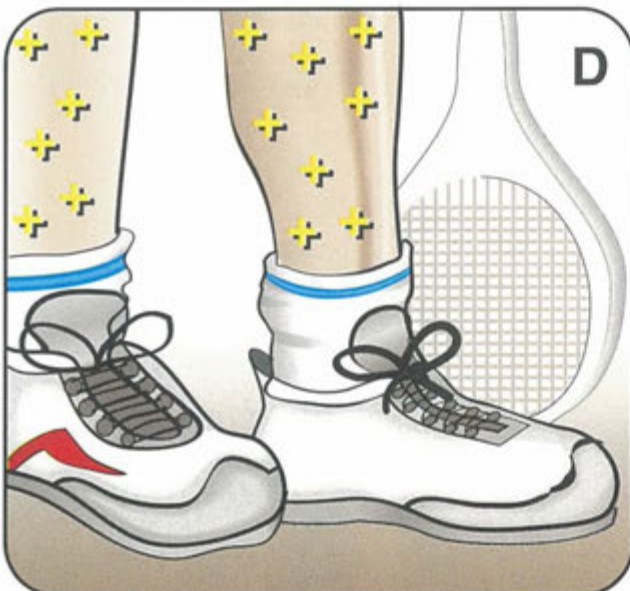
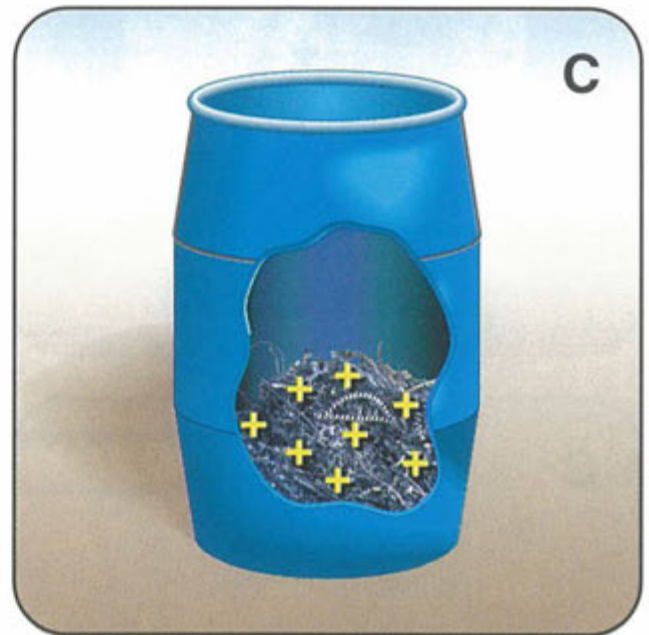
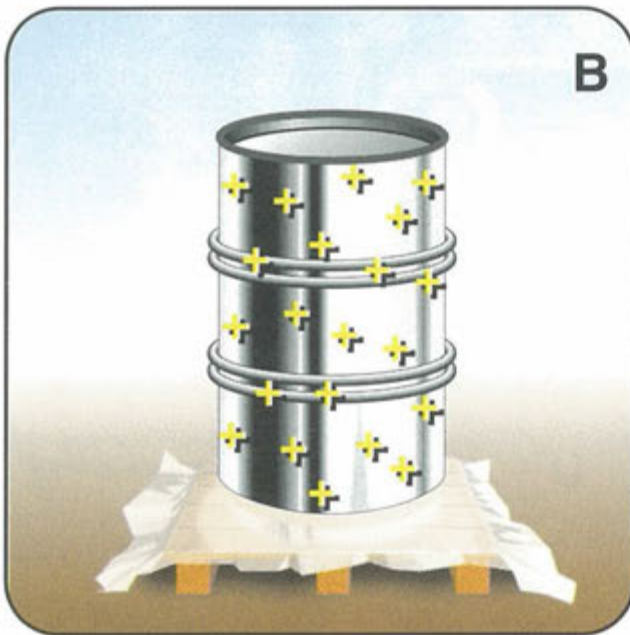
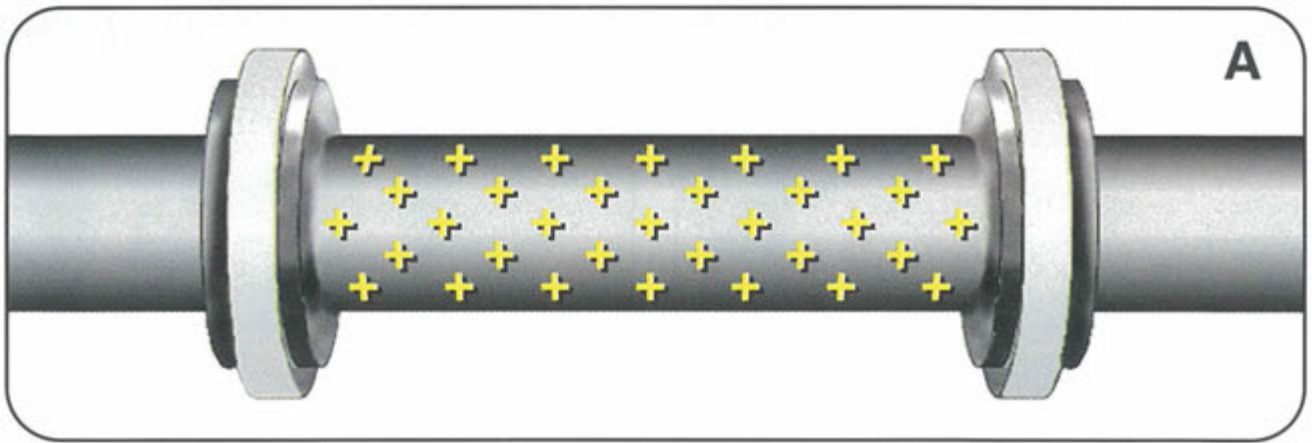


Abb. 11: Beispiele von Ladungsanhäufung auf leitfähigen von Erde elektrisch isolierten Teilen - A: Rohrstück mit isolierenden Dichtungen B: Metallfass auf isolierender Unterlage C: Metallspäne im Kunststoffbehälter D: Person mit isolierendem Schuhwerk E: Metallflansch auf Glasleitung

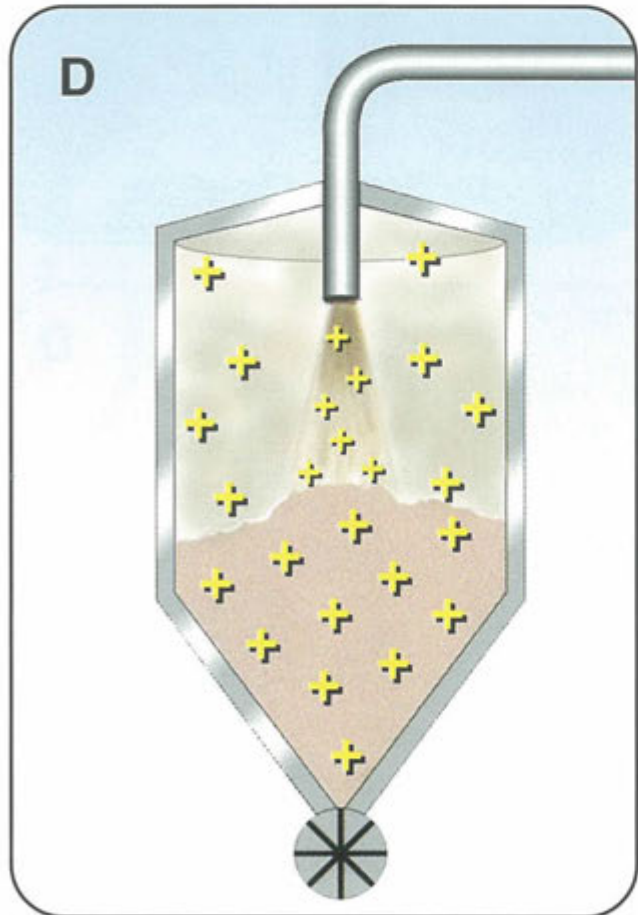
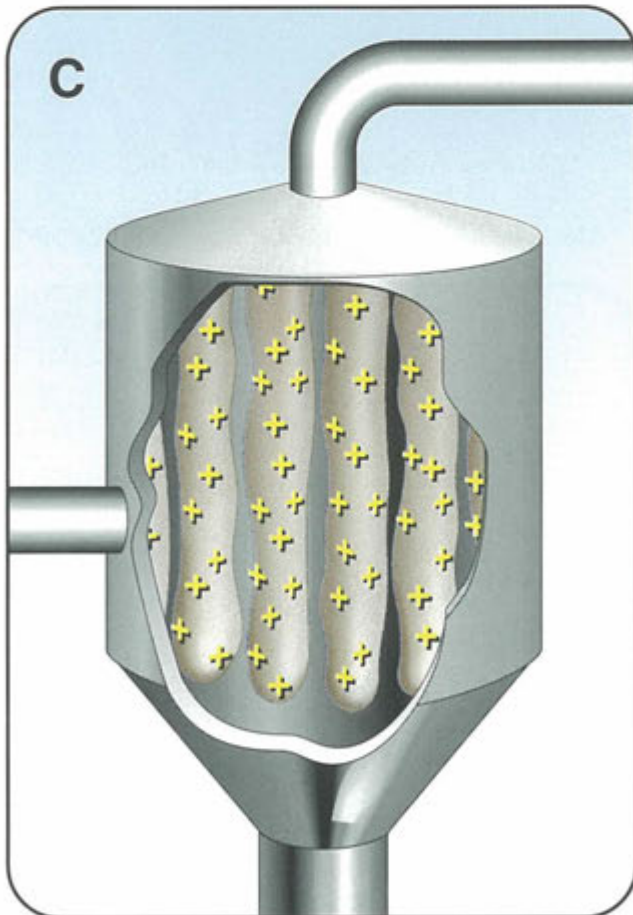
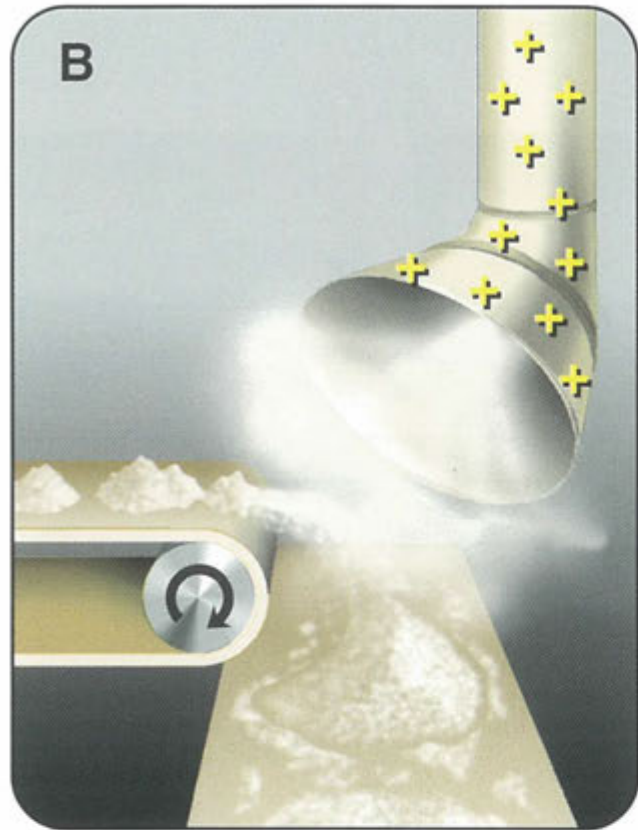


Abb. 12: Beispiele von Ladungsanhäufungen auf Oberflächen von isolierenden Werkstoffen oder Produkten - A: Schrumpffolie Kunststoff C: nichtleitfähige Filterschläuche D: isolierendes Schüttgut

Wann werden Ladungen abgeleitet?

Ladungen werden abgeleitet, wenn das aufgeladene Objekt elektrostatisch leitfähig und geerdet ist.

Welche Messgrößen werden für das Beurteilen der elektrostatischen Leitfähigkeit (Ladungsableitung) herangezogen?

Für das Beurteilen der Ladungsableitung ist der elektrische Widerstand massgebend. Je nach zu beurteilender Situation werden unterschiedliche Widerstandsgrößen herangezogen, z.B.:

- Der **spezifische Widerstand** ist die stoffspezifische Angabe des Widerstands eines Feststoffes, einer Flüssigkeit oder einer Pulverschüttung (Materialkonstante).
- Die **Leitfähigkeit** ist der reziproke Wert des spezifischen Widerstands eines Stoffes (Materialkonstante). Sie wird insbesondere bei Flüssigkeiten angegeben.
- Der **Oberflächenwiderstand** wird für das Beurteilen der Ladungsableitung von der Oberfläche eines Feststoffes benutzt.
- Der **Durchgangswiderstand** ist der, je nach Material und Geometrie gegebene totale Widerstand zwischen zwei Punkten eines Gegenstandes (z.B. Durchgangswiderstand zwischen dem Inneren und der Lauffläche eines Schuhs).
- Der **Ableitwiderstand** ist der totale Widerstand zwischen einem Punkt und Erde. Er wird oft auch Erdableitwiderstand genannt.

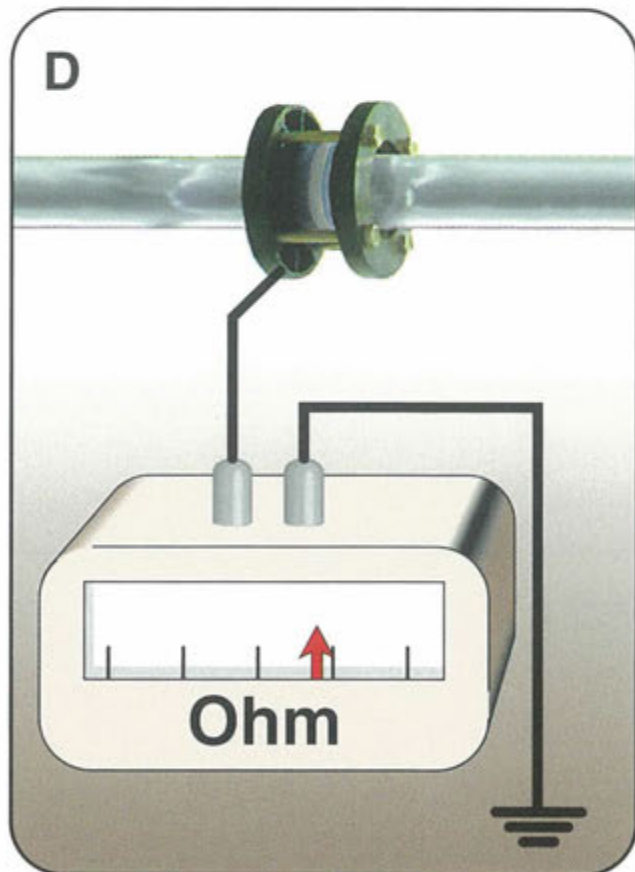
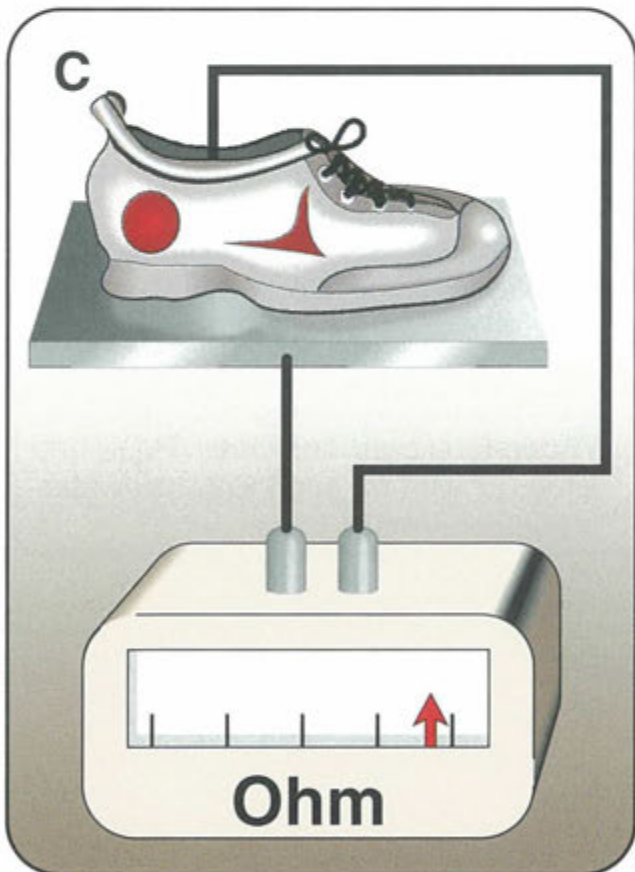
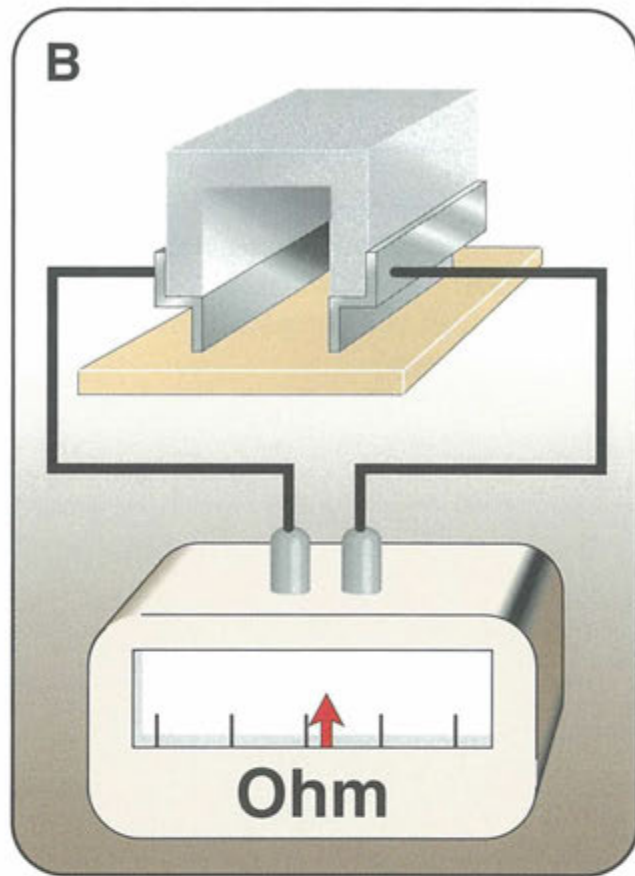
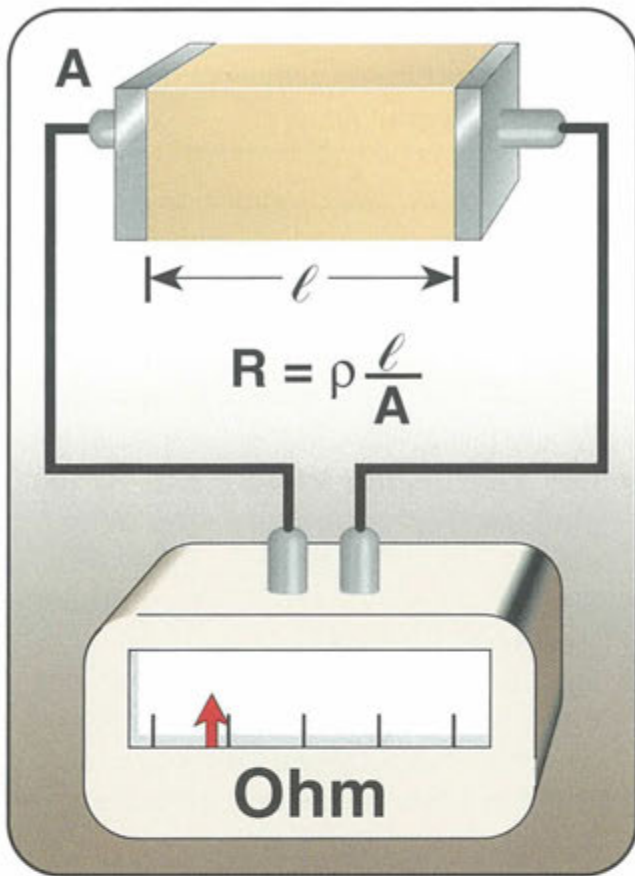


Abb. 13: Beispiele von Messungen zum Bestimmen des Widerstandes
 A: spezifischer Widerstand B: Oberflächenwiderstand
 C: Durchgangswiderstand von Schuhen D: Erdableitwiderstand

Gibt es sichere Grenzwerte für die Widerstandsgrößen?

Die für eine gefahrlose Ladungsableitung notwendigen Widerstandsgrenzwerte sind von der Art des Widerstandes (spezifischer Widerstand, Oberflächenwiderstand usw.) abhängig. Ferner können die Grenzwerte in den verschiedenen nationalen Richtlinien unterschiedlich festgelegt sein. Folgende Richtwerte haben sich in der Praxis bewährt:

- Erden von Anlageteilen: Ableitwiderstand gegen Erde (Erdableitwiderstand) $\leq 10^6$ Ohm
- Erden von Personen: Durchgangswiderstand der Schuhe und Erdableitwiderstand des Fussbodens $\leq 10^8$ Ohm

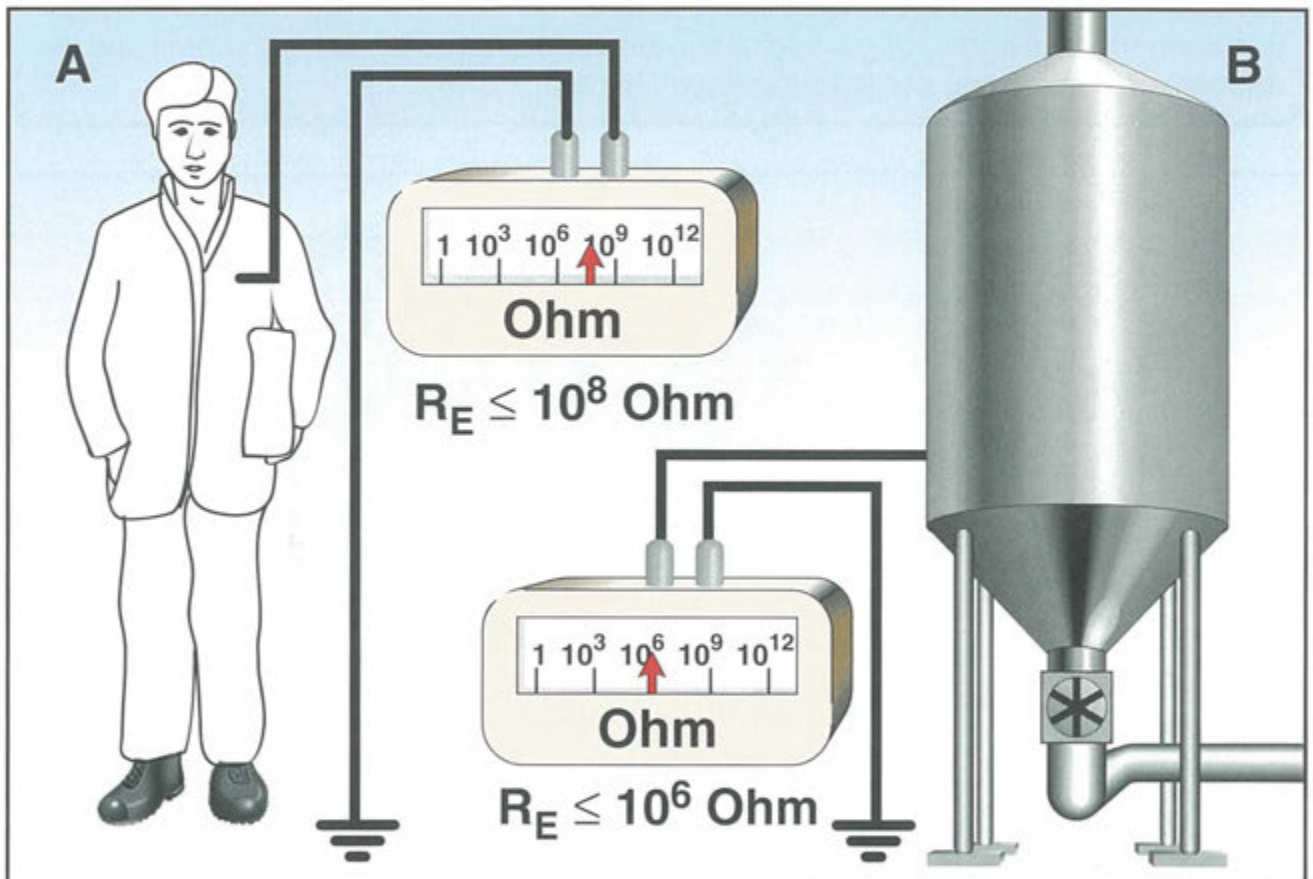


Abb. 14: Obere Grenzwerte für Widerstandsgrößen für den Erdableitwiderstand in der Praxis - A: Erden von Personen B: Erden von Anlageteilen

Widerstandsmessungen in einem für das Beurteilen von Elektrostatikgefahren üblichen Größenbereich erfordern spezielle Messgeräte und sind nur von fachkundigem Personal durchzuführen.

Entladungsarten und Zündfähigkeit

Wird das elektrische Feld infolge hoher Ladungsdichte (Ladungsanhäufung auf kleinem Raum) sehr stark, so kommt es beim Erreichen der Durchbruchfeldstärke zur Entladung. Für das Beurteilen der Zündfähigkeit (Zündwirksamkeit) einer Entladung ist die durch den Entladungsvorgang freigesetzte Energie massgebend. Je nach betrieblicher Situation kann diese freigesetzte Energie nur ein Bruchteil der gesamten in der Ladungsanhäufung enthaltenen Energie sein. Aus Erfahrung und theoretischen Betrachtungen ist bekannt, unter welchen Bedingungen die gesamte oder nur ein Bruchteil der gespeicherten Energie durch einen Entladungsvorgang freigesetzt wird. Es lassen sich unterschiedliche Entladungsarten abgrenzen, welchen unterschiedliche Energiebeträge und damit Zündfähigkeiten (Äquivalentenergien) zugeordnet werden können. Die Abgrenzung erfolgt aufgrund der Leitfähigkeit, der Geometrie und der räumlichen Anordnung der aufgeladenen Objekte.

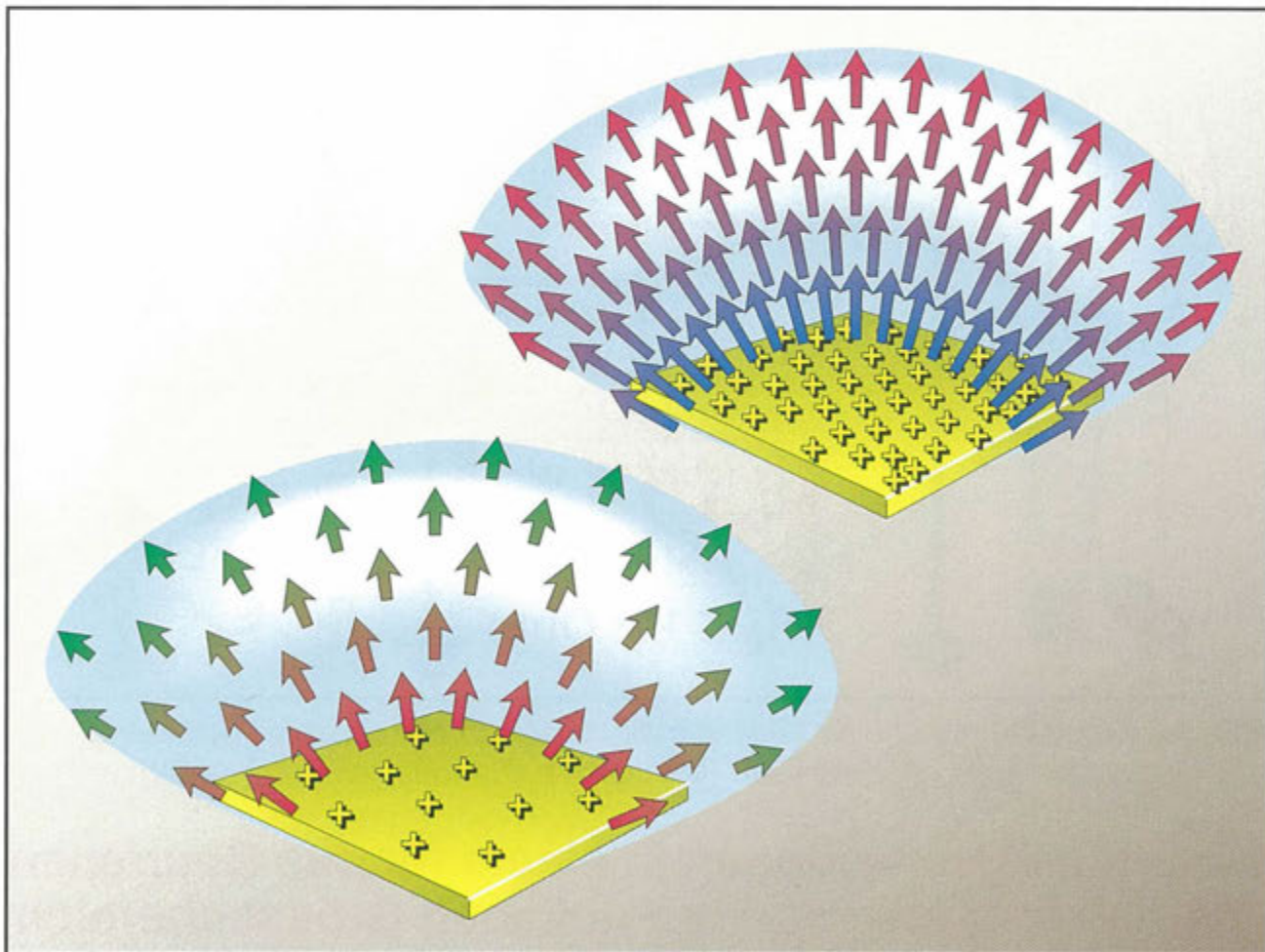


Abb. 15: Beziehung zwischen Ladungsdichte und Feldstärke - je höher die Ladungsdichte, desto höher die Feldstärke (Pfeillänge)

Wann kommt es zu einer Entladung?

Zu einer Entladung kommt es dann, wenn das elektrische Feld infolge hoher Raum- oder Oberflächenladungsdichte (Ladungsanhäufung) die Durchbruchfeldstärke erreicht.

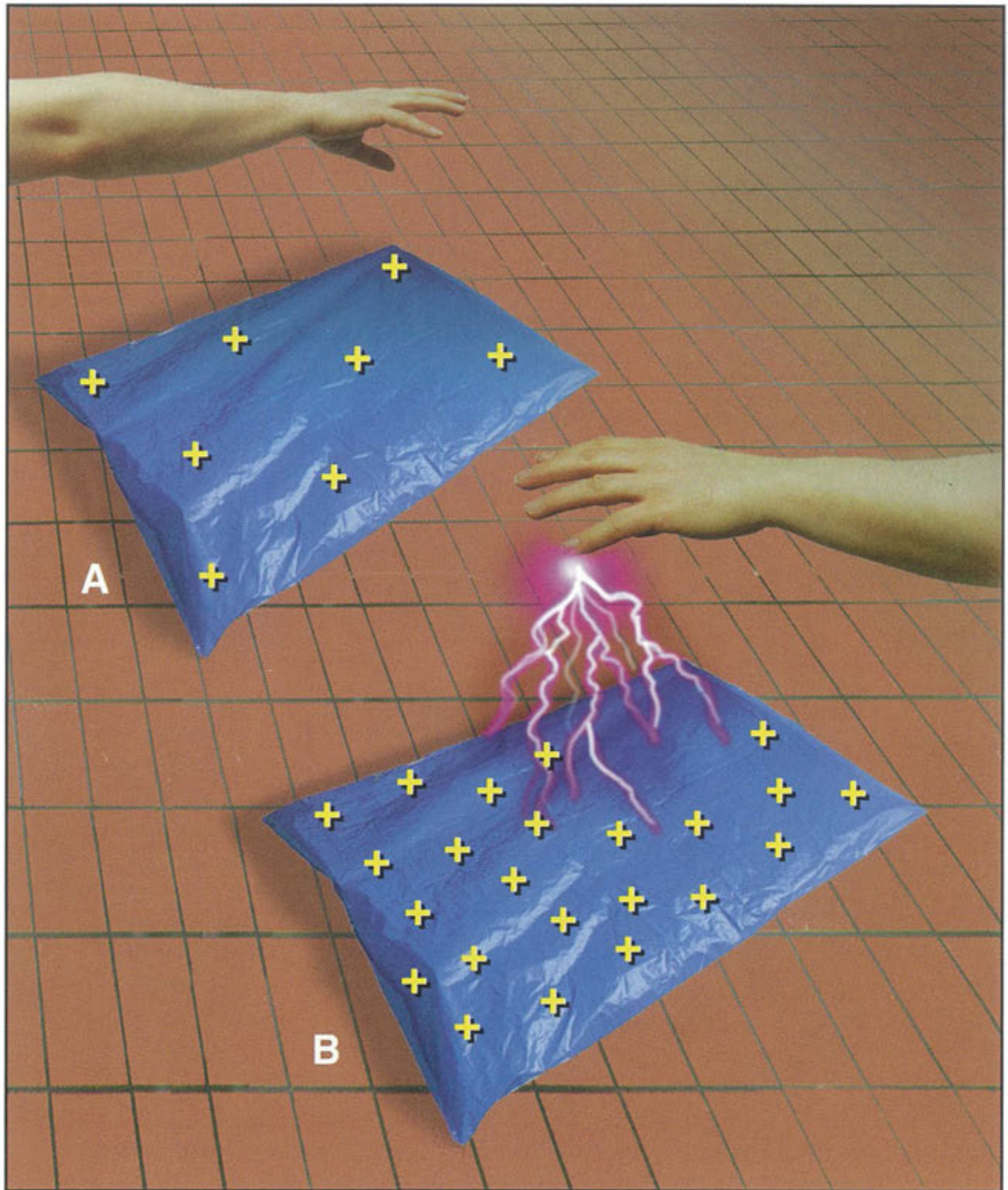


Abb. 16: Beziehung zwischen Feldstärke und Entladung

A: geringe Feldstärke \Rightarrow keine Entladung B: hohe Feldstärke \Rightarrow Entladung

Wie zündfähig ist eine Entladung?

Je nach betrieblicher Situation können Entladungen unterschiedlicher Energie auftreten. Ihre Zündfähigkeit wird durch den Betrag der freigesetzten Energie bestimmt. Die Entladungen lassen sich in unterschiedliche Entladungsarten mit unterschiedlichen Zündfähigkeiten einteilen.

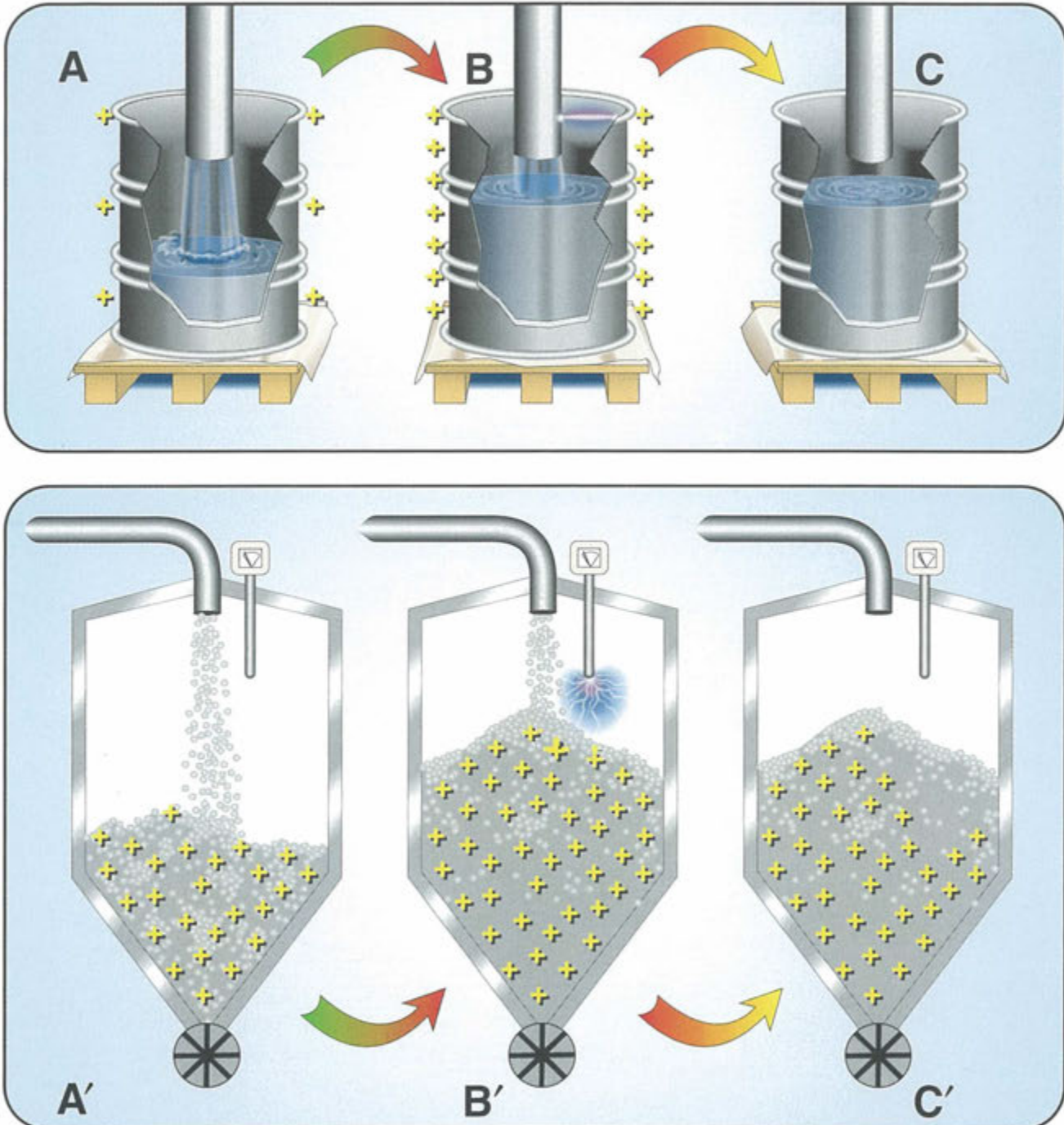


Abb. 17: Unterschiedliche Entladungsgrade bei Metallfässern und isolierendem Produkt in Silos - A: Trennprozess und Aufladung B: Funkenentladung C: vollständige Ladungsableitung A': Trennprozess und Aufladung B': Büschelentladung C': örtlich begrenzte Ladungsableitung

Wie zündempfindlich sind explosionsfähige Gemische?

Die Zündempfindlichkeit eines Stoffes im Hinblick auf eine Entzündung durch Entladungen infolge elektrostatischer Aufladung wird durch die Mindestzündenergie des betreffenden explosionsfähigen Gemisches bestimmt.

Was ist die Mindestzündenergie (MZE)?

Als Mindestzündenergie eines explosionsfähigen Gemisches gilt die niedrigste in Form eines Kondensatorentladungsfunkens erforderliche Energie, die in der Lage ist, das zündwilligste Gemisch aus Brennstoff und Luft unter Normalbedingungen eben noch zu entzünden.

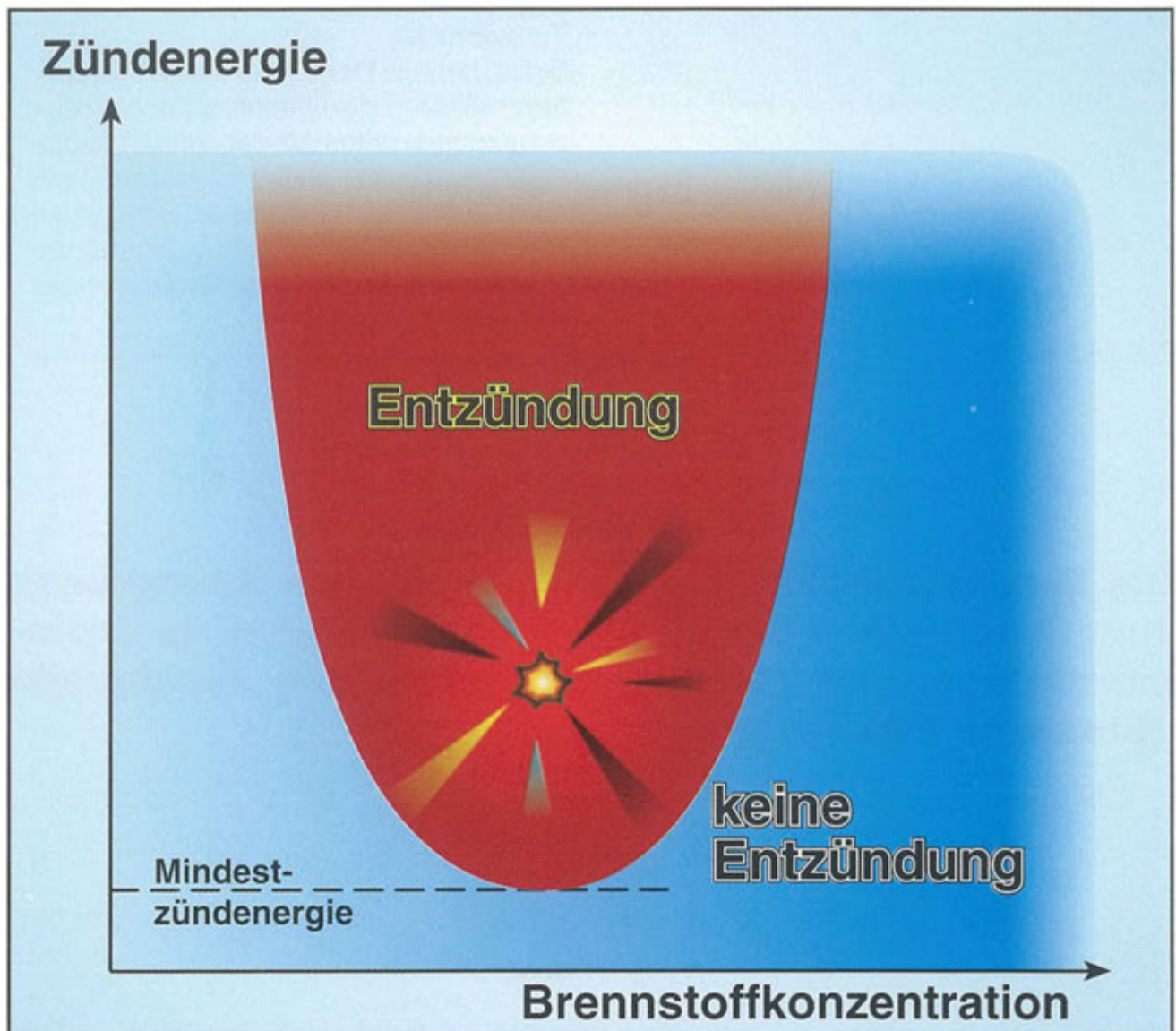


Abb. 18: Zündenergie in Abhängigkeit der Brennstoffkonzentration

Welche Mindestzündenergie weisen explosionsfähige Brennstoff/Luft-Gemische auf?

Die Mindestzündenergie der üblichen Lösemitteldampf/Luft-Gemische beträgt ca. 0,3 bis 1 mJ.

Sehr leicht entzündbare Stoffe wie Acetylen, Wasserstoff und Schwefelkohlenstoff weisen im Gemisch mit Luft Mindestzündenergie-Werte von weniger als 0,025 mJ auf.

Die Mindestzündenergie der brennbaren Stäube überstreicht einen weiten Bereich. Einige Stäube weisen eine Mindestzündenergie von weniger als 10 mJ auf, vereinzelte Stäube liegen sogar unterhalb 1 mJ. Grundsätzlich gilt, dass die Mindestzündenergie eines Staub/Luft-Gemisches umso tiefer liegt, je feiner und trockener das Produkt, je höher die Temperatur der Staubwolke und je geringer ihre Turbulenz ist.

Schon geringe Beimischungen von brennbaren Gasen oder Dämpfen, auch in Konzentrationen unterhalb der unteren Explosionsgrenze des entsprechenden Gas- oder Dampf/Luft-Gemisches, können die Mindestzündenergie eines Staub/Luft-Gemisches erniedrigen (Bildung eines hybriden Gemisches).

Die Mindestzündenergie ist die wichtigste Kenngröße zum Beschreiben der Zündempfindlichkeit eines explosionsfähigen Gemisches bezüglich der Zündquelle «Statische Elektrizität».

Wie zündwirksam sind Entladungen?

Die Zündwirksamkeit einer Entladung im Hinblick auf die Entzündung eines explosionsfähigen Gemisches wird nach Massgabe der Mindestzündenergie (MZE) des explosionsfähigen Gemisches und der Zündfähigkeit (freigesetzte Energie) einer Entladung bestimmt.

Welche Entladungsarten sind bekannt?

Die bis heute in der Praxis beobachteten Entladungsarten sind:

- Funkenentladung
- Büschelentladung
- Coronaentladung
- Gleitstielbüschelentladung
- Schüttkegelentladung

Ferner sind gewitterblitzartige Entladungen, wie sie auch bei Vulkanausbrüchen in den Aschenwolken beobachtet worden sind, denkbar. Sie wurden jedoch noch nie in industriell erzeugten Staubwolken nachgewiesen.

Art der Entladung	Wirksamkeit als Zündquelle für Gemische mit Luft von		
	Wasserstoff, Acetylen usw.	Lösemittel-dämpfen	trockenen brennbaren Stäuben
	MZE ≤ 0.025 mJ	MZE > 0.025 mJ	MZE > 1 mJ
Funke	+	+	+
Büschel	+	+	(-) ¹⁾
Gleitstiel-büschel	+	+	+
Corona	(+)	-	-
Schüttkegel	+	+	+

1) Entzündung von extrem zündempfindlichen Stäuben kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden

Tab. 1: Zündwirksamkeit verschiedener elektrostatischer Entladungsarten

Was ist eine Funkenentladung?

Eine Funkenentladung ist eine Entladung zwischen zwei leitfähigen Objekten unterschiedlichen Potentials. Sie tritt dann auf, wenn das elektrische Feld im Raum zwischen den leitfähigen Objekten die Durchbruchfeldstärke erreicht.

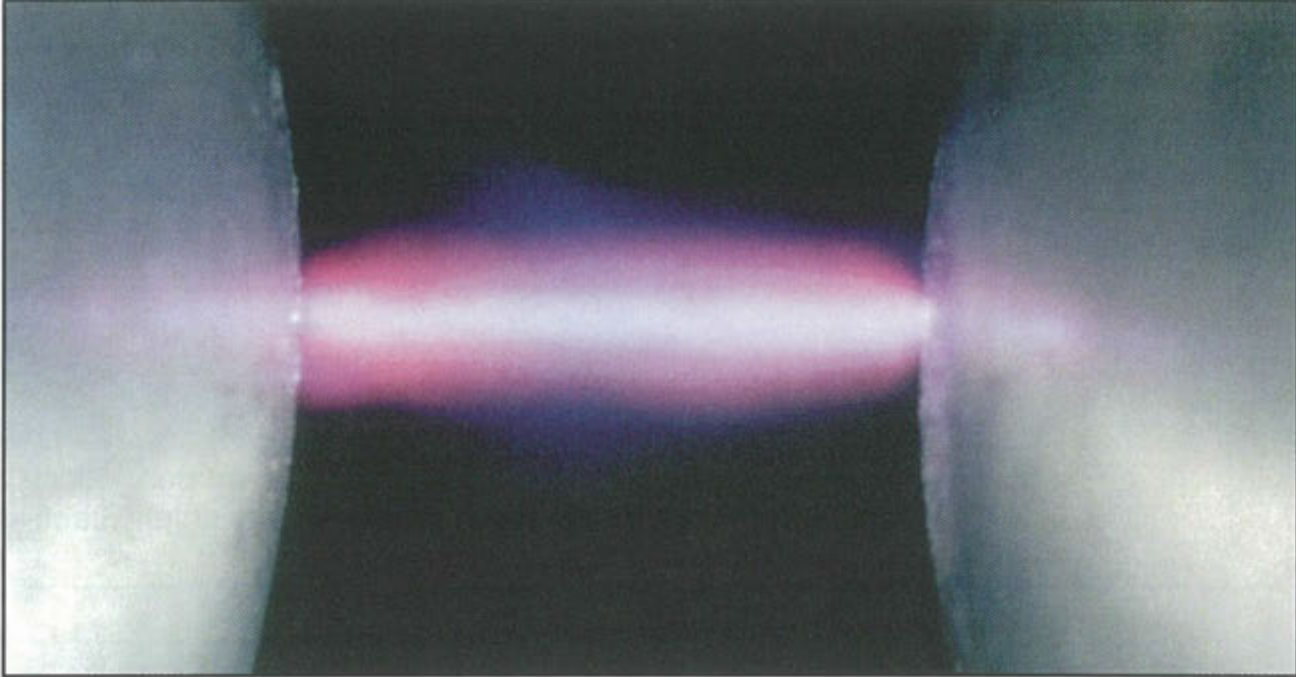


Abb. 19: Funkenentladung (Foto)

Wann treten Funkenentladungen in der Praxis auf?

Funkenentladungen treten in der Praxis üblicherweise immer dann auf, wenn leitfähige Objekte (Anlageteile, Gebinde, Produkte, Personen usw.), welche nicht geerdet sind, aufgeladen werden, und wenn eine geeignete Funkenstrecke vorhanden ist. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein leitfähiger, geerdeter Gegenstand in der Nähe ist und im Zwischenraum die Durchbruchfeldstärke überschritten wird.

Funkenentladungen können z.B. auftreten bei

- einem leitfähigen, durch Dichtungen isolierten Rohrstück,
- einer Person mit isolierendem Schuhwerk,
- einem Metallfass auf isolierender Unterlage,
- einer leitfähigen Flüssigkeit in einem isolierenden Kunststoffgebilde.

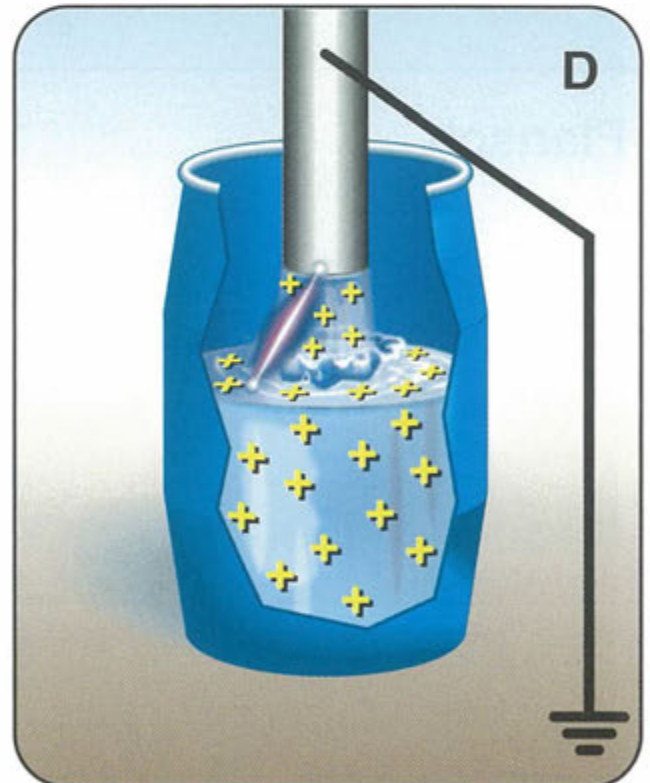
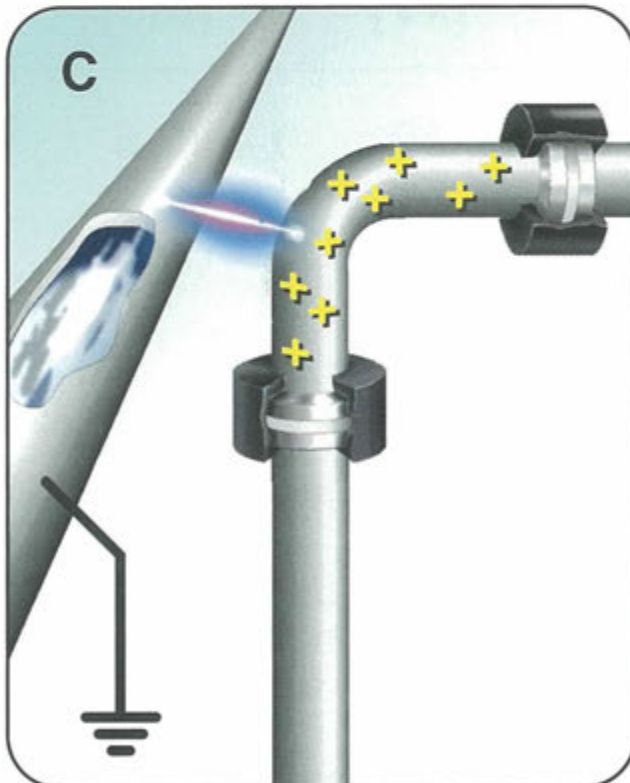
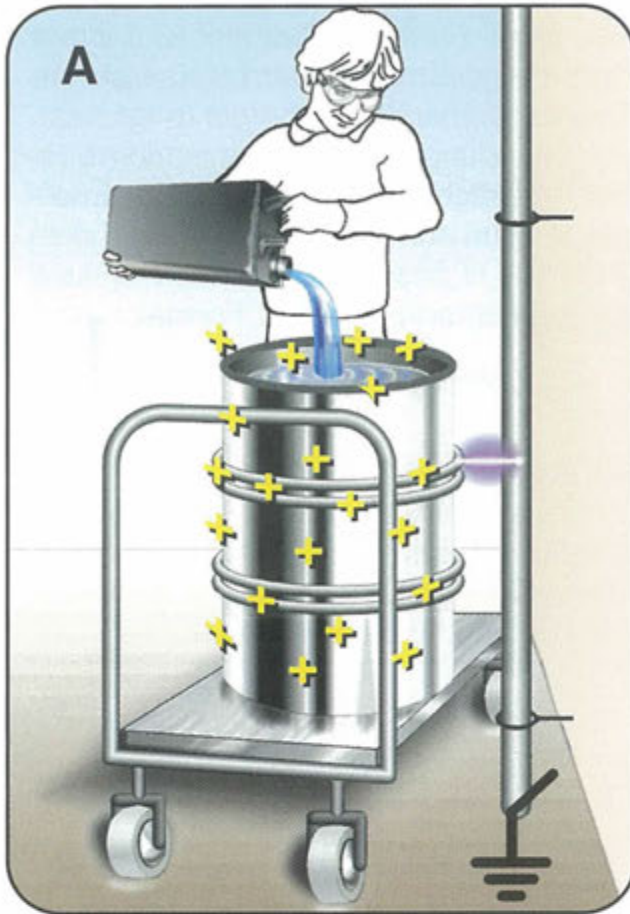


Abb. 20: Beispiele für das Auftreten von Funkenentladungen in der Praxis
 A: von Erde isoliertes Metallfass B: durch Schuhe von Erde isolierte Person
 C: durch Dichtungen isolierter Rohrbogen D: durch Kunststoffbehälter isolierte leitfähige Flüssigkeit

Wie zündfähig sind Funkenentladungen?

Bei einer Funkenentladung wird praktisch die gesamte auf dem aufgeladenen Objekt gespeicherte Energie freigesetzt. Die Entladungsenergie W entspricht deshalb praktisch der gespeicherten Energie, welche aus der Kapazität C und dem Potential U des aufgeladenen Objektes (Kondensators) nach der Formel

$$W = 1/2 C \cdot U^2$$

berechnet werden kann. Funkenentladungen sind somit grundsätzlich als zündwirksam für explosionsfähige Gas/Luft-, Dampf/Luft- und Staub/Luft-Gemische zu betrachten.

Aufgeladenes Objekt	Kapazität C [pF]	Potential U [kV]	Energie W [mJ]
Flansch	10	10	0,5
Kleinbehälter (50 l)	50	8	2
Person	150	12	11
Metallfass (200 l)	200	20	40

Tab 2: Typische Werte für die Energie von Funkenentladungen in der Praxis

Wie können Funkenentladungen vermieden werden?

Funkenentladungen können durch Erden aller leitfähigen Objekte (Anlageteile, Gebinde, Produkte, Personen usw.) vermieden werden.

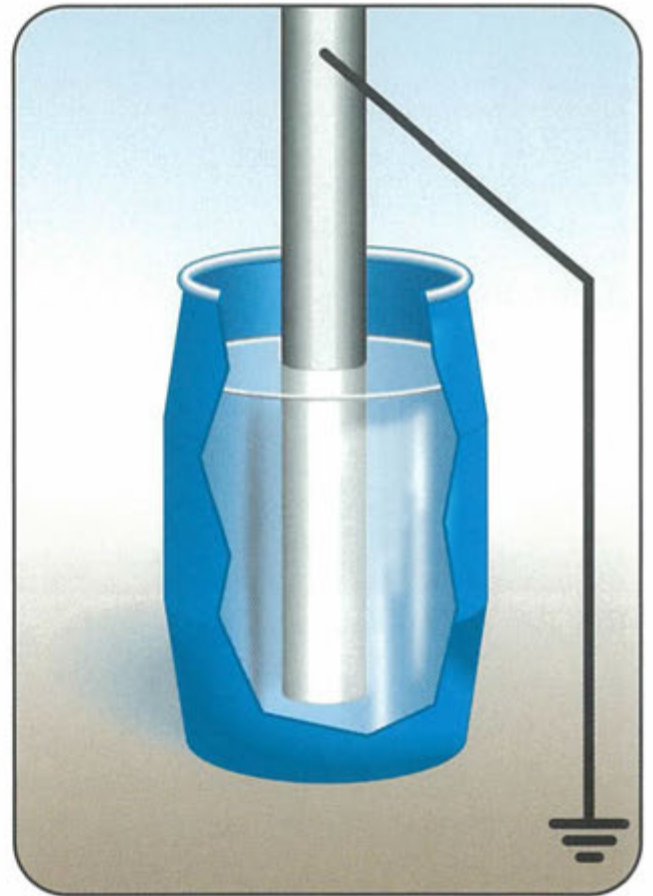
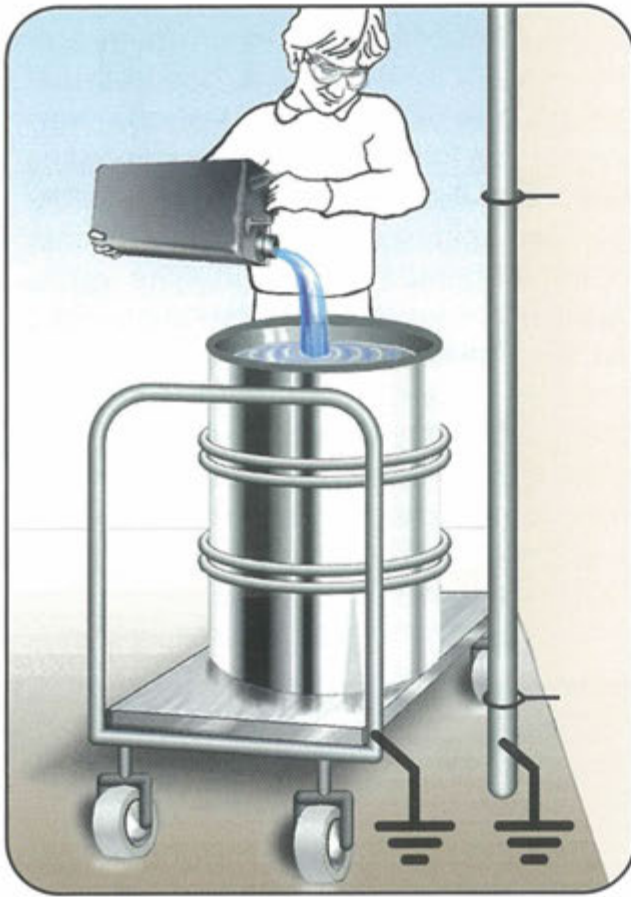


Abb. 21: Beispiele für das Vermeiden von Funkenentladungen durch Erden aller leitfähigen Teile und Produkte (vgl. Abb. 20)

Was ist eine Büschelentladung?

Büschelentladungen können dann auftreten, wenn eine leitfähige, geerdete und gekrümmte Oberfläche (Elektrode) vorzugsweise mit einem Krümmungsradius von 5 mm bis 50 mm einem hohen elektrischen Feld - z.B. ausgehend von einer hoch aufgeladenen Oberfläche eines nichtleitfähigen Werkstoffes - ausgesetzt ist. Die Entladung breitet sich ausgehend vom Ort der grössten Krümmung (höchste Feldstärke) in den Raum aus und zwar in Form eines hellen Entladungskanals, der sich nach mehreren Millimetern Länge fein verästelt (daher der Name Büschelentladung).

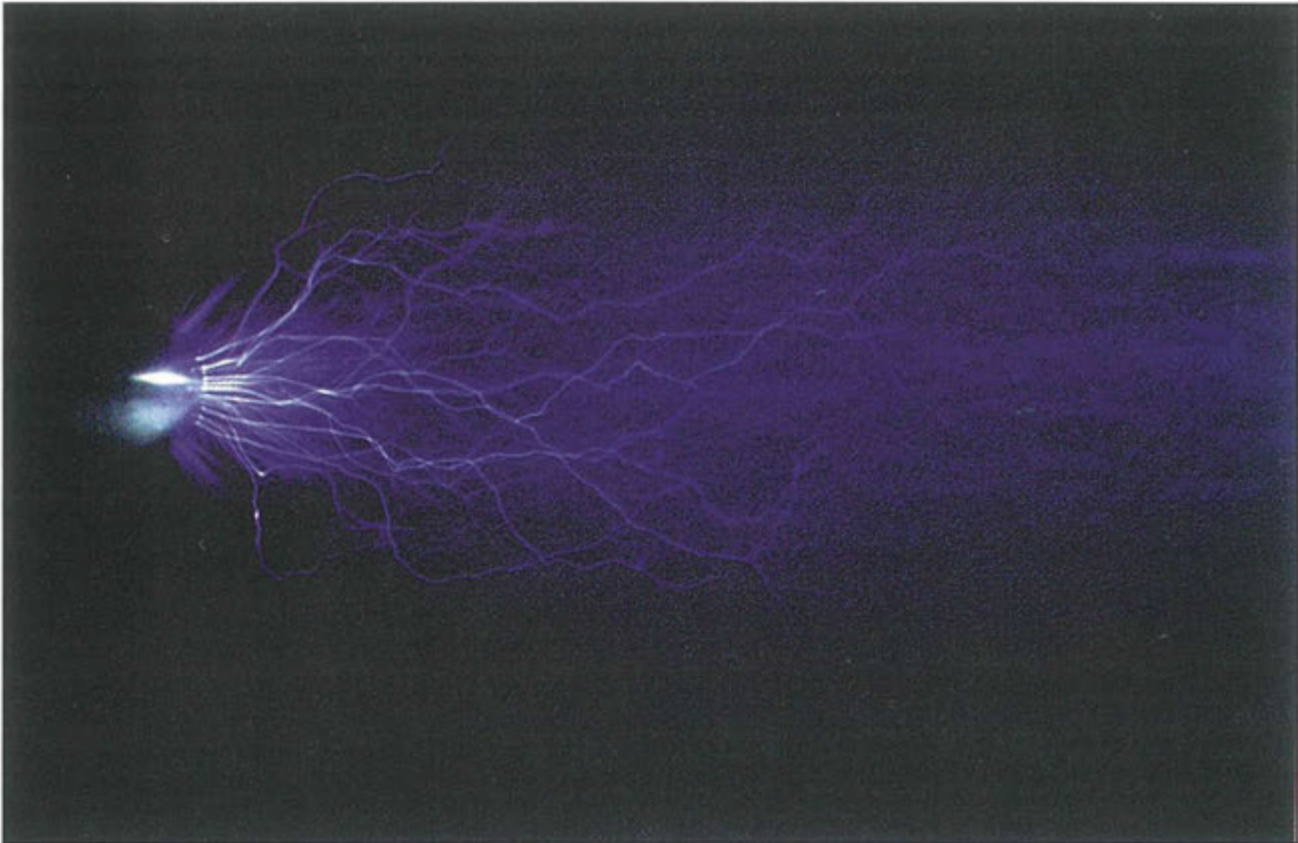


Abb. 22: Büschelentladungen (Foto)

Wann treten Büschelentladungen in der Praxis auf?

Für das Auftreten einer Büschelentladung ist es grundsätzlich belanglos, wie das hohe elektrische Feld erzeugt wird. Typische Beispiele aus der Praxis sind:

- Annähern einer leitfähigen Elektrode, wie Werkzeug oder Fingerspitze, an hoch aufgeladene Isolatoroberfläche (z.B. Kunststoffleitung zur Flüssigkeits- oder Staubförderung, Kunststoffsack, Kunststoffgebinde, Filterschlauch, Folienbahn oder Förderband)
- Entleeren von Feststoffen aus einem Kunststoffsack oder Ausschütteln eines Kunststoffsackes in der Nähe von Metallarmaturen (z.B. über der Eintragsöffnung eines Reaktionskessels)
- Fördern einer nichtleitfähigen Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit in einen Tank und Annäherung der aufgeladenen Flüssigkeitsoberfläche an ableitfähige innere Einbauten
- Absenken eines leitfähigen, geerdeten Bechers auf eine hoch aufgeladene Flüssigkeitsoberfläche zwecks Probenentnahme
- Hineinragen von leitfähigen, geerdeten Einbauteilen in eine hoch aufgeladene Staubwolke oder einen hoch aufgeladenen Tröpfchennebel
- Eintragen von isolierendem, pulverförmigem Produkt in Gebinde, Behälter oder Silos, Annäherung der hoch aufgeladenen Staubschüttung an innere Einbauteile oder Herablassen eines leitfähigen, geerdeten Bechers zur Probenentnahme oder einer Niveausonde zur Füllstandsbestimmung
- Hineinragen von Fahnenstangen, Antennen, Schiffsmasten oder Eispickeln in hohe atmosphärische Felder (Elmsfeuer bei Gewitter)

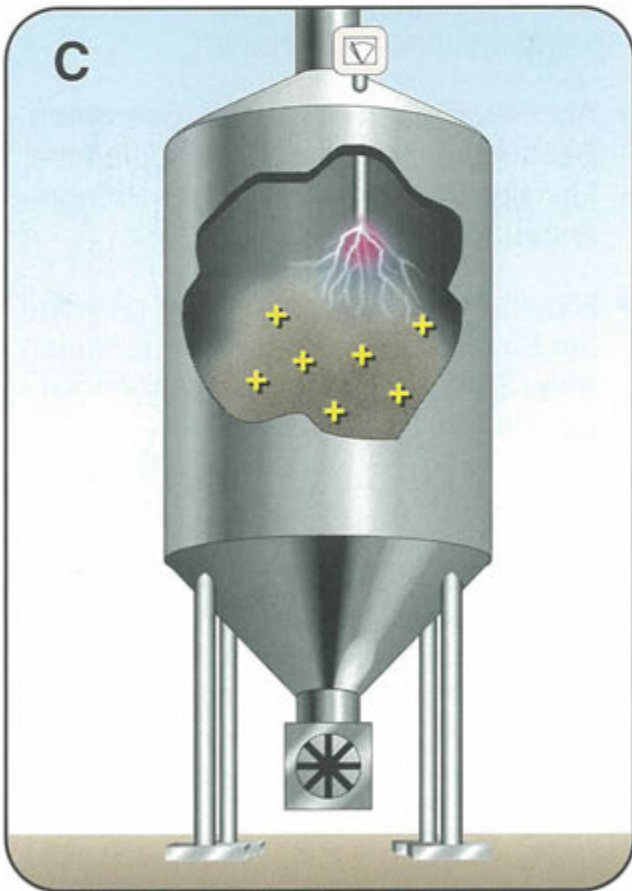
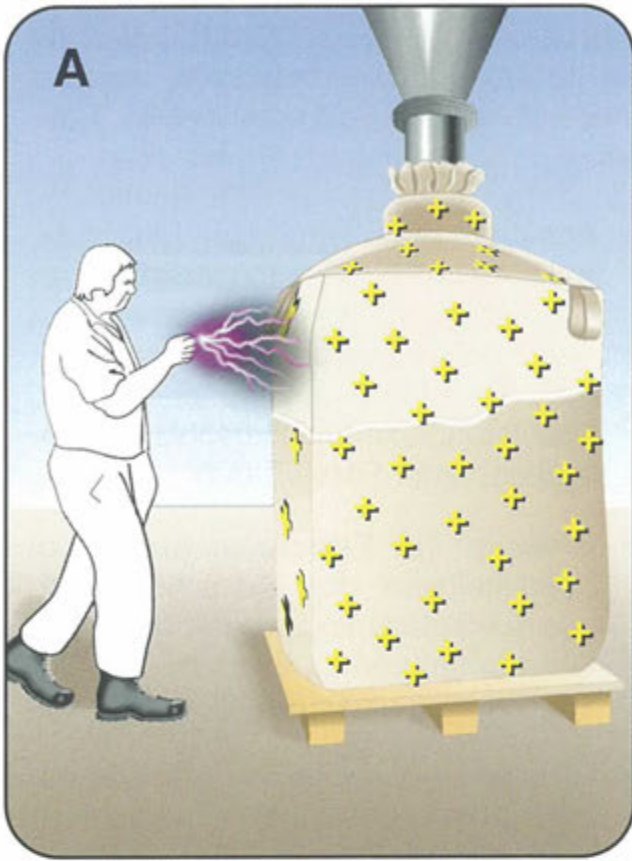


Abb. 23: Beispiele von Büschelentladungen in der Praxis - A: durch aufgeladenen Schüttgutbehälter B: durch aufgeladene, isolierende Flüssigkeit C: durch aufgeladene Staubwolke D: durch aufgeladene Gewitterwolke

**Wie zündfähig sind
Büschelentladungen?**

Die Energie von Büschelentladungen lässt sich schwer direkt bestimmen. Messwerte für die mit Gasen bestimmte Äquivalentenergie liegen im Bereich von wenigen Millijoule. Gemäss heutigem Kenntnisstand ist eine Entzündung von Staub/Luft-Gemischen durch Büschelentladungen im allgemeinen nicht zu erwarten. Eine Entzündung von extrem zündempfindlichen Stäuben durch Büschelentladung kann jedoch nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Mit der Entzündung von Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemischen durch Büschelentladungen muss hingegen gerechnet werden.

**Wie können Büschelentladungen ver-
mieden werden?**

Büschelentladungen können vermieden werden, indem starke elektrische Felder, z.B. durch Verwenden leitfähiger Materialien und deren Erdung, durch Begrenzen der Oberfläche nichtleitfähiger Objekte oder durch Abschirmungsmassnahmen, vermieden werden.

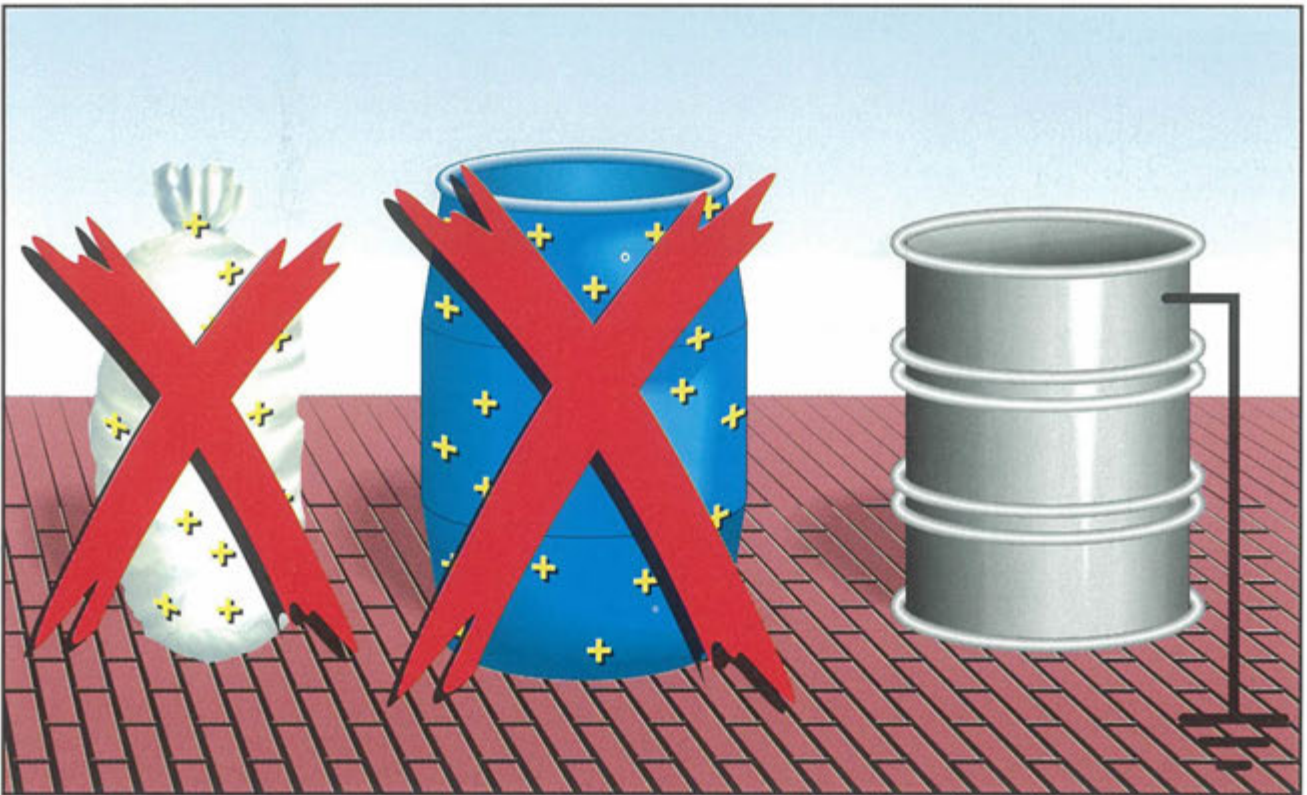


Abb. 24: Vermeiden von Büschelentladungen durch Verwenden von leitfähigen geerdeten Packmitteln (keine Kunststoffsäcke, keine Kunststoffbehälter)

Was ist eine Coronaentladung?

Die Coronaentladung (auch Spitzenentladung) kann als Spezialfall einer Büschelentladung verstanden werden. Falls der Krümmungsradius der geerdeten Elektrode, die in ein hohes elektrisches Feld gebracht wird, sehr klein ($< 1 \text{ mm}$) ist, wird das Feld nur in unmittelbarer Nähe der Spitze gestört. Dadurch entsteht eine sehr schwache, auf die unmittelbare Umgebung der Spitze beschränkte Entladung, welche in den meisten Fällen kontinuierlich abläuft. Auf weitere Erläuterungen zur Coronaentladung kann verzichtet werden, da unter den selben Bedingungen im schlimmsten Fall auch die viel energiereicheren Büschelentladungen auftreten können.

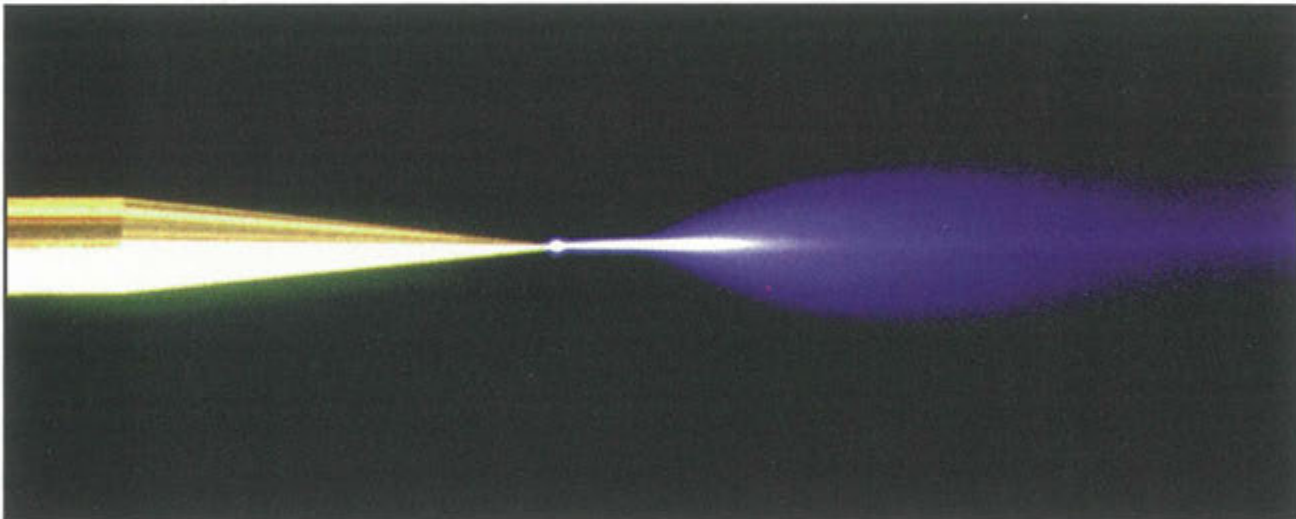


Abb. 25: Coronaentladung (Foto)

**Was ist eine
Gleitstielbüschelentladung?**

Eine Gleitstielbüschelentladung ist eine Entladung längs der Oberfläche einer beidseitig mit entgegengesetztem Vorzeichen sehr hoch aufgeladenen dünnen dielektrischen (isolierenden) Schicht. Die dielektrische Schicht kann entweder als «freitragende» Wand oder als Beschichtung einer Metalloberfläche vorliegen.

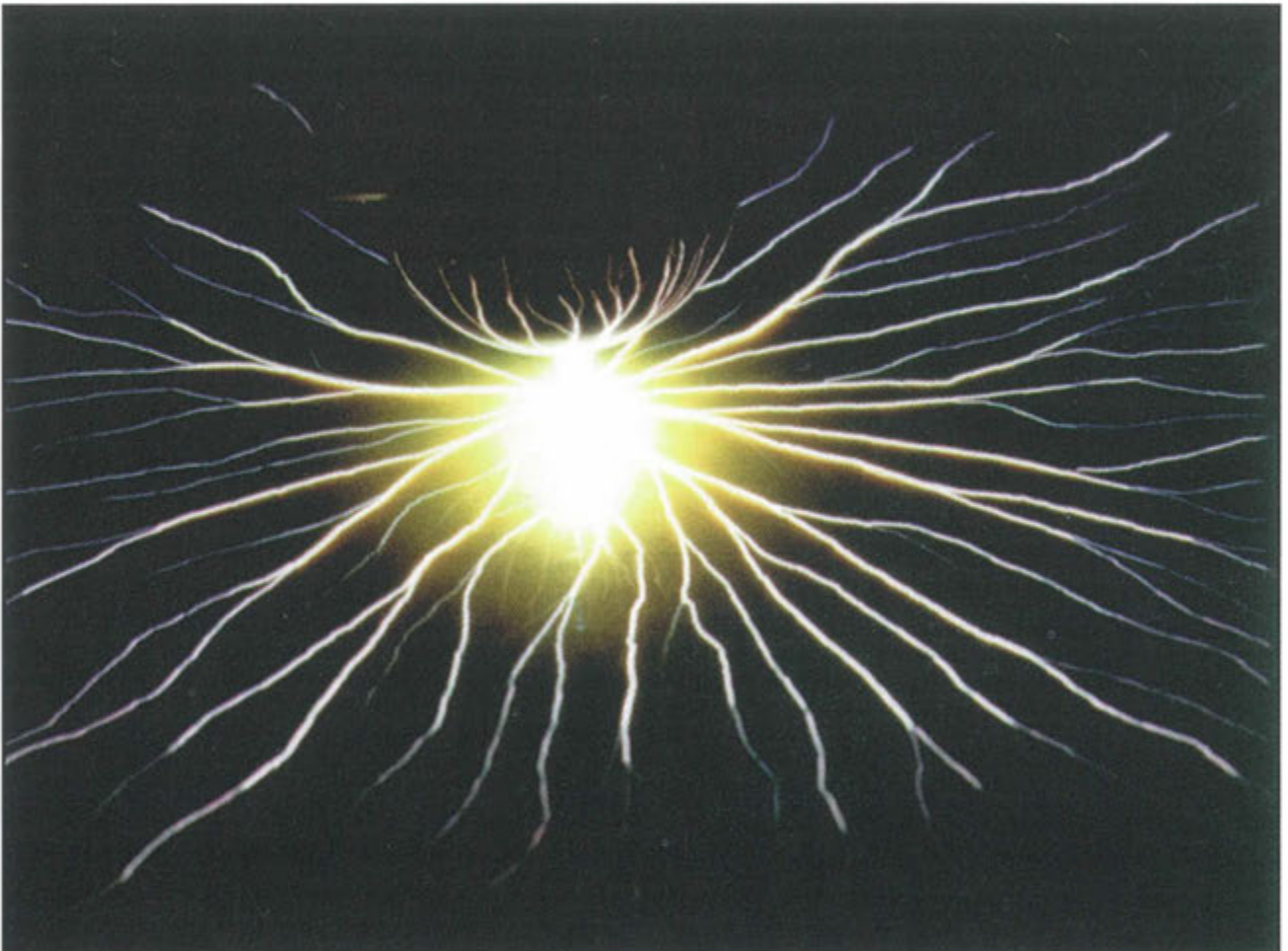


Abb. 26: Gleitstielbüschelentladung (Foto)

Wann treten Gleitstielbüschelentladungen in der Praxis auf?

Es sind Aufladevorgänge im Zusammenhang mit hohen Trenngeschwindigkeiten und isolierenden Materialien hoher dielektrischer Festigkeit (hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit) notwendig, wie sie etwa bei folgenden Operationen zu erwarten sind:

- pneumatisches Fördern von Staub mit hoher Geschwindigkeit durch eine isolierende Rohrleitung oder durch eine leitfähige Rohrleitung mit isolierender Innenbeschichtung
- Fördern von isolierenden Flüssigkeiten mit hoher Geschwindigkeit durch eine isolierende Rohrleitung oder durch eine leitfähige Rohrleitung mit isolierender Innenbeschichtung
- fortwährendes Aufprallen immer neuer Staubteilchen auf dieselbe Isolatoroberfläche oder auf eine isolierend beschichtete Metalloberfläche (z.B. in einem Staubabscheider oder an der Frontscheibe eines Flugzeuges beim Durchfliegen einer Wolke mit Eis- oder Staubpartikeln)
- schnelles Umlaufen von isolierenden oder einseitig leitfähig beschichteten Förder- oder Antriebsbändern
- Befüllen von isolierenden Grossgebinden und Silos mit hochaufgeladenem, isolierendem Produkt

Bei manuell bewirkten Trennvorgängen (z.B. Abreiben von isolierenden Oberflächen, Ausschütten von Pulver aus einem Kunststoffstoffsack) treten üblicherweise keine so hohen Oberflächenladungsdichten, wie sie zur Entstehung von Gleitstielbüschelentladungen notwendig sind, auf.

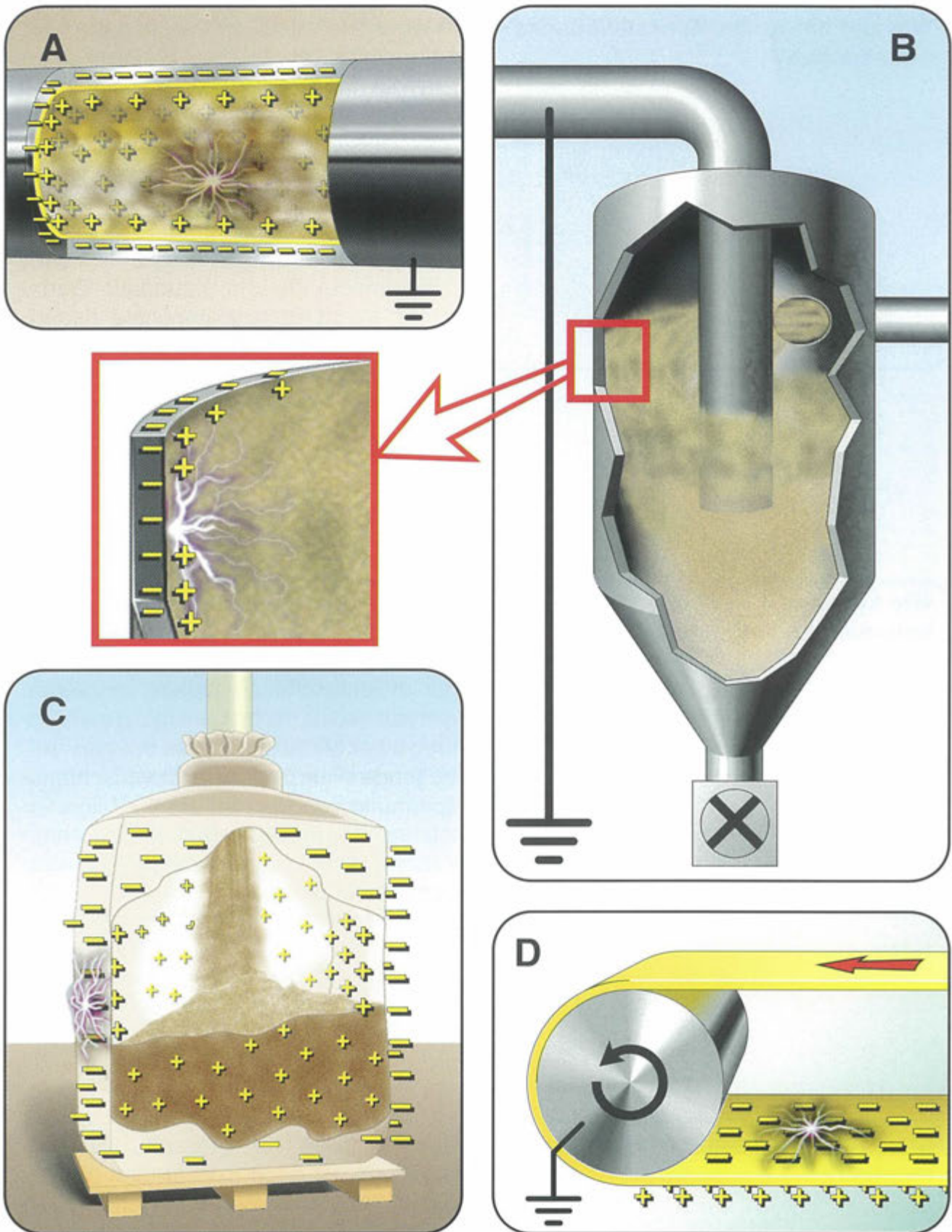


Abb. 27: Beispiele von Gleitstielbüscheleentladungen in der Praxis
 A: in isolierend innenbeschichteter Rohrleitung
 B: in isolierend innenbeschichtetem Staubabscheider
 C: an isolierendem Schüttgutbehälter
 D: an schnelllaufendem isolierendem Förderband

Wie zündfähig sind Gleitstielbüschelentladungen?

In einer Gleitstielbüschelentladung wird ein grosser Teil der total gespeicherten Energie freigesetzt. Die gespeicherte Energie kann entsprechend den Gesetzmässigkeiten beim Plattenkondensator berechnet werden. Sie kann schon für aufgeladene Flächen von $0,1 \text{ m}^2$ mehrere Joule betragen. Mit einer Entzündung von explosionsfähigen Gas/Luft-, Lösemitteldampf/Luft- und Staub/Luft- Gemischen durch Gleitstielbüschelentladungen muss gerechnet werden.

Wie können Gleitstielbüschelentladungen verhindert werden?

Gleitstielbüschelentladungen können durch das Verwenden von leitfähigen Werkstoffen oder Werkstoffen mit niedriger dielektrischer Festigkeit vermieden werden. Isolatorschichten (als Beschichtung einer Metalloberfläche oder als freitragende Wand) mit einer Durchschlagsspannung von weniger als 4 kV können toleriert werden. An derartigen Schichten können keine Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

Sind noch weitere Entladungsarten möglich?

Beim Befüllen von grossen Silos und Behältern mit hoch isolierenden Schüttgütern (z.B. pneumatischer Eintrag von Polymeren) sind vereinzelt Entladungen an der Schüttgutoberfläche, sogenannte Schüttkegelentladungen, beobachtet worden. Für das Beurteilen der Entstehung und Zündfähigkeit dieser Entladungen ist spezielles Fachwissen notwendig.

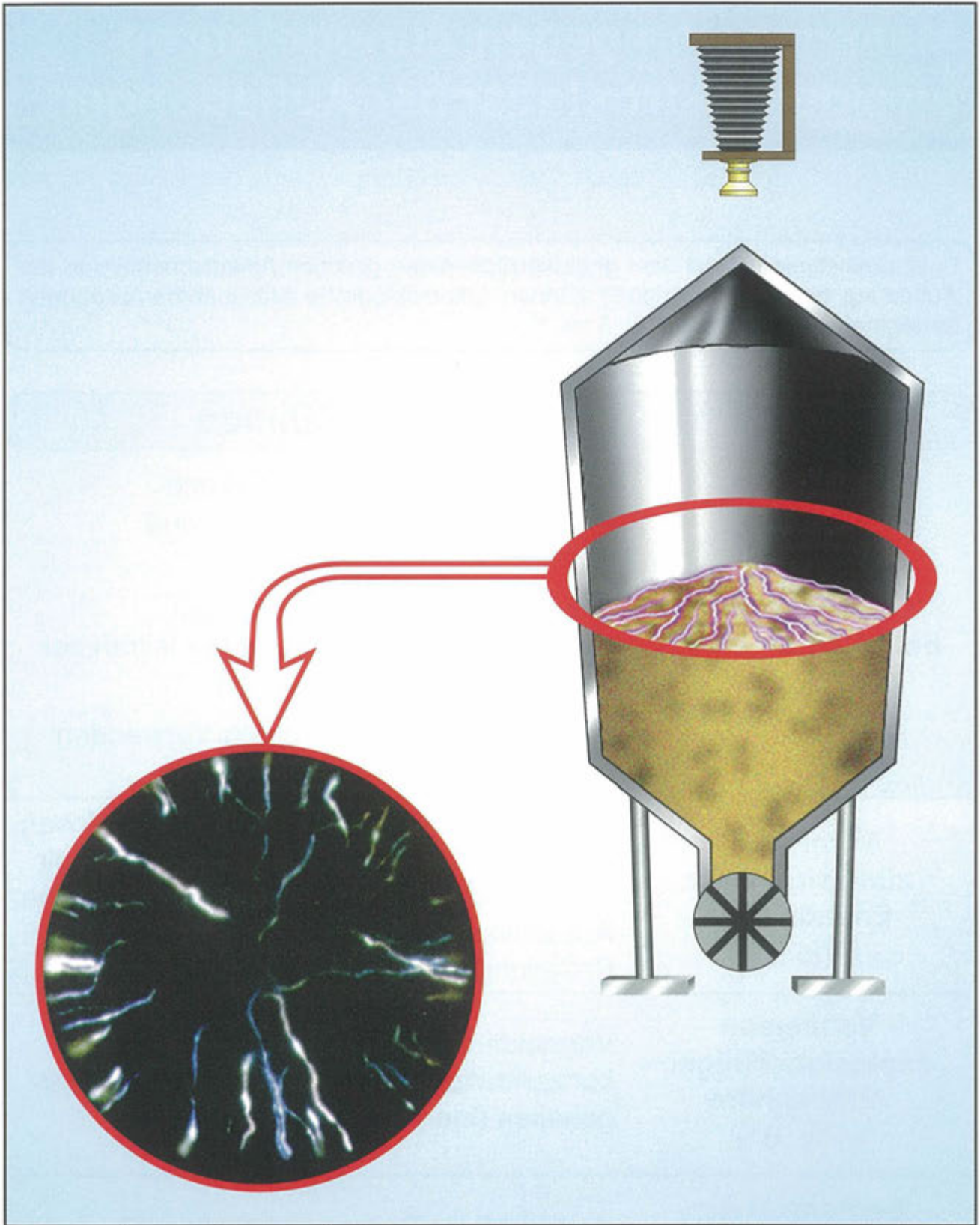


Abb. 28: Schüttkegelentladungen (Foto)

Massnahmen gegen Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen

In Übereinstimmung mit dem grundsätzlich immer gleichen Ablaufschema von der Aufladung bis zur Entzündung können unterschiedliche Massnahmenkategorien betrachtet werden (siehe Abb. 5 bis 7).

Ziel	Massnahmen
Vermeiden hoher Aufladungen (Abb. 29)	<p>Aufladerate niedrig halten durch Begrenzen sämtlicher Trenn- und Fördergeschwindigkeiten</p> <p>Gefahrlose Ladungsableitungen begünstigen durch Verwenden leitfähiger Materialien und durch Erden</p> <p>Ladung neutralisieren durch Verwenden aktiver oder passiver Ionisatoren</p>
Vermeiden zündwirksamer Entladungen (Abb. 30)	<p>Beurteilen der Zündfähigkeit der möglichen Entladungen und der Zündempfindlichkeit der möglichen explosionsfähigen Gemische</p> <p>Ausschliessen von zündwirksamen Entladungen</p>
Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre (Abb. 31)	<p>Vermeiden explosionsfähiger Brennstoffkonzentration, Vermindern des Sauerstoffgehaltes (Inertisieren)</p>
Begrenzen der Explosionsaus- wirkungen auf ein tragbares Mass (Abb. 31)	<p>Konstruktiver Explosionsschutz, z.B. Explosionsdruckentlastung, Explosionsunterdrückung</p>

Tab. 3: Schutzmassnahmen

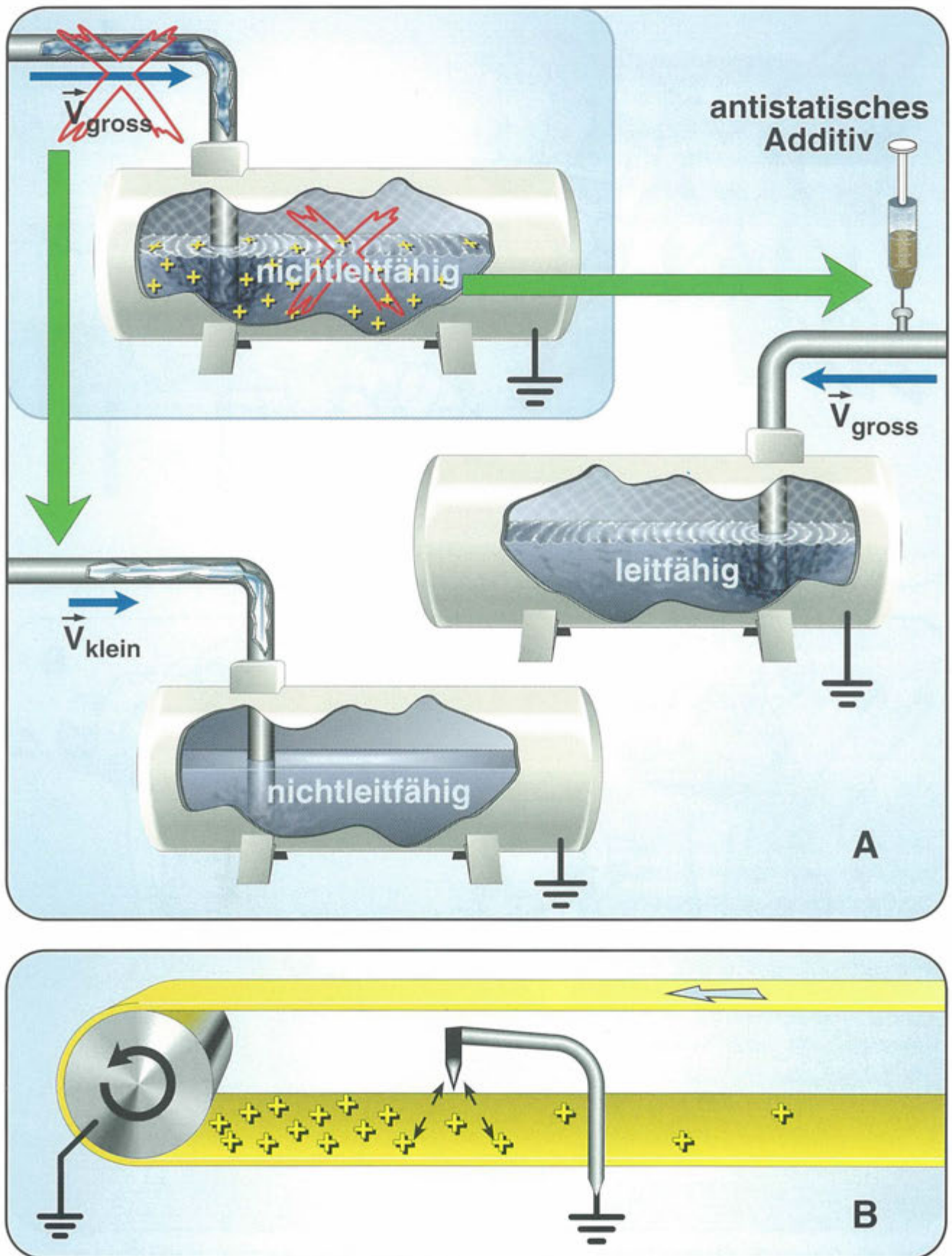


Abb. 29: Beispiele für das Vermeiden hoher Aufladungen in der Praxis
 A: Bei nichtleitfähigen Flüssigkeiten: Erhöhen der Leitfähigkeit durch Zugabe von Additiv oder Begrenzen der Strömungsgeschwindigkeit
 B: Bei isolierenden Feststoffoberflächen: Ladungsneutralisation

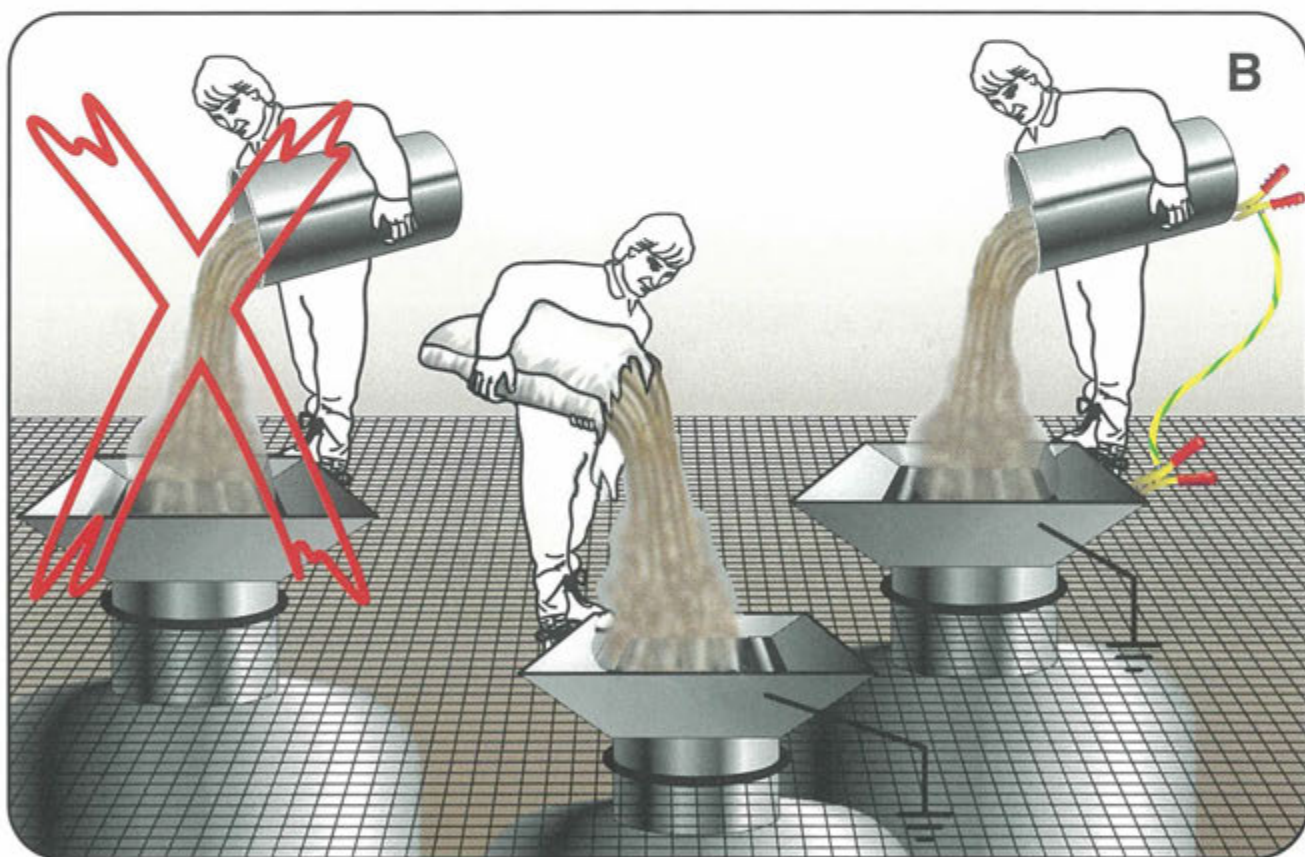
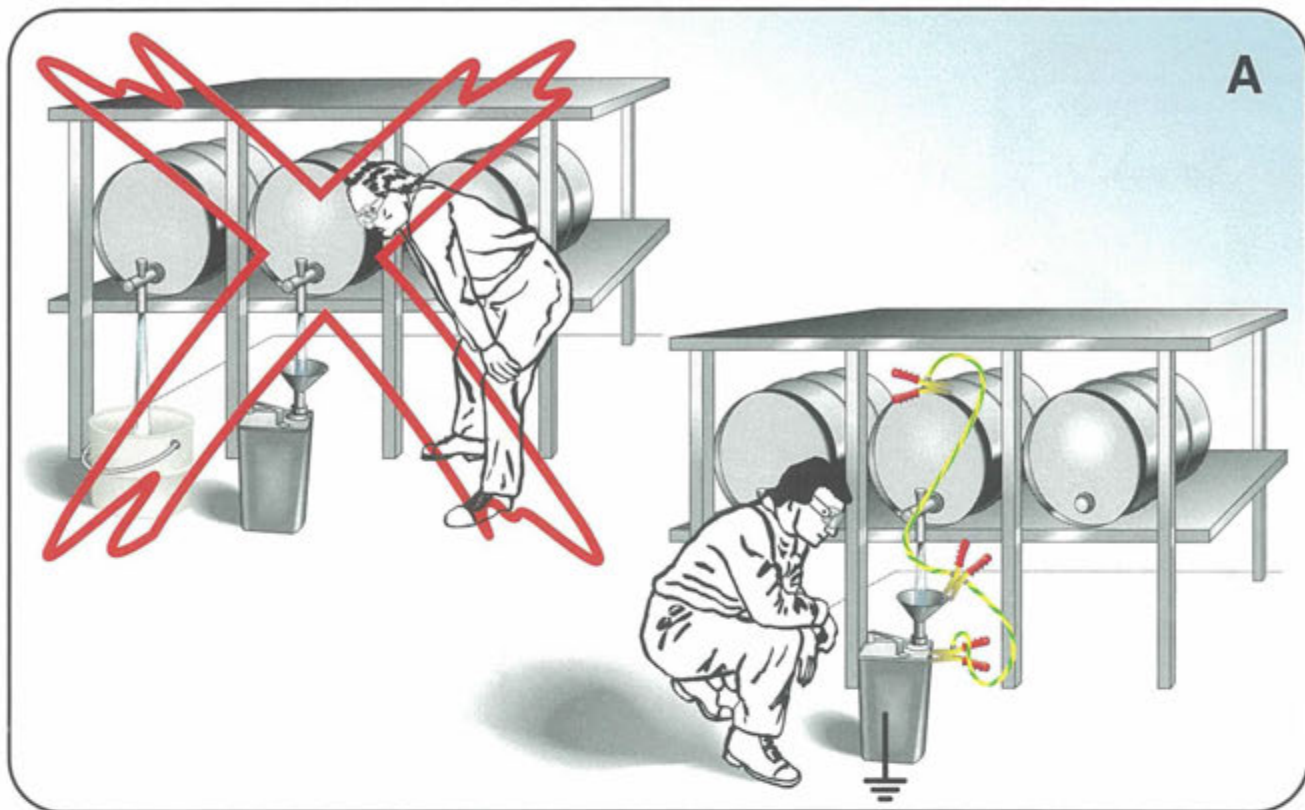


Abb. 30: Beispiele für das Vermeiden zündwirksamer Entladungen in der Praxis
 A: Umfüllen von brennbaren Flüssigkeiten: nur leitfähige Gebinde verwenden und erden B: Eintragen von brennbaren Stäuben: alle leitfähigen Teile erden, kleine Kunststoffgebilde z.B. Säcke, Schüttgutbehälter, Fässer sind in Abwesenheit von brennbaren Gasen oder Dämpfen zulässig

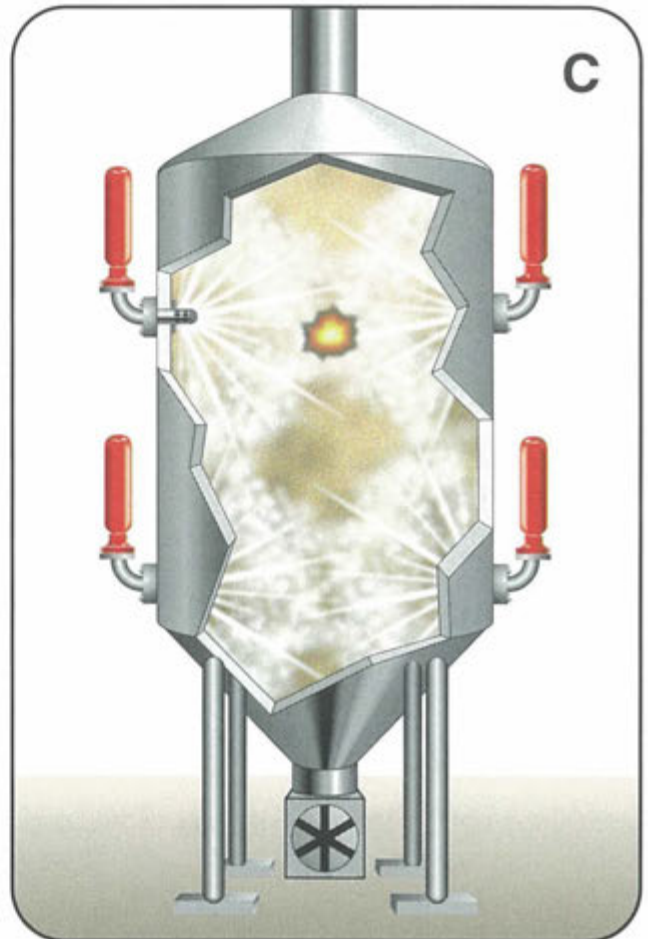
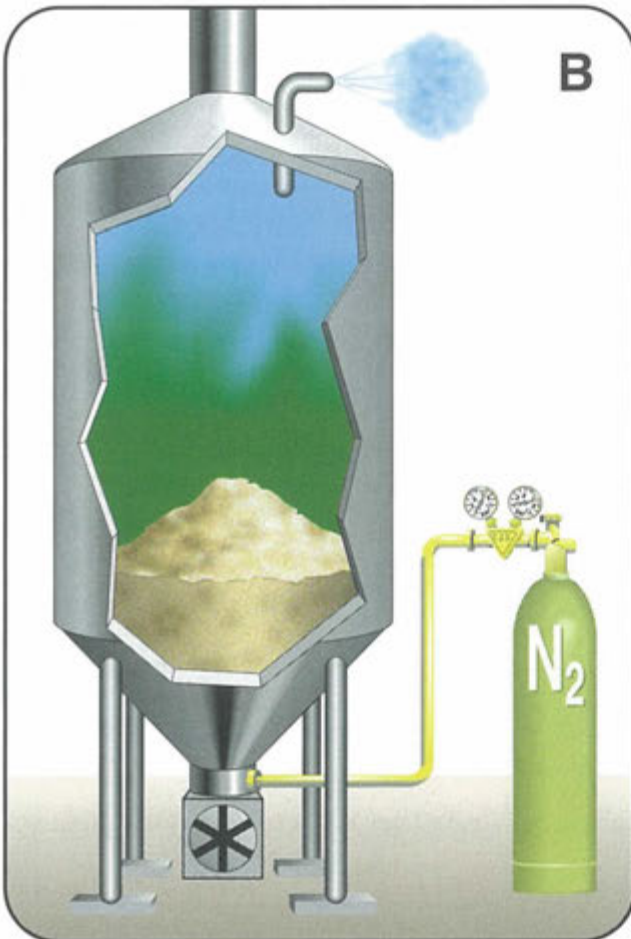
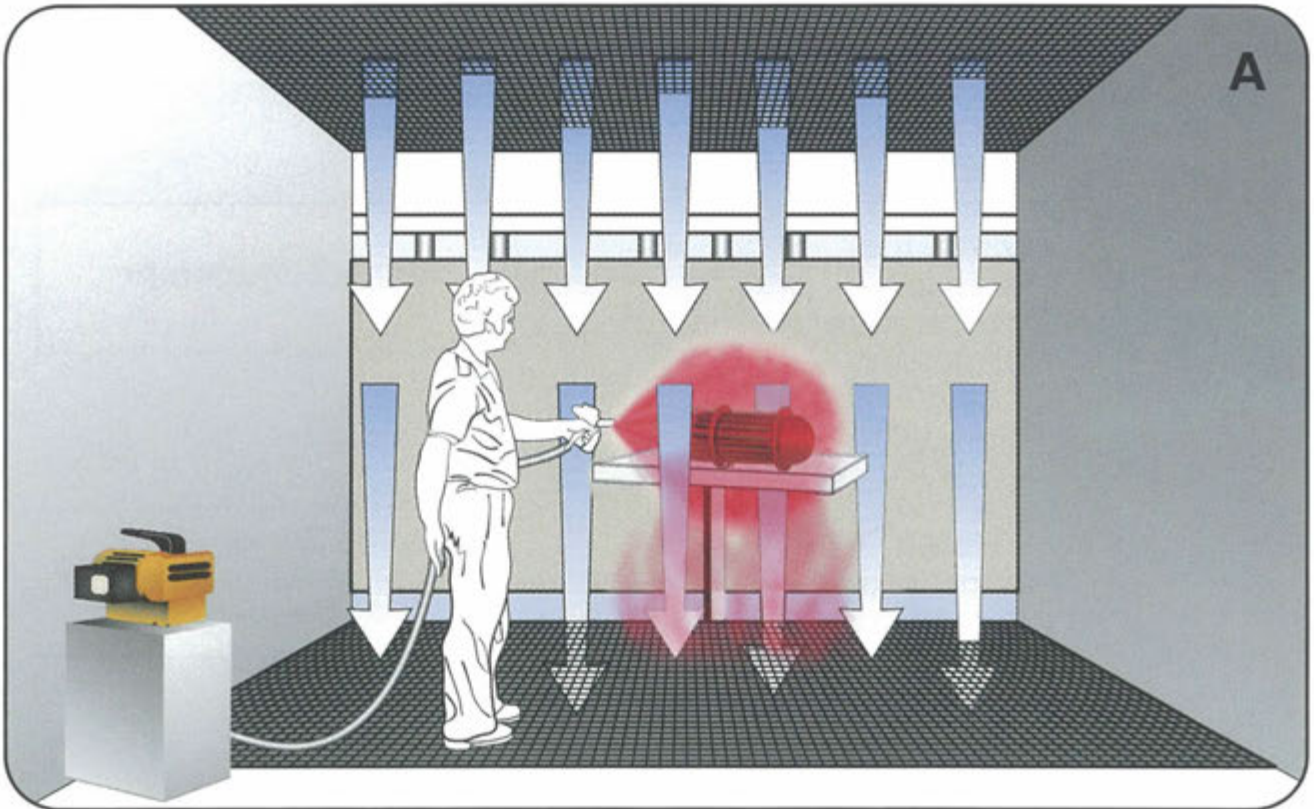
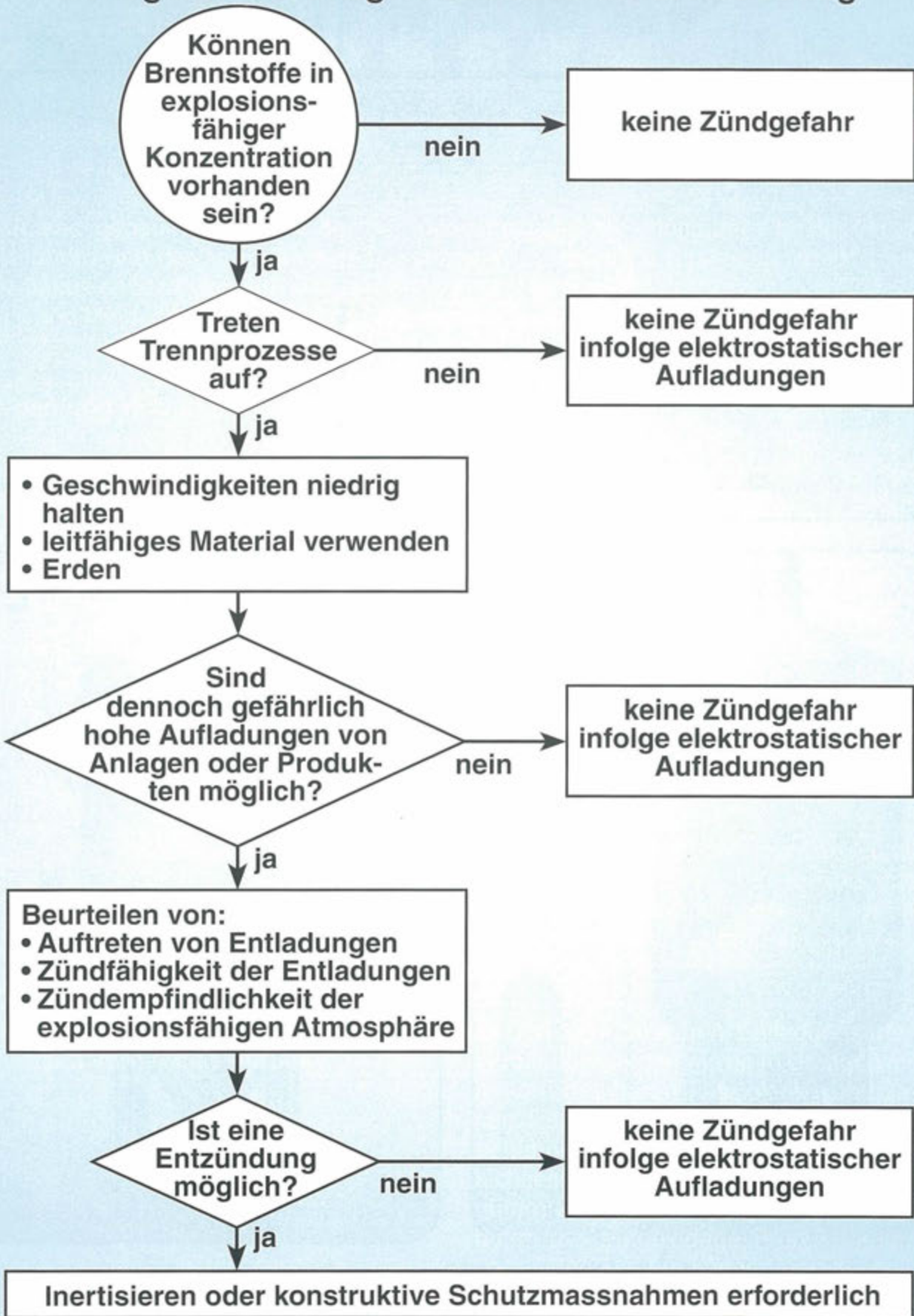


Abb. 31: Beispiele von Schutzmassnahmen

- Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre - A: Lüftung B: Inertisierung
- Konstruktive Schutzmassnahme - C: Explosionsunterdrückung

Entscheidungsbaum für das Beurteilen der Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung



Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten und Gasen

Für das genaue Beurteilen der bei brennbaren Flüssigkeiten und Gasen bestehenden Gefahren und der zu treffenden Massnahmen müssen die Stoffeigenschaften wie Leitfähigkeit und Flammpunkt (bei den Flüssigkeiten) sowie die Mindestzündenergie bekannt sein.

Die im folgenden ausgeführten Empfehlungen sollen als Beispiele dienen, wie in der Praxis den Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen begegnet werden kann. Neben den aufgezeigten Schutzmassnahmen können in der Praxis je nach spezieller Situation auch andere Schutzmassnahmen hinreichend oder zusätzlich erforderlich sein. Auf die Angabe von Grenzwerten wurde absichtlich verzichtet, da diese je nach Land unterschiedlich festgelegt sein können.

Beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten in Gegenwart von Luft muss immer mit explosionsfähiger Atmosphäre gerechnet werden, sofern die Arbeitstemperatur oberhalb des Flammpunktes der Flüssigkeit liegt.

Wann und wodurch besteht Gefahr?

- Brennbare Flüssigkeiten können explosionsfähige Dampf/ Luft-Gemische bilden, sofern die Temperatur nicht hinreichend tief unter dem Flammpunkt liegt (siehe IVSS-Broschüre «Gasexplosionen»).
- Brennbare Flüssigkeiten können durch Versprühen (Tröpfchennebel) auch bei Temperaturen unterhalb ihres Flammpunktes zu einer explosionsfähigen Atmosphäre führen.
- Brennbare Gase können explosionsfähige Gas/Luft-Gemische bilden (siehe Abb. 2).
- Flüssigkeiten können z.B. beim Strömen, Umfüllen, Rühren oder Versprühen zu gefährlich hohen Aufladungen von sich selbst oder von Anlageteilen, Gebinden usw. führen (siehe Abb. 32).

Schon durch Beimischen geringer Mengen nichtlöslicher Feststoffe (Suspensionen) oder nichtmischbarer Flüssigkeiten (Emulsionen) kann die Flüssigkeitsaufladung ausserordentlich hoch werden (siehe Abb. 33).

Reine Gase laden sich beim Strömen nicht auf. In der betrieblichen Praxis sind Gase aber oft durch Partikel oder Tröpfchen verunreinigt, die sich aufladen können (siehe Abb. 34).

Durch sekundäre Prozesse (z.B. Gehen des Menschen, Abreiben einer Isolatoroberfläche, Bewegen eines Förderbandes) können hohe Aufladungen herbeigeführt werden (siehe Abb. 8 und 35).

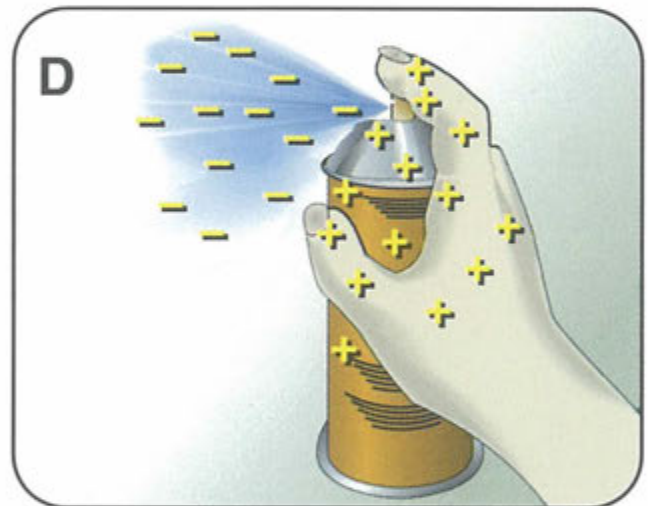
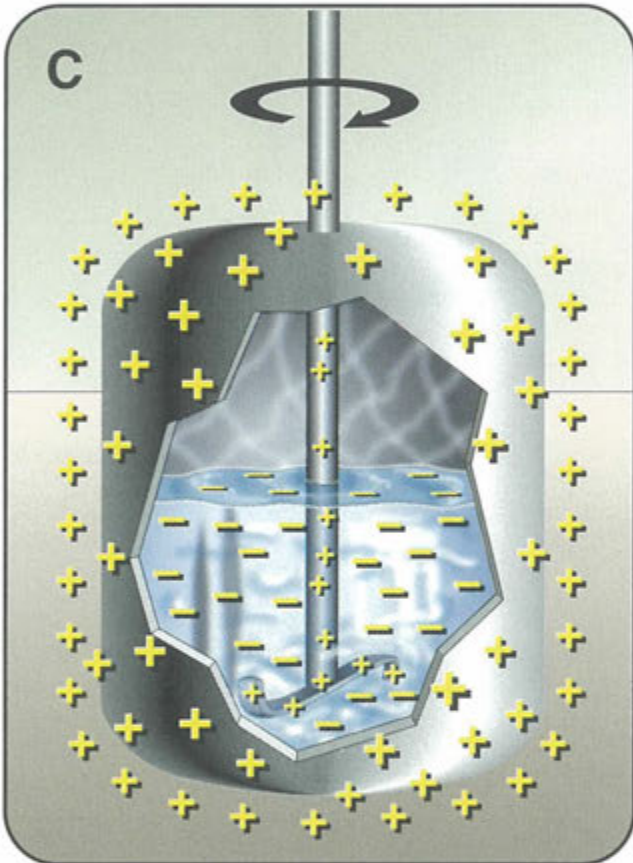
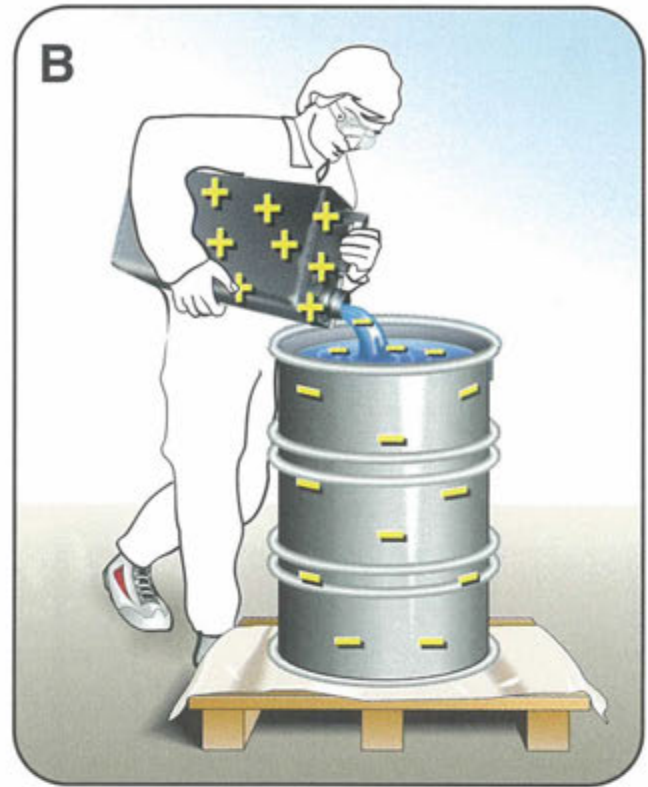
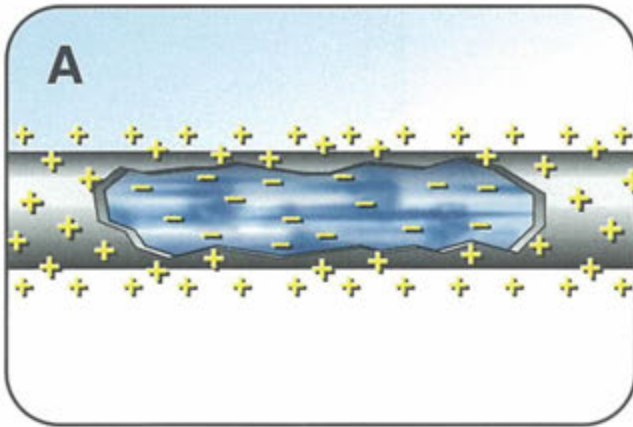


Abb. 32: Beispiele für das Entstehen von hohen Aufladungen in der Praxis
 A: Strömen einer nichtleitenden Flüssigkeit durch eine Rohrleitung (Metall, Glas, Kunststoff)
 B: Umfüllen einer nichtleitenden Flüssigkeit
 C: Rühren einer nichtleitenden Flüssigkeit
 D: Zerdüsen einer Flüssigkeit (leitend oder nichtleitend)

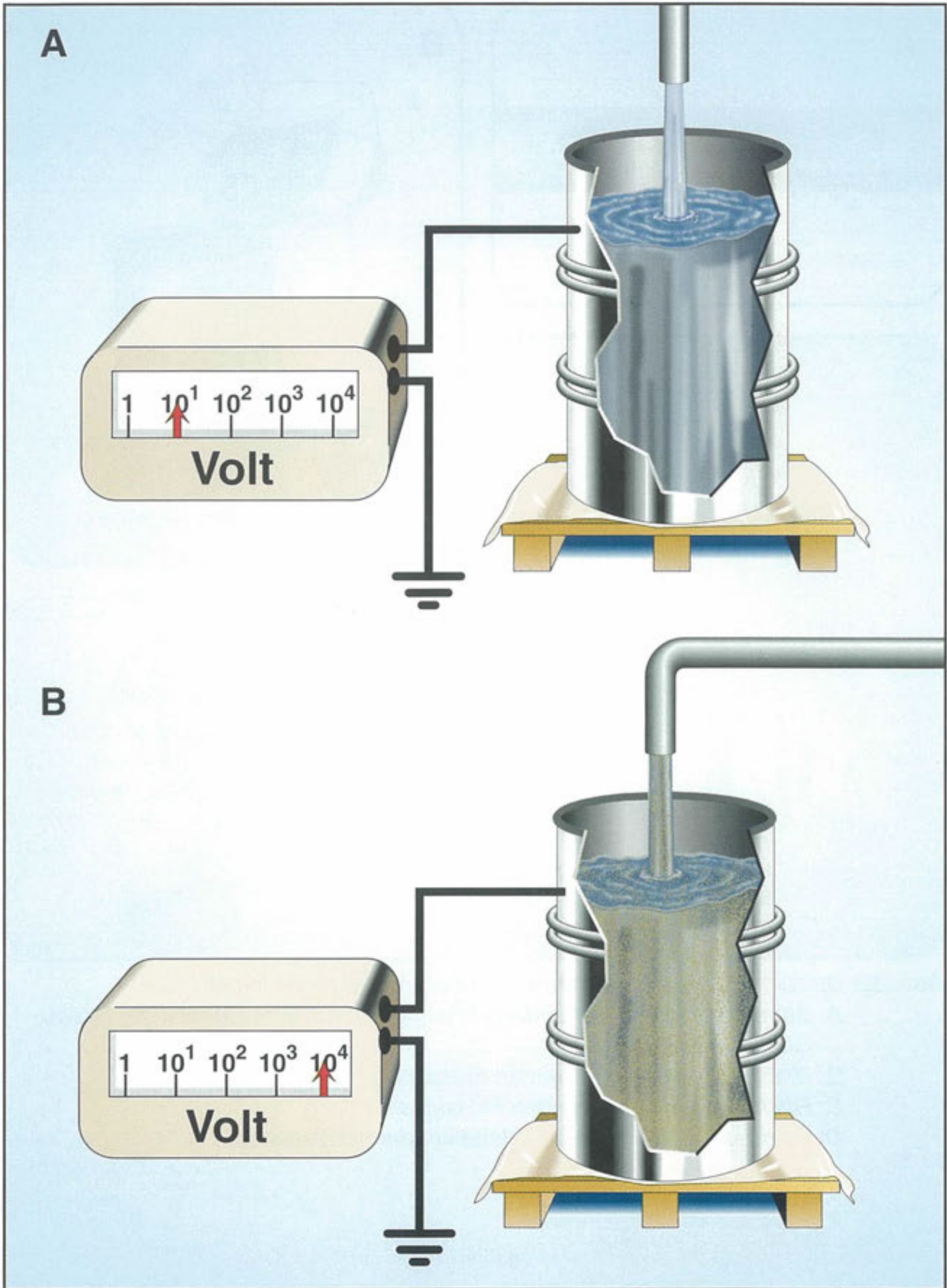


Abb. 33: Erhöhung der Aufladung von Flüssigkeiten durch Beimischen von nichtleitfähigen Feststoffen (Suspensionen)
 A: reine Flüssigkeit \Rightarrow geringe Aufladung B: Suspension \Rightarrow hohe Aufladung

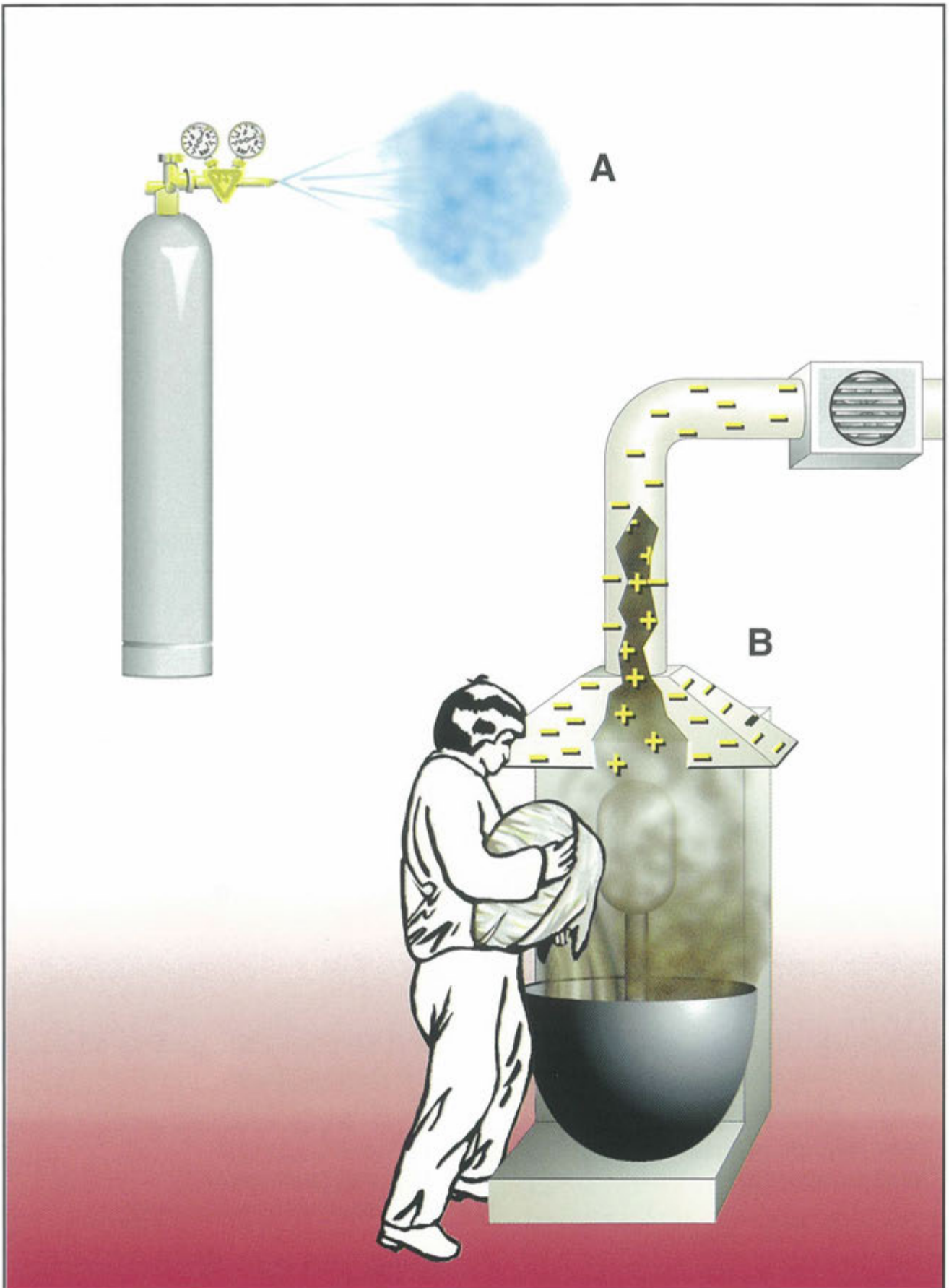


Abb. 34: Strömen von Gas (Trennprozess)

A: Strömen reiner Luft \Rightarrow keine Aufladung

B: Strömen verunreinigter Luft \Rightarrow Aufladung der Staubpartikel

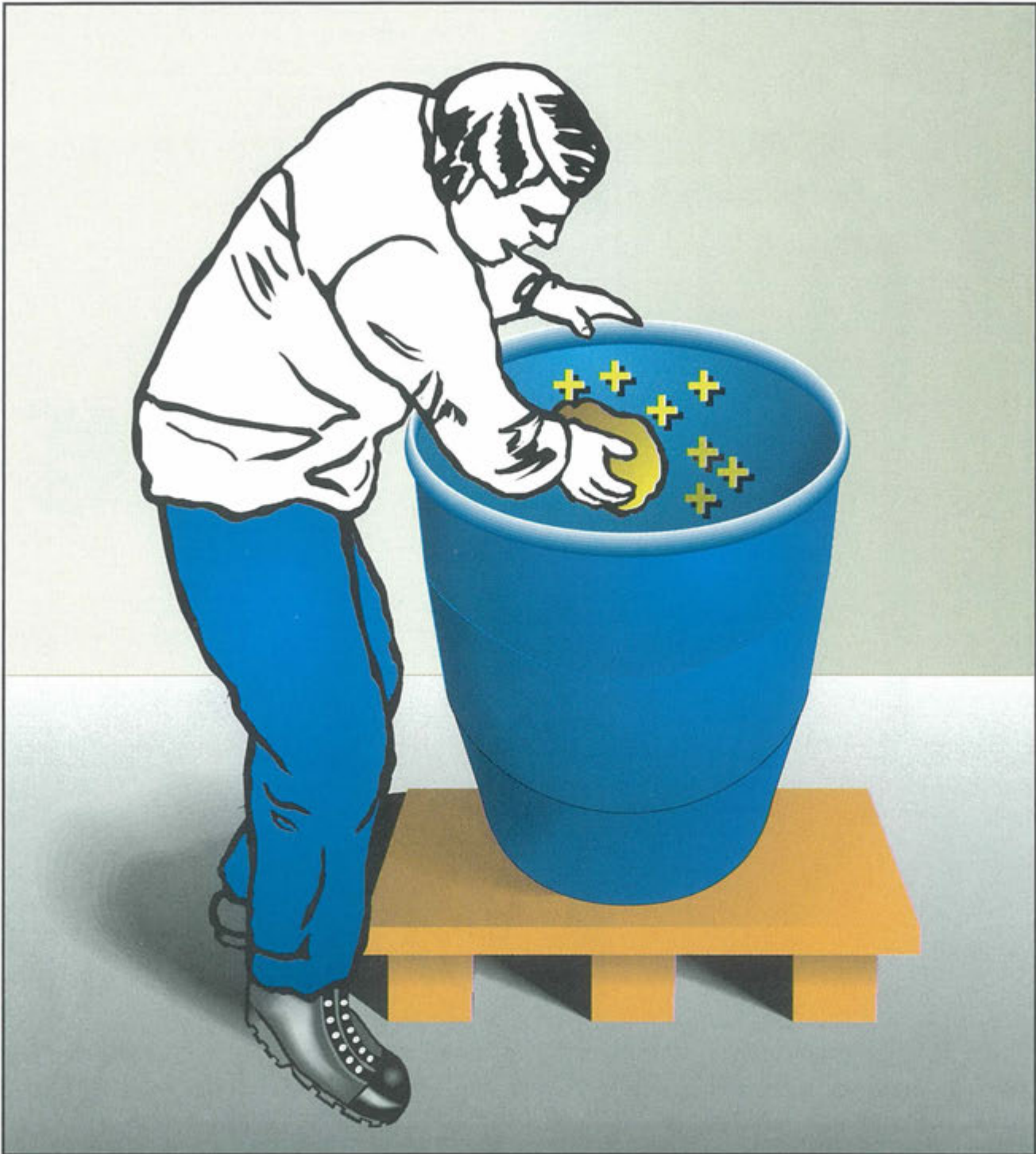


Abb. 35: Entstehen von hohen Aufladungen durch Reibvorgänge
(sekundäre Prozesse)

Welche Entladungsarten müssen vermieden werden?

- Funkenentladungen
- Büschelentladungen
- Gleitstielbüschelentladungen

Coronaentladungen müssen nur in Gegenwart von extrem zündempfindlichen Gasen wie Wasserstoff, Acetylen, Schwefelkohlenstoff vermieden werden.

Welche Massnahmen haben sich in der Praxis bewährt?

- Nur leitfähige Rohre, Schläuche, Behälter usw. verwenden und erden. (Isolierende Werkstoffe sind nur für kleine Nennweiten bzw. Volumina zulässig.)
- Beim Verwenden isolierender Innenbeschichtungen, z.B. in Rohren, Schläuchen und Behältern sind spezielle Anforderungen (abhängig von Schichtdicke, Leitfähigkeit der Flüssigkeit usw.) zu beachten.
- Leitfähige Anlageteile in Rohrleitungen (Ventile, Klappen usw.) und in Behältern (Schwimmer, Füllrohre, Rührer usw.) erden.
- Metallflansche an Glasleitungen grosser Nennweite erden.
- Füllrohre bis zum Behälterboden führen.
- Strömungsgeschwindigkeit begrenzen.
- Versprühen von Flüssigkeiten durch geeignetes Gestalten der Füllrohrmündung vermeiden.
- Beim Zerdüsen von Flüssigkeiten (z.B. zu Reinigungszwecken) sind unter Umständen spezielle Massnahmen erforderlich.
- Personen durch ableitfähige Schuhe und Fussböden erden.
- Offenes Eintragen von Feststoffen in vorgelegtes brennbares Lösemittel vermeiden, weil hier eine Inertisierung nicht mehr gewährleistet werden kann. Andernfalls nur aus leitfähigen, geerdeten Gebinden eintragen und Personenerdung sowie Erden allfälliger Hilfsmittel (Trichter, Abwurfrohre usw. immer leitfähig) beachten.
- Bei örtlich begrenzt vorkommenden hohen Aufladungen (z.B. an Papier- oder Folienbahnen) Ladungen durch passive oder aktive Ionisatoren neutralisieren. Ionisatoren sollten nur von fachkundigem Personal installiert und nicht in Gegenwart von extrem zündempfindlichen Gasen oder Dämpfen wie Wasserstoff, Acetylen oder Schwefelkohlenstoff betrieben werden.

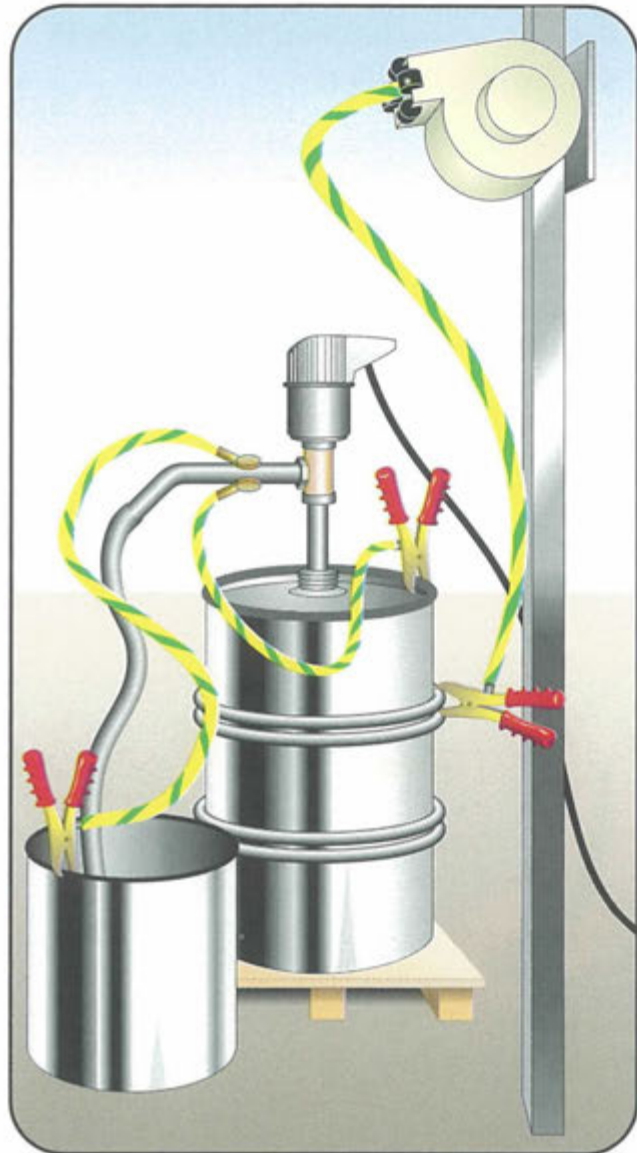


Abb. 36: Beispiele von Massnahmen beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten in der Praxis: Nur leitfähige Gebinde verwenden und beim Umfüllen erden. Alle leitfähigen Anlageteile (z.B. auch Fasspumpe) beim Umfüllen erden. Personen über ableitfähige Schuhe und ableitfähigen Fussboden erden.

Erden der Personen sowie aller leitfähigen Anlageteile, Produkte, Packmittel usw. ist eine der wichtigsten Massnahmen zum Vermeiden gefährlich hoher Aufladungen.

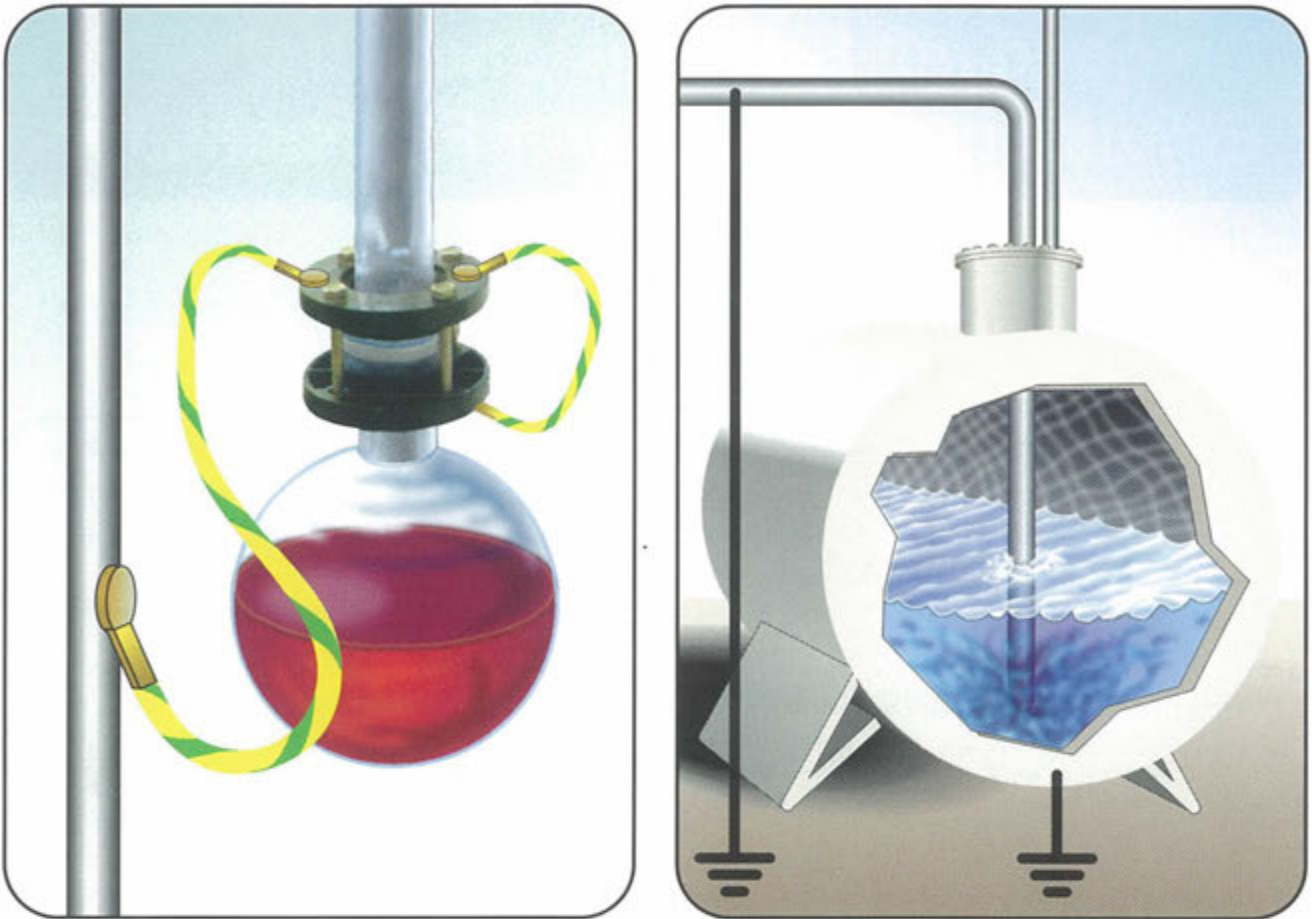


Abb. 37: Beispiele von Massnahmen beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten in der Praxis: Metallflansche an Glas- und Kunststoffleitungen erden. Grosse Tanks oder Behälter mit Tauchrohr befüllen, Strömungsgeschwindigkeit begrenzen, Leitfähigkeit der Flüssigkeit verbessern

Suspensionen und Emulsionen brennbarer, nicht-leitfähiger Flüssigkeiten dürfen nur unter inerten Bedingungen gehandhabt werden.

Umgang mit Suspensionen und Emulsionen brennbarer Flüssigkeiten

Für das genaue Beurteilen der bei Suspensionen und Emulsionen brennbarer Flüssigkeiten bestehenden Gefahren und der zu treffenden Massnahmen müssen die Stoffeigenschaften wie Leitfähigkeit und Flammpunkt sowie die Mindestzündenergie des betreffenden Dampf/Luft-Gemisches bekannt sein.

Wann und wodurch besteht Gefahr?

- Die elektrostatische Aufladung von Suspensionen und Emulsionen ist im allgemeinen um ein Vielfaches höher als die Aufladung der reinen Flüssigkeiten.
- Gefährlich hohe Aufladungen können bei der Handhabung von nichtleitfähigen Suspensionen und Emulsionen selbst beim Verwenden von leitfähigen und geerdeten Anlagen praktisch nicht vermieden werden. Es sind keine sicheren Grenzwerte für Förder- und Rührgeschwindigkeiten usw. bekannt.
- Im übrigen sind die Gefahren bei Suspensionen und Emulsionen brennbarer Flüssigkeiten grundsätzlich dieselben, wie bei den reinen brennbaren Flüssigkeiten.

Welche Entladungsarten müssen vermieden werden?

Es müssen dieselben Entladungsarten vermieden werden wie beim Umgang mit reinen brennbaren Flüssigkeiten und Gasen. Es ist jedoch zu beachten, dass unabhängig von der Bauart der Anlage bei Suspensionen und Emulsionen aus nichtleitfähigen Flüssigkeiten Büschelentladungen, verursacht durch das aufgeladene Produkt, kaum vermieden werden können und deshalb besondere Massnahmen getroffen werden sollten.

Welche Massnahmen haben sich in der Praxis bewährt?

- Beim Handhaben (z.B. Zentrifugieren, Filtern, Fördern) von brennbaren, **nicht-leitfähigen** Suspensionen und Emulsionen sollten Massnahmen zum Vermeiden explosionsfähiger Atmosphären (z.B. Inertisierung, Arbeiten unterhalb des Flammpunktes) getroffen werden.
- Beim Handhaben von brennbaren, **leitfähigen** Suspensionen und Emulsionen sind die bei reinen brennbaren Flüssigkeiten üblichen Massnahmen zu treffen.

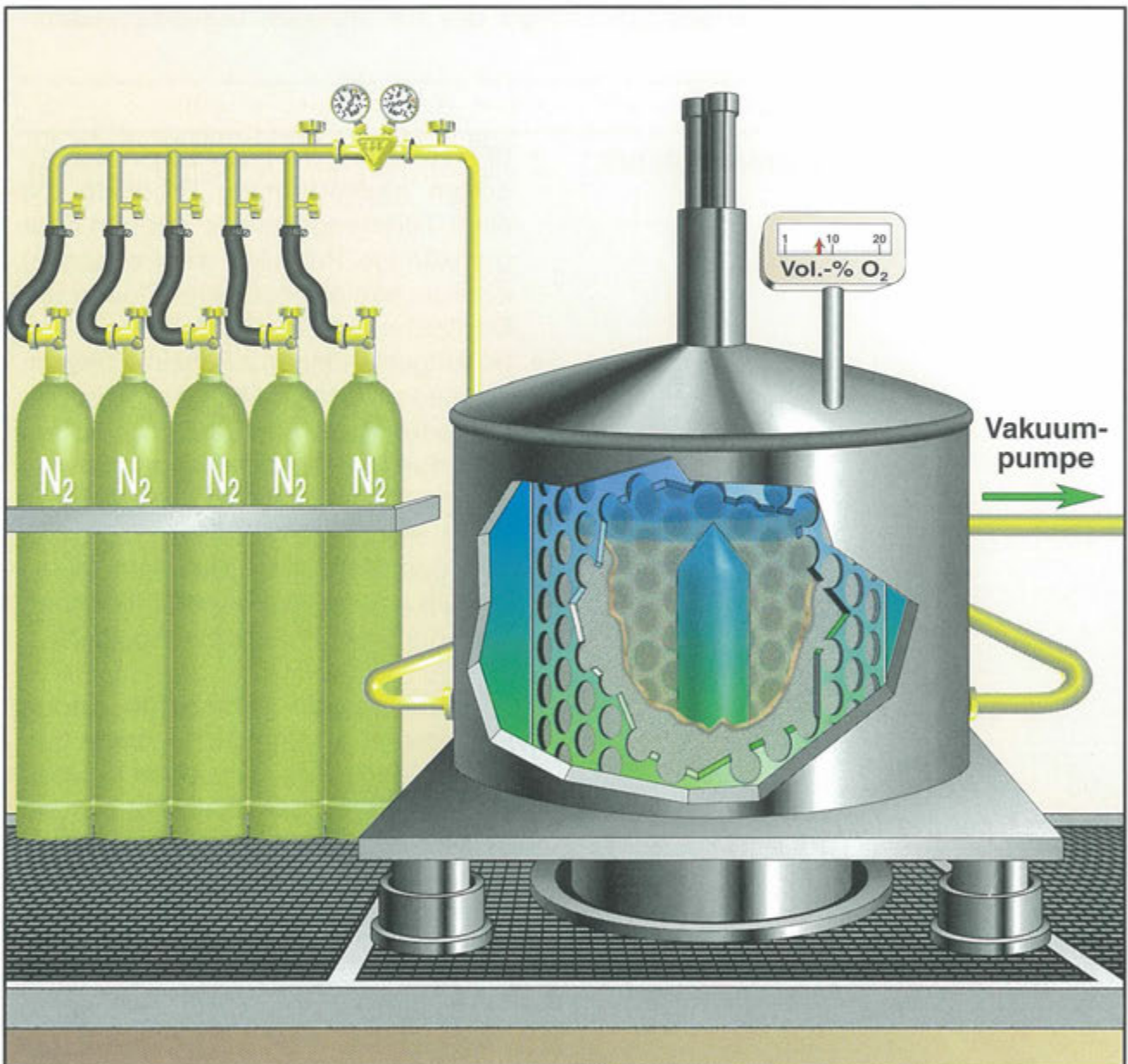


Abb. 38: Inertisierung einer Zentrifuge als Beispiel einer Explosionsschutzmassnahme beim Umgang mit Suspensionen und Emulsionen brennbarer Flüssigkeiten

Umgang mit brennbaren Schüttgütern ohne brennbare Gase und Dämpfe

Für das genaue Beurteilen der bei brennbaren Schüttgütern bestehenden Gefahren und der zu treffenden Massnahmen müssen die Stoffeigenschaften wie spezifischer Schüttgutwiderstand und Mindestzündenergie des betreffenden Staub/Luft-Gemisches bekannt sein.

Wann und wodurch besteht Gefahr?

- Beim Umgang mit brennbaren Schüttgütern (pulverförmige Produkte mit einer Teilchengrösse < 0.5 mm oder grobkörnige Produkte mit Feinstaub) können explosionsfähige Staub/Luft-Gemische gebildet werden.
- Schüttgüter können z.B. beim Fördern, Umfüllen, Mahlen, Mischen, Abscheiden oder Sieben zu gefährlich hohen Aufladungen von sich selbst oder von Anlageteilen, Gebinden usw. führen.
- Durch sekundäre Prozesse (z.B. Gehen des Menschen, Bewegen eines Förderbandes) können gefährlich hohe Aufladungen herbeigeführt werden.

In Gegenwart von brennbaren Gasen oder Dämpfen können sich hybride Gemische bilden. Dies muss beim Beurteilen der Gefahren berücksichtigt werden (z.B. offenes Eintragen von Feststoffen in vorgelegtes brennbares Lösemittel, siehe S. 57).

Viele Stäube besitzen eine derart niedrige Mindestzündenergie, dass sie durch die Zündquelle «Statische Elektrizität» entzündet werden können.

Welche Entladungsarten müssen vermieden werden?

- Funkenentladungen
- Gleitstielbüschelentladungen
- Schüttkegelentladungen

Büschelentladungen können nach heutigem Kenntnisstand toleriert werden, sofern nicht Stäube mit einer extrem tiefen Mindestzündenergie vorhanden sind.

Coronaentladungen können nach heutigem Kenntnisstand toleriert werden.

Welche Massnahmen haben sich in der Praxis bewährt?

- Leitfähige Behälter, Apparate, Anlageteile usw. erden.
- Zum grosstechnischen Handhaben von hochisolierenden brennbaren Schüttgütern (Schüttvolumina $> 2 \text{ m}^3$) nur leitfähige und geerdete Behälter, Apparate, Anlageteile usw. verwenden und erden. Keine isolierenden Innenbeschichtungen anbringen.
- Pneumatische Förderleitungen aus leitfähigem Material fertigen und erden. Keine isolierenden Innenbeschichtungen oder nur solche mit geringer elektrischer Durchschlagsfestigkeit (Durchschlagsspannung $U_D < 4 \text{ kV}$) verwenden.
- Beim Umgang mit Schüttgütern, die sehr zündempfindliche Staub/Luft-Gemische bilden, Personen erden (ableitfähige Schuhe und Fussböden).
- Beim Befüllen von grossen Silos und Behältern mit hochisolierenden, brennbaren Schüttgütern sind unter Umständen (je nach Mindestzündenergie, Partikelgrössenverteilung usw.) weitere, über die Massnahme «Vermeiden wirksamer Zündquellen» hinausgehende Explosionsschutzmassnahmen notwendig.

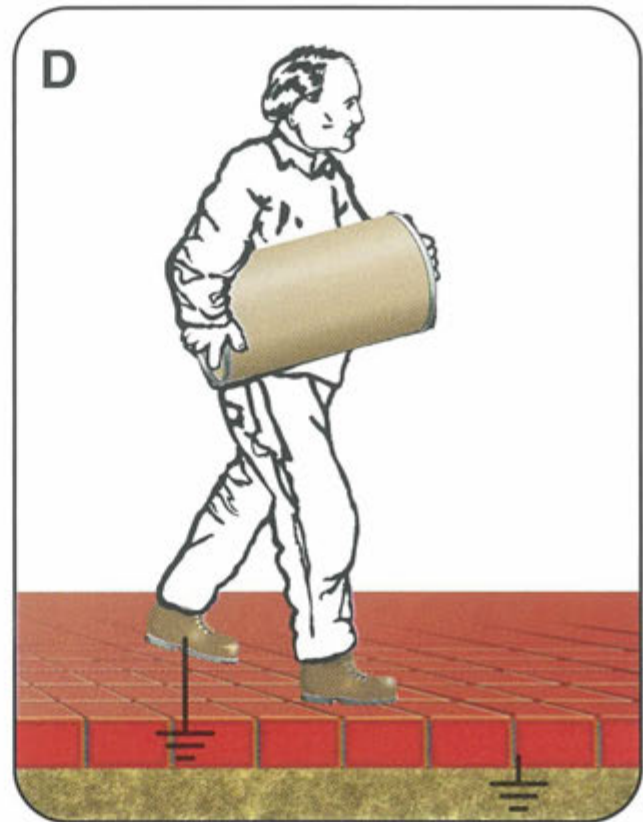
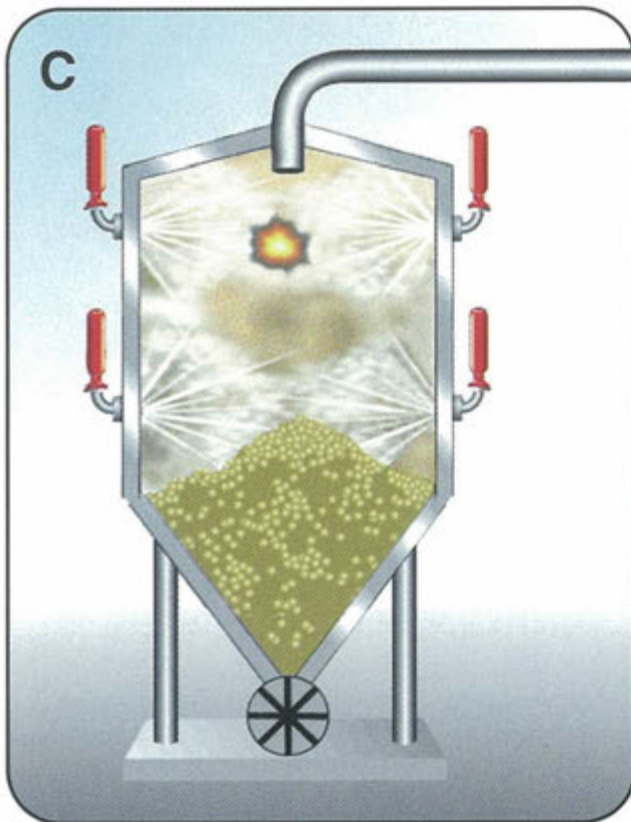
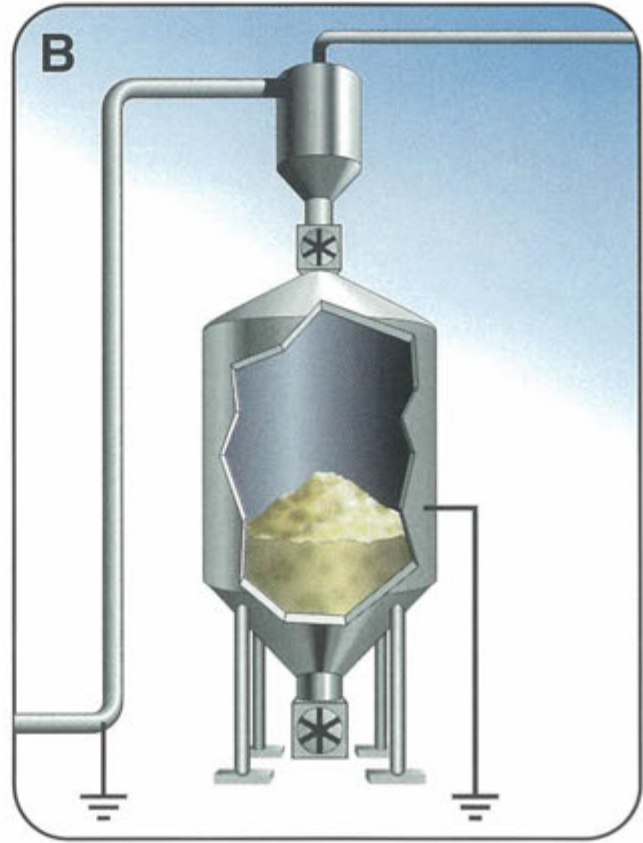
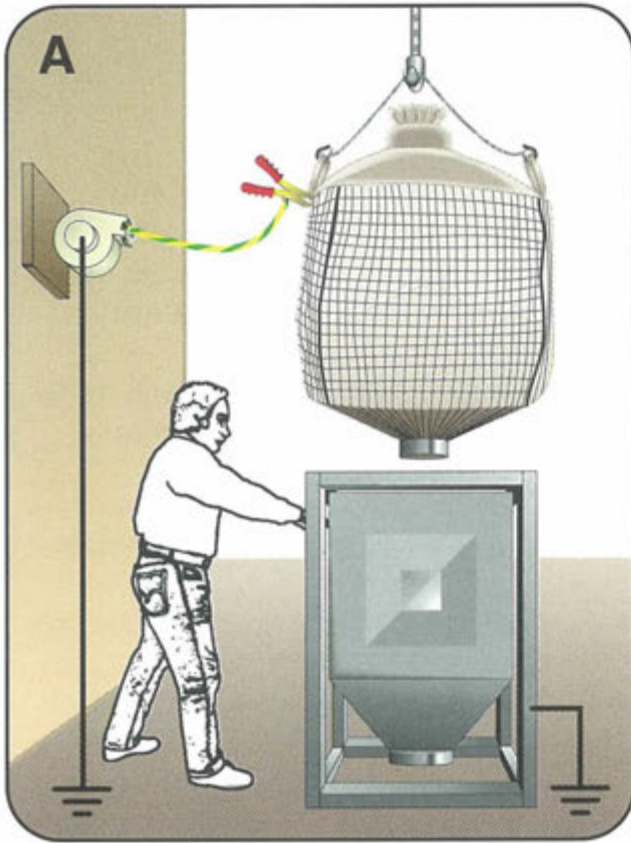


Abb. 39: Beispiele von Massnahmen beim Umgang mit brennbaren Stäuben in der Praxis - A: Erden aller leitfähigen Gebinde und Packmittel beim Umfüllen B: Erden aller leitfähigen Anlageteile C: Anwendung konstruktiver Explosionsschutzmassnahmen (z.B. Explosionsunterdrückung) D: Personenerdung beim Umgang mit sehr zündempfindlichen Schüttgütern

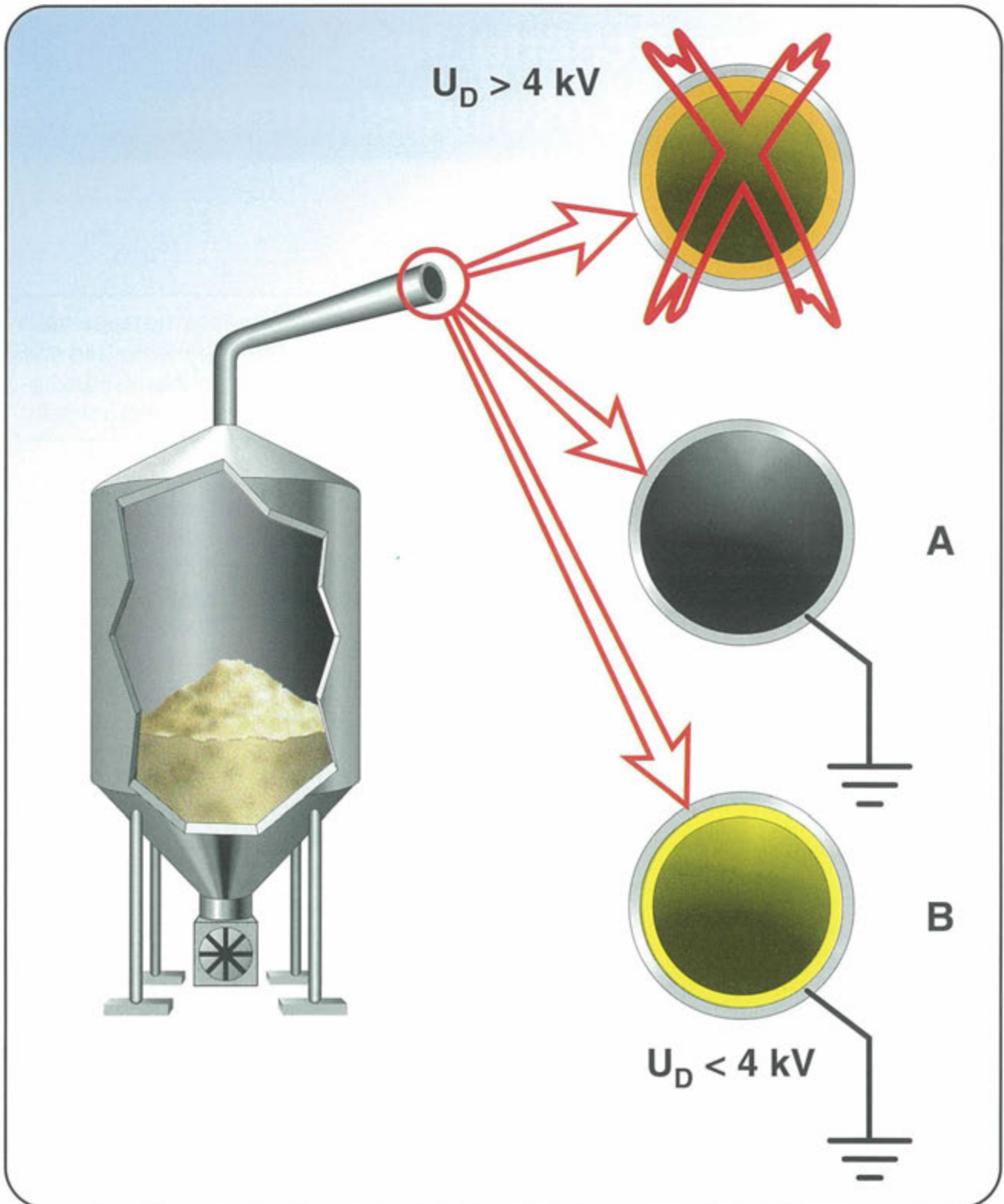


Abb. 40: Beispiele von Massnahmen beim pneumatischen Transport von brennbaren Stäuben in der Praxis - A: Erden aller leitfähigen Teile und Verzicht auf isolierende Innenbeschichtung der Förderleitung B: Erden aller leitfähigen Teile und Verwenden einer Innenbeschichtung mit maximal 4 kV Durchschlagsspannung

Nichtleitfähige lösemittelhaltige Schüttgüter dürfen nur unter inerten Bedingungen gehandhabt werden.

Umgang mit Schüttgütern, die brennbare Lösemittel enthalten

Für das genaue Beurteilen der bei lösemittelhaltigen Schüttgütern bestehenden Gefahren und der zu treffenden Massnahmen müssen die Stoffeigenschaften wie Leitfähigkeit des lösemittelhaltigen Schüttgutes, Flammpunkt der brennbaren Flüssigkeit und Mindestzündenergie des betreffenden Dampf/Luft-Gemisches bekannt sein.

Wann und wodurch besteht Gefahr?

- Sofern das lösemittelhaltige Schüttgut isolierend ist, besteht infolge des Zusammentreffens der hohen Aufladung des Schüttgutes (isolierende Schüttgüter laden sich um ein Vielfaches höher auf als isolierende Flüssigkeiten) und des explosionsfähigen Lösemitteldampf/Luft-Gemisches hohe Zündgefahr.
- Gefährlich hohe Aufladungen können beim Handhaben von isolierenden, lösemittelhaltigen Schüttgütern selbst beim Verwenden von leitfähigen und geerdeten Anlagen praktisch nicht vermieden werden.
- Im übrigen sind die Gefahren bei Schüttgütern, die brennbare Lösemittel enthalten, grundsätzlich dieselben wie bei den reinen brennbaren Flüssigkeiten.

Welche Entladungsarten müssen vermieden werden?

Es müssen dieselben Entladungsarten vermieden werden wie beim Umgang mit reinen brennbaren Flüssigkeiten und Gasen. Es ist jedoch zu beachten, dass unabhängig von der Bauart der Anlage bei nichtleitfähigen lösemittelhaltigen Schüttgütern Büschelentladungen, verursacht durch das aufgeladene Produkt, kaum vermieden werden können und deshalb besondere Massnahmen getroffen werden müssen.

**Welche Massnahmen
müssen getroffen werden?**

- Beim Handhaben von nichtleitfähigen Schüttgütern, die brennbare Lösemittel enthalten, sollten Massnahmen zum Vermeiden explosionsfähiger Atmosphären (z.B. Inertisieren, Arbeiten unterhalb des Flammpunktes) getroffen werden.
- Beim Handhaben von leitfähigen Schüttgütern, die brennbare Lösemittel enthalten, sind die bei reinen brennbaren Flüssigkeiten üblichen Massnahmen zu treffen.

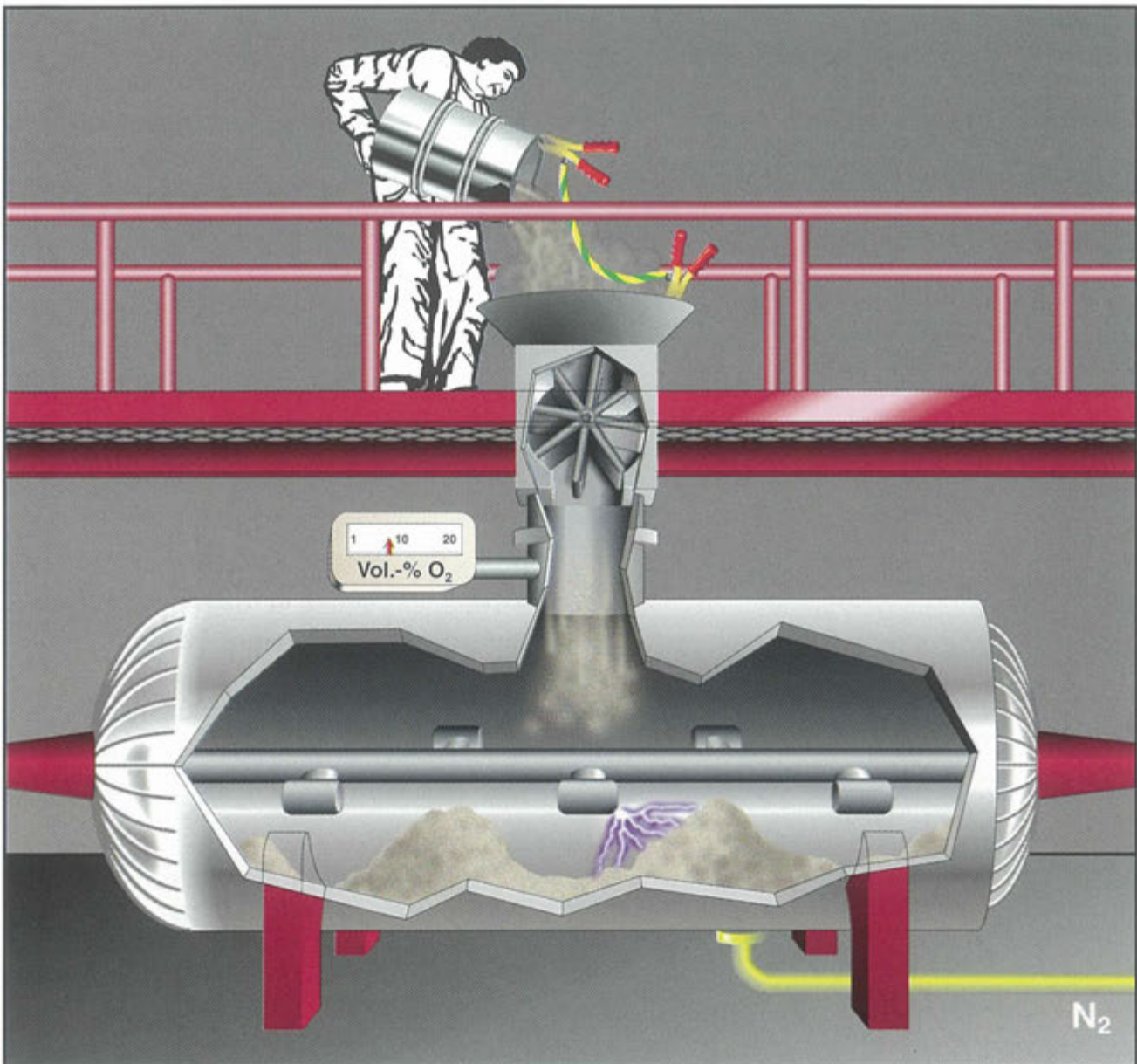


Abb. 41: Geschlossener Eintrag in einen inertisierten Schaufeltrockner als Beispiel einer Explosionsschutzmassnahme beim Umgang mit lösemittelfeuchtem Schüttgut in der Praxis

Literatur

Bibliographie

Lüttgens G., Glor M., Understanding and Controlling Static Electricity, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1989

Lüttgens G., Glor M., Elektrostatische Aufladung - begreifen und sicher beherrschen, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 3. vollständig neubearbeitete Auflage, 1993

Glor M., Electrostatic Hazards in Powder Handling, Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, 1988

Richtlinien

Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie der Schweiz (ESCIS), Statische Elektrizität, Regeln für die betriebliche Sicherheit, Schriftenreihe Sicherheit, ESCIS-Heft 2, SUVA, Sektion Chemie, Luzern, 1989

Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, Richtlinien „Statische Elektrizität“, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, ZH 1/200, Ausgabe Oktober 1989

Beispielsammlung zu den Richtlinien „Statische Elektrizität“, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, ZH 1/200, Merkblatt T 033 4/92

VDI 3673, Blatt 1, Druckentlastung von Staubexplosionen, 1992

British Standards Institution, Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, General Considerations, B.S. 5958: 1981 Part 1, London

British Standards Institution, Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, B.S. 5958: 1982 Part 2, London

NFPA 77, Static Electricity, National Fire Protection Association, 1988

Index

A

Ableitwiderstand **23**, 24, 25
Abreiben (siehe Reiben)
Abrollen 16
Abscheiden, Abscheider 16, 62
Acetylen 30, 31, 56, 57
Additiv, antistatisches 47
Antriebsband 42
Äquivalentenergie 26, 39
Atmosphäre, explosionsfähige (siehe auch Gemisch, explosionsfähiges) 13, 15, 46, 49, 50, 52, 61, 65, 67
Aufladung 10, **11**, 16, 19, 28, 29, 46, 47, 50-57, 60, 62, 66, 67
Ausschütten, Entleeren 16, 37, 42

B

Befüllen (siehe auch Umfüllen) 63
Behälter, Gebinde 16, 33, 34, 37, 42, 44, 48, 52, 57-59, 62-64
Benzin 8, 18
Beschichtung, Innenbeschichtung 41-44, 57, 63, 65
Boden, Fussboden 16, 20, 25, 57, 58, 63
Brennstoff 9, 29, 50
Brennstoffkonzentration 29, 46
Büschelentladung 28, 31, **36**, 37-40, 56, 60, 63, 66

C

Coronaentladung (siehe auch Spitzenentladung) 31, **40**, 56, 63

D

Dampf, Dampf/Luft-Gemisch 8, 9, 30, 34, 39, 52, 57, 60, 62, 66
Durchbruchfeldstärke 12, 26, 27, 32
Durchgangswiderstand 23, 24
Durchschlagsfestigkeit (siehe Festigkeit, dielektrische)
Durchschlagsspannung 44, 63, 65

E

Eintragen 37, 44, 48, 57, 62
Eintragen, offenes 57, 62
Elektrode 36, 37, 40
Elmsfeuer 37
Emulsion 20, 52, 60, 61
Energie 26, 28, 29, 31, 34, 39, 44
Entladung, Entladungsart 10, 11, **12**, 13, 15, **26**, 27-29, 31, 32, 40, 41, 44, 46, 48, 50, 56, 60, 66
Entladung, gewitterblitzartige 31
Entladungsenergie 34
Entladungskanal 36
Entzündung 13, 15, 29, 31, 39, 44, 46, 50
Erdableitwiderstand **23**, 24, 25
Erden 25, 34, 35, 46, 48, 57-59, 63-65
Erdverbindung 12
Explosion 9
Explosionsdruckentlastung 46
Explosionsgefahr 8
Explosionsunterdrückung 46, 49, 64

F

Fahnenstange 37
Fasspumpe 58
Feld, elektrisches, Feldstärke 11, 19, 26, 27, 32, 36, 37, 39, 40
Festigkeit, dielektrische 42, 44, 63
Feuer 10
Filtertuch, Filterschlauch 20, 22, 37
Filtrieren 16, 61
Flamme 10
Flammpunkt 51, 52, 60, 61, 66, 67
Flansch (siehe auch Metallflansch) 34
Flüssigkeit 8, 16, 18, 20, 23, 32, 33, 37, 38, 42, 47, 48, 51-54, 57-60, 66
Flüssigkeitströpfchen (siehe Tröpfchen)
Folienbahn 37, 57
Förderband 16, 37, 42, 43, 52, 62, 65
Fördergeschwindigkeit 46
Förderleitung, pneumatische 63
Fördern 42, 60, 61
Fördern, pneumatisches 16, 42, 44, 65
Füllrohr (siehe Rohr)
Füllstandsmessung 37
Funken, elektrisch erzeugter 10
Funken, mechanisch erzeugter 10
Funkenentladung 28, 31, **32**, 33-35, 56, 63
Funkenstrecke 32
Fussboden (siehe Boden)

G

Gas, Gas/Luft-Gemisch 8, 9, 30, 39, 44, 50, 52, 55-57, 62, 66
Gebinde (siehe Behälter)
Gehen 16, 52, 62
Gemisch, explosionsfähiges 8, **9**, 10, 29-31, 34, 46
Gemisch, hybrides 30, 62
Glasleitung 21, 53, 57, 59
Gleitstielbüschelentladung 31, **41**, 42-44, 56, 63
Glut 10

H

Heptan 18
Hexan 18

I

Inertisieren 46, 49, 50, 57, 61, 67
Influenz 19
Ionisator, aktiver 46, 57
Ionisator, passiver 46, 57
isolierend (siehe nichtleitfähig)

K

Kapazität 34
Klappe 57
Kohlenwasserstoffe 18
Kondensator 29, 34
Kondensatorentladung 29
Körper, menschlicher (siehe Person)
Krümmungsradius 36, 40
Kunststoffbehälter, Kunststoffgebinde 18, 21, 32, 33, 37, 39, 48
Kunststoffleitung 20, 37, 53, 59
Kunststoffsack 19, 20, 37, 39

L

Ladungsableitung 12-14, **23**, 25, 28, 46
Ladungsanhäufung 12-15, **20**, 21, 22, 26
Ladungsdichte 26
Ladungsneutralisation (siehe Neutralisieren)
Ladungstrennung 12-15
Leitfähigkeit, leitfähig, nichtleitfähig, isolierend **18**, 19, 20, **23**, 36, 39, 41-44, 47, 50, 51, 53, 54, 57-61, 63-67
Lösemittel, Lösemitteldampf 30, 31, 57, 62, 66

M

Mahlen 62
Mensch (siehe Person)
Metallfass 18, 20, 21, 28, 32-34
Metallflansch (siehe auch Flansch) 57, 59
Metallpulver 20
Metallrohr (siehe auch Rohr) 20
Mindestzündenergie **29**, 30, 31, 51, 60, 62, 63, 66
Mischen 62

N

Nebel (siehe auch Tröpfchen) 8, 9
Neutralisieren, Neutralisation 46, 47, 57
nichtleitfähig (siehe leitfähig)
Niveausonde 37

O

Oberfläche, heisse 10
Oberflächenladungsdichte 27, 42
Oberflächenwiderstand **23**, 24, 25

P

Packmittel 12, 39, 64
Partikel (siehe Staub)
Person 12, 19-21, 25, 32-34, 57, 58, 62-64
Plattenkondensator 43
Polyethylen (PE) 18
Polymer 44
Polypropylen (PP) 18
Polytetrafluorethylen (PTFE) 18
Polyvinylchlorid (PVC) 18
Probenentnahme 37

R

Raumladungsdichte 27
Reiben, Reibvorgang 52, 56
Rohr, Rohrleitung 16, 21, 32, 42, 43, 53, 57
Rührer, Rühren 52, 53, 57, 60

S

Sack 16
Sauerstoff 9, 46
Schaufeltrockner 67
Schlauch 57
Schuhe, Schuhwerk 19-21, 24, 25, 32, 33, 57, 58
Schüttgut 16, 18, 20, 22, 23, 44, 62, 63, 66, 67
Schüttgut, lösemittelhaltiges 66, 67
Schüttgutbehälter (siehe auch Behälter) 38, 43
Schüttkegelentladung 31, 44, 45, 63
Schutzmassnahmen, konstruktive 46, 49, 50, 64
Schwefelkohlenstoff 30, 56, 57
Schwimmer 57
Sieben 62
Silo 37, 42, 44, 63
Spitzenentladung (siehe Coronaentladung)
Staub, Staubwolke, Staub/Luft-Gemisch 8, 9, 20, 30, 31, 34, 37-39, 42, 44, 48, 52, 55, 62-65
Staubabscheider 42, 43
Staubschüttung 37
Strömen 16, 52, 53, 55
Strömungsgeschwindigkeit 47, 57, 59
Suspension 16, 20, 52, 54, 60, 61

T

Tauchrohr 59
Toluol 18
Transport, pneumatischer (siehe Fördern, pneumatisches)
Trenngeschwindigkeit 42, 46
Trennprozess 12, 16, 18, 19, 28, 50, 55
Tröpfchen, Tröpfchennebel (siehe auch Nebel) 8, 20, 37, 52

U

Umfüllen, Umschütten 16, 48, 52, 53, 57, 58, 62, 64

V

Ventil 57
Versprühen 16, 52, 57

W

Wasserstoff 30, 31, 56, 57
Widerstand, elektrischer 18, 23
Widerstand, spezifischer **23**, 24, 25, 62

X

Xylol 18

Z

Zentrifugieren 61
Zerdüsen 16, 53, 57
Zündempfindlichkeit, zündempfindlich 10, 29, 31, 39, 46, 50, 56, 57, 63, 64
Zündfähigkeit, zündfähig (siehe auch Zündwirksamkeit, zündwirksam) 26, 28, 31, 44-46, 48, 50
Zündgefahr 11, 46, 50, 51, 66
Zündquelle 9, 10, 31
Zündwirksamkeit, zündwirksam (siehe auch Zündfähigkeit, zündfähig) 10, 26, 31

Schriftenreihe IVSS - Explosionsschutz

IVSS Sektion für die chemische Industrie
Arbeitsgruppe «Explosionsschutz»:

Schutz vor Staubexplosionen (dt./engl./fr./it./span.)
(1987)

Schutz vor Explosionen durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel im Gemisch mit Luft
(dt./engl./fr./it.)
(1988)

Sicherheit von Flüssiggasanlagen (Propan und Butan) (dt./engl./fr./it./span.)
(1992)

Statische Elektrizität - Zündgefahren und Schutzmassnahmen (dt./engl./fr./it.)
(1995)

Bestelladresse: IVSS Sektion Chemie
Kurfürsten Anlage 62
D-69115 Heidelberg
Deutschland

IVSS Sektion Maschinensicherheit
Arbeitskreis «Staubexplosionen»

Grundlagen für das Verhüten von Staubexplosionen

- Vorbeugende und konstruktive Schutzmassnahmen (dt./engl./fr.)
(1987)
- Beispielsammlung (dt./engl./fr.)
(1990)

Explosionsunterdrückung (dt./engl./fr.)
(1990)

Bestimmen der Brenn- und Explosionskenngrossen von Stäuben (dt./engl./fr.)
(1995)

Bestelladresse: IVSS Sektion Maschinensicherheit
Dynamostr. 7-11
D-68165 Mannheim
Deutschland

DIE IVSS UND DIE VERHÜTUNG VON ARBEITSUNFÄLLEN UND BERUFSKRANKHEITEN

Der ständige Fachausschuss der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten bringt Arbeitsschutzspezialisten aus aller Welt zusammen. Er fördert das internationale Vorgehen in diesem Bereich und unternimmt Sonderstudien über Themen wie die Rolle von Presse, Rundfunk und Fernsehen im Arbeitsschutz und integrierte Sicherheitsstrategien für den Arbeitsplatz, den Strassenverkehr und den häuslichen Bereich. Er koordiniert ferner die Tätigkeiten der sieben internationalen Sektionen für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten, die in verschiedenen Industrien und der Landwirtschaft tätig sind und ihre Sekretariate in verschiedenen Ländern haben. Zwei weitere Sektionen befassen sich mit Informationstechniken im Bereich des Arbeitsschutzes und mit der einschlägigen Forschung.

Die Tätigkeiten der internationalen Sektionen der IVSS bestehen aus

- dem Austausch von internationalen Informationen zwischen den an der Verhütung von Berufsgefahren interessierten Gremien,
- der Organisation der Tagungen von Fachausschüssen und Arbeitsgruppen, Rundheitgesprächen und Kolloquien auf internationaler Ebene,
- der Durchführung von Erhebungen und Untersuchungen,
- der Förderung der Forschungsarbeit,
- der Veröffentlichung einschlägiger Informationen.

Weitere Informationen über diese Tätigkeiten und die allgemeine Arbeit der IVSS auf dem Gebiet des Arbeitsschutzes finden Sie in dem Faltblatt «Sicherheit weltweit». Es ist in deutscher, englischer, französischer und spanischer Fassung beim Sekretariat der Sektion erhältlich.

DIE MITGLIEDER DER INTERNATIONALEN SEKTIONEN

Jede internationale Sektion der IVSS hat drei Kategorien von Mitgliedern:

- **Vollmitglied:** Vollmitglieder und assoziierte Mitglieder der IVSS, Genf, und andere Organisationen ohne Gewinnstreben können die Aufnahme als Vollmitglied beantragen
- **Assoziiertes Mitglied:** Andere Organisationen und gewerbliche Unternehmen können assoziierte Mitglieder einer Sektion werden, wenn sie über Sachkenntnisse im Aufgabenbereich der Sektion verfügen.
- **Korrespondent:** Individuelle Experten können korrespondierende Mitglieder einer Sektion werden.

Weitere Informationen und Aufnahmeformulare sind direkt beim Sekretariat der einzelnen Sektion erhältlich.

**MINDESTENS EINE DIESER ARBEITSSCHUTZSEKTIONEN DER IVSS
ENTSPRICHT AUCH IHREM EIGENEN FACHBEREICH: ZÖGERN SIE NICHT,
MIT IHR KONTAKT AUFZUNEHMEN**



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für die LANDWIRTSCHAFT
Bundesverband der landwirtschaftlichen
Berufsgenossenschaften
Weissensteinstrasse 72
D-34131 KASSEL-WILHELMSHÖHE
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für MASCHINENSICHERHEIT
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und
Gaststätten
Dynamostr. 7-11
D-68165 MANNHEIM
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für die CHEMISCHE INDUSTRIE
Berufsgenossenschaft
der chemischen Industrie
Kurfürsten Anlage 62
D-69115 HEIDELBERG
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für den BERGBAU
OKD - Rozvoj a projektování
(Steinkohlegruben von Ostrava - Karviná
Entwicklung und Projektierung)
Havlickovo nábr. 38
CS-730 16 OSTRAVA 1
Tschechoslowakei



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für den HOCH- UND TIEFBAU
Organisme professionnel de prévention du
bâtiment et des travaux publics (OPPBT)
Tour Amboise
204, Rond-Point du Pont-de-Sèvres
F-92516 BOULOGNE-BILLANCOURT
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS für
FORSCHUNG
Institut National de Recherche et de Sécurité
(INRS)
30, rue Olivier - Noyer
F-75680 PARIS CEDEX 14
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für ELEKTRIZITÄT
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und
Elektrotechnik
Gustav Heinemann Ufer 130
D-50968 KÖLN
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für ERZIEHUNG und AUSBILDUNG
Caisse Régionale d'Assurance Maladie
d'Île de France
17-19, Place de l'Argonne
F - 75019 Paris
Frankreich



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für INFORMATION
Association nationale pour la prévention
des accidents du travail (ANPAT)
88, rue Gachard, Boîte 4
B-1050 BRUXELLES
Belgien



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS
für das GESUNDHEITSWESEN
Berufsgenossenschaft für
Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege
Pappelallee 35-37
D-22089 Hamburg
Deutschland



INTERNATIONALE SEKTION DER IVSS für
die EISEN UND METALLINDUSTRIE
Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
Adalbert-Stifter-Strasse 65
A-1200 WIEN XX
Österreich



ARBEITSGRUPPE DER IVSS
für PERSÖNLICHE SCHUTZAUSRÜSTUNG
Centro Nacional de Medios de Protección
del INSHT
Apdo. Correos 615
E-41080 SEVILLA
Spanien