Ausgabe: Januar 2016 [*)]

GMBl 2016 S. 256-314 [Nr. 12-17] (v. 26.04.2016)

Berichtigt: GMBl 2016 S. 623 [Nr. 31] (v. 29.07.2016)

Technische Regeln für Gefahrstoffe	Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen	TRGS 727

Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung wieder.

Sie werden vom

Ausschuss für Gefahrstoffe

ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gegeben.

Diese TRGS konkretisiert im Rahmen des Anwendungsbereichs die Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Bei Einhaltung der Technischen Regel kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnungen erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.

Die vorliegende Technische Regel TRGS 727 beruht auf der BGR 132 des Fachausschusses Chemie der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). Der Ausschuss für Gefahrstoffe hat die Inhalte der BGR 132 in Anwendung des Kooperationsmodells (BArbBl. 6/2003 S. 48) als TRGS in sein Regelwerk übernommen.

Dem Fachbereich Rohstoffe und Chemische Industrie obliegt in Absprache mit dem AGS die Fortschreibung der TRGS 727. Hält der AGS Änderungen für erforderlich, wird er den Fachbereich Rohstoffe und Chemische Industrie bitten, die Möglichkeit der Anpassung zu überprüfen.

[*)] Hinweis: Die neue TRGS 727 ersetzt die bisherige TRBS 2153 und schreibt sie fort.

Anlass für die Fortschreibung der bisherigen TRBS 2153 bestand aus folgenden Gründen:

– Die bisherigen Anforderungen an die pneumatische Förderung von Schüttgütern sind nach aktuellen Forschungsergebnissen nicht ausreichend, um das Auftreten von Zündquellen sicher zu verhindern.

- Eine Anpassung an den Stand der Technik war erforderlich, z. B. die Möglichkeit zur Durchführung von Modellrechnungen zur Beurteilung der Zündgefahr von Schüttgütern, die Harmonisierung von Grenzwerten mit aktuellen internationalen Normen (insbes. IEC 60079-32-1:2013) etc.

- Neue Entwicklungen waren zu berücksichtigen, z. B. der Einsatz von Biokraftstoffen, eine neue Einteilung von Schlauchtypen für Flüssigkeitstransport etc.

- Häufig missverstandene Passagen der Regel wurden präzisiert, Klarstellungen und Konkretisierungen vorgenommen.

Vollständig neu sind die Abschnitte zum Einsatz von Rohren und Schläuchen bei Schüttgütern und zu Filterelementen in Staubabscheidern sowie der Anhang „Rohre und Schläuche für den pneumatischen Transport von Schüttgütern“.

Inhalt

1 Anwendungsbereich

2 Begriffsbestimmungen

3 Elektrostatische Aufladungen von Gegenständen und Einrichtungen

4 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Flüssigkeiten

5 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Gasen

6 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Schüttgütern

7 Elektrostatische Aufladung von Personen und persönlichen Schutzausrüstungen

8 Erdung und Potenzialausgleich

Anhang A Auf- und Entladungsvorgänge in der Elektrostatik

Anhang B Rohre und Schläuche für den pneumatischen Transport von Schüttgütern

Anhang C Bauarten von flexiblen Schüttgutbehältern (FIBC)

Anhang D Elektrischer Schlag

Anhang E Erdung und Potenzialausgleich

Anhang F Leitfähigkeiten und Relaxationszeiten ausgewählter Flüssigkeiten

Anhang G Mindestzündenergie und Mindestzündladung brennbarer Gase und Dämpfe

Anhang H Typische Widerstände von Fußböden und Fußbodenbelägen

Anhang I Veranschaulichung von Begriffen zur Beschreibung elektrostatischer Eigenschaften

Verzeichnis der Beispiele

1 Beschichten und Bedrucken isolierender Folien

2 Befüllen mittelgroßer Behälter

3 Befüllen und Entleeren von Rigid Intermediate Bulk Containern (RIBC) in Zone 1

4 Befüllen von Fässern in Zone 1

5 Befüllen kleiner Kunststoffkanister in Zone 1

6 Schläuche zum Transport von Flüssigkeiten mit niedriger Leitfähigkeit durch Zone 1, die verursacht ist durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen IIA und IIB

7 Abluftsysteme in Bereichen der Zone 1

8 Funkenentladungen an einem isolierten Metalltrichter

9 Befüllen isolierender Kunststoffsäcke mit Schüttgut in Zone 21 oder 22

10 Pneumatische Förderung brennbarer Schüttgüter

11 Schläuche zum pneumatischen Transport nicht brennbarer Schüttgüter durch Zone 1, die verursacht ist durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen IIA und IIB

12 Schläuche zum pneumatischen Transport brennbarer Schüttgüter

13 Erdung in Zone 1

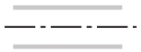
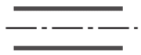
14 Funkenentladungen

15 Büschelentladungen und Koronaentladungen

16 Gleitstielbüschelentladungen

17 Schüttkegelentladungen

Symbollegende

	Bedeutung	***Beispiel***
	*isolierend*	*Rohr aus isolierendem Kunststoff, Haufwerk*
	leitfähig oder ableitfähig	*Stahlrohr*
	Gas, Dampf	*Gasraum im Reaktionsbehälter*
	isolierende Einrichtung, gasführend	*Rohr aus isolierendem Kunststoff für Abgas*
	Partikel im Gas- oder Flüssigkeitsstrom, auch im Haufwerk	*pneumatische Förderung*
	Flüssigkeit	*Alkohol*
	Leitfähige oder ableitfähige Einrichtung, flüssigkeitsführend	*Stahlrohr für Flüssigkeit*
	Entladung statischer Elektrizität	*Funkenentladung*
	Entladung statischer Elektrizität	*Büschelentladung*
	Entladung statischer Elektrizität	*Koronaentladung*
	Entladung statischer Elektrizität	*Gleitstielbüschelentladung*
	fest verlegte Erdungsleitung	
	flexibel verlegte Erdungsleitung	
	Erdungspunkt	*Potenzialausgleichsschiene*

Formelzeichen und Einheiten

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
t	Zeit, Verweilzeit	s
R_E	Ableitwiderstand	Ω
R_D	Durchgangswiderstand	Ω
d	Durchmesser	mm
U_D	Durchschlagspannung	V
ε_0	Elektrische Feldkonstante($8{,}854 \cdot 10^{-12}$)	As/Vm
A	Fläche	m^2, cm^2
V_F	Flüssigkeitsdurchsatz	l/s
N	Geometriefaktor	-
v	Geschwindigkeit	m/s
C	Kapazität	F
ρ	Ladungsdichte	C/m^3
L	Länge	m, mm
κ	Leitfähigkeit	S/m
W	maximale umgesetzte Energie	J
W_{SKE}	maximale zu erwartende Äquivalentenergie einer Schüttkegelentladung	mJ
W_{GBE}	maximale zu erwartende Energie einer Gleitstielbüschelentladung	J
Q	Menge der Ladung auf einem Leiter	C
MZE	Mindestzündenergie	mJ
MZQ	Mindestzündladung	nC
σ	Oberflächenladungsdichte	C/m^2
R_O	Oberflächenwiderstand	Ω
ε_r	Relative Permittivitätszahl (früher Dielektrizitätszahl)	-
τ	Relaxationszeit	s
D	Schichtdicke	mm, µm
dm/dt	Massenstrom	kg/s
$R_\square$	spezifischer Oberflächenwiderstand	Ω
ρ	spezifischer Widerstand, spezifischer Durchgangswiderstand	Ωm
R_{ST}	Streifenwiderstand	Ω
I	Stromstärke	A
T	Temperatur	°C
V	Volumen	m^3, Liter
s	Wandstärke	mm
R	Widerstand	Ω

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Technische Regel gilt für die Beurteilung und die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen in explosionsgefährdeten Bereichen und für die Auswahl und Durchführung von Schutzmaßnahmen zum Vermeiden dieser Gefahren.

Hinweis: Liegt aufgrund getroffener Maßnahmen, z. B. Inertisierung, keine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre vor, sind Maßnahmen nach dieser Technischen Regel nicht notwendig.

(2) Macht der Arbeitgeber von der Möglichkeit Gebrauch, gemäß Anhang I Nummer 1.6 Absatz 3 GefStoffV von einer Zoneneinteilung abzusehen, sind grundsätzlich die gemäß dieser technischen Regel für die Zone 0 bzw. 20 angegebenen Schutzmaßnahmen zu treffen. Abweichungen hiervon sind zulässig, wenn diese in der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung nach § 6 Absatz 9 GefStoffV begründet festgelegt werden.

(3) Diese Technische Regel findet sinngemäß auch Anwendung auf die Beurteilung und die Vermeidung von Zündgefahren explosionsfähiger Gemische unter anderen als atmosphärischen Bedingungen oder mit anderen Reaktionspartnern als Luft sowie in anderen reaktionsfähigen Systemen.

Hinweis: Andere als atmosphärische Bedingungen sind z. B. erhöhter Druck, erhöhte Temperatur oder erhöhter Sauerstoffgehalt. Andere Reaktionspartner als Luft sind z. B. Chlor oder Stickoxide. Andere reaktionsfähige Systeme enthalten z. B. chemisch instabile Stoffe, wie Peroxide und Ethylenoxid. Sie benötigen keinen weiteren Reaktionspartner.

(4) Diese Technische Regel kann sinngemäß auch angewendet werden, um elektrostatische Aufladungen als Zündursache für Brände zu vermeiden.

(5) Diese Technische Regel gilt auch für die Beurteilung der Bereiche, die durch explosionsgefährliche Stoffe und Gemische gefährdet sind, soweit für diese keine Regelungen bestehen.

2 Begriffsbestimmungen

(1) Medien im Sinne dieser TRGS sind Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe, mit denen im Betrieb umgegangen wird.

Hinweis: Zu den Medien gehören z. B. Abluft, Treibstoffe und Lösemittel sowie Stäube.

(2) Material ist die Bezeichnung für Werkstoffe, aus denen Gegenstände oder Einrichtungen bestehen.

Hinweis: Zu den Materialien gehören z. B. Stahl, Glas, Kunststoffe, Holz, aber auch Beschichtungsmaterialien, z. B. Lacke, Folien, Gummierungen. Ausgenommen sind Verbundwerkstoffe.

(3) Gegenstände oder Einrichtungen sind aus Materialien gefertigt und stehen in der Regel mit Medien in Kontakt.

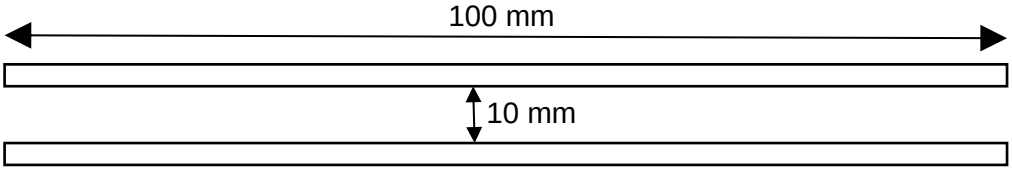
Hinweis: Zu den Gegenständen oder Einrichtungen gehören z. B. Rohrleitungen, Schläuche, Behälter, Ladetanks, Pumpen.

(4) Durchgangswiderstand R_D ist der elektrische Widerstand eines Materials oder eines Gegenstandes durch das Material oder den Gegenstand hindurch bestimmt unter Anwendung einer bestimmten Elektrodenanordnung. Der Durchgangswiderstand wird in Ω angegeben.

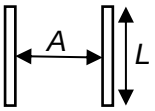
(5) Spezifischer Widerstand ρ ist der Durchgangswiderstand eines Mediums oder Materials bezogen auf die Einheitslänge und Einheitsquerschnittsfläche. Der spezifische Widerstand wird in Ωm angegeben.

Hinweis: Der spezifische Widerstand wird oft auch spezifischer Durchgangswiderstand genannt.

(6) Oberflächenwiderstand R_O ist der elektrische Widerstand gemessen auf der Oberfläche eines Gegenstandes. Er wird zwischen zwei parallelen Elektroden geringer Breite und jeweils 100 mm Länge, die 10 mm auseinander liegen und mit der zu messenden Oberfläche Kontakt haben, gemessen. Die Messspannung beträgt mindestens 100 V, abhängig vom Widerstandsbereich. Der Oberflächenwiderstand wird in Ω angegeben.



(7) Spezifischer Oberflächenwiderstand $R_{\square}$ ist der elektrische Widerstand gemessen auf der Oberfläche eines Gegenstandes. Die Messung erfolgt zwischen zwei parallelen Elektroden geringer Breite und der Länge L. Der Abstand A der Elektroden ist gleich ihrer Länge L ($A = L$). Der Messwert wird in Ω angegeben.



Hinweis: In der angelsächsischen Literatur wird der spezifische Oberflächenwiderstand häufig mit Ω square oder Ω^2 bezeichnet. Der spezifische Oberflächenwiderstand beträgt das Zehnfache des Oberflächenwiderstandes.

(8) Streifenwiderstand R_{ST} ist der elektrische Widerstand an Streifen aus textilen Flächengebilden, die zur Verbesserung der Ableitfähigkeit von elektrostatischen Ladungen Beimischungen aus Materialien enthalten, deren Widerstand wesentlich geringer ist als der des textilen Grundmaterials, z. B. Carbonfasern oder metallisierte Fäden. Der Streifenwiderstand R_{ST} wird an Textilstreifen mit den Abmessungen 50 mm x 350 mm ermittelt.

(9) Ableitwiderstand R_E eines Gegenstandes ist sein elektrischer Widerstand gegen Erdpotenzial, oft Erde genannt. Der Ableitwiderstand wird in Ω angegeben.

Hinweis: Die übliche Form der Messelektrode ist eine 20 cm^2 große, elastische Kreisfläche. Die Kontaktierung mit der Oberfläche des zu messenden Gegenstandes erfolgt trocken. Der Ableitwiderstand hängt unter anderem vom spezifischen Widerstand, vom – gegebenenfalls spezifischen – Oberflächenwiderstand der Materialien sowie vom Abstand zwischen den gewählten Messpunkten und Erde ab. Dieser Widerstand wird häufig auch Erdableitwiderstand R_E genannt.

(10) Leitfähigkeit κ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes. Die Leitfähigkeit wird in S/m angegeben.

(11) Leitfähig ist ein Medium oder Material mit einem spezifischen Widerstand $\rho \leq 10^4\ \Omega$m. Leitfähig ist ein Medium oder Material auch, wenn sein Oberflächenwiderstand $R_O \leq 10^4\ \Omega$ beträgt.

Hinweis 1: Für Flüssigkeiten, Schüttgüter oder bestimmte Gegenstände werden in den entsprechenden Abschnitten hinsichtlich der Grenzwerte spezielle Festlegungen getroffen. Zur Veranschaulichung der Begriffe siehe auch Anhang I. Leitfähige Materialien können nicht gefährlich aufgeladen werden, wenn sie geerdet sind. Der Oberflächenwiderstand leitfähig gemachter Kunststoffe weist oft einen großen Streubereich auf. Der Höchstwert darf $10^5\ \Omega$ und der Mittelwert $10^4\ \Omega$ nicht überschreiten.

Hinweis 2: Als leitfähig werden auch Gegenstände und Einrichtungen bezeichnet, wenn sie aus leitfähigem Material bestehen.

(12) Leiter sind Gegenstände oder Einrichtungen aus leitfähigen Materialien.

(13) Ableitfähig ist

1. ein Medium oder ein Material mit einem spezifischen Widerstand von mehr als $10^4\ \Omega$m und weniger als $10^9\ \Omega$m

oder

2. ein Gegenstand oder eine Einrichtung

   a) mit einem Oberflächenwiderstand zwischen $10^4\ \Omega$ und $10^9\ \Omega$, gemessen bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte

   oder

   b) mit einem Oberflächenwiderstand zwischen $10^4\ \Omega$ und $10^{11}\ \Omega$, gemessen bei 23 °C und 30 % relativer Luftfeuchte.

Hinweis 1: Mit sinkender Luftfeuchte nimmt der Oberflächenwiderstand in der Regel beträchtlich zu.

Hinweis 2: Ableitfähige Medien oder Gegenstände und Einrichtungen aus ableitfähigen Materialien speichern keine gefährliche elektrische Ladung, wenn sie mit Erde in Kontakt stehen. Als ableitfähig werden auch Gegenstände und Einrichtungen bezeichnet, wenn sie aus ableitfähigen Materialien bestehen.

Hinweis 3: Für Flüssigkeiten, Schüttgüter oder bestimmte Gegenstände, wie z. B. ableitfähige Fußböden, werden in den entsprechenden Abschnitten hinsichtlich der Grenzwerte spezielle Festlegungen getroffen. Zur Veranschaulichung der Begriffe siehe auch Anhang I. Der umgangssprachliche Begriff „antistatisch“ wird an verschiedenen Stellen unterschiedlich verwendet und deshalb in dieser Technischen Regel nicht definiert.

(14) Isolierend sind Medien oder Materialien, die weder leitfähig noch ableitfähig sind.

Hinweis 1: Als isolierend werden auch Gegenstände oder Einrichtungen aus isolierenden Materialien bezeichnet.

Hinweis 2: Zur Veranschaulichung der Begriffe siehe auch Anhang I.

Hinweis 3: Isolierende Medien sowie Gegenstände und Einrichtungen aus isolierenden Materialien werden unter Berücksichtigung ihrer elektrostatischen Eigenschaften

auch als „aufladbar“ bezeichnet. Zu diesen Materialien gehören viele Polymere, z. B. Kunststoffe.

(15) Geerdet im elektrostatischen Sinne sind leitfähige Gegenstände, Flüssigkeiten und Schüttgüter mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^6\ \Omega$ und Personen mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8\ \Omega$. Personen und kleine Gegenstände sind auch geerdet, wenn ihre Relaxationszeit $\tau \leq 10^{-2}$ s ist.

Hinweis: Zur Erdung siehe auch Nummer 8.

(16) Aufladbar sind isolierende Medien sowie Gegenstände und Einrichtungen aus isolierenden Materialien. Aufladbar sind auch nicht mit Erde verbundene leitfähige oder ableitfähige Gegenstände und Einrichtungen.

(17) Leitfähiges Schuhwerk ist Schuhwerk mit einem Ableitwiderstand von weniger als $10^5\ \Omega$.

(18) Ableitfähiges Schuhwerk ist Schuhwerk, welches ermöglicht, dass eine auf ableitfähigem Boden stehende Person einen Ableitwiderstand von höchstens $10^8\ \Omega$ aufweist.

(19) Explosionsfähiges Gemisch ist ein Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder aufgewirbelten Stäuben und Luft oder einem anderen Oxidationsmittel, das nach Wirksamwerden einer Zündquelle in einer sich selbsttätig fortpflanzenden Flammenausbreitung reagiert, so dass im Allgemeinen ein sprunghafter Temperatur- und Druckanstieg hervorgerufen wird.

(20) Gefährliches explosionsfähiges Gemisch ist ein explosionsfähiges Gemisch, das in solcher Menge auftritt, dass besondere Schutzmaßnahmen für die Aufrechterhaltung der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen erforderlich werden.

(21) Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ist ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch mit Luft als Oxidationsmittel unter atmosphärischen Bedingungen (Umgebungstemperatur von - 20 °C bis + 60 °C und Druck von 0,8 bar bis 1,1 bar).

(22) Explosionsgefährdeter Bereich ist der Gefahrenbereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann.

Hinweis: Ein Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphäre nicht in einer solchen Menge zu erwarten ist, dass besondere Schutzmaßnahmen erforderlich werden, gilt nicht als explosionsgefährdeter Bereich. Siehe auch § 2 Absatz 14 und Anhang I Nummer 1.7 der Gefahrstoffverordnung.

(23) Mindestzündenergie (*MZE*) ist die unter festgelegten Versuchsbedingungen ermittelte kleinste, in einem Kondensator gespeicherte elektrische Energie, die bei Entladung ausreicht, das zündwilligste Gemisch einer explosionsfähigen Atmosphäre zu entzünden.

Hinweis: Die *MZE* wird in mJ angegeben.

(24) Mindestzündladung (*MZQ*) ist die unter festgelegten Versuchsbedingungen kleinste in einer elektrostatischen Entladung übertragene elektrische Ladungsmenge, die das zündwilligste Gemisch einer explosionsfähigen Atmosphäre entzünden kann.

(25) Explosionsgruppen I, II und III unterscheiden Gefahrstoffe, die zu Brand- und Explosionsgefahren führen können, mit dem Ziel, geeignete Geräte und Einrichtungen für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen auszuwählen.

(26) Die Explosionsgruppe I gilt für explosionsgefährdete Bereiche unter Tage, die Explosionsgruppe II für explosionsgefährdete Bereiche über Tage, die durch Flüssigkeiten und Gase entstehen. Gefahrstoffe werden in Explosionsgruppe II nach DIN EN 60079-0:2014-06 hinsichtlich ihrer Normspaltweite unterschieden.

1. Gruppe IIA: einige Gase und organische Flüssigkeiten, z. B. Aceton, Benzin, Toluol,
2. Gruppe IIB: z. B. Ethen, Ethylenoxid, Diethylether,
3. Gruppe IIC: z. B. Acetylen, Wasserstoff, Schwefelkohlenstoff.

(27) Die Explosionsgruppe III betrifft explosionsgefährdete Bereiche über Tage, die durch fein verteilte Feststoffe hervorgerufen werden. Die Gefahrstoffe der Explosionsgruppe III werden nach DIN EN 60079-0:2014-06 hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterschieden.

1. Gruppe IIIA: brennbare Flusen, z. B. Flock,
2. Gruppe IIIB: nicht leitfähiger Staub, z. B. Pulverlacke,
3. Gruppe IIIC: leitfähiger Staub, z. B. Metallstaub.

(28) Stark ladungserzeugender Prozess ist ein Vorgang, bei dem im Vergleich zur Ladungsableitung hohe Ladungsmengen pro Zeit erzeugt werden und sich ansammeln können.

Hinweis: Typische Vorgänge sind z. B. laufende Antriebsriemen, pneumatische Förderung von Schüttgut oder schnelle Mehrphasenströmung von Flüssigkeiten. Ausschließlich manuelle Vorgänge sind erfahrungsgemäß nicht stark ladungserzeugend.

(29) Gefährliche Aufladung ist eine elektrostatische Aufladung, die bei ihrer Entladung die zu erwartende explosionsfähige Atmosphäre entzünden kann.

Hinweis: Die Entladungsformen Funkenentladung, Koronaentladung, Büschelentladung, Gleitstielbüschelentladung, gewitterblitzähnliche Entladung und Schüttkegelentladung werden im Anhang A3 erläutert.

(30) Relaxationszeit τ ist die Zeitspanne, in der eine elektrische Ladung, z. B. auf einer festen Oberfläche, im Innern einer Flüssigkeit, in einer Schüttung oder in einer Nebel- oder Staubwolke, auf 1/e (d. h. ungefähr 37 %) ihres ursprünglichen Wertes abnimmt.

Hinweis: Die Relaxationszeit τ bei Entladung eines Kondensators der Kapazität C über einen Entladewiderstand R beträgt $\tau = R \cdot C$.

(31) Schüttgut umfasst Teilchen von feinem Staub über Grieß und Granulat bis hin zu Spänen.

Hinweis: Zum Schüttgut zählt auch grobes Gut, das Feinstaubanteile enthält, z. B. Abrieb.

3 Elektrostatische Aufladungen von Gegenständen und Einrichtungen

(1) Die gefährliche Aufladung von Gegenständen oder Einrichtungen in explosionsgefährdeten Bereichen ist zu vermeiden.

Hinweis: Derartige Gegenstände oder Einrichtungen sind z. B. Rohre, Behälter, Folien, Anlagen- und Apparateteile, einschließlich eventueller Beschichtungen, Auskleidungen, aber auch textile Gegenstände, z. B. Schlauchfilter.

(2) Andernfalls muss das Annähern eines Gegenstandes oder einer Person an gefährlich aufgeladene Oberflächen von Gegenständen oder Einrichtungen sicher vermieden werden. Stellt diese Annäherung die einzige Möglichkeit dar, eine zündwirksame Entladung auszulösen, kann in Zone 1 auf weitere Maßnahmen verzichtet werden, solange keine stark ladungserzeugenden Prozesse vorliegen.

Hinweis: Stark ladungserzeugende Prozesse führen zu so starken Aufladungen, dass spontane zündwirksame Entladungen auftreten können.

(3) Der Gebrauch von Gegenständen oder Einrichtungen aus isolierenden Materialien in explosionsgefährdeten Bereichen ist zu vermeiden. Können Gegenstände oder Einrichtungen aus leitfähigen oder ableitfähigen Materialien nicht eingesetzt werden, sind Maßnahmen gegen gefährliche Aufladungen zu treffen.

Hinweis: Mögliche Maßnahmen sind z. B. leitfähige oder ableitfähige Beschichtungen, leitfähige Fäden in Textilien, Oberflächenbegrenzungen oder auch sicher wirkende organisatorische Maßnahmen. Siehe auch Nummern 3.2 und 8.

3.1 Leitfähige und ableitfähige Materialien

(1) In explosionsgefährdeten Bereichen sind grundsätzlich nur leitfähige oder ableitfähige Gegenstände oder Einrichtungen zu verwenden.

(2) Je nach Zündwahrscheinlichkeit sind alle Gegenstände oder Einrichtungen aus leitfähigen Materialien zu erden und solche aus ableitfähigen Materialien sind mit Erdkontakt zu versehen. Die Erdung bzw. die Erdverbindung darf nur entfallen, wenn eine gefährliche Aufladung ausgeschlossen ist.

Hinweis 1: Geerdete leitfähige Gegenstände können nicht gefährlich aufgeladen werden. Sind leitfähige Gegenstände von Erde isoliert, können Funkenentladungen auftreten.

Hinweis 2: Hinsichtlich Erdung siehe auch Nummer 8.

(3) Hängt die Ableitfähigkeit eines Gegenstandes oder einer Einrichtung von Temperatur- oder Feuchteschwankungen der Luft ab, sind diese im Rahmen der zu erwartenden Betriebsbedingungen zu berücksichtigen.

Hinweis: Siehe auch Anhang A.

3.2 Isolierende Materialien

(1) Gegenstände aus isolierenden Materialien können durch Reiben oder infolge betrieblicher Vorgänge aufgeladen werden. Dies kann zu Büschel- oder Gleitstielbüschelentladungen führen. Beim Umgang mit isolierenden Gegenständen oder Einrichtungen sind in explosionsgefährdeten Bereichen andere Explosionsschutzmaßnahmen, z. B. Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre, zu ergreifen.

1. Isolierende Gegenstände oder Einrichtungen dürfen in explosionsgefährdeten Bereichen nur benutzt werden, wenn gefährliche Aufladungen vermieden sind:
   a) In den Zonen 0 und 20 auch bei seltenen Betriebsstörungen,
   b) in den Zonen 1 und 21 auch bei Betriebsstörungen, mit denen üblicherweise zu rechnen ist oder bei Wartung und Reinigung und

c) in den Zonen 2 und 22 bei bestimmungsgemäßem Betrieb.

Hinweis: An der Oberfläche isolierenden Materials können Büschelentladungen auftreten. Deren Energien reichen zwar für eine Entzündung explosionsfähiger Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemische aus, jedoch nicht für die Entzündung von Staub/Luft-Gemischen unter atmosphärischen Bedingungen (siehe auch Nummer 6 „Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Schüttgütern“).

2. Werden isolierende Gegenstände oder Einrichtungen mit leitfähiger oder ableitfähiger Beschichtung eingesetzt, ist diese zu erden bzw. mit Erde zu verbinden.

3. Leitfähige oder ableitfähige Beschichtungen isolierender Gegenstände oder Einrichtungen in den Zonen 0 und 1 erfordern einen Nachweis ihrer dauerhaften Wirksamkeit.

Hinweis: Viele Materialien, die in der Vergangenheit als isolierend galten, z. B. Gummi oder Kunststoffe, sind mittlerweile in ableitfähigen Varianten erhältlich. Allerdings weisen diese Varianten in der Regel Additive auf, z. B. Ruß oder Graphit, welche die Eigenschaften des Ausgangsmaterials beeinträchtigen können.

4. Bei textilen Gegenständen, in die leitfähige oder ableitfähige Fasern eingearbeitet sind, z. B. bei mit Kohlenstofffasern ausgerüsteten Filtergeweben, ist nach Reinigung oder nach besonderer Beanspruchung zu prüfen, ob die Leitfähigkeit bzw. Ableitfähigkeit über das gesamte Gewebe erhalten geblieben ist. Andernfalls ist sie wieder herzustellen.

(2) Für die Auswahl geeigneter Gegenstände und Einrichtungen und für deren sicheren Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen sollen bevorzugt Maßnahmen in nachfolgender Reihenfolge gewählt werden:

1. Zur Vermeidung von Büschelentladungen ist die Größe der Fläche isolierender Gegenstände gemäß den in Nummer 3.2.1 bzw. 3.2.2 aufgeführten Abmessungen zu begrenzen. Zur Vermeidung von Gleitstielbüschelentladungen sind isolierende Beschichtungen gemäß den in Nummer 3.2.3 angegebenen Bedingungen zu begrenzen.

2. Können die vorgenannten Maßnahmen nicht umgesetzt werden, kann experimentell gemäß Nummer 3.2.4 nachgewiesen werden, dass gefährliche Aufladungen nicht zu erwarten sind.

3. Können die objektbezogenen Maßnahmen nicht erfolgreich umgesetzt werden, müssen zur Vermeidung gefährlicher Aufladungen umgebungsbeeinflussende Maßnahmen gemäß den Nummern 3.2.5 und 3.2.6 angewendet werden.

3.2.1 Begrenzung der Abmessungen von Oberflächen isolierender Gegenstände und Einrichtungen

(1) Zündgefahren durch Büschelentladungen sind in den Zonen 0, 1 oder 2 nicht zu erwarten, wenn

1. die Größe der Fläche eines Gegenstandes oder seine Abmessung auf die in den Tabellen 1a oder 1b aufgeführten Höchstwerte beschränkt ist,

2. eine gefährliche Aufladung durch betriebliche Vorgänge nicht zu erwarten ist oder

3. ein experimenteller Nachweis vorliegt, dass mit gefährlichen Aufladungen nicht zu rechnen ist.

Hinweis:

Maßgeblich für isolierende Oberflächen:
- Bei Gegenständen mit planen Oberflächen ist die größte freie Fläche (siehe auch Tabelle 1a) heranzuziehen.
- Bei Gegenständen mit gekrümmten Oberflächen ist die Projektion der größten Fläche (siehe auch Tabelle 1a) zu Grunde zu legen.
- Für lange, dünne Gegenstände, z. B. Kabel oder Rohrleitungen, tritt an die Stelle der Oberfläche die höchstzulässige Breite oder der höchstzulässige Durchmesser nach der Tabelle 1b,
- Ist der Gegenstand aufgewickelt, gelten jedoch die Werte wie für Gegenstände mit planen Oberflächen nach der Tabelle 1a.

(2) Maßnahmen nach den Tabellen 1a und 1b reichen bei stark ladungserzeugenden Prozessen nicht aus.

Hinweis 1: Das Strömen von Flüssigkeiten und Suspensionen mit niedriger Leitfähigkeit, die Förderung von Stäuben durch Rohre oder Schlauchleitungen sowie das Sprühen von Elektronen und Ionen von Hochspannungselektroden sind stark ladungserzeugende Prozesse.

Hinweis 2: An dünnen Gegenständen aus isolierenden Materialien, z. B. Folien und Schichten, können bei stark ladungserzeugenden Prozessen Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

Tabelle 1a: Höchstzulässige Oberflächen isolierender Gegenstände

Zone	Oberfläche (cm^2) in Explosionsgruppen		
	IIA	IIB	IIC
0	50	25	4
1	100	100	20
2	Maßnahmen nur erforderlich, wenn erfahrungsgemäß zündwirksame Entladungen auftreten.		

Tabelle 1b: Höchstzulässige Durchmesser oder Breiten langgestreckter isolierender Gegenstände

Zone	Breite oder Durchmesser (cm) in Explosionsgruppen		
	IIA	IIB	IIC
0	0,3	0,3	0,1
1	3,0	3,0	2,0
2	Maßnahmen nur erforderlich, wenn erfahrungsgemäß zündwirksame Entladungen auftreten.		

(3) Für Explosionsgruppe I beträgt die höchstzulässige Oberfläche 100 cm^2, die höchstzulässige Breite bzw. der höchstzulässige Durchmesser langgestreckter isolierender Gegenstände beträgt 3 cm.

(4) Da die Entwicklung unter anderem zu Werkstoffen – die sich nicht gefährlich aufladen lassen – geführt hat, kann an die Stelle des Flächenkriteriums auch der ex-

perimentelle Nachweis, dass der Gegenstand sich nicht gefährlich auflädt, treten. Ein solcher Nachweis erfordert eine fachkundige Prüfung.

Hinweis: Dieser Nachweis kann z. B. über die Bestimmung des Ladungstransfers erbracht werden.

(5) Da Staub/Luft-Gemische durch Büschelentladungen nicht entzündet werden können, sind vergleichbare Flächenkriterien für die Zonen 20, 21 oder 22 nicht erforderlich.

Hinweis: sicherheitstechnische Überlegungen zu Staub/Luft-Gemischen siehe auch Nummer 6.

3.2.2 Begrenzung der isolierenden Oberfläche durch leitfähige Netze

(1) Können die höchstzulässigen Abmessungen nach Nummer 3.2.1 zur Vermeidung von Büschelentladungen nicht eingehalten werden, lassen sich gefährliche Aufladungen mit Hilfe geerdeter leitfähiger oder ableitfähiger Netze, Rahmen etc. vermeiden. Sie sorgen für eine ausreichende Abschirmung, wenn die Größe der gebildeten Teilflächen und die Einbauart des Netzes oder Rahmens eines der beiden folgenden Kriterien erfüllt:

1. Die von der Masche des Netzes oder vom Rahmen eingeschlossene Fläche überschreitet nicht das Vierfache der in der Tabelle 1a angegebenen Werte und das Netz oder der Rahmen berühren die Oberfläche dauerhaft oder sie werden dauerhaft in einem Abstand entsprechend dem Schichtdickenwert nach Nummer 3.2.3.1 oberhalb der Oberfläche gehalten.
2. Die von der Masche des Netzes oder vom Rahmen eingeschlossene Fläche überschreitet nicht das Vierfache der in der Tabelle 1a angegebenen Werte, die Schichtdicke des isolierenden Materials oberhalb eines eingebauten Netzes überschreitet nicht den Wert nach Nummer 3.2.3.1 und stark ladungserzeugende Prozesse kommen nicht vor.

Hinweis: Ein eingebautes Netz oder ein eingebauter Rahmen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material bieten bei stark ladungserzeugenden Prozessen keinen Schutz gegen Gleitstielbüschelentladungen.

3.2.3 Begrenzung isolierender Beschichtungen leitfähiger oder ableitfähiger Gegenstände und Einrichtungen

3.2.3.1 Begrenzung der Beschichtungsdicke

Die Dicke isolierender Beschichtungen soll für

1. von Gefahrstoffen der Explosionsgruppen IIA und IIB berührte Oberflächen 2 mm und
2. von Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC berührte Oberflächen 0,2 mm nicht überschreiten.

Der leitfähige oder ableitfähige Teil des Gegenstandes muss bei der Handhabung geerdet sein.

Hinweis: Durch diese Maßnahmen werden Büschelentladungen in der Regel verhindert. Bei stark ladungserzeugenden Prozessen können jedoch Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

3.2.3.2 Begrenzung der Durchschlagspannung

(1) Gleitstielbüschelentladungen können vermieden werden, wenn die Durchschlagspannung dünner isolierender Schichten 4 kV nicht überschreitet.

Hinweis: Beschichtungen mit einer ausreichend geringen Durchschlagspannung, z. B. Farbanstriche, werden elektrisch durchschlagen, bevor sich eine für eine Gleitstielbüschelentladung ausreichende Ladungsmenge ansammeln kann. Zur Begrenzung der Durchschlagspannung textiler Gewebe, z. B. FIBC, siehe auch Anhänge A3.4 und C.

(2) Bei Gasen und Dämpfen der Explosionsgruppe IIC sind zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung von Entzündungen zu treffen, sofern stark ladungserzeugende Prozesse nicht ausgeschlossen sind.

3.2.3.3 Trennen isolierender Folien von festen Grundkörpern

(1) Das Abziehen isolierender Folien von festen Grundkörpern muss außerhalb der Zonen 0 und 1 erfolgen.

Hinweis: Bei Arbeitsprozessen, z. B. Abziehen von Schrumpffolien von Packmitteln, können gefährliche Aufladungen auftreten.

(2) In Zone 2 darf das Abziehen isolierender Folien nur dann erfolgen, wenn dabei keine zündwirksamen Entladungen auftreten.

Hinweis: Die Beurteilung der Zündwirksamkeit kann gemäß Nummer 3.2.1 oder 3.2.4 erfolgen.

3.2.4 Begrenzung der übertragenen Ladung

(1) Die von einem Gegenstand maximal übertragene Ladung darf in Zone 1 und 2 die folgenden Werte nicht überschreiten:

1. für Explosionsgruppe IIA: 60 nC,
2. für Explosionsgruppe IIB: 25 nC,
3. für Explosionsgruppe IIC: 10 nC.

Hinweis 1: Der Prüfgegenstand wird möglichst hoch aufgeladen und eine Entladung zu einer Kugelelektrode eines Coulombmeters provoziert.

Hinweis 2: Der Grenzwert von 25 nC wurde festgelegt, um für die Explosionsgruppen IIA, IIB und IIC einen einheitlichen Sicherheitsabstand herzustellen. Ältere Gegenstände, die auf der Basis des alten Grenzwertes von 30 nC zugelassen wurden, müssen nicht erneut geprüft werden.

(2) In Zone 0 gelten an Stelle der in (1) angegebenen Werte die folgenden:

1. für Explosionsgruppe IIA: 25 nC,
2. für Explosionsgruppe IIB: 10 nC,
3. für Explosionsgruppe IIC: Es dürfen keine Entladungen detektierbar sein.

(3) Für Explosionsgruppe I darf die von einem Gegenstand maximal übertragene Ladung 60 nC nicht überschreiten.

(4) Folgende Maßnahmen können die von isolierenden Flächen übertragene Ladung reduzieren:

1. grobe Strukturierung der Oberfläche; nur für die Explosionsgruppen I oder IIA,
2. Einbau leitfähiger Koronaspitzen.

3.2.5 Befeuchtung der Luft

Durch Erhöhung der relativen Feuchte kann der Oberflächenwiderstand verringert werden. Eine Erhöhung der relativen Feuchte darf nicht als alleinige Maßnahme in Zone 0 angewendet werden.

Hinweis: Die Oberfläche vieler isolierender Materialien kann durch die Anlagerung von Wasser aus der feuchten Luft ableitfähig werden. Während z. B. Glas oder Naturfasern diese Eigenschaft besitzen, trifft dies jedoch für viele andere Materialien, wie Polytetrafluorethylen oder Polyethylen, nicht zu. Feuchte Luft selbst ist isolierend.

3.2.6 Ionisierung der Luft

Durch Ionisierung der Luft kann manchmal eine gefährliche Aufladung isolierender Gegenstände lokal vermieden werden. Dieses Verfahren eignet sich z. B. zur Neutralisation elektrischer Ladungen auf Kunststoffplatten oder -schichten. Die Wirksamkeit der Ionisierungseinrichtungen ist regelmäßig zu prüfen.

3.2.6.1 Passive Ionisatoren

Passive Ionisatoren dürfen bei Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC nicht angewendet werden. Sie sind allein keine ausreichende Maßnahme in Zone 0.

Hinweis: Passive Ionisatoren sind geerdete spitze Elektroden, z. B. feine Nadeln, dünne Drähte oder leitfähige Litzen. Sie neutralisieren durch Koronaentladung elektrische Ladungen auf der Oberfläche eines aufgeladenen Gegenstandes nur, solange die Anfangsfeldstärke überschritten ist. Stark verschmutzte passive Ionisatoren können zu Entzündungen führen.

3.2.6.2 Aktive Ionisatoren

(1) Aktive Ionisatoren eignen sich, lokale Ladungsansammlungen zu neutralisieren. Ihre Wirksamkeit hängt wesentlich von der richtigen Auswahl, Positionierung und von der regelmäßigen Reinigung der Ionisatoren ab.

Hinweis: Zur Wartung gehört auch die regelmäßige Reinigung der emittierenden Seite der Ionisatoren.

(2) Aktive Ionisatoren dürfen bei Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC und darüber hinaus in Zone 0 nicht angewendet werden.

Hinweis: Bei einem aktiven Ionisator wird üblicherweise eine hohe Spannung an koronaerzeugende Spitzen angelegt. Handelsübliche Systeme verwenden in der Regel Wechselspannung in einem Bereich zwischen 5 kV und 15 kV.

3.2.6.3 Radioaktive Ionisatoren

(1) Die Dauer der Wirksamkeit radioaktiver Ionisatoren ist wegen der Halbwertszeit der radioaktiven Präparate begrenzt.

(2) Radioaktive Ionisatoren dürfen nicht in Zone 0 verwendet werden.

Hinweis: Radioaktive Stoffe ionisieren die umgebende Luft und können zur Ableitung elektrischer Ladungen von einem aufgeladenen Gegenstand eingesetzt werden.

3.2.6.4 Gebläse mit ionisierter Luft

Gebläse mit ionisierter Luft dürfen nicht in Zone 0 verwendet werden.

Hinweis: Zunächst wird die Luft mit einer der vorgenannten Methoden ionisiert und anschließend durch ein Gebläse an den Verwendungsort gebracht. Dieses Verfahren

eignet sich zur Ableitung elektrischer Ladungen von Gegenständen mit kompliziert geformter Oberfläche. Innerhalb des Luftstromes ist die schnelle Abnahme der Ionenkonzentration zu berücksichtigen. Die Ionisation der Luft ist beim Transport über Distanzen von mehr als 10 cm oft schwer aufrecht zu erhalten.

3.3 Folien- und Papierbahnen

(1) Folien- und Papierbahnen können unter anderem beim Laufen über Walzen gefährlich aufgeladen werden.

(2) Diese Aufladung entsteht beim Abheben oder Trennen des isolierenden Trägermaterials von der Unterlage oder von den Führungs- und Druckelementen, z. B. beim Abwickeln von der Rolle bei Rollenmaschinen, beim Lauf des Trägermaterials über Führungs- und Leitwalzen, beim Austritt der bedruckten bzw. beschichteten Bahn aus dem Druck- bzw. Auftragswerk.

Hinweis: Erfahrungsgemäß ist an Tief- und Flexodruckmaschinen das bedruckte Trägermaterial nach seinem Austritt aus dem Druckwerk, d. h. in unmittelbarer Nähe des Farbkastens, insbesondere beim Einsatz elektrostatischer Druckhilfen am stärksten aufgeladen. Die Farbe selbst wird durch den in ihr rotierenden Zylinder beträchtlich aufgeladen, wozu ihre dispergierten Feststoffanteile stark beitragen.

(3) Die Aufladung beim Drucken und Beschichten ist so gering wie möglich zu halten. Folgende Parameter beeinflussen ihre Höhe:

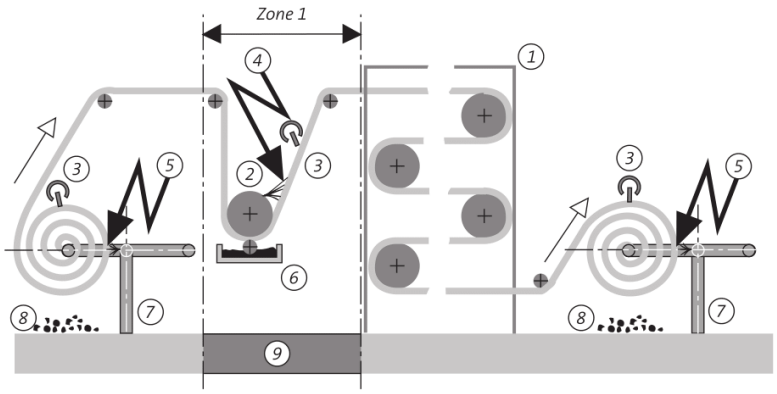
1. Art, Oberflächenbeschaffenheit und Leitfähigkeit der Folien- und Papierbahnen, z. B. durch die Feuchte des Trägermaterials,
2. Art, Oberflächenbeschaffenheit und Leitfähigkeit der Führungs- und Druckelemente, wie Rollen, Walzen und Zylinder,
3. die Verarbeitungsgeschwindigkeit,
4. konstruktionsbedingte zusätzliche Reibung zwischen Materialbahn und Rollen, Walzen und Zylindern beim Anlauf oder bei Geschwindigkeitsänderung von Rollenmaschinen oder bei schwergängigen Umlenkwalzen,
5. relative Luftfeuchte im Arbeitsraum.

(4) Aufladungen können durch folgende Maßnahmen vermieden werden:

1. Erdung aller leitfähigen Teile,
2. Einsatz ableitfähiger Materialien für Rollen, Walzen, Zylinder und Trägermaterial,
3. Erhöhung der Leitfähigkeit für Farben, Lacke, Klebstoffe, Lösemittel oder Schmiermittel auf mindestens 10 000 pS/m,
4. Entladung der Papier- oder Folienbahn auslaufseitig in der Mitte zwischen der Ablöselinie vom Presseur und der ersten Umlenkrolle und – falls notwendig – zusätzlich vor Eintritt in das Druck- oder Auftragswerk.

Hinweis: In vielen Fällen reichen die genannten Maßnahmen nicht aus; dann ist die explosionsfähige Atmosphäre zu vermeiden (z. B. durch technische Lüftung).

– Büschelentladungen nicht vermeidbar
– Ionisatoren als alleinige Explosionsschutzmaßnahme in Zone 1 nicht ausreichend
– Ionisatoren vermindern Verschmutzung der Maschine und Belästigung von Personen



(1) Durchlauftrockner
(2) Presseur
(3) Ionisator
(4) Starke Büschelentladung
(5) Schwache Büschelentladung; stark, wenn (3) nicht installiert
(6) Auftragswerk für leichtentzündlichen Beschichtungsstoff, Wannenbereich Zone 0
(7) Wickelstationen zum Ab- und Aufrollen
(8) Staubpartikel
(9) Fußboden, leitfähig oder ableitfähig in Zone 1

Beispiel 1: Beschichten und Bedrucken isolierender Folien

3.4 Fördergurte

(1) Der kontinuierliche Trennvorgang zwischen den Trommeln und dem Fördergurt kann beträchtliche Ladungsmengen auf den bewegten Oberflächen und dabei gefährliche Aufladungen erzeugen. Die Aufladung hängt vom spezifischen Widerstand der verwendeten Werkstoffe ab. Sie steigt mit der Geschwindigkeit, der Zugspannung sowie der Breite der Berührungsfläche. Die vom Gurtband aufgenommene Ladung kann nur über die geerdeten leitfähigen Rollen oder Trommeln sicher abgeleitet werden, wenn der Fördergurt ausreichend ableitfähig ist.

Hinweis: Normalerweise wird ein Fördergurt aus isolierendem Material gefertigt, wohingegen Antriebstrommel und Tragrollen aus leitfähigem Material bestehen.

(2) Ein Fördergurt heißt ableitfähig, wenn die Oberflächenwiderstände der Ober- und Unterseite des Bandes weniger als $3 \cdot 10^8\ \Omega$ betragen. Die Messung des Ober-

flächenwiderstands erfolgt bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte mit einer inneren kreisförmigen Elektrode von 25 mm Durchmesser und einer äußeren Ringelektrode mit 125 mm innerem und 150 mm äußerem Durchmesser. Wird der Oberflächenwiderstand mit der Streifenelektrode nach Nummer 2 Absatz 6 gemessen, muss der so erhaltene Messwert mit einem Faktor 4 multipliziert werden. Besteht der Gurt aus Schichten unterschiedlicher Materialien, wird er nur als ableitfähig betrachtet, solange sein Durchgangswiderstand senkrecht zu den Schichten $10^9\ \Omega$ nicht überschreitet.

(3) In explosionsgefährdeten Bereichen dürfen nur ableitfähige Fördergurte eingesetzt werden. Diese sind über leitfähige, geerdete Rollen und Trommeln zu führen.

(4) Gurtverbinder sind in Bereichen der Zone 0 nicht zulässig. Gleiches gilt in Zone 1 bei Gasen oder Dämpfen der Explosionsgruppe IIC sowie – soweit diese zulässig ist – bei einer Bandgeschwindigkeit von mehr als 5 m/s.

(5) Reparaturen ableitfähiger Fördergurte dürfen den Widerstand nicht erhöhen.

(6) Es gelten die Höchstgeschwindigkeiten und Anforderungen der Tabelle 2.

Tabelle 2: Anforderungen an Fördergurte und Antriebsriemen in Abhängigkeit von Ex-Zone und Gurt-/Riemengeschwindigkeit

<table>
<tr><td rowspan="2">Explosions-gefährdeter Bereich</td><td colspan="3">Band- bzw. Antriebsriemengeschwindigkeit</td></tr>
<tr><td>≤ 0,5 m/s</td><td>0,5-5 m/s</td><td>5-30 m/s</td></tr>
<tr><td>Zone 0</td><td>ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemen-scheiben zulässig,
Gurt-/Riemenverbinder nicht zulässig</td><td colspan="2">Betrieb der Gurte und Riemen mit diesen Geschwindigkeiten nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 1
Explosionsgruppe IIA, IIB</td><td colspan="2">ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben, Gurt-/Riemenverbinder zulässig</td><td>ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben zulässig,
Gurt-/Riemen-verbinder nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 1
Explosionsgruppe IIC</td><td>ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemen-scheiben zulässig, Gurt-/Riemenverbinder nicht zulässig</td><td colspan="2">Betrieb der Gurte und Riemen mit diesen Geschwindigkeiten nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 2</td><td colspan="3">keine zusätzlichen Anforderungen zu Nummer 3.4 (1), Maßnahmen nur erforderlich, wenn erfahrungsgemäß zündwirksame Entladungen auftreten.</td></tr>
<tr><td>Zone 20
und
MZE < 10 mJ</td><td colspan="2">ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben, Gurt-/Riemenverbinder zulässig</td><td>Betrieb der Gurte und Riemen mit diesen Geschwindigkeiten nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 20
und
MZE > 10 mJ</td><td colspan="2">ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben, Gurt-/Riemenverbinder zulässig</td><td>ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben zulässig,
Gurt-/Riemen-verbinder nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 21</td><td colspan="2">ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben, Gurt-/Riemenverbinder zulässig</td><td>ableitfähiger* Gurt/Riemen und leitfähige Riemenscheiben zulässig,
Gurt-/Riemen-verbinder nicht zulässig</td></tr>
<tr><td>Zone 22</td><td colspan="3">keine zusätzlichen Anforderungen zu Nummer 3.4 (1), Maßnahmen nur erforderlich, wenn erfahrungsgemäß zündwirksame Entladungen auftreten.</td></tr>
<tr><td colspan="4">* ableitfähiger Gurt nach der Definition von Nummer 3.4 (2), ableitfähiger Antriebsriemen nach der Definition von Nummer 3.5 (2) oder (3)</td></tr>
</table>

(7) Für Explosionsgruppe I gelten die gleichen Werte wie für Explosionsgruppe IIA.

(8) Für Bandgeschwindigkeiten $v > 30$ m/s liegen keine Erfahrungen vor.

3.5 Antriebsriemen

(1) Der kontinuierliche Trennvorgang zwischen dem Antriebsriemen und der Riemenscheibe kann beträchtliche Ladungsmengen auf den bewegten Oberflächen und dabei gefährliche Aufladungen erzeugen. Die Aufladung hängt vom spezifischen Widerstand der verwendeten Werkstoffe ab. Sie steigt mit der Geschwindigkeit, der Zugspannung sowie der Breite der Berührungsflächen.

Hinweis: Antriebsriemen sind Keilriemen, Zahnriemen und Flachriemen, die rotierende Teile oder Maschinen antreiben. Die Materialien, aus denen der Riemen gefertigt ist, sind häufig isolierend, während die Riemenscheiben normalerweise aus Metall sind.

(2) Ein Antriebsriemen heißt ableitfähig, wenn für den Riemen gilt:

$$R \cdot B / L \leq 6 \cdot 10^5\,\Omega$$

mit R = Widerstand des Antriebsriemens zwischen zwei Elektroden

B = Bei Flachriemen die Riemenbreite, bei Keilriemen die doppelte Flankenbreite

L = Abstand der beiden Elektroden

(3) Besteht der Antriebsriemen aus Schichten unterschiedlicher Materialien, wird er nur dann als ableitfähig betrachtet, wenn zusätzlich sein Durchgangswiderstand senkrecht zu den Schichten den Wert von $10^9\,\Omega$ nicht überschreitet.

Hinweis: Die Widerstandsmessung erfolgt bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte.

(4) In explosionsgefährdeten Bereichen dürfen nur ableitfähige Antriebsriemen eingesetzt werden. Sie sind über leitfähige, geerdete Riemenscheiben zu führen.

(5) Riemenverbinder sind nicht zulässig in Bereichen der Zone 0. Gleiches gilt in Zone 1 bei Gasen oder Dämpfen der Explosionsgruppe IIC sowie – soweit diese zulässig ist – bei einer Antriebsriemengeschwindigkeit von mehr als 5 m/s.

(6) Haftwachs oder isolierende Klebstoffe dürfen die Ableitfähigkeit der Antriebsriemen nicht herabsetzen.

(7) Reparaturen ableitfähiger Antriebsriemen dürfen den Widerstand nicht erhöhen.

(8) Für Antriebsriemen gelten die Höchstgeschwindigkeiten und Anforderungen der Tabelle 2.

(9) Für Explosionsgruppe I gelten die gleichen Werte wie für Explosionsgruppe IIA.

(10) Erfahrungen bei Antriebsriemengeschwindigkeiten $v > 30$ m/s liegen nicht vor.

4 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Flüssigkeiten

Durch Füllen und Entleeren von Behältern mit Flüssigkeiten, durch Umpumpen, Rühren, Mischen und Versprühen von Flüssigkeiten aber auch beim Messen und Probenehmen sowie durch Reinigungsarbeiten, können sich Flüssigkeiten oder das Innere von Behältern gefährlich aufladen. Die entstehende Ladungsmenge und die Höhe der Aufladung hängen von den Eigenschaften der Flüssigkeit, ihrer Strömungsgeschwindigkeit, dem Arbeitsverfahren sowie von der Größe und Geometrie des Behälters und von den Behältermaterialien ab.

4.1 Einteilung von Flüssigkeiten

(1) Die entstehende Ladungsmenge einer Flüssigkeit nimmt mit der Größe vorhandener Grenzflächen, z. B. an Wandungen, und mit der Strömungsgeschwindigkeit zu. Eine zweite nicht mischbare Phase, z. B. in Dispersionen oder flüssig/flüssig-Mischungen, vergrößert die Aufladung erheblich. Da sich Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit beim Strömen stärker aufladen als solche hoher Leitfähigkeit, werden zur Wahl geeigneter Maßnahmen die Flüssigkeiten hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit κ wie folgt eingeteilt:

niedrige Leitfähigkeit:			κ	$\leq$ 50 pS/m*
mittlere Leitfähigkeit:	50 pS/m*	<	κ	$\leq$ 10 000 pS/m
hohe Leitfähigkeit:	10 000 pS/m	<	κ	

Fußnote *: 50 pS/m für Kohlenwasserstoffe,
100 pS/m für sonstige Flüssigkeiten

Hinweis: Die Leitfähigkeit ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes, z. B. 10 000 pS/m entsprechen 10^8 Ωm. Die hier genannten Bereiche niedrige, mittlere oder hohe Leitfähigkeit, sind nicht identisch mit den in Nummer 2 Absatz 11, 13 und 14 genannten Bereichen für leitfähig, ableitfähig und isolierend. Messungen der Leitfähigkeit einer Flüssigkeit können unterschiedliche Werte ergeben, je nachdem, ob sie ruht oder nicht.

(2) Eine gefährliche Aufladung tritt besonders leicht bei Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit auf. Bei Flüssigkeiten mittlerer Leitfähigkeit ist beim Strömen durch Rohre und Filter sowie bei Rührprozessen eine gefährliche Aufladung auch noch möglich. Bei Flüssigkeiten hoher Leitfähigkeit ist mit gefährlichen Aufladungen nur bei stark ladungserzeugenden Prozessen, z. B. beim Versprühen oder wenn sie keinen Erdkontakt aufweisen, zu rechnen.

4.2 Verfahrenstechnische Maßnahmen

(1) Die folgenden Maßnahmen gelten für den Umgang mit Flüssigkeiten und organischen Lösemitteln der Explosionsgruppen IIA und IIB mit *MZE* ≥ 0,2 mJ sowie mit Mineralölprodukten, die explosionsfähige Atmosphäre bilden können. Sie gelten somit z. B. nicht für Schwefelkohlenstoff oder Diethylether.

(2) Alle leitfähigen Medien, Einrichtungen und Gegenstände sind zu erden und alle ableitfähigen mit Erde zu verbinden.

Hinweis: Hinsichtlich Erdung und Potenzialausgleich siehe auch Nummer 8.

(3) Arbeitsschritte, z. B. Rühren, Umpumpen, Dispergieren, dürfen nur in leitfähigen Behältern durchgeführt werden, es sei denn, die Leitfähigkeit der homogenen Phase beträgt mehr als 10 000 pS/m.

(4) Zur Vermeidung gefährlicher Ladungsansammlungen in Flüssigkeiten ist die Erhöhung der Leitfähigkeit durch Additive eine wirksame Maßnahme.

Hinweis: Mit speziellen Additiven kann die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit auf über 50 pS/m erhöht werden, z. B. bei Flugzeugkraftstoffen. Oft genügen bereits Konzentrationen im ppm-Bereich.

(5) Beim Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten muss oft die Erzeugung elektrostatischer Ladungen begrenzt werden.

1. Maßnahmen beim Rühren oder Schütteln können z. B. sein

   a) das Begrenzen des Leistungseintrags durch das Rührwerk,

   b) das Vermeiden einer zweiten, nicht mischbaren Phase.

2. Maßnahmen beim Befüllen oder Entleeren eines Behälters können z. B. sein

   a) das Begrenzen der Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung,

   Hinweis: Das Begrenzen der Strömungsgeschwindigkeit bezieht sich im Folgenden auf Flüssigkeiten im normalen Viskositätsbereich. Bei Flüssigkeiten hoher Viskosität, z. B. Schmierölen, sind darüber hinausgehende Maßnahmen erforderlich (siehe auch Nummer 4.6).

   b) eine ausreichende Verweilzeit hinter Pumpen und Filtern, z. B. durch Berücksichtigen einer Zeitspanne vom Mehrfachen der Relaxationszeit (siehe auch Anhang F),

   c) das Vermeiden verspritzender Flüssigkeit, z. B. durch Unterspiegelabfüllung oder durch Füllrohrführung bis zum Boden bei der Kopfbefüllung oder mit Ablenkplatte bei der Bodenbefüllung,

   d) das Vermeiden von Gasblasen,

   e) das Vermeiden einer zweiten, nicht mischbaren Phase oder deren Aufwirbelung, z. B. von Wasser am Grund von Öltanks.

3. Maßnahmen beim Reinigen von Behältern mit Flüssigkeitsstrahlern können z. B. sein

   a) das Beschränken des Flüssigkeitsdruckes und -durchsatzes,

   b) das Vermeiden einer zweiten, nicht mischbaren Phase; insbesondere, wenn die Reinigungsflüssigkeit im Kreislauf geführt wird,

   c) das Vermeiden der Tankreinigung mit Dampfstrahl.

4. Maßnahmen beim Umgang mit Suspensionen können z. B. sein

   a) das Verringern der Strömungsgeschwindigkeit.

5. Maßnahmen sind auch

   a) das Vermeiden isolierter, leitfähiger Gegenstände im Behälter sowie

   b) die regelmäßige Kontrolle auf schwimmende Gegenstände.

(6) Erforderliche Maßnahmen, insbesondere beim Befüllen oder Entleeren, sind abhängig von der Behältergröße. In dieser TRGS werden nachfolgend

1. große,
2. mittelgroße und
3. kleine

Behälter unterschieden.

4.3 Große Behälter

(1) Große Behälter im Sinne dieser TRGS sind Behälter mit einer Diagonalen $L > 5$ m oder einem Behälterinhalt $V > 50$ m^3. Dazu gehören z. B. Lagertanks und auch Ladetanks von Schiffen.

(2) Behälter aus ausschließlich ableitfähigem Material sind wie Metallbehälter zu behandeln.

(3) Große Behälter aus ableitfähigem Kunststoff oder mit ableitfähigen Kunststoffbeschichtungen sind mit der Aufschrift „elektrostatisch ableitfähig“ zu versehen.

(4) Für große leitfähige und ableitfähige Behälter mit isolierender Innenbeschichtung gelten die Anforderungen nach Nummer 4.4.5 sinngemäß.

(5) Ortsfeste große Behälter müssen Erdkontakt besitzen und ortsbewegliche müssen mit Erdungseinrichtungen ausgerüstet sein.

Hinweis: Große Behälter aus nichtmetallischen Werkstoffen erfordern eine gesonderte Beurteilung.

(6) Im Bereich großer ortsfester Behälter unterscheidet man Tanks mit Festdach und Tanks mit Schwimmdach oder innerer Schwimmdecke.

4.3.1 Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit

(1) Für die sichere Befüllung großer Behälter kann eine Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit erforderlich sein.

(2) Die Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit hängt unter anderem von folgenden Randbedingungen ab:

1. von der Verunreinigung der Flüssigkeit mit einer anderen, mit ihr nicht mischbaren Phase,

Hinweis: Eine Flüssigkeit ist verunreinigt, wenn sie mehr als 0,5 Vol.-% freie, nicht mischbare Flüssigkeit, z. B. Wasser in Benzin, oder wenn sie mehr als 10 mg/l suspendierte Feststoffe enthält.

2. der Füllvorgang befindet sich noch in der Anfangsphase.

Hinweis 1: Die Anfangsphase des Füllvorganges endet beim Tank mit Festdach, wenn der Auslauf des Füllrohres und alle weiteren Einbauteile am Boden des Tanks um mindestens das Zweifache des Füllrohrdurchmessers überdeckt sind.

Hinweis 2: Bei Tanks mit Schwimmdach oder inneren Schwimmdecken endet die Anfangsphase beim Aufschwimmen des Daches oder der Abdeckung.

Hinweis 3. Liegt Wasser in den Rohrleitungen vor, endet die Anfangsphase, nachdem das vorhandene Wasser vollständig beseitigt wurde.

Hinweis 4: Erfahrungsgemäß liegt kein Wasser in den Rohrleitungen mehr vor, nachdem das Zweifache des Rohrleitungsinhaltes in den Tank gelaufen ist oder die Befüllung bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit 30 Minuten angedauert hat.

(3) Die höchstzulässigen Strömungsgeschwindigkeiten für das Befüllen großer Metalltanks mit Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit zeigt Tabelle 3.

Hinweis: Bei Strömungsgeschwindigkeiten $v \leq 7$ m/s ist erfahrungsgemäß nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen.

(4) Da für mittlere Leitfähigkeiten von 50 pS/m bis 10 000 pS/m nur geringe Erfahrungswerte vorliegen, wird empfohlen, die Werte der Tabelle 3 auch für diese Flüssigkeiten anzuwenden.

Tabelle 3: Höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeiten *v* beim Befüllen großer Metalltanks mit Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit

Randbedingung beim Befüllen	Tank mit Festdach	Tank mit Schwimmdach oder Schwimmdecke
In der Anfangsphase	$v \leq 1$ m/s	$v \leq 1$ m/s
danach ohne Verunreinigungen	$v \leq 7$ m/s	keine Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit
danach mit Verunreinigungen	$v \leq 1$ m/s	

4.3.2 Tanks mit Festdach

(1) Neben den Maßnahmen nach Nummer 4.2 sind alle leitfähigen Teile der Tanks und alle dazugehörenden leitfähigen Ausrüstungen, wie Rohre, Pumpen, Filtergehäuse, zu erden.

(2) Bei Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich:

1. Flüssigkeiten dürfen nicht in einen Tank eingefüllt werden, der bereits eine Flüssigkeit höherer Dichte als die der einzufüllenden enthält.
2. Die einfließende Flüssigkeit darf keine gasförmige Phase enthalten, z. B. keine Luft- oder Dampfblasen.

Hinweis: Diese beiden Maßnahmen vermeiden den Auftrieb aufgeladener Flüssigkeiten an die Oberfläche und verringern das elektrische Potenzial im Totraum des Tanks.

(3) Hinter Einrichtungen, die Flüssigkeiten aufladen, z. B. hinter Mikrofiltern in der Einfüllleitung, ist eine angemessene Verweilzeit zwischen den ladungserzeugenden Bauteilen und dem Tankeinlass erforderlich.

Hinweis: Damit wird die Ansammlung von Ladungen im Tank verringert.

(4) Die Befüllung ist so durchzuführen, dass Entladungen zwischen der Flüssigkeit und dem Füllrohr oder den Einbauteilen vermieden werden.

(5) Turbulenz der Flüssigkeiten ist zu vermeiden.

Hinweis 1: Wichtige Parameter beim Befüllen und für das Vermeiden von Turbulenzen sind der Querschnitt des Füllrohres, die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Steuerung des Füllrohres bei Unterspiegelbefüllung.

Hinweis 2: Vermeiden von Turbulenz bewirkt, dass einfließende, aufgeladene Flüssigkeit eher am Boden des Tanks verbleibt und nicht an die Oberfläche gelangt. Abgesetzte, nicht mischbare Flüssigkeiten, z. B. Bodenwasser, Feststoffe oder Sedimente, werden ohne Turbulenz nicht aufgewirbelt.

(6) Der Durchmesser des Füllrohres und der Volumenstrom sind so zu wählen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten weder zu Beginn noch danach die höchstzulässigen Werte nach Nummer 4.3.1 überschreiten.

4.3.3 Tanks mit Schwimmdach oder innerer Schwimmdecke

(1) Das Schwimmdach oder die Schwimmdecke müssen aus leitfähigem Material bestehen und geerdet sein, um elektrische Felder oberhalb des Flüssigkeitsspiegels zu vermeiden.

(2) Schwimmkörper, z. B. Schwimmkugeln, dürfen nur bei Flüssigkeiten mit ausreichender Leitfähigkeit eingesetzt werden und müssen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material bestehen sowie mit Erde verbunden sein.

Hinweis: Schwimmkörper werden eingesetzt, um die Verdunstung im Tank zu beschränken. Sie können sich gefährlich aufladen, wenn sie nicht mit Erde verbunden sind.

(3) Der Durchmesser des Füllrohres und der Volumenstrom sind so zu wählen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten die höchstzulässigen Werte nach Nummer 4.3.1 nicht überschreiten.

(4) In der Anfangsphase ist Folgendes zu berücksichtigen:

1. Hinter Einrichtungen, die Flüssigkeiten aufladen, z. B. hinter Mikrofiltern in der Einfüllleitung, ist eine angemessene Verweilzeit zwischen den ladungserzeugenden Bauteilen und dem Tankeinlass erforderlich.
2. Eventuell vorhandenes Bodenwasser darf nicht aufgewirbelt werden.
3. Hinweis: Damit wird die Ansammlung von Ladungen im Tank verringert.

(5) Die einfließende Flüssigkeit darf keine gasförmige Phase, z. B. keine Luft- oder Gasblasen, enthalten.

Hinweis: Unter dieser Bedingung liegt bei Tanks mit Schwimmdach oder innerer Schwimmdecke nach der Anfangsphase keine explosionsfähige Atmosphäre oberhalb des Flüssigkeitsspiegels vor.

4.4 Mittelgroße Behälter

(1) Mittelgroße Behälter im Sinne dieser TRGS sind Behälter mit einer Diagonalen $L \leq 5$ m oder einem Rauminhalt 1 m^3 < $V \leq 50$ m^3. Dazu gehören z. B. Reaktionsbehälter und die Behälter von Straßentank- oder Eisenbahnkesselwagen.

(2) Unabhängig von der Leitfähigkeit der Flüssigkeit sind die Maßnahmen zur Begrenzung der Ladungserzeugung nach Nummer 4.2 zu treffen.

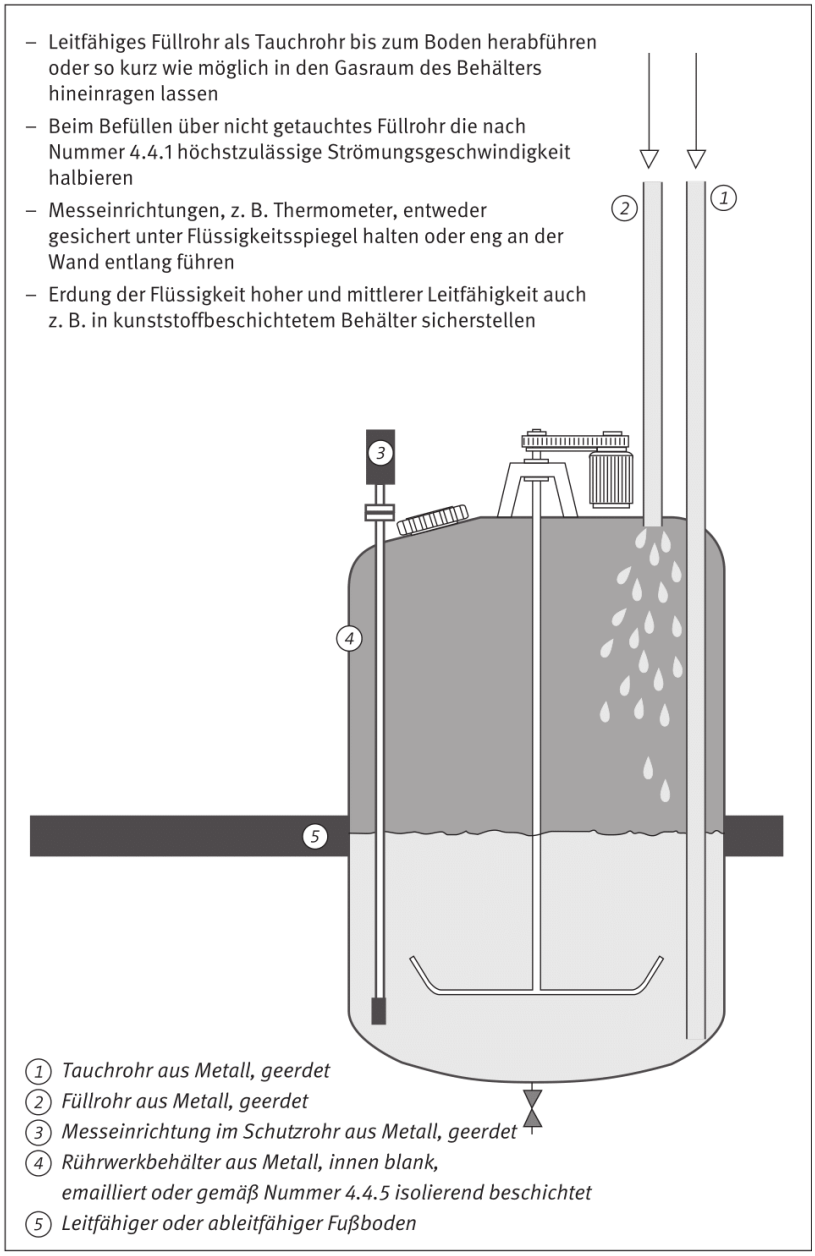
4.4.1 Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit

(1) Die Strömungsgeschwindigkeit ist zu begrenzen. Die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit hängt von Größe und Form des Behälters, der Füllmethode, z. B. Kopf- oder Bodenbefüllung, dem Durchmesser der Leitung zum Behälter und der Leitfähigkeit der Flüssigkeit ab und darf 7 m/s nicht überschreiten.

Hinweis: Beim Befüllen von quader- oder kugelförmigen Behältern von etwa 5 m^3 Rauminhalt – das entspricht in etwa der Größe und Form eines Teilraums bei Straßentankwagen – kann es auf Grund ihrer Geometrie am ehesten zu gefährlichen Aufladungen kommen.

(2) Bei der Befüllung mit einer zwei- oder mehrphasigen Flüssigkeit ist die Strömungsgeschwindigkeit auf 1 m/s zu begrenzen. Gleiches gilt auch, wenn abgesetztes Bodenwasser im Behälter aufgewirbelt werden kann.

Hinweis: Die Strömungsgeschwindigkeit soll aber auch 1 m/s nicht wesentlich unterschreiten, da sich andernfalls Wasser an tiefen Punkten in der Rohrleitung absetzen kann.



Beispiel 2: Befüllen mittelgroßer Behälter

(3) Für die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit einphasiger Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit, z. B. gesättigte Kohlenwasserstoffe ohne freies Wasser, gilt:

$v \cdot d / N = 0{,}38\ m^2/s$ für Bodenbefüllung ohne zentralen Leiter

$v \cdot d / N = 0{,}50\ m^2/s$ für Boden- oder Kopfbefüllung mit zentralem Leiter

mit v = mittlere, lineare Strömungsgeschwindigkeit im Füllrohr in m/s

d = Füllrohrdurchmesser in m, bei mehreren Füllleitungen zwischen Tankkammern der kleinste Rohrdurchmesser im zu befüllenden Tank bzw. der Tankkammer in m

Hinweis: An die Stelle des kleinsten Rohrdurchmessers tritt der nächst größere, wenn die Länge des kleinsten Rohres kürzer als 10 m ist und sein Durchmesser mindestens 2/3 des nächst größeren Durchmessers beträgt.

N = Geometriefaktor des Tanks

$N = 1$ für $L < 2{,}0$ m wobei L Tankkammerlänge in m

$N = 0{,}7\sqrt{L}$ für $2{,}0\ m \leq L \leq 4{,}5$ m

$N = 1{,}5$ für $4{,}5\ m < L$

Hinweis: Bei der Kopfbefüllung wirkt das Füllrohr als zentraler Leiter und reduziert das maximale elektrische Potenzial im Tank. Zentraler Leiter ist ein in der Mitte des Behälters befindlicher geerdeter leitfähiger Gegenstand, z. B. ein Füllrohr oder ein Stahlseil.

(4) Bei der Bestimmung der Länge einer Tankkammer sind Schwallbleche nicht zu berücksichtigen.

(5) Liegt z. B. bei der Bodenbefüllung der Kammer eines Straßentankwagens kein zentraler Leiter vor, ist die Strömungsgeschwindigkeit nach der ersten Formel in Absatz 3 zu bestimmen, die um 25 % niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten ergibt.

(6) Da für mittlere Leitfähigkeiten von 50 pS/m bis 10 000 pS/m nur geringe Erfahrungswerte vorliegen, ist es zweckmäßig, die Werte der Tabelle 4 in Nummer 4.4.2 auch für diese Flüssigkeiten anzuwenden.

4.4.2 Straßentankwagen

Für Straßentankwagen gelten über die Anforderungen an mittelgroße Behälter hinaus folgende Maßnahmen:

1. Der Widerstand zwischen Fahrwerk, Tank und zugehörigen Ausrüstungen auf dem Tankwagen muss $10^6\ \Omega$ unterschreiten.
2. Vor jeder Tätigkeit, z. B. dem Öffnen der Deckel, dem Anschließen der Rohre oder Schläuche, ist der Tankwagen mit einem Erdungskabel zu erden, so dass der Widerstand zwischen dem Tank und dem Boden oder gegebenenfalls einer Ladungsbrücke $10^6\ \Omega$ unterschreitet. Es darf nicht vor Abschluss aller Tätigkeiten entfernt werden.
3. Verriegelungen, die eine Be- oder Entladung bei nicht angeschlossenem oder nicht wirksamem Erdungskabel verhindern, sind zweckmäßig.

4. Ist die Versiegelung des Untergrundes einer Füllstelle unumgänglich und wird die Füllstelle nur selten benutzt, kann ein isolierender Boden toleriert werden, wenn durch zusätzliche Maßnahmen sichergestellt ist, dass Personen in der Umgebung des Tankwagens geerdet sind oder nicht gefährlich aufgeladen werden.
5. Werden ein oder mehrere Straßentankwagen mit unterschiedlich großen Tankkammern am gleichen Beladungsort befüllt, darf nur mit der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit für die kleinste Tankkammer (L < 2 m, d. h. N = 1) befüllt werden, um Fehler durch Verwechslung der Tankkammern zu vermeiden.
6. Beim Umgang mit Flüssigkeiten, die eine niedrige Leitfähigkeit aufweisen, gilt für die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit v:

   $v \cdot d / N = 0{,}38\ m^2/s$ für Bodenbefüllung ohne zentralen Leiter

   $v \cdot d / N = 0{,}50\ m^2/s$ für Boden- oder Kopfbefüllung mit zentralem Leiter

   Zu v, d und N siehe auch Nummer 4.4.1 (3).

   Hinweis: Zahlenbeispiele sind in Tabelle 4 aufgeführt.
7. Bei Kopfbefüllung ist das Tauchrohr bis auf den Grund des Tanks herabzusenken, bevor mit der Befüllung begonnen wird.
8. Straßentankwagen sollen unter freiem Himmel während eines Gewitters nicht ohne Blitzschutz mit brennbaren Flüssigkeiten befüllt werden.
9. Da für mittlere Leitfähigkeiten von 50 pS/m bis 10 000 pS/m nur geringe Erfahrungswerte vorliegen, ist es zweckmäßig, die Werte der Tabelle 4 auch für diese Flüssigkeiten anzuwenden.
10. Wird bei Wechselbeladung („switch loading“) mit schwefelarmen Kraftstoffen befüllt, sind verringerte ($v \cdot d$)-Werte gemäß Tabelle 5 anzuwenden.

Tabelle 4: Höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeiten v für das Befüllen von Straßentankwagen mit Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit (mit N = 1)

Straßentankwagen (N = 1)				
Füllrohrdurchmesser d (m)	Boden- oder Kopfbefüllung mit zentralem Leiter $v \cdot d / N = 0{,}50\ m^2/s$		Bodenbefüllung ohne zentralen Leiter $v \cdot d / N = 0{,}38\ m^2/s$	
	Strömungsgeschwindigkeit v (m/s)	Volumenstrom (m^3/min)	Strömungsgeschwindigkeit v (m/s)	Volumenstrom (m^3/min)
0,05	7,0*	0,83	7,0*	0,83
0,08	6,3	1,90	4,7	1,40
0,10	5,0	2,40	3,8	1,80
0,15	3,3	3,50	2,5	2,70
0,20	2,5	4,70	1,9	3,50
* Der errechnete Wert wird nach Nummer 4.4.1 auf 7,0 m/s begrenzt.				

Tabelle 5: Höchstzulässige Werte für $v \cdot d$ von Kraftstoffen in Abhängigkeit von Schwefelgehalt und Leitfähigkeit (mit $N = 1$)

Schwefelgehalt (ppm)	Leitfähigkeit κ (pS/m)		
	$10 \geq \kappa$ oder unbekannt	$50 \geq \kappa > 10$	$\kappa > 50$
> 50	$v \cdot d \leq 0{,}38$	$v \cdot d \leq 0{,}5$	$v \cdot d \leq 0{,}5$
≤ 50	$v \cdot d \leq 0{,}25$	$v \cdot d \leq 0{,}38$	$v \cdot d \leq 0{,}5$

4.4.3 Eisenbahnkesselwagen

Für Eisenbahnkesselwagen gelten über die Anforderungen an mittelgroße Behälter hinaus folgende Maßnahmen:

1. Die Widerstände zwischen den beiden Schienen des Gleiskörpers untereinander sowie zwischen dem Gleiskörper und der Ladungsbrücke müssen $10^6\ \Omega$ unterschreiten.
2. Entsprechendes gilt für den Widerstand zwischen den Rädern, dem Tank und dem übrigen Kesselwagen. Unter diesen Voraussetzungen ist eine Erdung des Kesselwagens selbst nicht erforderlich, da diese durch die Schienen erfolgt.
3. Wird, um Streuströme zu verhindern, ein Isolierflansch in die Füllleitung eingebaut, ist vor Füllbeginn das Füllventil mit dem Schienenfahrzeug elektrisch leitend zu verbinden. Die Einrichtung, die für das Füllen des Kesselwagens verwendet wird, muss vom übrigen Gleiskörper isoliert sein, um Streuströme zu vermeiden. Die Isolierung durch den Isolierflansch darf bei diesem Verfahren nicht durch Gegenstände oder Eisenbahnwagen kurzgeschlossen werden.
4. Werden Flüssigkeiten mit niedriger Leitfähigkeit verladen, gilt unabhängig von der Länge der Tankkammer ($N = 1{,}5$) für die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit v:

   $v \cdot d / N = 0{,}35\ m^2/s$ für Wechselbeladung schwefelarmer Kraftstoffe niedriger Leitfähigkeit

   $v \cdot d / N = 0{,}38\ m^2/s$ für Bodenbefüllung ohne zentralen Leiter

   $v \cdot d / N = 0{,}50\ m^2/s$ für Boden- oder Kopfbefüllung mit zentralem Leiter

   Zu v, d und N siehe auch Nummer 4.4.1 (3).

   Hinweis: Zahlenbeispiele sind in Tabelle 6 aufgeführt.
5. Bei Kopfbefüllung ist das Tauchrohr bis auf den Grund des Tanks herabzusenken, bevor mit der Befüllung begonnen wird.
6. Eisenbahnkesselwagen sollen unter freiem Himmel während eines Gewitters nicht ohne Blitzschutz mit brennbaren Flüssigkeiten befüllt werden.

Tabelle 6: Höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeiten *v* für das Befüllen von Eisenbahnkesselwagen mit Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit (mit *N* = 1,5)

Eisenbahnkesselwagen (*N* = 1,5)				
Füllrohrdurchmesser *d* (m)	Boden- oder Kopfbefüllung mit zentralem Leiter $v \cdot d / N = 0{,}50\ m^2/s$		Bodenbefüllung ohne zentralen Leiter $v \cdot d / N = 0{,}38\ m^2/s$	
	Strömungsgeschwindigkeit *v* (m/s)	Volumenstrom (m^3/min)	Strömungsgeschwindigkeit *v* (m/s)	Volumenstrom (m^3/min)
0,10	7,0*	3,3	5,6	2,6
0,15	5,0	5,3	3,7	4,0
0,20	3,8	7,1	2,8	5,3
0,25	3,0	8,8	2,2	6,6
0,30	2,5	10,6	1,9	7,9
* Der errechnete Wert wird nach Nummer 4.4.1 auf 7,0 m/s begrenzt.				

7. Da für mittlere Leitfähigkeiten von 50 pS/m bis 10 000 pS/m nur geringe Erfahrungswerte vorliegen, ist es zweckmäßig, die Werte der Tabelle 6 auch für diese Flüssigkeiten anzuwenden.
8. Wird bei Wechselbeladung („switch loading“) mit schwefelarmen Kraftstoffen befüllt, sind verringerte ($v \cdot d$)-Werte gemäß Tabelle 5 anzuwenden.
9. Ist die Versiegelung des Untergrundes einer Füllstelle unumgänglich, und wird die Füllstelle nur selten benutzt, kann ein isolierender Boden toleriert werden, wenn durch zusätzliche Maßnahmen sichergestellt ist, dass Personen in der Umgebung des Eisenbahnkesselwagens geerdet sind oder nicht gefährlich aufgeladen werden.

4.4.4 Ableitfähige Behälter

(1) Mittelgroße Behälter aus ausschließlich ableitfähigem Material werden wie Metallbehälter behandelt.

(2) Mittelgroße Behälter aus ableitfähigem Kunststoff oder mit ableitfähigen Kunststoffbeschichtungen sind mit der Aufschrift „elektrostatisch ableitfähig“ zu versehen.

(3) Ortsfeste Behälter müssen Erdkontakt besitzen und ortsbewegliche mit Erdungseinrichtungen ausgerüstet sein.

4.4.5 Leitfähige oder ableitfähige Behälter mit isolierender Innenbeschichtung

(1) An Innenbeschichtungen können gefährliche Aufladungen auftreten, z. B. durch Reibung, Reinigung oder Kontakt mit aufgeladener Flüssigkeit.

(2) Diese Gefahr besteht für Flüssigkeiten der Explosionsgruppen IIA und IIB nicht bei isolierenden Beschichtungen von weniger als 2 mm Dicke, z. B. Farbschichten oder Epoxidbeschichtungen, Auskleidungen oder entsprechenden Leckschutzsystemen. Hierbei darf der Behälter nur zum Befüllen, Entleeren, Transportieren und Lagern verwendet und nicht wiederholt schnell befüllt werden.

Hinweis: Stark ladungserzeugende Prozesse, z. B. wiederholtes schnelles Befüllen, können auf der beschichteten Innenseite hohe Ladungsdichten erzeugen, die zu zündwirksamen Gleitstielbüschelentladungen führen. In diesen Fällen muss die Durchschlagspannung der Beschichtung $U_D \leq 4$ kV sein.

(3) Für Flüssigkeiten der Explosionsgruppe IIC darf die Dicke der Beschichtung 0,2 mm nicht überschreiten.

(4) Für innenbeschichtete Behälter gilt ferner:

1. Die Beschichtung muss fest mit der Behälterwand verbunden sein; ein Ablösen oder Abblättern der Beschichtung darf nicht auftreten.
2. Es muss eine elektrisch leitende Verbindung zwischen Flüssigkeit und Erde vorhanden sein.

   Hinweis: Diese kann z. B. durch ein geerdetes leitfähiges Steigrohr am Tankboden oder Fußventil bzw. eine geerdete Metallplatte am Tankboden realisiert werden.
3. Personen sind beim Betreten eines Behälters zu erden.

4.4.6 Leitfähige oder ableitfähige Behälter mit isolierender Außenbeschichtung

(1) Der Behälter einschließlich aller Bauteile ist zu erden bzw. mit Erde zu verbinden. Personen in der direkten Umgebung des Behälters dürfen nicht aufgeladen werden.

Hinweis: Es besteht leicht die Gefahr, dass die äußere Beschichtung eines Behälters aufgeladen wird und dass außen angebrachte Gegenstände isoliert sind.

(2) Bei Beschichtungsdicken $D \leq 2$ mm sind keine gefährlichen Aufladungen zu erwarten, solange nicht durch äußere Prozesse starke elektrostatische Aufladungen erzeugt werden, z. B. durch Sprühaufladung.

4.4.7 Isolierende Behälter

Isolierende Behälter dürfen in explosionsgefährdeten Bereichen nicht eingesetzt werden, es sei denn, sie können nachweislich nicht gefährlich aufgeladen werden.

Hinweis: Sie können z. B. von außen nicht gefährlich aufgeladen werden, wenn sie in der Erde vergraben sind. Durch Vergraben wird ein isolierender Behälter einem leitfähigen Tank mit isolierender Innenbeschichtung vergleichbar und kann für brennbare Flüssigkeiten gemäß Nummer 4.4.5 eingesetzt werden.

4.5 Kleine Behälter

(1) Kleine Behälter im Sinne dieser TRGS sind Behälter mit einem Volumen $V \leq 1\ m^3$. Sie sind in der Regel aus Metall oder beschichtetem Metall, aus Kunststoffen oder umwehrten und ummantelten Kunststoffen oder aus Glas hergestellt.

Hinweis: Beispiele für diese Behälter sind Container, Fässer, Kanister, Flaschen. Glasbehälter siehe auch Nummer 4.13.

(2) Gefährliche Aufladungen können durch Reibung, durch Flüssigkeitsströmung oder durch nicht geerdete Personen entstehen. In diesen Fällen muss mit gefährlichen Entladungen an isolierten Metallkomponenten, z. B. Griffen, Verschlüssen, Fasspumpen, sowie an festen oder flüssigen Oberflächen gerechnet werden.

4.5.1 Leitfähige oder ableitfähige Behälter

(1) Während des Befüllens und Entleerens des Behälters müssen alle leitfähigen oder ableitfähigen Teile des Systems elektrisch leitend verbunden und geerdet sein.

Hinweis: Ein Metalltrichter darf nicht, z. B. durch eine Kunststoffmuffe, vom Behälter isoliert sein.

(2) Isolierende Teile, z. B. Kunststofftrichter, dürfen nicht eingesetzt werden. Ausnahmen siehe auch Nummern 4.5.5 und 4.8.

(3) Beim Befüllen des Behälters mit Flüssigkeiten der Explosionsgruppen IIC und IIB mit *MZE* < 0,2 mJ oder mit mehrphasigen Flüssigkeiten, deren kontinuierliche Phase eine niedrige Leitfähigkeit aufweist, darf die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s nicht überschritten werden.

4.5.2 Leitfähige oder ableitfähige Behälter mit isolierender Innenbeschichtung

(1) Zur Vermeidung von Büschelentladungen dürfen Beschichtungsdicken 2 mm nicht überschreiten. Werden beschichtete Behälter für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIC verwendet, dürfen nur Beschichtungsdicken $D \leq 0{,}2$ mm verwendet werden.

Hinweis: An Innenbeschichtungen können gefährliche Aufladungen, z. B. durch Reibung, Reinigung oder Kontakt mit aufgeladener Flüssigkeit, auftreten.

(2) Stark ladungserzeugende Prozesse, z. B. wiederholtes schnelles Befüllen, sind zu vermeiden, es sei denn, die Innenbeschichtung besitzt eine Durchschlagspannung $U_D \leq 4$ kV.

Hinweis: Andernfalls können auf der beschichteten Innenseite hohe Ladungsdichten auftreten, die zu zündwirksamen Gleitstielbüschelentladungen führen.

(3) Die Beschichtung muss fest mit der Behälterwand verbunden sein; Ablösen oder Abblättern der Beschichtung darf nicht auftreten.

(4) Sowohl bei Flüssigkeiten hoher als auch mittlerer Leitfähigkeit muss während des Befüllens oder Entleerens eine leitfähige Verbindung zwischen Flüssigkeit und Erde vorhanden sein. Dies ist über Unterspiegelbefüllung zu erreichen oder durch ein bis zum Boden geführtes Tauchrohr.

4.5.3 Leitfähige oder ableitfähige Behälter mit isolierender Außenbeschichtung

Gegen die durch die Beschichtung zusätzlich auftretenden Gefahren sind die Maßnahmen für mittelgroße Behälter nach Nummer 4.4.6 zu treffen.

4.5.4 Isolierende Behälter mit leitfähiger Umhüllung (RIBC)

(1) Isolierende Behälter mit leitfähiger Umhüllung dürfen für brennbare Flüssigkeiten der Explosionsgruppe IIC und IIB mit *MZE* < 0,2 mJ nicht verwendet werden.

Hinweis: Ein Beispiel isolierender Behälter mit leitfähiger Umhüllung ist der gitterummantelte oder außen leitfähig beschichtete, quaderförmige Kunststoffbehälter auf Palette, der so genannte „Rigid Intermediate Bulk Container“ (RIBC).

(2) Für alle anderen als die in (1) genannten brennbaren Flüssigkeiten muss nachgewiesen sein, dass weder die Außen- und Innenflächen des Behälters noch die Flüssigkeit im Behälter gefährlich aufgeladen werden können.

(3) Die Arbeitsschritte Befüllen, Transportieren, Lagern, Bereithalten vor Ort und Entleeren eines derartigen Behälters, z. B. RIBC, gelten als sicher, wenn die nachfolgenden neun Mindestanforderungen erfüllt werden:

1. Die Behälterblase besitzt eine Wandstärke $s \leq 2$ mm. Ausnahmen sind nur an Ecken und Kanten zu tolerieren.
2. Der Behälter ist bis auf kleine Flächen allseitig mit einer leitfähigen Umhüllung versehen. Im Falle eines Gitters
   a) müssen die vom Gitter gebildeten Teilflächen $A \leq 100$ cm^2 sein,
   b) muss das Gitter an allen sechs Behälterseiten eng anliegen und die Kunststoffblase berühren und es darf nur an wenigen konstruktionsbedingten Stellen ein Abstand von höchstens 2 cm zwischen Kunststoffbehälter und Umhüllung auftreten,

      Hinweis: Konstruktionsbedingte Stellen sind z. B. Stutzen und Armaturenanschlüsse.
   c) kann ein größerer Abstand nur an Ecken und Kanten toleriert werden.

      Hinweis: Ecken und Kanten der Behälterblase sind meist abgerundet, um Stoß- und Fallprüfung zu bestehen.
3. Kleine Flächen, z. B. Schraubdeckel, die nicht durch die Umhüllung geschützt sind, müssen die Anforderungen nach Nummer 3.2 erfüllen.
4. Zwischen der Flüssigkeit im Behälter und der Behälterumhüllung muss eine dauerhaft leitfähige Verbindung bestehen.
5. Alle leitfähigen Teile des Behälters müssen untereinander dauerhaft leitfähig verbunden sein.
6. Die Umhüllung des Behälters muss beim Befüllen und Entleeren geerdet werden. Siehe auch Nummer 8.3.3.

   Hinweis: Der elektrische Widerstand zwischen Behälterumhüllung und anderen leitfähigen Teilen des Behälters sowie der Kontaktfläche zum Fußboden darf $10^6\ \Omega$ nicht überschreiten.
7. Die Befüllung eines Behälters darf nicht in gefährlich aufgeladenem Zustand erfolgen. Neubefüllung oder Nachfüllen von mehr als der Hälfte des Nennvolumens in kürzerem Zeitabstand als 1 h ist zu vermeiden.

   Hinweis: Herstellungs- oder reinigungsbedingte gefährliche Aufladungen des Kunststoffbehälters sind erfahrungsgemäß nach ca. 24 h Wartezeit abgeklungen.
8. Die Entleerung, insbesondere die Obenentleerung, ist so durchzuführen, dass sich die Behälterblase nicht von der Umhüllung ablöst.
9. Das Befüllen mit warmen Flüssigkeiten ist so durchzuführen, dass sich die Behälterblase durch Kontraktion während der Abkühlung nicht von der Umhüllung ablöst.

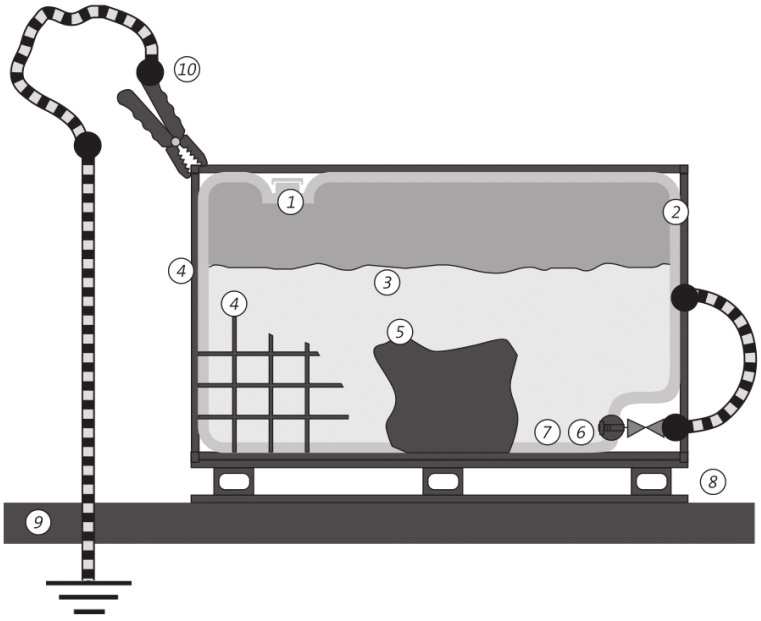
(4) Für andere als die vorstehend genannten Arbeitsschritte reichen die Mindestanforderungen des Absatzes 3 Nr. 1 bis 9 nicht aus; für sie ist die Verwendung isolierender Behälter mit leitfähiger Umhüllung ohne zusätzliche Maßnahmen ausgeschlossen.

Hinweis: Zu den ausgeschlossenen Arbeitsschritten gehören z. B. Rühren, Mischen, Reinigen sowie die Verwendung des Behälters als Reaktionsgefäß, Absetz- oder Sammelbehälter.

(5) Behälter, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, müssen wiederkehrend geprüft werden. Im Rahmen dieser Wiederholungsprüfung muss überprüft werden, ob die oben genannten elektrostatischen Anforderungen des gebrauchten RIBC erfüllt sind. Hierzu muss insbesondere geprüft werden, ob alle Metallteile und die Kontaktstelle mit der Flüssigkeit und die Kontaktstellen mit dem Fußboden untereinander elektrisch leitend verbunden sind (Sicht- oder messtechnische Prüfung). Handelt es sich um RIBC, deren Kunststoffblase ableitfähig ausgeführt ist, muss ein messtechnischer Nachweis erfolgen, dass die Ableitfähigkeit auch am gebrauchten RIBC sichergestellt ist.

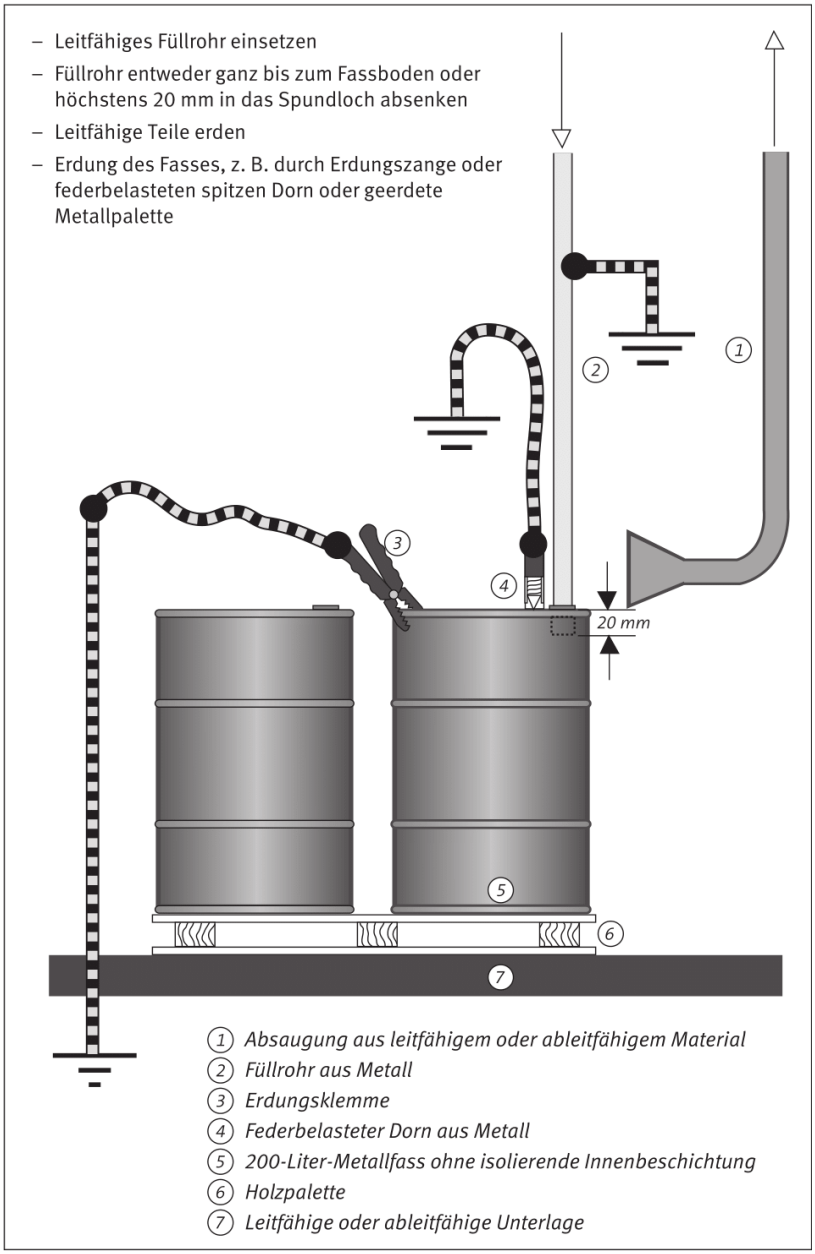
Hinweis: RIBC, die für den Gefahrguttransport zugelassen sind, müssen alle 30 Monate einer Wiederholungsprüfung (WHP) unterzogen werden.

(6) Rekonditionierte Behälter, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, müssen vor der Wiederbenutzung geprüft werden. Der Umfang entspricht der Prüfung gemäß (5).



(1) *Deckel leitfähig und geerdet oder ableitfähig und mit Erde verbunden oder isolierend aber nicht gefährlich aufgeladen*
(2) *Flüssigkeitsbehälter isolierend*
(3) *Nichtbrennbare oder brennbare Flüssigkeit, ausgenommen Flüssigkeiten der Gruppe IIC und IIB mit MZE < 0,2 mJ*
(4) *Leitfähiges Gitter, geerdet, allseitig am Flüssigkeitsbehälter anliegend, Gitterform so, dass die umschlossenen Teilflächen A ≤ 100 cm² oder*
(5) *Leitfähige oder ableitfähige vollflächige Beschichtung mit Erdkontakt*
(6) *Auslaufarmatur leitfähig und geerdet*
(7) *Flüssigkeit in Kontakt mit Erde, hier z. B. über die Auslaufarmatur*
(8) *Metallpalette*
(9) *Leitfähiger oder ableitfähiger Boden*
(10) *Erdungsklemme*

Beispiel 3: Befüllen und Entleeren von Rigid Intermediate Bulk Containern (RIBC) in Zone 1



Beispiel 4: Befüllen von Fässern in Zone 1

4.5.5 Isolierende Behälter

(1) Bei isolierenden Behältern ist die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Aufladungen höher einzuschätzen als bei anderen Behältern, da leitfähige oder ableitfähige Behälterwände nicht zur Verfügung stehen.

Hinweis: Insbesondere können Gefährdungen ausgehen von

– isolierten leitfähigen oder ableitfähigen Gegenständen oder Medien, z. B. Metalltrichter, Werkzeuge, Abdeckungen und Ansammlungen von Flüssigkeiten,
– hohen Ladungsdichten auf Oberflächen im Innern, mit der Folge hoher Potenziale innerhalb und hoher elektrischer Feldstärken außerhalb des Behälters,
– Reibung oder Strömung an den Wänden,
– verminderter Ladungsrelaxation aufgeladener Flüssigkeit.

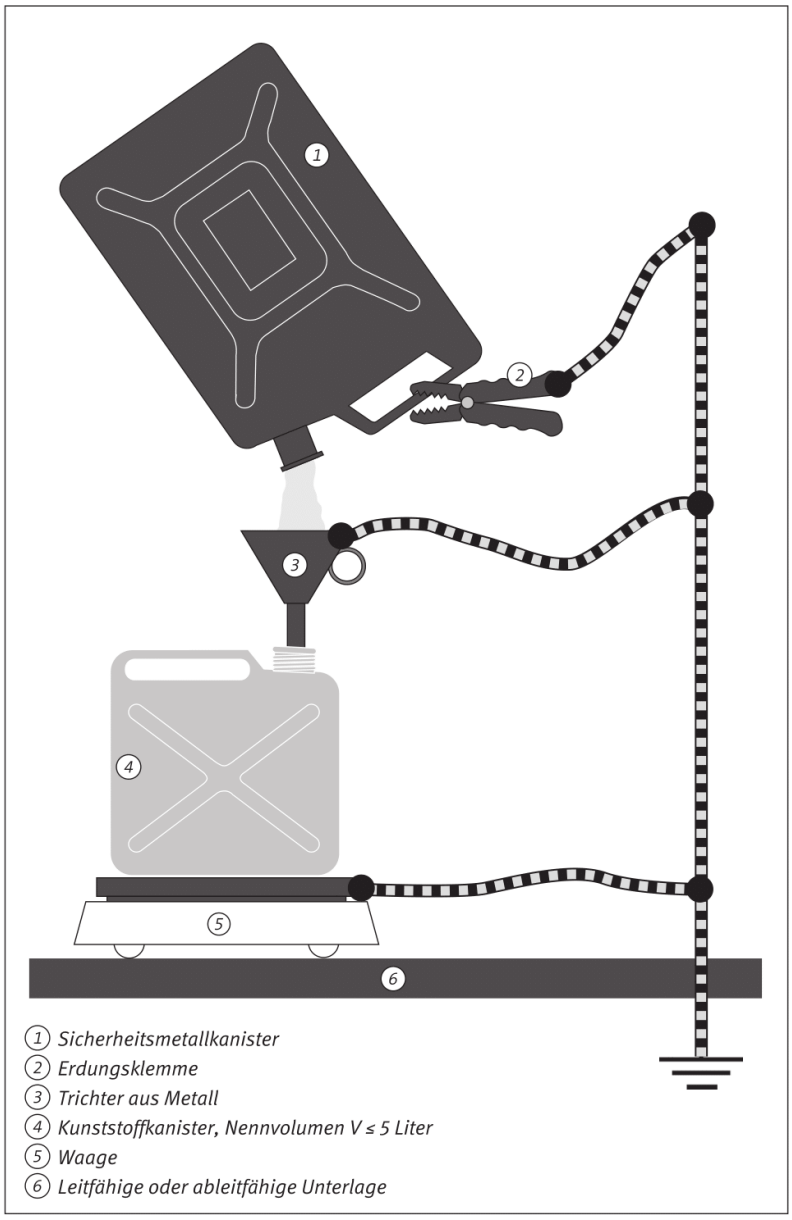
(2) In Zone 2 sind für den Umgang mit isolierenden Behältern folgende Maßnahmen zu treffen:

1. Flüssigkeiten hoher oder mittlerer Leitfähigkeit sind mit Erde zu verbinden, z. B. durch ein geerdetes leitfähiges Einfüllrohr bei Unterspiegelabfüllung.
2. Die Strömungsgeschwindigkeit darf bei mehrphasigen Flüssigkeiten 1 m/s nicht übersteigen.

(3) In Zone 1 beträgt die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit 1 m/s. Das höchstzulässige Volumen beträgt 5 l.

Hinweis: Bei bestimmungsgemäßer Verwendung sind gefährliche Aufladungen durch Ein- und Ausströmen von Flüssigkeiten nicht zu erwarten, z. B. bei Kanistern für Otto-Kraftstoffe.

(4) In Zone 0 dürfen unabhängig von den Eigenschaften der Flüssigkeit isolierende Behälter nicht eingesetzt werden. Hiervon sind Behälter zur Probenahme nach Nummer 4.8 ausgenommen.



Beispiel 5: Befüllen kleiner Kunststoffkanister in Zone 1

4.6 Hochviskose Flüssigkeiten

(1) Hochviskose Flüssigkeiten, z. B. Schmieröle, laden sich häufig schneller auf als niedrigviskose, z. B. Treibstoffe oder Lösemittel. Die schnelle Aufladung wird oft beim Strömen durch Rohrleitungen und Filter festgestellt.

(2) Da sichere Strömungsgrenzen für hochviskose Flüssigkeiten nicht bekannt sind, werden andere Maßnahmen des Explosionsschutzes, z. B. Inertisierung, zweckmäßig.

(3) Vor Produktwechsel von einer brennbaren Flüssigkeit geringer Dichte zu einer hochviskosen Flüssigkeit höherer Dichte ist der Behälter zu reinigen.

4.7 Siebeinsätze, Filter und Wasserabscheider

(1) Beim Durchströmen von Drahtnetzen oder Siebeinsätzen werden Flüssigkeiten nur geringfügig mehr aufgeladen als beim Durchströmen von Rohren. Mikrofilter und Wasserabscheider mit einer Poren-Nennweite von weniger als 10 µm erzeugen dagegen sehr hohe Ladungsdichten.

Hinweis: Typische Werte sind 10 µC/m^3 im Rohrstrom, etwa 100 µC/m^3 hinter verschmutzten Drahtnetzen und Siebeinsätzen sowie 5 000 µC/m^3 oder mehr hinter einem Mikrofilter.

(2) Drahtnetze und Siebeinsätze sind bei Verschmutzung zu reinigen oder auszutauschen.

Hinweis: Hierdurch wird vermieden, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Siebeinsatz und die damit verbundene Aufladung weiter erhöht werden. Die Verschmutzung des Siebeinsatzes lässt sich über den Druckabfall erkennen.

(3) Beim Ausbau und bei der Reinigung isolierender Filter ist damit zu rechnen, dass diese gefährlich aufgeladen sein können.

(4) Hinter Mikrofiltern oder Wasserabscheidern ist eine ausreichende Verweilzeit einzuhalten. Zu diesem Zweck können leitfähige Rohrleitungen hinter dem Filter oder ein zusätzlicher leitfähiger Relaxationsbehälter eingesetzt werden.

Hinweis: Die erforderliche Verweilzeit t in s kann mit der Zahlenwertgleichung

$t = 100/\kappa$

mit κ = Leitfähigkeit in pS/m

errechnet werden. Damit wird die aufgeladene Flüssigkeit auf ein sicheres Niveau entladen, bevor sie in einen Behälter eintritt.

(5) Neben der Erdung und der elektrisch leitenden Verbindung aller Teile sind folgende Bedingungen zu beachten:

1. Es ist sicherzustellen, dass das Filtergehäuse und der gegebenenfalls verwendete Relaxationsbehälter während des normalen Betriebs mit Flüssigkeit gefüllt sind, um eine explosionsfähige bzw. brennbare Atmosphäre zu verhindern.
2. Ist die Leitfähigkeit der ruhenden Flüssigkeit bekannt, beträgt die Verweilzeit mindestens das Dreifache ihrer Relaxationszeit.

   Hinweis: Relaxationszeit siehe auch Anhang F.
3. Ist die Leitfähigkeit nicht bekannt, beträgt die Verweilzeit hinter groben Filtern oder Siebeinsätzen mindestens 30 s und hinter Feinfiltern, Mikrofiltern oder Wasserabscheidern mindestens 100 s. Bei hochviskosen Flüssigkeiten müssen längere Verweilzeiten eingehalten werden.
4. Verschmutzte Filter sind wie Mikrofilter zu betrachten.
5. Kann die Verweilzeit nicht eingehalten werden, ist eine explosionsfähige Atmosphäre im aufnehmenden Behälter, z. B. durch Inertisierung, zu vermeiden.

4.8 Maßnahmen beim Messen und Probenehmen

(1) Alle beim Messen und Probenehmen verwendeten leitfähigen oder ableitfähigen Teile oder Geräte, müssen geerdet bzw. mit Erde verbunden sein.

Hinweis: Zu den Geräten zählen z. B. Seile, Tauchstangen oder Becher.

(2) Die Verbindungen müssen durchgehend aus leitfähigem Material bestehen und dürfen nicht unterbrochen sein. Metallketten sind nicht einzusetzen.

(3) Bei Flüssigkeiten niedriger und mittlerer Leitfähigkeit sind Probenahmegefäße aus isolierendem Material mit einem Volumen $V \leq 1$ Liter bevorzugt gegenüber leitfähigen Gefäßen gleichen Volumens einzusetzen. Die Probenahmegefäße dürfen vorher nicht gefährlich aufgeladen sein.

(4) In Behältern mit explosionsfähiger Atmosphäre dürfen keine Messungen und Probenahmen durch Einbringen von Sonden in den Gasraum erfolgen, solange ladungserzeugende Prozesse stattfinden.

Hinweis: Zu solchen Prozessen zählen unter anderem das Pumpen von Flüssigkeiten mit geringer Leitfähigkeit in einen anderen Tank sowie viele Reinigungsprozesse.

(5) Nach dem Ende eines ladungserzeugenden Prozesses darf mit Messen und Probenehmen erst begonnen werden, wenn die Abwesenheit gefährlicher Aufladungen sichergestellt ist. Dies kann durch eine ausreichend lange Wartezeit erreicht werden.

(6) Die Wartezeit nach einem Arbeitsprozess mit mehrphasigen Flüssigkeiten soll bei niedriger Leitfähigkeit der kontinuierlichen Phase mindestens 30 Minuten betragen.

Hinweis: Dies tritt z. B. auf, wenn Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit mit geringen Mengen aufgerührten Wassers oder ungelösten Feststoffpartikeln in einen Behälter gepumpt wurden oder nach dem Rühren einer Suspension in einem Dissolver.

(7) Nach einem Mischvorgang mit Flüssigkeiten geringer Leitfähigkeit ist abzuwarten, bis sich alle Bestandteile der Mischung abgesetzt haben.

(8) Nach einem Reinigungsvorgang muss so lange gewartet werden, bis sich ein gegebenenfalls erzeugter aufgeladener Sprühnebel abgesetzt hat.

Hinweis: Das Absetzen kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

(9) Wartezeiten können verkürzt werden, wenn durch ortsfeste Messgeräte, z. B. Feldstärkenmessgeräte, die Abwesenheit gefährlicher Aufladungen nachgewiesen ist.

Hinweis: Bei Gewittern, Schneestürmen, Hagel oder anderen atmosphärisch bedingten Störungen soll Messen und Probenehmen unter freiem Himmel nicht stattfinden.

4.9 Rohre und Schläuche für Flüssigkeiten

(1) Rohrleitungen und Schläuche müssen aus leitfähigem Material gefertigt sein oder den unter den folgenden Nummern genannten Anforderungen entsprechen.

(2) Innerhalb eines Rohres oder Schlauches kann gefährliche explosionsfähige Atmosphäre vorliegen, insbesondere beim Leerlaufen. Außerhalb des Rohres ist zusätzlich auf gefährliche explosionsfähige Atmosphäre durch andere Gefahrstoffe, die zu Brand- und Explosionsgefahren führen können, zu achten.

Hinweis: Strömt eine Flüssigkeit durch ein Rohr, treten elektrische Ladungen entgegengesetzter Polarität an der inneren Rohrwand und der Flüssigkeit auf. Insbesondere der Oberflächenwiderstand des Rohres bzw. Schlauches, die Leitfähigkeit der Flüssigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit beeinflussen die entstehende Ladungsmenge. Darüber hinaus ist es möglich, dass Metallteile, die durch isolierende Rohre oder Schläuche isoliert sind, aufgeladen werden.

(3) Von der Eignung eines Schlauches für den Transport brennbarer Flüssigkeiten darf nicht auf seine Eignung für den sicheren Transport von Stäuben geschlossen werden.

Hinweis: Sollen Rohre oder Schläuche in explosionsgefährdeten Bereichen zur Aspiration oder zum pneumatischen Transport von Schüttgut eingesetzt werden, müssen sie den Anforderungen in Nummer 6.4 entsprechen.

(4) Die Außenfläche des Rohres kann sich zusätzlich aufladen, z. B. durch Reibung.

(5) Die Leitungen dürfen mit Luft oder anderen Gasen nur dann gereinigt werden, wenn unterhalb der höchstzulässigen Strömungsgeschwindigkeiten für Flüssigkeiten nach Nummer 4.3 bzw. 4.4 gearbeitet wird.

4.9.1 Rohre aus leitfähigem oder ableitfähigem Material

Rohrleitungen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material sind untereinander leitfähig zu verbinden und zu erden.

Hinweis: Ableitfähige Rohre können bei der Verwendung für Flüssigkeiten mit niedriger Leitfähigkeit sehr hoch aufgeladen werden.

4.9.2 Leitfähige Rohre mit isolierender oder ableitfähiger Auskleidung

(1) In der Regel sind Auskleidungen mit einem spezifischen Widerstand $\rho < 10^8\ \Omega m$ zu verwenden.

(2) Auskleidungen mit einem spezifischen Widerstand zwischen $10^8\ \Omega m$ und $10^{11}\ \Omega m$ können sicher unter folgenden, experimentell abgesicherten Bedingungen eingesetzt werden:

1. Ladungsdichte der Flüssigkeit $\rho \leq 10^{-3}\ C/m^3$,
2. Rohrdurchmesser $d \leq 100$ mm,
3. Dicke der Auskleidung $D \leq 5$ mm und
4. Strömungsgeschwindigkeit $v \leq 2$ m/s.

(3) Bei Auskleidungen mit einem spezifischen Widerstand $\rho > 10^{11}\ \Omega m$ muss die Dicke der Auskleidung zur Vermeidung von Büschelentladungen $D \leq 2$ mm sein.

Hinweis: Wird ein leitfähiges Rohr mit einer isolierenden Auskleidung verwendet, um eine Flüssigkeit geringer oder mittlerer Leitfähigkeit zu transportieren, treten elektrische Ladungen an der Innenfläche der Auskleidung auf. Gefährliche Entladungen treten bei dicken Auskleidungen, z. B. Kunststoffbuchsen, eher auf, als bei dünnen, z. B. Epoxidbeschichtungen.

(4) Sollen dennoch Auskleidungen mit einem spezifischen Widerstand $\rho > 10^{11}\ \Omega m$ und einer Dicke der Auskleidung $D > 2$ mm verwendet werden, müssen neben der Erdung aller leitfähigen Teile der Rohrleitung zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Z. B. müssen die Rohre während des Betriebes vollständig mit Flüssigkeit gefüllt bleiben. Beim Befüllen oder Entleeren eines Rohres darf die Strömungsgeschwindigkeit nicht mehr als 1 m/s betragen. Wird die Flüssigkeit durch Mikrofilter geführt, können niedrigere Geschwindigkeiten erforderlich sein, die durch Bestimmen der Aufladung im Einzelfall festzulegen sind.

Hinweis: Entladungen können isolierende Auskleidungen durchschlagen und beschädigen, z. B. Korrosionsschäden verursachen. Ein spezifischer Widerstand $\rho < 10^8\ \Omega$m oder eine Durchschlagspannung $U_D > 100$ kV vermeiden diese Schäden.

(5) Bei Flüssigkeiten mittlerer oder hoher Leitfähigkeit ist zur Vermeidung von Ladungsansammlungen Erdkontakt der Flüssigkeit erforderlich.

4.9.3 Isolierende Rohre

(1) Das Strömen von Flüssigkeiten geringer Leitfähigkeit in isolierenden Rohren kann sehr hohe Ladungsdichten an den Oberflächen der Rohre erzeugen. Es sind daher zusätzliche Maßnahmen des Explosionsschutzes erforderlich, z. B. Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre.

(2) Verbleiben nach dem Verschweißen von Kunststoffrohren metallische Heizdrähte im Rohrinnern mit Kontakten nach außen, sind die verbleibenden Anschlüsse der Heizdrähte zu isolieren, z. B. mit gut sitzenden Plastikstopfen.

Hinweis: Spezielle Erdungsmaßnahmen sind an den Schweißstellen von Kunststoffrohren nicht notwendig, obwohl an diesen Stellen verfahrensbedingt isolierte elektrische Leiter vorhanden sein können.

(3) Außerdem soll die Durchschlagspannung $U_D > 100$ kV betragen, damit Perforationen des Rohres und dadurch Leckagen vermieden werden.

4.9.3.1 Oberirdisch verlegte isolierende Rohre

(1) In explosionsgefährdeten Bereichen dürfen keine isolierenden Rohre eingesetzt werden; siehe auch Nummer 3.2.1.

(2) Sollen dennoch Flüssigkeiten mit isolierenden Rohren transportiert werden, ist sicherzustellen, dass keine gefährlichen Aufladungen außerhalb des Rohres auftreten.

Hinweis: Starke elektrische Felder außerhalb des Rohres können zu zündwirksamen Büschel- und an nicht geerdeten Metallteilen zu Funkenentladungen führen.

(3) Besitzt die Flüssigkeit eine Leitfähigkeit $\kappa > 10\,000$ pS/m, können isolierende Rohre eingesetzt werden, wenn die Flüssigkeit an mindestens einer Stelle Erdkontakt über ein geerdetes leitfähiges Bauteil, z. B. ein Ventil oder einen Tank, besitzt. Diese Stelle soll sich nicht weiter als 10 m vor dem Rohrende befinden.

(4) Besitzt die Flüssigkeit eine Leitfähigkeit zwischen 50 und 10 000 pS/m, dürfen isolierende Rohre nur dann eingesetzt werden, wenn über eine Einzelfallbetrachtung nachgewiesen ist, dass eine gefährliche Aufladung nicht zu erwarten ist.

(5) Beim Einsatz isolierender Rohre muss zusätzlich sichergestellt werden, dass keine gefährliche Aufladung von außen, z. B. durch Dampfstrahlen oder Reiben, erfolgt. Alle leitfähigen Bauteile, z. B. Flansche oder Ventile, sind nach Nummer 8 zu erden. Entsprechendes gilt auch für leitfähige Einrichtungen, die sich in der Nähe oberirdisch verlegter isolierender Rohre befinden.

Hinweis: In der Nähe aufgeladener Rohre sind an durch Influenz aufgeladenen isolierten Metallteilen Funkenentladungen möglich.

4.9.3.2 Unterirdisch verlegte isolierende Rohre

(1) Eingegrabene isolierende Rohre stellen in der Regel dann keine Zündgefahr dar, wenn ihre gesamte Oberfläche Kontakt mit Erde besitzt, die Flüssigkeit eine Leitfähigkeit $\kappa > 50$ pS/m besitzt und an mindestens einer Stelle mit einem geerdeten leitfähigen Bauteil, z. B. Ventil, in Berührung steht.

(2) Beim Ausgraben eines Teils der Rohrleitung sind leitfähige oder ableitfähige Bauteile vor ihrem völligen Freilegen zu erden.

Hinweis 1: Das Erden eines bereits aufgeladenen Bauteils in einer potenziell explosionsfähigen Atmosphäre ist zu vermeiden.

Hinweis 2: Besteht die Gefahr einer explosionsfähigen Atmosphäre, sind zusätzlich alle leitfähigen Objekte in der näheren Umgebung, z. B. innerhalb der Baugrube, zu erden, da diese durch Influenz aufgeladen werden können.

4.9.4 Schläuche

(1) In der Praxis werden im Allgemeinen mit Armaturen konfektionierte Schläuche eingesetzt. Diese werden als Schlauchleitungen bezeichnet. Für die Beurteilung der Eignung sind jedoch die Eigenschaften des Schlauches maßgebend.

(2) Im Sinne dieser Technischen Regel gilt für die Förderung von Flüssigkeiten als

1. leitfähige Schlauchleitung, eine Schlauchleitung mit einem Widerstand von weniger als $10^3\ \Omega$/m,
2. ableitfähige Schlauchleitung, eine Schlauchleitung mit einem Widerstand von mehr als $10^3\ \Omega$/m und weniger als $10^6\ \Omega$/m,
3. isolierende Schlauchleitung eine Schlauchleitung mit einem Widerstand von mehr als $10^6\ \Omega$/m.

Hinweis 1: Der Widerstand wird zwischen den Armaturen der Schlauchleitung gemessen und auf die Schlauchlänge bezogen.

Hinweis 2: Nach internationalem Regelwerk werden die gleichen Grenzwerte als Widerstand zwischen den Endarmaturen verwendet, d. h. nicht auf einen Meter Schlauchlänge bezogen.

(3) In explosionsgefährdeten Bereichen sollen leitfähige oder ableitfähige Schlauchleitungen eingesetzt werden, da isolierende Schlauchleitungen für den Einsatz in explosionsfähiger Atmosphäre nicht geeignet sind.

Hinweis 1: Isolierende Schlauchleitungen bestehen aus isolierendem Schlauchmaterial und besitzen weder leitfähige Drähte noch Litzen. Sie leiten elektrische Ladungen nur ungenügend ab.
Leitfähige und ableitfähige Schlauchleitungen werden nach Bauformen unterschieden. Zu ihrer Eignung für den Einsatz in explosionsfähiger Atmosphäre siehe nachstehende Tabelle 7.

Tabelle 7: Eignung von Schlauchleitungstypen für den Einsatz zur Förderung von Flüssigkeiten in explosionsgefährdeten Bereichen

Typ	M	Ω	ΩCL oder ΩT	ΩM oder MT
Eignung	(+)	(+)*	+	+
Eignung bei Streuströmen	−	(+)	+	−

\+ geeignet
(+) nur geeignet, wenn weitere Anforderungen an die Beschaffenheit erfüllt sind
(+)* nicht geeignet, wenn isolierende Zwischenschichten im Schlauch vorhanden sind, die nicht leitfähig überbrückt sind
− nicht geeignet

Hinweis 2: Ein M-Schlauch besitzt elektrisch leitfähige Drahteinlagen, z. B. Metallwendeln, die so eingebracht sind, dass sie sich regelmäßig überkreuzen. Die Einlage ermöglicht eine Ableitung durch Anschluss an den Flansch oder an die Schlauchkupplung. Bei der Prüfung darf der Widerstand von M-Schlauchleitungen zwischen den Armaturen über die ganze Länge nicht mehr als 100 Ω betragen. Bei stark ladungserzeugenden Prozessen können gefährliche Aufladungen nicht ausgeschlossen werden.

Ein Ω-Schlauch besteht aus leitfähigem oder ableitfähigem Material. Er kann zusätzlich mit Metalleinlagen ausgerüstet sein. Bei der Prüfung darf der Widerstand von Ω-Schlauchleitungen zwischen den Armaturen über die ganze Länge nicht mehr als 10^6 Ω betragen.

Ein ΩCL- oder ΩT-Schlauch besteht zumindest auf der Innenseite und der Außenseite aus ableitfähigem Schlauchmaterial, evtl. vorhandene isolierende Zwischenschichten sind ableitfähig überbrückt. Sofern der Schlauch metallene Stützwendeln aufweist, sind diese bei der Schlauchleitung zumindest auf einer Seite nicht an die Armatur angeschlossen.

Eine ΩM- oder MT-Schlauchleitung ist aufgebaut wie eine ΩCL-Schlauchleitung, jedoch besitzt sie eine metallische Verbindung zwischen beiden Armaturen.

Hinweis 3: Sollen Schlauchleitungen in explosionsgefährdeten Bereichen zur Aspiration oder zum pneumatischen Transport von Schüttgut eingesetzt werden, sind für die Eignung nicht die Angaben dieser Tabelle heranzuziehen. Es müssen die Anforderungen gemäß Nummer 6.4 erfüllt sein.

(4) Für Zapfschläuche an Tankstellen gilt ein höchstzulässiger Widerstand von 10^6 Ω zwischen den Schlauchenden. Hier sind bevorzugt Ω-Schlauchleitungen einzusetzen.

(5) Leitfähige Schlauchleitungen erfordern regelmäßige elektrische Durchgangsprüfungen. Es muss außerdem darauf geachtet werden, dass alle inneren Metalleinlagen mit den Armaturen verbunden sind.

Hinweis: Auf Grund von gerissenen Verbindungsdrähten oder mangelhafter Konstruktion ist es möglich, dass leitfähige Komponenten des Schlauches, z. B. Schlauchkupplungen, Stützwendel oder Abschirmungen, elektrisch isoliert werden.

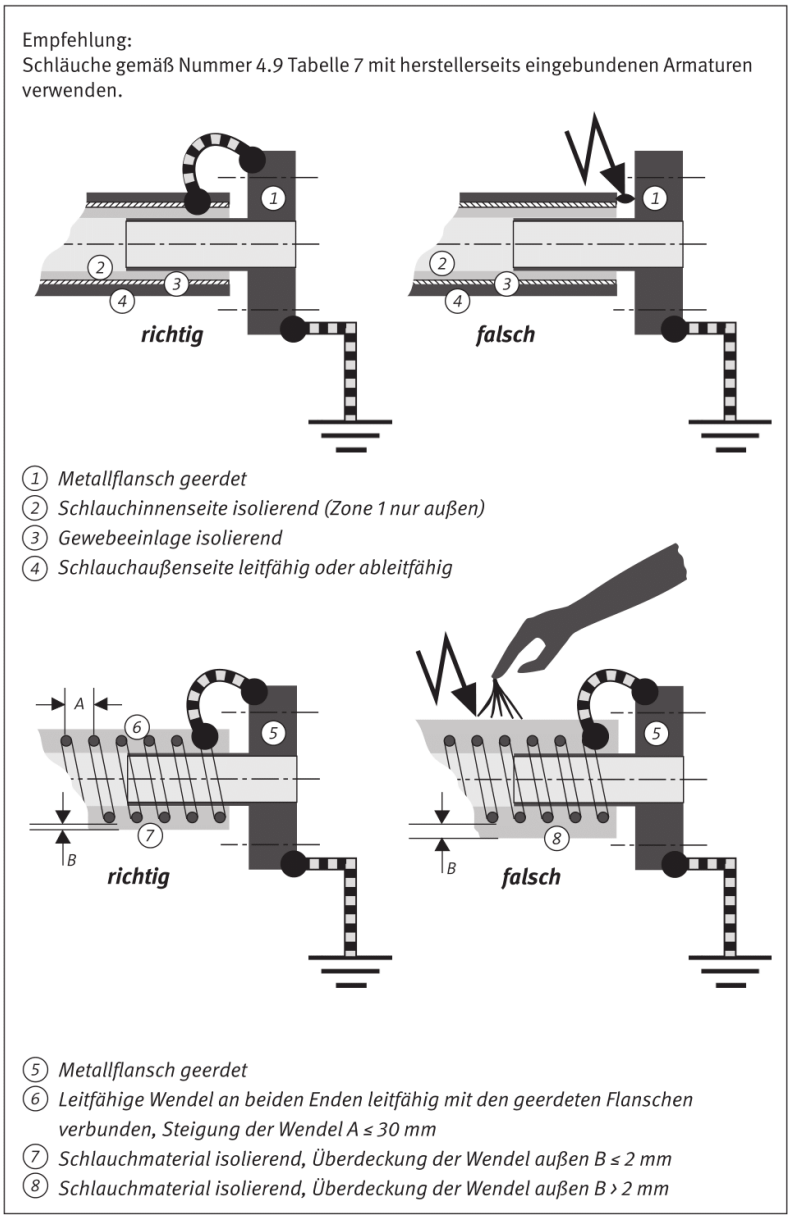
(6) Können Streuströme nicht ausgeschlossen werden, sollen leitfähige Schlauchleitungen nicht eingesetzt werden. Geeignet sind dagegen Ω-Schlauchleitungen ohne metallische Verbindungen zwischen den Armaturen, siehe Tabelle 7, die zumindest

auf der Innenseite und der Außenseite aus ableitfähigem Schlauchmaterial bestehen und bei denen evtl. vorhandene isolierende Zwischenschichten ableitfähig überbrückt sein müssen. Sofern die Schlauchleitungen metallische Stützwendeln aufweisen, dürfen diese nicht auf beiden Seiten an die Armatur angeschlossen sein.

Hinweis 1: Streuströme schließen Ausgleichsströme ein.

Hinweis 2: Metallische Einlagen oder Drähte können wegen ihres geringen Widerstandes Streuströme führen, die beim Abkuppeln der Schlauchleitung eine Zündgefahr darstellen.

(7) Werden entgegen Absatz 6 lange leitfähige Schläuche oder leitfähige Schlauchleitungen eingesetzt, sind abschnittsweise Isolierflansche (Isolationswiderstand zwischen $10^3\ \Omega$ und $10^8\ \Omega$) einzufügen, um Schutz gegen induktive Funken zu gewährleisten. In diesem Fall ist jeder Schlauchabschnitt separat zu erden.



Beispiel 6: Schläuche zum Transport von Flüssigkeiten mit niedriger Leitfähigkeit durch Zone 1, die verursacht ist durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen IIA und IIB

4.10 Spezielle Befüllverfahren

Das Befüllen von Flugzeugtanks, Straßentankwagen oder das Betanken von Kraftfahrzeugen erfordert weitergehende Maßnahmen als die in den jeweiligen Abschnitten zu den entsprechenden Behältern angegebenen. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen zur Vermeidung hoher Aufladungen gelten in der Regel sowohl für konventionelle als auch für Biokraftstoffe.

Hinweis: Bei einigen Biokraftstoffen ist der explosionsfähige Bereich größer als bei konventionellen Kraftstoffen und der Flammpunkt kann im Bereich der Umgebungstemperatur liegen.

4.10.1 Flugzeugbetankung

(1) Bei jedem Betankungsfahrzeug, innerhalb jedes Hydrantentanksystems und innerhalb jeder Zapfsäule müssen sämtliche Metallteile einen guten elektrischen Kontakt untereinander aufweisen.

(2) Bevor die Füllschläuche angeschlossen werden, ist zuerst eine elektrisch leitende Verbindung zwischen dem Flugzeug und dem Betankungsfahrzeug bzw. der Zapfsäule herzustellen. Sie muss fortbestehen, bis der Tankvorgang abgeschlossen ist und die Schläuche gelöst sind.

(3) Steht ein Erdungspunkt zur Verfügung, ist das Betankungsfahrzeug oder die Zapfsäule zunächst mit dem Erdungspunkt und dann mit dem Flugzeug zu verbinden.

(4) Erdungs- oder Potenzialausgleichsverbindungen müssen in ausreichendem Abstand zu den Betankungsschläuchen liegen, um der Gefahr einer Entzündung durch Funken beim Herstellen oder Lösen der Verbindungen zu begegnen.

(5) Die Betankung aus Fässern oder anderen Behältern erfordert die gleichen Erdungsmaßnahmen wie die Betankung mit Fahrzeugen. Die Fasspumpe ist sowohl mit dem Flugzeug als auch mit dem Fass elektrisch leitend zu verbinden.

(6) Da Flugzeugtanks üblicherweise eine flache Form aufweisen, ist abweichend von Nummer 4.4.1 bei Flugzeugkraftstoffen mit einer Leitfähigkeit $\kappa > 50$ pS/m und beim Befüllen über einen Schlauch von 63 mm Durchmesser eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 7 m/s zulässig. Für Kraftstoffe ohne Leitfähigkeitsadditive dürfen 5 m/s nicht überschritten werden. Eine ausreichende Verweilzeit hinter den Filtern nach Nummer 4.7 muss sichergestellt werden.

4.10.2 Kraftstofflieferung mit Straßentankwagen

Folgende Maßnahmen sind zu berücksichtigen:

1. Der Schlauch ist zunächst am Tankwagen anzuschließen.
2. Noch bevor der Deckel des Füllrohrs geöffnet wird oder andere Verbindungen hergestellt werden, ist ein Potenzialausgleich herbeizuführen.

   Hinweis: Der Potenzialausgleich kann im vorliegenden Fall z. B. durch Kontakt der Schlauchendkupplung mit dem Deckel oder einem anderen Metallteil des Tanks herbeigeführt werden, wenn keine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden ist.

3. Eine separate elektrisch leitende Verbindung ist bei leitfähigen oder ableitfähigen Schläuchen nicht erforderlich, weil der Schlauch selbst diese Verbindung herstellt.

4.10.3 Betanken von Kraftfahrzeugen

(1) Beim Betanken von Kraftfahrzeugen treten Benzindämpfe in der Nähe der Tankköffnung auf, die eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bilden können.

(2) Folgende Maßnahmen sind durchzuführen bzw. erforderlich:

1. Die Zapfsäule muss ordnungsgemäß geerdet sein.
2. Es ist ein leitfähiger oder ableitfähiger Ω-Schlauch mit einem Widerstand $R < 10^6\ \Omega$ zwischen seinen Enden gemäß Nummer 4.9.4 zu benutzen, um das leitfähige Zapfventil mit der Zapfsäule zu verbinden.
3. Die Oberflächen der Tankstellenfahrbahnen müssen einen Ableitwiderstand $R_E < 10^8\ \Omega$ gegen Erde aufweisen, um eine Erdung der Fahrzeuge über ihre Reifen zu ermöglichen.

   Hinweis: Autoreifen müssen einen Ableitwiderstand < 10^8 Ohm haben, um die Erdung der Fahrzeuge über die Tankstellenfahrbahn zu ermöglichen.
4. Es ist ein elektrisch leitender Kontakt zwischen der Fahrzeugkarosserie und dem Zapfventil notwendig.

Hinweis: Diese Maßnahme stellt sicher, dass das Fahrzeug, das Zapfventil, die das Zapfventil berührende Person, der leitfähige oder ableitfähige Schlauch sowie die angeschlossenen Tankeinrichtungen während der Betankung auf gleichem Potenzial liegen und mit Erde verbunden sind. Die Erfahrung zeigt, dass der Erdkontakt ausreicht, die relativ geringen Mengen elektrischer Ladung über das Zapfventil und gegebenenfalls die Reifen während der Betankung abzuleiten. Ungeeignet versiegelte Böden und Reifen minderer Qualität können die Ableitung herabsetzen. Die Verwendung von Kunststofftanks in Fahrzeugen bewirkt keine zusätzlichen Gefahren. Die Auflage für das Zapfventil am Tankeinfüllstutzen und alle Metallteile müssen elektrisch leitend mit dem Fahrzeug verbunden sein.

4.10.4 Befüllung der Lagertanks von Tankstellen

(1) Die Befüllung von Lagertanks an Tankstellen erfolgt über unterirdisch verlegte Rohrleitungen. Beim Strömen von Kraftstoff kann es zu gefährlichen Aufladungen kommen.

(2) Für Befüllleitungen ausschließlich aus Metall sind folgende Maßnahmen erforderlich:

1. Werden Feinfilter eingesetzt, muss dahinter eine ausreichende Relaxationszeit eingehalten werden, siehe Nummer 4.7 Absatz 4.
2. Alle leitfähigen Teile müssen geerdet und nach Nummer 8.7 Absatz 1 geprüft werden.

Hinweis: Insbesondere bei Wartungsarbeiten ist darauf zu achten, dass keine isolierten leitfähigen Abschnitte entstehen.

(3) Für Befüllleitungen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material oder für isolierende Kunststoffrohre mit einer leitfähigen oder ableitfähigen Innenauskleidung gelten die gleichen Anforderungen wie für Systeme mit Metallrohren nach Absatz 2. Es

ist insbesondere darauf zu achten, dass die durchgehende Leitfähigkeit nicht z. B. durch isolierende Schweißnähte unterbrochen wird.

Hinweis: Solche isolierenden Rohre mit leitfähiger Innenauskleidung werden im Handel als „leitfähige Rohre“ angeboten, isolierende Rohre ohne leitfähige Innenauskleidung werden im Handel als „nichtleitfähige Rohre“ angeboten.

Freiliegende Leitungsabschnitte dürfen von außen nicht aufgeladen werden, z. B. durch manuelle Reibung.

(7) Wenn die Verwendung von isolierenden Kunststoffleitungen ohne leitfähige oder ableitfähige Innenauskleidung nicht vermieden werden kann, sind alle folgenden Maßnahmen zu ergreifen:

1. Die Strömungsgeschwindigkeit des Kraftstoffs muss auf < 2,8 m/s begrenzt werden.

   Hinweis: Die mögliche Einführung von Bio-Komponenten kann die elektrostatische Aufladbarkeit von Kraftstoff ändern. Darüber hinaus begünstigen Bio-Komponenten das Auftreten von explosionsfähiger Atmosphäre.

2. Am Einfüllstutzen, an dem der Befüllschlauch des Tankwagens angeschlossen wird, muss verhindert werden, dass Luft in das System eintritt, z. B. durch ein Ventil, das vor dem Trennen von Schlauch und Rohr geschlossen ist.

   Hinweis: Wird beim Abkuppeln Luft hinter dem noch strömenden Kraftstoff eingesaugt, kann es durch Kondensation von Wasser lokal zu aufgeladenen leitfähigen Oberflächen oder isolierten Leitern kommen, die in isolierenden Rohrleitungen zu zündwirksamen Entladungen führen können.

3. Freiliegende Flächen von Rohrleitungen und Kunststoffflanschen, z. B. in Pumpenschächten, dürfen die Abmessungen nach Nummer 3.2.1 bzw. 3.2.2. nicht überschreiten.

4. Zur Vermeidung von elektrischen Durchschlägen müssen isolierende Kunststoffrohre eine elektrische Durchschlagspannung durch die Rohrwand von mehr als 100 kV haben.

   Hinweis: Eine Polyethylenschicht von mindestens 4 mm Dicke erfüllt in der Regel diese Forderung.

5. Anschlüsse von Elektroschweißmuffen müssen dauerhaft und zuverlässig geerdet oder mit luftdichten Kappen versiegelt sein.

6. Alle leitfähigen Teile müssen geerdet und nach Nummer 8.7 Absatz 1 geprüft werden.

7. Ausrüstungen, die eine gefährliche Aufladung des Kraftstoffs bewirken, z. B. Feinfilter, dürfen nicht verwendet werden.

8. Bei Wartungsarbeiten dürfen keine hoch aufgeladenen Rohrteile in eine explosionsfähige Atmosphäre gebracht werden.

(5) Gaspendelleitungen aus isolierenden Materialien müssen den Anforderungen nach Nummer 3.2.1 entsprechen.

4.11 Rühren und Mischen von Flüssigkeiten

(1) Rühren und Mischen darf nur erfolgen

1. in leitfähigen Behältern,
2. in ableitfähigen Behältern oder
3. in Behältern mit isolierender Innenschicht, wenn sie leitfähig umhüllt sind und die Anforderungen von Nummer 4.4.5 bei mittelgroßen Behältern bzw. Nummer 4.5.4 bei kleinen Behältern erfüllt werden.

Hinweis 1: Rühren und Mischen verschiedener Flüssigkeiten oder von Flüssigkeiten mit Feststoffen sind oft stark ladungserzeugende Prozesse, die leicht zu gefährlichen Aufladungen führen können.

Hinweis 2: Ladungen werden beim Rühren und Mischen erzeugt, wenn mindestens eine Flüssigkeit eine niedrige Leitfähigkeit aufweist. Die Ladungen werden in diesem Fall insbesondere auf den in der kontinuierlichen Phase suspendierten Flüssigkeiten oder Feststoffen sowie auf isolierten Metallgegenständen angesammelt.

(2) Werden ausschließlich vollständig mischbare Flüssigkeiten gemischt, muss die Leitfähigkeit der Hauptkomponente $\kappa > 50$ pS/m betragen.

(3) Werden Medien so gemischt, dass Emulsionen oder Suspensionen entstehen, sind in der Regel höhere Leitfähigkeiten für einen sicheren Betrieb notwendig, z. B. 10 000 pS/m. Gegebenenfalls ist der Leistungseintrag des Rührwerks so zu verringern, dass keine gefährliche Aufladung erzeugt wird.

Hinweis Die Leitfähigkeit der Hauptphase kann durch Absorption von Ionen durch die Nebenphase beträchtlich sinken. Durch Zugeben von Leitfähigkeitsadditiven kann die Leitfähigkeit erhöht werden. In vielen Fällen werden auch Inertisierungsmaßnahmen ergriffen.

(4) Es gibt Flüssigkeiten, die trotz hoher oder mittlerer Leitfähigkeit sehr leicht aufgeladen werden können. Hierzu gehören z. B. Ethylacetat, Isopropylacetat, Ether und höhere Ketone, jedoch z. B. nicht Aceton. Sofern als kontinuierliche Phase solche sehr leicht aufladbare Flüssigkeiten eingesetzt werden und sie nicht großflächig Kontakt mit leitfähigen Oberflächen besitzen, ist mit so starken Aufladungen zu rechnen, dass weitere Explosionsschutzmaßnahmen, z. B. Inertisieren, erforderlich sind.

(5) Wird mit Schnellmischern, z. B. Dissolvern, gearbeitet, ist mit so starken Aufladungen zu rechnen, dass weitere Explosionsschutzmaßnahmen in Betracht gezogen werden müssen.

4.11.1 Strahlmischverfahren

(1) Beim Strahlmischen von Flüssigkeiten, deren Leitfähigkeit, gegebenenfalls unter Zusatz von Leitfähigkeitsadditiven, $\kappa > 50$ pS/m ist, ist nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen, solange der Strahl die Flüssigkeitsoberfläche nicht durchbricht.

Hinweis: Der freie Strahl kann beim Zerfall oder beim Auftreffen auf die Behälterwand so viele aufgeladene Tropfen in den Gasraum bringen, dass dort eine gefährliche Aufladung entsteht. Leitfähige Flüssigkeiten erzeugen dabei oft höhere Aufladungen als isolierende.

(2) Weist eine Flüssigkeit eine Leitfähigkeit $\kappa < 50$ pS/m auf und sind andere Explosionsschutzmaßnahmen nicht möglich, ist die Aufladung des Mischgutes zu beurteilen und auf dieser Basis zu bewerten, ob ein sicherer Betrieb möglich ist.

Hinweis: Zur Beurteilung können die Feldstärke gemessen und das Potenzial der Flüssigkeitsoberfläche abgeschätzt werden. Einflussgrößen auf die Aufladung und die Feld- und Potenzialverteilung sind z. B.

1. Behältergeometrie, z. B. vorspringende Kanten im Behälter in Richtung der Flüssigkeitsoberfläche, Messfühler,
2. Vorliegen einer zweiten Phase, z. B. Wasser, am Boden des Behälters,
3. Füllprozesse während des Mischvorgangs,
4. die Relaxationszeit.

4.11.2 In-Line-Mischen

Beim In-Line-Mischen können hohe Aufladungen auftreten. Ausreichende Relaxationszeiten sind einzuhalten. Beim In-Line-Prozess besteht in der Regel keine explosionsfähige Atmosphäre. Die Strömungsgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass sich kein Dampfraum bildet.

Hinweis: Bei diesem Verfahren erfolgt das Mischen in einem Rohr, durch das die verschiedenen Mischungskomponenten mit verfahrenstechnisch vorgeschriebenen Geschwindigkeiten gepumpt werden.

4.12 Reinigen von Behältern

(1) Beim Reinigen von Behältern, insbesondere beim Strahlen, können hohe elektrostatische Aufladungen entstehen.

(2) Die entstehende Ladungsmenge wird unter anderem beeinflusst von

1. den Eigenschaften des Strahlmittels,
2. weiteren Zusatzstoffen zum Strahlmittel,
3. dem Phasenzustand des Strahlmittels,
4. dem Phasenzustand des verunreinigten Strahlmittels,
5. dem Durchsatz beim Flüssigstrahlen,
6. der Form und der Anzahl der Strahldüsen,
7. dem Arbeitsdruck,
8. der Größe und Geometrie des Behälters,
9. den Flüssigkeitseigenschaften im Behälter,
10. der Restflüssigkeit und
11. dem Flüssigkeitsstand.

(3) Zündempfindliche Gemische, z. B. Schwefelkohlenstoff/Luft-Gemische, erfordern zusätzliche Maßnahmen.

(4) Aufprallende Reinigungsstrahlen bilden beim Zerteilen Tropfen oder Nebel, die normalerweise aufgeladen sind und elektrische Ladungen im Behälter erzeugen. Vorhandene Turbulenzen verteilen den aufgeladenen Nebel im gesamten Behälter und können so eine hohe Raumladungsdichte mit hohen Feldstärken erzeugen.

Hinweis 1: Das durch den Nebel erzeugte elektrische Potenzial besitzt seinen Maximalwert in der Mitte des Behälters und ist abhängig von der Art der Reinigungsflüssigkeit, z. B. Wasser, Öl oder dem Einsatz von Hilfsstoffen und den Parametern des

verwendeten Flüssigkeitsstrahlers, z. B. Flüssigkeitsdruck, Durchsatz und Düsendurchmesser.

Hinweis 2: Darüber hinaus können isolierte Leiter gebildet werden, wenn mit einem Wasserstrahl gereinigt wird. Herunterfallende zusammenhängende Wassercluster können dabei durch Influenz auf das Potenzial in der Tankmitte aufgeladen werden. Zündwirksame Entladungen können entstehen, wenn sich die Wassercluster geerdeten leitfähigen Gegenständen oder dem Boden nähern.

4.12.1 Reinigen mit Wasserstrahlen von Drücken bis zu 12 bar

Beim Reinigen mit Wasserstrahlen bis zu 12 bar und mit bis zu 20 Düsen ist nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen, solange der Flüssigkeitsdurchsatz 7 l/s und das Behältervolumen 10 m^3 nicht überschreiten.

4.12.2 Reinigen mit Wasserstrahlen von Drücken über 12 bar

Beim Reinigen von mit Kohlenwasserstoffen benetzten metallischen Behältern mit Wasserstrahlen ist nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen, solange der Arbeitsdruck 500 bar unterschreitet sowie der Flüssigkeitsdurchsatz 5 l/s und der Behälterdurchmesser 3 m nicht überschreiten.

4.12.3 Reinigen mit Lösemitteln niedriger und mittlerer Leitfähigkeit von Drücken bis zu 12 bar

(1) Werden als Reinigungsmittel Flüssigkeiten niedriger und mittlerer Leitfähigkeit, z. B. organische Lösemittel, verwendet, darf der Anteil einer zweiten Phase, z. B. Wasser oder Feststoff, 1 % nicht überschreiten.

(2) Reinigungsmittel dürfen im geschlossenen Kreislauf nur geführt werden, wenn die Verunreinigung unterhalb 1 % gehalten wird.

Hinweis 1: Das Ansammeln von Flüssigkeit im Behälter während der Reinigung ist zu vermeiden.

Hinweis 2: Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit, wie Kohlenwasserstoffe, laden sich während des Versprühens weniger auf als Wasser, da sie nur eine geringe Konzentration dissoziierter Ionen enthalten.

4.12.4 Reinigen mit Lösemitteln mittlerer Leitfähigkeit von Drücken über 12 bar

(1) Beim Reinigen metallischer Behälter mit Lösemitteln mittlerer Leitfähigkeit von Drücken über 12 bar ist nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen, solange der Arbeitsdruck 50 bar unterschreitet, der Flüssigkeitsdurchsatz kleiner 1 l/s ist und der Behälterdurchmesser 3 m nicht überschreitet.

(2) Die Reinigungsflüssigkeiten dürfen nicht mehr als 1 % flüssige oder feste Bestandteile enthalten, die eine zweite Phase bilden können. Sie sind während des Reinigens abzulassen.

Hinweis: Über andere Rahmenbedingungen liegen bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor.

4.12.5 Reinigen mit Dampfstrahlen

Beim Dampfstrahlen von mit Kohlenwasserstoffen benetzten metallischen Behältern mit einem Rauminhalt $V < 100$ m^3 ist nicht mit gefährlichen Aufladungen zu rechnen. Es dürfen keine isolierten Metallteile im zu reinigenden Behälter vorhanden sein.

Hinweis: Falls möglich, sollen überhitzter Dampf verwendet und eine Kondensatbildung beim Entspannen verhindert werden. Dampfdüsen und andere leitfähige Teile des Strahlgerätes müssen geerdet sein.

4.12.6 Reinigen von Behältern durch Fluten mit Wasser

Fluten mit Wasser ist geeignet, explosionsfähige Atmosphäre zu verdrängen. Fluten mit Wasser arbeitet ohne Hochdruck und erzeugt in der Regel keine Sprühnebel. Gefährliche Aufladungen sind nicht zu erwarten.

4.13 Glasapparaturen

(1) In Glasapparaturen verwendete Gläser weisen meist einen Oberflächenwiderstand von etwa $10^{11}\ \Omega$ gemessen bei 50 % relativer Feuchte und 23 °C auf. Unter diesen Bedingungen werden Glasapparaturen durch Vorgänge, z. B. Reiben, nicht gefährlich aufgeladen.

Hinweis: Der Oberflächenwiderstand von Glas steigt mit zunehmender Temperatur des Glases und mit abnehmender Luftfeuchte. Aufladbare Kunststoffbeschichtungen erhöhen den Oberflächenwiderstand erheblich.

(2) Isolierend beschichtete Glasapparaturen sind wie isolierende Einrichtungen zu behandeln.

(3) Glasapparaturen dürfen

1. in Bereichen der Zone 0,
2. in Bereichen der Zone 1 für zündempfindliche Medien, z. B. Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIC,
3. bei Glasbauteilen mit einer Temperatur $T > 50$ °C

   nur mit zusätzlichen Maßnahmen gegen gefährliche Aufladungen betrieben werden, wenn in ihrer Umgebung mit einer relativen Feuchte < 50 % zu rechnen ist. Die Glasoberflächen dürfen in den genannten Fällen nicht gerieben werden, z. B. beim Reinigen.

Hinweis 1: Zusätzliche Maßnahmen sind z. B. Erhöhen der Leitfähigkeit der Glasoberflächen und Erhöhen der Luftfeuchte.

Hinweis 2. Büschelentladungen können von Glasoberflächen nur bei einer niedrigen relativen Feuchte ausgehen, z. B. wenn die Oberflächentemperatur deutlich über der Umgebungstemperatur liegt.

Hinweis 3: In Glasapparaturen werden oft stark ladungserzeugende Prozesse durchgeführt. Diese Prozesse führen entsprechend häufig zu gefährlichen Aufladungen, insbesondere bei Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit,

1. hinter Pumpen und Filtern oder Ähnlichem,
2. beim Versprühen und Verdüsen, auch von Flüssigkeiten mittlerer oder hoher Leitfähigkeit,
3. bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und
4. beim Umgang mit Mehrphasengemischen.

Infolge dieser Prozesse auftretende elektrische Felder können bei Gläsern zum Felddurchgriff führen und Aufladungen außerhalb der Glasapparatur hervorrufen.

(4) Leitfähige Gegenstände und Einrichtungen an Glasapparaturen sind zu erden. Ableitfähige Gegenstände und Einrichtungen sind mit Erde zu verbinden. Siehe hierzu auch Nummer 8.

(5) Leitfähige Flanschverbindungen sind entsprechend den Angaben der Tabelle 8 zu erden. Die Erdung kleiner leitfähiger Teile kann entfallen, wenn ihre Kapazität in eingebautem Zustand ausreichend klein ist, siehe Tabelle 11 in Nummer 8.3.5. Liegen zuverlässige Messwerte der Kapazität nicht vor, so sind sie zu erden.

Hinweis: Typische Metallflansche in Glasapparaturen besitzen häufig eine Kapazität $C > 3$ pF. Die Kapazität von Schrauben und Bolzen bis 150 mm Länge liegt meist unter 3 pF.

(6) Im Inneren von Glasapparaturen sind die gleichen Maßnahmen zu treffen wie in anderen ableitfähigen Einrichtungen.

Hinweis: Elektrostatische Aufladungen in Glasapparaturen treten hauptsächlich prozessbedingt durch Flüssigkeiten, Tropfen und Suspensionen oder durch Staub/Luft-Gemische geringer Leitfähigkeit auf.

Tabelle 8: Erforderliche Erdung leitfähiger Flanschverbindungen an Glasapparaturen in Abhängigkeit des Nenndurchmessers *DN* bei Abwesenheit stark ladungserzeugender Prozesse

Zone	Zone verursacht durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen	
	IIA, IIB	IIC
0	für alle *DN*	für alle *DN*
1	für $DN \geq 50$	für alle *DN*
2	für $DN \geq 50$	für $DN \geq 50$

5 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Gasen

(1) Die Bewegung reiner Gase oder Gasgemische erzeugt keine elektrostatische Aufladung. Enthält ein Gasstrom jedoch Feststoffpartikel oder Flüssigkeitströpfchen, können diese sowie alle betroffenen Anlagenteile und Gegenstände aufgeladen werden.

Hinweis: Prozesse, die zu beträchtlichen elektrostatischen Aufladungen führen können, sind der pneumatische Transport, das Freisetzen von Druckgas mit Partikeln, das Ausströmen von flüssigem Kohlendioxid, der Einsatz von industriellen Staubsaugern oder das Spritzlackieren.

(2) Solche Prozesse können zu zündwirksamen Funkenentladungen, Büschelentladungen, Gleitstielbüschelentladungen oder Schüttkegelentladungen führen.

Hinweis: Siehe auch Anhang A3.

(3) Die Aufladung der Partikel selbst kann nicht vermieden werden. Zusätzlich zur Vermeidung isolierender Materialien sind folgende Maßnahmen geeignet, gefährliche Aufladungen zu verhindern:

1. Entfernung der Partikel oder Tröpfchen,
2. Wahl ausreichend niedriger Strömungsgeschwindigkeiten,
3. Wahl geeigneter Düsengeometrie zur Verringerung der Ladungsdichte,
4. Verwendung leitfähiger Gegenstände oder Einrichtungen, die zu erden sind.

5.1 Sandstrahlen

Werden in explosionsgefährdeten Bereichen Sandstrahlarbeiten durchgeführt oder kann beim Sandstrahlen explosionsfähige Atmosphäre entstehen, dürfen nur leitfähige Sandstrahlgeräte benutzt werden. Alle leitfähigen Teile der Sandstrahlgeräte, insbesondere die am Ende des Schlauches befestigte Düse, müssen geerdet sein. Einzelne Anlagenteile, z. B. Schläuche, müssen mindestens ableitfähig und mit anderen geerdeten Anlagenteilen elektrisch leitend verbunden sein.

Hinweis: Durch diese Maßnahmen werden Funkenentladungen sicher vermieden. Trotzdem kann sich verfahrensbedingt das Strahlmittel aufladen. Liegen Gefahrstoffe der Explosionsgruppe II vor, sind – wegen möglicher Büschelentladungen – weitere Maßnahmen, notwendig. Ggf ist die Gefährdungsbeurteilung im Hinblick auf die Vermeidung gefährlicher explosionsfähiger Gemische, z. B. durch Inertisierungsmaßnahmen, zu wiederholen.

5.2 Feuerlöscher und Feuerlöschanlagen

(1) Feuerlöscher und Feuerlöschanlagen, deren Löschmittel sich beim Austritt aufladen können, dürfen in explosionsgefährdeten Bereichen nur dann zu Testzwecken ausgelöst werden, wenn sichergestellt ist, dass keine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden ist.

Hinweis: Z. B. können Wolken aus Löschpulver oder entspanntem Kohlendioxid gefährlich aufgeladen sein.

(2) Inertgasfeuerlöschanlagen, deren Gas, z. B. CO_2, sich beim Austritt auflädt, dürfen bei vorhandener explosionsfähiger Atmosphäre nicht ausgelöst werden.

Hinweis: Eine bereits vorhandene explosionsfähige Atmosphäre soll nicht durch vorbeugendes Einbringen des Löschmittels entzündet werden. Im Brandfall ist nicht mehr von einer explosionsfähigen Atmosphäre auszugehen.

5.3 Inertisieren

Zum Inertisieren bereits vorhandener explosionsfähiger Atmosphäre darf das Inertisierungsmedium nur so eingebracht werden, dass keine gefährlichen Aufladungen auftreten. Eine Bildung von Nebel oder Sublimat sowie das Aufwirbeln von Stäuben sind zu vermeiden.

Hinweis: Nassdampf oder CO_2 eignen sich in diesen Fällen nicht als Inertisierungsmedium. Inertgas soll feststofffrei und langsam durch möglichst große Öffnungen eingeleitet werden. Ein Mitreißen von Schmutz, Kondensat oder Anbackungen aus den Leitungen ist zu vermeiden.

5.4 Unvorhergesehene Leckage von Druckgas

(1) Gefährliche Aufladungen können entstehen, wenn Gase Flüssigkeitströpfchen, feste Partikel oder einen hohen Sattdampfanteil enthalten. Besteht die Möglichkeit, dass z. B. durch Leckagen in Systemen, die brennbare Gase führen, explosionsfähige Atmosphäre entsteht, sind alle leitfähigen Einrichtungen, z. B. Gefäße oder Rohre, die solche Gase enthalten, sowie alle benachbarten oder angrenzenden leitfähigen Teile zu erden.

(2) Personen, die einen solchen Bereich, z. B. zur Ausführung von Reparaturen, betreten sowie die von ihnen mitgeführten leitfähigen Teile sind ebenfalls zu erden. Isolierende Teile sollen in einen solchen Bereich nicht eingebracht werden.

5.5 Spritzlackieren, Pulverbeschichten und Beflocken

(1) Beim Verspritzen oder Versprühen von Flüssiglacken oder Pulverlacken sowie beim Beflocken werden Sprühwolken von Tröpfchen oder Feststoffteilchen erzeugt, welche oft elektrostatisch aufgeladen sind. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Aufladung durch Hochspannung oder triboelektrisch bewusst erzeugt wird. Da die Sprühwolken oft brennbar sind, besteht Zündgefahr und die folgenden Maßnahmen sind erforderlich:

1. Alle leitfähigen Gegenstände im Arbeitsbereich, z. B. Spritzpistolen, Werkstücke, Metallobjekte in der Nähe, sind zu erden.
2. Der Lackierer muss während des Beschichtens und bei der Reinigung geerdet sein, z. B. über leitfähige geerdete Handgriffe der Lackierpistolen oder über ableitfähiges Schuhwerk in Verbindung mit ableitfähigen Fußböden. Werden Handschuhe verwendet, müssen diese mindestens ableitfähig sein. Weitere Personen, die sich im Arbeitsbereich aufhalten, müssen ebenfalls geerdet sein.
3. Werden Werkstücke mittels einer Förderanlage transportiert, ist über leitfähige Aufnahmevorrichtungen, z. B. Haken, Ösen, Auflagen oder Mitnehmer, eine dauerhafte Erdung während des gesamten Transportes sicherzustellen, z. B. durch regelmäßiges Reinigen der Aufnahmevorrichtungen.
4. Beim elektrostatischen Beschichten mit Flüssiglacken sollen nur Spritzkabinen, Spritzwände oder Spritzstände aus ableitfähigem oder geerdetem leitfähigen Material eingesetzt werden. Isolierende Materialien dürfen nur dann verwendet werden, wenn gefährliche Aufladungen, z. B. durch Wasserberieselung, ausgeschlossen sind.
5. Beim Pulverbeschichten sollen leitfähig hinterlegte Kabinenwände aus isolierendem Material nur dann eingesetzt werden, wenn ihre Wandstärke $s > 9$ mm oder die Durchschlagspannung $U_D \leq 4$ kV ist.

(2) Beim Beflocken ohne brennbare Klebstoffe ist nicht mit einer Zündgefahr ausgehend vom Flock selbst zu rechnen.

Hinweis: Flock kann jedoch durch Funkenentladung von Flockelektroden gezündet werden, insbesondere bei der Beflockung mit Wechselstrom.

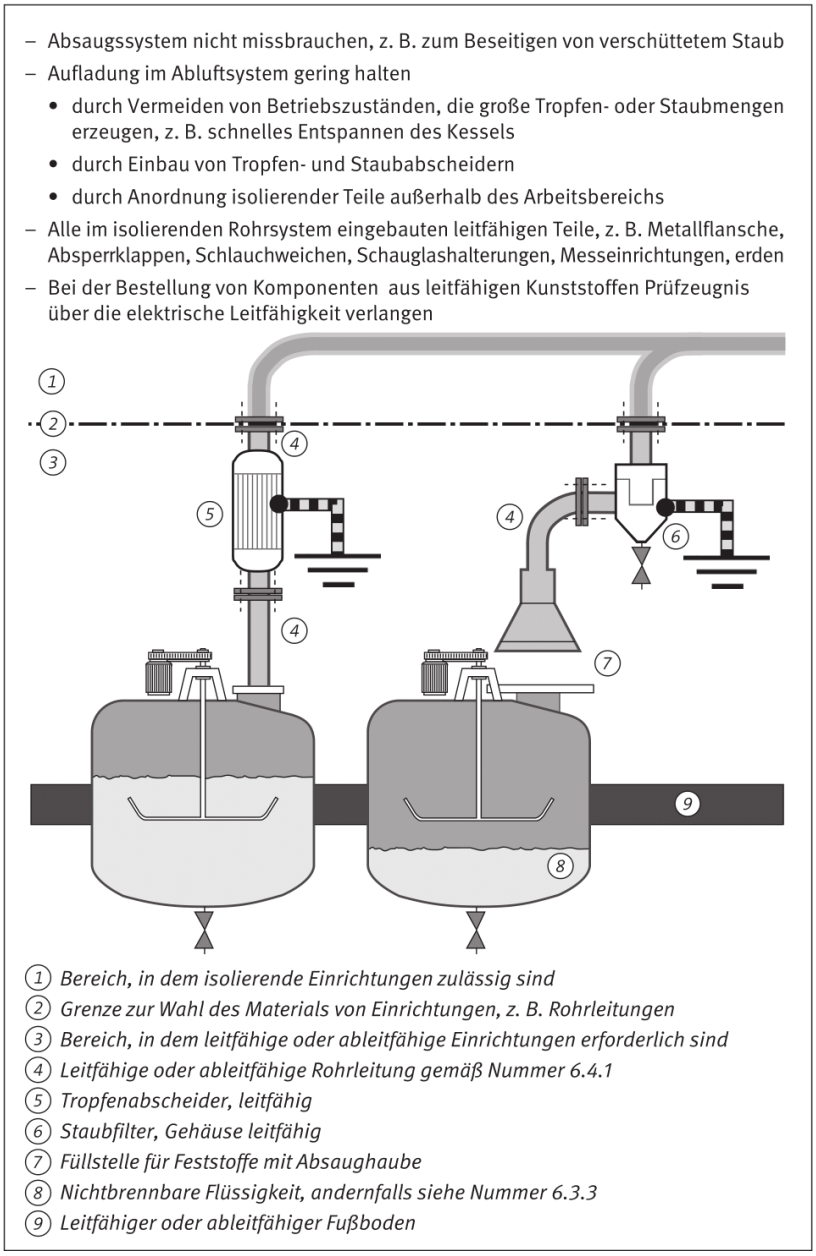
5.6 Abluftsysteme

(1) Abluft- und Abgassammelsysteme sind in explosionsgefährdeten Bereichen so zu verlegen und zu betreiben, dass sie nicht gefährlich aufgeladen werden können. Anforderungen siehe auch Nummer 6.4. Systeme aus leitfähigen Materialien müssen geerdet sein; zusätzliche Maßnahmen sind in der Regel nicht erforderlich.

(2) Leitungen aus isolierendem Material sind

1. außerhalb des Arbeits- und Verkehrsbereiches zu verlegen,
2. so zu verlegen, dass Anspritzen aus undichten benachbarten Leitungen vermieden wird,
3. bei Reinigung nur mit Wasser abzuspülen oder mit wasserfeuchten Tüchern abzureiben und nicht mit Hochdruck- oder Dampfstrahlen zu reinigen,
4. von Partikeln und Tropfen freizuhalten, z. B. mittels Filter oder Abscheider im Luft- oder Gasstrom vor Eintritt in das Leitungssystem.

(3) Alle in einem isolierenden Leitungssystem befindlichen leitfähigen Teile, z. B. Ventile oder Rückschlagklappen, sind zu erden.



Beispiel 7: Abluftsysteme in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 1

5.7 Staubsauger und Staubsauganlagen

(1) Staubsauger und Staubsauganlagen können hohe Ladungsdichten erzeugen und selbst gefährlich aufgeladen werden.

Hinweis: Als Staubsauger werden hier ortsbewegliche und als Staubsauganlagen ortsfeste Einrichtungen verstanden.

(2) Staubberührte Teile von Staubsaugern und Staubsauganlagen müssen aus leitfähigen oder ableitfähigen Teilen bestehen. Die leitfähigen Teile sind zu erden, insbesondere leitfähige Saugdüsen. Alle ableitfähigen Teile müssen mit leitfähigen verbunden sein, so dass Erdkontakt besteht.

(3) Bei Stäuben mit einer *MZE* ≤ 3 mJ ist die Verwendung ableitfähiger Filtergewebe erforderlich. Es ist sicherzustellen, dass der Staubsammelbehälter während des gesamten Betriebes, auch beim Entleeren, geerdet bleibt. Staubsauger und

Staubsauganlagen dürfen nicht zum Aufnehmen lösemittelhaltiger Stäube eingesetzt werden oder wenn die Gefahr der Bildung brennbarer Gase besteht.

(4) Staubsauger, die nicht geerdet werden können oder die keine leitfähige Verbindung zwischen Saugdüse und Sammelbehälter aufweisen, dürfen weder in explosionsgefährdeten Bereichen noch zum Aufsaugen brennbarer Stäube eingesetzt werden.

(5) Rohrleitungen oder Schläuche müssen die Anforderungen nach Nummer 6.4. erfüllen.

Hinweis: Staubsauger können mit Hilfe des Netzkabels oder über einen leitfähigen Druckluftschlauch geerdet werden.

6 Elektrostatische Aufladungen beim Umgang mit Schüttgütern

(1) Die Zündempfindlichkeit eines Schüttgutes, das von feinem Staub über Grieß und Granulat bis hin zu Spänen reichen kann, steigt erfahrungsgemäß mit abnehmender Korngröße, Mindestzündenergie (*MZE*) bzw. Mindestzündladung (*MZQ*) an.

(2) Für die Beurteilung der Zündempfindlichkeit ist die *MZE* der feinsten auftretenden Partikelfraktion zu Grunde zu legen.

Hinweis: Diese Fraktion erhält man in der Regel durch Sieben einer Probe durch ein 63-µm-Sieb.

(3) Beträgt die *MZE* mehr als 1 J und liegen keine brennbaren Gase und Dämpfe vor, sind besondere Maßnahmen zur Vermeidung der Zündgefahr infolge elektrostatischer Aufladungen nicht erforderlich.

Hinweis: Eventuell sind Maßnahmen zur Minderung der Gefahr eines elektrischen Schlags angezeigt; siehe auch Anhang D.

(4) Schüttgüter werden nach ihrem spezifischen Widerstand ρ in drei Gruppen eingeteilt:

1. niedriger spezifischer Widerstand: $\rho \leq 10^6\ \Omega m$
2. mittlerer spezifischer Widerstand: $10^6\ \Omega m < \rho \leq 10^{10}\ \Omega m$
3. hoher spezifischer Widerstand: $10^{10}\ \Omega m < \rho$

Hinweis 1: Der spezifische Widerstand eines Schüttgutes wird in der Regel an einer Schüttung bekannter Höhe in einem zylindrischen Gefäß (Ø 50 bis 80 mm) mit isolierendem Mantel bestimmt. Der Boden und ein Stempel dienen als Elektroden. Der Stempel wiegt ca. 1 kg. Die Messspannung beträgt in der Regel 100 V.

Hinweis 2: Zur Veranschaulichung der Begriffe siehe auch Anhang I.

Hinweis 3: In der Praxis kommen Schüttgüter mit einem niedrigen spezifischen Widerstand selten vor. Selbst Metallpulver bleiben nicht sehr lange leitfähig, da sich Oxidschichten an der Oberfläche bilden, die den Widerstand erhöhen.

Hinweis 4: Beim Umgang mit Schüttgut muss erfahrungsgemäß mit elektrostatischen Aufladungen gerechnet werden. Neben Maßnahmen, gefährlich hohe Ladungsansammlungen zu vermeiden, sind gegebenenfalls zusätzliche Explosionsschutzmaßnahmen, z. B. Inertisierung, Explosionsunterdrückung oder Explosionsdruckentlastung, zu treffen oder es ist eine explosionsfeste Bauweise für den maximal zu erwartenden Explosionsdruck zu wählen.

6.1 Verfahrenstechnische Maßnahmen

Die Randbedingungen sind so zu wählen, dass keine gefährlichen elektrostatischen Aufladungen erzeugt werden. Dazu gehören:

1. Erhöhen der Leitfähigkeit des Schüttgutes und der Anlagenteile, z. B. durch Coating oder Beschichtung,
2. Erhöhen der Feuchte oder Ionisierung,
3. Vermindern von Feinanteilen im Schüttgut,
4. Beschränken des Dispersionsgrades, z. B. durch Wahl der Pfropfenförderung anstelle der Flugförderung,
5. Verringern der Fördergeschwindigkeit, des Massendurchflusses oder der Luftgeschwindigkeit,
6. Vermeiden großer Schüttguthaufen,
7. Bevorzugen des Transportes mit Schwerkraft vor pneumatischem Transport,
8. Einsatz von Rohren und Schläuchen bei der pneumatischen Förderung von Schüttgut gemäß Nummer 6.4.

6.1.1 Befeuchtung

(1) Wird die Befeuchtung als Maßnahme zum Ableiten der Ladungen von Schüttgut gewählt, werden in der Regel mindestens 70 % relative Feuchte bei 23 °C benötigt.

(2) Die Befeuchtung ist keine geeignete Maßnahme für das Ableiten von Ladungen bei stark ladungserzeugenden Prozessen – wie der Flugförderung – und keine bei warmen Produkten.

Hinweis: Luft ist ein schlechter Leiter für Elektrizität. Erhöhen der Luftfeuchte eignet sich nicht als Maßnahme zum Ableiten der Ladung aus einer Staubwolke. Eine hohe Feuchte verringert jedoch den spezifischen Widerstand vieler Schüttgüter (mit Ausnahme der meisten Polymere), wodurch der Ladungsabbau in abgelagerten Schüttgütern beschleunigt werden kann.

6.1.2 Ionisierung

(1) Die Leitfähigkeit eines Staub/Luft-Gemisches lässt sich durch Ionisieren erhöhen. Ionisierung kann auch geeignet sein, gefährliche Staubablagerungen zu verringern.

(2) Ionisierung ist ungeeignet, gefährliche Aufladungen an größeren Schüttgutmengen oder großen Staubwolken zu vermeiden.

Hinweis: Es ist schwierig, die erforderliche Ionisierung für ein relativ großes Volumen von mehr als 100 l aufzubringen. Außerdem ist die zu neutralisierende Gesamtladung oft größer als die Ladung, die durch ein Ionisierungssystem abgegeben werden kann.

(3) Die elektrische Ladung bereits aufgeladener Staubwolken oder Schüttgutschüttungen kann durch geerdete Spitzen oder Drähte örtlich herabgesetzt werden, wenn die elektrische Feldstärke bereits nahe der Durchbruchfeldstärke liegt.

Hinweis: An der Auftreffstelle des Schüttgutes angeordnete Spitzen oder Drähte können die Energie einzelner Entladungen auf ein niedriges Niveau reduzieren. Sie

können außerdem angesammelte Ladungen sicher zur Erde ableiten, wenn das Schüttgut in einen isolierenden Behälter eintritt.

(8) Die verwendeten Spitzen oder Drähte sind so zu wählen, dass weder sie noch Teile von ihnen abbrechen können.

Hinweis: Abgebrochene Teile können wie aufgeladene Kondensatoren wirken und Funkenentladungen verursachen.

6.2 Schüttgüter bei Abwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe

Von Abwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe wird im Sinne dieser Technischen Regel auch dann ausgegangen, wenn

1. bei nichtbrennbaren Schüttgütern die Konzentration brennbarer Gase und Dämpfe sicher unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) liegt,
2. bei brennbaren Schüttgütern die Konzentration brennbarer Gase und Dämpfe sicher unterhalb 20 % der UEG des Gases/Dampfes liegt.

Hinweis: Diese Bedingung ist oft erfüllt, wenn z. B. unmittelbar nach einem Trocknungsprozess der restliche Anteil eines brennbaren Lösemittels weniger als 0,5 Gew.-% des Schüttgutes beträgt.

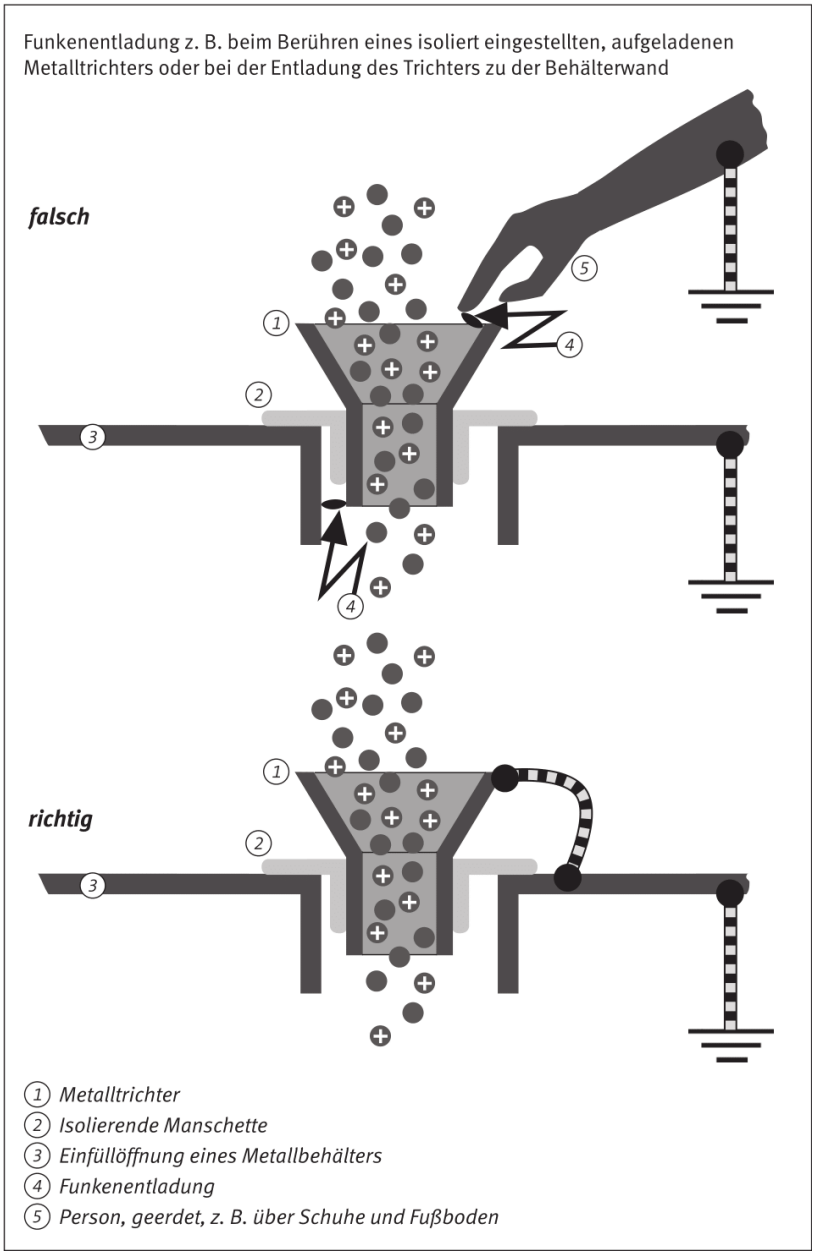
6.2.1 Gegenstände und Einrichtungen aus leitfähigen und ableitfähigen Materialien

(1) In explosionsgefährdeten Bereichen sind alle Gegenstände und Einrichtungen, die aus leitfähigen und ableitfähigen Materialien gefertigt sind, gemäß Nummer 8 zu erden.

Hinweis: Hierzu zählen leitfähig kaschierte Packmittel und viele Arten ortsbeweglicher beschichteter Behälter, z. B. aluminiumbeschichtete.

(2) Unter den folgenden Umständen kann auf eine Erdung verzichtet werden:

1. Gegenstände aus leitfähigem oder ableitfähigem Material werden während des bestimmungsgemäßen Betriebes einschließlich möglicher Störungen nachweislich nicht aufgeladen oder
2. die auf den nicht geerdeten Gegenständen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material speicherbare Energie ist kleiner als die *MZE* des Schüttgutes.



Beispiel 8: Funkenentladungen an einem isolierten Metalltrichter

6.2.2 Gegenstände und Einrichtungen aus isolierenden Materialien

(1) Isolierende Gegenstände oder Einrichtungen sind nur zulässig, wenn keine gefährlichen Aufladungen zu erwarten sind.

(2) Werden Gegenstände oder Einrichtungen aus isolierenden Materialien verwendet, z. B. Rohre, Schläuche, Behälter, Folien, Beschichtungen oder Einstellsäcke, ist mit Aufladungen zu rechnen. Mit gefährlichen Aufladungen ist erfahrungsgemäß erst beim Vorhandensein stark ladungserzeugender Prozesse zu rechnen.

Hinweis 1: Der pneumatische Transport von Schüttgütern oder das Abwerfen von Schüttgut über Rohrleitungen, Schüttrinnen, etc. mit einer Fallhöhe von mehr als 3 m stellt einen stark ladungserzeugenden Prozess dar, welcher die Innenwand von isolierenden Rohrleitungen, Schüttrinnen, etc. gefährlich aufladen kann. Wird aufgeladenes Schüttgut in einen isolierenden Behälter, dessen Volumen 0,25 m^3 überschrei-

tet, eingefüllt, kann eine gefährliche Aufladung auftreten, siehe dazu auch Nummern 6.2.3.2 und 6.2.3.3.

Hinweis 2: Aufladungen von isolierenden Oberflächen können zu Gleitstielbüschelentladungen mit typischen Energien von 1 J führen, z. B. an dünnen, isolierenden Schichten oder isolierend beschichteten leitfähigen Rohren oder Schläuchen. Werden isolierende Folien, Schichten oder Beschichtungen mit Durchschlagspannungen $U_D \leq 4$ kV verwendet, sind keine für Schüttgüter zündwirksamen Aufladungen zu erwarten.

Hinweis 3: Anforderungen an Rohrleitungen oder Schläuche zur Aspiration oder zum pneumatischen Transport von Schüttgut siehe Nummer 6.4.

(3) Werden in einer Mischbauweise leitfähige, ableitfähige und isolierende Materialien verwendet, ist sicherzustellen, dass alle leitfähigen und ableitfähigen Teile geerdet bzw. mit Erde verbunden sind.

Hinweis: Aufladungen an isolierten Leitern können zu Funkenentladungen führen.

6.2.3 Behälter

(1) Anhand der Ablaufdiagramme 1 bis 3 auf den folgenden Seiten kann geprüft werden, ob das Schüttgut beim Befüllen von Behältern gefährlich aufgeladen werden kann. Gegebenenfalls sind Maßnahmen gegen Schüttkegelentladungen (SKE), gewitterblitzartige Entladungen oder Funkenentladungen zu treffen.

(2) Schüttgüter und Schüttgutbehälter sind so zu handhaben bzw. zu betreiben, dass gefährliche Aufladungen vermieden werden. Gefährliche Aufladungen können sowohl auf dem Schüttgut als auch auf dem Schüttgutbehälter angesammelt werden.

Hinweis 1: Als Schüttgutbehälter werden neben großen Behältern oder Silos auch ortsbewegliche Behälter, z. B. Gebinde, Fässer, Säcke, flexible Schüttgutbehälter (FIBC) oder andere Packmittel, verstanden. Zu FIBC siehe auch Nummer 6.6 und Anhang C.

Hinweis 2: Anforderungen an Rohrleitungen oder Schläuche zur Aspiration oder zum pneumatischen Transport von Schüttgut siehe Nummer 6.4.

(3) Je nach spezifischem Widerstand ρ des Schüttgutes trifft eines der drei Ablaufdiagramme zu:

Ablaufdiagramm 1:		ρ	$\leq$	$10^6\ \Omega$m
Ablaufdiagramm 2:	$10^6\ \Omega$m $<$	ρ	$\leq$	$10^{10}\ \Omega$m
Ablaufdiagramm 3:	$10^{10}\ \Omega$m $<$	ρ		

Hinweis: In den Ablaufdiagrammen 2 und 3 bedeutet W_{SKE} die maximale zu erwartende Äquivalentenergie der Schüttkegelentladung (siehe auch Anhang A3.6).

(4) Zur Beurteilung der Aufladung verschiedener Schüttgutbehälter sind zusätzlich die Nummern 6.2.3.1 bis 6.2.3.4 zu beachten.

(5) Beim Entleeren von Behältern mittels Schwerkraft sind bei Abwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe in der Regel im zu entleerenden Behälter keine gefährlichen Aufladungen des Schüttgutes zu erwarten.

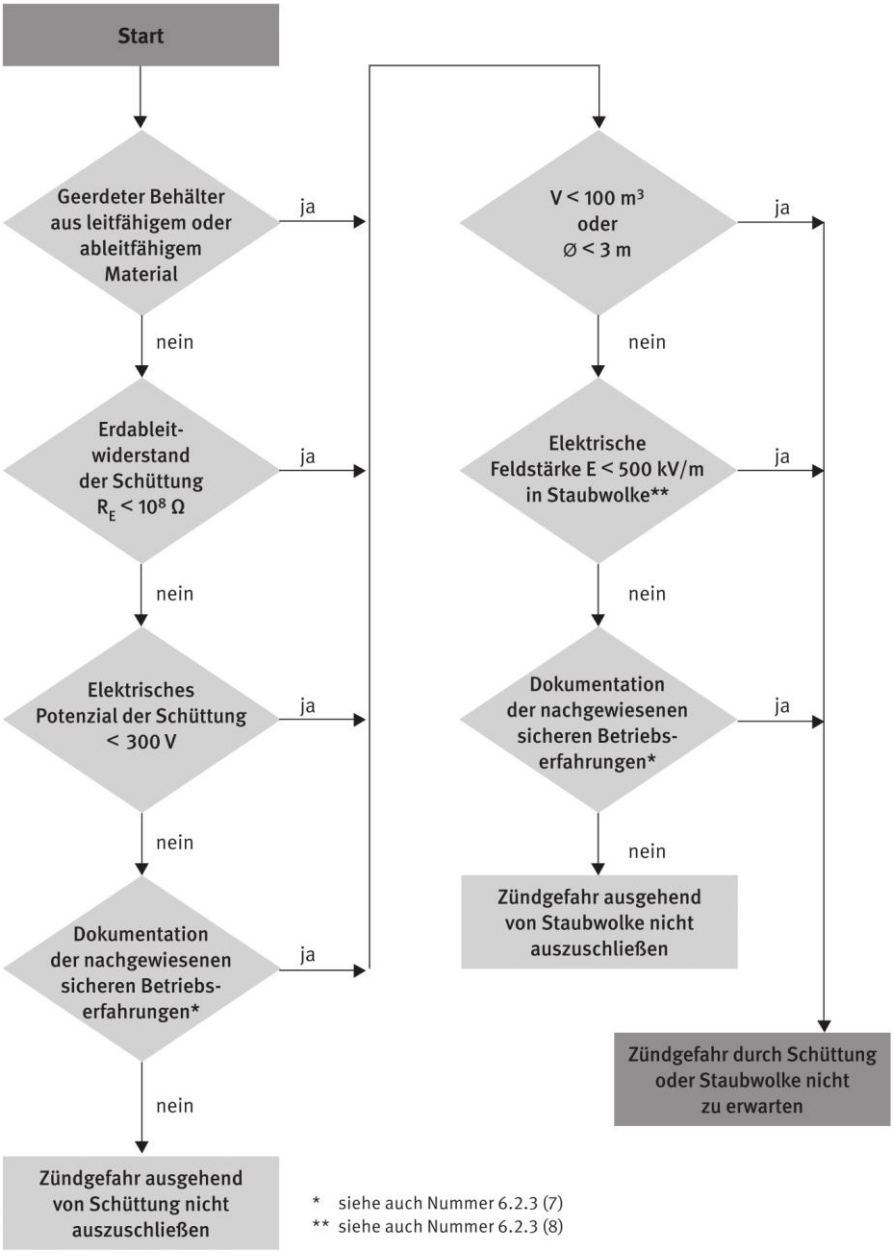
Hinweis: Siehe auch Nummer 6.3. Zu beachten ist, dass jeder Entleervorgang für das schüttgutaufnehmende System einen Befüllvorgang darstellt, auf den die Beurteilungskriterien der Ablaufdiagramme 1 bis 3 anzuwenden sind.

(6) Leitfähige und ableitfähige Behälter müssen beim Befüllen und Entleeren geerdet bzw. mit Erde verbunden sein.

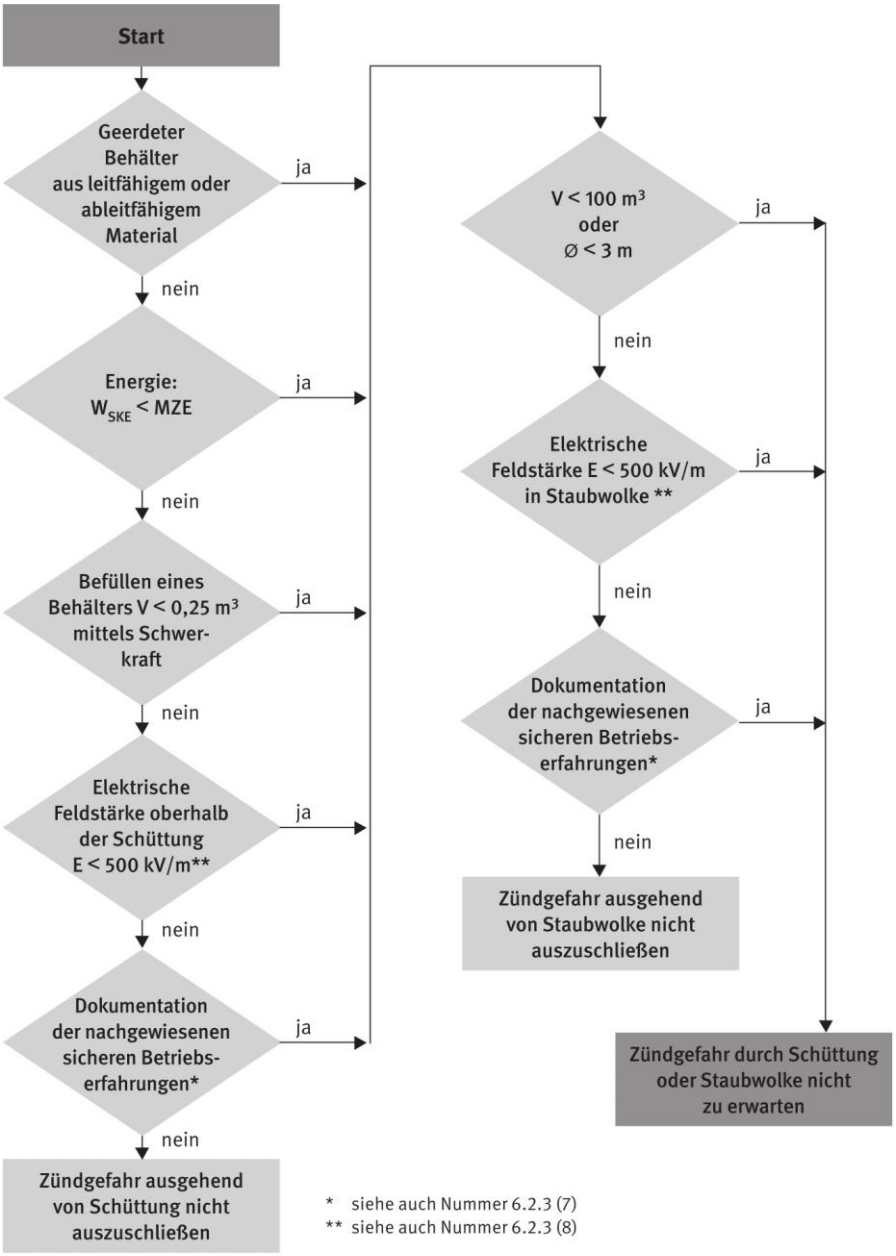
(7) Soll gemäß einem der Ablaufdiagramme 1 bis 3 die Zündgefahr auf Grund des Entscheidungsschrittes „Dokumentation der nachgewiesenen sicheren Betriebserfahrungen“ ausgeschlossen werden, muss die Explosionsgefährdung ermittelt und einer Bewertung unterzogen worden sein. Die entsprechenden Begründungen sind im Explosionsschutzdokument darzulegen.

Hinweis: Zum Explosionsschutzdokument siehe auch § 6 Absatz 9 der Gefahrstoffverordnung.

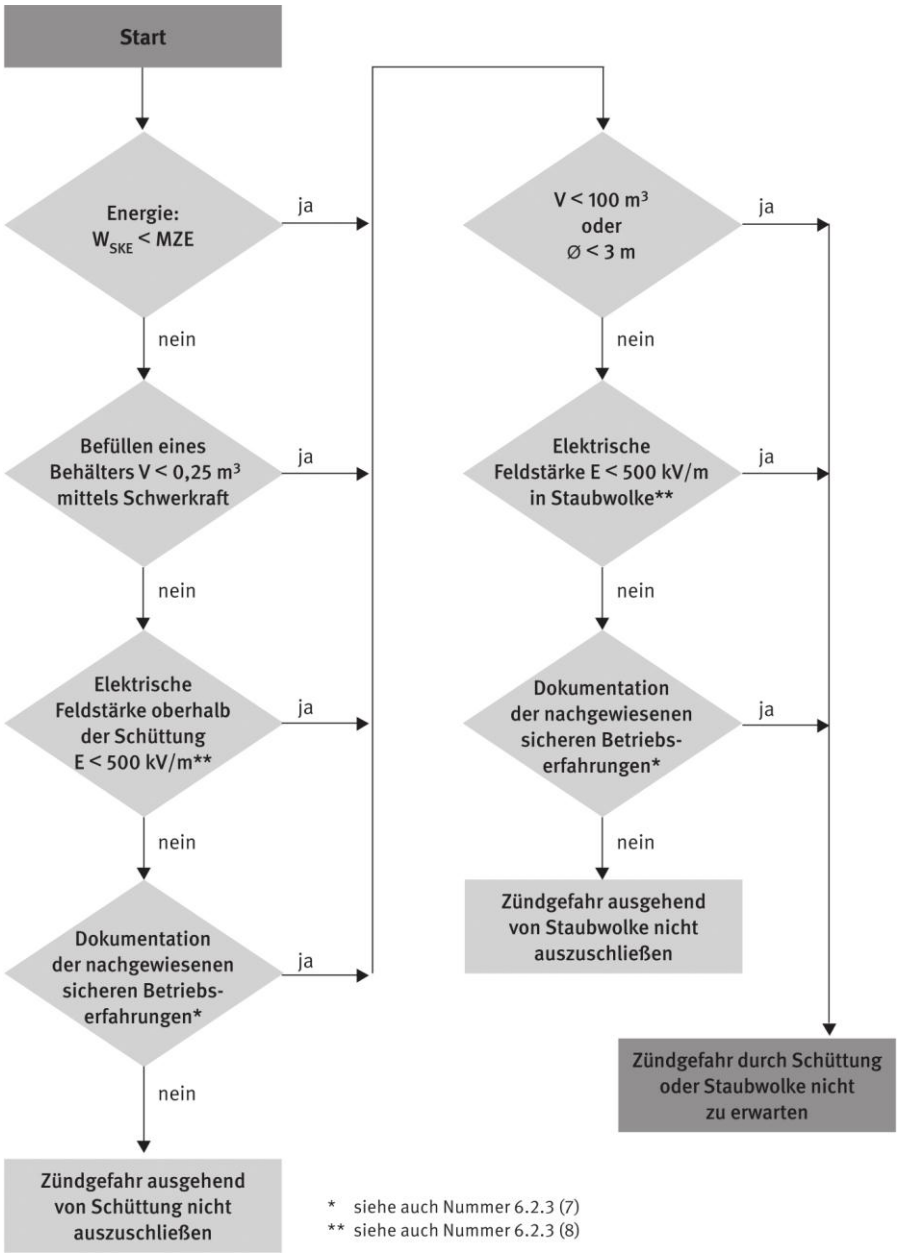
(8) Als Alternative zu Feldstärkemessungen vor Ort können auch Modellrechnungen durchgeführt werden (siehe dazu auch Anhang A3.6).



Ablaufdiagramm 1: Beurteilung der Zündgefahr ausgehend von Schüttgütern mit $\rho \leq 10^6\ \Omega$m



Ablaufdiagramm 2: Beurteilung der Zündgefahr ausgehend von Schüttgütern mit $10^6\ \Omega m < \rho \leq 10^{10}\ \Omega m$



Ablaufdiagramm 3: Beurteilung der Zündgefahr ausgehend von Schüttgütern mit $\rho > 10^{10}$ Ωm

6.2.3.1 Leitfähige und ableitfähige Behälter mit leitfähigen oder ableitfähigen Einstellsäcken

(1) Zusätzlich zu den Maßnahmen nach Nummer 6.2.3 dürfen leitfähige und ableitfähige Einstellsäcke in explosionsgefährdeten Bereichen nur benutzt werden, wenn sie sicher geerdet sind und beim Einstellen und Herausnehmen geerdet bleiben, z. B. indem sie mit dem Behälter fest verbunden und beim Ein- und Ausstellen über die Person geerdet bleiben.

(2) Das Einstellen und Herausnehmen der Säcke muss anderenfalls außerhalb der Zonen 20 und 21 erfolgen.

6.2.3.2 Leitfähige und ableitfähige Behälter mit isolierenden Einstellsäcken

(1) Isolierende Einstellsäcke sollen grundsätzlich vermieden werden.

Hinweis: Gleitstielbüschelentladungen können je nach Dicke, spezifischem Widerstand des Einstellsacks, seiner Durchschlagspannung und den elektrischen Eigenschaften des Füllgutes auftreten.

(2) Sind isolierende Einstellsäcke nicht zu vermeiden, muss zusätzlich zu den Maßnahmen nach Nummer 6.2.3 mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

1. Volumen $V < 0{,}25\ m^3$,
2. Durchschlagspannung $U_D \leq 4$ kV,
3. dokumentierter Nachweis, dass keine Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

(3) Beträgt der spezifische Widerstand des Schüttguts weniger als $10^6\ \Omega m$, ist es zu erden.

Hinweis: Die Erdung kann z. B. durch eine oder mehrere vertikale Metallstange(n) oder ein in den Behälter führendes Metallfüllrohr erfolgen. Rohr und Stangen sind vor dem brennbaren Schüttgut und nicht nachträglich einzubringen.

6.2.3.3 Isolierende Behälter

(1) Isolierende Behälter dürfen nur eingesetzt werden, wenn dies aus zwingenden Gründen erforderlich ist.

(2) Füllgut mit einem spezifischen Widerstand $\rho < 10^6\ \Omega m$ ist zu erden.

Hinweis: Die Erdung kann z. B. wie in Nummer 6.2.3.2 (3) beschrieben erfolgen.

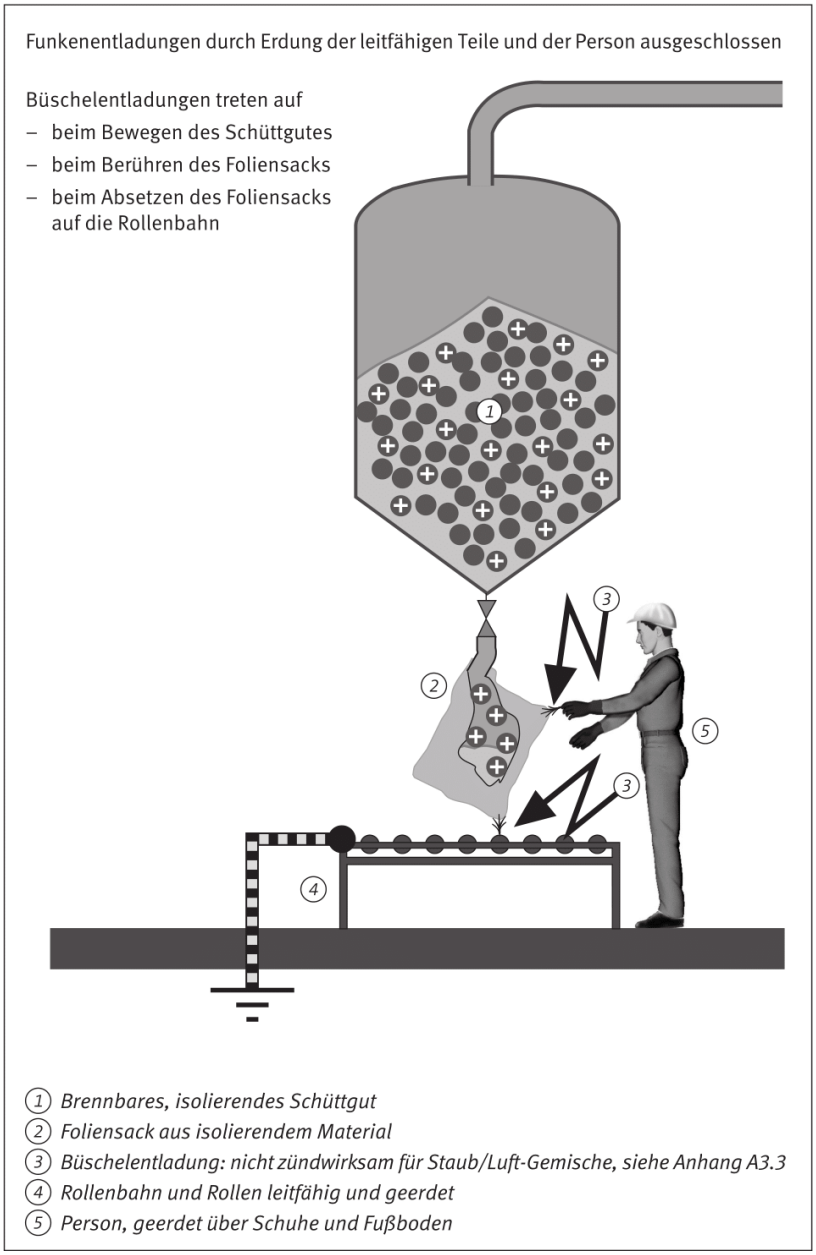
(3) Isolierende Behälter können verwendet werden, wenn zusätzlich zu den Maßnahmen nach Nummer 6.2.3 mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

1. Volumen $< 0{,}25\ m^3$,
2. Durchschlagspannung $U_D \leq 4$ kV bzw. $U_D \leq 6$ kV für textiles Gewebe, siehe auch Anhänge A3.4 und C für FIBC,
3. dokumentierter Nachweis, dass keine Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

6.2.3.4 Isolierende Behälter mit Einstellsäcken

(1) Leitfähige Einstellsäcke sollen in isolierenden Behältern vermieden werden. Ist ihr Einsatz unverzichtbar, sind sie sicher zu erden.

(2) Isolierende Einstellsäcke in isolierenden Behältern sind so zu beurteilen wie isolierende Behälter nach Nummer 6.2.3.3.



Beispiel 9: Befüllen isolierender Kunststoffsäcke mit Schüttgut in Zonen 21 und 22

6.3 Schüttgüter in Gegenwart brennbarer Gase oder Dämpfe

Bei Anwesenheit brennbarer Gase oder Dämpfe muss je nach ihrer Konzentration mit der Entzündung einer explosionsfähigen Gas- oder Dampfatmosphäre oder mit der Entzündung eines so genannten hybriden Gemisches (Gemisch aus brennbaren Gasen oder Dämpfen und brennbaren Stäuben mit Luft) gerechnet werden. Die Mindestzündenergie (*MZE*) wird wesentlich durch anwesende gas- oder dampfförmige Komponenten bestimmt und liegt meist niedriger als die *MZE* des reinen Staubes.

Hinweis: Anstelle der Eigenschaften niedriger, mittlerer oder hoher spezifischer Widerstand von Schüttgütern genügt im Folgenden die Unterscheidung des spezifischen Widerstandes an der Grenze 10^8 Ωm.

6.3.1 Maßnahmen bei spezifischem Widerstand $\rho \geq 10^8\ \Omega m$

(1) Die offene Handhabung von lösemittelfeuchten Schüttgütern mit einem spezifischen Widerstand $\rho \geq 10^8\ \Omega m$ ist zu vermeiden.

Hinweis: Die Handhabung von Schüttgütern mit einem spezifischen Widerstand $\rho \geq 10^8\ \Omega m$ erzeugt in der Regel hohe elektrostatische Aufladungen, so dass Büschelentladungen nicht sicher vermieden werden können. Die Entzündung des gefährlichen explosionsfähigen Gemisches ist deshalb möglich.

(2) In diesen Fällen sind zusätzliche Maßnahmen des Explosionsschutzes notwendig. Ggf ist die Gefährdungsbeurteilung im Hinblick auf die Vermeidung gefährlicher explosionsfähiger Gemische, z. B. durch Inertisierungsmaßnahmen oder Vermeiden des hybriden Gemisches, zu wiederholen. Weitere Maßnahmen sind Arbeiten im Vakuum oder in druckfesten Behältern oder Abkühlen deutlich unter die Temperatur des Flammpunktes.

6.3.2 Maßnahmen bei spezifischem Widerstand $\rho < 10^8\ \Omega m$

Ist der spezifische Widerstand des Schüttgutes $\rho < 10^8\ \Omega m$, z. B. bei Schüttgütern, die ein polares Lösemittel enthalten, muss die Handhabung in leitfähigen geerdeten Anlagen erfolgen.

Hinweis: Bei größeren Schüttgutmengen ist eine repräsentative Probenahme zur Beurteilung des spezifischen Widerstandes notwendig. Anstelle des spezifischen Widerstandes kann auch die Bestimmung der Feuchte im Schüttgut aussagefähig sein. Sowohl das Schüttgut als auch die brennbare Flüssigkeit können durch den Eintrag in den Behälter oder durch die Zugabe in die Flüssigkeit gefährlich aufgeladen werden.

6.3.3 Eintrag von Schüttgut in Behälter mit brennbaren Gasen oder Dämpfen

(1) Der Eintrag von Schüttgut in einen Behälter, der brennbare Gase oder Dämpfe enthält, soll möglichst in einem geschlossenen System und unter Inertgas erfolgen. Der offene Eintrag von Schüttgut ist zu vermeiden.

Hinweis 1: Elektrostatische Aufladungen beim Eintrag von Schüttgut aus Metall- oder Kunststofffässern oder aus Kunststoffsäcken in brennbare Flüssigkeiten verursachten bislang zahlreiche Brände und Explosionen.

Hinweis 2: Elektrostatische Aufladungen werden erzeugt, wenn das Schüttgut aus einem Behälter geschüttet oder über eine Rutsche in den Sammelbehälter fließt.

Hinweis 3: Sofern keine Maßnahmen ergriffen werden, können sich gefährlich hohe Potenziale am Behälter während des Entleerens, an einem Einstellsack im Behälter, am Sammelbehälter, an der Laderutsche, am Schüttgutstrom, am Produkt im Sammelbehälter sowie an Personen, die mit der Handhabung und Bedienung befasst sind, aufbauen.

(2) Lässt sich der offene Eintrag von Schüttgut in eine explosionsfähige Atmosphäre nicht vermeiden, sind besondere Maßnahmen vorzusehen, welche die Aufladungen auf ein ungefährliches Maß begrenzen:

1. Schüttgutbehälter oder Packmittel müssen aus leitfähigem oder ableitfähigem Material bestehen; während des Schüttens müssen leitfähige geerdet sein und ableitfähige Erdkontakt besitzen.

Hinweis 1: Schüttgutbehälter oder Packmittel aus ableitfähigen Materialien können z. B. aus Metall, Papier oder ableitfähigen Verbundmaterialien bestehen. Zu ihnen zählen z. B. auch Packmittel aus kunststoffkaschiertem Papier.

Hinweis 2: Bei Packmitteln aus ableitfähigen Materialien, z. B. Papiersäcken, kann ein ausreichender Erdkontakt über die Person durch Anfassen erreicht werden. Bei diesem Vorgehen ist unverzichtbar, dass die Ableitfähigkeit des Fußbodens, des Schuhwerkes sowie der Handschuhe gegeben ist und nicht durch Verschmutzungen herabgesetzt wird.

Hinweis 3: Bei der Lagerung ist zu beachten, dass die Ableitfähigkeit der Verpackung nicht verloren geht, z. B. durch sehr trockene Lagerung.

2. Isolierende Einstellsäcke dürfen nicht verwendet werden.
3. Einstellsäcke aus leitfähigem oder ableitfähigem Material dürfen nur benutzt werden, wenn sichergestellt ist, dass sie mit dem Behälter fest verbunden sind und beim Einstellen und Herausnehmen geerdet bleiben. Andernfalls muss das Einstellen und Herausnehmen der Säcke außerhalb des explosionsgefährdeten Bereiches erfolgen. Während der Handhabung darf sich der eingestellte Sack nicht von der Behälterinnenwand ablösen.
4. Isolierend beschichtete oder mehrlagige Packmittel sollen möglichst vermieden werden.
5. Isolierend beschichtete Packmittel dürfen nur dann entleert werden, wenn
   a) die Beschichtung bzw. die produktberührende Lage dünner als 2 mm ist und
   b) die Beschichtung bzw. die produktberührende Lage beim Leeren mit dem Behälter verbunden bleibt und
   c) das Packmittel Erdkontakt besitzt.
6. Eintragshilfen müssen leitfähig und geerdet sein.

   Hinweis: Eintragshilfen sind z. B. Schaufeln, Trichter oder Rutschen.
7. Die Erdung der beteiligten Personen ist sicherzustellen.
8. Begrenzung des Massenstroms $dm/dt < 1$ kg/s.

(3) Entsteht durch Zugabe eines Schüttgutes in eine Vorlage eine Suspension oder Emulsion – eventuell auch nur kurzzeitig – so ist zu beachten, dass z. B. beim Rühren unabhängig vom eigentlichen Schüttvorgang eine gefährliche Aufladung im Gefäß erzeugt werden kann. In diesen Fällen ist Nummer 4.11 zu beachten.

Hinweis: Ein typisches Beispiel ist die Zugabe von Pigmenten bei der Herstellung einiger Farben und Lacke.

6.4 Rohre und Schläuche für Schüttgüter

Beim Transport von Schüttgütern durch Rohre und Schläuche können sich sowohl das Schüttgut als auch die Rohre und Schläuche aufladen. Die Höhe der Aufladung hängt von den Stoff- und Materialeigenschaften sowie den Förderbedingungen ab. Je nach Aufbau und Widerstand des Wandmaterials können Korona-, Büschel-, Funken- und Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Diese Entladungen können eine Zündgefahr sowohl für das transportierte Schüttgut, als auch für die Umgebung der Rohre und Schläuche darstellen.

Rohre und Schläuche können sowohl zur Aspiration als auch zum pneumatischen Transport verwendet werden.

6.4.1 Aspiration

(1) Rohre und Schläuche aus isolierenden Materialien sind zur Aspiration zulässig, wenn nur eine geringe Staubbeladung im Inneren der Schlauchleitung vorliegt und somit nur selten und kurzzeitig mit dem Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Staubatmosphäre zu rechnen ist.

(2) Unabhängig von der Wahl des Schlauchmaterials sind alle leitfähigen Teile des Schlauches, z. B. Stützwendeln, Armaturen zu erden.

(3) In Anwesenheit brennbarer Gase oder Dämpfe gelten die Anforderungen gemäß Nummer 6.4.2.

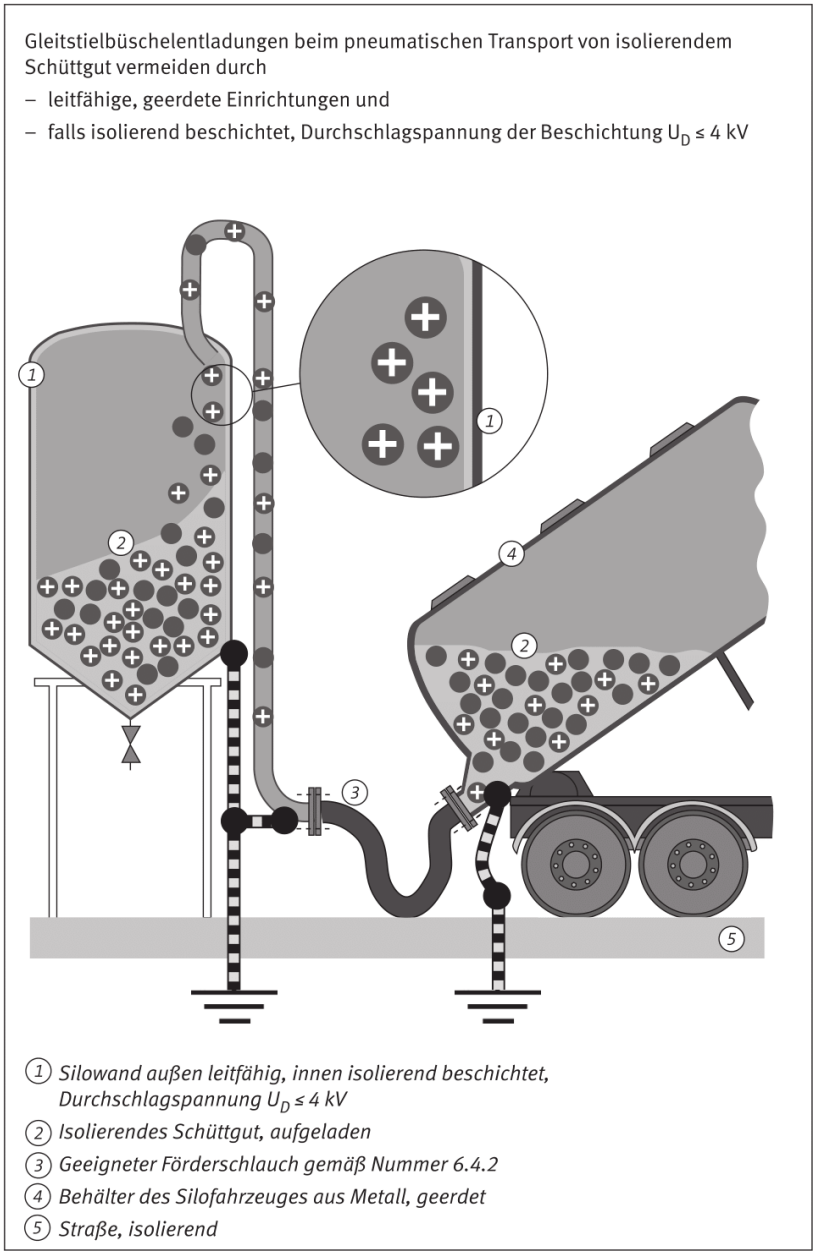
6.4.2 Pneumatischer Transport

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

(2) Im Folgenden werden Rohre und Schläuche hinsichtlich ihres Wandaufbaues und der verwendeten Materialien unterschieden. Für eine Charakterisierung des Wandmaterials als leitfähig oder ableitfähig darf entgegen Nummer 2 Absatz 11 bzw. 13 nur der Durchgangswiderstand (spezifische Widerstand) herangezogen werden. Eine Charakterisierung über den Oberflächenwiderstand allein ist nicht zulässig.

Hinweis 1: Angaben zur Bewertung der Rohre und Schläuche finden sich in Anhang B.

Hinweis 2: Insbesondere bei Fallhöhen größer 3 m kann auch eine Förderung mittels Schwerkraft einen stark ladungserzeugenden Prozess darstellen. In diesem Fall gelten dieselben Anforderungen wie für den pneumatischen Transport.



Beispiel 10: Pneumatische Förderung brennbarer Schüttgüter

6.4.2.1 Rohre und Schläuche mit homogenem leitfähigem Wandmaterial

(1) Bei Rohren und Schläuchen aus homogenem leitfähigem Wandmaterial treten keine Gleitstielbüschelentladungen auf.

(2) Um Funkenentladungen und auch Korona- und Büschelentladungen an Rohren und Schläuchen aus leitfähigem Material zu vermeiden, sind sie wenigstens an einem Ende zu erden und die Länge ist zu begrenzen.

(3) Tabelle 9 zeigt zulässige Längen für verschiedene Wertepaare aus Wandstärke und spezifischem Widerstand des Wandmaterials für Rohre und Schläuche, die an einem Ende geerdet sind. Für an beiden Enden geerdete Rohre und Schläuche gilt der zweifache Wert.

(4) Für Rohre und Schläuche aus Metall liegt die zulässige Rohrlänge bei einer Wandstärke von 1 mm bei mehreren Kilometern.

Tabelle 9: Zulässige Länge von an einem Ende geerdeten Rohren und Schläuchen in Abhängigkeit von der Wandstärke und dem spezifischen Widerstand des Wandmaterials

Wandstärke (mm)	zulässige Länge (m) bei einem spezifischen Widerstand (Ωm) von		
	1	1 000	10 000
0,5	17	0,55	0,17
1	24	0,77	0,24
2	35	1,1	0,35
3	42	1,3	0,42
5	55	1,7	0,55
8	69	2,2	0,69
10	77	2,5	0,77

6.4.2.2 Rohre und Schläuche aus leitfähigem Wandmaterial mit Drahteinlagen

Werden in eine Schlauch- oder Rohrwand aus leitfähigem Material nicht ummantelte metallische Drähte eingelegt, kann die Leitfähigkeit längs des Schlauches oder Rohres verbessert werden. Wenn der Abstand von jedem Ort der Wand zu den Drähten kleiner ist als die zulässige Länge nach Nummer 6.4.2.1, kann eine Längenbeschränkung entfallen. Die Drahteinlagen sind zu erden.

Hinweis: Zur Verwendung von ableitfähigem Wandmaterial mit Drahteinlagen siehe Nummer 6.4.2.4.

6.4.2.3 Rohre und Schläuche mit Wänden aus mehreren Schichten

(1) Genügt die produktberührte Schicht Nummer 6.4.2.1 oder 6.4.2.2, treten innen keine Entladungen auf.

(2) Ist die produktberührte Schicht aus einem Material mit einem spezifischen Durchgangswiderstand kleiner als 10^9 Ωm und einer relativen Permittivität von weniger als 20 und genügt die darauf folgende Schicht den Anforderungen nach Nummer 6.4.2.1 oder 6.4.2.2, treten innen keine Entladungen auf.

(3) Treten außen keine stark ladungserzeugenden Prozesse auf oder besteht die äußerste Schicht aus leitfähigem oder ableitfähigem Material, treten außen keine Entladungen auf.

Hinweis: Die äußerste Schicht darf isolierend sein, wenn andere Kriterien, z. B. die nach Nummer 3.2.1, anwendbar und erfüllt sind.

(4) Alle leitfähigen Bestandteile der Rohre und Schläuche sind zu erden und alle ableitfähigen Bestandteile der Rohre und Schläuche sind mit Erde in Kontakt zu bringen.

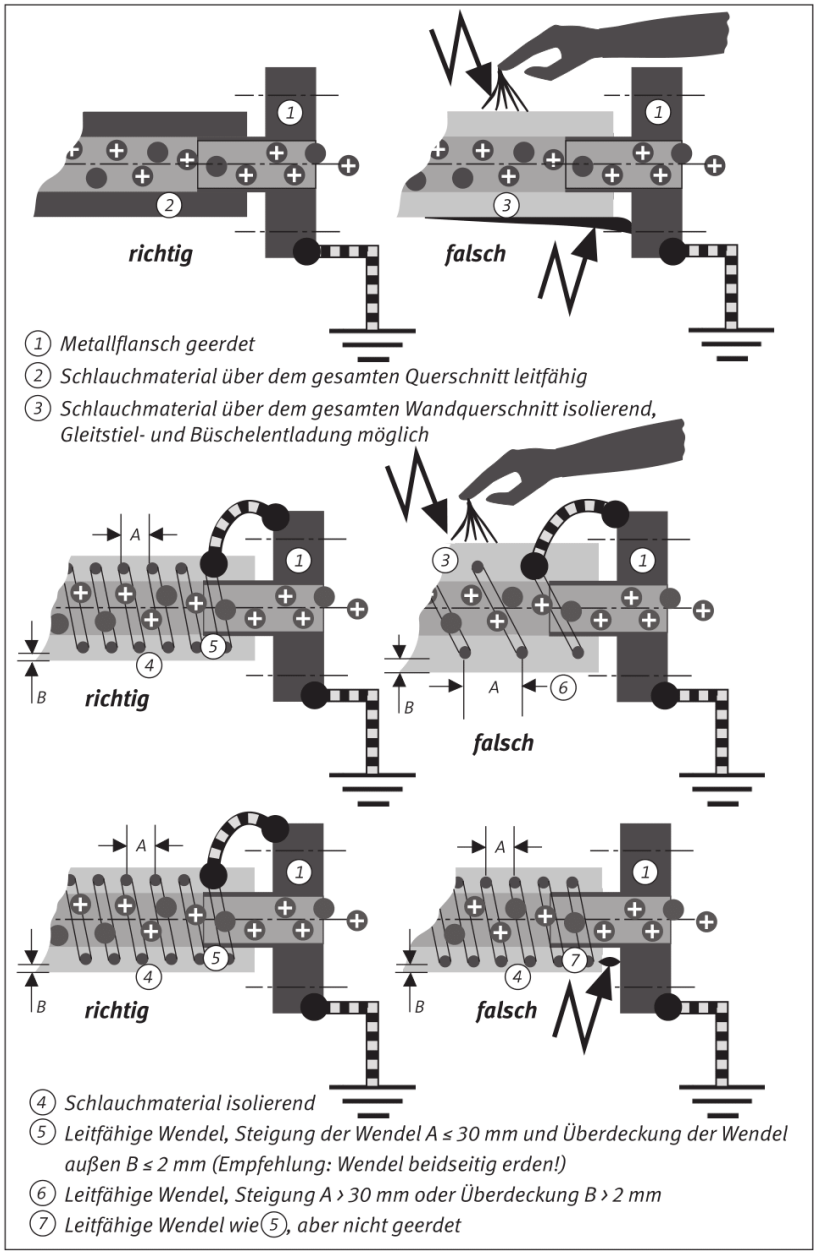
Hinweis: Die Anforderungen an die Schichten betreffen auch Haftvermittler o. ä. zwischen den Schichten.

6.4.2.4 Stützwendelschläuche

(1) Stützwendelschläuche sind nur für den pneumatischen Transport zulässig, wenn sie alle nachfolgenden Eigenschaften besitzen:

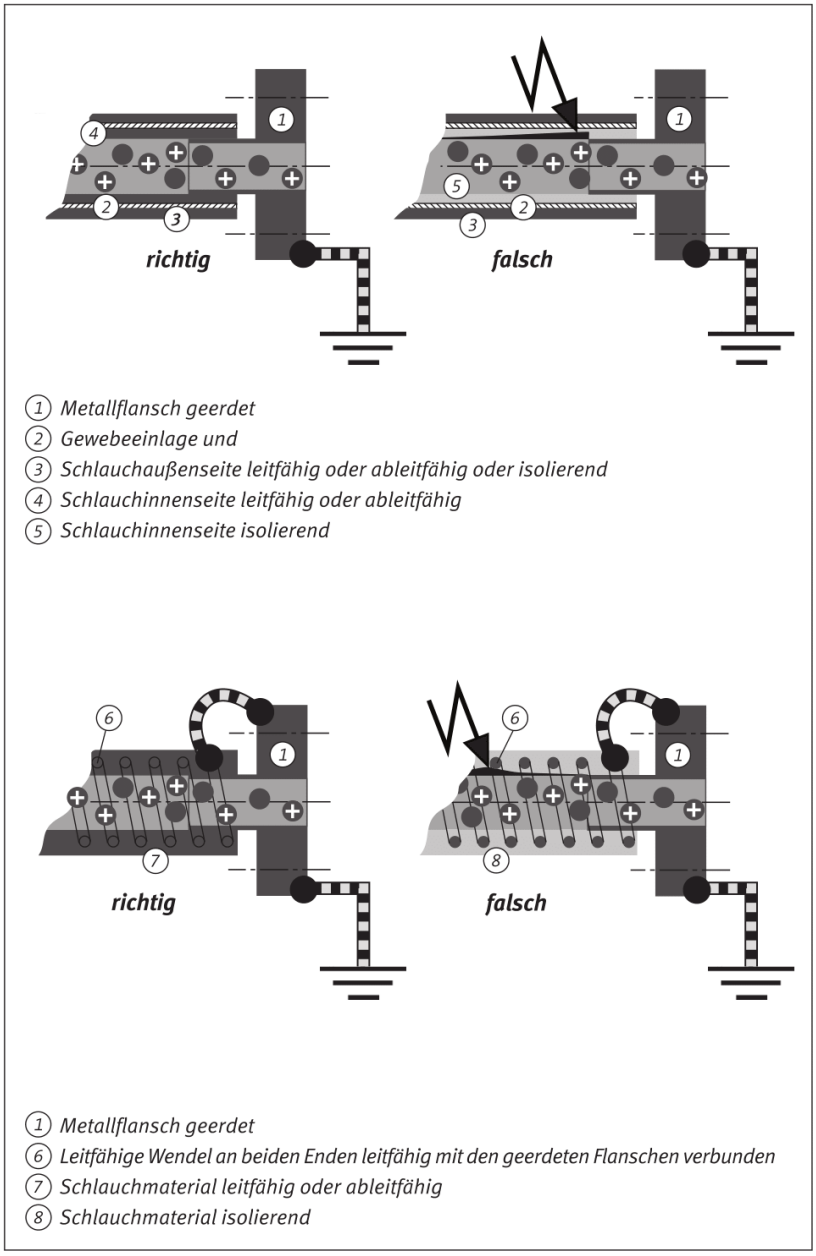
1. Als Stützwendel werden ausschließlich metallisch blanke, unisolierte, nicht ummantelte Drähte verwendet.
2. Die Stützwendel ist beidseitig geerdet.
3. Der Wendeldrahtdurchmesser liegt zwischen 1 mm und 2 mm.
4. Der Abstand (Schichtdicke) der inneren Schlauchwandoberfläche zur Wendeldrahtoberfläche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

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



① Metallflansch geerdet
② Schlauchmaterial über dem gesamten Querschnitt leitfähig
③ Schlauchmaterial über dem gesamten Wandquerschnitt isolierend, Gleitstiel- und Büschelentladung möglich
④ Schlauchmaterial isolierend
⑤ Leitfähige Wendel, Steigung der Wendel A ≤ 30 mm und Überdeckung der Wendel außen B ≤ 2 mm (Empfehlung: Wendel beidseitig erden!)
⑥ Leitfähige Wendel, Steigung A > 30 mm oder Überdeckung B > 2 mm
⑦ Leitfähige Wendel wie ⑤, aber nicht geerdet

Beispiel 11: Schläuche zum pneumatischen Transport nicht brennbarer Schüttgüter durch Zone 1, die verursacht ist durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen IIA und IIB



Beispiel 12: Schläuche zum pneumatischen Transport brennbarer Schüttgüter

6.4.3 Kompensatoren

(1) Kompensatoren müssen in explosionsgefährdeten Bereichen so beschaffen sein und betrieben werden, dass sie nicht gefährlich aufgeladen werden. Sie sind möglichst kurz zu halten und so zu gestalten, dass sich möglichst keine Berührung zwischen Kompensator und strömendem Produkt ergibt.

(2) Leitfähige Materialien müssen geerdet sein, ableitfähige müssen mit Erdkontakt versehen sein.

(3) Für Kompensatoren, die beim pneumatischen Transport oder bei der Förderung mittels Schwerkraft mit Fallhöhen größer als 3 m eingesetzt werden, gelten die gleichen Anforderungen wie für Rohre und Schläuche nach Nummer 6.4.2.

(4) Beim Einsatz in Aspirationsleitungen und bei Förderung mittels Schwerkraft bei Fallhöhen bis 3 m sind in Abwesenheit von brennbaren Gasen und Dämpfen in der Regel keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

(5) Bei Anwesenheit von brennbaren Gasen und Dämpfen sind beim Einsatz isolierender Materialien zusätzlich Maßnahmen gegen Büschelentladungen nach Nummer 3.2 zu ergreifen.

6.5 Filterelemente in Staubabscheidern

(1) Filterelemente wie Filterschläuche, -patronen oder -kassetten bestehen i. d. R. aus Filtermaterialien, z. B. Papier, Gewebe oder Sintermaterial, und einer Rahmenkonstruktion. An Filterelementen in filternden Staubabscheidern kann es zu elektrostatischen Entladungen kommen.

Hinweis 1: Beim Einsatz von filternden Abscheidern sind mehrere elektrostatische Zündgefahren zu beachten:

- Von isolierten leitfähigen Teilen können Funkenentladungen ausgehen (siehe Anhang A3.1).
- Isolierend beschichtete und staubberührte Flächen der Abscheider können zu zündwirksamen Gleitstielbüschelentladungen führen (siehe Anhang A3.4).
- Im Staubsammelraum kann es je nach Durchmesser des Staubsammelraumes und der Eigenschaften des Staubes zu zündwirksamen Schüttkegelentladungen kommen. Zur Beurteilung der Zündwirksamkeit ist die Äquivalentenergie zu bestimmen (siehe Anhang A3.6).
- Büschelentladungen sind nur dann zu beachten, wenn brennbare Gas/Luft-Gemische oder hybride Gemische vorhanden sind (siehe hierzu Nummer 6.3).

Hinweis 2: Bei Verwendung von Schläuchen und Rohrleitungen zur Förderung von brennbaren Stäuben in Staubabscheider siehe Nummer 6.4.

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

Hinweis: In filternden Abscheidern können die Erdverbindungen starken mechanischen Belastungen ausgesetzt sein. Daher ist die Erdung bzw. der ausreichende Erdkontakt wiederkehrend zu prüfen (siehe Nummer 8.7).

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

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

Hinweis 1: Filtermaterialien aus Gewebe (z. B. Nadelfilze oder Vliese), die mit leitfähigen Fasern ausgerüstet sind, gelten als ableitfähig, wenn ihr Streifenwiderstand $R_{ST} \leq 10^8\ \Omega$ beträgt.

Hinweis 2: Stäube können durch Büschelentladungen nicht gezündet werden. Bei den in Abscheidern auftretenden stark ladungserzeugenden Prozessen können jedoch auch sehr kleine isolierte leitfähige Teile so stark aufgeladen werden, dass sie für Stäube geringer Mindestzündenergie zündwirksame Funkenentladungen erzeu-

gen. Beim Einsatz isolierender Filtermaterialien ist es sehr schwierig, sicherzustellen, dass auch kleinste leitfähige Bauteile in die Erdung eingebunden sind.

(5) Bei leitfähigen Schüttgütern ist der Einsatz ableitfähiger Filtermaterialien mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8\ \Omega$ oder leitfähiger geerdeter Filtermaterialien erforderlich.

(6) Beim Auftreten hybrider Gemische in filternden Abscheidern ist der Einsatz ableitfähiger Filtermaterialien mit einem Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8\ \Omega$ oder leitfähiger geerdeter Filtermaterialien erforderlich.

6.6 Flexible Schüttgutbehälter (FIBC)

(1) Flexible Schüttgutbehälter werden bei Lagerung und Transport sowie in Produktionsprozessen, z. B. zur Aufnahme von Schüttgütern, Granulaten, verwendet. Elektrische Ladungen können während des Füllens und Entleerens erzeugt werden und sich auf dem Schüttgut selbst oder auf der Oberfläche des FIBC ansammeln. Von aufgeladenen FIBC können durch Influenz Gegenstände oder Personen aufgeladen werden. Insbesondere können auf dem FIBC abgelegte Werkzeuge oder nasse Stellen des Gewebes durch Influenz aufgeladen werden.

(2) Es werden die Typen A, B, C und D unterschieden. Typ A weist keine Schutzmaßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen auf. Bei den anderen Typen werden aufgrund verschiedener physikalischer Prinzipien Büschelentladungen (Typ C und D), Gleitstielbüschelentladungen (Typ B, C und D) und Funkenentladungen (Typ B, C und D) vermieden.

Hinweis: Eigenschaften einzelner Typen sind im Anhang C zusammengestellt.

(3) In explosionsgefährdeten Bereichen erfolgt der Einsatz der FIBC-Typen gemäß nachstehender Tabelle 10. Sie gibt Hinweise auf die geeignete Wahl von FIBC unter Berücksichtigung des zu handhabenden Schüttgutes und der Umgebungsbedingungen.

(4) FIBC Typ A sind für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen grundsätzlich nicht geeignet.

(5) In Gegenwart brennbarer Gase, Dämpfe oder Stäube müssen FIBC des Typs C während des Befüllens oder Entleerens geerdet sein.

(6) In der Umgebung von FIBC Typ D müssen in Gegenwart brennbarer Gase, Dämpfe oder Stäube alle Personen und leitfähigen Gegenstände, die gefährlich aufgeladen werden können, geerdet werden.

Hinweis: Diese Forderung leitet sich aus dem physikalischen Wirkungsprinzip von FIBC des Typs D ab.

(7) Etiketten oder Dokumententaschen usw. an FIBC Typ B, C und D dürfen keine zündwirksamen Entladungen verursachen.

(8) Kommen Einstellsäcke in FIBC zum Einsatz, ist das Packmittel als Ganzes zu bewerten, da die Typeinteilung des Herstellers die Verwendung von Einstellsäcken in der Regel nicht mit abdeckt.

(9) Schüttgut mit einem spezifischen Widerstand der Schüttung von weniger als $10^6\ \Omega$m darf nur in FIBC eingefüllt oder aus diesen entleert werden, wenn die Erdung des Schüttgutes im FIBC während des Befüllens bzw. Entleerens gewährleistet ist.

Hinweis 1: Die Erdung des Schüttgutes kann z. B. durch Einstellen eines geerdeten leitfähigen Stabes erfolgen.

Hinweis 2: Selbst die Verwendung von FIBC Typ C stellt die Erdung des Schüttgutes nicht ohne weitere Maßnahmen sicher. Bei diesem Typ ist eine Durchschlagspannung von bis zu 6 kV zulässig, so dass zündwirksame Funkenentladungen auftreten können, siehe auch Anhang C.

Tabelle 10: Auswahl geeigneter FIBC-Typen in Abhängigkeit von Schüttgut und Einsatzbedingungen

Mindestzündenergie (*MZE*) des Schüttgutes	Befüll- und Entleereinrichtung befindet sich im			
	nicht explosionsgefährdeten Bereich	explosionsgefährdeten Bereich der		
		Zone 21 oder 22	Zone 2	Zone 1
nicht staubexplosionsfähig oder 1 000 mJ < *MZE*	A, B, C, D	A[4], B[4], C, D	C, D	C[1], D[1]
3 mJ < *MZE* ≤ 1 000 mJ	B, C, D	B, C, D	C, D	C[1], D[1]
MZE[5] ≤ 3 mJ	C, D	C, D	C, D	C[1], D[1]
Staub mit brennbarem Lösemittelanteil[3]	C[2], D[2]	C[2], D[2]	C[2], D[2]	C[2], D[2]

[1] beim Befüllen des FIBC nur in Verbindung mit zusätzlichen Maßnahmen, z. B. Spülen mit Luft

[2] beim Befüllen und Entleeren des FIBC nur in Verbindung mit zusätzlichen Maßnahmen, z. B. Inertisierung

[3] zur Konzentration der Lösemittelanteile siehe auch Nummer 6.2

[4] sofern das gehandhabte Schüttgut die Zone bestimmt

[5] Die Einschränkung, bei Schüttgut mit *MZE* ≤ 3 mJ nur FIBC Typ C oder Typ D einzusetzen, beruht auf der Zündwirksamkeit von Schüttkegelentladungen. Diese können in einem FIBC Typ B eine viel höhere Energie besitzen als in einem FIBC Typ C oder Typ D.
Im Fall eines FIBC Typ B kann die Schüttkegelenergie bereits für Schüttgut mit einem Medianwert von nur 0,055 mm einen Wert von 3 mJ erreichen. In einem FIBC Typ C oder Typ D muss der Medianwert des Schüttguts bei 0,27 mm oder höher liegen, damit die Schüttkegelenergie 3 mJ erreicht; üblicherweise besitzt derart grobes Schüttgut aber eine *MZE* von mehr als 3 mJ.

7 Elektrostatische Aufladung von Personen und persönlichen Schutzausrüstungen (PSA)

(1) Personen, die in explosionsgefährdeten Bereichen tätig sind, dürfen nicht gefährlich aufgeladen werden.

Hinweis: Personen können aufgeladen werden, z. B. beim Gehen, beim Aufstehen von einem Sitz, beim Kleiderwechsel, beim Umgang mit Kunststoffen, durch Schütt- oder Füllarbeiten oder durch Influenz beim Aufenthalt in der Nähe aufgeladener Gegenstände. Berührt eine aufgeladene Person einen leitfähigen Gegenstand, z. B. einen Türgriff, treten Funkenentladungen auf. Die Wahrnehmungsschwelle beträgt 0,5 mJ und kann bereits zündwirksam sein. Der typische Wert für die gespeicherte Energie einer Person beträgt 10 mJ und der höchste zu erwartende Wert 15 mJ. Beim Entladungsvorgang wird i. d. R. nur ein Teil dieser Energie zündwirksam.

(2) Personen, die ableitfähiges Schuhwerk auf ableitfähigen Fußböden tragen, laden sich nicht gefährlich auf, solange sie nicht einem stark ladungserzeugenden Prozess ausgesetzt sind. Haben Personen über den Fußboden keinen Erdkontakt,

ist dafür zu sorgen, dass sie in explosionsgefährdeten Bereichen nicht gefährlich aufgeladen werden.

Hinweis: Diese Situation kann z. B. bei Höhenarbeiten bzw. bei Auf- oder Abseilverfahren oder dem Tragen von Überschuhen auftreten.

(3) Aufstiegshilfen wie Leitern, Tritte, Podeste und Laufstege müssen so beschaffen sein, dass ein geforderter Erdkontakt der Person nicht unterbrochen wird. Dies ist z. B. durch Verwendung metallischer, geerdeter Aufstiegshilfen möglich.

Hinweis: Sowohl eine nicht mit Erde verbundene Aufstiegshilfe, als auch eine darauf befindliche Person kann durch ladungserzeugende Vorgänge oder durch Influenz aufgeladen werden.

7.1 Ableitfähiges Schuhwerk

(1) In explosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 0, 1 und 20 ist ableitfähiges Schuhwerk mit einem Ableitwiderstand der Person gegen Erde von höchstens $10^8\ \Omega$ zu tragen. Die gleiche Forderung gilt in Zone 21 bei Stäuben mit *MZE* ≤ 10 mJ.

Hinweis: In der Regel sind Personen nicht in den Zonen 0 oder 20 tätig.

(2) In Bereichen, die durch explosionsgefährliche Stoffe oder Gemische gefährdet sind, ist ableitfähiges Schuhwerk zu benutzen.

(3) Ableitfähiges Schuhwerk darf nicht so verändert werden, dass die Ableitfähigkeit verloren geht.

Hinweis 1: Socken oder Strümpfe beeinträchtigen erfahrungsgemäß die Schutzwirkung der leitfähigen und ableitfähigen Schuhe nicht.

Hinweis 2: Handelsübliche Sicherheits-, Schutz- oder Berufsschuhe besitzen einen elektrischen Durchgangswiderstand zwischen 10^5 und $10^9\ \Omega$. Liegt ihr Durchgangswiderstand zwischen 10^8 und $10^9\ \Omega$, sind sie für den Einsatz in den oben genannten Bereichen nicht geeignet. Der Hersteller des Schuhs kann Auskunft über den elektrischen Durchgangswiderstand geben.

Hinweis 3: Schuheinlagen können die ableitfähige Eigenschaft von Schuhen beeinträchtigen. Die Forderung nach ableitfähigem Schuhwerk gilt auch für orthopädisch gefertigte oder veränderte Schuhe.

7.2 Ableitfähige Fußböden

Fußböden in explosionsgefährdeten Bereichen müssen so ausgeführt sein, dass sich Personen beim Tragen ableitfähiger Schuhe nicht gefährlich aufladen.

Hinweis: Fußböden entsprechend Nummer 8.2 besitzen diese Eigenschaften.

7.3 Kleidung

(1) Arbeitskleidung oder Schutzkleidung darf in explosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 0 und 1 nicht gewechselt, nicht aus- und nicht angezogen werden.

Hinweis: Handelsübliche Bekleidung sowie Schutzkleidung kann aufgeladen werden. Beim Tragen stellt sie im Allgemeinen keine Zündgefahr dar, sofern die Person z. B. durch geeignetes Schuhwerk und geeignete Fußböden geerdet ist. Trotzdem kann es im Einzelfall, z. B. bei PU-beschichteter Wetterschutzkleidung, zu gefährlichen Aufladungen kommen.

(2) In Bereichen der Zone 0 und in Bereichen, in denen mit einer Sauerstoffanreicherung oder mit dem Auftreten von Gefahrstoffen der Explosionsgruppe IIC zu rechnen ist, darf nur ableitfähige Kleidung getragen werden.

(3) Die Ableitfähigkeit der Kleidung darf, z. B. durch Waschen, nicht beeinträchtigt werden; gegebenenfalls ist die Kleidung wieder neu zu behandeln.

Hinweis 1: Ableitfähige Kleidung oder Textilien besitzen einen spezifischen Oberflächenwiderstand $R_{\square} < 5 \cdot 10^{10}\ \Omega$.

Hinweis 2: Die ableitfähige Eigenschaft der Kleidung kann durch spezielle nachträgliche Ausrüstung der Textilien erreicht werden.

(4) Wird die Ableitfähigkeit des Gewebes durch eingearbeitete leitfähige Fäden erreicht, ist sicherzustellen, dass diese Fäden während des Gebrauchs Erdkontakt haben und nicht brechen.

7.4 Handschuhe

Werden in explosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 0, 1 und 20 sowie in Zone 21 bei Stäuben mit *MZE* ≤ 10 mJ Handschuhe getragen, dürfen diese nicht isolierend sein.

Hinweis: Durch Handschuhe aus isolierendem Material werden in der Hand gehaltene Objekte von Erde isoliert und können gefährlich aufgeladen werden. Zur Erdung von in der Hand gehaltenen Gegenständen soll der Durchgangswiderstand der Handschuhe weniger als $10^8\ \Omega$ betragen.

7.5 Kopfschutz

(1) Ist das Tragen von Kopfschutz in Zone 1 erforderlich, soll er auch dann getragen werden, wenn nur solcher aus isolierenden Materialien verfügbar ist.

Hinweis: Erforderlicher Kopfschutz kann der Industrieschutzhelm oder die Industrie-Anstoßkappe sein.

(2) In Zone 0 soll nur Kopfschutz aus ableitfähigem Werkstoff getragen werden.

7.6 Sonstige persönliche Schutzausrüstungen

Persönliche Schutzausrüstungen dürfen, z. B. bei Wartungsarbeiten oder bei Notfalleinsätzen, in explosionsgefährdeten Bereichen oder bei Anwesenheit von explosionsfähigen Gemischen nicht gefährlich aufgeladen werden.

Hinweis 1: Bei der Bewertung elektrostatischer Zündgefahren sind sowohl isolierende Kunststoffe (z. B. Sichtscheiben, Bänderungen, Chemikalienschutzanzüge etc.) als auch isolierte Metallteile (z. B. Beschläge, Pressluftflaschen) zu berücksichtigen.

Hinweis 2: Beim Abseilen in Behälter, Silos oder enge Räume wird die PSA selbst nicht gefährlich aufgeladen. Auch eine frei hängende Person lädt sich in der Regel nicht gefährlich auf. Übt diese Person jedoch eine Tätigkeit aus, die zu einer gefährlichen Aufladung führen kann, ist für eine ausreichende Personenerdung zu sorgen.

8 Erdung und Potenzialausgleich

(1) Zur Vermeidung gefährlicher Aufladungen in explosionsgefährdeten Bereichen sind Personen sowie Gegenstände oder Einrichtungen aus leitfähigem oder ableitfä-

higem Material nach Nummer 3.1 zu erden bzw. mit Erdkontakt zu versehen. Entsprechendes gilt auch für leitfähige oder ableitfähige Medien, z. B. Flüssigkeiten oder Schüttgüter.

Hinweis 1: Leitfähige Medien und Gegenstände können auf Grund ihres niedrigen Widerstandes geerdet werden.

Hinweis 2: Ableitfähige Medien und Gegenstände besitzen einen Ableitwiderstand $R_E > 10^6\ \Omega$ und liegen somit oberhalb des Definitionsbereiches „geerdet“. Deshalb spricht man hier von „mit Erde verbinden“.

Hinweis 3: Elektrostatische Aufladungen leitfähiger isolierter Gegenstände bilden eine wesentliche Gefahrenquelle, da die gespeicherte Energie in einer Entladung zur Erde oder auf einen anderen leitfähigen geerdeten Gegenstand übergehen kann.

Hinweis 4: Maßnahmen zur Erdung und zum Potenzialausgleich aus der Blitzschutz-Technik können zur elektrostatischen Erdung genutzt werden.

(2) Bestehen Einrichtungen aus mehreren leitfähigen Komponenten, sind diese einzeln zu erden oder untereinander elektrisch leitend zu verbinden und insgesamt zu erden.

8.1 Ableitung statischer Elektrizität von leitfähigen Gegenständen

(1) Im Allgemeinen soll der Ableitwiderstand $10^6\ \Omega$ nicht überschreiten. Ein Ableitwiderstand R_E von $10^8\ \Omega$ reicht jedoch aus, wenn z. B. die Ladestromstärke $I < 10^{-6}$ A und die Kapazität $C < 100$ pF betragen. Kleine Gegenstände gelten als elektrostatisch geerdet, wenn ihre Relaxationszeit 10^{-2} s unterschreitet.

Hinweis 1: R_E ist der Ableitwiderstand eines Gegenstandes zur Erde. Er beeinflusst entscheidend die Aufladung eines Gegenstandes und die Relaxation seiner Ladungen.

Hinweis 2: Der Zusammenhang zwischen Potenzial, Ladestromstärke und Erdableitwiderstand wird in Anhang E erläutert.

Hinweis 3: Leitfähige Gegenstände werden aufgeladen, wenn die Geschwindigkeit der Ladungsaufnahme die der Ladungsableitung überschreitet. Eine gefährliche zündwirksame Entladung tritt auf, wenn die elektrische Feldstärke die Durchschlagspannung der Atmosphäre überschreitet und die in der Entladung freiwerdende Energie gleich oder größer der Mindestzündenergie der vorliegenden explosionsfähigen Atmosphäre ist.

(2) In Bereichen, in denen mit besonders zünd- oder anzündempfindlichen Explosivstoffen umgegangen wird, darf der Ableitwiderstand von Gegenständen $10^5\ \Omega$ nicht überschreiten.

(3) Die Erdung und der Potenzialausgleich müssen zuverlässig und dauerhaft sein und den zu erwartenden Beanspruchungen, insbesondere durch Korrosion, standhalten.

8.2 Ableitwiderstand von Fußböden

(1) Ein Fußboden ist ableitfähig, wenn sein Ableitwiderstand $10^8\ \Omega$ unterschreitet. In explosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 0, 1, 20 sowie in Zone 21 bei Stäuben mit $MZE \leq 10$ mJ sind ableitfähige Fußböden erforderlich. Verschmutzungen,

z. B. durch Farb- oder Ölreste oder ungewollte Isolierung, z. B. durch abgelegte Folien oder Leergut, sind zu vermeiden.

Hinweis: Da zur Bestimmung des Ableitwiderstandes von Fußböden unterschiedliche Prüfnormen mit entsprechenden Prüfverfahren angewendet werden können, soll bereits vor der Lieferung und Verlegung von Fußbodenbelägen in der Ausschreibung auf das in der Abnahme anzuwendende Prüfverfahren und die einzuhaltenden Höchstwerte hingewiesen werden. Tabelle 19 in Anhang H gibt typische Erfahrungswerte für verschiedene Fußböden wieder.

(2) Bei geklebten Fußbodenbelägen ist auf die ausreichende Leitfähigkeit der verwendeten Klebstoffe zu achten.

(3) Bei nicht ausreichender Ableitfähigkeit des Fußbodens ist durch besondere Maßnahmen, z. B. durch Feuchthalten, dafür zu sorgen, dass der Ableitwiderstand $10^8\ \Omega$ unterschreitet.

(4) Durch Fußbodenpflegemittel darf der Widerstand nicht erhöht werden.

Hinweis: Viele Fußbodenpflegemittel enthalten Wachse o. ä., um den Glanz zu erhöhen oder das Trocknen nach dem Wischen zu beschleunigen. Diese Wachse bilden oft einen isolierenden Film oder verändern die Feuchteaufnahme des Fußbodens.

(5) In Bereichen, die durch explosionsgefährliche Stoffe oder Gemische gefährdet sind, darf der Ableitwiderstand des Fußbodens $10^8\ \Omega$ nicht überschreiten.

8.3 Erdung und Potenzialausgleich in besonderen Fällen

(1) Meist wird mit der Energieversorgung eine Erdleitung verlegt. Darüber hinaus sind industrielle Anlagen normalerweise fest zusammengesetzt, z. B. durch Schraub- oder Schweißverbindungen, und der Ableitwiderstand beträgt bereits ohne zusätzliche Maßnahmen meist weniger als $10^6\ \Omega$.

(2) Nur wenn diese Maßnahmen nicht ausreichen, sind zusätzliche Erdungsleitungen notwendig.

8.3.1 Erdung eigensicherer Betriebsmittel

Eigensichere Betriebsmittel oder eigensichere Anlagen werden häufig betriebsbedingt erdfrei betrieben. In explosionsgefährdeten Bereichen sind dennoch leitfähige oder ableitfähige Gehäuse elektrostatisch zu erden. Können in explosionsgefährdeten Bereichen Teile der eigensicheren Schaltung, z. B. Sensorelektroden, berührt oder untereinander verbunden werden, z. B. über Steckverbindungen, ist die Schaltung elektrostatisch geerdet auszuführen. In diesem Fall genügt ein Ableitwiderstand $R_E \leq 10^8\ \Omega$.

Hinweis: Zum Bestehen der Isolationsprüfung mit 500 V muss ein eigensicheres Betriebsmittel oder eine eigensichere Anlage einen Widerstand $R \geq 15\ \text{k}\Omega$ gegen Erde aufweisen.

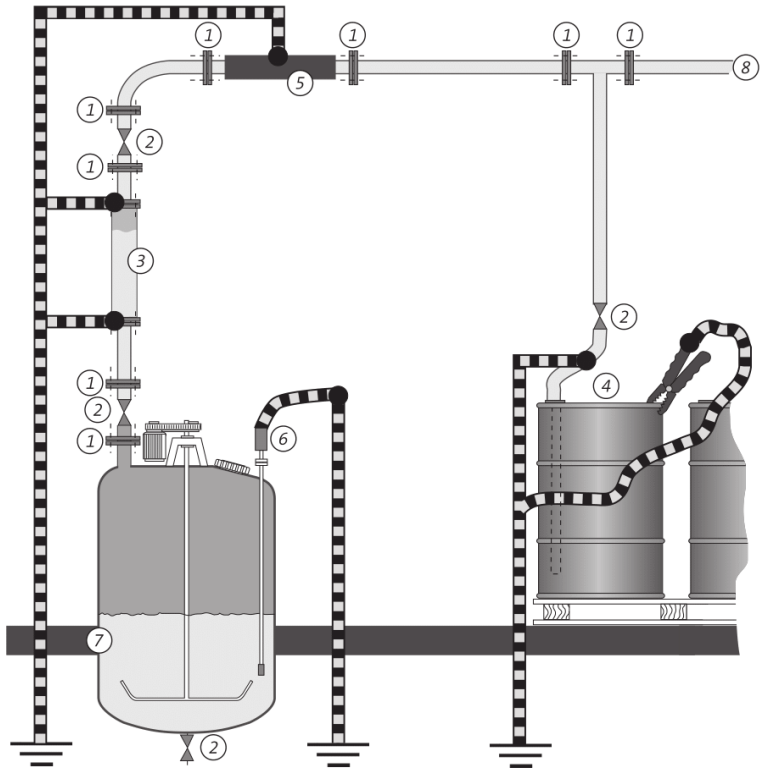
8.3.2 Leitfähige ortsfeste Einrichtungen

Anlagenteile, die nicht mit der Gesamtanlage elektrisch leitend verbunden sind, z. B. flexible oder schwingungsfähige Bauteile, sind getrennt zu erden.

Hinweis: Hierzu zählen z. B. Rohrleitungen mit isolierenden Zwischenstücken. Der Potenzialausgleich ist nur bei fehlendem metallischem Kontakt der einzelnen Rohrteile untereinander notwendig.

Metallische Einrichtungen und Rohrleitungen, auch beschichtete, sowie leitfähige Gehäuse und isoliert eingebaute Innenteile sind zu erden.

Empfehlung: Innenteile konstruktionsbedingt mit Flansch leitfähig verbinden.



(1) *Verschraubte Metallflansche, blank oder lackiert, unterbrechen die Erdung nicht; isolierend beschichtete, z. B. pulverbeschichtete, separat erden*
(2) *Absperrarmaturen mit geerdeten leitfähigen Innenteilen*
(3) *Schauglas m. leitfähigem geerdetem Gehäuse u. geerdeten Spannringen aus Metall*
(4) *Geerdete Schlauchleitung für Zone 1 geeignet, siehe Beispiel 6*
Empfehlung: leitfähiges geerdetes Tauchrohr verwenden, siehe Beispiel 2
(5) *Leitfähige Schutzabdeckung der Wärmeisolierung, geerdet*
(6) *Eigensichere, gemäß Nummer 8.3.1 elektrostatisch geerdete Messeinrichtung*
(7) *Rührkessel, leitfähig, über Gebäudestruktur geerdet*
(8) *Rohrleitung, leitfähig, über Gebäudestruktur geerdet*

Beispiel 13: Erdung in Zone 1

8.3.3 Leitfähige ortsbewegliche Einrichtungen

Ortsbewegliche metallische Gegenstände und Einrichtungen, z. B. Fässer, Container, Trichter, Kannen, Karren, werden im Allgemeinen nicht über die Gesamtanlage geerdet. Ihre Erdung erfolgt über eigene Erdungsanschlüsse. Insbesondere beim Füllen und Entleeren ist ein Ableitwiderstand $R_E < 10^6\ \Omega$ zu gewährleisten. Gegebenenfalls erfolgt die Erdung kleiner Gegenstände über Personen und den Fußboden.

8.3.4 Leitfähige Einrichtungen mit isolierenden Komponenten

(1) Die Erdung einer Anlage kann durch isolierende Komponenten, z. B. Dichtungen, oder durch isolierende Betriebsstoffe, z. B. Schmierfette, beeinträchtigt werden. Erfahrungsgemäß zeigen Öle und Fette in normaler Schmierfilmdicke, z. B. an rotierenden Wellen, Übergangswiderstände von nicht mehr als $10^3\ \Omega$.

(2) Beim Einsatz isolierender Materialien, z. B. Zwischenstücke aus Kunststoff mit hohem Widerstand, sind die verbleibenden leitfähigen Komponenten untereinander zu verbinden und zu erden.

(3) Alternativ kann jedes Anlagenteil für sich geerdet werden.

Hinweis 1: In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf von außen nicht sichtbare Teile zu achten, z. B. auf

1. Kugelventile mit isolierenden Dichtungen,
2. Metalleinlagen in Dichtungen,
3. Wellen und Durchführungen mit isolierenden Manschetten,
4. hohe oder dicke Abstandsringe,
5. Steckverbindungen aus Kunststoffen,
6. metallische Düsen am Ende eines Rohres aus Kunststoff.

Hinweis 2: Bei zusammengesetzten Anlagenteilen ist gegebenenfalls eine Herstellerauskunft einzuholen.

8.3.5 Gegenstände geringer elektrischer Kapazität

(1) Leitfähige Gegenstände mit einer Kapazität $C > 10$ pF sind zu erden. Die Erdung darf nur entfallen, wenn gefährliche Aufladungen nicht auftreten.

(2) Leitfähige Gegenstände mit einer Kapazität unter 10 pF sind gemäß Tabelle 11 zu erden. Darüber hinaus sind kleine leitfähige Gegenstände zu erden

1. unabhängig von ihrer Kapazität in der Nähe stark ladungserzeugender Prozesse,
2. wenn sie mit dem Produktstrom in einer Apparatur Berührung haben.

Hinweis 1: Zu den typischen kleinen Gegenständen zählen z. B. Schrauben und Muttern bis M8. Blechschrauben besitzen in der Regel eine Kapazität $C < 3$ pF.

Hinweis 2: Die Kapazität leitfähiger Teile wird von ihrer unmittelbaren Umgebung beeinflusst.

(3) Zur Beurteilung der Kapazität von Gegenständen ist ihre Kapazität im Einbauzustand, gegebenenfalls unter simulierten Bedingungen, zu bestimmen.

Hinweis: Für leitfähige Flansche an Glasapparaturen sind die Werte nach Tabelle 8 in Nummer 4.13 heranzuziehen.

Tabelle 11: Höchstzulässige Kapazitäten ungeerdeter kleiner Gegenstände, sofern keine stark ladungserzeugenden Prozesse auftreten

	Explosionsfähige Atmosphäre erzeugt durch Gefahrstoffe der Explosionsgruppen				
	I	**IIA**	**IIB**	**IIC**	**III**
untertage	10 pF				
Zone 0		3 pF	3 pF	keine isolierten leitfähigen Gegenstände oder Materialien	
Zone 1		6 pF	3 pF	3 pF	
Zone 2		–	–	–	
Zone 20 oder 21 *MZE* < 10 mJ					6 pF
Zone 20 oder 21 *MZE* > 10 mJ					10 pF
Zone 22					–

8.3.6 Medizinisch genutzte Räume mit explosionsgefährdeten Bereichen

(1) Wenn in medizinisch genutzten Räumen explosionsgefährdete Bereiche vorliegen, sind Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladungen erforderlich.

Hinweis 1: Die Zündempfindlichkeit explosionsfähiger Gemische hängt stark von der Konzentration des Oxidatorgases im Oxidatorgas/Inertgas-Gemisch ab. Wird z. B. das explosionsfähige Gemisch aus einem brennbaren Gefahrstoff und mit Sauerstoff angereicherter Umgebungsluft gebildet, liegt die Mindestzündenergie dieses Gemisches deutlich unter der des nur mit Umgebungsluft gebildeten explosionsfähigen Gemisches.

Hinweis 2: Explosionsgefährdete Bereiche können z. B. bei der Verwendung brennbarer Reinigungs- oder Desinfektionsmittel vorliegen.

(2) Zur Vermeidung von Aufladungen sollen Arbeitskleidung, Decken und Tücher unter den betriebsgemäß anzunehmenden Bedingungen ableitfähig sein.

(3) Decken, Tücher oder solche Gewebe und Gewirke, die nicht ableitfähig sind, sind auszuschließen, da sie bei Reibungs- und Trennungsvorgängen zu hohen Aufladungen führen können.

(4) Auch für typische Gegenstände und Einrichtungen in medizinischen Räumen, z. B. Gummitücher, -matratzen, -kopfkissen oder gepolsterte Sitze, gelten die Anforderungen der Nummer 3. Ableitfähige Überzüge isolierender Gegenstände haben diese vollständig zu umschließen.

(5) Abweichend von Nummer 3 dürfen als Abdeckung des Operationstisches und fahrbarer Krankentragen sowie der Sitzflächen von Hockern nur Gummi oder Kunststoffe mit Oberflächenwiderständen zwischen $5 \cdot 10^4\ \Omega$ und $10^6\ \Omega$ verwendet werden.

(6) Der Ableitwiderstand des Fußbodens darf höchstens $10^8\ \Omega$ betragen. Bei Bodenbelägen, bei denen eine Erhöhung des Ableitwiderstandes während des Gebrauches nicht ausgeschlossen ist, darf der Ableitwiderstand im Neuzustand höchstens $10^7\ \Omega$ und nach vier Jahren höchstens $10^8\ \Omega$ betragen.

(7) Alle leitfähigen berührbaren Teile von Gegenständen oder Einrichtungen, auch die der ortsbeweglichen, müssen untereinander und mit dem Fußboden leitfähig verbunden und geerdet sein. Die Erdverbindung darf an keiner Stelle unterbrochen sein, z. B. durch isolierende Lackierung. Der Durchgangswiderstand von Reifen oder Rollen soll $10^4\ \Omega$ nicht überschreiten.

Hinweis: Narkosegeräte, Hocker, Tritte, fahrbare Krankentragen und Ähnliches müssen durch Rollen bzw. Fußkappen aus leitfähigem Werkstoff mit dem Fußboden verbunden sein.

(8) In medizinisch genutzten Räumen mit explosionsgefährdeten Bereichen ist ableitfähiges Schuhwerk – einschließlich der Überschuhe – zu tragen. Jedoch soll ein Ableitwiderstand von $5 \cdot 10^4\ \Omega$ nicht unterschritten werden.

(9) Schläuche für die Fortleitung von medizinischen Gasen, auch von Sauerstoff, Lachgas, Anästhesiegasen, dürfen abweichend von Nummer 5.6 aus isolierenden Materialien bestehen. Sind sie leitfähig, dürfen sie nur auf metallische Schlauchtüllen ohne isolierende Lackierung aufgezogen sein. Im Verlaufe der Gasführungen, auch innerhalb von Geräten, dürfen keine isolierten leitfähigen Teile vorhanden sein.

(10) Für Atembeutel und Bälge von Anästhesiegeräten und Sauerstoffbeatmungsgeräten sind ausschließlich leitfähige Werkstoffe zu verwenden.

8.4 Kennzeichnung

Einrichtungen, die zur Erdung und zum Potenzialausgleich eingesetzt werden, dürfen nicht unterbrochen oder abgeschaltet werden. Sie sind eindeutig zu kennzeichnen, z. B. durch grün-/gelbgestreifte Farbgebung.

8.5 Planung und Ausführung

(1) Bereits in der Planungsphase einer Anlage oder einer Einrichtung sind Maßnahmen für die Erdung und für den Potenzialausgleich vorzusehen. Die Anzahl manuell zu handhabender Erdungsvorrichtungen, z. B. Erdungsklemmen, soll gering gehalten werden. Erdungsklemmen sind vor Arbeitsbeginn anzubringen und verbleiben am Ort, bis alle gefährlichen Aufladungen abgeleitet sind. Es sind Aufnahmevorrichtungen oder Ablagen für Erdungsklemmen vorzusehen.

(2) Einrichtungen zur Erdung und zum Potenzialausgleich sind so auszuführen und so zu erhalten, dass

1. sie ihre Funktion erfüllen,
2. Mängel schnell erkannt werden können,
3. sie den elektrischen, mechanischen und korrosiven Beanspruchungen standhalten,
4. sie – bei Verwendung von Klemmen – Lack-, Rostschichten oder auch Folien von Einstellsäcken durchdringen können,
5. sie deutlich erkennbar gekennzeichnet sind und
6. sie leicht gehandhabt werden können.

8.6 Betriebsanweisung und Unterweisung

(1) Für Arbeiten zur Erdung und zum Potenzialausgleich in explosionsgefährdeten Bereichen ist das Vorliegen einer eigenen Betriebsanweisung erforderlich.

Hinweis: Siehe auch § 14 der Gefahrstoffverordnung.

(2) Personen, die in explosionsgefährdeten Bereichen arbeiten, müssen über die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Erdung und zum Potenzialausgleich unterwiesen werden.

Hinweis: Ziel der Unterweisung ist, dass die Beschäftigten, die zur Erdung und zum Potenzialausgleich vorgesehenen betrieblichen Einrichtungen kennen und bestimmungsgemäß anwenden können. Auf typische Erdungsfehler, z. B. nachträgliches Erden bereits aufgeladener Gegenstände oder Einrichtungen, ist besonders hinzuweisen.

8.7 Prüfung

(1) Die Prüfungen der Einrichtungen zur Erdung und zum Potenzialausgleich für die Vermeidung gefährlicher elektrostatischer Aufladungen sind unabhängig von anderen elektrischen Prüfungen durchzuführen.

(2) Art, Umfang und Fristen der Prüfungen sind gemäß der Technischen Regel TRBS 1201 Teil 1 festzulegen. Dabei sind Anlagen- und Bauwerksteile zu berücksichtigen, die neben ihrer eigentlichen Funktion auch andere erden und in den Potenzialausgleich einbeziehen, z. B. Schlauch und Zapfventil.

(3) Die Prüfungen sind durch zur Prüfung befähigte Personen gemäß Anhang 2 Abschnitt 3 Nummer 3.1 BetrSichV durchzuführen.

Anhang A

Auf- und Entladungsvorgänge in der Elektrostatik

A1 Elektrostatische Aufladungen

Häufigste Ursache elektrostatischer Aufladung ist die Kontaktaufladung. Kommen z. B. zwei zuvor ungeladene Gegenstände in Berührung, erfolgt an ihrer gemeinsamen Grenzfläche ein Ladungsübergang. Bei der nachfolgenden Trennung der Oberflächen trägt jede Oberfläche einen Teil dieser Ladung, jeweils mit entgegengesetzter Polarität.

Kontaktaufladung kann an allen Grenzflächen zwischen festen und/oder flüssigen Phasen erfolgen. Gase können nicht aufgeladen werden, wohl aber in einem Gasstrom enthaltene Feststoffpartikel oder Flüssigkeitstropfen.

Leitfähige Gegenstände können auch durch Influenz aufgeladen werden, wenn sie sich in einem elektrischen Feld befinden. Eine weitere Möglichkeit der Aufladung besteht durch Ansammeln aufgeladener Partikel oder ionisierter Moleküle.

A1.1 Aufladung von Flüssigkeiten

Die Aufladung von Flüssigkeiten erfolgt im Wesentlichen über die Kontaktaufladung. Typische Beispiele sind der Strom einer Flüssigkeit entlang einer festen Wand, z. B. eines Rohres, einer Pumpe oder eines Filters oder das Rühren, Schütteln, Sprühen oder Zerstäuben von Flüssigkeit. Enthält die Flüssigkeit mindestens eine weitere Phase, z. B. in Form suspendierter Feststoffe oder dispergierter anderer Flüssigkeiten, wird die Aufladung erheblich verstärkt, da die Ausdehnung der Phasengrenzflächen deutlich zunimmt. Normalerweise entstehen gefährliche elektrostatische Aufladungen nur bei Flüssigkeiten geringer elektrischer Leitfähigkeit.

Werden Flüssigkeiten versprüht oder vernebelt siehe auch Anhang A1.3.

In Behältern sind Büschelentladungen zwischen Einbauten und der Oberfläche isolierender Flüssigkeiten nicht zu erwarten, wenn das Potential an der Oberfläche der Flüssigkeit 25 kV nicht überschreitet. Für Gefahrstoffe der Explosionsgruppe IIA werden die auftretenden Entladungen erst ab einem Oberflächenpotential von etwa 58 kV zündwirksam.

Hinweis: Das Oberflächenpotential ist keine direkt messbare Größe. Es kann bei Kenntnis der Ladungsdichte und der Stoffwerte der Flüssigkeit sowie der Behältergeometrie rechnerisch abgeschätzt werden.

A1.2 Flüssigkeiten in Rohren und Filtern

Turbulente Strömungen erzeugen mehr Ladungen als laminare Strömungen. Bei laminarer Strömung einphasiger Flüssigkeiten verhält sich der erzeugte elektrische Strom nahezu proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, bei Turbulenz hingegen quadratisch. Turbulente Strömungsvorgänge sind bei industriellen Prozessen üblich. Tritt ungeladene Flüssigkeit in ein Rohr ein, nimmt die Ladungsdichte in der Flüssigkeit mit der Länge des Rohres zu und erreicht – sofern das Rohr ausreichend lang ist – einen konstanten Wert.

Für Flüssigkeiten niedriger Leitfähigkeit, z. B. gesättigte Kohlenwasserstoffe, lässt sich die Ladungsdichte nach folgender Zahlenwertgleichung abschätzen:

$\rho_\infty = 5 \cdot v$

mit ρ_∞ = Ladungsdichte der Flüssigkeit im unendlich langen Rohr (µC/m^3)
v = Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Rohr (m/s)

Ein Rohr kann als unendlich lang betrachtet werden, wenn

$L \geq 3 \cdot v \cdot \tau$

mit $\tau = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 / \kappa$
L = Länge des Rohres (m)
v = Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Rohr (m/s)
τ = Relaxationszeit der Flüssigkeit (s)
ε_0 = elektrische Feldkonstante (As/Vm)
ε_r = relative Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) der Flüssigkeit
κ = elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit (S/m)

Die Formeln können verwendet werden, um die Ladungsdichte einer Flüssigkeit abzuschätzen, die z. B. beim Befüllen eines Tanks aus dem Rohr austritt.

A1.3 Versprühen und Strahlen mit Flüssigkeiten

Die Zerteilung eines Flüssigkeitsstrahles in kleine Tropfen kann unabhängig von der Leitfähigkeit der Flüssigkeit stark aufgeladene Flüssigkeitsstrahlen oder Nebel erzeugen. Im Allgemeinen gilt: je leitfähiger die Flüssigkeit, umso stärker die Ladungserzeugung. So erzeugt ein Wasserstrahl mehr Ladungen als ein Ölstrahl. Noch stärkere Aufladungen bewirken mehrphasige Mischungen, z. B. aus Öl und Wasser.

A1.4 Aufladung von Schüttgütern

Kontaktaufladung tritt bei Schüttgütern sehr häufig auf. Die Aufladungseigenschaften werden sowohl durch Oberflächeneigenschaften der Partikel als auch durch die chemische Zusammensetzung des Schüttguts selbst bestimmt.

Die Höhe der Aufladung ist normalerweise nur schwer vorherzusehen. Die Aufladungshöhe hängt von der Menge entstehender Ladungen und der Kapazität der Anordnung ab. Mit Aufladungen ist immer dann zu rechnen, wenn Schüttgut von mittlerem bis hohem spezifischem Widerstand mit einer andersartigen Oberfläche in Berührung kommt. Dies ist z. B. beim Mischen, Mahlen, Sieben, Schütten, Mikronisieren und pneumatischen Transport der Fall. Beispiele für die Ladungsmenge, die ein Schüttgut aufnehmen kann, finden sich in der Tabelle 12.

Tabelle 12: Aufladung von Schüttgütern mit mittlerem oder hohem spezifischen Widerstand

Vorgang	Spezifische Aufladung µC/kg
Sieben	10^{-5} bis 10^{-3}
Schütten	10^{-3} bis 1
Transportieren mit Schneckenförderer	10^{-2} bis 1
Mahlen	10^{-1} bis 1
Mikronisieren	10^{-1} bis 10^{2}

Pneumatischer Transport	10^{-1} bis 10^{3}

A2 Ladungsansammlung

Ladungen, die nicht rekombinieren, zur Erde abfließen oder auf andere Art und Weise abgeleitet werden, verbleiben auf der Oberfläche des aufgeladenen Materials. Ladungen auf isolierenden Materialien bleiben auf Grund des Widerstandes erhalten. Ladungen auf leitfähigen oder ableitfähigen Materialien und Gegenständen bleiben nur erhalten, wenn kein Kontakt zur Erde besteht. Unter normalen Bedingungen sind reine Gase Isolatoren. Sie isolieren Staubpartikel und Tröpfchen, so dass Wolken und Nebel ihre Ladung über längere Zeit behalten.

Häufig wird bei technischen Vorgängen ein Gleichgewicht zwischen der Relaxation von Ladungen und ihrer kontinuierlichen Erzeugung erreicht. Beispielsweise wird das elektrische Potenzial eines isolierten Metallbehälters, in den eine aufgeladene Flüssigkeit oder ein aufgeladenes Schüttgut hineingegeben wird, bestimmt durch die Geschwindigkeiten der Ladungszuleitung und -ableitung. Die entstehende Potenzialdifferenz (Spannung) wird berechnet durch:

$$U = I \cdot R \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

mit U = elektrische Spannung des Behälters (V)
I = „elektrostatischer“ Ladestrom (A)
R = Widerstand zur Erde (Ω)
t = Zeit (s)
τ = Relaxationszeit (s)

Zur Beurteilung einer gefährlichen elektrostatischen Aufladung wird die maximale Spannung herangezogen, welche nach obiger Formel bei großen Zeiten erreicht wird:

$$U_{max} = I \cdot R$$

Ableitwiderstand und Kapazität lassen sich oft messen. Das Produkt

$$\tau = R \cdot C$$

mit C = Kapazität (F)

kann zur Beurteilung der Aufladungshöhe benutzt werden.

A2.1 Ladungsrelaxation in Flüssigkeiten

Die Relaxation von Ladungen in einem leitfähigen oder ableitfähigen Behälter mit Flüssigkeit hängt wesentlich von der elektrischen Leitfähigkeit der Flüssigkeit ab. Wird keine Ladung erzeugt, gilt für die Relaxationszeit:

$$\tau = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 / \kappa$$

mit τ = Relaxationszeit der Flüssigkeit (s)
ε_0 = elektrische Feldkonstante (As/Vm)
ε_r = relative Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) der Flüssigkeit
κ = elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit (S/m)

Zum Beispiel beträgt die Relaxationszeit $\tau = 18$ s für einen Kohlenwasserstoff mit einer Leitfähigkeit von $\kappa = 1$ pS/m. Die Erfahrung zeigt, dass selbst bei geringen Leitfähigkeiten und sehr hohen Ladungsdichten Verweilzeiten von 100 s ausreichen, um gefährliche Aufladungen abzuleiten.

A2.2 Ladungsrelaxation in Schüttgütern

Erfahrungsgemäß liegt das elektrische Potenzial an der Grenze einer Staubwolke in Luft bei höchstens $3 \cdot 10^6$ V. Ursächlich ist die Aufladung des Schüttgutes.

Die Ladung sammelt sich auf einem Schüttgut an, wenn die Geschwindigkeit der Ladungserzeugung die der Ladungsableitung übersteigt. Die Relaxationszeit wird bestimmt durch:

$$\tau = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho$$

mit τ = Relaxationszeit des Schüttgutes (s)

ε_0 = elektrische Feldkonstante (As/Vm)

ε_r = relative Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) des Schüttgutes

ρ = spezifischer Widerstand des Schüttgutes (Ωm)

Für ein Schüttgut mit $\rho = 10^{10}$ Ωm und der Permittivität von $2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m beträgt die Relaxationszeit τ, in der 2/3 der angesammelten Ladung zur Erde abgeleitet werden, 0,2 s. Verursacht ein Schüttgut eine Staubwolke, so ist von erheblich längeren Relaxationszeiten auszugehen, die sich nicht berechnen lassen.

A3 Entladungsarten in der Elektrostatik

Die verschiedenen elektrostatischen Entladungsarten unterscheiden sich erheblich in ihrer Fähigkeit, explosionsfähige Atmosphäre zu entzünden.

A3.1 Funkenentladung

Ein Funke ist eine Entladung zwischen zwei Leitern mit einem gut definierten leuchtenden Entladungskanal, durch den ein Strom hoher Dichte fließt. Im gesamten Kanal ist das Gas ionisiert. Die Entladung erfolgt sehr schnell und ist in der Regel deutlich wahrnehmbar. Sie erfolgt, wenn die Feldstärke zwischen den Leitern die elektrische Durchbruchfeldstärke der Atmosphäre übersteigt. Die erforderliche Potenzialdifferenz hängt von der Form und dem Abstand zwischen den Leitern ab. Als Richtwert für die Durchbruchfeldstärke werden $3 \cdot 10^6$ V/m angenommen. Dieser Wert gilt erfahrungsgemäß für ebene Oberflächen oder Oberflächen mit großem Radius in Luft und 10 mm Mindestabstand. Die Durchbruchfeldstärke steigt mit abnehmendem Abstand.

Hinweis: Beispiel 14 zeigt eine schematische Darstellung der Funkenentladung.

Die Energie des Funkens zwischen einem leitfähigen und einem leitfähigen, geerdeten Gegenstand wird berechnet:

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

mit W = maximale umgesetzte Energie [J]

Q = Menge der Ladung auf dem Leiter [C]

U = Potenzialdifferenz (Spannung) [V]

C = Kapazität [F]

Typische Werte der Kapazität von leitfähigen Gegenständen zeigt die Tabelle 13.

Tabelle 13: Kapazitäten ausgewählter Körper mit beispielhafter Aufladung

Aufgeladener Körper	Kapazität (pF)	Potenzial (kV)	Energie (mJ)
Flansch	10	10	0,5
kleine Metallgegenstände, z. B. Schaufel, Schlauchdüse	10 – 20	10	0,5 – 1
Eimer	10	10	0,5
Kleinbehälter bis 50 l	50 – 100	8	2 – 3
Metallbehälter von 200 l bis 500 l	50 – 300	20	10 – 60
Person	100 – 200	12	7 – 15
große Anlagenteile, von einer geerdeten Struktur unmittelbar umgeben	100 – 1 000	15	11 – 120

Berechnungsbeispiel:

Ein nicht geerdetes Metallfass wird mit Schüttgut gefüllt. Der Ladestrom I kann 10^{-7} A und der Ableitwiderstand R des Fasses zur Erde 10^{11} Ω sowie seine Kapazität 50 pF betragen.

Danach ist mit einem maximalen Potenzial des Fasses von

$$U_{max} = I \cdot R = 10 \text{ kV},$$

einer auf dem Fass gespeicherten maximalen Ladung Q_{max} von

$$Q_{max} = C \cdot U_{max} = 500 \text{ nC}$$

und einer maximalen Energie W_{max} des Entladungsfunkens von

$$W_{max} = 1/2\ C \cdot U^2_{max} = 2{,}5 \text{ mJ}$$

zu rechnen.

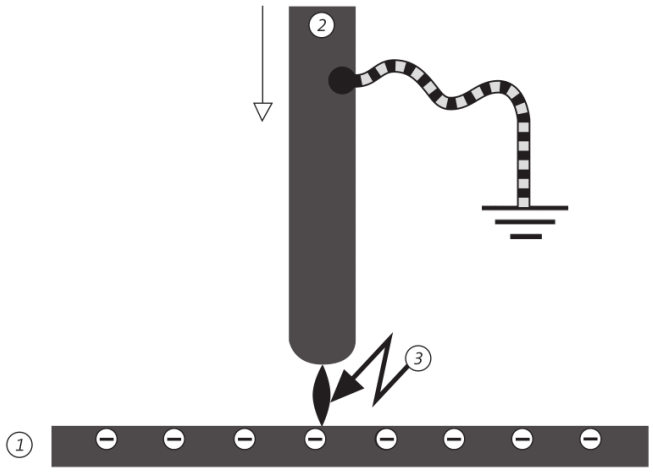
W_{max} ist mit der Mindestzündenergie des Schüttgutes zu vergleichen. Zur Beurteilung der Zündwirksamkeit von Funken kann auch die übertragene Ladung Q herangezogen werden.

Hinweis: Stoffbezogene Werte für *MZE* und *MZQ* siehe auch Tabelle 18 in Anhang G.

Entstehung:
Funkenentladungen entstehen zwischen Leitern unterschiedlichen Potentials, z. B. bei Annäherung einer geerdeten Person oder eines geerdeten Gegenstands an eine aufgeladene leitfähige Einrichtung.

Zündgefahr:
Funkenentladungen sind zündwirksam für Gas-, Dampf- und Staub/Luft-Gemische; sie sind die häufigste Ursache für Entzündungen durch Entladungen statischer Elektrizität.

Maßnahmen:
Erdung aller leitfähigen Anlagenteile.



① *Aufgeladene leitfähige Einrichtung*
② *Leitfähiger geerdeter Gegenstand oder geerdete Person*
③ *Funkenentladung*

Beispiel 14: Funkenentladungen (vgl. Anhang A3.1)

A3.2 Koronaentladung

Koronaentladungen entstehen an Oberflächen leitfähiger Gegenstände mit einem kleinen Krümmungsradius, z. B. an scharfen Ecken oder Spitzen, wenn lokal Feldstärken von über 3 MV/m erreicht werden. Da das elektrische Feld mit zunehmendem Abstand schnell abnimmt, ist der Bereich für die Koronaentladung nicht weit ausgedehnt. Koronaentladungen sind schwer und oftmals nur bei Dunkelheit erkennbar.

Hinweis: Beispiel 15 zeigt eine schematische Darstellung der Koronaentladung.

Ihre Energiedichte ist wesentlich geringer als die der Funken, und in der Regel sind sie nicht zündwirksam. Beim Umgang mit großen Mengen Schüttgut von mittlerem oder hohem spezifischen Widerstand lassen sich Koronaentladungen nicht vermeiden.

A3.3 Büschelentladung

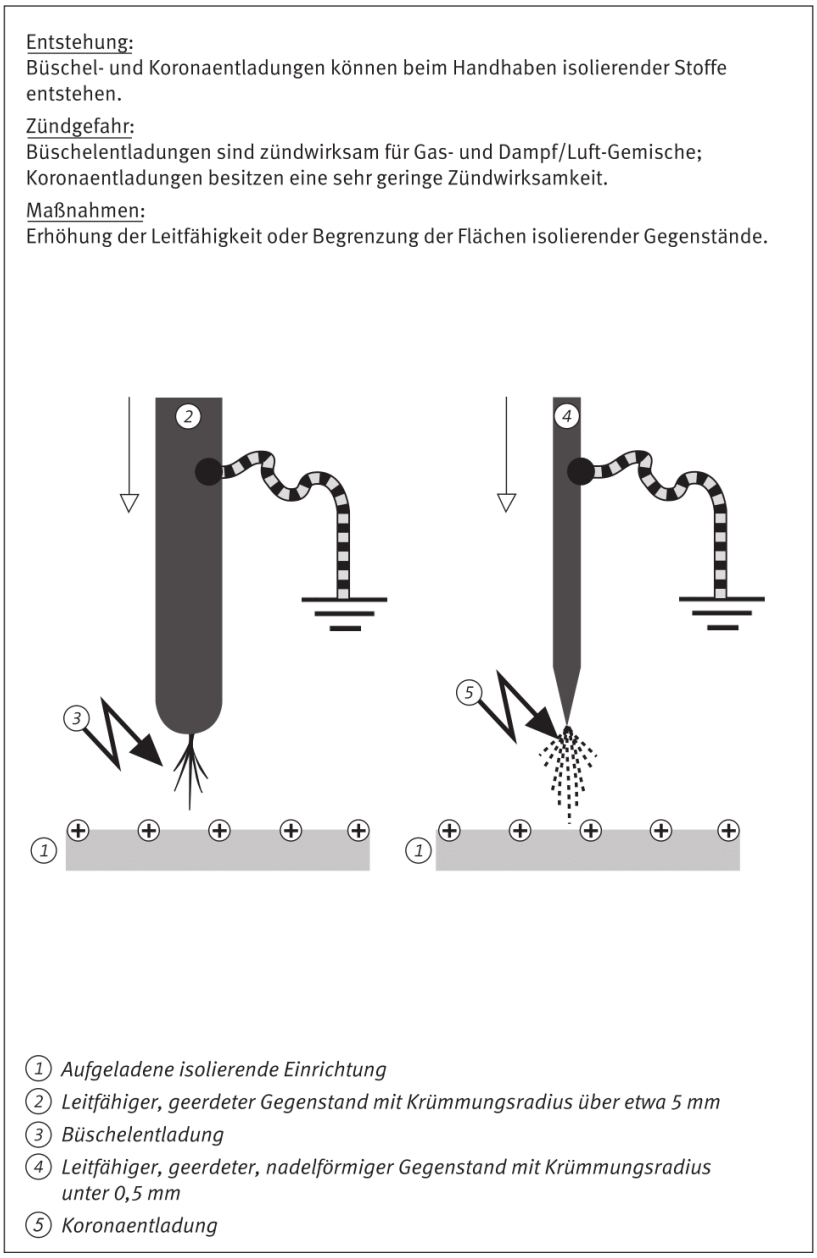
Büschelentladungen können auftreten, wenn geerdete Leiter auf geladene isolierende Gegenstände zu bewegt werden, z. B. zwischen dem Finger einer Person und einer Kunststoffoberfläche oder zwischen einem Metallgegenstand und der Oberfläche der Flüssigkeit in einem Tank. Sie lassen sich beim Umgang mit großen Schüttgutmengen von mittlerem oder hohem spezifischem Widerstand nicht vermeiden. Büschelentladungen sind gegenüber Koronaentladungen von kurzer Dauer und können sichtbar und hörbar sein.

Hinweis: Beispiel 15 zeigt eine schematische Darstellung der Büschelentladung.

Obwohl Büschelentladungen normalerweise nur einen Bruchteil der Energie einer Funkenentladung besitzen, können sie die meisten brennbaren Gase und Dämpfe entzünden. Durch Büschelentladungen werden nach derzeitigem Kenntnisstand keine Stäube entzündet, solange keine brennbaren Gase oder Dämpfe vorliegen. Die Zündwirksamkeit von Büschelentladungen kann durch Messung der übertragenen Ladung *Q* beurteilt werden. Büschelentladungen sind nicht zündwirksam, wenn die übertragene Ladung *Q* kleiner als die Mindestzündladung *MZQ* ist.

Hinweis 1: In einem homogenen elektrischen Feld ist unterhalb einer Feldstärke von 100 kV/m auch bei Einbringen von feldverzerrenden Einrichtungen nicht mit der Auslösung von Büschelentladungen zu rechnen.

Hinweis 2: Stoffbezogene Werte für *MZE* und *MZQ* siehe auch Tabelle 18 in Anhang G.



Beispiel 15: Büschelentladungen (links, vgl. Anhang A3.3) und Koronaentladungen (rechts, vgl. Anhang A3.2)

A3.4 Gleitstielbüschelentladung

Gleitstielbüschelentladungen sind in aller Regel für brennbare Gase, Dämpfe und Stäube zündwirksam und besitzen Energien von bis zu 1 J oder mehr. Erfahrungsgemäß treten die für Gleitstielbüschelentladungen notwendigen hohen Energiedichten unter folgenden besonderen Voraussetzungen auf:

- dünne isolierende Gegenstände oder Materialschichten,

  Hinweis: Gleitstielbüschelentladungen werden an isolierenden Platten, Folien oder an Beschichtungen beobachtet, weil diese Gegenstände beidseitig Ladungen speichern können.

- hohe Durchschlagspannung eines Materials,

Hinweis: Die Durchschlagspannung bestimmt die Ladungsdichte auf den Oberflächen wesentlich mit.

- vorhandene starke ladungserzeugende Prozesse,

  Hinweis: Stark ladungserzeugende Prozesse sind z. B. pneumatischer Transport, schnelllaufende Antriebsriemen.

- geringes Absprühen von Ladungen.

  Hinweis: An Spitzen, Ecken und Kanten können Ladungen absprühen.

Die Gleitstielbüschelentladung hat häufig eine hell leuchtende, baumähnliche Struktur und wird von einem lauten Knall begleitet. Sie kann sowohl bei sich frei im Raum befindlichen bipolar geladenen Schichten, z. B. Verpackungsfolien, als auch bei Beschichtungen eines leitfähigen Grundkörpers auftreten.

Nach erfolgter Aufladung kann eine Gleitstielbüschelentladung ausgelöst werden durch

- mechanisches Durchstechen der Oberfläche,
- einen elektrischen Durchschlag im Inneren des Materials,
- gleichzeitige Annäherung beider Oberflächen über zwei elektrisch verbundene Elektroden, z. B. bei Dickenmessungen,
- Berühren der freien Oberfläche mit einem geerdeten Leiter, wenn die andere geerdet ist, z. B. durch Berührung der Oberfläche durch eine Person.

Die hohe Energie der Gleitstielbüschelentladung entstammt den bipolar aufgeladenen Oberflächen, die bei einem elektrischen Durchschlag entladen werden.

Erfahrungsgemäß sind folgende Voraussetzungen für eine Gleitstielbüschelentladung erforderlich:

- Schichtdicke $D < 9$ mm und
- Oberflächenladungsdichte $\sigma > 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ C/m^2 und
- Durchschlagspannung $U_D > 4$ kV bzw. $U_D > 6$ kV bei textilem Gewebe, z. B. bei FIBC.

Hinweis: Beispiel 16 zeigt eine schematische Darstellung der Gleitstielbüschelentladung.

Gleitstielbüschelentladungen können explosionsfähige Atmosphäre aus Gasen, Dämpfen oder Stäuben entzünden. Ihre Energie kann wie folgt rechnerisch abgeschätzt werden:

$$W_{GBE} = (A \cdot D \cdot \sigma^2)/(2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0)$$

mit W_{GBE} = maximale zu erwartende Energie der Gleitstielbüschelentladung (J)

A = Fläche (m^2)

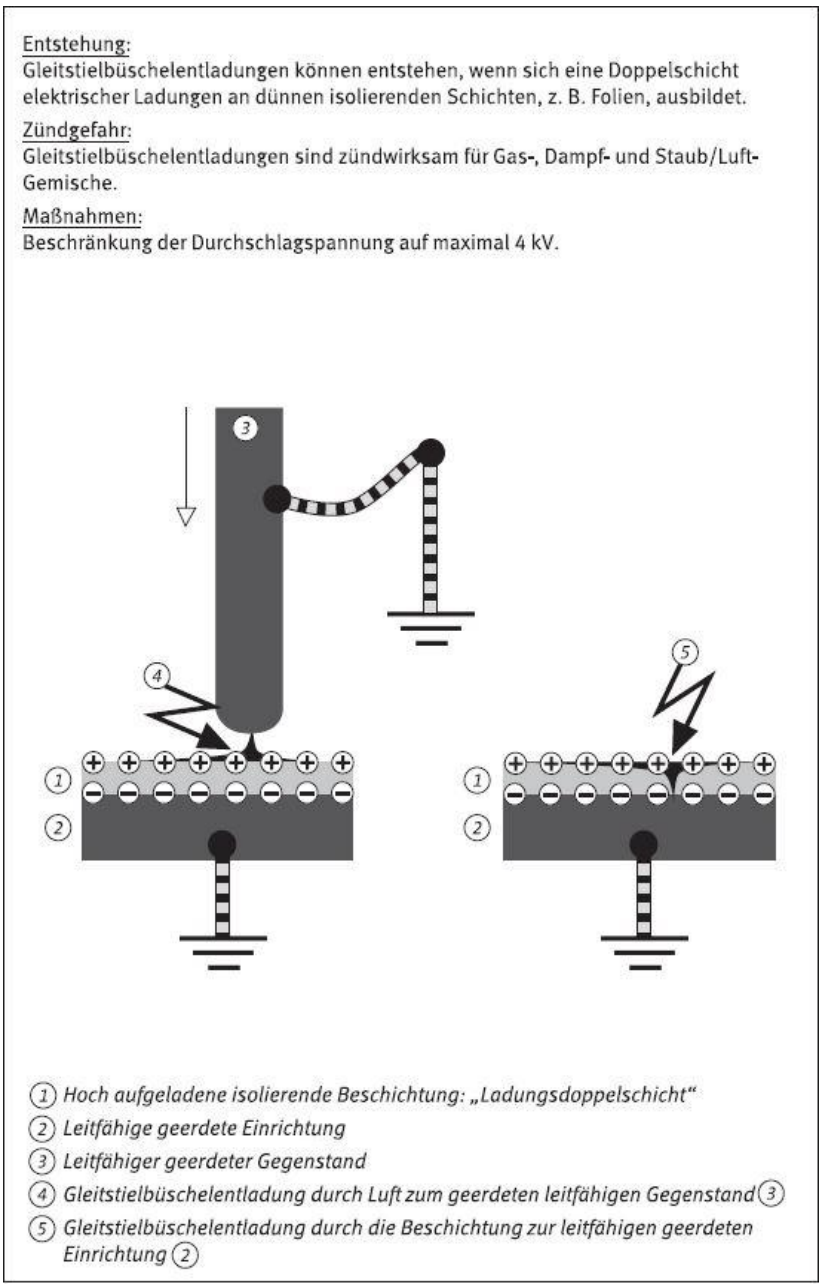
D = Schichtdicke (m)

σ = Oberflächenladungsdichte (C/m^2)

ε_0 = elektrische Feldkonstante (As/Vm)

ε_r = relative Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) der Schicht

An dünnen Farbschichten treten normalerweise keine Gleitstielbüschelentladungen auf.



Beispiel 16: Gleitstielbüschelentladungen (vgl. Anhang A3.4)

A3.5 Gewitterblitzähnliche Entladung

Prinzipiell können gewitterblitzähnliche Entladungen in großen Staubwolken auftreten; sie wurden in Aschewolken bei Vulkanausbrüchen beobachtet, jedoch bei industriellen Prozessen noch nicht nachgewiesen. Bei experimentellen Untersuchungen konnten solche Entladungen in Silos mit einem Volumen $V < 100\ m^3$ nicht festgestellt werden. Auch in beliebig hohen Behältern mit Durchmesser $d < 3$ m sind gewitterblitzähnliche Entladungen nicht zu erwarten. Theoretische Überlegungen lassen vermuten, dass in größeren Silos oder Behältern gewitterblitzähnliche Entladungen bei Feldstärken über 500 kV/m auftreten können.

A3.6 Schüttkegelentladung

Wird hoch aufgeladenes isolierendes Schüttgut in Silos oder große Behälter gefüllt, erzeugt es Bereiche innerhalb der Schüttung mit sehr hoher Ladungsdichte und führt zu starken elektrischen Feldern im oberen Teil der Schüttung. In diesem Bereich können Schüttkegelentladungen auftreten. Sie treten typischerweise in leitfähigen geerdeten Behältern auf und verlaufen radial entlang der Oberfläche der Schüttung, sobald die Feldstärke an der Behälterinnenwand 3 MV/m übersteigt.

Hinweis: Beispiel 17 zeigt eine schematische Darstellung der Schüttkegelentladung.

Beeinflussende Faktoren für Schüttkegelentladungen sind:

- der spezifische Widerstand des Schüttgutes,
- der zugeführte Massenstrom,
- das Volumen und die Geometrie des Behälters,
- die Korngröße des Schüttgutes (Medianwert)
- die Schüttdichte des Schüttgutes,
- die spezifische Ladung des Schüttgutes,
- die relative Permittivität (Dielektrizitätszahl) der Schüttung.

Basierend auf der Raumladungsdichteverteilung im Behälter kann unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren die Feldstärke an der Behälterwand in Modellrechnungen berechnet werden, z. B. mit Hilfe einer finite-Elemente-Methode.

Für metallische Behälter mit einem Durchmesser zwischen 0,5 und 3 m und Schüttgütern mit Korngrößen zwischen 0,1 und 3,0 mm kann die Energie einer Schüttkegelentladung berechnet werden durch:

$$W_{SKE} = 5{,}22 \cdot d^{3{,}36} \cdot g^{1{,}46}$$

mit W_{SKE} = maximale zu erwartende Äquivalentenergie der Schüttkegelentladung (mJ)

d = Behälterdurchmesser (m)

g = Medianwert der Korngröße (mm)

Mit zunehmendem Medianwert der Korngröße, z. B. bei Granulat, steigt die Energie für Schüttkegelentladungen.

Schüttkegelentladungen können auch in Behältern aus isolierenden Materialien auftreten. In diesem Fall ist an Stelle des Behälterdurchmessers d der doppelte Wert ($2 \cdot d$) einzusetzen.

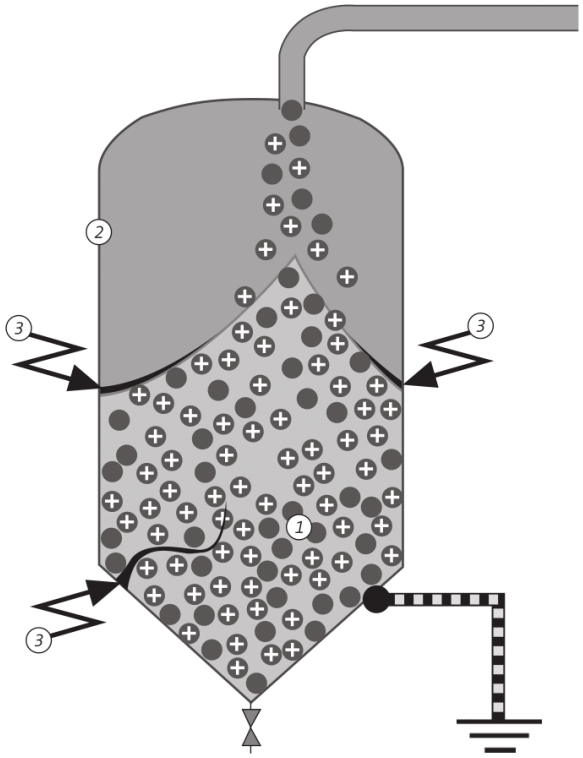
Besonders gefährlich sind Situationen, in denen die Zündenergie für Schüttkegelentladungen durch grobes Korn erzeugt wird und gleichzeitig Feinanteile des Schüttgutes, z. B. Abrieb, mit niedriger Mindestzündenergie vorliegen.

Schüttkegelentladungen können sowohl brennbare Gas- und Dampf/Luft-Gemische als auch Staub/Luft-Gemische entzünden.

Entstehung:
Schüttkegelentladungen können bei Anhäufung von isolierendem Schüttgut entstehen, das z. B. durch pneumatischen Transport hoch aufgeladen wurde. Bei Schüttgütern mit einem spezifischen Widerstand unter 10^{10} Ωm in leitfähigen, geerdeten Behältern sind keine Schüttkegelentladungen zu erwarten.

Zündgefahr:
Schüttkegelentladungen sind zündwirksam für Gas-, Dampf- und Staub/Luft-Gemische.

Maßnahmen:
Begrenzung des lichten Silodurchmessers, Verringerung der Füllgeschwindigkeit.



(1) *Hoch aufgeladenes Schüttgut; spezifischer Widerstand des Schüttgutes › 10^{10} Ωm*
(2) *Leitfähiges Silo, geerdet*
(3) *Schüttkegelentladungen an der Oberfläche oder im Inneren des abgelagerten Schüttgutes*

NB: In isolierenden Behältern kann auch Schüttgut geringeren Widerstands zu Schüttkegelentladungen führen, vgl. Ablaufdiagramme in Nummer 6.2.3.

Beispiel 17: Schüttkegelentladungen (vgl. Anhang A3.6)

Anhang B

Rohre und Schläuche für den pneumatischen Transport von Schüttgütern

Der pneumatische Transport von Schüttgütern ist im Allgemeinen ein stark ladungserzeugender Prozess. Es können dabei an der Wand von Rohren und Schläuchen Stromdichten in der Größenordnung von 1 mA/m^2 auftreten. Je nach Materialeigenschaften der Rohre und Schläuche und der Art des Leitungsaufbaues können bis auf Schüttkegelentladungen und gewitterblitzähnliche Entladungen alle in Anhang A beschriebenen Entladungen statischer Elektrizität auftreten.

Die an der inneren und äußeren Oberfläche von Rohren und Schläuchen zu vermeidenden Entladungsarten sind in Abhängigkeit von der Art des Fördergutes und der möglicherweise vorhandenen explosionsfähigen Atmosphäre in der Umgebung der Rohre und Schläuche in den Spalten 3 und 4 der Tabelle 14 eingetragen.

Korona- und Büschelentladungen können an allen aufgeladenen Bereichen der Rohre und Schläuche auftreten, wenn die in Anhang A3.2 bzw. A3.3 beschriebenen Bedingungen erfüllt sind.

Funkenentladungen können auftreten, wenn leitfähige Bereiche aufgeladen werden (siehe Anhang A3.1).

Gleitstielbüschelentladungen können auftreten, wenn sich an der Schlauchwand die dafür notwendigen Ladungen ansammeln können (siehe Anhang A3.4).

B1 Rohre und Schläuche mit homogenem Wandaufbau

Bei Rohren und Schläuchen, deren Wände aus einem homogenen Material bestehen, können je nach Wandstärke und spezifischem Widerstand des Wandmaterials außen Funkenentladungen auftreten. Insbesondere wenn das Rohr oder der Schlauch nur an einem Ende geerdet ist, z. B. bei Verwendung als Saugschlauch, können auch am nicht geerdeten Ende Funkenentladungen auftreten.

Legt man am freien Ende von Rohren und Schläuchen ein Potential von 300 V (vgl. Anhang E) und im Inneren eine konstante Ladestromdichte (i) von 1 mA/m^2 zugrunde, berechnet sich die zulässige Länge (L_{zul}) in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand (ρ) des Wandmaterials und der Wandstärke (s) gemäß folgender Gleichung:

$$L_{zul} = (K \cdot s / \rho)^{0,5} \quad \text{mit } K = 6 \cdot 10^5 \text{ Vm}^2/\text{A}$$

In Nummer 6.4.2.1 in Tabelle 9 sind für verschiedene Werte des spezifischen Widerstands zulässige Längen von Rohren und Schläuchen gemäß dieser Gleichung angegeben.

Für leitfähige Materialien, deren Widerstand am oberen Ende des Widerstandsbereiches liegt, der die Eigenschaft „leitfähig“ beschreibt, werden die zulässigen Längen sehr klein.

Für solche Materialien empfiehlt es sich, die Ableitfähigkeit durch Drahteinlagen zu verbessern.

B2 Rohre und Schläuche mit inhomogenem Wandaufbau

An einer Rohr- oder Schlauchwand aus einer leitfähigen äußeren Schicht und einer nicht leitfähigen inneren Schicht können Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Zur Beurteilung der Möglichkeit ihres Auftretens werden in der einschlägigen Literatur zwei verschiedene Kriterien verwendet, siehe auch Anhang A3.4. Das am häufigsten verwendete Kriterium ist das Überschreiten einer Durchschlagspannung von 4 kV. Das andere Kriterium betrifft das Überschreiten einer Oberflächenladungsdichte von $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ C/m^2. Beide Kriterien gelten für alle Wandstärken und Schichtdicken bis zu 9 mm. Beide Kriterien wurden empirisch in Experimenten ermittelt, es besteht kein unmittelbarer physikalischer Zusammenhang. Bei der Ableitung von sicherheitstechnischen Grenzwerten wie dem spezifischen Widerstand des Wandmaterials bei Wendelschläuchen hat sich das 4-kV-Kriterium als konservativer erwiesen. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass die 4 kV einen auf die Schichtdicke 0 extrapolierten Wert darstellen und die relative Permittivität des Wandmaterials bei diesem Kriterium nicht berücksichtigt wird.

Für eine Rohr- oder Schlauchwand aus einer leitfähigen äußeren Schicht und einer nicht leitfähigen inneren Schicht lässt sich der für die Vermeidung von Gleitstielbüschelentladungen maximal zulässige spezifische Widerstand der inneren Schicht mit den folgenden Gleichungen bestimmen:

a) Kriterium Oberflächenladungsdichte $\sigma \leq 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ C/m^2:

$\rho \leq \sigma / i \cdot 1/(\varepsilon \cdot \varepsilon_0)$

$\rho \leq K_a / \varepsilon$

mit $K_a = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ C/m^2 / (1 mA/m^2 · 8,854 pC/Vm) = 28,2 GΩm
und der relativen Permittivität ε der inneren Schicht

b) Kriterium Durchschlagspannung $U_D \leq 4$ kV:

$\rho \leq DU / (s \cdot i)$

$\rho \leq K_b / s$

mit K_b = 4 kV / 1 mA/m^2 = 4 MΩm^2
und der Schichtdicke s der inneren Schicht

Z. B. ergibt sich für einen Siloschlauch mit Schichtdicke von 7 mm und einer relativen Permittivität der inneren Schicht von 5 für den maximal zulässigen spezifischen Widerstand der inneren Schicht nach a) ein Wert von ca. 6 GΩm und nach b) ein Wert von ca. 0,6 GΩm. Beide Werte liegen nahe bei dem oberen Grenzwert des Widerstandsbereiches von 10^9 Ωm, der die Eigenschaft „ableitfähig“ beschreibt.

Kriterium b) kann zur Bewertung der Innenseite von fertig konfektionierten Schläuchen nach Nummern 6.4.2.1, 6.4.2.2 und 6.4.2.3 herangezogen werden:

Es wird der Widerstand von der inneren Oberfläche, z. B. kontaktiert mit einem trockenen Pfropfen aus leitfähigem Schaumstoff, zu der leitfähigen Struktur gemessen. Wenn das Produkt aus dem gemessenen Widerstand und der Kontaktfläche der inneren Elektrode kleiner als 4 MΩm^2 ist, sind die Rohre/Schläuche hinsichtlich der Vermeidung von zündwirksamen Entladungen im Inneren zum pneumatischen Transport von Schüttgütern geeignet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Messort repräsentativ für die Beschaffenheit des Schlauchs über die gesamte Länge ist

und nicht durch Inhomogenitäten der inneren Schicht bei der Messung lokale Minima des Widerstandswertes auftreten.

Ähnlich den homogenen mehrschichtigen Schläuchen können auch beide Kriterien auf die Beurteilung von Stützwendelschläuchen angewandt werden.

Basierend auf den beiden oben genannten Kriterien unterscheiden sich je nach Geometrie des Schlauchs die zulässigen Leitfähigkeiten des Wandmaterials um mehr als einen Faktor 5. Der in Nummer 6.4.2.4 angegebene Wert von $2{,}5 \cdot 10^8\ \Omega m$ stellt einen bezogen auf die zwei Kriterien mittleren Wert dar.

B3 Geeigneter Wandaufbau von Rohren und Schläuchen

Durch einen speziellen Aufbau der Wand von Rohren und Schläuchen können zündwirksame Entladungen vermieden werden. In Spalte 5 der Tabelle 14 ist der geeignete Aufbau in Form von Kennziffern aufgelistet. Die Bedeutung der Kennziffern ist in Tabelle 15 erklärt.

Tabelle 14: Auswahl geeigneter Wandaufbauten in Abhängigkeit von Umgebung und Fördergut

Umgebung	Schüttgut	zu vermeidende Entladungen an der		geeigneter Wandaufbau (s. Tab. 15)
		inneren Oberfläche	äußeren Oberfläche	
keine explosionsfähige Atmosphäre	nicht brennbar	-	-	beliebig
	brennbar ohne brennbaren Lösemittelanteil	*F G*	-	1, 2, 3, 4, 5
	brennbar oder nicht brennbar mit brennbarem Lösemittelanteil	*C B F G* *)	-	1, 2, 3, 4, 5
explosionsfähige Atmosphäre durch Stäube	nicht brennbar	-	*F G*	1, 2, 3, 4, 5
	brennbar ohne brennbaren Lösemittelanteil	*F G*	*F G*	1, 2, 3, 4, 5
	brennbar oder nicht brennbar mit brennbarem Lösemittelanteil	*C B F G* *	*F G*	1, 2, 3, 4, 5
explosionsfähige Atmosphäre durch Gase/Dämpfe	nicht brennbar	-	*C B F G*	1, 2, 4, 5
	brennbar ohne brennbaren Lösemittelanteil	*F G*	*C B F G*	1, 2, 4, 5
	brennbar oder nicht brennbar mit brennbarem Lösemittelanteil	*C B F G* *)	*C B F G*	1, 2, 4, 5

Für die Entladungsarten stehen folgende Abkürzungen:

C Koronaentladung

B Büschelentladung

F Funkenentladung

G Gleitstielbüschelentladung

* Bei der Förderung von Schüttgütern unter Anwesenheit von brennbaren Gasen/Dämpfen können durch die Wahl geeigneter Rohre und Schläuche zwar zündwirksame Entladungen ausgehend von den Rohren und Schläuchen vermieden werden, jedoch nicht Entladungen ausgehend vom geförderten Produkt.

Tabelle 15: Beschreibung des Wandaufbaus der Rohre/Schläuche (Erklärung zu Tabelle 14)

Aufbau 1	homogene leitfähige Wand $L < L_{zul}$ (Nummer 6.4.2.1)
Aufbau 2	leitfähiges Wandmaterial mit Metalleinlage (Nummer 6.4.2.2)
Aufbau 3	mehrschichtiger Wandaufbau: - innere Schicht ableitfähig - folgende Schicht nach Aufbau 1 oder 2 - mit beliebiger äußerer Schicht (Nummer 6.4.2.3)
Aufbau 4	wie Aufbau 3, jedoch äußere Schicht leitfähig oder ableitfähig oder Nachweis, dass beim Einsatz an der äußeren Oberfläche keine Entladungen auftreten
Aufbau 5	Stützwendelschlauch (Nummer 6.4.2.4)

Anhang C

Bauarten von flexiblen Schüttgutbehältern (FIBC)

FIBC des Typs A erfüllen keine Anforderungen zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.

FIBC des Typs B erfüllen folgende Anforderungen:

- sie bestehen ausschließlich aus isolierendem Material und
- die Durchschlagspannung des Körpermaterials sowie des Einfüll- und Auslaufstutzens sind kleiner 6 kV oder es liegt ein gesicherter Nachweis vor, dass keine Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

Einstellsäcke können das Verhalten der FIBC Typ B verändern.

FIBC des Typs C erfüllen folgende Anforderungen:

a) Das Wandmaterial des Körpers, des Einfüll- und Auslaufstutzens besitzen eine leitfähige oder ableitfähige Struktur mit einem Ableitwiderstand von weniger als $10^7\ \Omega$ zum Erdungspunkt. Die leitfähige oder ableitfähige Struktur kann nach einem der folgenden Prinzipien aufgebaut sein:
   - Großflächig eingearbeitete parallele leitfähige oder ableitfähige Bändchen oder Fäden, die in einem Abstand von weniger als 20 mm voneinander entfernt und mindestens an einer Stelle, vorzugsweise an einem Ende, miteinander elektrisch leitend verbunden sind. Der Ableitwiderstand jedes leitfähigen Bändchens oder Fadens zum Erdungspunkt beträgt weniger als $10^7\ \Omega$.

     Oder alternativ:
   - Gitterförmig angeordnete, leitfähige oder ableitfähige Bändchen oder Fäden, die ein elektrisch leitend verbundenes Netz mit einer Maschenweite von maximal 50 mm bilden. Der Ableitwiderstand jedes leitfähigen Bändchens oder Fadens zum Erdungspunkt beträgt weniger als $10^7\ \Omega$.

b) Der Ableitwiderstand der Hebeschlaufen zum Erdungspunkt am FIBC beträgt weniger als $10^7\ \Omega$.

c) Die Durchschlagspannung von der inneren Oberfläche auf die leitfähige Struktur beträgt weniger als 6 kV. Sofern der FIBC eine geschlossene isolierende Innenbeschichtung aufweist, reduziert sich der Grenzwert für die Durchschlagspannung auf 4 kV.

d) Sofern der FIBC Teile aus isolierenden Materialien besitzt, entsprechen diese den Anforderungen nach Nummer 3.2 (ohne 3.2.5 und 3.2.6).

   Hinweis: Nicht fest und flächig mit dem Gewebe des FIBC-Körpers verbundene Etiketten oder Dokumententaschen aus isolierendem Material können sich gefährlich aufladen.

e) Am FIBC befindet sich ein gut sichtbarer Hinweis auf die Erdungspflicht.

Einstellsäcke können das Verhalten des FIBC des Typs C verändern.

FIBC des Typs D erfüllen die Anforderung der Begrenzung der Aufladung auf ein ungefährliches Maß nach dem Prinzip der Koronaentladung. Erdungseinrichtungen be-

sitzt der Typ D nicht. Beim Einsatz des FIBC Typ D ist der Nachweis zu erbringen, dass keine gefährlichen Aufladungen auftreten.

Sofern der FIBC Teile aus isolierenden Materialien besitzt, entsprechen diese den Anforderungen nach Nummer 3.2 (ohne 3.2.5 und 3.2.6).

Einstellsäcke können das Verhalten des FIBC des Typs D verändern.

Anhang D

Elektrischer Schlag

Die Entladung statischer Elektrizität durch den menschlichen Körper kann einen elektrischen Schlag verursachen. Solche elektrischen Schläge verursachen selten unmittelbare Verletzungen, können jedoch Schmerzen verursachen und Schreckreaktionen auslösen.

Entladungen statischer Elektrizität sind von kurzer Dauer ($t \leq 1$ ms) und werden als impulsartig wahrgenommen. Personen können die folgenden Entladungsarten wahrnehmen:

- Büschelentladungen
  können auftreten, wenn sich Personen in der Nähe einer hoch aufgeladenen isolierenden Oberfläche, z. B. eines Schüttgutbehälters, aufhalten oder diesen berühren. Sie verursachen oft ein hörbares Knistern.
- Funkenentladungen
  treten z. B. auf, wenn Personen mit einem aufgeladenen leitfähigen Gegenstand in Berührung kommen.
- Gleitstielbüschelentladungen
  können auftreten, wenn Personen mit beidseitig aufgeladenen Folien oder Platten bzw. mit aufgeladenen leitfähig beschichteten Folien oder Platten arbeiten oder hoch aufgeladenes Pulver oder Granulat in einem großen Kunststoffbehälter berühren.

Personen gelten als gefährdet, wenn entweder die übertragene Ladung 50 µC oder die Energie 350 mJ überschreitet. Bei Personen mit Herzschrittmachern liegt der Grenzwert bei 2 mJ.

Die auf Trichtern, Kanistern oder Handwerkzeugen gespeicherten Energien liegen unter diesen Werten und sind für Personen ungefährlich.

Entladungen von großen Gegenständen oder Einrichtungen können jedoch die Energie von 1 J übersteigen und Personen schädigen.

Beim pneumatischen Transport sind neben der Erdung die folgenden Maßnahmen zu treffen:

- Eine Ansammlung von leitfähigem Material in einem isolierenden Rohr muss geerdet werden, bevor der Versuch gemacht wird, es zu entfernen.

  Hinweis: Eine Metallstange, die mit einem geerdeten Draht verbunden ist, eignet sich zu diesem Zweck.
- Sammeln sich pneumatisch transportierte leitfähige Gegenstände in einem isolierenden Behälter an, muss der Behälterboden mit einem geerdeten Kontakt ausgerüstet werden. Andernfalls dürfen Personen den Inhalt nicht berühren.
- Sammeln sich pneumatisch transportierte isolierende Schüttgüter in einem isolierenden Behälter $V > 1$ m^3 an, soll der Zugriff durch Personen vermieden sein.

Maßnahmen zur Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen nach dieser Technischen Regel schließen gleichermaßen den Schutz von Personen mit ein, z. B. Schutz vor Entladung aufgeladener Schüttgüter oder aufgeladener Folien.

Anhang E

Erdung und Potenzialausgleich

Der Erdableitwiderstand von leitfähigen Einrichtungen und Gegenständen muss so niedrig sein, dass keine gefährlichen Entladungen statischer Elektrizität auftreten.

Im Allgemeinen sind Funkenentladungen bei Potentialdifferenzen von $U < 300$ V gegenüber explosionsfähiger Atmosphäre durch brennbare Gase/Dämpfe und Stäube und bei Potentialdifferenzen $U < 100$ V auch gegenüber Explosivstoffen nicht zündwirksam.

Messungen in Produktionsanlagen zeigten, dass typische Ladeströme I zwischen 10^{-11} A und 10^{-4} A liegen.

Mit

$$R = U / I$$

lässt sich aus diesen Angaben konservativ ein maximal zulässiger Erdableitwiderstand berechnen:

$$R_{Emax} = 100 \text{ V} / 10^{-4} \text{ A} = 10^6 \ \Omega.$$

Hinweis 1: Bei einigen stark ladungserzeugenden Prozessen, z. B. pneumatischer Transport, können höhere Ladeströme auftreten.

Hinweis 2: Die Betrachtung gilt nicht für Streu- und Ausgleichströme sowie für elektrische Funken.

Anhang F

Leitfähigkeiten und Relaxationszeiten ausgewählter Flüssigkeiten

Die nachfolgenden Tabellen 16 und 17 geben Leitfähigkeiten und Relaxationszeiten ausgewählter Flüssigkeiten wieder.

Tabelle 16: Leitfähigkeit und Relaxationszeit ausgewählter Flüssigkeitsgruppen

Flüssigkeit	Leitfähigkeit (S/m)	Relaxationszeit (s)
niedrige Leitfähigkeit		
hochreine Paraffine	10^{-14}	2 000
Schmieröle	10^{-14}–10^{-9}	0,02–2 000
typische Paraffine	10^{-13}–10^{-11}	2–200
gereinigte aromatische Verbindungen (z. B. Toluol, Xylol)	10^{-13}–10^{-11}	2–200
Petroleum	10^{-13}–$5 \cdot 10^{-11}$	0,4–200
Benzin abhängig vom Schwefelgehalt*)	10^{-13}–10^{-10}	0,2–200
Weißöle	10^{-13}–10^{-10}	0,2–200
Ether	10^{-13}–10^{-10}	0,2–200
Gasöl	10^{-12}–10^{-10}	0,2–20
aromatische Markenlösemittelgemische	10^{-12}–10^{-9}	0,02–20
typische aromatische Verbindungen	$5 \cdot 10^{-12}$–$5 \cdot 10^{-11}$	0,4–4
Erdgaskondensat ohne Korrosionsinhibitor	10^{-11}–10^{-10}	0,2–2
mittlere Leitfähigkeit		
Treibstoffe*) und Öle mit leitfähigen Additiven	$5 \cdot 10^{-11}$–10^{-9}	0,02–0,04
schwere (schwarze) Heizöle	$5 \cdot 10^{-11}$–10^{-7}	$2 \cdot 10^{-4}$–0,4
Ester	10^{-10}–10^{-6}	$2 \cdot 10^{-5}$–0,2
hohe Leitfähigkeit		
Rohöl	$\geq 10^{-9}$	≤ 0,02
Erdgaskondensat mit Korrosionsinhibitor	$\geq 10^{-9}$	≤ 0,02
Alkohole	10^{-6}–10^{-4}	$2 \cdot 10^{-7}$–$2 \cdot 10^{-5}$
Ketone	10^{-7}–10^{-4}	$2 \cdot 10^{-7}$–$2 \cdot 10^{-4}$
Wasser, nicht destilliert	$\geq 10^{-4}$	$\leq 2 \cdot 10^{-7}$
destilliertes Wasser	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}

*) Besonders hohe Aufladungen treten beim Einsatz von Kraftstoffen auf, deren schwefelhaltige Komponenten ersetzt worden sind, z. B. bei Leitfähigkeiten < 50 pS/m und gleichzeitigem Schwefelgehalt < 50 ppm.

Tabelle 17 enthält Leitfähigkeiten von Flüssigkeiten gemessen von verschiedenen Autoren, entnommen aus „Techniques of Chemistry Volume II, Organic Solvents,

Physical Properties and Methods of Purification.“ John A. Riddick und William B. Bunger, John Wiley & Sons, 4. Auflage 1986.

Die Werte hängen von Verunreinigungen der Flüssigkeit ab und sind daher als orientierend zu betrachten. Wird eine Flüssigkeit in reiner Form verwendet, muss mit geringeren Leitfähigkeiten gerechnet werden.

Kohlenwasserstoffe sind in reiner Form stets als isolierend anzusehen.

Tabelle 17: Leitfähigkeit von Flüssigkeiten nach John A. Riddick und William B. Bunger

Flüssigkeit	Formel	Leitfähigkeit (S/m) (gemessen bei °C)
Acetaldehyd	CH_3 CHO	$1{,}20 \cdot 10^{-4}$ (0 °C)
Acetamid	CH_3CONH_2	$8{,}8 \cdot 10^{-5}$ (83,2 °C)
Acetessigsäureethylester	$CH_3COCH_2COOCH_2CH_3$	$4 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Aceton	CH_3COCH_3	$4{,}9 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Acetonitril	CH_3CN	$6 \cdot 10^{-8}$ (25 °C)
Acetophenon	$C_6H_5COCH_3$	$3{,}1 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Acrolein	$CH_2 = CHCHO$	$1{,}55 \cdot 10^{-5}$ (– °C)
Allylamin	$CH_2 = CHCH_2NH_2$	$5{,}7 \cdot 10^{-3}$ (25 °C)
Ameisensäure	HCOOH	$6{,}08 \cdot 10^{-3}$ (– °C)
Ameisensäureethylester	$HCOOC_2H_5$	$1{,}45 \cdot 10^{-7}$ (20 °C)
Ameisensäuremethylester	$HCOOCH_3$	$1{,}92 \cdot 10^{-4}$ (17 °C)
Ameisensäurepropylester	$HCOOCH_2CH_2CH_3$	$5{,}5 \cdot 10^{-3}$ (17 °C)
2-Aminoethanol	$HOCH_2CH_2NH_2$	$11{,}0 \cdot 10^{-4}$ (25 °C)
Anilin	$C_6H_5NH_2$	$2{,}4 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Anisol	$C_6H_5OCH_3$	$1 \cdot 10^{-11}$ (25 °C)
Benzin		ca. $1 \cdot 10^{-13}$ (20 °C)
Benzoesäureethylester	$C_6H_5COOCH_2CH_3$	$1 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Benzonitril	C_6H_5CN	$0{,}5 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Bernsteinsäuredinitril	$NCCH_2CH_2CN$	$5{,}64 \cdot 10^{-2}$ (– °C)
Brombenzol	C_6H_5Br	$1{,}2 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
1-Bromnaphthalin	$C_{10}H_7Br$	$3{,}66 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
Bromoform	$CHBr_3$	$< 2 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Butanol-(1)	$CH_3CH_2CH_2$ CH_2OH	$9{,}12 \cdot 10^{-7}$ (– °C)
Butanol-(2)	$CH_3CH_2CHOHCH_3$	$< 1{,}0 \cdot 10^{-5}$ (– °C)
tert. Butanol	$(CH_3)_3COH$	$2{,}66 \cdot 10^{-6}$ (27 °C)
Butanon-(2)	$CH_3CH_2COCH_3$	$3{,}6 \cdot 10^{-7}$ (– °C)
2-Butoxyethanol	$CH_3CH_2CH_2CH_2OCH_2CH_2OH$	$4{,}32 \cdot 10^{-5}$ (20 °C)
Caprylsäure	$CH_3(CH_2)_5CH_2COOH$	$< 3{,}7 \cdot 10^{-11}$ (– °C)
Chinolin	C_9H_7N	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)

Flüssigkeit	Formel	Leitfähigkeit (S/m) (gemessen bei °C)
Chlorethan	CH_3CH_2Cl	$< 3 \cdot 10^{-7}$ (0 °C)
Chlorbenzol	C_6H_5Cl	$7 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
1-Chlorbutan	$CH_3CH_2CH_2CH_2Cl$	$1 \cdot 10^{-8}$ (30 °C)
2-Chlorbutan	$CH_3CH_2CHClCH_3$	$1 \cdot 10^{-8}$ (30 °C)
1-Chlor-2-methylpropan	$(CH_3)_2CHCH_2Cl$	$1 \cdot 10^{-8}$ (30 °C)
2-Chlor-2-methylpropan	$(CH_3)_3CCl$	$1 \cdot 10^{-8}$ (30 °C)
Chloroform	$CHCl_3$	$< 1 \cdot 10^{-8}$ (25 °C)
Cyanessigsäureethylester	$NCCH_2COOCH_2CH_3$	$6{,}9 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Cyanessigsäuremethylester	$NCCH_2COOCH_3$	$4{,}49 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Cyclohexanon	$CH_2CH_2CH_2CH_2CH_2CO$	$5 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Diethylenglykol	$HOCH_2CH_2OCH_2CH_2OH$	$5{,}86 \cdot 10^{-5}$ (20 °C)
1,2-Dibromethan	CH_2BrCH_2Br	$< 2 \cdot 10^{-8}$ (19 °C)
1,1-Dichlorethan	CH_3CHCl_2	$2{,}0 \cdot 10^{-7}$ (– °C)
1,2-Dichlorethan	CH_2ClCH_2Cl	$4{,}0 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
cis-1,2-Dichlorethylen	CHClCHCl	$8{,}5 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
o-Dichlorbenzol	$o\text{-}C_6H_4Cl_2$	$3 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
Dichlormethan	CH_2Cl_2	$4{,}3 \cdot 10^{-9}$ (25 °C)
Dieselöl (technisch rein)		ca. $1 \cdot 10^{-13}$ (20 °C)
N,N-Dimethylformamid	$HCON(CH_3)_2$	$6 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Dimethylsulfoxid	$(CH_3)_2SO$	$2 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
p-Dioxan	$C_4H_8O_2$	$5 \cdot 10^{-13}$ (25 °C)
Epichlorhydrin	C_3H_5OCl	$3{,}4 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Essigsäure	CH_3COOH	$6 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Essigsäureethylester	$CH_3COOCH_2CH_3$	$< 1 \cdot 10^{-7}$ (- °C)
Essigsäureamylester	$CH_3COOCH_2(CH_2)_3CH_3$	$1{,}6 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Essigsäureisobutylester	$CH_3COOCH_2CH(CH_3)_2$	$2{,}55 \cdot 10^{-2}$ (19 °C)
Essigsäuremethylester	CH_3COOCH_3	$3{,}4 \cdot 10^{-4}$ (20 °C)
Essigsäurepropylester	$CH_3COOCH_2CH_2CH_3$	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$ (17 °C)
Ethanol	CH_3CH_2OH	$1{,}35 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
2-Ethoxyethanol	$CH_3CH_2OCH_2CH_2OH$	$9{,}3 \cdot 10^{-6}$ (– °C)
Ethylbromid	CH_3CH_2Br	$< 2 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Ethylchlorid	CH_3CH_2Cl	$< 3 \cdot 10^{-7}$ (0 °C)
Ethylendiamin	$H_2NCH_2CH_2NH_2$	$9 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Ethylenglykol	$(CH_2OH)_2$	$1{,}16 \cdot 10^{-4}$ (25 °C)
Ethylenimin	$(CH_2CH_2)NH$	$8 \cdot 10^{-4}$ (25 °C)
Formamid	$HCONH_2$	$< 2 \cdot 10^{-5}$ (– °C)
Glycerin	$HOCH_2CH(OH)CH_2OH$	ca. $0{,}6 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Isoamylalkohol	$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)

Flüssigkeit	Formel	Leitfähigkeit (S/m) (gemessen bei °C)
Isobutanol	$(CH_3)_2CHCH_2OH$	$1{,}6 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Isovaleriansäure	$(CH_3)_2CHCH_2COOH$	$< 4 \cdot 10^{-11}$ (80 °C)
Kohlensäureethylenester	$C_3H_4O_3$	$1 \cdot 10^{-5}$ (– °C)
Kohlensäurediethylester	$(CH_3CH_2O)_2CO$	$9{,}1 \cdot 10^{-8}$ (25 °C)
m-Kresol	$m\text{-}CH_3C_6H_4OH$	$1{,}397 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
o-Kresol	$o\text{-}CH_3C_6H_4OH$	$1{,}27 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
p-Kresol	$p\text{-}CH_3C_6H_4OH$	$1{,}378 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Methanol	CH_3OH	$1{,}5 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
N-Methylacetamid	$CH_3CONH(CH_3)$	$2 \cdot 10^{-5}$ (40 °C)
N-Methylformamid	$HCONCH(CH_3)$	$8 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
4-Methyl-2-pentanon	$(CH_3)_2CHCH_2COCH_3$	$< 5{,}2 \cdot 10^{-6}$ (35 °C)
N-Methyl-2-pyrrolidon	C_5H_9ON	$2 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
2-Metoxyethanol	$CH_3OCH_2CH_2OH$	$1{,}09 \cdot 10^{-4}$ (20 °C)
Milchsäureethylester	$CH_3CH(OH)COOCH_2CH_3$	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$ (25 °C)
Nitroethan	$CH_3CH_2NO_2$	$5 \cdot 10^{-5}$ (30 °C)
Nitrobenzol	$C_6H_5NO_2$	$2{,}05 \cdot 10^{-8}$ (25 °C)
Nitromethan	CH_3NO_2	$5 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
1-Nitropropan	$CH_3CH_2CH_2NO_2$	$3{,}3 \cdot 10^{-5}$ (35 °C)
2-Nitropropan	$CH_3CH(NO_2)CH_3$	$5 \cdot 10^{-5}$ (30 °C)
Octanol-(1)	$CH_3(CH_2)_6CH_2OH$	$1{,}39 \cdot 10^{-5}$ (23 °C)
Oxalsäurediethylester	$(COOCH_2CH_3)_2$	$7{,}12 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Phenetol	$C_6H_5OC_2H_5$	$< 1{,}7 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Phenol	C_6H_5OH	$(1\text{-}3) \cdot 10^{-6}$ (50 °C)
Phthalsäuredibutylester	$1{,}2\text{-}C_6H_4(COOCH_2CH_2CH_2CH_3)_2$	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$ (30 °C)
Propanol-(1)	$CH_3CH_2CH_2OH$	$9{,}17 \cdot 10^{-7}$ (18 °C)
Propanol-(2)	$CH_3CHOHCH_3$	$5{,}8 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Propionaldehyd	CH_3CH_2CHO	$1 \cdot 10^{-2}$ (25 °C)
Propionitril	CH_3CH_2CN	$8{,}51 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Propionsäure	CH_3CH_2COOH	$< 1 \cdot 10^{-7}$ (25 °C)
Propionsäureethylester	$CH_3CH_2COOCH_2CH_3$	$8{,}33 \cdot 10^{-2}$ (17 °C)
Pyridin	C_5H_5N	$4{,}0 \cdot 10^{-6}$ (25 °C)
Salicylaldehyd	$C_7H_6O_2$	$1{,}64 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Sebacinsäuredibutylester	$C_4H_9OOC(CH_2)_8COOC_4H_9$	$1{,}7 \cdot 10^{-9}$ (30 °C)
Stearinsäurebutylester	$CH_3(CH_2)_{16}COOCH_2CH_2CH_2CH_3$	$2{,}1 \cdot 10^{-11}$ (30 °C)
Sulfolan	$C_4H_8O_2S$	$< 2 \cdot 10^{-6}$ (30 °C)
Tetrachlorethylen	$CCl_2 = CCl_2$	$5{,}55 \cdot 10^{-2}$ (20 °C)

Flüssigkeit	Formel	Leitfähigkeit (S/m) (gemessen bei °C)
Tetrachlorkohlenstoff	CCl_4	$4 \cdot 10^{-16}$ (18 °C)
Tetramethylharnstoff	$(CH_3)_2NCON(CH_3)_2$	$< 6 \cdot 10^{-6}$ (– °C)
o-Toluidin	o-$CH_3C_6H_4NH_2$	$3{,}792 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
m-Toluidin	m-$CH_3C_6H_4NH_2$	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$ (25 °C)
p-Toluidin	p-$CH_3C_6H_4NH_2$	$6{,}2 \cdot 10^{-6}$ (100 °C)
o-Tolunitril	o-$CH_3C_6H_4CN$	$< 0{,}5 \cdot 10^{-5}$ (25 °C)
Toluol (Methylbenzol)	$C_6H_5CH_3$	$8 \cdot 10^{-14}$ (– °C)
Triethylenglykol	$HOCH_2CH_2OCH_2CH_2$ OCH_2CH_2OH	$8{,}4 \cdot 10^{-6}$ (20 °C)
1,1,1-Trichlorethan	CH_3CCl_3	$7{,}3 \cdot 10^{-7}$ (– °C)
Trichlorethylen	$CHCl = CCl_2$	$8 \cdot 10^{-10}$ (– °C)
Valeriansäurenitrill	$CH_3CH_2CH_2CH_2CN$	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$ (– °C)
Waschbenzin (techn. rein)	siehe Benzin	
o-Xylol	$C_6H_4(CH_3)_2$	$6{,}7 \cdot 10^{-14}$ (25 °C)
m-Xylol	$C_6H_4(CH_3)_2$	$8{,}6 \cdot 10^{-14}$ (25 °C)
p-Xylol	$C_6H_4(CH_3)_2$	$7{,}6 \cdot 10^{-14}$ (25 °C)

Anhang G

Mindestzündenergie und Mindestzündladung brennbarer Gase und Dämpfe

Tabelle 18 enthält Angaben zur Mindestzündenergie (*MZE*), zur Mindestzündladung (*MZQ*) und zum zündwilligsten Gemisch. Sie beruht auf Angaben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig. Die angegebenen Werte beziehen sich auf atmosphärische Bedingungen im Gemisch mit Luft.

Tabelle 18: MZE und *MZQ* brennbarer Gase und Dämpfe

Substanz	*MZE* mJ	*MZQ* nC	Zündwilligstes Gemisch Vol.-%	Explosions-gruppe nach IEC 60079-0
Acetaldehyd	0,38	–	–	IIA
Aceton	0,55	127	6,5	IIA
Acrylnitril	0,16	–	9,0	IIB
Ammoniak	14	1500	20	IIA
Benzol	0,20	45	4,7	IIA
1,3-Butadien	0,13	–	5,2	IIB
Butan	0,25	60	4,7	IIA
2-Butanon	0,27	–	5,3	IIA
Cyclohexan	0,22	–	3,8	IIA
Cyclopropan	0,17	–	6,3	IIB
1,2-Dichlorethan	1,0	–	10,5	IIA
Dichlormethan	9 300	880 000	18	IIA
Diethylether	0,19	40	5,1	IIB
2,2-Dimethylbutan	0,25	70	3,4	IIA
Essigsäureethylester	0,46	120	5,2	IIA
Ethan	0,25	70	6,5	IIA
Ethanol	0,28	60	6,4	IIB
Ethen	0,082	32	8,0	IIB
Ethin	0,019	–	7,7	IIC
Ethylenoxid	0,061	–	10,8	IIB
Heptan	0,24	60	3,4	IIA
Hexan	0,24	60	3,8	IIA
Methan	0,28	70	8,5	IIA
Methanol	0,20	50	14,7	IIA
2-Methylbutan	0,21	63	3,8	IIA
Methylcyclohexan	0,27	70	3,5	IIA
Pentan	0,28	63	3,3	IIA
cis-2-Penten	0,18	–	4,4	IIB

Substanz	*MZE* mJ	*MZQ* nC	Zündwilligstes Gemisch Vol.-%	Explosions-gruppe nach IEC 60079-0
trans-2-Penten	0,18	–	4,4	IIB
Propan	0,25	70	5,2	IIA
1-Propin	0,11	–	6,5	IIB
Propylenoxid	0,13	–	7,5	IIB
Schwefelkohlenstoff	0,009	–	7,8	IIC
Tetrafluoroethen	4,1	–	–	IIA
Tetrahydro-2H-pyran	0,22	60	4,7	IIA
1,1,1-Trichlorethan	4 800	700 000	12	IIA
Trichlorethen	510	150 000	26	IIA
Wasserstoff	0,016	12	22	IIC

Anhang H

Typische Widerstände von Fußböden und Fußbodenbelägen

Die Prüfung des Ableitwiderstandes soll am verlegten Bodenbelag vorgenommen werden, auch wenn für den unverlegten Belag Prüfzeugnisse vorliegen.

Beläge für den Wohnbereich unterschreiten meist nicht den geforderten Grenzwert, auch wenn sie als „antistatisch“ oder „elektrostatisch nicht aufladbar“ bezeichnet werden.

Hinweis: Isolierende Dichtungsfolien zwischen Betondecke und Estrich vermindern beispielsweise die Ableitung des Belages bei zusammenhängenden Flächen über 10 m^2 nicht mehr.

Tabelle 19: Widerstände verschiedener Fußböden oder Fußbodenbeläge in Abhängigkeit des Materials

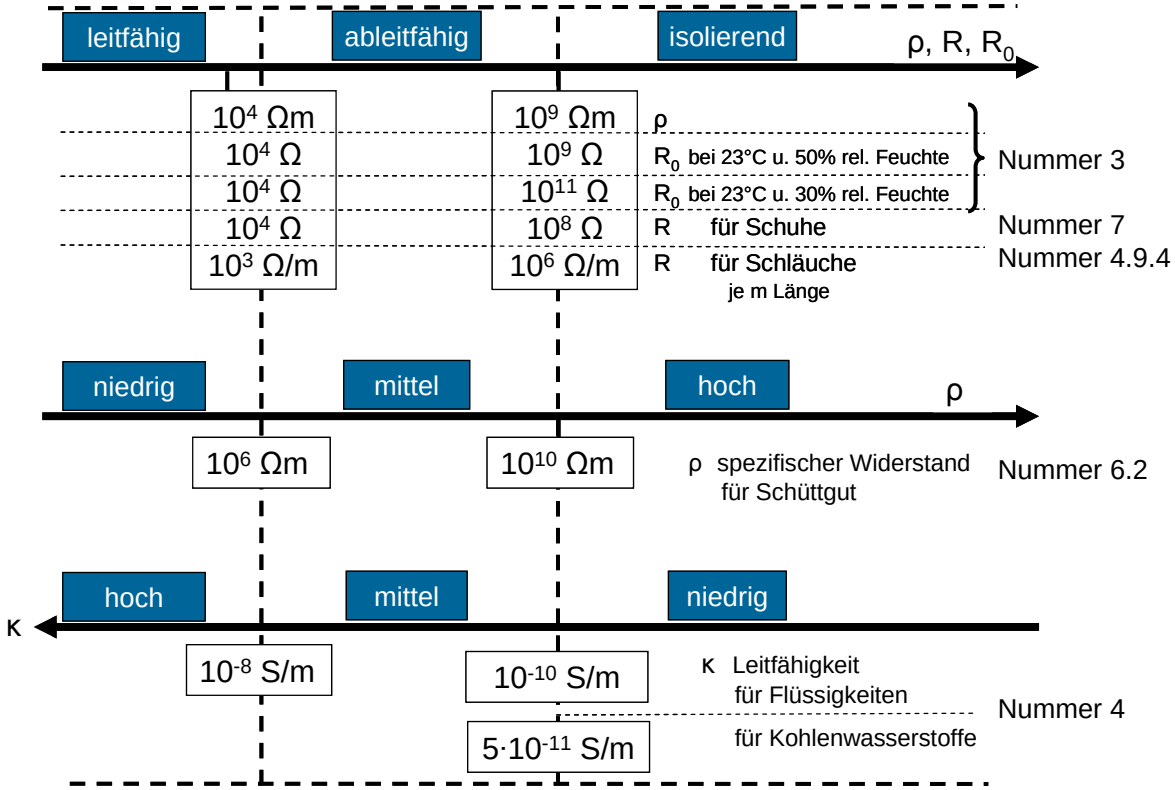
	Material	Ableitwiderstand (Ω)
1	Stahl	
1.1	Stahl, verzinkt	$<< 10^8$
1.2	Stahl, nicht rostend	$<< 10^8$
1.3	Stahl, pulverbeschichtet oder lackiert	10^{11}–10^{13}
2	Aluminium, blank	$<< 10^8$
3	Beton	
3.1	Beton, ohne Kunststoffzusatz	10^4–10^8
3.2	Beton, mit z. B. abriebverminderndem Kunststoffzusatz	10^9–10^{13}
3.3	Beton, mit üblicher Betonfarbe gestrichen	10^{12}–10^{14}
3.4	Beton, mit ableitfähiger Epoxidharzbeschichtung	10^5–10^8
3.5	Polymerbeton (Sand und Polyester)	10^{14}
4	Fliesen	
4.1	säurefeste Fliesen	10^8–10^{10}
4.2	säurefeste Fliesen, mindestens einmal wöchentlich mit Wasser ohne (Wachs-)Zusätze gereinigt	10^4–10^8
5	PVC	
5.1	PVC-Belag mit leitfähigem Kleber verlegt	10^{10}–10^{14}
5.2	PVC-Belag mit isolierendem Kleber verlegt	10^{14}
6	Asphalt	10^{12}–10^{15}

Quelle: nach Mitteilungen aus der Industrie und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

Anhang I

Veranschaulichung von Begriffen zur Beschreibung elektrostatischer Eigenschaften

Elektrostatische Eigenschaften sind einer direkten Messung nicht zugänglich. Teils durch die historische Entwicklung, teils auch aus praktischen Gesichtspunkten werden für Medien in verschiedenen Aggregatszuständen und für einige Gegenstände unterschiedliche Messgrößen verwendet, um die Leitfähigkeit bzw. den elektrischen Widerstand zu charakterisieren.

Feststoffe und Schüttgut	Flüssigkeiten	feste Materialien, Gegenstände und Einrichtungen
spezifischer Widerstand ρ (Ωm)	Leitfähigkeit κ (S/m) = 1/ρ	spezifischer Widerstand ρ (Ωm) Oberflächenwiderstand R_O (Ω) Durchgangswiderstand R_D (Ω)

Die Einteilung, die den entsprechenden Abschnitten der Regel jeweils für die Bereiche „leitfähig“, „ableitfähig“ und „isolierend“ zu Grunde liegt, ist in der folgenden Übersicht zusammengestellt: