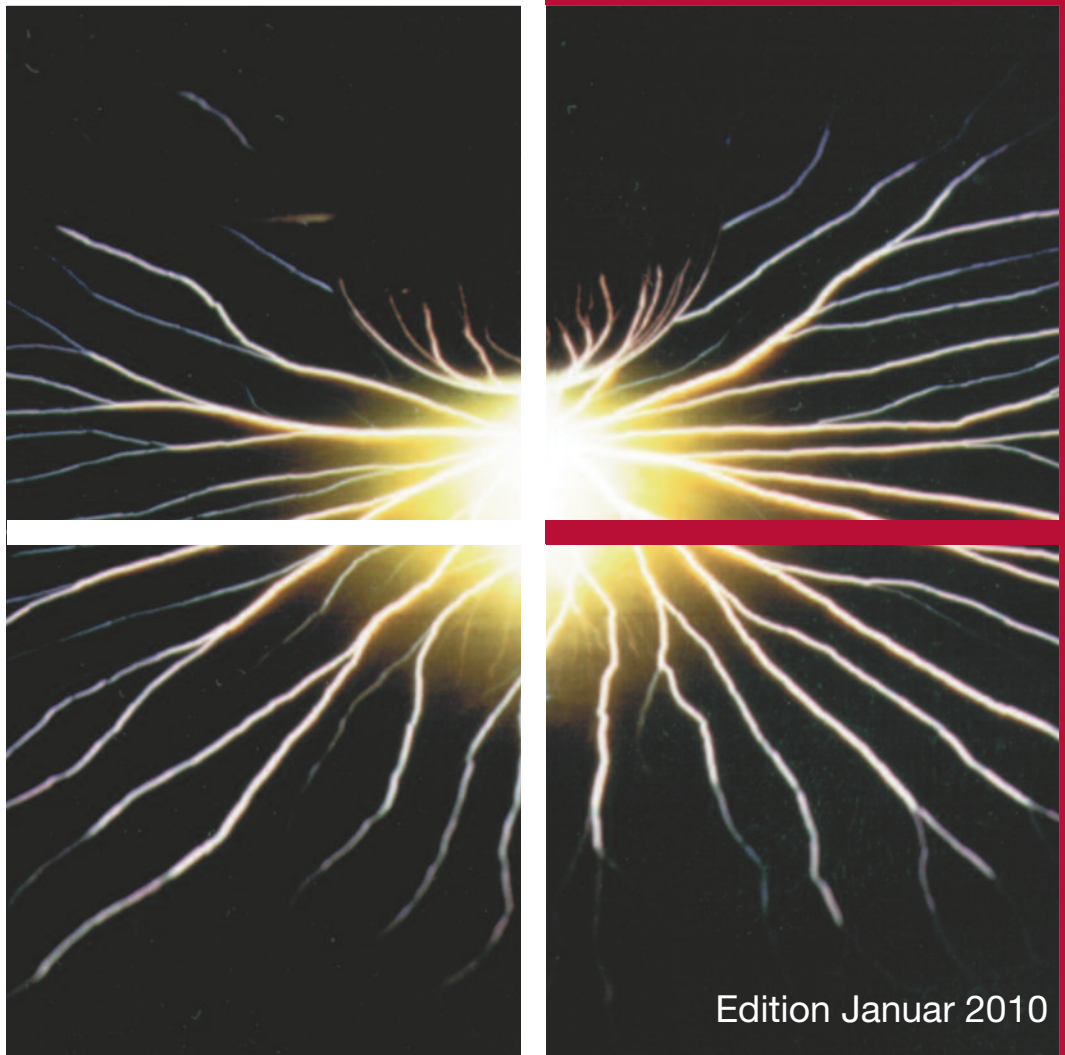




**Zündgefahren durch  
elektrostatische  
Aufladungen  
in der Prozessindustrie**



Edition Januar 2010

Autoren:  
Dr. Martin Glor,  
Schweizerisches Institut zur Förderung der Sicherheit  
Peter Thurnherr,  
thuba AG

© **thuba**®

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und der Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeberin reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

## 1 Einleitung

### 1.1 Explosionsgefahren in der Prozessindustrie

In vielen Branchen der Prozessindustrie werden brennbare und explosionsfähige Stoffe produziert, verarbeitet oder als Hilfsstoffe verwendet. Hierzu gehören brennbare Gase, Dämpfe, Flüssigkeiten, Aerosole, Stäube und deren Gemische. Solche Stoffe können im Gemisch mit Luft eine explosionsfähige Atmosphäre bilden. Beim Auftreten einer wirksamen Zündquelle kann eine Explosion ausgelöst werden. Die Gesetzmässigkeiten über die Entstehung und den Ablauf von Explosionen sind in der einschlägigen Literatur beschrieben [1-3].

Die Schutzmassnahmen gegen Explosionen werden in vorbeugende und konstruktive Schutzmassnahmen eingeteilt. Die vorbeugenden Schutzmassnahmen verhindern das Auftreten von Explosionen, die konstruktiven Schutzmassnahmen vermindern die Auswirkungen von Explosionen auf ein akzeptierbares Mass.

Im Rahmen des vorbeugenden Explosionsschutzes nimmt die Schutzmassnahme «Vermeiden von wirksamen Zündquellen» eine vorrangige Stellung ein. Einerseits wird sie als flankierende Massnahme in Kombination mit anderen Massnahmen des vorbeugenden und insbesondere des konstruktiven Explosionsschutzes eingesetzt. Selbst wenn eine Anlage beispielsweise durch Explosionsdruckentlastung oder durch Explosionsunterdrückung hinreichend geschützt ist, wird schon aus Gründen der Anlagenverfügbarkeit dem Vermeiden wirksamer Zündquellen grösste Beachtung geschenkt. Andererseits stellt das Vermeiden wirksamer Zündquellen bei den meisten «offen» durchgeführten Entleer-, Befüll- und Umfülloperationen von brennbaren Flüssigkeiten oder Schüttgütern die wichtigste Schutzmassnahme dar.

Wird das Vermeiden von wirksamen Zündquellen als Schutzmassnahme angewandt, so ist eine umfangreiche Risikoanalyse unter Berücksichtigung der Zündempfindlichkeit der möglichen explosionsfähigen Atmosphären sowie der Zündwirksamkeit der möglichen Zündquellen erforderlich. In der industriellen Praxis können je nach Prozess und Umgebung die unterschiedlichsten Zündquellen auftreten. Die Fachliteratur nennt 13 mögliche Zündquellenarten. In diesem Zusammenhang spielt die richtige Beurteilung elektrostatischer Aufladungen im Hinblick auf deren Wirksamkeit als mögliche Zündquelle eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zu anderen Zündquellen treten elektrostatische Aufladungen nicht nur bei Abweichungen oder Fehlmanipulationen sondern auch oft im normalen Betriebszustand auf.

### 1.2 Elektrostatische Aufladung als Zündquelle

Elektrostatische Aufladung ist in vielen Fällen unmittelbar mit industriellen Prozessen verbunden. Sie kann Störungen und Schäden verursachen und sie kann Brände und Explosionen auslösen. Der entscheidende Faktor bei der Beurteilung der Gefahren durch elektrostatische Aufladung ist die Wahrscheinlichkeit des örtlichen und zeitlichen Zusammentreffens von explosionsfähiger Atmosphäre und gefährlich hoher Aufladung. Ein solches Zusammentreffen ist dann am wahrscheinlichsten, wenn die Handhabung eines Produktes sowohl zu gefährlich hoher Aufladung als auch zur Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre führt. Dies trifft insbesondere bei der Handhabung von nichtleitfähigen, brennbaren Flüssig-

keiten wie z.B. von Kohlenwasserstoffen oder anderen apolaren Lösemit-  
teln oder von nichtleitfähigen brennbaren Schüttgütern zu. Aber auch leit-  
fähige Stoffe können gefährlich hoch aufgeladen werden, wenn sie in  
nichtleitfähigen Anlagen verarbeitet werden. Ferner können nichtleitfähige  
Anlagen selbst oder nicht geerdete leitfähige Anlagen gefährlich hoch  
aufgeladen werden. Beispiele für Brände und Explosionen, die durch sta-  
tische Elektrizität als Zündquelle verursacht worden sind, reichen vom  
Befüllen einer Plastikkanne mit Toluol bis zum pneumatischen Befüllen  
eines grossen Silos mit brennbarem Schüttgut. Typische weitere Unfall-  
beispiele sind das Befüllen von Trocknern mit lösemittelfeuchtem Produkt,  
das Entleeren von Zentrifugen sowie das Entleeren von brennbaren  
Schüttgütern aus flexiblen Schüttgutbehältern. Über die Zündgefahren  
infolge elektrostatischer Aufladungen gibt es eine Vielzahl von Text-  
büchern, Richtlinien und Spezialliteratur, Beispiele hierzu finden sich in  
den Literaurangaben [4-11, 15]

## 2. Entstehung elektrostatischer Aufladung

Elektrostatische Aufladungen treten immer dann auf, wenn zwei Ober-  
flächen voneinander getrennt werden, wovon mindestens eine hoch iso-  
lierend ist. Bei der Berührung zweier Oberflächen findet eine Umvertei-  
lung von Ladungsträgern statt. Wenn der anschliessende mechanische  
Trennvorgang schnell genug ist im Vergleich zur Beweglichkeit der  
Ladungsträger, befinden sich nach dem Trennvorgang die umverteilten  
Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens auf beiden Oberflächen. Da  
sämtliche Transportprozesse sowie die meisten physikalischen Operatio-  
nen in der industriellen Praxis mit Trennprozessen verbunden sind, ist hier-  
bei je nach elektrischer Leitfähigkeit naturgemäss mit Aufladungen zu  
rechnen. Dies gilt sowohl für Feststoffe als auch für Flüssigkeiten. Zur Illu-  
stration dieser allgemeinen Aussagen sollen die nachfolgend beschrie-  
benen Beispiele dienen (siehe Bild 1).

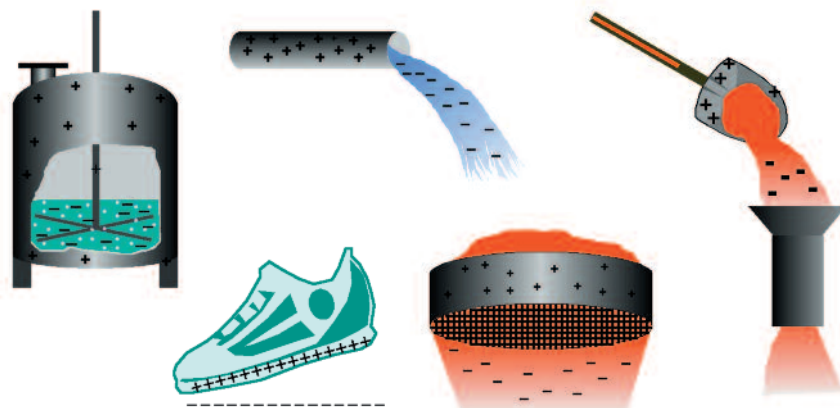


Bild 1: Beispiele von elektrostatischer Aufladung in der Praxis

Der Mensch kann sich beim Gehen aufladen, falls der Fussboden oder  
seine Schuhe nicht leitfähig sind. Wenn ein Pulver aus einem Sack aus-  
geschüttet oder durch ein Rohr gefördert wird, können das Pulver und der  
Sack oder das Rohr aufgeladen werden. Beim Sieben oder Einschütten  
durch einen Trichter muss ebenfalls mit einer Aufladung des Pulvers und  
des Siebes bzw. des Trichters gerechnet werden. Strömt eine Flüssigkeit  
durch eine Rohrleitung oder einen Schlauch, kann sich sowohl die Flüs-  
sigkeit als auch die Rohrleitung oder der Schlauch aufladen. Die Auflade-

tendenz wird stark erhöht, falls sich Filter in der Rohrleitung befinden. Flüssigkeiten werden ferner durch Rühren, Verspritzen und Zerstäuben aufgeladen. Besteht die Flüssigkeit aus einem Mehrphasengemisch - also z.B. bei Anwesenheit suspendierter Feststoffteilchen oder Tröpfchen einer nicht mischbaren Flüssigkeit - muss im allgemeinen mit einer um Größenordnungen höheren Aufladetendenz gerechnet werden. Ferner werden an Treibriemen und Förderbändern sowie beim Abrollen von Papier- und Plastikfolienbahnen hohe Aufladungen beobachtet.

Wie aus der obigen Aufzählung von Praxisbeispielen hervorgeht, ergibt sich in den meisten Fällen eine Aufladung durch Trennprozesse zwischen Produkten und Anlageteilen. Die Aufladungshöhe hängt hierbei wohl von den Produkteigenschaften, aber in noch viel stärkerem Mass von der durchgeführten Operation ab.

### 3. Systematisches Vorgehen zur Beurteilung von Zündgefahren durch elektrostatische Aufladungen

Damit elektrostatische Aufladungen als Zündquelle wirksam werden können, müssen in der Praxis immer die gleichen physikalischen Vorgänge ablaufen. Diese sind in Bild 1 schematisch dargestellt. Obwohl das Schema auf den ersten Blick recht einfach aussieht, ist es nicht immer einfach, für einen vorgegebenen Prozess jeden Schritt örtlich und zeitlich richtig zuzuordnen. Gewisse Schritte laufen gleichzeitig und an verschiedenen Orten ab. Beispielsweise wird das Niveau der Ladungsansammlung durch das Gleichgewicht zwischen der Ladungstrennungsrate und der Ladungsableitungsrate bestimmt.

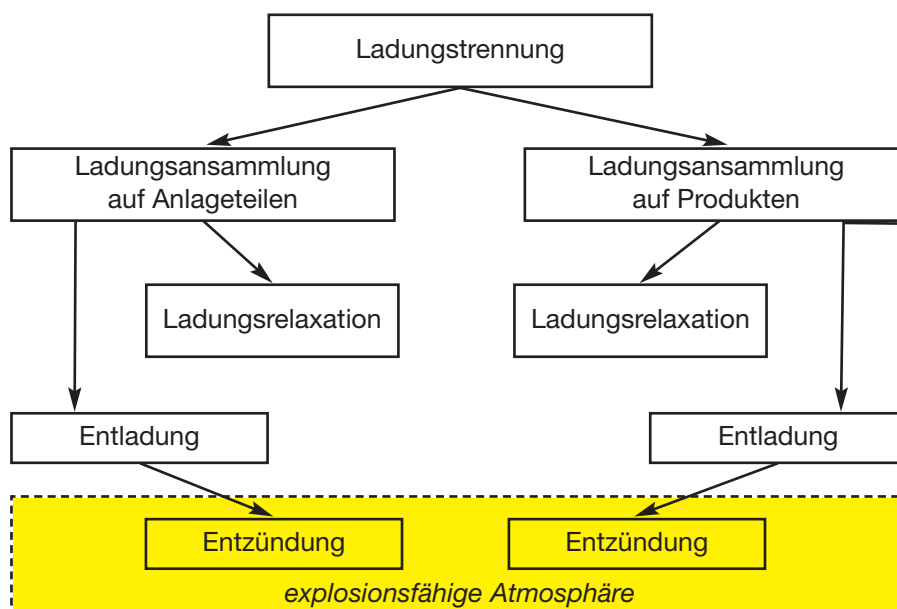


Bild 2: Schematische Darstellung der elektrostatischen Vorgänge, welche zur Entzündung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen.

Bei der Berührung zweier Oberflächen kann es je nach Materialkombination und Oberflächenbeschaffenheit zum Austausch von Ladungsträgern an der Oberfläche kommen. Dieser Ladungsaustausch wird in der Festkörperphysik durch die Elektronenaustrittsarbeit aus den betreffenden Oberflächen beschrieben und führt zur Ausbildung eines Kontaktpotentials. Obwohl die genannten Begriffe streng genommen nur bei kristallinen Feststoffen definiert sind, können sie auch bei amorphen Strukturen wie

bei Polymeren sinngemäss verwendet werden. Ist nach dem Kontakt die mechanische Trennung hinreichend schnell im Vergleich zur Beweglichkeit der Ladungsträger auf den Oberflächen, sind diese nach der Trennung aufgeladen. Auf diese Weise kommt es zu einer Ladungstrennung, das heisst zu einer Trennung von positiven und negativen Ladungsträgern (siehe Bild 3). Dieser Prozess wird üblicherweise als «Aufladung» bezeichnet. Dies bedeutet, dass in der Praxis immer dann mit Aufladung gerechnet werden muss, wenn zwei Oberflächen voneinander getrennt werden, wovon mindestens eine elektrisch isolierend ist. Ladungstrennung wird somit immer durch den Prozess selbst bestimmt und kann in Form eines Aufladestroms gemessen werden. Der Aufladestrom kann auch als Produkt aus spezifischer Produktaufladung und Massenfluss berechnet werden.

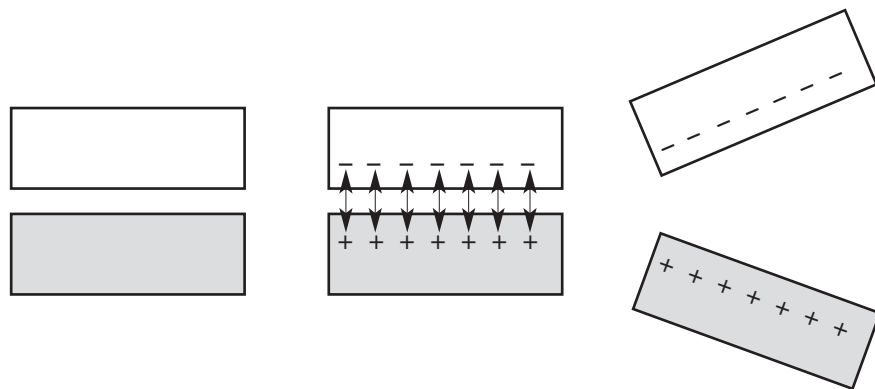


Bild 3: Aufladung durch Trennung zweier Oberflächen

Oberflächenkontakt mit anschliessender Trennung sowie Schleif- oder Reibbewegungen zwischen schlecht leitfähigen Oberflächen sind häufig vorkommende Abläufe in industriellen Prozessen. Beispiele im weitesten Sinn hierfür sind das Strömen oder die Filtration nichtleitfähiger Flüssigkeiten, die Bewegung von Schüttgütern in Mahl-, Misch- oder Sieboptionen, die pneumatische Förderung von Schüttgütern, das Gehen von Personen oder das Rollen von Fahrzeugen auf isolierenden Fussböden und die Bewegung von Transmissionsriemen oder -bändern über Antriebsscheiben oder Umlenkwalzen. Bei diesen oder ähnlichen Prozessen sind elektrostatische Aufladungen kaum vermeidbar. Es ist wichtig, zu beachten, dass bei all diesen Prozessen immer beide Oberflächen, die miteinander im Kontakt stehen, nach der Trennung aufgeladen sind. Im Fall der Produkthandhabung und Produktverarbeitung bedeutet dies, dass sowohl das Produkt als auch die Anlage aufgeladen werden, wie in Bild 2 dargestellt. Dieser Sachverhalt muss bei jeder Beurteilung von Gefahren durch elektrostatische Aufladung beachtet werden.

Neben der Aufladung durch Trennung, die auch «Triboaufladung» genannt wird, gibt es noch andere Auflademechanismen (siehe Bild 4). Ein weiteres Beispiel ist die Influenz. Eine Aufladung über Influenz erfolgt dann, wenn eine elektrisch leitfähige Oberfläche einem elektrischen Feld ausgesetzt wird, welches seinerseits durch eine Ladungsansammlung erzeugt worden ist. Ferner kann eine Oberfläche auch durch das «Aufsprühen» von Ladungen aufgeladen werden. Hierzu ist erforderlich, dass die Ladungen in Form von Ionen oder Elektronen über Ionisation der Luft (oder eines anderen Gases) erzeugt und dem Verlauf des elektrischen Feldes folgend auf einer Oberfläche abgelagert werden

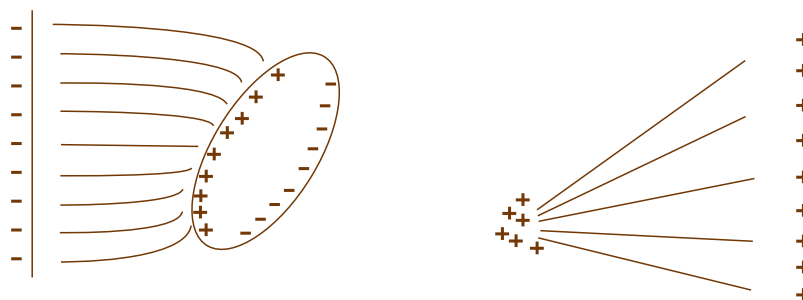


Bild 4: Aufladung durch Influenz und durch Aufsprühen von Ladungen

Ladungstrennung alleine führt noch nicht zu einer gefährlichen Situation. Die Menge der angesammelten Ladung ist die entscheidende Grösse. Diese wird durch die Ladungstrennungsrate (Aufladestrom) und die Ladungsableitungsrate (Entladestrom) bestimmt. In der Praxis können Ladungen auf elektrisch von Erde isolierten Leitern, auf isolierenden Oberflächen oder auf isolierenden Produkten, wie z.B. isolierenden Flüssigkeiten (Kohlenwasserstoffe) oder Kunststoffpulvern angesammelt werden. Die Ladungsableitung wird durch den totalen Erdableitwiderstand bestimmt, der sich seinerseits aus den unterschiedlichen spezifischen Materialwiderstände der Anlage und der Produkte sowie aus der geometrischen Anordnung zusammensetzt.

Eine Ladungsableitung erfolgt schon bei vergleichsweise hohem Erdableitwiderstand. Die elektrischen Ströme, die in der Praxis infolge von Trennprozessen auftreten, sind sehr klein. Typische Werte für die Stromstärke betragen  $10^{-6}$  A oder weniger. Unter extremen Bedingungen (hohe Trenngeschwindigkeiten) werden Werte bis  $10^{-4}$  A erreicht. Für derart kleine Stromstärken ist eine Ladungsableitung nach Erde über einen Widerstand von  $10^6$  bis  $10^8$  Ohm hinreichend, um eine gefährlich hohe Aufladung (Ladungsansammlung) zu vermeiden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verwendung von hochisolierenden Kunststoffmaterialien, wie Polyethylen, Polypropylen, etc., oder von apolaren Flüssigkeiten wie Kerosin, Benzin, Hexan, Toluol, etc. zu Erdableitwiderständen weit oberhalb der oben genannten Grenze führt.

Sofern die Ladungsansammlung immer grösser wird, kann das davon ausgehende elektrische Feld den Wert der Durchbruchfeldstärke in Luft erreichen. Diese Durchbruchfeldstärke wird auch «dielektrische Festigkeit» von Luft genannt. Sie beträgt in Luft unter Normalbedingungen ca. 3 MV/m. Beim Erreichen dieses Grenzwerts kann eine sogenannte «Entladung» entstehen. Ein Teil der oder die gesamte in der Ladungsansammlung gespeicherten Energie kann in einer solchen Entladung freigesetzt werden. Es entsteht ein energiereicher, heisser Entladungskanal, der eine vorhandene explosionsfähige Atmosphäre möglicherweise entzündet.

Die in der Entladung freigesetzte Energie und die Zündempfindlichkeit der vorhandenen explosionsfähigen Atmosphäre, charakterisiert durch deren Mindestzündenergie, sind dafür massgebend, ob eine Entzündung stattfindet oder nicht.

Die physikalischen Grössen, welche die in Bild 2 schematisch dargestellten Vorgänge beschreiben und beeinflussen, sind in derselben schematischen Art in Bild 5 dargestellt. Die durchgeführte Operation bestimmt den Trennprozess und somit die Höhe des Aufladestroms. Die verschiedenen Widerstandswerte für die Anlagenteile und Produkte sowie die elektri-

schen Erdverbindungen sind dafür verantwortlich, ob eine sichere Ableitung der Ladungen nach Erde möglich ist, oder ob die Ladungen angesammelt werden. Die Beurteilung des Auftretens und der Zündfähigkeit von Entladungen in unterschiedlichen Situationen in der Praxis stellt den wichtigsten, aber auch schwierigsten Schritt bei der Analyse von Gefahren durch elektrostatische Aufladungen dar. Da es praktisch unmöglich ist, das Auftreten und die Zündfähigkeit von Entladungen in der industriellen Praxis aufgrund der Gesetzmässigkeiten der Plasmaphysik zu beurteilen, wird üblicherweise rein phänomenologisch vorgegangen. Das Auftreten von Entladungen hängt neben der Aufladungshöhe von den elektrischen Eigenschaften und der räumlichen Anordnung der aufgeladenen Objekte ab. Diese Parameter bestimmen die Art der Entladung und somit die in der Entladung freigesetzte Energie sowie deren Zündfähigkeit. Ob es zu einer Entzündung kommt, hängt dann vom Vergleich zwischen der Mindestzündenergie der explosionsfähigen Atmosphäre und der Zündfähigkeit der Entladung ab.

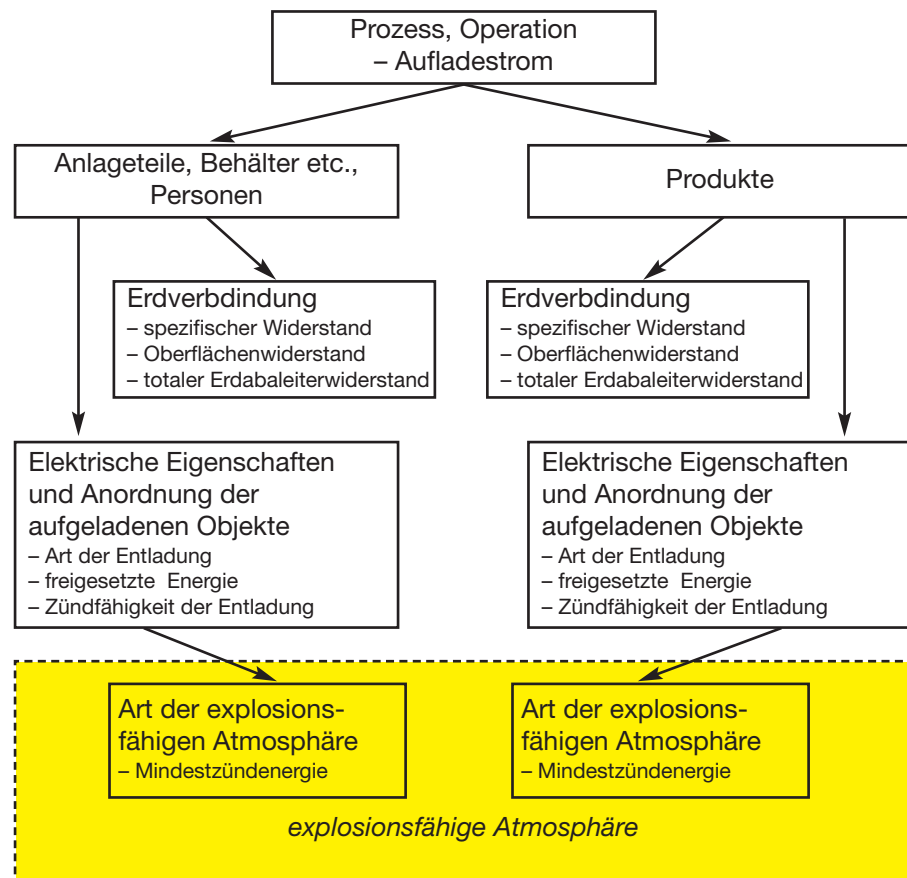


Bild 5: Schematische Darstellung der Parameter, die die in Bild 2 gezeigten Vorgänge beschreiben

#### 4. Entladungen – Auftreten und Zündfähigkeit

##### 4.1 Entladungen ausgehend von isolierten Leitern

###### 4.1.1 Funkenentladungen

Infolge des vermehrten Gebrauchs von isolierenden Kunststoffen beim Apparate- und Anlagenbau besteht immer mehr die Gefahr, dass an und für sich leitfähige Anlagenteile elektrisch von Erde isoliert sind. Eine Aufladung von isolierten, leitfähigen Teilen ist für die Mehrzahl der durch statische Elektrizität in der Industrie verursachten Entzündungen von explo-

sionsfähigen Atmosphären verantwortlich. Typische Beispiele sind:

- Metallflansch auf Glasrohr
- Leitfähiger flexibler Schüttgutbehälter (FIBC) aufgehängt an isolierenden Tragschlaufen
- Person, isoliert von Erde durch isolierende Schuhe und/oder isolierenden Fussboden

In allen oben genannten Beispielen kann eine sogenannte Funkenentladung auftreten, sobald der isolierte Leiter aufgeladen wird. Die Funkenentladung tritt dann auf, wenn dessen Potential so hoch wird, dass innerhalb einer geeigneten Funkenstrecke zu einem geerdeten Objekt die Durchbruchfeldstärke erreicht wird. Die Energie  $W$  einer solchen Funkenentladung lässt sich nach der Formel

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1)$$

berechnen. Hierbei bedeuten  $C$  die Kapazität des isolierten, leitfähigen Objektes und  $U$  dessen Potential. Um die Zündgefahr zu beurteilen, muss die nach Formel (1) erhaltene Energie mit der Mindestzündenergie der betreffenden explosionsfähigen Atmosphäre verglichen werden. Hierbei ist derjenige Wert der Mindestzündenergie massgebend, der ohne zusätzliche Induktivität im Entladekreis gemessen worden ist. Grundsätzlich können brennbare Gase, Dämpfe und Stäube durch Funkenentladungen entzündet werden. Die im folgenden beschriebenen Massnahmen müssen deshalb überall dort angewendet werden, wo explosionsfähige Atmosphären aus solchen Stoffen zu erwarten sind.

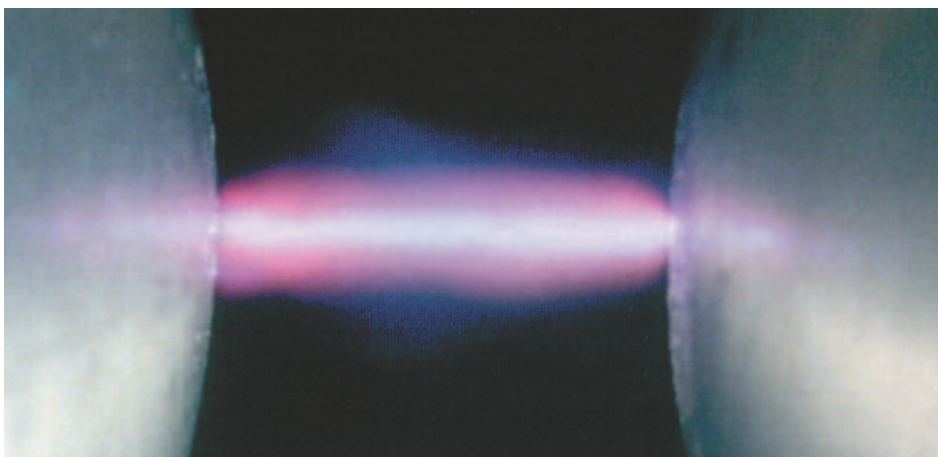


Photo: D. Settele, Mannheim

Bild 6: Funkenentladung

#### 4.1.2 Massnahmen gegen das Auftreten von Funkenentladungen

Theoretisch betrachtet, können Funkenentladungen einfach durch Erden aller leitfähigen Teile vermieden werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass die sichere Erdung aller leitfähigen Teile in der Praxis nicht immer so einfach zu bewerkstelligen ist. Dies gilt insbesondere für ortsveränderliche Objekte, welche vom Personal immer wieder neu geerdet werden müssen und für Anlagen, in welchen leitfähige und nichtleitfähige Bauteile verwendet werden und deshalb die Wahrscheinlichkeit für isoliert eingebaute leitfähige Teile hoch ist. Aus diesem Grund sind eine gute Schulung des Personals und der ausschliessliche Gebrauch von leitfähigen Materialien im Anlagenbau eine wichtige Voraussetzung für die Vermeidung von Funkenentladungen in der Praxis.

Aus der Sicht der Elektrostatik ist zur Vermeidung von Funkenentladungen ein Erdableitwiderstand von  $10^6$  Ohm für Anlagenteile und von  $10^8$  Ohm für Personen hinreichend.

Im Betrieb ist es üblicherweise sinnvoll, viel tiefere Werte als  $10^6$  Ohm für den Erdableitwiderstand zu fordern, sofern die Erdverbindung über metallische Kontakte bewerkstelligt wird. Falls unter diesen Umständen der Erdableitwiderstand wesentlich höher als 10 Ohm liegt, ist die Erdverbindung schadhaft und kann jederzeit auch den Grenzwert von  $10^6$  Ohm überschreiten.

#### 4.2 Entladungen ausgehend von isolierenden Oberflächen, isolierenden Flüssigkeiten und isolierenden Schüttgütern

Wenn Ladungen auf nichtleitfähigen Oberflächen angeordnet sind, können sie nicht in einer einzelnen Funkenentladung abgeführt werden. Die Beweglichkeit der Ladungen längs der Oberfläche ist viel zu klein, verglichen mit der Entladedauer einer Funkenentladung. Es gibt jedoch unter diesen Umständen drei andere Entladungsformen. Ihr Auftreten hängt von der geometrischen Anordnung der Ladungen und ihrer Umgebung ab.

##### 4.2.1 Büschel- und Coronaentladungen

Wenn Ladungen eines Vorzeichens auf der Oberfläche eines Isolators verteilt sind, können sogenannte Corona- oder Büschelentladungen auftreten, sobald der Oberfläche eine geerdete Elektrode wie beispielsweise der Finger einer Person angenähert wird. Hierbei wird die elektrische Feldstärke an der Elektrodenoberfläche derart erhöht, dass der Wert der Durchbruchfeldstärke in Luft (ca. 3 MV/m unter Normalbedingungen) erreicht wird. Ob eine Corona- oder Büschelentladung auftritt, hängt von vielen Faktoren, wie Krümmungsradius der Elektrode, Annäherungsgeschwindigkeit der Elektrode und Polarität der Oberflächenladungen ab. In der Praxis kann im allgemeinen angenommen werden, dass nur Coronaentladungen auftreten, sofern der Krümmungsradius der Elektrode weniger als 0.5 mm beträgt. Sofern der Krümmungsradius grösser als 5 mm ist, treten mit grosser Wahrscheinlichkeit Büschelentladungen auf. Im Hinblick auf eine Gefahrenbeurteilung in der Praxis sollte im Sinne der Betrachtung des schlimmsten Falles immer angenommen werden, dass die energiereicheren Büschelentladungen auftreten.

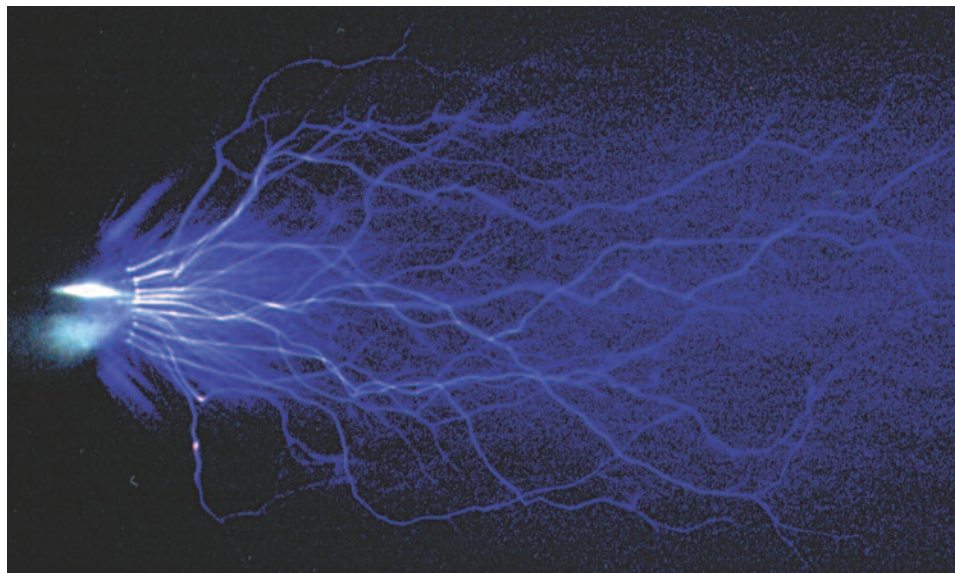


Bild 7: Büschelentladungen

Photo: D. Settele, Mannheim

Büschelentladungen treten aber nicht nur im Zusammenhang mit hochaufgeladenen isolierenden Kunststoffoberflächen auf. Immer, wenn eine geerdete leitfähige Elektrode in ein elektrisches Feld hoher Feldstärke hineingebracht wird, muss mit dem Auftreten von Büschelentladungen gerechnet werden. Das elektrische Feld kann durch eine hoch aufgeladene isolierende Flüssigkeit oder Suspension, einen Tröpfchennebel, eine Schüttung aus isolierendem Schüttgut oder eine Staubwolke erzeugt werden.

Die charakteristischen Eigenschaften und die Zündfähigkeit von Büschelentladungen wurden von verschiedenen Autoren untersucht [9, 16]. Die in der Literatur angegebenen Werte für die Äquivalentenergie von Büschelentladungen wurden mit explosionsfähigen Gas/Luft-Gemischen bestimmt und liegen bei wenigen Millijoule. Die Zündfähigkeit der Büschelentladungen wird durch den Krümmungsradius der Elektrode, die Polarität des elektrischen Feldes und – falls das elektrische Feld durch eine aufgeladene Kunststoffoberfläche erzeugt wird – durch die Oberflächenladungsdichte und die Ausdehnung der aufgeladenen Oberfläche bestimmt.

Ausgehend von den experimentell bestimmten Werten für die Äquivalentenergie von Büschelentladungen muss angenommen werden, dass die meisten explosionsfähigen Gas- oder Lösemitteldampf/Luft-Gemische und hybride Gemische durch Büschelentladungen gezündet werden können. Obwohl die Mindestzündenergie von einigen Stäuben im Bereich unterhalb weniger Millijoules liegt, ist bis heute keine Zündung einer Staubwolke durch Büschelentladungen beobachtet worden. Es kann deshalb gemäss heutigem Kenntnisstand angenommen werden, dass eine Staubzündung durch Büschelentladungen sehr unwahrscheinlich ist, sofern nicht zusätzlich brennbare Gase oder Dämpfe vorhanden sind. Folglich müssen Büschelentladungen in Bereichen vermieden werden, wo explosionsfähige Gas- oder Dampf/Luft-Gemische auftreten können.

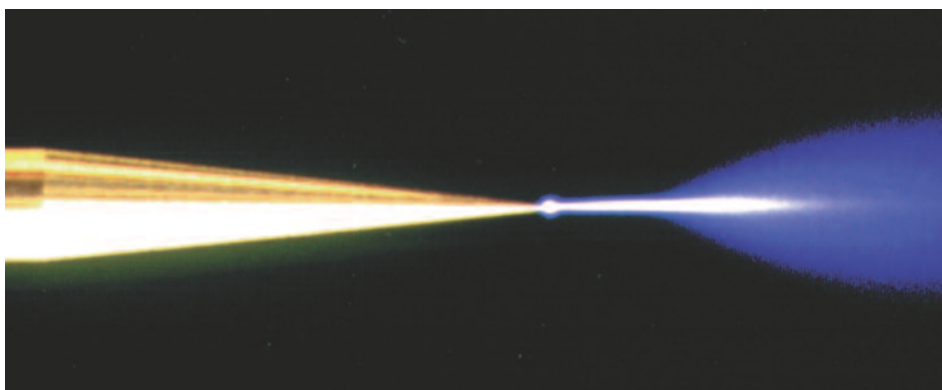


Bild 8: Coronaentladung

Photo: D. Settele, Mannheim

#### 4.2.2 Massnahmen gegen das Auftreten von Büschel- und Coronaentladungen

Büschel- und Coronaentladungen ausgehend von Apparaten, Einrichtungen, Behälter und Packmaterialien können durch den Gebrauch von leitfähigen Materialien oder durch die Begrenzung der Ausdehnung von aufladbaren Oberflächen vermieden werden. In diesem Zusammenhang wird oft die Bezeichnung «antistatisch» gebraucht. Im deutschen Sprachbereich entspricht die genau definierte Eigenschaft «nicht aufladbar» am ehesten der Bezeichnung «antistatisch». Eine Oberfläche wird als nicht aufladbar bezeichnet, sofern ihr Oberflächenwiderstand gemessen im

Normalklima unterhalb  $10^9$  Ohm liegt. Unter diesen Umständen sind keine Büschelentladungen zu erwarten. Neben dem Oberflächenwiderstand wird auch die Ladungszersetzungszeit (Relaxationszeit) benutzt, um Oberflächen bezüglich ihres Entladungsverhaltens zu charakterisieren.

Das Einarbeiten von sog. antistatischen Additiven in Polymere wird oft angewandt, um das Ladungsableitungsverhalten von aufladbaren Oberflächen zu verbessern. Durch dieses Verfahren kann der Oberflächenwiderstand auf Werte innerhalb des oben angegebenen Bereichs reduziert werden. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch darin, dass die Wirksamkeit der antistatischen Ausrüstung stark von der relativen Feuchte der Umgebungsluft abhängt und dass das Antistatikmittel von Substanzen im Kontakt mit den behandelten Oberflächen absorbiert werden kann.

Das Einarbeiten von Kohlepulver in das Polymer kann bei geeigneter Menge, Feinheit und Verteilung die Volumenleitfähigkeit des Polymers um viele Größenordnungen verbessern. Derart veränderte Kunststoffe sind aus der Sicht der Elektrostatik als leitfähig zu betrachten und müssen in der Praxis geerdet werden.

Infolge der Wirkung der Influenz treten bei aufladbaren Oberflächen, welche mit einer leitfähigen, geerdeten Schicht hinterlegt sind (z.B. isolierend beschichtete Metalloberflächen), keine Büschelentladungen auf. Dasselbe gilt für Wände aus isolierendem Material, sofern mindestens eine Oberfläche im oben genannten Sinn nicht aufladbar ist. Büschelentladungen werden in diesen Fällen aber nur sicher vermieden, wenn die Schichtdicke bzw. Wandstärke genau festgelegte Grenzwerte nicht überschreitet und die leitfähige bzw. nicht aufladbare Oberfläche nicht vom Rest des Verbunds abgelöst werden kann.

#### 4.2.3 Gleitstielbüschelentladungen

Sofern die Ladung nicht in Form einer Ladungsschicht eines Ladungsvorzeichens auf einer isolierenden Oberfläche angeordnet ist, sondern in Form einer Ladungsdoppelschicht mit Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens auf den gegenüberliegenden Oberflächen einer isolierenden Folie, können Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Sie werden durch einen elektrischen Kurzschluss zwischen den zwei mit entgegengesetzten Vorzeichen aufgeladenen Oberflächen einer isolierenden Folie ausgelöst. Dieser Kurzschluss kann entweder durch Annäherung von zwei elektrisch miteinander verbundenen Elektroden an die beiden Oberflächen der Folie oder durch elektrische oder mechanische Perforation der Folie zustande kommen. Das Entladungsbild sieht immer gleich aus: Viele Entladungskanäle breiten sich sternförmig vom Ort des Kurzschlusses entlang der Oberflächen aus. Durch diese Entladungskanäle, welche alle in einem hellen zentralen Entladungskanal zwischen den Elektroden und der Folienoberfläche oder – im Fall der Folienperforation – zwischen den beiden Folienoberflächen enden, werden die Ladungen grossflächig von den Folienoberflächen abgeführt.

Während langer Zeit wurde angenommen, dass diese Entladungen nur auftreten, wenn eine Seite der Folie in dichtem Kontakt mit einer geerdeten Metalloberfläche ist. In diesem Fall wird die zweite Ladungsschicht mit entgegengesetztem Vorzeichen automatisch durch influenzierte Ladungen an der Metalloberfläche gebildet. Es kann aber durch «Aufsprayen» der zweiten Ladungsschicht mittels Coronaentladungen leicht nachgewiesen werden, dass die geerdete Metalloberfläche zur Ausbildung

der Ladungsdoppelschicht nicht unbedingt notwendig ist. Wenn eine isolierende Wand eines Gebindes oder Behälters auf der Innenseite hoch aufgeladen wird, ist das elektrische Feld üblicherweise nach aussen durch die Wand hindurch nach Erde gerichtet und kann im Aussenraum Coronaentladungen auslösen, welche zu einer Aufladung der Aussenwand mit entgegengesetztem Vorzeichen führen. Ein derartiger Auflademechanismus kann beispielsweise beim Befüllen eines isolierenden Behälters mit hoch aufgeladenem isolierendem Schüttgut beobachtet werden.

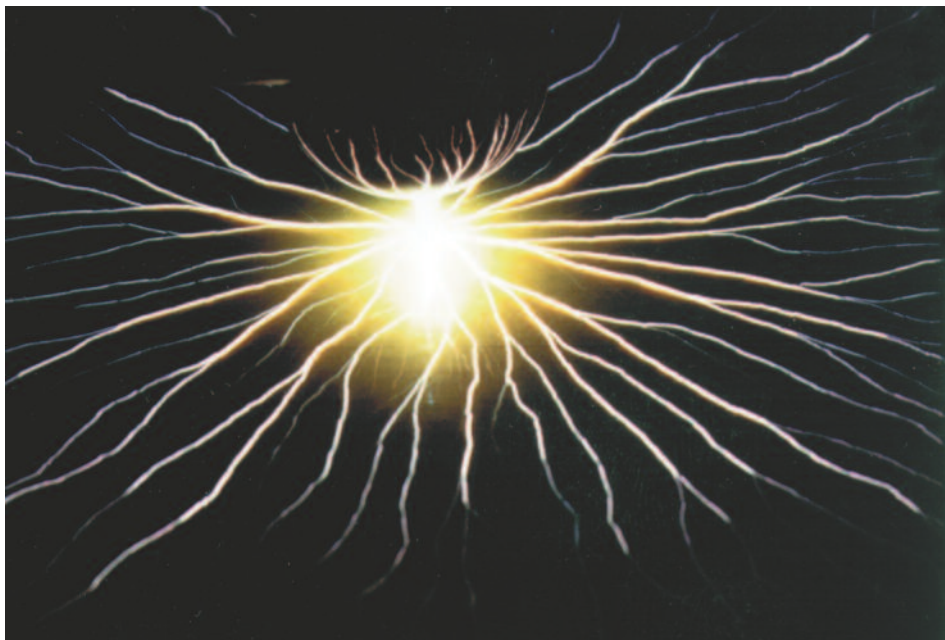


Bild 9: Gleitstielbüschelentladung

Photo: D. Settele, Mannheim

Aufgrund praktischer Erfahrung und basierend auf Resultaten aus experimentellen Untersuchungen kann angenommen werden, dass derart hohe Oberflächenladungsdichten, wie sie zur Auslösung von Gleitstielbüschelentladungen erforderlich sind, nicht durch manuell ausgeführte Trennprozesse wie beispielsweise Abwischen einer isolierenden Oberfläche oder Ausleeren von Pulver aus einem Plastiksack herbeigeführt werden können. Aufladungsprozesse in Verbindung mit schnellen Trennvorgängen wie sie beispielsweise beim pneumatischen Transport von Schüttgut durch isolierende Rohrleitungen oder leitfähige Rohrleitungen mit isolierender Innenbeschichtung hoher elektrischer Durchschlagsfestigkeit auftreten, sind für den Aufbau derart hoher Oberflächenladungsdichten notwendig.

Die Energie von Gleitstielbüschelentladungen ist im Allgemeinen hinreichend zur Entzündung explosionsfähiger Gas-, Lösemitteldampf- und Staub/Luft-Gemische. Personen können einen Schock erleiden, wenn sie z.B. durch Berühren einer hoch aufgeladenen Oberfläche eine Gleitstielbüschelentladung auslösen. Solche Entladungen müssen in Bereichen, in welchen explosionsfähige Gas-, Dampf- oder Staubatmosphären gebildet werden können, vermieden werden.

#### 4.2.4 Massnahmen gegen das Auftreten von Gleitstielbüschelentladungen

Gleitstielbüschelentladungen werden vermieden durch das Verwenden von leitfähigen Materialien oder von isolierenden Materialien niedriger elektrischer Durchschlagsfestigkeit an allen Orten, wo eine Ausbildung

hoher Oberflächenladungsdichten möglich ist. Sofern die Durchschlagsspannung durch eine isolierende Wand oder Beschichtung weniger als 4 kV beträgt, können keine Gleitstielbüschelentladungen auftreten.

#### 4.2.5 Schüttkegelentladungen

Neben Funkenentladungen ausgehend von aufgeladenem leitfähigem Produkt und Büschel- oder Coronaentladungen ausgehend von aufgeladenem isolierendem Produkt wurde eine weitere Entladungsform, sog. Schüttkegelentladungen, im Zusammenhang mit Schüttungen aus isolierendem Produkt in Silos und grossen Behältern beobachtet. Diese Schüttkegelentladungen können an Produktschüttungen beim Befüllen von Silos und Behältern mit aufgeladenen hoch isolierenden Schüttgütern entstehen. Sie bilden sich in Form von radial nach aussen gerichteten oder in speziellen Fällen durch die Schüttung hindurch verlaufenden Entladungskanälen aus. Schüttkegelentladungen können explosionsfähige Gas-, Dampf und Staubatmosphären entzünden. Ihre Zündfähigkeit (äquivalente Zündenergie) nimmt mit wachsendem Silodurchmesser und mit wachsender Teilchengrösse des die Schüttkegelentladung erzeugenden Schüttgutes zu [12-14].

#### 4.2.6 Massnahmen gegen das Auftreten von Schüttkegelentladungen

Die Vermeidung einer hohen Ladungsakkumulation in der Produktschüttung ist die einzige sichere Massnahme gegen das Auftreten von Schüttkegelentladungen. Bei Verwendung von leitfähigen geerdeten Silos kann bis zu einem spezifischen Schüttgutdurchgangswiderstand von ca.  $10^{10}$  Ohm•m mit einem hinreichend schnellen Ladungsabfluss gerechnet werden. Für höhere Schüttgutdurchgangswiderstände kann je nach Eintragsart und Eintragsgeschwindigkeit eine gefährlich hohe Ladungsakkumulation nicht mehr ausgeschlossen werden. Da im allgemeinen in der Praxis eine Erhöhung der Schüttgutleitfähigkeit kaum möglich ist, müssen in denjenigen Situationen, in welchen Schüttkegelentladungen nicht ausgeschlossen werden können und die zu erwartende Äquivalentenergie gleich oder höher als die Mindestzündenergie des zu verarbeitenden Produktes ist, andere Explosionsschutzmassnahmen wie Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre (z.B. Ausschluss von brennbaren Gasen, Dämpfen und Feinstaub oder Sauerstoffreduktion) oder konstruktiver Explosionsschutz angewendet werden.

#### 4.2.7 Gewitterblitzähnliche Entladungen

Vor der Entdeckung der Schüttkegelentladungen wurde die aufgeladene Staubwolke als die gefährlichste elektrostatische Zündquelle in einem Silo oder Behälter betrachtet. Diese Ansicht basierte auf der Beobachtung von Blitzen in den Staub- und Aschewolken während Ausbrüchen von Vulkanen. Zwischenzeitlich wurden systematisch Versuche in einem  $60 \text{ m}^3$  Behälter durchgeführt, die in Übereinstimmung mit bisherigen praktischen Erfahrungen den Schluss zulassen, dass in Anlagen industrieller Grösse das Auftreten von gewitterblitzähnlichen Entladungen sehr unwahrscheinlich ist.

## 5. Die Richtlinie 94/9/EC und elektrostatische Zündgefahren

In der Richtlinie 94/9/EC (ATEX 95) [17], wird ausführlich festgelegt, dass Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemässen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen keine Zündgefahr darstellen dürfen. Dies gilt ausdrücklich auch für nicht elektrische Betriebsmittel (Anhang II Abschnitt 1.0.1). Diese Geräte und Schutzsysteme dürfen folglich keine Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen darstellen. Darauf wird im Anhang II Abschnitt 1 eingegangen. Im Detail betreffen die Anforderungen:

- das Vermeiden von Zündquellen, allgemein (Abschnitt 1.0.1 und 1.0.2)
- die Wahl des geeigneten Materials (Abschnitt 1.1.1 und 1.1.3)
- die Funktionsweise und Konstruktion (Abschnitt 1.2.1)
- die mögliche Zündquellen (Abschnitt 1.3), speziell elektrostatische Aufladung (Abschnitt 1.3.2)

Ferner wird festgelegt, dass auch bei Störungen und infolge der Alterung keine Zündgefahren auftreten dürfen.

Die in der Richtlinie festgehaltenen Anforderungen zur Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen bei Geräten und Schutzsystemen betreffen in erster Linie die Vermeidung von Funken- und Büschelentladungen. Wie in den Abschnitten 4.1.2 und 4.2.2 des vorliegenden Artikels beschrieben werden Funkenentladungen durch Erdung aller leitfähigen Teile und zündfähige Büschelentladungen durch

- das Erhöhen der Oberflächenleitfähigkeit isolierender Oberflächen
- die Begrenzen der Ausdehnung isolierender Oberflächen
- das Beschränken der Schichtdicke isolierender Beschichtungen vermieden.

Die diesbezüglichen Anforderungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dünne isolierende Beschichtungen von leitfähigen geerdeten Oberflächen sind in allen Zonen zulässig, sofern die Dicke 2.0 mm bzw. 0.2 mm im Falle von Gasen oder Dämpfen der Gruppen IIA und IIB bzw. IIC nicht übersteigt [11, 17, 18, 19].

## 6. Die Risikobeurteilung und die Vermeidung der statischen Elektrizität in den harmonisierten Normen

Wie in Abschnitt 3 «Systematisches Vorgehen zur Beurteilung von Zündgefahren durch elektrostatische Aufladungen» dargelegt, stellt die Beurteilung des Auftretens und der Zündfähigkeit von Entladungen in unterschiedlichen Situationen in der Praxis den wichtigsten, aber auch schwierigsten Schritt bei der Analyse von Gefahren durch elektrostatische Aufladungen dar. In Tabelle 2 sind deshalb die Zündfähigkeiten der verschiedenen Entladungsarten in der Praxis nochmals zusammengefasst. Heute liegen genügend Erfahrungen und Kenntnisse vor, um beim Vorhandensein der notwendigen Basisdaten eine solche Beurteilung durchführen zu können. Die erforderlichen Daten für eine verlässliche Analyse sind eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des möglicherweise vorhandenen explosionsfähigen Gemisches, der Widerstände oder Leitfähigkeiten der verwendeten Stoffe, Anlagen, Packmittel und persönlichen Ausrüstungsgegenstände, der Volumina und geometrischen Anordnung der Anlagen und technischen Einrichtungen sowie eine genaue Kenntnis der vorhandenen Erdableit- und Potentialausgleichverhältnisse.

	Zündfähigkeit		Stäube
	Gase Dämpfe		
Entladungsart	MZE < 0.025 mJ	MZE > 0.025 mJ	
Funkenentladung	+	+	+
Spitzenentladung	+	-	-
Büschelentladung	+	+	-
Gleitstiehbüschelentladung	+	+	+
Schüttkegelentladung	+	+	+
Gewitterblitzartige Entladung	+	+	+

Tabelle 1: Zündfähigkeiten der verschiedenen Entladungsarten

### 6.1 Grundlagen und Methodik im Explosionsschutz EN 1127-1:2008 (Abschnitt 5.3.7 und 6.4.7) [3]

#### 6.1.1 Risikobeurteilung

Unter bestimmten Bedingungen können zündfähige Entladungen statischer Elektrizität auftreten. Die Entladung aufgeladener, isoliert angeordneter leitfähiger Teile kann leicht zu zündfähigen Funken führen. An aufgeladenen Teilen aus nichtleitfähigen Stoffen, zu denen die meisten Kunststoffe, aber auch andere Stoffe, gehören, sind Büschelentladungen und in besonderen Fällen bei schnellen Trennvorgängen (beispielsweise beim Ablaufen von Folien über Walzen, Treibriemen) oder Kombinationen von leitfähigen und nichtleitfähigen Materialien auch Gleitstiehbüschelentladungen möglich. Ausserdem können Schüttkegelentladungen bei Schüttgütern sowie gewitterblitzähnliche Entladungen auftreten.

Büschelentladungen können nahezu alle explosionsfähige Gas- und Dampfatamosphären entzünden. Nach dem heutigen Kenntnisstand kann selbst die Zündung von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemische mit extrem niedrigen Mindestzündenergien durch Büschelentladungen ausgeschlossen werden [16]. Funken, Gleitstiehbüschel-, Schüttkegel- und gewitterblitzähnliche Entladungen können abhängig von ihrer Entladungsenergie alle Arten explosionsfähiger Atmosphäre entzünden.

## 6.1.2 Schutzmassnahmen gegen Zündgefahren durch statische Elektrizität

Werden Gefährdungen durch statische Elektrizität festgestellt, dann müssen in Abhängigkeit von der Kategorie die Geräte, Schutzsysteme und Komponenten folgende Anforderungen erfüllen:

### 6.1.2.1 Alle Kategorien

Wichtigste Schutzmassnahme ist das Verbinden und Erden aller leitfähigen Teile, die sich gefährlich aufladen könnten. Bei Vorhandensein nicht leitfähiger Teile und Stoffe reicht diese Schutzmassnahme jedoch nicht aus. In diesem Fall müssen gefährliche Aufladungen von nichtleitfähigen Teilen und Stoffen, einschliesslich von Feststoffen, Flüssigkeiten und Stäuben, vermieden werden. Diese Informationen müssen in die entsprechenden Betriebsanleitungen aufgenommen werden.

### 6.1.2.2 Kategorie 1

Zündfähige Entladungen müssen auch unter Berücksichtigung selten auftretender Betriebsstörungen ausgeschlossen werden.

### 6.1.2.3 Kategorie 2

Zündfähige Entladungen dürfen bei bestimmungsgemäsem Betrieb der Anlagen, einschliesslich Wartung und Reinigung, und bei Betriebsstörungen, mit denen man üblicherweise rechnen muss, nicht auftreten.

### 6.1.2.4 Kategorie 3

Andere Massnahmen als Erdung sind in der Regel nur dann erforderlich, wenn zündfähige Entladungen häufig auftreten (beispielsweise bei nicht ausreichend leitfähigen Treibriemen).

## 6.2 Anforderungen an elektrische Betriebsmittel der Gerätegruppe II (IEC/EN 60079-0) [18]

Mit der Neuauflage 2007 der IEC/EN 60079-0 wurden die Anforderungen an die elektrischen Betriebsmittel der Geräteschutzniveaus Ga, Gb und Gc für alle Zündschutzarten zusammengefasst.

### 6.2.1 Schutzmassnahmen

Die elektrischen Geräte müssen so konstruiert sein, dass bei bestimmungsgemäsem Gebrauch, bei der Wartung und bei Reinigungsarbeiten Zündgefahren durch elektrostatische Aufladungen vermieden werden. Diese Anforderung muss erfüllt werden durch eine der folgenden Massnahmen:

- a) durch geeignete Wahl des Werkstoffes, sodass der Oberflächenwiderstand des Gehäuses, gemessen nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren, nicht höher ist als  $10^9$  Ohm bei  $(23 \pm 2)$  °C und  $(50 \pm 5)$  % relativer Feuchte,
- b) oder durch Begrenzung der Oberfläche von nichtmetallischen Gehäuseteilen

EPL	Max. zulässige Oberfläche [mm <sup>2</sup> ]		
	IIA	IIB	IIC
Ga	5000	2500	400
Gb	10000	10000	2000
Gc	10000	10000	2000

Tabelle 2: Max. zulässige Oberfläche

Die obigen Werte für die max. zulässige Oberfläche dürfen um den Faktor 4 überschritten werden, wenn die nichtmetallischen Gehäuseteile von einem geerdeten, leitfähigen Rahmen umgeben sind.

Alternativ müssen die Oberflächen von langgestreckten Teilen mit nichtmetallischen Oberflächen wie Rohre, Seile nicht berücksichtigt werden, wenn der Durchmesser oder die Breite die in der Tabelle angegebenen Werte nicht überschreiten. Elektrische Kabel sind von dieser Anforderung ausgenommen.

EPL	Max. zulässiger Durchmesser oder Breite [mm]		
	IIA	IIB	IIC
Ga	3	3	1
Gb	30	30	20
Gc	30	30	20

Tabelle 3: Max. zulässiger Durchmesser

- c) durch die Begrenzung einer nichtmetallischen Schicht, welche mit einer leitfähigen, geerdeten Oberfläche verbunden ist (beispielsweise Folien von Operatorpanels oder Tastaturen).

EPL	Max. zulässige Dicke [mm]		
	IIA	IIB	IIC
Ga	2	2	0.2
Gb	2	2	0.2
Gc	2	2	0.2

Tabelle 4: Max. zulässige Dicke

- d) durch Begrenzung der Ladungsübertragung oder durch die Unfähigkeit, eine gefährliche Ladung zu speichern entsprechend den in der Norm beschriebenen Verfahren.

Wenn die Zündgefahr nicht durch die Gestaltung des Gerätes vermieden werden kann, muss ein Warnschild auf die Sicherheitsmassnahmen hinweisen, die im Betrieb anzuwenden sind.

### 6.3 Anforderungen an elektrische Betriebsmittel der Gerätegruppe III (IEC/EN 60079-0) [18]

Mit der Neuausgabe 2007 der IEC 60079-0 wurde auch die neue Gerätegruppe III für Stäube eingeführt. Die Anforderungen gelten für die Geräteschutzniveaus Da, Db und Dc.

#### 6.3.1 Schutzmassnahmen

Die elektrischen Geräte müssen so konstruiert sein, dass bei bestimmungsgemäsem Gebrauch, bei der Wartung und bei Reinigungsarbeiten Zündgefahren durch sich ausbreitende Gleitstielbüschelentladungen verhindert werden. Diese Anforderung muss erfüllt werden durch eine der folgenden Massnahmen:

- a) durch geeignete Wahl des Werkstoffes, sodass der Oberflächenwiderstand des Gehäuses, gemessen nach dem in der Norm beschriebenen Verfahren, nicht höher ist als  $10^9$  Ohm bei  $(23 \pm 2)$  °C und  $(50 \pm 5)$  % relativer Feuchte,
- b) Durchschlagspannung  $\leq 4$  kV (gemessen durch die Dicke des Isolierstoffes nach dem in EN 60243-1 beschriebenen Verfahren);
- c) Schichtdicke von äusseren Isolationen auf Metallteilen  $\geq 8$  mm. (bei einer äusseren Kunststoffschicht von 8 mm Dicke oder mehr auf Metallteilen, wie z. B. Messsonden oder ähnlichen Anlageteilen, sind keine Gleitstielbüschelentladungen zu erwarten. Bei der Bemessung und Bewertung der Mindestschichtdicke der Isolierung ist die bei bestimmungsgemässer Verwendung zu erwartende Abnutzung zu berücksichtigen.)
- d) durch Begrenzung der Ladungsübertragung entsprechend den in der Norm beschriebenen Verfahren.

#### 6.4 Anforderungen für elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (IEC/EN 60079-14) [19]

In der Installationsnorm wurden die Anforderungen aus der IEC/EN 60079-0 übernommen. Bei der Installation werden Hilfsmittel wie Kunststoffplatten und Rohre für die Befestigung von elektrischen Geräten eingesetzt. Für diese Hilfsmittel müssen dieselben Anforderungen wie für die Geräte Gültigkeit haben.

#### 6.5 Nichtelektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen (EN 13643-1) [20]

Gehäuse von Geräten der Kategorien 1 und 2 sollen so konstruiert sein, dass bei bestimmungsgemäsem Gebrauch, Wartung und Reinigung, die Gefahr einer Entzündung infolge elektrostatischer Aufladungen vermieden wird. Diese Anforderung ist durch eine der folgenden Massnahmen zu gewährleisten:

- a) durch geeignete Materialauswahl, so dass der Oberflächenwiderstand des Gehäuses, gemessen nach der entsprechenden Norm bei  $(23 \pm 2)$  °C und  $(50 \pm 5)$  % relativer Feuchte,  $10^9$  Ohm nicht überschreitet
- b) durch Grösse, Form und Anordnung oder weitere Schutzmassnahmen, sodass das Auftreten derartiger gefährlicher elektrostatischer Aufladungen vermieden wird. Für Gerätekategorie 2G kann diese Anforderung durch Anwendung der Prüfung nach der EN 13463-1 Anhang C erfüllt werden, vorausgesetzt, dass Gleitstielbüschelentladungen nicht auftreten können (Gleitstielbüschelentladungen werden als wirksame Zündquellen für Gas, Dampf, Nebel und Staub/Luft-Gemische angesehen. Gleitstielbüschelentladungen können nach hoher Aufladung von nicht leitenden Schichten oder Überzügen auf metallischen Oberflächen entstehen und bei Geräten der Gruppe I und Gruppe II verhindert werden, indem eine Durchschlagspannung der Schichten von weniger als 4 kV sichergestellt wird. Für Geräte der Gruppe II D, die nur bei Staubatmosphären mit einer Mindestzündenergie von mehr als 3 mJ anzuwenden sind (gemessen bei einer kapazitiven Entladung), können zündwirksame elektrostatische

Entladungen, einschließlich Gleitstielbüschelentladungen, auch verhindert werden, indem eine Dicke der nicht leitenden Schichten von mehr als 10 mm sichergestellt wird.);

- c) oder durch Begrenzung der in jede beliebige Richtung projizierten Oberflächen von nicht leitenden Teilen des Gerätes, die elektrostatisch aufgeladen werden können, vorausgesetzt, dass Gleitstielbüschelentladungen nicht auftreten können.

Kategorie	Zulässige Flächengrösse in cm <sup>2</sup> <sup>1</sup>			
	Staub <sup>2</sup>	IIA	IIB	IIC
1	250	50	25	4
2	500	100	100	20
3	keine Grenzen <sup>3</sup>	keine Grenzen <sup>3</sup>	keine Grenzen <sup>3</sup>	keine Grenzen <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Die Einheit cm<sup>2</sup> ist keine Einheit nach ISO. Achtung: in allen IEC-Normen wurden die Einheiten nach ISO auf mm<sup>2</sup> angepasst.

<sup>2</sup> Da Büschelentladungen die Stäube nicht entzünden können, machen die Grenzwerte in dieser Tabelle gemäss EN 13463-1 für aufladbare Oberflächen keinen Sinn.

<sup>3</sup> Für die Kategorie 3 ist zu beachten, dass bei betriebsmässig auftretenden zündfähigen Entladungen Massnahmen zu ergreifen sind. Leider wurde in der EN 13463-1 für nicht-elektrische Geräte nicht die gleiche Philosophie wie in der IEC/EN 60079-0 angewandt. In den IEC-Normen müssen die max. zulässigen Werte auch für die Kategorie 3 (Geräteschutzniveaus 3G und 3D) eingehalten werden, Erleichterungen sind mit dem entsprechenden Nachweis möglich.

Tabelle 5: Zulässige projizierte Flächen für nicht leitende Teile von Geräten

Diese Werte können mit dem Faktor 4 multipliziert werden, falls die der Reibung ausgesetzten flachen Kunststoffoberflächen von einem leitfähigen geerdeten Rahmen umgeben sind.

Für die Kategorie 3 ist zu beachten, dass bei betriebsmässig auftretenden zündfähigen Entladungen Massnahmen zu ergreifen sind. Leider wurde in den EN-Normen für nicht-elektrische Geräte nicht die gleiche Philosophie wie in den IEC-Normen angewandt. In den IEC-Normen müssen die max. zulässigen Werte auch für die Kategorie 3 (Geräteschutzniveaus 3G und 3D) eingehalten werden, Erleichterungen sind mit dem entsprechenden Nachweis möglich.

Weitere Informationen zu diesem Gebiet sind in dem CENELEC Technical Report RO44-001 «Maschinensicherheit – Richtlinien und Empfehlungen zur Vermeidung elektrostatischer Zündgefahren» enthalten [11].

## Literaturhinweise

- [1] W. Bartknecht, Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1993.
- [2] Handbuch des Explosionsschutzes (Herausgeber Henrikus Steen) Wiley-VCH; 1. Auflage (April 2000).
- [3] Europäische Norm EN 1127-1:2007 Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik.
- [4] Glor, «Electrostatic Hazards in Powder Handling», Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, England 1988.
- [5] Lüttgens und M. Glor, «Statische Elektrizität begreifen und sicher beherrschen», Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1993.
- [6] J.A. Cross, «Electrostatics – Principles, Problems and Applications», IOP Publishing Ltd., Bristol, 1987.
- [7] Schriftenreihe der ESCIS «Statische Elektrizität, Regeln für die betriebliche Sicherheit» Heft 2, Ausgabe 2005, zu beziehen bei Sektion Chemie, Abteilung Arbeitssicherheit, SUVA, Fluhmattstrasse 1, CH-6002 Luzern.
- [8] ISSA Prevention Series No. 2017 (G) «Statische Elektrizität Zündgefahren und Schutzmassnahmen» Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie der internationalen Vereinigung für soziale Sicherheit (IVSS), 1995. ISBN 92-843-70914, ISSN 1015-8022.
- [9] TRBS 2153 (ehemals BGR132) Technische Regel Betriebssicherheit 2153, Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, (Deutschland) 2009.
- [10] Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity. B.S. 5958, Part 1 and 2, British Standards Institution, London.
- [11] CENELEC Report R044-001 «Safety of machinery – Guidance and recommendations for the avoidance of hazards due to static electricity» 2003.
- [12] M. Glor und B. Maurer, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3 Nr. 181, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989.
- [13] M. Glor and B. Maurer, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3 Nr. 389, VDI-Verlag, Düsseldorf 1995.
- [14] M. Glor und K. Schwenzfeuer, Journal of Electrostatics 40&41 (1997) 511.
- [15] M. Glor, Journal of Electrostatics 63 (2005) 447.
- [16] M. Glor und K. Schwenzfeuer Journal of Electrostatics 63 (2005) 463.
- [17] ATEX Richtlinie 94/9/EG für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemässen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.
- [18] IEC/EN 60079-0 Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Allgemeine Anforderungen.
- [19] IEC/EN 60079-14 Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 14: Projektierung, Auswahl und Errichtung elektrischer Anlagen.
- [20] EN 13463-1 Nicht elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	<i>Explosionsgefahren in der Prozessindustrie</i>	3
1.2	<i>Elektrostatische Aufladung als Zündquelle</i>	3
<b>2.</b>	<b>Entstehung elektrostatischer Aufladung</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Systematisches Vorgehen zur Beurteilung von Zündgefahren durch elektrostatische Aufladungen</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>Entladungen – Auftreten und Zündfähigkeit</b>	<b>8</b>
4.1	<i>Entladungen ausgehend von isolierten Leitern</i>	8
4.1.1	Funkenentladungen	8
4.1.2	Massnahmen gegen das Auftreten von Funkenentladungen	9
4.2	<i>Entladungen ausgehend von isolierenden Oberflächen, isolierenden Flüssigkeiten und isolierenden Schüttgütern</i>	9
4.2.1	Büschel- und Coronaentladungen	10
4.2.2	Massnahmen gegen das Auftreten von Büschel- und Coronaentladungen	11
4.2.3	Gleitstielbüschelentladungen	12
4.2.4	Massnahmen gegen das Auftreten von Gleitstielbüschelentladungen	13
4.2.5	Schüttkegelentladungen	14
4.2.6	Massnahmen gegen das Auftreten von Schüttkegelentladungen	14
4.2.7	Gewitterblitzähnliche Entladungen	14
<b>5.</b>	<b>Die Richtlinie 94/9/EC und elektrostatische Zündgefahren</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>Die Risikobeurteilung und die Vermeidung der statischen Elektrizität in den harmonisierten Normen</b>	<b>16</b>
6.1	<i>Grundlagen und Methodik im Explosionsschutz EN 1127-1:2008 (Abschnitt 5.3.7 und 6.4.7)</i>	16
6.1.1	Risikobeurteilung	16
6.1.2	Schutzmassnahmen gegen Zündgefahren durch statische Elektrizität	17
6.2	<i>Anforderungen an elektrische Betriebsmittel der Gerätegruppe II (IEC/EN 60079-0)</i>	17
6.2.1	Schutzmassnahmen	17
6.3	<i>Anforderungen an elektrische Betriebsmittel der Gerätegruppe III (IEC/EN 60079-0)</i>	18
6.3.1	Schutzmassnahmen	18
6.4	<i>Anforderungen für elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (IEC/EN 60079-14)</i>	18
6.5	<i>Nichtelektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen (EN 13643-1)</i>	19
	<b>Literaturhinweise</b>	<b>21</b>

# Ihr Partner für international zertifizierte Lösungen im Explosionsschutz.

## Installationsmaterial

- Klemmen- und Abzweigkästen
- Motorschutzschalter bis 63 A
- Sicherheitsschalter 10–180 A (für mittelbare und unmittelbare Abschaltung)
- Steckvorrichtungen
- Steckdosen für Reinnräume
- Befehls- und Meldegeräte
- kundenspezifische Befehlsgeber
- Kabelrollen
- Kabelverschraubungen
- Montagematerial

## Explosionsschutzgeschützte Energieverteilungs-, Schalt- und Steuergerätekombinationen

Kategorie 2 G/D, Zündschutzarten

- Druckfeste Kapselung «d»
- Erhöhte Sicherheit «e»
- Überdruckkapselung «px»

Kategorie 3 G/D, Zündschutzarten

- Nicht-funkend «nA»
- Schwadenschutz «nR»
- Überdruckkapselung «pz»

Kategorien 2 D und 3 D

für staubexplosionsschutzgeschützte Bereiche

- Schutz durch Gehäuse «tD»
- Schutz durch Überdruck «pD»

Zubehör

- Tastatur und Maus
- Bildschirm
- Industrie-PC

## Elektrische Heizungen für Industrieanwendungen

- Luft- und Gaserwärmung
- Flüssigkeitsbeheizung
- Reaktorbeheizungen (HT-Anlagen)
- Beheizung von Festkörpern
- Sonderlösungen

## Rohr- und Tankbegleitheizungen

- Wärmekabel
  - Wärmekabel mit Festwiderstand
  - mineralisierte Wärmekabel
  - selbstbegrenzende Wärmekabel
- Montagen vor Ort
- Temperaturüberwachungen
  - Thermostate und Sicherheitstemperaturbegrenzer
  - elektronische Temperaturregler und Sicherheitsabschalter

## Leuchten

- tragbare Leuchten Kategorien 1, 2 und 3
- Hand- und Maschinenleuchten 6–58 Watt
- Inspektionsleuchten Kategorie 1 (Zone 0)
- Langfeldleuchten 18–58 Watt (auch mit integrierter Notbeleuchtung)
- Strahler
- Sicherheitsbeleuchtung im Ex-Bereich
- Blitzleuchten
- Kesselflanschleuchten

## Eigensichere Betriebsmittel für die Mess- und Regeltechnik

- Fernbedienungen zu Temperaturregler
- Digital-Anzeigen
- Trennschaltverstärker
- Transmitterspeisegeräte
- Sicherheitsbarrieren
- Remote I/O (Bussysteme)
- Widerstandsfühler Pt-100 Kategorie 1 G
- Widerstandsfühler Pt-100 Kategorie 2 G

## Ihre Abteilung für Explosionsschutz

Wir bieten unseren Kunden einen kompletten Service aus einer Hand: Sonderlösungen basieren auf standardisierten und zertifizierten Baugruppen, Entwicklung, Zertifizierung und Produktion. Wir begleiten Sie von der Idee bis zur Installation und kümmern uns auch um die Ausbildung des Personals.



**thuba Ltd.**  
**thuba EHB Ltd.**  
CH-4015 Basel  
Switzerland

**Phone** +41 61 307 80 00  
**Fax** +41 61 307 80 10

**E-mail** [headoffice@thuba.com](mailto:headoffice@thuba.com)  
**Internet** [www.thuba.com](http://www.thuba.com)

ISBN 978-3-905850-07-9