

## Gefahrenquelle statische Elektrizität in der chemischen Industrie

Nachdruck aus „CHIMIA“ 40 (1986) Nr. 1  
Martin G L O R  
(Fortsetzung von Heft 1/88, Seiten 11 bis 16)

### 7. Zündung durch elektrostatische Entladungen

Die Zündempfindlichkeit einer explosionsfähigen Atmosphäre wird durch ihre Mindestzündenergie charakterisiert. Folglich ist es auch sinnvoll, die Zündfähigkeit von elektrostatischen Entladungen in Form einer Energie anzugeben. Die Wahrscheinlichkeit für eine Zündung kann sodann aus dem Vergleich der zwei Energiewerte, wie in Bild 6 dargestellt, abgeschätzt werden.

Die Mindestzündenergie der gebräuchlichsten Gase und Dämpfe (Kohlenwasserstoffe) im Gemisch mit Luft liegt im Bereich zwischen 0.2 und 1mJ. Acetylen, Schwefelkohlenstoff und Wasserstoff sind extrem zündempfindlich, ihre Mindestzündenergie liegt unterhalb 0.025 mJ.

Lange Zeit wurde angenommen, daß die Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen um einiges höher ist als diejenige der Kohlenwasserstoffe. Neuere Untersuchungen [9, 10, 14, 55-57] führten aber zu immer tieferen Werten, so daß heute feststeht, daß sich der Mindestzündenergiebereich der Stäube bis zu demjenigen der Kohlenwasserstoffe erstreckt. Dieser Sachverhalt wirft die Frage auf, ob die Schutzmaßnahme „Vermeidung von wirksamen Zündquellen“ in

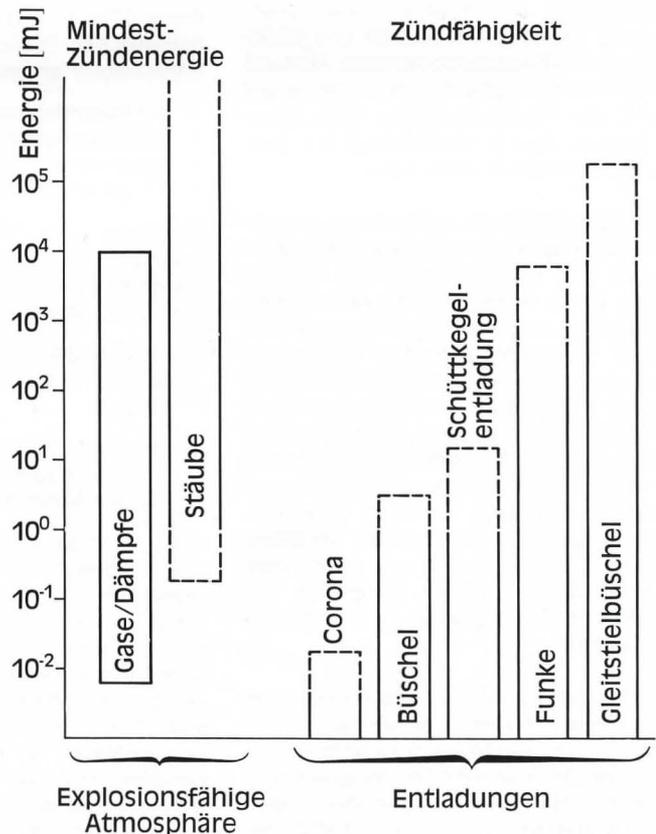


Bild 6. Zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit der Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch elektrostatische Entladungen sind die Mindestzündenergie der explosionsfähigen Atmosphäre und die bei der Entladung freigesetzte Energie ausschlaggebend.

Dr. M. Glor  
Zentrale Funktion Forschung, Physik  
Ciba-Geigy AG, Basel

Anlagen, in welchen sehr zündempfindliche Stäube verarbeitet werden, immer noch als einzige Schutzmaßnahme akzeptiert werden kann. Zum heutigen Zeitpunkt ist es aus folgenden Gründen noch nicht möglich, diese Frage in allgemeiner Form zu beantworten: (1) Die Zündfähigkeit von Entladungen im Zusammenhang mit dem Eintragen von Stäuben in Großgebäude und Silos ist noch nicht hinreichend bekannt. (2) Über die Interpretation der gemessenen Mindestzündenergiewerte im Hinblick auf die in der Praxis zu erwartenden Zündquellen besteht noch keine Einigkeit unter den Experten.

In allen Versuchsanordnungen zur Bestimmung der Mindestzündenergie werden Funkenentladungen ausgehend von einem geladenen Kondensator erzeugt. Die Mindestzündenergie einer explosionsfähigen Atmosphäre entspricht dann derjenigen Funkenenergie  $W$  – berechnet nach der Formel  $\frac{1}{2} C U^2$  mit der Kapazität  $C$  und der Spannung  $U$  des geladenen Kondensators –, bei welcher die explosionsfähige Atmosphäre bei optimaler Brennstoffkonzentration gerade eben noch entzündet werden kann. Obwohl diese Definition sehr einfach ist, werden die experimentell bestimmten Werte, insbesondere bei den Stäuben, durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst, wie beispielsweise: Spannung, Kapazität, Induktivität und Widerstand des Entladestromkreises, Abstand, Form und Material der Elektroden sowie Art der Funkenauslösung (z. B. Spannungserhöhung, Verringerung des Elektrodenabstands, Vorionisation).

Im Falle der Gase und Dämpfe ist das Untersuchungsverfahren vergleichsweise einfach [58]. Die Gemischherstellung bereitet hier keine Probleme. Ganz anders sind hingegen die Verhältnisse bei den Stäuben. Der reproduzierbaren Herstellung eines geeigneten Staub/Luft-Gemisches muß besondere Beachtung gewidmet werden. Eine Arbeitsgruppe mit Experten aus mehreren Ländern hat ein Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Stäuben entwickelt. Im Vergleich zu einer ersten Veröffentlichung dieses Verfahrens durch *Bertold* [57] sind für das endgültige Verfahren nur geringfügige Änderungen zu erwarten.

Zusätzlich zum Einfluß des Funkengenerators und der Elektrodenanordnung wird die Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen durch die Teilchengrößenverteilung, die Produktfeuchte, den Dispergierungsgrad, die Turbulenz innerhalb der Staubwolke und die Temperatur beeinflusst. Staubwolken, die durch sehr feine, trockene und gut dispergierte Partikel bei hoher Temperatur und niedrigem Turbulenzgrad gebildet werden, weisen für

ein vorgegebenes Produkt die tiefsten Werte für die Mindestzündenergie auf [55, 59].

Der Temperatureinfluß ist von besonderer Bedeutung für die Gefahrenbeurteilung, da viele Prozesse in der Industrie bei erhöhten Temperaturen gefahren werden. Bei einer Erhöhung der Temperatur von 20 °C auf 200 °C beträgt die Erniedrigung der Mindestzündenergie ( $MZE$ ) für bei Normaltemperatur schwer entzündliche Stäube ( $MZE \approx 100$  J) mehrere Größenordnungen und für bei Normaltemperatur leicht entzündliche Stäube ( $MZE \approx 10$  bis 100 mJ) ungefähr eine Größenordnung.

Bei gleichzeitigem Auftreten von Stäuben und Gasen oder Dämpfen müssen die Gesetzmäßigkeiten von sogenannten hybriden Gemischen beachtet werden [60]. In Gegenwart von Gasen oder Dämpfen kann die Mindestzündenergie eines reinen Staub/Luft-Gemisches selbst dann stark erniedrigt werden, wenn die Konzentration des reinen Gas- oder Dampf/Luft-Gemisches unterhalb der unteren Explosionsgrenze bleibt.

## 8. Entladungen – Entstehung und Zündfähigkeit

Je nach Material der aufgeladenen Objekte, deren räumlicher Anordnung und deren näherer Umgebung werden in der betrieblichen Praxis die folgenden vier Entladungsarten beobachtet [24–26]:

- Funkenentladung,
- Coronaentladung,
- Büschelentladung,
- Gleitstielbüschelentladung.

Zusätzlich können unter speziellen Bedingungen bei der großtechnischen Handhabung von Stäuben folgende Entladungen auftreten:

- Entladung entlang der Oberfläche von Schüttkegeln aus hochisolierendem Produkt,
- gewitterblitzartige Entladung in hochaufgeladenen Staubwolken großer räumlicher Ausdehnung.

Eine derartige Klassierung basiert auf einer empirischen und mehr oder weniger phänomenologischen Betrachtungsweise. Wie anschließend zum Ausdruck kommen wird, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Entladungsformen nicht immer ganz eindeutig. Dennoch hat sich diese Vorgehensweise zur Gefahrenbeurteilung in der Praxis bestens bewährt, weil den verschiedenen Entladungen unterschiedliche Zündfähigkeiten zugeordnet werden können.

In Abschnitt 7 wurde schon erwähnt, daß die in einer Entladung freiwerdende Energie zur Abschätzung der Zündfähigkeit herangezogen wird. Grundsätzlich kann

die totale in einer Entladung umgesetzte Energie aus der Differenz der elektrischen Felder vor und nach der Entladung berechnet werden. Dies ist im Fall der Zweielektrodenentladungen, wie z. B. bei der Funkenentladung und bis zu einem gewissen Grad bei der Gleitstielbüschelentladung, leicht möglich. Für sogenannte Eielektrodenentladungen wie Corona- oder Büschelentladungen, welche in einem mehr oder weniger inhomogenen elektrischen Feld entstehen, ist eine solche Berechnung jedoch sehr kompliziert.

Zur Umgehung dieser Schwierigkeiten wurde von *Gibson* [61] der Begriff der Äquivalentenergie eingeführt. Diese ist folgendermaßen definiert: Eine Entladung hat die Äquivalentenergie  $W$ , wenn sie gerade eben imstande ist, ein explosionsfähiges Gemisch zu zünden, dessen Mindestzündenergie – bestimmt mit einer Funkenentladung –  $W$  beträgt. Eine derartige empirische Vorgehensweise zur Bestimmung der Energie einer Entladung ist sehr nützlich und praxisnah. Sie birgt aber auch den Nachteil, daß sie bei unkritischer Anwendung zu falschen Schlußfolgerungen führen kann. Letztlich ist ja nicht der absolute Energiebetrag, sondern die Leistungsdichte und die räumliche Ausdehnung maßgebend. Falls die räumliche und zeitliche Energieverteilung einer Entladung stark von derjenigen der Funkenentladung abweicht, ist die mit einem gegebenen explosionsfähigen Gemisch bestimmte Äquivalentenergie nicht bedenkenlos auf ein anderes explosionsfähiges Gemisch übertragbar.

### 8.1. Funkenentladung

Eine Funkenentladung entsteht zwischen zwei elektrischen Leitern auf unterschiedlichem Potential (Bild 7). Sie wird entweder durch Annäherung der Leiter oder durch Spannungserhöhung bei vorgegebenem Abstand beim Erreichen der Durchbruchfeldstärke im Raum zwischen den beiden Leitern ausgelöst. Funkenentladungen treten in der Praxis typischerweise bei isolierten leitfähigen Anlageteilen, welche beim Betrieb mit Produkt in Berührung kommen (z. B. Filterstützkorb, Sieb, Konus in Staubabschneider, Einfülltrichter, Rohr- oder Schlauchteil, Flansch oder Klappe auf Rohrleitung, Behälter, Gebinde), bei nicht geerdeten Personen sowie bei isoliertem leitfähigem Produkt auf.

Die Zündfähigkeit einer Funkenentladung ist in guter Näherung durch die Energie gegeben, welche im Kondensator, gebildet durch die oben aufgezählten Situationen, gespeichert ist. Diese läßt sich nach der Formel  $W = \frac{1}{2} C U^2$  berechnen (vgl. Abschnitt 7). Grundsätzlich ist eine Zündung von Gas- oder Dampf/Luft-Gemischen sowie von

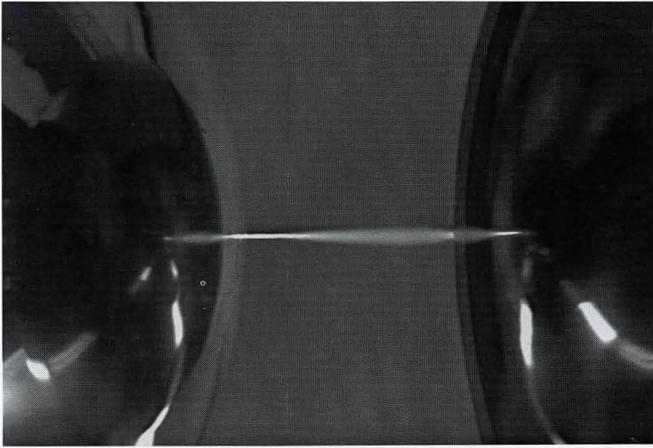


Bild 7. Funkenentladungen treten zwischen leitfähigen Teilen – je nach Abstand und Potentialdifferenz – beim Erreichen der Durchbruchfeldstärke (3 MV/m) im Zwischenraum zwischen den beiden Teilen auf. Sie können in der Praxis durch Erdung aller leitfähigen Anlageteile, Produkte sowie durch Erdung der Personen vermieden werden.

Staub/Luft-Gemischen durch Funkenentladungen nicht auszuschließen. Aufgrund eines Vergleichs zwischen der möglicherweise gespeicherten Funkenenergie und der Mindestzündenergie der gegebenen explosionsfähigen Atmosphäre können in der Praxis Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Zündung gemacht werden.

In Übereinstimmung mit den in der Einführung zum Abschnitt 8 geschilderten Überlegungen betreffend die Energieverteilung im Entladungskanal wird die Zündwahrscheinlichkeit von Funkenentladungen durch viele Parameter (Abstand, Form und Material der Elektroden sowie Spannung, Induktivität und Widerstand des Entladekreises) beeinflusst. *Glamer* [59] hat gezeigt, daß für gewisse Stäube die Zündfähigkeit von Funkenentladungen durch Zuschaltung einer kleinen Induktivität ( $\approx 1$  mH) in den Entladekreis wesentlich erhöht wird (um einen Faktor 10 oder mehr). *Glamer* [59] und *Felstead et al.* [62] haben ebenfalls bei Stäuben einen ausgeprägten Einfluß des Elektrodenabstands festgestellt, wobei für einen solchen von 6 bis 13 mm die zündfähigsten Funken beobachtet wurden. Im Hinblick auf die Praxis ist jedoch zu bemerken, daß dort in erster Linie mit rein kapazitiven Funkenentladungen gerechnet werden muß und über den Elektrodenabstand keine Voraussagen gemacht werden können.

Befunde von *Wilson* und von *Tolson* [63–65] deuten darauf hin, daß von Personen ausgehende Funkenentladungen sowohl für Gase und Dämpfe als auch für Stäube um einen Faktor 2 bis 4 weniger zündfähig sind als rein kapazitive Funkenentladungen.

Funkenentladungen lassen sich durch Erdung aller leitfähigen Anlageteile (Ableitwiderstand  $< 10^6 \Omega$ ), durch Personenerdung (Verwendung von leitfähigem

Schuhwerk und leitfähigen Böden, Erdableitwiderstand  $< 10^8 \Omega$ ) sowie durch Erdung von leitfähigen Produkten (Ableitwiderstand  $< 10^6 \Omega$ ) vermeiden [24–26]. Obwohl Funkenentladungen im Vergleich zu den anderen Entladungsarten theoretisch am einfachsten vermieden werden können, stellen sie immer noch die häufigste elektrostatische Zündquelle in der Praxis dar. Dies hängt wohl damit zusammen, daß die Erdung im Betrieb oft nur durch organisatorische Maßnahmen (bewegliche Teile) sichergestellt werden kann.

## 8.2. Büschelentladung

Eine Büschelentladung entsteht an einer leitfähigen, geerdeten Elektrode (Krümmungsradius ca. 5–50 mm), welche in ein starkes elektrisches Feld hineinragt (Bild 8). In der Praxis kommen typischerweise Ausbuchtungen innerhalb von Anlagen (z. B. Füllstandsanzeigen, Temperaturfühler, Probeentnahmebecher etc.) nicht allzu scharfe Kanten und Spitzen an Anlageteilen, Werkzeuge sowie die Hand oder die Finger einer Person als Elektroden in Frage. Falls derartige Elektroden in ein starkes elektrisches Feld hineinragen, das beispielsweise durch hochaufgeladene Kunststoffoberflächen (PE-Sack, PVC-Rohr etc.), Staubschüttungen, Staubwolken, Flüssigkeitsoberflächen oder Tröpfchenwolken hervorgerufen wird, ist in der Praxis mit dem Auftreten von Büschelentladungen zu rechnen.

Die Zündfähigkeit von Büschelentladungen wurde von *Heidelberg* [66, 67], *Gibson et al.* [61] und *Glor* [68] untersucht. Die mit Gas/Luft-Gemischen erhaltenen Werte für die Äquivalentenergie liegen im Bereich zwischen 1 und 3,6 mJ. Die Zündfähigkeit einer Büschelentladung wird wesentlich vom Krümmungsradius der Elektrode und von der Polarität des

elektrischen Feldes beeinflusst. Büschelentladungen, die durch negativ aufgeladene Oberflächen hervorgerufen werden, sind zündfähiger als solche, die von positiv aufgeladenen Oberflächen ausgehen.

Büschelentladungen sind erwiesenermaßen zündfähig für die meisten Gas- oder Lösemitteldampf/Luft-Gemische. Obwohl die Mindestzündenergie einiger Stäube im Bereich zwischen 1 und 10 mJ liegt, konnte bis heute keine Zündung eines Staub/Luft-Gemisches durch eine Büschelentladung beobachtet werden. Der scheinbare Widerspruch zwischen der mit Gasen bestimmten Äquivalentenergie von Büschelentladungen und der Tatsache, daß selbst Stäube mit einer Mindestzündenergie von 1 mJ bis heute nicht mit Büschelentladungen entzündet werden konnten, hat vermutlich folgende Ursachen:

- (1) Die räumliche und zeitliche Energieverteilung ist nicht dieselbe in Funken- und Büschelentladungen. Bei der Zündung von Staub/Luft-Gemischen spielt die Energieverteilung eine andere Rolle als im Fall der Gase und Dämpfe, weil der Zündmechanismus nicht derselbe ist.
- (2) Mehrere Autoren [69–71] haben einen Zusammenhang zwischen der Zündfähigkeit und dem Ladungstransfer in einer Büschelentladung beobachtet. Aus den Befunden läßt sich ableiten, daß für die Zündung der Kohlenwasserstoffe ein Ladungstransfer von ca.  $0.1 \mu\text{C}$  benötigt wird. Ladungstransfermessungen für Büschelentladungen,

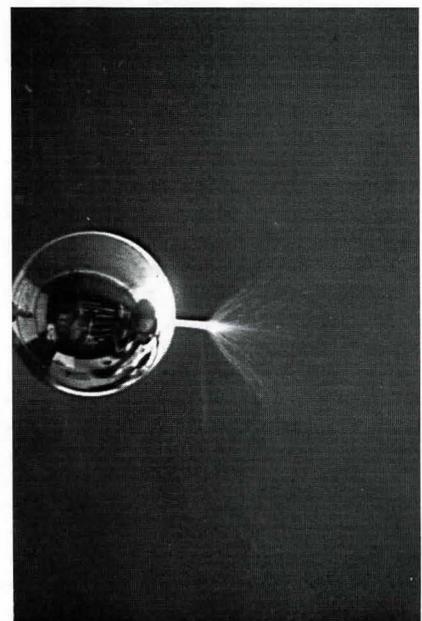


Bild 8. Büschelentladungen gehen von gekrümmten Oberflächen leitfähiger geerdeter Teile aus, wenn diese in starke elektrische Felder gebracht werden (z. B. Annäherung der Fingerspitze an einen aufgeladenen Plastiksack).

welche in Gegenwart von Staubwolken auftreten, haben jedoch eindeutig gezeigt, daß die in einer einzelnen Entladung übertragene Ladung wesentlich geringer ist. Diese Ergebnisse legen den Schluß nahe, daß in Gegenwart einer Staubwolke zwar viel häufiger Büschelentladungen auftreten, daß aber die Energie einer einzelnen Entladung viel geringer ist als in einer reinen Gas- oder Dampf/Luft-Atmosphäre.

Büschelentladungen lassen sich in der betrieblichen Praxis durch Ausschluß aufladbarer Kunststoffoberflächen (z. B. Plastiksäcke, -gebände oder -rohre), durch Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeiten von nichtleitfähigen Flüssigkeiten und durch Volumenbegrenzung von aufgeladenen Tröpfchenwolken in der Regel vermeiden, sofern keine größeren Mengen isolierender pulverförmiger Substanzen gehandhabt werden. Ist letzteres der Fall, so können Büschelentladungen nicht mit Sicherheit vermieden werden. Dies bedeutet, daß bei gleichzeitiger Anwesenheit von explosionsfähigen Gasen oder Dämpfen (z. B. Rühren, Zentrifugieren oder Filtrieren von Suspensionen aus nichtleitfähigen brennbaren Flüssigkeiten oder Handhabung von lösemittelfeuchtem, pulverförmigem Produkt) andere Schutzmaßnahmen (z. B. Inertisierung) getroffen werden müssen.

### 8.3. Coronaentladung

Die Coronaentladung ist bezüglich Entstehung und Vorkommen in der Praxis der Büschelentladung ähnlich (Bild 9). Im Gegensatz zur Büschelentladung entsteht eine Coronaentladung jedoch an Elektroden mit einem sehr kleinen Krümmungsradius ( $< 1\text{mm}$ ), d. h. typischerweise an scharfen Spitzen und Kanten. Deshalb wird diese Entladung auch „Spitzenentladung“ genannt. Die Zündfähigkeit von Coronaentladungen ist viel geringer als diejenige von Büschelentladungen. Es muß äußerstenfalls mit einer Zündung der extrem zündempfindlichen Gase Wasserstoff, Acetylen und Schwefelkohlenstoff (Mindestzündenergie  $\leq 0.025\text{ mJ}$ ) gerechnet werden. Bei der Gefahrenbeurteilung wird den Coronaentladungen üblicherweise keine Beachtung zuteil, da bei entsprechenden Situationen – im Sinne einer „worst case“ Betrachtung – immer auch mit dem Auftreten von zündfähigeren Büschelentladungen gerechnet werden muß. Eine Ausnahme hiervon wird unter Umständen in speziellen Industriezweigen (z. B. Folienherstellung, Filmherstellung und -beschichtung, Druckereigewerbe) gemacht, wo mittels spezieller Einrichtungen Coronaentladungen zum Zwecke der gefahrlosen Ladungsneutralisation absichtlich erzeugt werden.

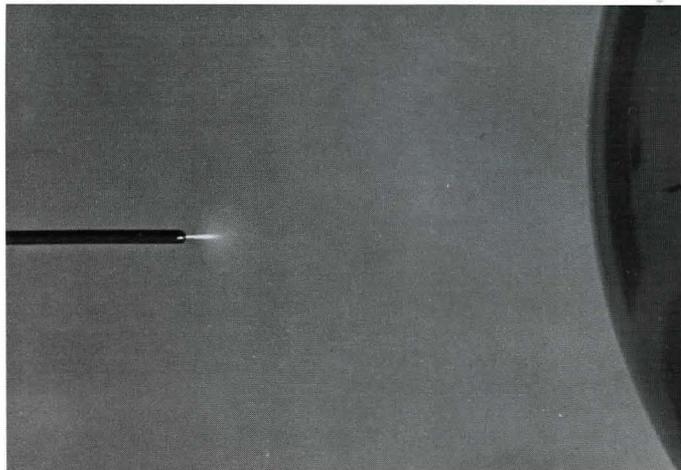


Bild 9. Coronaentladungen entstehen, wenn leitfähige geerdete Spitzen in starke elektrische Felder hineinragen. Wegen ihrer geringen Energie können Coronaentladungen oft auch zur gefahrlosen Ladungsneutralisation – beispielsweise von hochaufgeladenen Isolatoroberflächen – gebraucht werden.

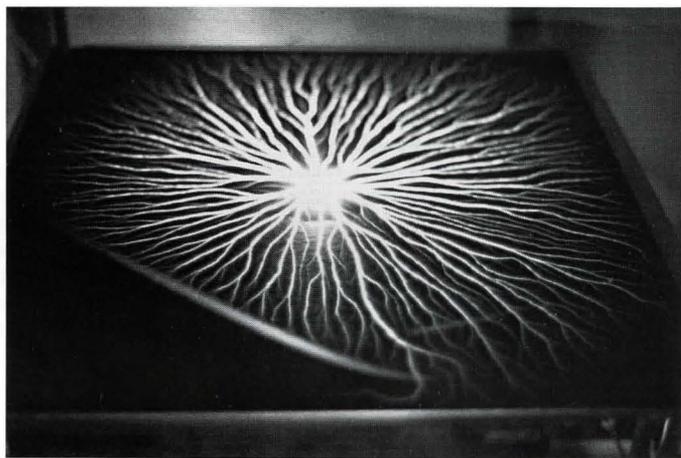


Bild 10. Gleitstielbüschelentladungen entstehen an beidseitig mit entgegengesetzter Polarität extrem hoch aufgeladenen Isolatorschichten beim elektrischen Kurzschluß der zwei Oberflächen. Die dazu erforderliche Oberflächenladungsdichte ( $> 2.7 \times 10^{-4}\text{ C/m}^2$ ) kann nur durch maschinell erzeugte Trenngeschwindigkeiten – nicht durch manuelle Operationen – herbeigeführt werden.

### 8.4. Gleitstielbüschelentladung

Die maximale Ladungsdichte, welche auf einer Grenzfläche gegenüber Luft in Form einer unipolaren Ladungsschicht gespeichert werden kann, beträgt  $2.7 \times 10^{-5}\text{ C/m}^2$ . Bei dieser Ladungsdichte erreicht das elektrische Feld im Luftraum den Wert der Durchbruchfeldstärke. Jede zusätzliche Ladung würde eine Gasentladung auslösen. Wird im Gegensatz hierzu die Ladung in Form einer Doppelladungsschicht mit Ladungen unterschiedlicher Polarität auf den zwei Oberflächen einer Isolatorschicht gespeichert, so sind viel höhere Werte für die Oberflächenladungsdichten möglich. Dieser Sachverhalt wird dadurch erklärt, daß im Falle einer derartigen Ladungsdoppelschicht das elektrische Feld innerhalb des Dielektrikums, welches normalerweise eine viel höhere Durchbruchfeldstärke als die Luft aufweist, verläuft.

Oft wird in der Praxis eine der Ladungsschichten in Form von Influenzladungen auf einer in dichtem Kontakt mit der Isolatorschicht stehenden leitfähigen Oberfläche aufgebaut (z. B. Isolierend beschichtete Leitoberfläche).

Abhängig von der Oberflächenladungsdichte sowie von der Dicke und der Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums können auf diese Weise Energien von mehr als  $1\text{J}$  gespeichert werden. Durch einen elektrischen Kurzschluß der mit entgegengesetzten Vorzeichen aufgeladenen Oberflächen entsteht eine energiereiche Entladung, in welcher praktisch die gesamte, in der Doppelschicht gespeicherte Energie freigesetzt wird. Wegen ihrer speziellen Form (sternförmige Ausbreitung längs der aufgeladenen Oberfläche) wird diese Entladung „Gleitstielbüschelentladung“ genannt (Bild 10). Der für die Auslösung erforder-

liche Kurzschluß kann entweder durch eine Perforation der Isolatorschicht oder durch eine von außen herbeigeführte elektrische Verbindung der beiden Isolatoroberflächen erfolgen.

Die Bedingungen für das Auftreten solcher Gleitstielbüschelentladungen sind [66]: Oberflächenladungsdichte  $\geq 2.7 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$  und Schichtdicke des Dielektrikums  $< 8 \text{ mm}$ . Für das Erreichen derart hoher Oberflächenladungsdichten sind erfahrungsgemäß manuell durchgeführte Operationen (z.B. Ausleeren von Produkt, Abwischen von Oberflächen) nicht hinreichend.

Hohe Trenngeschwindigkeiten im Bereich oberhalb von  $10 \text{ m/s}$  oder Ladungsaufsprühvorgänge sind hierzu erforderlich. In der Praxis können beispielsweise bei der pneumatischen Staubförderung durch Kunststoffrohre oder durch isolierend innenbeschichtete Metallrohre, bei der Staubabscheidung an isolierend beschichtetem Metallkonus oder beim Füllen von isolierenden Großbehältern mit nichtleitfähigem Produkt – insbesondere mit grobkörnigen polymeren Substanzen – Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Grundsätzlich muß mit einer Zündung sowohl von Gas- oder Dampf/Luft-Gemischen als auch mit einer solchen von Staub/Luft-Gemischen durch Gleitstielbüschelentladungen gerechnet werden.

Gleitstielbüschelentladungen können durch Verwendung von leitfähigem Material ohne isolierende Beschichtungen an Orten hoher Aufladung vermieden werden. Ablagerungen von pulverförmigen Produkten im Innern von leitfähigen Rohrleitungen rufen erfahrungsgemäß keine Gleitstielbüschelentladungen hervor.

### 8.5. Spezielle Entladungen bei der großtechnischen Handhabung von pulverförmigen Produkten

Beim Eintragen von hochisolierenden pulverförmigen Produkten in große Behälter oder Silos mittels pneumatischer Förderung durch Rohrleitungen oder durch Abwurf über Abwurfschächte erreicht das elektrische Feld, ausgehend von der Produktschüttung, viel höhere Werte als das elektrische Feld, ausgehend vom dispergierten Produkt in der Rohrleitung oder im Abwurfschacht. Der enorme Feldanstieg bei der Produktschüttung hat zwei Ursachen. Erstens wird die Raumladungsdichte in der Schüttung entsprechend der Verdichtung des Produkts erhöht, denn die Ladungen sind an die Produktteilchen gebunden und können wegen der schlechten Produktleitfähigkeit auch bei Verwendung eines leitfähigen geerdeten Behälters oder Silos nicht nach Erde abfließen. Zweitens ist bei der Produkt-

schüttung die Ausdehnung der Raumladungsdichteverteilung viel größer als im Rohr oder im Abwurfschacht und führt somit auch zu einem stärkeren elektrischen Feld am Rand dieser Verteilung. Der erste Effekt, welcher als „Ladungskompaktierung“ bezeichnet werden kann, tritt typischerweise nur bei pulverförmigen Substanzen auf, während der zweite Effekt – der Volumeneinfluß – sowohl bei Stäuben als auch bei Flüssigkeiten auftritt.

Je nach dem Zusammenspiel von Größe, Dichte und Oberflächenladungsdichte

der Produktteilchen resultiert eine anziehende (Gravitationskraft überwiegt) oder abstoßende (elektrostatische Abstoßung überwiegt) Kraft zwischen der schon vorhandenen Produktschüttung und den einzelnen hinunterfallenden Teilchen. Unter der Annahme einer sphärisch symmetrischen Produktschüttung wurden zu diesem Problemkreis Modellrechnungen durchgeführt [72]. Die Resultate aus diesen Modellrechnungen sind in Bild 11 zusammengefaßt. Das erstaunliche Resultat der Modellrechnungen besagt, daß unter der realistischen

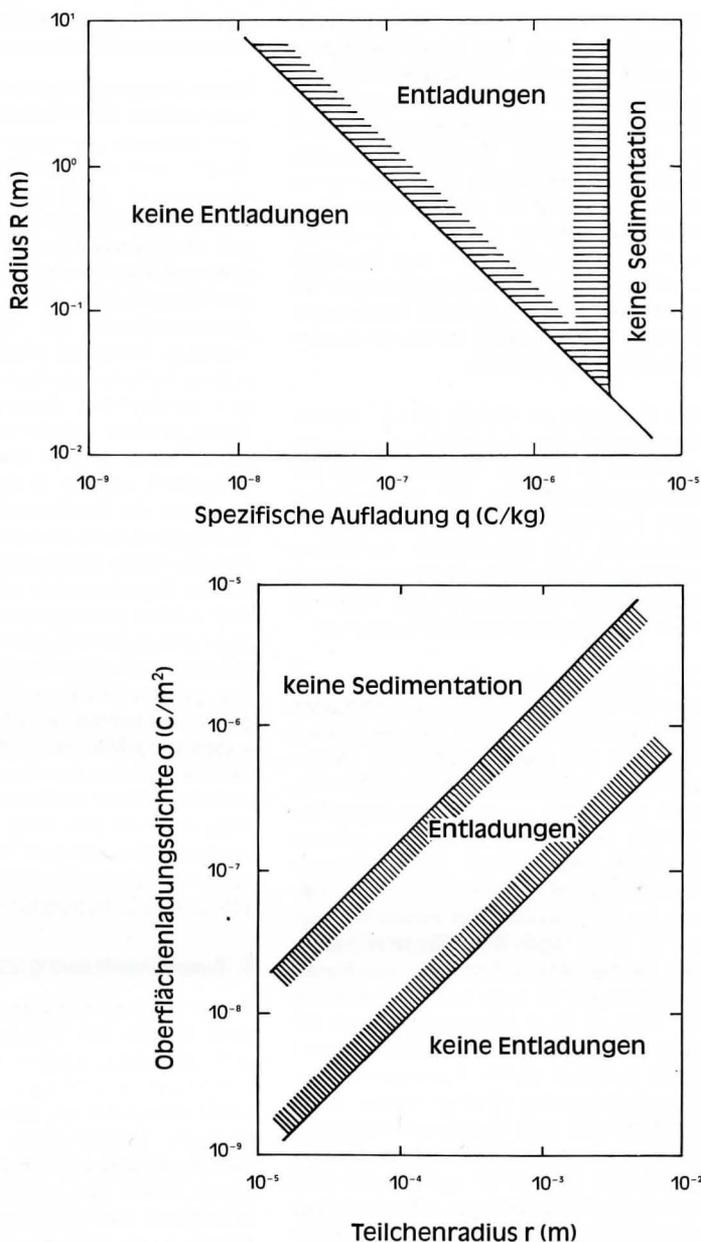


Bild 11. Beim Einfördern hochisolierender pulverförmiger Substanzen in Silos werden Ladungen zusammen mit den Pulverteilchen in der Schüttung „kompaktiert“. Diese Ladungskompaktierung führt zu sehr hohen elektrischen Feldern oberhalb des Schüttkegels. In Modellrechnungen [72] können die Grenzen für das Auftreten von Entladungen an der Schüttgutoberfläche als Funktion der spezifischen Produktaufladung  $q$  und des Radius  $R$  der Schüttung (oberes Diagramm) oder für eine Schüttung vom Radius  $R = 0,5 \text{ m}$  als Funktion des Teilchenradius  $r$  und der Oberflächenladungsdichte  $\sigma$  berechnet werden (unteres Diagramm).

Annahme einer hohen Oberflächenladungsdichte (vgl. Bild 5) nur bei Zufuhr von relativ grobem Produkt mit Teilchengrößen im Bereich zwischen 1 und 10 mm Entladungen an der Schüttgutoberfläche zu erwarten sind. Tatsächlich wurden derartige Entladungen bis heute nur im Zusammenhang mit grobkörnigen Polymeren beobachtet [73, 74]. Dies ist aber noch kein endgültiger Beweis für einen uneingeschränkten Geltungsbereich des genannten Modells, da beim Fördern von Feingut der Nachweis solcher Entladungen viel schwieriger ist.

Die Entladungen, welche oft als „Schüttkegelentladungen“ bezeichnet werden, verlaufen in radialer Richtung längs der Schüttgutoberfläche. Sie werden nach dem heutigen Stand der Kenntnisse – abgeleitet aus praxisnahen Versuchen und theoretischen Überlegungen – durch geringfügige Änderungen des Produkts oder der Anlage wesentlich beeinflusst.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Schüttkegelentladungen nimmt mit dem Volumen des Silos, mit der Förderrate und mit dem spezifischen Widerstand des Produkts zu. Bei grobem Produkt entstehen schon bei geringer Förderrate derartige Entladungen. Maurer [16] hat in einem 100 m<sup>3</sup>-Silo im Falle von Kunststoffgrieß mit einer Teilchengröße von ca. 800 µm ab einer Förderrate von ca. 28 X 10<sup>3</sup> kg/h Schüttkegelentladungen beobachtet und im Falle von Kunststoffgranulat mit einer Teilchengröße von ca. 3 mm ab einer solchen von ca. 4 X 10<sup>3</sup> kg/h. Schmalz [75] beobachtete während eines kontinuierlichen Füllungs- und Entleerungsvorgangs eines leitfähigen 3 m<sup>3</sup>-Behälters mit sehr trockenem Polyestergranulat derartige Entladungen bei einer Förderrate von 2 X 10<sup>3</sup> kg/h. Bisher können noch keine genauen Angaben über die Zündfähigkeit von Schüttkegelentladungen gemacht werden. Aufgrund von Ereignissen, theoretischen Überlegungen und Folgerungen aus Messungen der Feldänderung wird heute vermutet, daß die Äquivalentenergie im Bereich von 10 mJ liegt. Demzufolge ist insbesondere dann mit einer möglichen Zündung durch Schüttkegelentladungen zu rechnen, wenn grobes polymeres Produkt zusammen mit einem sehr zündempfindlichen Feinstaub in ein Silo oder einen Großbehälter gefördert wird.

Unabhängig von der Energie und Erscheinungsform der Entladungen an der Schüttgutoberfläche, können diese im Falle von isolierenden Behälterwänden zum Aufbau einer Ladungsdoppelschicht an der Behälterwand und somit zu Gleitstielbüschelentladungen (siehe Abschnitt 8.4) führen. Dieses Phänomen wurde von Blythe [73] beim Füllen von flexiblen Schüttgutbehältern mit Polymergranulat beobachtet. Abhilfe schafft

das Einführen eines geerdeten Metallstabs ins Innere des Kunststoffbehälters.

Bevor die geschilderten Schüttkegelentladungen in der Praxis beobachtet wurden, stand in der Vergangenheit oft die Frage nach gewitterblitzähnlichen Entladungen in Silos zur Diskussion. Daß solche Entladungen auch in aufgeladenen Staubwolken großer räumlicher Ausdehnung auftreten können, wurde schon seit längerer Zeit durch entsprechende Beobachtungen bei Vulkaneruptionen bestätigt. Bis heute wurden jedoch keine solche Entladungen in industriellen Anlagen beobachtet. Boschung et al. [76] haben in einer Vielzahl von Versuchen in einem 60 m<sup>3</sup>-Bunker Bedingungen herbeigeführt, welche in der Natur für das Auslösen von Gewitterblitzen bei weitem hinreichend sind, es konnten aber keine Gewitterblitze beobachtet werden. Aus diesen Experimenten wird geschlossen, daß in Silos von weniger als 60 m<sup>3</sup> Inhalt oder mit einem Durchmesser von weniger als 3 m aber beliebiger Silohöhe nicht mit gewitterblitzähnlichen Entladungen gerechnet werden muß. Die Experimente sagen natürlich nichts darüber aus, ab welchem Volumen – welches irgendwo zwischen 60 m<sup>3</sup> und dem riesigen Volumen einer Asche- oder Staubwolke bei einem Vulkanausbruch oder demjenigen einer Gewitterwolke liegt – nun tatsächlich solche Entladungen möglich sind.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

In der Vergangenheit wurden vorerst auf dem Gebiet der Flüssigkeitsaufladung und neuerdings auch im Hinblick auf die Aufladung von Stäuben umfangreiche Untersuchungen angestellt. Anhand des dadurch gewonnenen grundlegenden Verständnisses elektrostatischer Phänomene sowie der vielfältigen Erfahrung betreffend das Auftreten und die Zündfähigkeit von Entladungen ist es heute möglich, die Gefahren infolge statischer Elektrizität in der betrieblichen Praxis richtig einzuschätzen und gegebenenfalls geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen. Diese sind in Richtlinien und Empfehlungen [24–26] festgehalten.

Natürlich können in der Praxis die Maßnahmen zur Ladungsableitung nicht immer so einfach bewerkstelligt werden, wie das auf den ersten Blick aussieht. Die Verwendung leitfähigen Materials für alle Konstruktionsteile steht oft im Widerspruch zu anderen Erfordernissen, die Erdung aller beweglichen Teile bringt organisatorische Probleme mit sich, und oft sind die zu verarbeitenden Produkte selbst nicht leitfähig. Bei Beachtung der diskutierten Empfehlungen und insbesondere bei ihrer Anwendung aus Kenntnis und Verständnis der ihnen zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten, bei entsprechender Ausbildung des Betriebspersonals und bei Anwendung anderer

Schutzmaßnahmen, sobald mit zündfähigen Entladungen gerechnet werden muß, können die Gefahren infolge statischer Elektrizität hingegen dennoch auf ein annehmbar tiefes Niveau gebracht werden.

Zukünftig werden aber auch weitere Untersuchungen betreffend das Auftreten und die Zündwahrscheinlichkeit von Entladungen bei der großtechnischen Handhabung von Stäuben durchgeführt werden müssen. Durch die zunehmende Verbreitung von flexiblen isolierenden Schüttgutbehältern werden immer breitere Kreise von dieser Problematik erfaßt. Auf dem Gebiet der Flüssigkeiten können u. U. im Zusammenhang mit der Hochdruckreinigung von Behältern neue Problemstellungen auftreten.

## Literaturverzeichnis:

- [1] E. Heidelberg, K. Nabert, G. Schön. *Arbeitsschutz* 11 (1958a) 221; 12 (1958b) 242.
- [2] D. van der Meer, J. W. White, *J. Electrostat.* 1 (1975) 265.
- [3] K. C. Bachmann, W. G. Dukek, A. H. Popkin, Esso Research and Engineering Co., Linden NJ, Report No. RL-45 M-69, July 21 (1969).
- [4] J. T. Leonard, *J. Electrostat.* 10 (1981) 17.
- [5] A. Klinkenberg, J. L. van der Minne: *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier, Amsterdam (1958).
- [6] W. M. Bustin, W. G. Dukek: *Electrostatics Hazard in the Petroleum Industry*, Research Studies Press, Letchworth, Hertfordshire (1983).
- [7] W. Bartknecht, *VDI-Ber. (Ver. Dtsch. Ing.)* 494 (1984) 11 [„Sichere Handhabung brennbarer Stäube“, Tagung Nürnberg 1983]
- [8] G. Kühnen, H. Beck, *VDI-Ber. (Ver. Dtsch. Ing.)* 494 (1984) 25 [„Sichere Handhabung brennbarer Stäube“, Tagung Nürnberg 1983]
- [9] R. Eckhoff, *Combust. Flame* 24 (1975) 53.
- [10] W. Bartknecht, *Chemie-Technik* 8 (1979) 493.
- [11] H. Haase: *Electrostatic Hazard – Their Evaluation and Control*, Verlag Chemie, Weinheim (1977).
- [12] W. Hilgner: *Jahrbuch 1975 der VDI-Gesellschaft für Kunststofftechnik*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1975), S. 145.
- [13] N. Gibson, *DEHEMA-Monogr.* 72 (1974) 343.
- [14] N. Gibson, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 66 (1983) 1.
- [15] A. W. Bright, *J. Electrostat.* 4 (1977/1978) 131.
- [16] B. Maurer, *VDI-Ber. (Ver. Dtsch. Ing.)* 494 (1984) 119 [„Sichere Handhabung brennbarer Stäube“, Tagung Nürnberg 1983].
- [17] J. Cross, D. Farrer: *Dust Explosions*, Plenum Press, New York (1982).
- [18] M. Glor, *J. Electrostat.* 16 (1985) 175.
- [19] W. D. Rees, *J. Electrostat.* 11 (1981) 13.
- [20] G. J. Butterworth, K. P. Brown, *J. Electrostat.* 13 (1982) 9.
- [21] J. N. Chubb, K. P. Brown, G. J. Butterworth, *J. Electrostat.* 9 (1980) 71.
- [22] H. Krämer, K. Asano, G. Schön, *3rd Int. Congr. Static Electricity, Grenoble* (1977), Paper 31.
- [23] H. Strawson, Vortrag, 25. Haupttagung der Deutschen Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlechemie, Salzburg (1976).

- [24] Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen [Richtlinie „Statische Elektrizität“], Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie, Heidelberg, Richtlinie Nr. 4/4.80.
- [25] B. S. 5958, Part 1 and 2, British Standards Institution, London (1981/1982).
- [26] Statische Elektrizität, Regeln für die betriebliche Sicherheit, Schriftenreihe der ESCIS, Heft 2, Vogt-Schild, Solothurn (1984).
- [27] H. Krämer, *J. Electrostat.* 10 (1981) 89.
- [28] L. Post, G. Lüttgens, B. Maurer, M. Glor, *Die Berufsgenossenschaft*, Heft 7 (1983) 1.
- [29] M. R. O. Jones, J. Bond, *Chem. Eng. Res. Des.* 62 (1984) 327.
- [30] W. B. Kunkel, *J. Appl. Phys.* 21 (1959) 820.
- [31] E. Bodenstedt, *Z. Angew. Phys. IV* (1954) 297.
- [32] K. H. Mirgel, *VDI-Ber. (Ver. Dtsch. Ing.)* 19 (1957) 49.
- [33] K. Min, B. T. Chao, M. E. Wyman, *Rev. Sci. Instrum* 34 (1963) 329.
- [34] T. G. O. Berg, G. C. Fernish, W. J. Flood, *Aerojet, General Corp. Reports 0395-04(8)SP* (1963) und *0395-04(14)SP* (1963); *Rev. Sci. Instrum.* 35 (1964) 719.
- [35] I. N. Aleinikova, A. V. Kitaev, B. V. Filipenko, *Colloid J. USSR* 28 (1966) 505.
- [36] L. Ramackers, *Advances in Static Electricity I, Proc. 1st. Int. Conf. Static Electricity, Vienna* (1970) 370.
- [37] C. E. Lapple, *Adv. Chem. Eng.* 8 (1970) 1.
- [38] G. Jansen: *Der Einfluß elektrischer Felder auf die Höhe elektrostatischer Aufladungen unter besonderer Berücksichtigung der Kunststoffe*, Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe (1972).
- [39] B. Maurer, XI<sup>e</sup> Congress FATIPEC 1972, Edizione Ariminum, Milano (1972).
- [40] G. A. Turner, M. Balasubramanian, *DEHEMA-Monogr.* 72 (1974) 435; *J. Electrostat.* 2 (1976) 85.
- [41] L. B. Schein, J. Cranch, *J. Appl. Phys.* 46 (1975) 5140.
- [42] S. Kittaka, Y. Murata, *J. Electrostat.* 2 (1976) 111.
- [43] W. Muhr, *Chem. Ing. Tech.* 48 (1976) 581.
- [44] J. Kakas, G. Vigyazo, *Staub-Reinhalt. Luft* 36 (1976) 73.
- [45] A. T. Szaynok, J. Malcher, A. Sycinska-Tojniak, *3rd Int. Congr. Static Electricity, Grenoble* (1977) Paper 16a
- [46] H. Masuda, T. Komatsu, N. Mitsui, K. Iino, *J. Electrostat.* 2 (1977) 341.
- [47] S. Kittaka, N. Masui, Y. Murata, *J. Electrostat.* 6 (1979) 181.
- [48] A. G. Bailey, *Prep. Int. Symp.: The Role of Particle Interactions in Powder Mechanics, Eindhoven* (1983) 67.
- [49] P. Boschung, M. Glor, *J. Electrostat.* 8 (1980) 205.
- [50] M. Glor, P. Boschung, *Swiss Chem.* 3 (1981) 71.
- [51] M. Glor, G. Lüttgens, B. Maurer, L. Post, unveröffentlicht.
- [52] P. Cartwright, S. Sing, A. G. Bailey, IEEE Conference, San Francisco (1982).
- [53] B. Maurer, *Germ. Chem. Eng.* 4 (1979) 189.
- [54] S. Larigaldie, N. Giboni, *J. Electrostat.* 10 (1981) 57.
- [55] W. Bartknecht: *Explosionen*, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin (1980).
- [56] P. Field, „Dust Explosions“, in J. C. Williams, T. Allen (Eds.): *Handbook of Powder Technology*, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam (1982).
- [57] W. Berthold, *VDI-Ber. (Ver. Dtsch. Ing.)* 494 (1984) 105 [Sichere Handhabung brennbarer Stäube“, Tagung Nürnberg 1983].
- [58] B. Lewis, G. van Elbe: *Combustion, Flames, and Explosions of Gases*, Academic Press, New York (1961).
- [59] T. Glarner, Dissertation, ETH-Zürich (1983).
- [60] G. Pellmont, Dissertation, ETH-Zürich (1979).
- [61] N. Gibson, F. C. Lloyd, *Br. J. Appl. Phys.* 16 (1965) 1619.
- [62] D. K. Felstead, R. L. Rogers, D. G. Young, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 66 (1983) 105.
- [63] N. Wilson, in *Electrostatics 1979, Institute of Physics*, London (1979) p. 73.
- [64] P. Tolson, *J. Electrostat.* 8 (1980) 289.
- [65] N. Wilson, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 66 (1983) 21.
- [66] E. Heidelberg, Static Electrification Conference, The Institute of Physics and the Physical Society, London (1967).
- [67] E. Heidelberg, *Advances in Static Electricity I, Proc. 1st Int. Conf. Static Electricity, Vienna* (1970) 351.
- [68] M. Glor, *J. Electrostat.* 10 (1981) 327.
- [69] H. Krämer, K. Asano, *J. Electrostat.* 6 (1979) 361.
- [70] J. K. Johnson, *J. Electrostat.* 4 (1977/1978) 53.
- [71] M. Glor, unveröffentlicht.
- [72] M. Glor, *J. Electrostat.* 15 (1984) 223.
- [73] A. R. Blythe, W. Reddish, in *Electrostatics 1979*, Institute of Physics, London (1979), p. 107.
- [74] B. Maurer, *Chem. Ing. Techn.* 51 (1979) 98.
- [75] F. Schmalz, persönliche Mitteilung.
- [76] P. Boschung, W. Hilgner, G. Lüttgens, B. Maurer, A. Widmer, *J. Electrostat.* 3 (1977) 303.
- [77] G. Lüttgens, P. Boschung: *Elektrostatische Aufladungen*, Expert-Verlag, Grafenau (1980).

# Selbstentzündung von Wäschestapeln

Dr. U. Puchner

## Einleitung

Mit zunehmender Anzahl von Groß-Wäschereien vor etwa 20 Jahren sind Brände in diesen Betrieben aufgefallen, die außerhalb der üblichen Arbeitszeiten, vielfach mehrere Stunden nach Arbeits-schluß, entdeckt worden sind [1,2,3]. In den meisten Fällen führten die kriminal-technischen Untersuchungen am Brandort zu dem eindeutigen Ergebnis, daß eine technische Brandursache zuverlässig auszuschließen ist; die kriminalisti-schen Erhebungen ergaben aber auch keine Hinweise auf eine fahrlässige oder vorsätzliche Brandstiftung. So mußten einige Brandfälle zunächst als ungeklärt zu den Akten gelegt werden, wobei jeder an der Aufklärung oder Schadenregulie-rung Beteiligte oder davon Betroffene den sich anscheinend widersprechenden Befunden mit Skepsis begegnete. Die mit

diesen Schäden befaßten Brandsachver-ständigen waren herausgefordert, durch Auswertung von Beobachtungen Sach-kundiger und Laborversuchen sowie durch theoretische Untersuchungen die tatsächliche Ursache dieser Brände zu erforschen [6].

## Beobachtungen bei realen Bränden

Wegen des hohen Zerstörungsgrades war es meist nicht möglich, Einzelunter-suchungen in der vor dem Brand auf-gestapelten Wäsche durchzuführen. Als aber nach einem frühen, erfolgreichen Löschangriff relativ gut erhaltene Wäschestapel sichergestellt werden konnten, war der entscheidende Hinweis gegeben. Im Inneren konnten Glutnester nachgewiesen werden, die zum Zeit-punkt der Löschmaßnahmen noch keine direkte Verbindung zur Umgebungsluft aufwiesen. Im brandbeschädigten Textil-material konnten weder Reste einer zeit-verzögernden Inbrandsetzungsvorrich-tung noch Spuren eines chemischen

Brandsatzes nachgewiesen werden. Daraus resultierte der Verdacht, es könne sich bei diesen Bränden nur um einen Selbsterhitzungsprozeß in den gestapel-ten Wäschestücken handeln. Dabei erin-nernte man sich z. B. an Selbstentzün-dungsbrände in Papierrollen nach einer Lagerzeit von 10 Tagen nach Herstellung [4] und an Selbstentzündungsbrände von gepreßten Baumwollballen nach wochenlangem Schiffstransport.

Gerade die in den Baumwollballen fest-gestellten Glutnester schienen ein unmit-telbares Analogon zu den Bränden in der gewaschenen, getrockneten und gesta-pelten Wäsche der Groß-Wäschereien zu sein. Es war bekannt, daß die in der Baum-wolle enthaltenen Öle eine chemische Reaktion mit dem Luftsauerstoff einge-hen, die von einer erheblichen Wärmeab-gabe begleitet wird. Diese Ballen sorgen durch ihre dichte Packung für eine solche thermische Isolierung, daß sich im Inne-ren offensichtlich ein zum Brand führen-der Wärmestau entwickeln kann.

Dr. Ulrich Puchner, Bauoberrat,  
Sachverständiger im Sachgebiet Physik  
des Bayerischen Landeskriminalamtes