

An dieser Stelle möchten die Verfasser den Herren Oberregierungsrat Dipl.-Ing. J. Knapp, E. Altmann und G. Preschel danken für die ausgezeichnete kollegiale Zusammenarbeit, insbesondere bei der Entwicklung des speziellen Zünderprüfstandes.

5. Zusammenfassung

Sprengkapseln mit elektrischer Auslösung (SKE) werden in großer Zahl, z. B. in Schnellauslöseeinrichtungen insbesondere für Feuerlöschanlagen unter und über Tage, eingesetzt. Da diese Gegenstände, soweit sie vertrieben, anderen überlassen und verwendet werden, einer Zulassung nach § 5 des Sprengstoffgesetzes bedürfen, wurden die not-

wendigen Anforderungen zusammen mit den zugehörigen Prüfvorschriften formuliert und kommentiert und eine für die Prüfung notwendige Meßapparatur beschrieben.

Literaturverzeichnis

- [1] Bartels und Ziegler:
Über die sicherheitstechnischen Anforderungen an Sprengkapseln mit mechanischer Auslösung für gewerbliche Zwecke, Nobelhefte 44 (1978), S. 35–39
- [2] TOTAL – Foerstner GmbH + Co.:
Explosionsunterdrückung in Behältern, technisches Firmeninformationsblatt
- [3] Walter Kidde GmbH, Lüneburg:
Sicherheit auf See, maßgeschneiderte Sicherheit und umfassender Feuerschutz, technische Firmeninformationsblätter
- [4] Ludwig Scheichl:
Halone für die Brandbekämpfung, Sonderdruck aus der „VFDB-Zeitschrift“, Heft 4/1966, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart
- [5] Herrmann
Ein Gerät zur Prüfung der Sicherheit elektrischer Zünder gegen Zündung durch elektrostatische Aufladungen.
Nobel Hefte 39 (1973), H. 2, S. 72–79
- [6] Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) vom 13. September 1976, BGBl. I, S. 2737
- [7] Erste Verordnung zum Sprengstoffgesetz (1. SprengV) vom 21. Juni 1983 (BGBl. I, S. 744)
- [8] Bekanntmachung der Prüfvorschriften für Sprengstoffe, Zündmittel, Sprengzubehör sowie pyrotechnische Gegenstände und deren Sätze vom 12. 03. 1982
Beilage zum Bundesanzeiger Nr. 59 vom 26. 03. 1982

Gefahrenquelle statische Elektrizität in der chemischen Industrie

Nachdruck aus „CHIMIA“ 40 (1986) Nr. 1

Martin Gior

Die Elektrostatik hat seit ihrer Entdeckung durch Thales von Milet vor ca. 2600 Jahren die Menschen fasziniert. Die damals beobachtete Anziehung leichter Teilchen durch geriebenen Bernstein ist heute, im Zeitalter der Kunststoffe mit hochisolierenden Oberflächen, erneut aktuell geworden. Aber auch in der Zwischenzeit wurden die Leute immer wieder mit elektrostatischen Phänomenen konfrontiert, sei es in Form von imposanten Gewitterblitzen in der Natur oder in Form von magisch anmutenden Experimenten, wie sie in den vergangenen Jahrhunderten oft nicht nur zu wissenschaftlichen Zwecken unternommen, sondern auch zum Ergötzen und Erstaunen des Volks vorgeführt worden sind. Bis in die Gegenwart hat die Elektrostatik etwas von diesem magischen Anschein beibehalten. Nur so ist erklärlich, daß bis vor kurzem noch allzu oft der Elektrostatik die Schuld an Störungen oder Explosionen in all jenen Fällen zugeschoben wurde, in welchen keine anderen nachweisbaren Ursachen gefunden worden sind. In den letzten Jahrzehnten wurden große Anstrengungen unternommen, um die Erklärung und Voraussage elektrostatischer Phänomene in der industriellen Praxis auf eine wissenschaftliche Grundlage zu stellen. Dieser Fortschrittsbericht soll einen Überblick über unsere Kenntnisse von durch elektrostatische Aufladungen verursachten Gefahren geben.

1. Einleitung

In der Physik wird dasjenige Spezialgebiet der Elektrizitätslehre mit „Elektrostatik“ bezeichnet, welches sich mit den Gesetzmäßigkeiten zwischen ruhenden Ladungen, elektrischen Feldern und Potentialen befaßt. Abweichend von einer streng physikalischen Definition wird jedoch heute immer dann von Elektrostatik gesprochen, wenn infolge starker statischer elektrischer Felder irgendwelche Ladungsträger bewegt werden. In diesem erweiterten Sinne umfaßt die Elektrostatik die Bereiche industrielle Anwendungen, Störungen und Gefahren. Beispiele für industrielle Anwendungen, in denen man sich die Kraftwirkung von elektrischen Feldern auf geladene Teilchen oder Tröpfchen zu Nutzen macht, sind die elektrostatischen Kopier-, Beschichtungs-, Lackier- und Druckverfahren sowie die elektrostatische Staub-

abscheidung und die elektrostatische Applikation von Pflanzenschutzmitteln.

Störungen und Schäden infolge elektrostatischer Aufladungen sind entweder direkt auf die Anziehung oder Abstoßung aufgeladener Oberflächen (z. B. Textilien, Fertigung und Verarbeitung von Kunststoffen) zurückzuführen oder auf die Wirkung von Gasentladungen, welche durch hohe elektrostatische Aufladungen ausgelöst werden können (Verblitzung von Filmen bei deren Herstellung, Zerstörung von Halbleiterbauteilen, Störung von Computern).

Durch elektrostatische Aufladungen hervorgerufene Gasentladungen sind zwar für den Menschen unangenehm, aber im allgemeinen nicht unmittelbar gefährlich. Bei Anwesenheit einer explosionsfähigen Atmosphäre werden derartige Gasentladungen jedoch zu einer Gefahr. Sie können als Zündquelle wirksam werden und Explosionen mit verheerenden Folgen initiieren. Aus der Sicht der Elektrostatik ist naturgemäß die Explosionsgefahr dort am größten, wo Stoffe gehandhabt werden, die sich sowohl hierbei hoch auf-

laden als auch zur Entstehung einer explosionsfähigen Atmosphäre beitragen. Dies trifft besonders für den Umgang mit brennbaren nichtleitfähigen Flüssigkeiten wie Kraftstoffe oder apolare Lösemittel und für den Umgang mit brennbaren nichtleitfähigen Stäuben zu. Daher sind insbesondere sämtliche Produktionszweige der chemischen Industrie, der Petrolindustrie sowie der Nahrungs- und Futtermittelindustrie betroffen. Leider wird dies durch einige spektakuläre Explosionsereignisse hinreichend bestätigt.

Im Zusammenhang mit der elektrostatischen Aufladung von Flüssigkeiten sind beispielsweise das Großereignis von Bitburg in der Bundesrepublik Deutschland [1] und drei verheerende Großtankerexplosionen [2], welche innerhalb eines Monats am Ende der sechziger Jahre stattfanden, zu erwähnen. Bild 1 vermittelt einen Eindruck von der Heftigkeit und den Auswirkungen einer solchen Explosion. Nach der Zusammenstellung einer großen Ölgesellschaft für die Jahre 1960–1969 konnten innerhalb dieser Zeit-

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

spanne 116 Brände oder Explosionen beim Füllen von Straßentankwagen oder Lagertanks auf statische Elektrizität zurückgeführt werden [3]. Statistisch betrachtet bedeutet diese Zahl ein solches Ereignis pro Monat. Die entsprechende Zahl für die Betankung von Flugzeugen ist mit 53 derartigen Unfällen in 24 Jahren um einiges niedriger [4]. Inzwischen hat die Petrolindustrie große Anstrengungen unternommen, um die Phänomene der Elektrostatik im Zusammenhang mit dem Strömen und der Lagerung von Kohlenwasserstoffen zu verstehen und daraus Maßnahmen zu deren sicheren Handhabung in der Praxis abzuleiten. Am Anfang stehen die Arbeiten von *Klinkenberg et al.* [5], denen bald eine Vielzahl von Publikationen anderer Autoren folgte (Literaturübersicht [4, 6]).

Im Fall der chemischen Industrie mit einer im allgemeinen wesentlich größeren Vielfalt an betrieblichen Operationen und Produkten ist es schwierig, vergleichbare Zahlen zu nennen. Basierend auf einem Rückblick über die letzten 10 Jahre dürften in der Schweiz mehrere Brände und Explosionen pro Jahr auf elektrostatische Aufladungen zurückzuführen sein. Eine erhebliche Gefahr stellt in diesem Industriezweig sowie auch in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie nicht nur die mögliche Aufladung von Flüssigkeiten, sondern auch die von pulverförmigen Produkten dar.

Die Explosionsfähigkeit von Gas- oder Dampf/Luft-Gemischen ist jedermann bekannt. Das Wissen um die Explosionsfähigkeit von Staub/Luft-Gemischen ist hingegen weniger weit verbreitet. Es mußte erst zu einigen folgenschweren Staubexplosionen in der Europäischen Nahrungsmittelindustrie und in der Amerikanischen Getreideindustrie (Bremen 1979, Metz 1981, USA 1976–1978) kommen, bis sich jedermann der Möglichkeit und der Tragweite von Staubexplosionen bewußt wurde Bild 2. Die ersten Berichte über Staubexplosionen liegen zwar weit zurück Bild 3, sie stammen noch vom Ende des 18. Jahrhunderts [7], die meisten Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet haben sich jedoch lange ausschließlich auf die Untersuchung von Gasexplosionen konzentriert. Erst in den letzten zwei Jahrzehnten hat sich das Forschungsinteresse auch den Staubexplosionen zugewendet.

Nach einer Statistik des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitssicherheit ereignet sich fast täglich eine Staubexplosion in der Bundesrepublik Deutschland [8]. Dieser Statistik ist zu entnehmen, daß 9% aller 381 analysierten Ereignisse auf statische Elektrizität als Zündquelle zurückzuführen sind. Wenn ausschließlich die Staubgruppe Kunststoffe betrachtet wird, erhöht sich dieser Anteil auf 34% von 47 analysierten Explosionen.

Die Elektrostatik ist zu einer mehr und mehr ins Gewicht fallenden möglichen Zündquelle in Anlagen zur Verarbeitung



Bild 1. Ende der sechziger Jahre fanden mehrere Explosionen auf Großtankern statt, die – wie hier im Bild – zum Aufreißen des Schiffsrumpfes geführt haben. Als Zündursache werden elektrostatische Entladungen infolge des aufgeladenen Tröpfchennebels beim Waschen der riesigen Rohölbehälter vermutet [2].



Bild 2. Die Zündempfindlichkeit von Staubwolken und die Heftigkeit von Staubexplosionen wurden während langer Zeit unterschätzt. Die Auswirkungen von Staubexplosionen übertreffen in mancher Hinsicht diejenigen von Gasexplosionen. In diesem Bild ist der Feuerball nach der Zündung einer Staubwolke, gebildet aus ca. 4 kg fein verteilten Pigmentpartikeln, festgehalten [55].

und Lagerung von pulverförmigen Stoffen geworden. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Die Erhöhung der Transportgeschwindigkeiten und die Erhöhung der Lagerkapazitäten durch den Bau von

Silos und Bunkern mit immer größer werdenden Volumen sowie die Umstellung von Klein- auf Großgebäude (z. B. flexible Schüttgutbehälter) zum Transport von Schüttgütern haben zu höheren Auf-

ladungsraten bzw. zu einer vermehrten Ladungsakkumulation geführt. Die Ladungsakkumulation wird zusätzlich begünstigt durch den hohen spezifischen elektrischen Widerstand der Kunststoffe, welche heute in zunehmendem Maße verarbeitet werden. Außerdem haben neue Untersuchungen gezeigt, daß die Zündempfindlichkeit vieler Stäube gegen elektrostatische Entladungen wesentlich höher ist als noch vor zehn Jahren angenommen wurde. Die Werte für die Mindestzündenergie diverser organischer Stäube, welche von verschiedenen Autoren [9, 10] in jüngerer Zeit gemessen wurden, sind teilweise ähnlich denjenigen für Gase und Dämpfe.

Gerade weil viele Faktoren darauf hindeuten, daß die Gefahren durch elektrostatische Aufladungen in Staub verarbeitenden Anlagen nicht unterschätzt werden dürfen, ist die Versuchung groß, in Unkenntnis der wirklichen Ursache eines Schadensereignisses der Elektrostatik die Schuld in die Schuhe zu schieben. Selbstverständlich ist ein solches Vorgehen sehr riskant, weil so die wirkliche Ursache unerkannt bleibt und nicht notwendigerweise die richtigen Maßnahmen getroffen werden. Folgeereignisse mit derselben Ursache können nicht ausgeschlossen werden. Dies trifft speziell für Staub verarbeitende Anlagen zu, in denen noch mit vielen anderen möglichen Zündquellen gerechnet werden muß. Im Gegensatz zu Flüssigkeiten erfordert die Verarbeitung von pulverförmigen Stoffen wesentlich mehr bewegte Anlageteile, die zu mechanisch erzeugten Funken oder zu Erwärmung infolge von Reibung führen können. Häufig gehört zum Verarbeitungsprozeß eine Trocknungsoperation, welche eine exotherme Reaktion und somit eine eventuell kritische Selbsterwärmung des Produkts bewirken kann.

Unter dem Aspekt der Elektrostatik ist die Gefahrenbeurteilung bei den Flüssigkeiten einfacher und viel weiter fortgeschritten als bei den Stäuben. Dies hängt einerseits damit zusammen, daß die Explosionsgefahr bei den Gasen und Dämpfen viel offensichtlicher ist, und deshalb die Aufladung der Flüssigkeiten zuerst im Brennpunkt der Interessen stand, während – wie schon erwähnt – die Untersuchungen an den Stäuben erst neueren Datums sind. Andererseits hat sich erwiesen, daß die Verhältnisse in bezug auf Ladungsakkumulation und Zündempfindlichkeit bei den Stäuben wesentlich komplizierter sind.

Aufgrund der gegenwärtigen Aktualität von Problemen im Zusammenhang mit Staubexplosionen wird in diesem Fortschrittsbericht eher die Staubaufladung im Vordergrund stehen. Es ist allerdings noch nicht möglich, alle Fragen zur Gefahrenbeurteilung bei der Handhabung und Verarbeitung von Stäuben aus der Sicht der Elektrostatik zu beantworten. Zunächst sollen deshalb die Grenzbereiche der heutigen Kenntnisse und



Bild 3. Staubexplosionen haben schon im vorigen Jahrhundert zu schweren Zerstörungen von Gebäuden und Anlagen geführt. Das Bild zeigt die Neue Wesermühle zu Hameln nach der Getreidestaubexplosion im Jahre 1887 [7].

die Tendenzen innerhalb dieser Bereiche aufgezeigt und dann die bisher gesicherten Befunde zusammengefaßt werden. Trotz der Komplexität dieses Forschungsgebietes wurden in den letzten zehn Jahren an Hochschulen und in der Industrie bei grundlegenden Untersuchungen umfangreiche Erfahrungen gesammelt, welche in Übersichtsartikeln und Büchern veröffentlicht worden sind [11–18, 77].

2. Elektrostatische Aufladungen in der industriellen Praxis

Elektrostatische Aufladungen entstehen immer dann, wenn zwei Oberflächen voneinander getrennt werden, wovon mindestens eine hoch isolierend ist. Bei der Berührung zweier Oberflächen findet eine Umverteilung von Ladungsträgern statt. Wenn der anschließende mechanische Trennvorgang schnell genug ist im Vergleich zur Beweglichkeit der Ladungsträger, befinden sich nach der Trennung die umverteilten Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens auf beiden Oberflächen. Da sämtliche Transportprozesse

sowie die meisten physikalischen Operationen in der industriellen Praxis mit Trennvorgängen verbunden sind, kommt es hierbei je nach elektrischer Leitfähigkeit unweigerlich zu Aufladungen. Dies gilt sowohl für Feststoffe als auch für Flüssigkeiten. Zur Illustration dieser allgemeinen Aussagen mögen folgende Beispiele dienen:

Der Mensch kann sich beim Gehen aufladen, falls der Fußboden oder seine Schuhe nicht leitfähig sind. Wenn ein Pulver aus einem Sack ausgeschüttet oder durch ein Rohr gefördert wird, können das Pulver und der Sack oder das Rohr aufgeladen werden. Beim Sieben oder Einschütten durch einen Trichter ist ebenfalls eine Aufladung des Pulvers und des Siebes bzw. des Trichters zu erwarten. Strömt eine Flüssigkeit durch eine Rohrleitung oder einen Schlauch, kann sich sowohl die Flüssigkeit als auch die Rohrleitung oder der Schlauch aufladen. Die Aufladetendenz wird stark erhöht, falls sich Filter in der Rohrleitung befinden. Flüssigkeiten werden auch 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 Aufladendenz gerechnet werden. Ebenso werden an Treibriemen und Förderbändern sowie beim Abrollen von Papier- und Plastikfolienbahnen hohe Aufladungen beobachtet.

3. Systematisches Vorgehen zur Gefahrenbeurteilung und zur Wahl von Abwehrmaßnahmen

Wie aus der vorangegangenen Aufzählung von Praxisbeispielen hervorgeht, entsteht in den meisten Fällen eine Aufladung durch Trennprozesse zwischen Produkten und Anlageteilen. Trotz der Vielfalt der verschiedenen Operationen lassen sich bezüglich der Gefahrenbeurteilung wesentliche Gemeinsamkeiten ableiten.

Damit elektrostatische Aufladungen als Zündquellen wirksam werden können, müssen immer die gleichen Vorgänge ablaufen. Diese sind in Bild 4 schematisch dargestellt. Am Anfang steht ein Auflademechanismus durch irgendwelche Trennprozesse. Der Auflademechanismus kann zu einer Ladungsakkumulation führen. Da jeder Auflademechanismus durch Trennprozesse zustandekommt, gibt es natürlich immer zwei Orte der Ladungsakkumulation. In der Regel sind dies das Produkt und die betroffenen Anlageteile. Ladungen können auf elektrisch isolierten Leitern, auf Isolatoroberflächen oder als Raumladungen (Staubwolke, Nebel, Staubschüttung, Flüssigkeit) akkumuliert werden.

Die Höhe der akkumulierten Ladung wird durch die Raten der Ladungstrennung und der Ladungsableitung bestimmt. Erreicht die Ladungsakkumulation einen so hohen Wert, daß das resultierende elektrische Feld an einem Ort im Raum den Wert der Durchbruchfeldstärke (in Luft ca. 3 MV/m) erreicht, ist mit dem Auftreten einer Gasentladung zu rechnen. Je nach Energie der Gasentladung und Zündempfindlichkeit einer eventuell anwesenden explosionsfähigen Atmosphäre kann es zu einer Zündung kommen.

Das in Bild 4 gezeigte Schema sieht auf den ersten Blick recht einfach aus. Die genaue Analyse eines Prozesses zeigt aber oft, daß es nicht immer einfach ist, die einzelnen Schritte örtlich und zeitlich genau zu lokalisieren, weil diese unter Umständen sowohl zeitlich als auch örtlich zusammenfallen.

Das Schema kann nicht nur zur Analyse von potentiellen Gefahren durch statische Elektrizität benutzt werden, sondern auch zur systematischen Diskussion von möglichen Sicherheitsmaßnahmen. Das Ziel einer jeden dieser Sicherheitsmaßnahmen besteht letztlich darin, zu verhindern, daß entweder durch die Ladung auf dem Produkt oder auf den

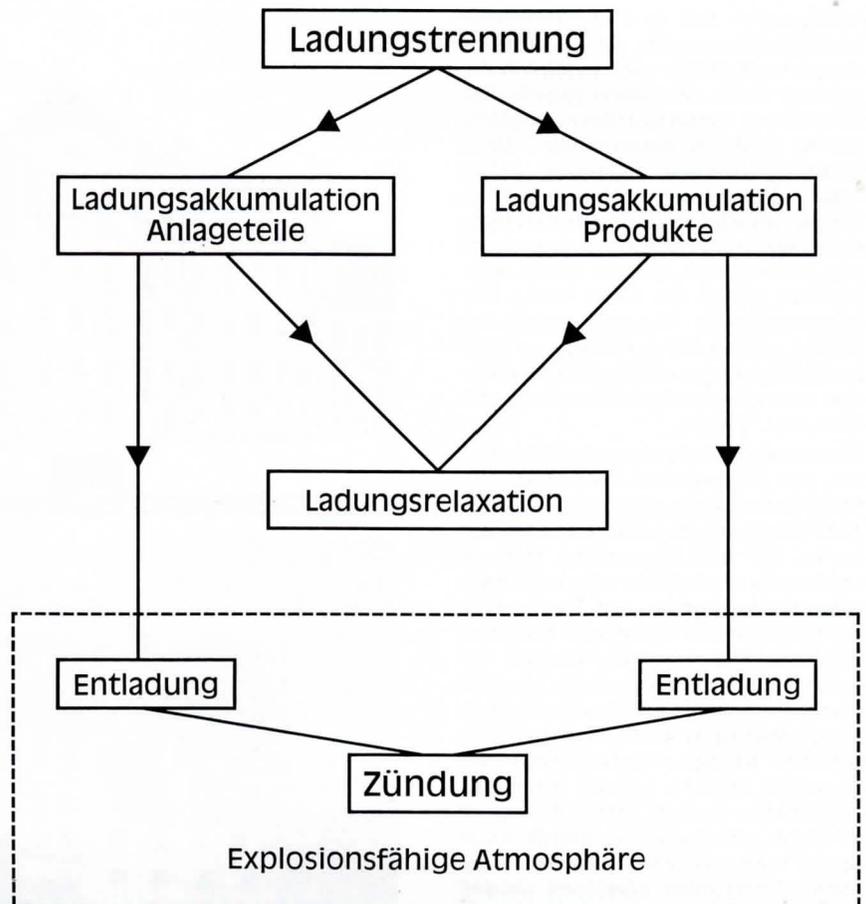


Bild 4. Falls elektrostatische Aufladungen zur Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre führen, laufen in jedem Fall dieselben Einzelschritte ab. Das Schema kann nicht nur zur systematischen Analyse eines Explosionsereignisses aus der Sicht der Elektrostatik, sondern auch zur systematischen Herleitung von Maßnahmen herangezogen werden.

Anlageteilen die Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre bewirkt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, genügt es, die dargestellte Ereignisfolge an irgendeinem Ort zu unterbrechen, bevor es zu einer Zündung kommt. Dies kann grundsätzlich an drei verschiedenen Orten erfolgen und läuft auf folgende Maßnahmen hinaus:

- (1) Das Niveau der akkumulierten Ladungen wird tief gehalten durch Verminderung der Ladungstrennungsraten (z. B. Begrenzung von Fördergeschwindigkeiten) und Steigerung der Ladungsrelaxation (Verwendung von leitfähigen Materialien und Erdung).
- (2) Aus Kenntnis der betrieblichen Operation, der involvierten Produkte und der Anlagen kann vorausgesagt werden, mit welchen Entladungen (Entladungstyp, Energie) gerechnet werden muß. Aus Erfahrung ist hinreichend bekannt, daß die zu erwartenden Entladungen für das ins Auge gefaßte explosionsfähige Gemisch nicht zündfähig sind.
- (3) Zündfähige Entladungen können nicht ausgeschlossen werden. Es sind andere Schutzmaßnahmen (z. B. Inertisierung) vorzusehen.

Maßnahmen der ersten Art werden hauptsächlich zur Verhinderung gefähr-

lich hoher Aufladungen von Flüssigkeiten und Anlageteilen angewendet. Da es sehr schwierig ist, die Aufladung von staubförmigen Produkten unter Kontrolle zu halten, empfehlen sich bei den staubförmigen Produkten die Maßnahmen der zweiten oder dritten Art. Es stellt sich hierbei also die Frage, mit welchen Entladungen muß gerechnet werden und sind diese Entladungen zündfähig für das betreffende explosionsfähige Gemisch. Selbstverständlich werden hauptsächlich in allen jenen Fällen Maßnahmen der dritten Art angewendet, in welchen das vorhandene explosionsfähige Gemisch besonders zündempfindlich ist, also z. B. bei der Handhabung von Stäuben in Gegenwart von leicht entzündlichen Gas- oder Lösemitteldampf/Luft-Gemischen.

4. Produktaufladung

4.1. Flüssigkeiten

Elektrisch isolierende Flüssigkeiten laden sich beim Strömen durch Rohrleitungen auf, und zwar unabhängig davon, ob die Rohrleitungen aus Kunststoff oder leitfähig und geerdet sind. Falls die Ladungsabflußrate im Lagertank geringer ist als der Aufladestrom durch die neu zufließende Flüssigkeit, kann es zu Entladungen im Lagertank kommen. Die hierbei

auftretenden Entladungen gehören in die Kategorie der Büschelentladungen (siehe Abschnitt 8.2).

Zur Beurteilung der Gefahrensituation in einem Lagertank wird von vielen Autoren die Höhe der Flüssigkeitsaufladung in Form von Oberflächenpotentialen auf der Flüssigkeit angegeben. Diese Angaben beruhen auf Untersuchungen über das Einsetzen zündfähiger Entladungen in Funktion des Oberflächenpotentials. Gemäß einer Zusammenstellung aller Resultate bis 1981 durch Leonard [4] liegt das kritische Oberflächenpotential im Bereich zwischen 20 und 45 kV. In neueren Arbeiten [19, 20] wird dieser Bereich auf 25 bis 35 kV eingeschränkt. Natürlich haben auch die Größe und Form des Lagertanks sowie allfällige innere Strukturen (Einbauten etc.) einen Einfluß auf das Einsetzen zündfähiger Entladungen. In diesem Zusammenhang wurde von Butterworth et al. [20, 21] mittels Modellrechnungen die Feld- und Potentialverteilung in Lagertanks bestimmt.

Für den Spezialfall der Füllung von Straßentankwagen wurde der Zusammenhang zwischen Produktleitfähigkeit, Strömungsgeschwindigkeit, Ladungsdichte und Oberflächenpotential im Detail untersucht [19, 22, 23]. Die daraus resultierenden Empfehlungen für die sichere Handhabung brennbarer Flüssigkeiten haben in mehreren nationalen Richtlinien [24–26] ihren Niederschlag gefunden. Allen diesen Empfehlungen liegt eine von verschiedenen Parametern (Leitfähigkeit der Flüssigkeit, Rohrdurchmesser, Tankgröße etc.) abhängige Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit zugrunde. Hier muß noch darauf hingewiesen werden, daß schon bei geringen Feststoffanteilen oder Anteilen von nicht mischbaren Flüssigkeiten wesentlich höhere Aufladungen zu beobachten sind als bei reinen Flüssigkeiten [27].

Außer beim Strömen werden Flüssigkeiten auch beim Verdüsen aufgeladen und können somit einen aufgeladenen Tröpfchennebel ergeben. Wie eingangs erwähnt, hat dieses Phänomen bei der Reinigung von Großtanks [2] zu schweren Explosionen geführt. Heute werden bei der Reinigung von Kesseln, Behältern und Fässern vermehrt Wasser oder Lösemittel unter hohem Druck – bis zu einigen hundert bar – verwendet. Über die hierbei in Form von Tröpfchennebeln entstehenden Raumladungsdichten, Felder und Potentiale gibt es bisher nur wenige Einzeluntersuchungen [28, 29].

4.2. Stäube

Sobald der Pulverdurchgangswiderstand Werte oberhalb ca. $10^3 \Omega \cdot m$ erreicht, muß unabhängig vom Material der Anlage mit einer Aufladung von staubförmigen Produkten bei deren Handhabung und Verarbeitung gerechnet werden. Dies gilt für die meisten organischen Substanzen aufgrund ihrer schlechten elektrischen Leitfähigkeit. Da es nicht möglich ist, amorphe organische Sub-

stanzen mit den Gesetzmäßigkeiten der Festkörperphysik zu beschreiben, besteht immer noch Ungewißheit in bezug auf den eigentlichen Auflademechanismus bei diesen Materialien. Aber selbst beim Vorliegen einer Theorie zur Voraussage des Aufladeverhaltens von reinen Substanzen wäre diese von untergeordneter praktischer Bedeutung. Denn die meisten pulverförmigen Substanzen in der Industrie sind nicht reine Substanzen und ihre Oberflächen sind nicht absolut sauber.

Geringste Oberflächenveränderungen beeinflussen aber das Aufladeverhalten entscheidend. Dieser Sachverhalt, welcher für die bekanntermaßen schlechte Reproduzierbarkeit elektrostatischer Effekte verantwortlich ist und den Experimentator oft in Verzweiflung bringt, kann wie folgt verstanden werden: Unter der Annahme, daß an der Oberfläche eines Feststoffs die Moleküle einen Abstand von einigen zehntel Nanometer aufweisen, wird nur eine einzige Elementarladung als Überschubladung pro 10^5 Oberflächenmoleküle gebraucht, um an der Grenzfläche zur Luft die maximal

mögliche Oberflächenladungsdichte von $2.7 \cdot 10^{-5} C/m^2$ (bei dieser Oberflächenladungsdichte erreicht die Feldstärke im Luftraum den Wert der Durchbruchfeldstärke) hervorzubringen. Für pulverförmige Substanzen ist die Reproduzierbarkeit des Aufladeverhaltens oft um einiges schlechter als für Feststoffoberflächen. Dies hängt damit zusammen, daß die Nettoladung, welche meßtechnisch erfaßt wird, als Differenz hoch aufgeladener negativer und positiver Bestandteile des Pulvers verstanden werden muß. Somit kann auch der bei manchen Produkten mit schwacher Aufladetendenz beobachtete Vorzeichenwechsel nach wiederholter Messung erklärt werden.

Mehrere Autoren haben Resultate über die Aufladung von Stäuben veröffentlicht [30–36]. Eine Übersicht über die Literatur bis 1970 wurde von Lapple [37] erstellt. Seither ist ein steigendes Interesse auf diesem Gebiet festzustellen [38–50]. Beinahe alle Publikationen beziehen sich auf Untersuchungen an einem einzigen Produkt. Jansen [38] machte Messungen an 20 verschiedenen Kunststoffpulvern und Boschung und Glor [49, 50] unter-

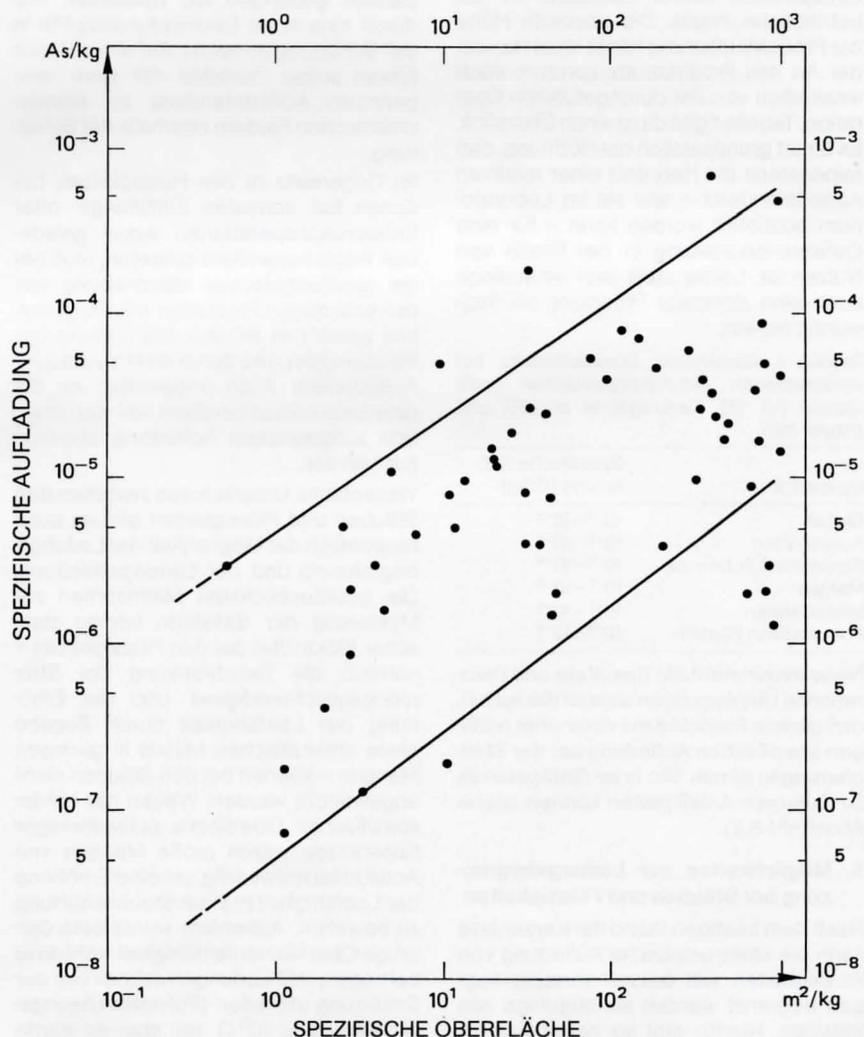


Bild 5. Die spezifische Aufladung von pulverförmigen Produkten hängt nicht nur von der Substanz, sondern auch ganz wesentlich von der spezifischen Oberfläche ab. Die hier dargestellten Resultate wurden an einer Vielzahl unterschiedlicher Industriestäube mit einer pneumatischen Förderapparatur im Laboratoriumsmaßstab erhalten [49].

suchten das Aufladeverhalten von ca. 200 verschiedenen Industriestäuben. Diese Messungen wurden mit einer Laboratoriumsapparatur, die den pneumatischen Transport simuliert, durchgeführt. Die spezifische Produktaufladung wurde in Funktion von Parametern wie Massenfluß, spezifische Oberfläche, Luftgeschwindigkeit sowie Länge, Durchmesser und Material der Förderleitung gemessen. Ohne Veränderung der Apparateparameter betrug der Variationsbereich bei den untersuchten Produkten 10^{-7} bis 10^{-3} C/kg, dabei war ein starker Einfluß durch die spezifische Oberfläche Bild 5 festzustellen. Aufgrund der Reproduzierbarkeit der Resultate war es möglich, die Produkte nach ihrer Aufladetendenz zu klassieren. Dieselbe relative Klassierung wurde auch mit einer anderen Methode erreicht, bei welcher die Pulver langsam auf eine schnell rotierende, konische Scheibe geschüttet wurden [51].

Obwohl es offensichtlich möglich ist, Produkte bezüglich ihrer Aufladetendenz im Laboratorium zu klassieren, bestehen erhebliche Bedenken hinsichtlich einer Extrapolation dieser Resultate in die betriebliche Praxis. Die absolute Höhe der Produktaufladung hängt nicht nur von der Art des Produkts ab, sondern auch wesentlich von der durchgeführten Operation. Tabelle 1 gibt dazu einen Überblick. Es bleibt grundsätzlich die Hoffnung, daß mindestens die Kenntnis einer relativen Aufladetendenz – wie sie im Laboratorium bestimmt werden kann – für eine Gefahrenbeurteilung in der Praxis von Nutzen ist. Leider stellt sich neuerdings auch eine derartige Prognose als fragwürdig heraus.

Tabelle 1. Spezifische Staubaufladung bei verschiedenen Industrieoperationen nach Gibson [13, 14], Cartwright et al. [52] und Maurer [53].

Operation	Spezifische Aufladung [C/kg]
Sieben	10^{-11} – 10^{-9}
Ausschütten	10^{-9} – 10^{-7}
Fördern mit Schnecke	10^{-8} – 10^{-6}
Mahlen	10^{-7} – 10^{-6}
Mikronisieren	10^{-7} – 10^{-4}
Pneumatisch Fördern	10^{-6} – 10^{-4}

Neue experimentelle Resultate und theoretische Überlegungen weisen darauf hin, daß gerade Produkte mit einer eher mäßigen spezifischen Aufladung bei der Speicherung in einem Silo oder Großgebäude zu Gefahren Anlaß geben können (siehe Abschnitt 8.5).

5. Möglichkeiten zur Ladungsbegrenzung bei Stäuben und Flüssigkeiten

Nach dem heutigen Stand der Kenntnisse kann die elektrostatische Aufladung von Flüssigkeiten viel besser vorausgesagt und begrenzt werden als diejenige von Stäuben. Hierfür gibt es hauptsächlich zwei Gründe: Zum einen wurden – wie schon eingangs erwähnt – in der Vergangenheit viel mehr Anstrengungen unternommen, um die Gefahrenbeurteilung

bei den Flüssigkeiten in den Griff zu bekommen als bei den Stäuben; zum anderen sind bei den pulverförmigen Produkten die Probleme bei weitem komplizierter. Letzteres rührt von der grundsätzlich verschiedenen Natur der Flüssigkeiten und Stäube her. Um beispielsweise eine Anlage zur pneumatischen Förderung und Lagerung von Stäuben zu charakterisieren, müssen viel mehr Parameter spezifiziert werden (Partikelgrößenverteilung, spezifische Oberfläche, Dichte, Schüttgewicht, Pulverdurchgangswiderstand, Massendurchsatz, Luftdurchsatz, Luftgeschwindigkeit, Dimensionen der Rohrleitung und des Lagersilos, Art des Siloeintrags etc.) als im Fall von Flüssigkeiten.

Ein anderer wesentlicher Unterschied zwischen der Aufladung von pulverförmigen Substanzen und Flüssigkeiten besteht darin, daß die Stäube meistens in dispergiertem Zustand aufgeladen werden (z. B. pneumatischer Transport). Wenn die aufgeladenen Staubteilchen in die Schüttung hinunterfallen, wird nicht nur die Masse, sondern auch die Ladung, welche ja unmittelbar an die Feststoffpartikel gebunden ist, verdichtet, wodurch eine hohe Raumladungsdichte in der Schüttung entsteht. Auf diese Weise führen selbst Produkte mit einer sehr geringen Aufladetendenz zu starken elektrischen Feldern oberhalb der Schüttung.

Im Gegensatz zu den Flüssigkeiten, bei denen bei normalen Einfüllungs- oder Entleerungsoperationen keine geladenen Tröpfchenwolken auftreten, muß bei der großtechnischen Handhabung von pulverförmigen Produkten mit Staubwolken gerechnet werden. Die Bildung von Staubwolken wird durch elektrostatische Aufladungen noch unterstützt, da die geladenen Staubpartikeln von der ebenfalls aufgeladenen Schüttung abgestoßen werden.

Wesentliche Unterschiede zwischen den Stäuben und Flüssigkeiten gibt es auch hinsichtlich der Möglichkeit der Ladungsbegrenzung und der Ladungsableitung. Die gebräuchlichsten Maßnahmen zur Minderung der Gefahren infolge statischer Elektrizität bei den Flüssigkeiten – nämlich die Beschränkung der Strömungsgeschwindigkeit und die Erhöhung der Leitfähigkeit durch Zugabe eines antistatischen Mittels in geringen Mengen – können bei den Stäuben nicht angewendet werden. Wegen der hohen spezifischen Oberfläche pulverförmiger Substanzen wären große Mengen von Antistatika notwendig, um eine Erhöhung der Leitfähigkeit in einer Staubschüttung zu bewirken. Außerdem würde eine derartige Oberflächenleitfähigkeit wohl dazu beitragen, daß Ladungen schnell von der Schüttung abfließen (Pulverdurchgangswiderstand $\leq 10^8 \Omega \cdot m$), aber es würde nicht verhindert, daß die Staubpartikeln bei kurzen Wandkontakten aufgeladen werden und eine aufgeladene Staubwolke bilden.

Da sich die bei den Flüssigkeiten üblichen Methoden zur Gefahrenminderung, wie Beschränkung der Strömungsgeschwindigkeit und Erhöhung der Produkteleitfähigkeit, bei der Handhabung und Verarbeitung von Stäuben nicht anwenden lassen, muß nach anderen Wegen gesucht werden, sobald mit zündfähigen Entladungen zu rechnen ist. Grundsätzlich bieten sich die Methoden zur Ladungsneutralisation, welche bei der Papier- und Folienherstellung oder -bedruckung angewendet werden, als Alternative an. In einer Staub verarbeitenden Anlage muß die Ladungsneutralisation über einen viel größeren Volumenbereich wirksam sein als im Fall hoch aufgeladener Papier- oder Folienoberflächen. Um dieser Anforderung Rechnung zu tragen, haben Larigaldie et al. [54] einen sogenannten „elektrogasdynamischen Generator“ entwickelt. In diesem Generator werden die für die Ladungsneutralisation bestimmten Ladungsträger nicht in Form von Ionen oder Elektronen mit der normalerweise hohen Rekombinationsrate erzeugt, sondern in Form von geladenen Aerosoltröpfchen, welche anschließend durch einen starken Luftstrom an die Orte hoher Raumladungsdichte geblasen werden. Trotz der offensichtlichen Verbesserung derartiger Ladungsneutralisatoren im Vergleich zu einfachen Ionisatoren sind diese in Staub verarbeitenden Anlagen noch nicht weit verbreitet. Es ist weitere Forschungsarbeit erforderlich, um zu entscheiden, ob und bei welchen Operationen, Anlagen und Produkten in Wirklichkeit mit zündfähigen Entladungen ausgehend vom Produkt gerechnet werden muß. In jenen Fällen, wo dies jedoch zutrifft, könnten derartige Verfahren von großem Nutzen sein. Ihr Einsatz hängt aber natürlich auch von der Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu anderen Möglichkeiten des Explosionsschutzes ab.

6. Beurteilung von Operationen und Materialien

Oft ist es sehr schwierig, die Höhe der elektrostatischen Aufladung in der betrieblichen Praxis vorzusagen. Deshalb beruht die Gefahrenbeurteilung meistens darauf, abzuschätzen, ob bei den gegebenen Operationen und Materialien Entladungen auftreten und wie zündfähig diese sind. Für eine Übersicht müssen also die Gefahren infolge statischer Elektrizität nicht unter dem Gesichtspunkt einzelner betrieblicher Operationen diskutiert werden, sondern vielmehr unter dem des Vorkommens und der Zündfähigkeit der verschiedenen Gasentladungsarten. Dieser Weg soll im folgenden eingeschlagen werden. Der Bezug zur industriellen Praxis wird durch die Beschreibung der Bedingungen für das Auftreten der einzelnen Entladungsarten hergestellt.

Fortsetzung des Artikels in Heft 2/88