

Abzuleitende Aufladungen

FALLSTUDIEN – In letzter Zeit kam es zu mehreren Unfällen beim Abfüllen von Toluol. Wie die Untersuchungen zeigten, waren jeweils elektrostatische Aufladungen bzw. deren mangelhafte Ableitung ursächlich. VON GÜNTER UND SYLVIA LÜTTGENS

Eigentlich sollte es in unserer so stringent regulierten „technischen Gesellschaft“ zu einem Unfall gar nicht kommen. Ist er aber – häufig durch ein Zusammentreffen unheilvoller Abläufe – doch einmal eingetreten, so muss seine Ursache ausfindig gemacht werden. Bei Bränden und Explosionen erfordert das die Ermittlung der Zündquelle. Die Vorgehensweise ist dann, die in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) unter TRBS 2152 gelisteten 13 Arten von Zündquellen abzufragen (siehe **Info-Kasten**).

Bei einer solchen Verfahrensweise ist es oft so, dass alle gelisteten Zündquellen als nicht zutreffend eingestuft werden – bis auf die „statische Elektrizität“, bei der man es nicht so genau weiß, und die dann verdächtigt wird. Das führt mitunter sogar dazu, dass die Elektrostatik für Schadensereignisse verantwortlich gemacht wird, die nachweislich gar nicht von ihr verursacht wurden.

Ganz allgemein hängt die Wirksamkeit von Zündquellen, d.h. ihre Fähigkeit, explosionsfähige Atmosphäre zu entzünden, von der Energie der Zündquelle und von den Eigenschaften der explosionsfähigen Atmosphäre ab. Im Bereich der Elektrostatik sind in erster Linie zwei Entladungsformen relevant:

- ◆ Funkenentladung
- ◆ Büschelentladung

Davon verursacht nach Ansicht von Fachleuten allein die Funkenentladung etwa 80 Prozent aller nachgewiesenen elektrostatischen Zündungen. Sie ist wohl bekannt als lästige Erscheinung beim Aussteigen aus dem Auto, wenn anschließend von außen die Karosserie berührt wird. Vergleicht man die bei Funkenentladungen freigesetzten Energiebeträge (siehe **Info-Kasten** rechts unten) mit den Mindestzündenergien von etwa 0,2 Millijoule bei entflammaren Flüssigkeiten, so folgt, dass Funkenentladungen stets als zündfähig anzusehen sind.

Genau genommen lassen sich Funkenentladungen einfach und sicher vermeiden durch Erdung aller leitfähigen oder ableitfähigen Teile, die elektrostatisch aufgeladen werden können. Dessen ungeachtet, kommt es immer wieder vor, dass ein aufgeladenes Metallteil zu einer Funkenzündung führt.

Funkenentladung beim Abfüllen von Toluol

Dies war auch kürzlich der Fall, als es beim Abfüllen von Toluol zu einem Brandschaden kam.

Der Vorfall spielte sich so ab: Toluol soll aus einem starren Intermediate Bulk Container (IBC) von einem hohen Sockel in ein Metallfass abgefüllt werden. Ein Arbeiter holt das Fass auf einer Transportkarre herbei. Doch er zögert, weil sich das Fass nicht bis unter den Auslaufstutzen des IBC schieben lässt. Doch dann entsinnt er sich einer dafür speziell angefertigten Stutzenverlängerung. Er geht ins Lager und bekommt dort auch ein entsprechendes Teil, das sogar aus funkenarmer Bronze hergestellt ist. Doch es passt nicht auf den IBC-Auslass. Also wieder zurück ins Lager. Dort gibt man ihm ein Übergangsstück aus Kunststoff – und das passt!

Auch an die Maßnahmen zur Ableitung elektrostatischer Aufladungen denkt er rechtzeitig. An das metallene Gestell des IBC

Arten von Zündquellen nach TRBS 2152

Nr. Zündquelle	Beispiel
1 Heiße Oberflächen	heiße Rohrleitung, Apparategehäuse
2 Flammen und heiße Gase	Streichholz, Abgase, Trockenluft
3 Mechanisch erzeugte Funken	Schleifen, Trennen, mech. Feuerzeug
4 Elektrische Anlagen	elektrische Schließ- und Trennfunkten
5 Elektrische Ausgleichströme, Kathodischer Korrosionsschutz	Rückströme beim Elektroschweißen, Fremdstromeinspeisung, Fahrschienen
6 Statische Elektrizität	Gasentladungen nach Trennvorgängen
7 Blitzschlag	Zündung im Blitzkanal, Funken in Umgebung
8 Elektromagnetische Felder Bereich: 9 kHz bis 300 GHz	Hochfrequenzanlagen
9 Elektromagnetische Strahlung im optischen Spektralbereich	Lichtfokussierung, Fotoblitz
10 Ionisierende Strahlung	UV-Strahler, Röntgenröhren, Laser
11 Ultraschall	Ultraschallreinigung
12 Adiabatische Kompression	Verdichter, Stoßwellen in Leitungen
13 Chemische Reaktionen	Exotherme, pyrophore Reaktionen

Energiebeträge bei Funkenentladungen

Aufgeladener Körper	Kapazität (in Picofarad)	Potenzial (in Kilovolt)	Energie (in Millijoule)
Flansch	10	10	0,5
Kleine Metallgegenstände	10 - 20	10	0,5 - 1
Eimer	10	10	0,5
Kleinbehälter (bis 50 Liter)	50 - 100	8	2 - 3
Metallbehälter (200 bis 500 Liter)	50 - 300	20	10 - 60
Person	100 - 200	12	7 - 15
Große Anlagenteile (von geerdeter Struktur umgeben)	100 - 1.000	15	11 - 120

wird eine Erdungsklemme angelegt. Das Metallfass steht zwar auf ableitfähigem Fußboden, doch sicherheitshalber wird es noch zusätzlich geerdet. Der Arbeiter selbst trägt vorschriftsmäßig ableitfähige Schutzschuhe. Nachdem er alles nochmal gründlich in Augenschein nahm, öffnet er das Entleerungsventil des IBC. Doch jetzt steigt aus dem Fass eine Stichflamme auf, es brennt und der Arbeiter sucht sein Heil in der Flucht.

Der Brandschaden in der Anlage war beträchtlich, weil der IBC unter der Flammeneinwirkung herunterschmolz und sein gesamter Inhalt in das Feuer hinein freigesetzt wurde. Bei der Unfalluntersuchung wurde der naheliegende Verdacht einer elektrostatischen Zündung zunächst zerstreut, denn eine Nachprüfung ergab, dass der IBC und das Metallfass einwandfrei geerdet waren. Der Werker hatte sich mit seinen ableitfähigen Schuhen auf dem sauberen und ebenfalls ableitfähigen Fußboden nicht aufladen können.

Doch da war ja noch die metallene Stutzenverlängerung – eigens aus Bronze gefertigt, um mechanische Funken zu vermeiden – auf die dann noch ein Anpassstück aus Kunststoff gesteckt worden war. Zwar war das Kunststoffteil beim Brand geschmolzen und verkohlt, doch ein gleiches aus Polypropylen gefertigtes Objekt wurde geprüft und daran ein Widerstand von mehr als 100 Teraohm ermittelt, es war also nichtleitend.

Mithin war die metallene Stutzenverlängerung gegen Erde isoliert. Nach BetrSichV/TRBS 2153 zählt Toluol zu den Stoffen mit niedriger Leitfähigkeit und kann beim Fließen gefährliche Aufladungen herbeiführen. Erfahrungsgemäß fließt Toluol beim Strömen durch eine metallene Leitung negativ geladen heraus und hinterlässt eine positive Gegenladung auf dem Rohr.

Weil die Stutzenverlängerung nicht geerdet war, konnte diese Ladung nicht abgeleitet werden und war somit imstande, ein ent-

sprechend hohes Potenzial von mehreren Kilovolt herbeizuführen. Das kann Funkenüberschläge zu nahen leitfähigen, geerdeten Teilen auslösen. Die Stutzenverlängerung befand sich nur wenige Millimeter oberhalb vom Rand des geerdeten Fasses, so dass es dort zu Funkenentladungen kommen konnte. Diese nur relativ schwachen Funken waren in der Lage, das dort auftretende explosionsfähige Toluoldampf/Luft-Gemisch zu entzünden. Weil Toluol eines der wenigen Lösemittel ist, das bereits bei Raumtemperatur ein optimal zündfähiges Gemisch bildet, ist ein solcher Zündvorgang als sehr wahrscheinlich anzusehen.

Als Konsequenz aus dem Unfall bleibt festzuhalten, dass (ab-) leitfähige Teile, die elektrostatisch aufgeladen werden können, ständig geerdet sein müssen. Dieser Forderung wird erwiesenermaßen oft nicht nachgekommen, mutmaßlich aus Unkenntnis. Auch scheint die Empfehlung angebracht, eine gemischte Bauweise aus leitenden und nichtleitenden Bauteilen möglichst zu vermeiden, denn sie birgt stets die Gefahr, dass leitfähige Teile gegen Erde isoliert sind. Mitunter kann es sogar sicherer sein, komplexe Anordnungen von nicht allzu großen Abmessungen konsequent aus nichtleitenden Werkstoffen zu gestalten.

Büschelentladung beim Abfüllen von Toluol

An der Oberfläche isolierenden Materials können Büschelentladungen auftreten. Deren Energien reichen bei optimaler Konzentration zwar für eine Entzündung explosionsfähiger Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemische aus, jedoch nicht für die Entzündung von Staub/Luft-Gemischen unter atmosphärischen Bedingungen. Auch hierzu ein Fallbeispiel, das sich vor kurzem so zugetragen hat.

Eine neue Produktionsanlage war fertiggestellt worden. Da es sich um ein großes Projekt handelte, sollte insbesondere ökologischen Ansprüchen weitgehend



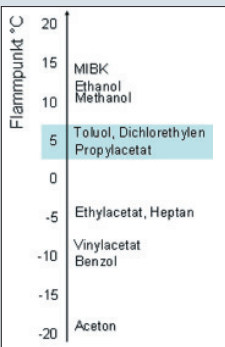
Beim Abfüllen brennbarer Flüssigkeiten ist an Erdung bzw. die Ableitung allfälliger elektrostatischer Aufladung zu denken.

Foto: geis-Archiv

Rechnung getragen werden, wozu unter anderem zählte, verunreinigt anfallendes Toluol nicht mehr zu verbrennen, sondern in einer Destillationsanlage wieder aufzuarbeiten.

Wie so oft bei umfangreichen Projekten waren nicht alle Anlagenteile rechtzeitig fertig geworden. In diesem Fall fehlte bei der Inbetriebnahme noch die Rohrleitung zur entfernt liegenden Aufarbeitungsstation für das verunreinigte Toluol. So entschloss sich der Betrieb, das während der Produktion anfallende Toluol zunächst in einem bereits vorhandenen Tank mit rund 10 Kubikmeter Volumen zwischenzulagern und danach in Stahlfässer abzulassen. Diese würden dann mit einem Lastwagen zur Aufarbeitung befördert, der anschließend die leeren Fässer wieder zurückbringen sollte. Mit den Fassbefüllungen waren betriebsseitig zwei Werker beauftragt, denen es gleichzeitig oblag, dafür zu sorgen, dass der Tank zur Zwi-

Toluol bei Raumtemperatur am gefährlichsten



In beiden Fallstudien betrifft es Toluol als entflammbare Flüssigkeit. Dies lässt sich damit begründen, dass dieses Lösemittel bei Raumtemperatur überproportional an Zündungen infolge elektrostatischer Aufladungen beteiligt ist. Grund dafür ist, dass die minimale Zündenergie (MZE) stets beim **stöchiometrischen Verhältnis** Brennstoff zu Luft von $\lambda = 1$ gegeben ist. Die nebenstehende **Grafik** zeigt für einige Lö-

semittel, wie dieses Verhältnis bei Raumtemperatur vom Flammpunkt abhängt. Bei Raumtemperatur (20 °C) bilden die Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von etwa 5 °C (Toluol, Dichlorethylen, Propylacetat) optimal zündfähige Gemische. Hingegen kommt es bei Flüssigkeiten mit tieferen Flammpunkten zur Bildung „fetter“ Gemische (Brennstoffüberschuss), darüber angesiedelte Flüssigkeiten sind im Gemisch „mager“.

Toluol, Dichlorethylen und Propylacetat bilden ein Gemischverhältnis von $\lambda = 1$ bei etwa 20 °C.

schonlagerung nicht voll wurde. Andernfalls würde dessen Überfüllsicherung ansprechen, die dann automatisch die gesamte Anlage herunterfährt.

Die Verantwortlichen waren sich des Risikos bewusst, das von dieser temporären Behelfseinrichtung ausging und hatten daher auch Maßnahmen gegen mögliche Elektrostatik-Gefahren getroffen. Da Toluol wegen seiner niedrigen elektrischen Leitfähigkeit besonders leicht gefährlich aufgeladen werden kann, waren gegen elektrostatische Zündgefahren folgende Schutzmaßnahmen veranlasst worden:

- ◆ Füllschlauch mit Zapfventil: leitfähig und geerdet
- ◆ Blechfässer: über Rollenbahn geerdet
- ◆ Fußboden: ableitfähig
- ◆ Schutzschuhe: ableitfähig

So erschien die Zündgefahr infolge elektrostatischer Aufladung beherrscht, und die beiden Werker konnten ihre Arbeit beruhigt aufnehmen.

Doch das Verhängnis begann seinen Lauf damit, dass der zum Fasstransport eingesetzte Lastwagen einen Motordefekt bekam. Die für die Fassbefüllung verantwortlichen Werker wurden darüber informiert, dass erst ein anderer Lastwagen geordert werden müsse und es so zu Verzögerungen im Fasstransport kommen würde. Mit fortschreitender Zeit fanden sich die beiden der Situation ausgesetzt, dass sie alle verfügbaren Metallfässer gefüllt hatten, und der Zwischenlagertank langsam aber

stetig voll wurde. Um sich nicht den Vorwurf einzuhandeln, durch mangelnden Eifer die gesamte Anlage zum Stillstand gebracht zu haben – wer komplexe Chemieanlagen kennt, weiß was das bedeutet – suchte der eine Kollege verzweifelt nach weiteren Fässern und fand sie schließlich auch. Doch dies waren Plastikfässer. Sie überlegten kurz und entschlossen sich dann, es einfach auszuprobieren.

Als das erste Fass annähernd voll war, bildete sich dort zu beider Entsetzen eine Stichflamme. Die beiden Werker taten das in diesem Fall noch einzig Richtige: Nach Alarm an die Feuerwehr rannten sie aus dem Gebäude heraus und brachten sich so in Sicherheit.

Indessen setzte eine Verkettung von Ereignissen ein, die zwangsläufig in einer Katastrophe mündeten: Als der mit dem Abfüllen beschäftigte Werker die brennende Zapfpistole zu Boden fallen ließ, hatte sie sich offensichtlich – wie erwartet – selbst geschlossen, weiteres Toluol konnte also nicht nachströmen. Doch infolge der vom brennenden Toluol abgestrahlten Hitze wurde das Plastik-Fass heruntergeschmolzen, und die Flüssigkeit konnte auslaufen. Das führte zu einem sich rasch ausbreitenden Flächenbrand. Schließlich wurde dadurch auch der Abfüllschlauch bis zum Aufplatzen erhitzt und somit der gesamte Toluolinhalt des Lagerbehälters freigesetzt.

Selbst die anrückende Feuerwehr war so beeindruckt von der

Gewalt des Brandes, dass sie sich erfolgreich darauf beschränkte, die benachbarten Gebäude vor einem Übergreifen der Flammen zu schützen. Es ist überflüssig, zu erwähnen, dass die neue Produktionsanlage schließlich als Totschaden abgeschrieben werden musste.

Die beiden unverletzt gebliebenen Werker wurden zum Hergang des Desasters befragt. Als sich dabei herausstellte, dass als letztes Fass vor dem Brand eines aus Polyethylen verwendet worden war, wurde elektrostatische Aufladung als Zündursache für sehr wahrscheinlich angesehen. Unter dem Vorbehalt, dass sich eine elektrostatische Zündung an einem gleichen Plastikfass rekonstruieren ließe, wurde eine Suche nach anderen möglichen Zündquellen zunächst ausgesetzt. Auch der betroffenen Versicherung erschien in Anbetracht des enormen Schadens eine Rekonstruktion der Brandentstehung notwendig.

Die elektrostatische Sichtweise dazu war diese: Toluol wird beim Strömen durch den Abfüllschlauch elektrostatisch aufgeladen, sammelt sich im Plastikfass an und führt dort zu einer hohen Aufladung. Im Gegensatz zu den vorher verwendeten geerdeten Metallfässern wird das von der Ladung ausgehende elektrische Feld nicht von der Fasswandung gebunden, kann sich also frei im Raum ausbreiten. Die einzige Orientierung zur Erde gibt die oben vorhandene, über den leitfähigen Schlauch geerdete Zapfpistole. Nach dort richtet sich das elektrische Feld der aufgeladenen Flüssigkeit aus, wobei die Feldstärke in dem Maße ansteigt, wie sich der Abstand zwischen Flüssigkeit und Zapfpistole verringert. Schließlich wird dort die elektrische Durchbruchfeldstärke der Luft erreicht: Es kommt zu einer Büschelentladung, die fähig ist, ein optimal zündfähiges Toluoldampf/Luft-Gemisch zu entzünden.

Doch auch die Frage nach einer elektrostatischen Aufladung des verunreinigten Toluols war

zu klären. Toluol zählt zwar zu den Flüssigkeiten mit einer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit und kann sich daher auch leicht gefährlich hoch aufladen, doch trifft das auch für die verunreinigte Sorte zu? Eine Kontrollmessung ergab für die hier eingesetzte verunreinigte Qualität eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von 60 Picosiemens pro Meter – das kennzeichnet sie als leicht elektrostatisch aufladbar.

Unfall im Kleinen rekonstruiert

Der im Folgenden geschilderte Versuchsaufbau wurde bewusst funktional gehalten, um ihn für jeden Interessierten anschaulich zu machen. Für die Versuche fand ein Plastikfass gleicher Herkunft und Sorte Verwendung, wie das an dem Brand beteiligte. Um das Brandrisiko zu beherrschen, wurde die Toluolmenge auf 10 Liter (in einem Blecheimer) beschränkt. Die Strömungsgeschwindigkeit konnte mit ei-

ner Handpumpe in weitem Bereich angepasst werden.

An dem Versuch gab es noch eine Besonderheit: Ein dicht neben dem Plastikfass positioniertes AM-Radio sollte nicht dem einsatzbereiten Feuerwehrmann zur kurzweiligen Unterhaltung dienen, sondern hatte seine Aufgabe darin, zündfähige Büschelentladungen ausfindig zu machen. Es ist bekannt, dass von dem für eine Zündung notwendigen Plasma einer elektrostatischen Entladung auch ein hochfrequentes Signal ausgeht, das von einem AM-Radio empfangen werden kann – man kennt dies von Knackgeräuschen im Gerät bei Gewitterblitzen. Allerdings funktioniert das nur noch mit älteren Radios, denn die neueren FM-UKW-Radios verfügen über eine Störsignalunterdrückung.

Nach diesen Vorbereitungen wurde Toluol mit der Handpumpe in das Plastikfass befördert. Hin und wieder kam es da-

bei zu Knackgeräuschen im AM-Radio, offensichtlich immer dann, wenn sich der Flüssigkeitsspiegel dem geerdeten Einfüllrohr annäherte. Zweifellos waren solche Effekte Büschelentladungen zuzuordnen.

Eine Zündung trat jedoch nicht ein. Auch anscheinend saubere Gerätschaften können immer noch so viel an Verunreinigung abgeben, dass dadurch die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit erhöht und somit ihre Aufladbarkeit vermindert wird. Deshalb wurde ein zweiter Versuch mit einer neuen Füllung aus der verunfallten Toluolcharge gestartet. Jetzt kam es spontan zur Zündung, deren Folgen dann der Feuerwehrmann erfolgreich bezwang. Somit konnte nachgewiesen werden, dass es beim Einfüllen von Toluol in ein Plastikfass zu Büschelentladungen kommen kann, die in der Lage sind, Toluoldampf/Luft-Gemische zu entzünden. ■

GGT