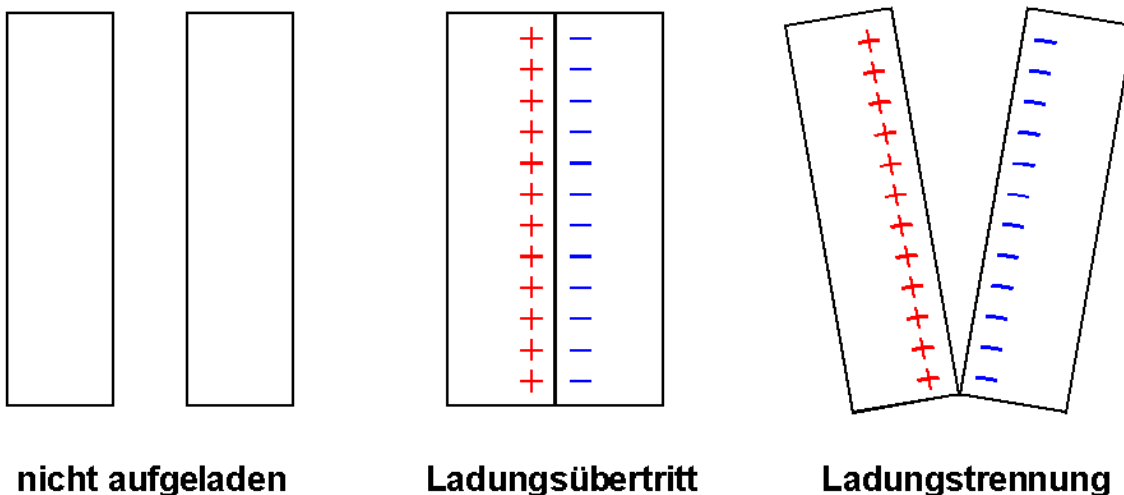


## Gefährdungen infolge Elektrostatik und Schutzmaßnahmen

Dr. Ulrich von Pidoll, 3.73, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, ulrich.v.pidoll@ptb.de

### 1. Physik elektrostatischer Aufladungen

Jeder hat bestimmt schon einmal einen elektrischen Schlag gespürt, als er aus einem Kraftfahrzeug ausgestiegen oder auf einem Teppichfußboden entlang gegangen ist und anschließend einen geerdeten Gegenstand berührt hat. Solche elektrischen Schläge treten auf, wenn als Folge von Reibung unterschiedlicher Materialien (in unseren Beispielen Kleidung/Sitzpolster und Schuhsohle/Teppich) Reibungselektrozität gebildet wird, die sich auf dem menschlichen Körper ansammelt.



Der physikalische Hintergrund hierbei ist folgender: Bringt man zwei unterschiedliche Materialien in engen Kontakt, so treten Elektronen von dem Stoff mit der geringeren Elektronenaustrittsenergie in den Stoff mit der höheren Elektronenaustrittsenergie über. Ist zumindest einer der beiden Stoffe elektrisch isolierend, so können bei einer anschließenden schnellen Trennung der Materialien die Elektronen nicht schnell genug zurückfließen und verbleiben als Überschuss auf dem einen und als Unterschuss auf dem anderen Material. Der Stoff mit dem Elektronenüberschuss wird somit negativ, der Stoff mit dem Elektronenunterschuss positiv elektrostatisch aufgeladen.

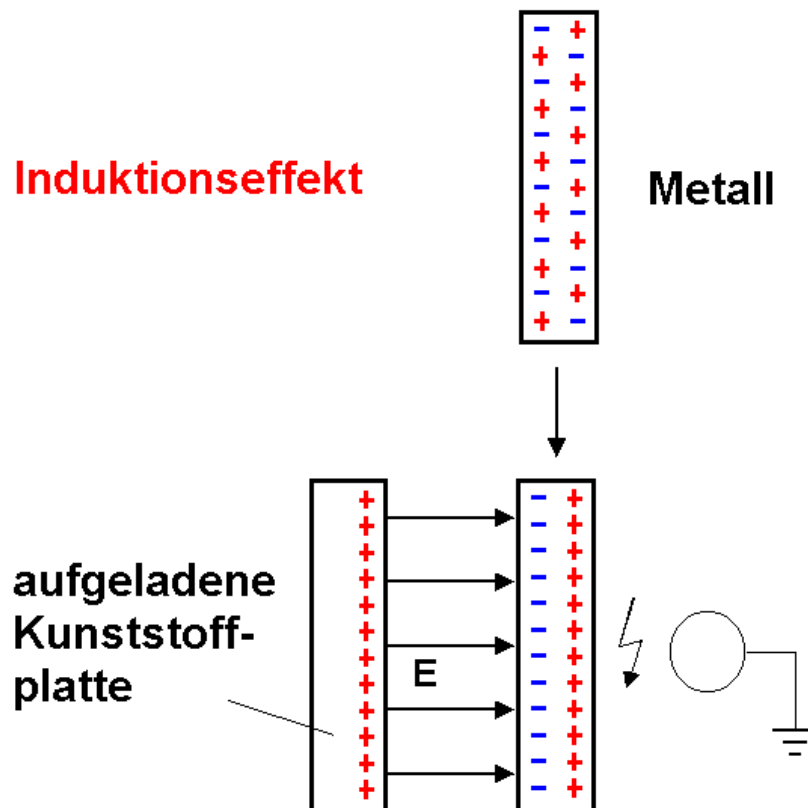
Beispiele für schnelle Kontakt- und Trennungsprozesse sind

- Reibung eines Kunststoffes,
- Abziehen einer Folie von einer Unterlage,
- laufende isolierende Keilriemen,
- Mischen, insbesondere von mehrphasigen Systemen,
- Strömung einer isolierenden Flüssigkeit durch Rohre oder Schläuche,
- Verspritzen oder Versprühen einer Flüssigkeit,
- pneumatische Förderung von Stäuben,
- Ausziehen von isolierenden Kleidungsstücken, insbesondere Pullover,
- Aufstehen einer Person von einem isolierenden Sitz, sowie
- Gehen einer Person auf einem isolierenden Bodenbelag.

Neben dieser Art von elektrostatischer Aufladung, der sogenannten Kontaktaufladung, gibt es auch noch weitere Methoden zur Erzeugung gefährlicher elektrostatischer Aufladungen. Hierzu gehören

- Die Anlagerung von aufgeladenen Teilchen an Oberflächen, z.B. das Aufsprühen von Ladungen von einer auf Hochspannung befindlichen Metallspitze, oder
- die Bildung von Ladungen durch den Influenzeffekt in einem elektrischen Feld.

Bei der Aufladung durch Influenz (auch Induktion genannt) findet durch die Anziehungskraft einer benachbarten Ladung eine Trennung der Ladungen in einem bisher neutralen leitfähigen Körper in der Gestalt statt, dass die Ladungsträger, welche entgegengesetzt wie die aufgeladene Fläche geladen sind, sich so nah wie möglich zur aufgeladenen Fläche anordnen und die entgegengesetzte Spiegelladung sich möglichst weit von ihr entfernt. Hierbei herrscht in dem bisher neutralen Gegenstand nach wie vor die Feldstärke 0, denn die Anzahl seiner Ladungsträger ändert sich ja durch die Influenz nicht.



Als Folge davon tritt eine Entladung auf, wenn man eine geerdete Elektrode einer durch Influenz erzeugten Ladungsansammlung nähert. Entfernt man anschließend auch die ursprüngliche benachbarte Ladung, so werden die bisher im neutralen Körper durch die Influenz gebundenen Gegenladungen wieder frei beweglich, und es ist eine erneute Entladung bei Annäherung einer geerdeten Elektrode an den ursprünglich neutralen Körper möglich.

Zündgefahren durch Influenz bestehen prinzipiell nur bei von Erde isolierten Metallteilen. Aus diesem Grund müssen isolierte Leiter unbedingt vermieden werden. Wie bereits oben festgestellt können Zündgefahren jedoch auch durch versprühte Ladungsträger bewirkt werden, z.B. beim elektrostatischen Lackieren und Beflocken, beim Versprühen von Flüssigkeiten während der Befüllung von Behältern oder bei

Reinigungsprozessen. Die hierzu notwendigen Schutzmassnahmen können den einschlägigen Regelwerken [1-4] entnommen werden.

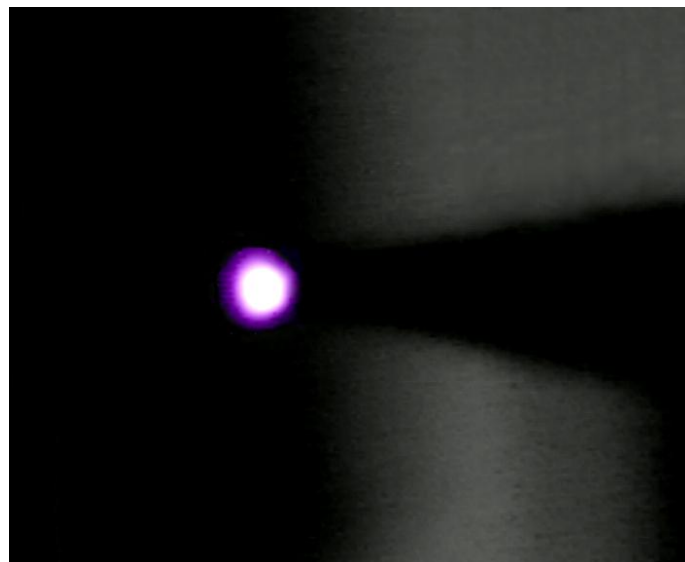
Der Abbau von elektrostatischen Aufladungen ist im Wesentlichen durch den Widerstand des aufgeladenen Mediums zur Erde bestimmt. Während bei kleinen Widerständen im Megohmbereich eine gefährliche elektrostatische Aufladung in der Praxis normalerweise nicht erreicht wird, kann bei Kunststoffen wie Polyethylen und PTFE mit Widerständen von einigen Teraohm eine elektrostatische Aufladung über Wochen bestehen bleiben oder sich über einen längeren Zeitraum ansammeln. Neben dem Widerstand zur Erde spielt übrigens auch die Form des geladenen Gegenstands eine Rolle, da an Spitzen und Kanten überschüssige Ladungen absprühen können.

## 2. Formen von elektrostatischen Entladungen und ihre Auslösung

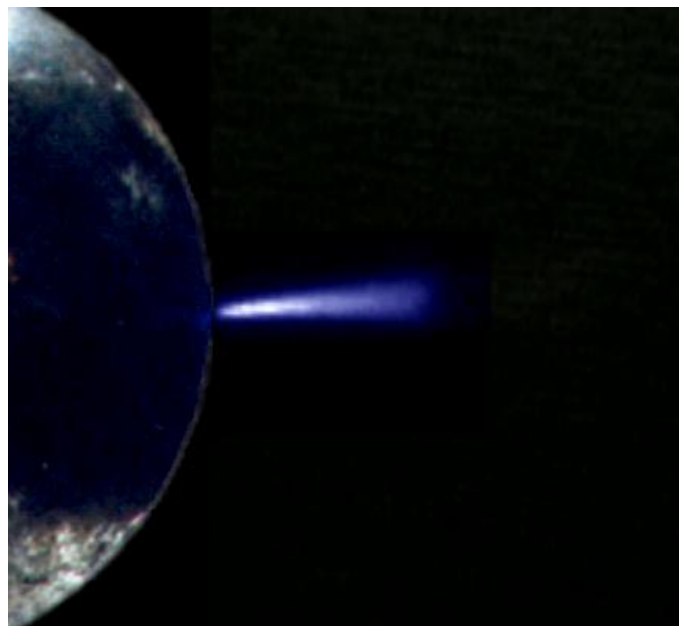
Der energiereiche aufgeladene Zustand ist thermodynamisch instabil. Aufgeladene Stoffe können deshalb ihre zum Teil beträchtlichen Ladungen in Form einer elektrostatischen Entladung wieder ausgleichen. Es stellt sich hierbei die Frage, welche unterschiedlichen elektrostatischen Entladungsformen es gibt und unter welchen Bedingungen sie auftreten können.

Abgesehen von speziellen Entladungsformen wie die Schüttkegelentladung bei geschütteten Pulvern und gewitterblitzähnlichen Entladungen bei aufgeladenen Wolken gibt es die folgenden vier Entladungsformen:

1. Bringt man eine geerdete Metallspitze in ein starkes elektrisches Feld oder legt man an die Spitze eine elektrische Spannung von einigen Kilovolt, so tritt eine schwache Gasentladung in der Umgebung der Spitze auf, bei welcher Ladungsträger in die Umgebung gesprüht werden, die im Dunkeln als schwache Leuchterscheinung wahrgenommen werden können. Bisher wurde eine Zündung explosionsfähiger Atmosphäre durch diese sogenannten *Coronaentladungen* noch nicht beobachtet, sodass das Einbringen von geerdeten Spitzen in ein starkes elektrisches Feld oft als Schutzmassnahme zur Neutralisation von starken Aufladungen durchgeführt wird.



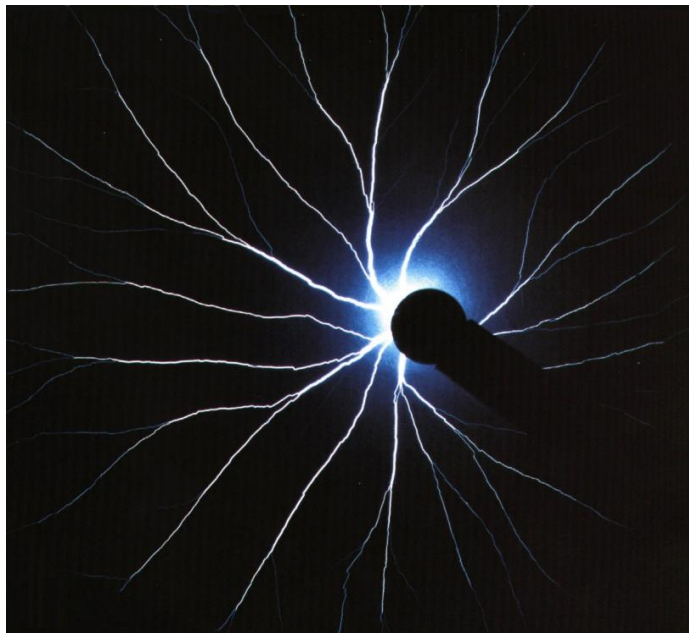
2. Nähert man eine leitfähige Elektrode (z.B. einen Finger) einer aufgeladenen nichtleitfähigen Fläche (z.B. einer Kunststoffoberfläche), so tritt eine Entladung in Form eines hellen Entladekanals auf, welcher von der Elektrode ausgeht und sich nach einigen Millimetern in Richtung auf die nichtleitfähige Fläche büschelförmig verästelt. Diese sogenannten *Büschelentladungen* können Gase und Dämpfe, aber keine Stäube, entzünden sein und müssen deshalb in durch Gase und Dämpfe explosionsgefährdeten Bereichen vermieden werden. Aus diesem Grund wird in den einschlägigen Regelwerken [1-4] bei der Verwendung nichtleitfähiger Materialien in diesen Fällen entweder ein ausreichend niedriger Oberflächenwiderstand (z.B. kleiner  $10^9$  Ohm bei 25 °C und 50 % relativer Luftfeuchte), eine Begrenzung der Fläche (z.B. 100 cm<sup>2</sup> für normale organische Lösemittel bei gelegentlich vorhandener explosionsfähiger Atmosphäre) oder der experimentelle Nachweis der Nichtzündfähigkeit möglicher Büschelentladungen gefordert.



3. Etwa 90 % aller durch elektrostatische Aufladung bedingten Unfälle sind durch sogenannte *Funkenentladungen* von elektrisch isolierten Leitern bedingt. Hierbei tritt durch Annäherung einer leitfähigen Gegenelektrode (z.B. ein Finger) an den aufgeladenen isolierten Leiter (z.B. ein Metallteil) ein Funke auf, der als blauer Funkenkanal wahrnehmbar ist. Die Erdung isolierter leitfähiger Teile ist somit die wichtigste elektrostatische Schutzmaßnahme. Nur sehr kleine leitfähige Bauteile mit einer Kapazität von weniger als 3 pF (z.B. Blechschrauben) müssen nicht geerdet werden. Funkenentladungen gelten als sehr zündfähig, sie können in der Regel sogar Stäube entzünden.



4. Wird eine elektrisch isolierende Fläche auf der einen Seite sehr stark positiv und auf der anderen Seite sehr stark negativ aufgeladen, so können bei Annäherung einer leitfähigen Elektrode oder bei einem elektrischen Durchbruch durch die Fläche sehr starke sogenannte *Gleitstielbüschelentladungen* auftreten, deren Energie für den Menschen als lebensgefährlich angesehen wird. Ein Gleitstielbüschel ist eine hell leuchtende, auf der aufgeladenen isolierenden Fläche stark verästelnde Entladung, welche immer als zündfähig anzusehen ist. Für ihre Vermeidung gibt es zahlreiche Vorschriften in den einschlägigen Normenwerken [1-4] (z.B. maximale Durchschlagfestigkeit durch die isolierende Fläche 4 kV).



### 3. Nachweis von elektrostatischen Aufladungen

Die zunehmende Verwendung von Bauteilen aus Kunststoff hat dazu geführt, dass elektrostatische Aufladungen als Zündquelle für brennbare Gemische eine immer größere Bedeutung bekommen. Statische Elektrizität tritt insbesondere bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % oder weniger auf und kann unter diesen Bedingungen tagelang auf aufgeladenen Materialien erhalten bleiben. Bei relativen Luftfeuchten

von mehr als 65 % ist das Auftreten gefährlicher elektrostatischer Aufladungen eher unwahrscheinlich.

## Vergleich elektrostatische Aufladung mit normalen Energiesystemen

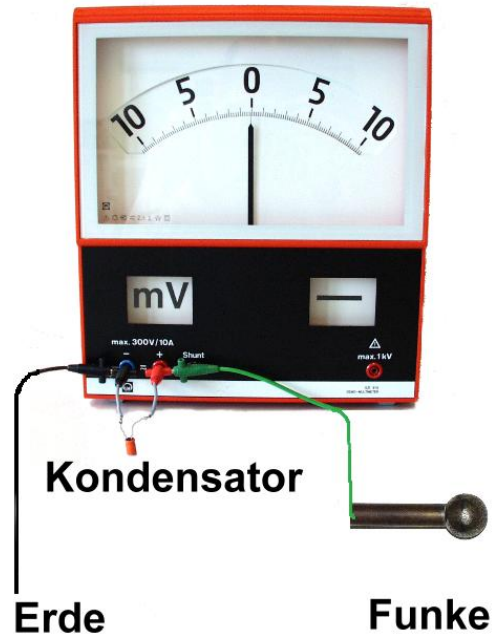
- normale Energiesysteme: 1,5 V bis 400 V, Ströme von einigen A, Leiter im Milliohm-Bereich, Isolatoren im Megohmbereich
- Elektrostatik: 5 kV bis 100 kV, Ströme im nA-Bereich, Leiter im Megohm-Bereich, Isolatoren im Teraohm-Bereich

Bei elektrostatischen Messungen wird leicht vergessen, dass die zu messenden Größen zwar in den Dimensionen mit den üblichen elektrischen Messgrößen übereinstimmen, allerdings in ganz anderen Größenordnungen liegen. Hieraus resultieren oft fehlerhafte Messergebnisse. Beispielsweise sind elektrostatische Widerstände von Nichtmetallen stark spannungsabhängig. Allgemein gilt: Je höher die Messspannung, desto geringer der gemessene Widerstandswert. Ein normales Ohmmeter mit 1,5 V bis 9 V ist deshalb für elektrostatische Messungen ungeeignet. Hierfür sind Messspannungen zwischen 100 V und 1000 V erforderlich.

Der Nachweis elektrostatischer Aufladungen erfolgt üblicherweise über die Detektion des von ihr ausgehenden elektrischen Feldes (z.B. mit einer Feldmühle) oder über die Messung der bei einer provozierten Büschelentladung übertragenen Ladung (z.B. mit einem Coulombmeter). Ein solches Coulombmeter ist nichts anderes als ein hochohmiges Voltmeter, an dessen Eingang ein genügend großer Kondensator geschaltet ist. Ein Pol des Eingangs liegt dabei an Erde. Der andere Teil ist mit einer Kugelelektrode von 20 mm Durchmesser verbunden. Es gibt in den Fachkreisen anerkannte Korrelationen zwischen der übertragenen Ladung in nC und der Funkenenergie in mJ [1-5]. Beispielsweise gilt eine übertragene Ladung von weniger als 60 nC als nicht zündfähig für normal zündwillige organische Lösemittel.



**Feldmühle**



**Coulombmeter**

Da elektrostatische Aufladungen nach einer aufgetretenen Explosion nicht mehr nachweisbar sind, ist nur ein indirekter Nachweis als wahrscheinlichste Zündquelle möglich. Üblicherweise geht man hierzu wie folgt vor:

1. Information über Temperatur und relativer Luftfeuchte zum Zeitpunkt der Explosion
2. Experimenteller Nachweis, dass bei den vor der Explosion abgelaufenen Prozessen gefährliche elektrostatische Aufladungen bei den festgestellten klimatischen Bedingungen möglich sind. Hierzu wird die Zündquelle nachgestellt, indem die übertragene Ladung einer provozierten Entladung unter Unfallbedingungen mit einem Handcoulombmeter bestimmt und ihre Zündwirksamkeit mit Hilfe bekannter Grenzwerte aus Literatur und Normen [1-5] bewertet wird.
3. Andere Zündquellen werden ausgeschlossen.

#### **4. Aufklärung elektrostatisch bedingter Unfälle**

Die folgenden Unfälle haben sich tatsächlich so ereignet und wurden vor kurzem vor Gericht verhandelt.

##### **4.1 Erster Unfall**

Am 6.11.2002 ereignete sich um 10:45 Uhr in Neunkirchen eine Explosion eines verschlossenen, mit Spraydosen gefüllten nicht elektrostatisch geschützten Kunststofffasses in einer auf 20 °C beheizten Montagehalle. Ein Mitarbeiter, welcher an das Fass getreten war und an diesem 8 Sekunden hantierte (Videoaufzeichnung), verstarb bei dieser Explosion, konnte also nicht mehr zum genauen Unfallhergang ge-

fragt werden. Kann diese Explosion durch elektrostatische Aufladung ausgelöst worden sein?

Keine Explosion ohne brennbare Atmosphäre. Aus dieser Tatsache folgt, dass das explodierte Fass zwangsläufig mit explosionsfähiger Atmosphäre gefüllt war, die ohne Zweifel aus einer oder mehreren undichten Spraydosen ausgetreten ist. Dies ist auch bemerkt worden, da kurz zuvor zur Druckentlastung des aufgeblähten Fasses ein Loch in den Deckel gebohrt wurde, bevor das Fass weitergegeben wurde.

Zur Beurteilung, ob elektrostatische Aufladungen überhaupt in Frage kommen, empfiehlt es sich, die zur Unfallzeit am Unfallort vorliegenden klimatischen Bedingungen z.B. von [www.wunderground.com/history](http://www.wunderground.com/history) abzufragen. Diese Abfrage ergab für den 6.11.2002 um 10:45 Uhr in Neunkirchen einen Taupunkt von höchstens 5 °C, d.h. gemäß dem Feuchterechner auf [www.wettermail.de/wetter/feuchte.html](http://www.wettermail.de/wetter/feuchte.html) eine relative Luftfeuchte in der Montagehalle von höchstens 37 %. Damit sind elektrostatische Aufladungen als Zündquelle grundsätzlich möglich.

Experimentelle Nachstellungen des Unfalls ergaben, dass es bei 30 % relativer Luftfeuchte lediglich durch Abreißen eines auf der Außenseite eines Kunststofffasses aufgeklebten Aufklebers möglich ist, zündwirksame elektrostatische Entladungen von der Innenseite des Fasses zu den Sprühdosen zu erzeugen. Tatsächlich wurden daraufhin auf den Fotos vom Unfallort vor dem explodierten Fass zwei abgerissene Gefahrgutaufkleber gefunden, die bisher nicht beachtet wurden. Der Unfallhergang erscheint daher plausibel aufgeklärt.

## **4.2 Zweiter Unfall**

Am 15.2.1999 ereignete sich in Frankenhain in einer Autowerkstatt eine Explosion eines Kraftstofftanks, als dieser gerade ausgebaut werden sollte. Laut seiner eigenen Aussage hatte sich der Monteur den Pullover ausgezogen und war dann wieder unter das auf 2 m Höhe hochgebockte Fahrzeug getreten, als plötzlich eine Kraftstoffleitung in seiner Nähe leck wurde und Kraftstoff heraustropfte, der sich entzündete und den Tank von der Unterseite befeuerte. Er rannte ins Freie – das Einfahrtstor der Werkstatt stand offen –, während das Auto und die Werkstatt abbrannten. Er sei unschuldig - es war elektrostatische Aufladung, behauptete er bei der polizeilichen Vernehmung. Hatte er Recht?

Die Wetterrecherche ergab, dass am 15.2.1999 in Frankenhain eine Temperatur von -7 °C vorlag. Das Innere der Werkstatt war jedoch mit einem Propangasbrenner auf etwa 15 °C beheizt. Um eine Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wassers zu verhindern, war das Werkstatttor kurzzeitig geöffnet worden. Versuche ergaben, dass unter diesen Bedingungen im Werkstattinneren etwa 15 °C bei einer relativen Luftfeuchte von deutlich mehr als 60 % zu erwarten sind. Unbeteiligte Zeugen sprachen außerdem von großen Wasserpfützen auf dem Boden durch abgetaute Schneeresten von den reparierten Fahrzeugen. Unter diesen Bedingungen erscheint die Zündquelle elektrostatische Aufladungen nicht wahrscheinlich.

Weitere Versuche schlossen die Zündquelle Gasbrenner definitiv aus, da dieser zu weit entfernt war, um Dämpfe des Kraftstoffs von etwa 0 °C Temperatur unmittelbar nach dem Heraustropfen zu entzünden.

Beim Beobachten eines Tankausbaus in einer anderen Autowerkstatt fiel auf, dass die Monteure zwecks Arbeitserleichterung die Wagenunterseite mit einer geeigneten Lampe beleuchteten. Beim Betrachten der Unfallfotos fielen dann Reste eines verkohlten Stromkabels auf, das unter dem Auto endete. Es gehörte offensichtlich zu einer Leuchte, mit welcher die Unterseite des Wagens beim Tankausbau angestrahlt wurde.

Im Kreuzverhör gab der Monteur dann zu, dass er wegen einer defekten Kraftstoffuhr im Auto den Kraftstoffstand im Tank unterschätzte, und dass beim Lösen der Kraftstoffleitungen eine Menge Kraftstoff auf die heiße, nicht explosionsgeschützte Halogenleuchte getropft war. Auch diese Unfallrekonstruktion erwies sich somit als plausibel.

## **5. Allgemeines Vorgehensschema bei der Prüfung von Produkten auf elektrostatische Sicherheit**

Entladungen, die man körperlich spüren kann, weisen Energien von über 0,3 mJ auf und können somit die meisten organischen Lösemittel- und Benzindämpfe entzünden [6]. Gefährliche elektrostatische Aufladungen müssen deshalb in explosionsgefährdeten Bereichen, bei denen mit der Anwesenheit von brennbaren Gasen, Dämpfen oder Stäuben gerechnet werden muss, durch Schutzmaßnahmen vermieden werden.

Relativ einfach ist die sicherheitstechnische Beurteilung von Produkten für den Einsatz in Zone 2, d.h. für explosionsgefährdete Bereiche, in denen zündfähige Atmosphäre nur selten und dann auch nur kurzzeitig auftritt. Ein solcher Bereich ist z.B. ein Fasslager, in welchem organische Lösemittel nur gelagert aber nicht umgefüllt werden. Für Produkte, die in diesem Bereich eingesetzt werden sollen, wird nur gefordert, dass zündwirksame Entladungen bei Normalbetrieb nicht auftreten. Diese Beurteilung kann in der Regel vom Hersteller selbst durchgeführt werden.

Schwieriger ist die Begutachtung für explosionsgefährdete Bereiche der Zonen 0 und 1, in denen zündfähige Atmosphäre häufig oder langfristig (Zone 0) bzw. gelegentlich (Zone 1) vorliegt. Hier darf ein Produkt auch bei solchen Fehlerzuständen, die üblicherweise zu erwarten sind (Zone 1) bzw. selbst bei seltenen Betriebsstörungen oder Fehlerzuständen (Zone 0) nicht zur Zündquelle werden. Zur Beurteilung eines Produkts bezüglich dieser Anforderungen hat sich der folgende Ablaufplan in der Praxis bewährt:

1) Sind elektrisch leitfähige Teile vorhanden, deren Kapazität den zulässigen Grenzwert überschreitet (3 pF bzw. 10 pF, je nach Einsatzgebiet, siehe [1], Abschnitt 11.3.5) und deren Widerstand gegen Erde mehr als 1 M $\Omega$  beträgt (siehe [1], Abschnitt 11.3.5; in bestimmten Fällen sind auch 100 M $\Omega$  noch akzeptabel)?

Ja: Die Prüfung ist nicht bestanden.

Nein: Weiter mit 2).

2) Werden isolierende Materialien eingesetzt, die den zulässigen Grenzwert für den Oberflächenwiderstand überschreiten ( $10^{11} \Omega$  bei < 30 % relativer Luftfeuchte, zur Not  $10^9 \Omega$  bei 50 % relativer Luftfeuchte, siehe [1], Abschnitt 4.2)?

Ja: Weiter mit 3).

Nein: Die Prüfung ist bestanden.

3) Überschreitet die vorhandene projizierte Fläche an isolierenden Materialien den maximal zulässigen Grenzwert (je nach Zone und Brennstoff 4 cm<sup>2</sup> bis 100 cm<sup>2</sup>, siehe [1], Abschnitt 4.4.3)?

Ja: Weiter mit 4).

Nein: Die Prüfung ist bestanden.

4) Ist durch eine Messung, z.B. der maximalen übertragenen Ladung, unter den kritischsten in der Praxis möglichen Bedingungen (in der Regel also im Trockenklima) nachweisbar, dass die von dem Produkt ausgehende Gefahr nicht größer ist als die von einem zulässigen Produkt?

Ja: Die Prüfung ist bestanden.

Nein: Weiter mit 5).

5) Es sind die Randbedingungen zu formulieren, unter denen ein sicherer Betrieb des Produkts möglich ist. Nur wenn diese Randbedingungen im Betrieb leicht einzuhalten sind und wenn, z.B. durch Warnhinweise auf dem Produkt, auf die Einhaltung dieser Randbedingungen hingewiesen wird, gilt das Produkt als ausreichend sicher. Für diese Randbedingungen ist ein strenger Maßstab anzulegen. Keinesfalls darf dieses Kriterium dazu verwendet werden, die Anforderungen hinsichtlich der Vermeidung zündwirksamer elektrostatischer Entladungen herabzusetzen. Sind diese Bedingungen erfüllt?

Ja: Die Prüfung ist bestanden.

Nein: Die Prüfung ist nicht bestanden.

## **6. Schutzmaßnahmen gegen elektrische Funkenentladungen**

Die wichtigste Schutzmaßnahme gegen elektrostatische Aufladungen besteht darin, alle isolierten leitfähigen oder ableitfähigen Teile zu erden ([1], Abschnitt 11.1), da isolierte, d.h. nicht geerdete Leiter in der weit überwiegenden Mehrzahl aller Zündungen von Gasen, Dämpfen und Stäuben durch elektrostatische Entladungen ursächlich beteiligt waren. Zur Vermeidung einer gefährlichen Aufladung müssen somit isolierte Leiter geerdet werden. Unter „Erdung“ ist dabei nicht die elektrotechnische Erdung mit einem Erdungswiderstand in der Größenordnung 1  $\Omega$  notwendig, sondern es ist bereits ein Widerstand in der Größenordnung 1 M $\Omega$  bis 100 M $\Omega$ , je nach Anwendungsfall, ausreichend ([1], Abschnitt 11.3). Nur sehr kleine Gegenstände mit einer Kapazität von höchstens 3 pF, z.B. Blechschrauben, müssen nicht geerdet werden ([1], Abschnitt 11.3.5).

Das Auffinden von isolierten Leitern in Form von isolierten Metallteilen an einem Produkt ist einfach. Schwieriger ist es dagegen, versteckte isolierte Leiter aufzuspüren, z.B. eine Eisschicht, eine Sprühwolke aus Wasser, ein Gehäuse aus leitfähigem Kunststoff oder ein leitfähiger Überzugslack. Streng von diesen isolierten Leitern sind Materialien zu unterscheiden, deren elektrischer Widerstand sich an der obersten Grenze zu den Isolatoren befindet. Diese Materialien können einerseits wegen ihres hohen Oberflächenwiderstands keine Funkenentladungen bewirken, auf der anderen Seite aber auch nicht durch Reibung gefährlich elektrostatisch aufgeladen werden.

Ein weiteres Beispiel für einen versteckten isolierten Leiter sind Bedienpersonen. Der menschliche Körper besteht zum größten Teil aus Salzwasser und ist deshalb in

sicherheitstechnischer Hinsicht wie ein wandelnder Kondensator von etwa 200 pF zu betrachten, sofern er nicht über ableitfähiges Schuhwerk und ableitfähige Fußböden geerdet, d.h. kurzgeschlossen ist. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, den menschlichen Körper aufzuladen (z.B. Aufstehen von einem Polstersitz, Gehvorgänge, Influenz, Ausziehen von Kleidungsstücken usw.). Aus diesem Grund muss in explosionsgefährdeten Bereichen Personenaufladung sicher ausgeschlossen werden.

Auch eine leitfähige Flüssigkeit, die aufgeladen in einen innen isolierten Container strömt und über einen zündwirksamen Funken wieder entladen werden kann, ist in elektrostatischer Hinsicht nichts anderes als ein versteckter isolierter Leiter. Aus diesem Grund müssen Container für brennbare Flüssigkeiten, welche innen nichtleitfähig sind, einen elektrischen Pfad zwischen Flüssigkeit und Erde aufweisen ([1], Abschnitt 5.4.6.4, Punkt f). Dieser Pfad muss, wie auch alle anderen Erdverbindungen, zuverlässig, dauerhaft und korrosionsbeständig sein ([1], Abschnitt 11.2), also z.B. über verschraubte, gelötete oder geschweißte Verbindungen erfolgen.

Abgesehen von Schrauben und anderen Kleinteilen müssen alle Metallteile von Produkten, welche in explosionsgefährdeten Bereichen aufgestellt werden, elektrisch miteinander verbunden werden und - sofern keine permanente Erdleitung angeschlossen ist - über leitfähige oder zumindest ableitfähige Füße Kontakt mit einem ableitfähigen Fußboden aufweisen.

Da man aus Erfahrung weiß, dass Fußböden in explosionsgefährdeten Bereichen nicht immer die vorgeschriebene Ableitfähigkeit sicherstellen, müssen ortsbewegliche Metallgefäße (z.B. Container, Fässer und Trommeln) beim Befüllen oder Entleeren in explosionsgefährdeten Bereichen zusätzlich über ein angeklebtes Erdungskabel geerdet werden ([1], Abschnitt 11.3.1.2).

## **7. Schutzmaßnahmen gegen Büschelentladungen**

Aufgeladene Kunststoffoberflächen können ihre Ladung in Form von so genannten Büschelentladungen zu einer Gegenelektrode (z.B. ein menschlicher Finger) wieder abgeben. Ist die Kunststofffläche genügend groß und genügend hoch aufgeladen, können diese Büschelentladungen zündwirksam für brennbare Gase und Dämpfe werden. Zur Vermeidung von zündwirksamen Büschelentladungen sind folgende Maßnahmen denkbar:

- a) Verwendung nahezu isolierender oder geerdeter leitfähiger/ableitfähiger Kunststoffe, oder
- b) Begrenzung der aufladbaren Fläche auf ein sicheres Maß, oder
- c) Beschichten von isolierenden Kunststoffflächen mit ableitfähigen oder geerdeten leitfähigen langzeitbeständigen Materialien, oder
- d) Beschichten isolierter Kunststoffflächen mit nicht aufladbaren langzeitbeständigen Materialien, oder
- e) Hinterlegen von dünnen Kunststoffflächen mit einer geerdeten Metallplatte oder einem Gitter (nur zulässig, wenn starke Aufladungen, die zu Gleitstielbüschelentladungen führen könnten, ausgeschlossen sind), oder
- f) grobe Strukturierung von Kunststoffflächen zur Begrenzung zusammenhängender aufladbarer Flächen (Maßnahme ist nicht ausreichend bei den Explosionsgruppen IIB und IIC gemäß DIN IEC 60079-11 [7]), oder

- g) Ausschluss von ladungserzeugenden Mechanismen, oder
- h) Ausschluss von funkenauslösenden Elektroden.

Nur für die Maßnahmen a) bis e) gibt es harmonisierte europäische Anforderungen und Prüfvorschriften [1-4]. Die Maßnahme f) muss experimentell untersucht und beurteilt werden [5]. Die Maßnahmen g) und h) sind teilweise betrieblicher Art und stellen keine direkten Anforderungen an die Beschaffenheit des Produktes.

Zu a): Es gibt im Handel eine Vielzahl leitfähiger oder ableitfähiger Kunststoffe bis hin zu leitfähigem PTFE: als Plattenmaterial, als Granulat zum Pressen bzw. Spritzen oder Blasen, in flüssiger Form zum Beschichten und als Spray. Die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit durch Russzusatz führt jedoch in der Regel zu geringerer mechanischer Festigkeit, die bei der Auslegung des Produkts zu berücksichtigen ist. Ferner können die chemischen Eigenschaften des Stoffes (z.B. Abgabe fremder Ionen) verändert werden. Als Alternative hierzu hat die chemische Industrie inhärent leitfähige Kunststoffgranulate entwickelt, welche in kleinen Mengen unter das bisherige Kunststoffgranulat gemischt werden und die mechanischen Eigenschaften des Produkts nicht verschlechtern. Da diese Granulate teurer sind als das normale Granulat, produziert man oft in der Koextrusionstechnik. Hierbei wird das normale Standardmaterial mit antistatischem Material beschichtet. Somit ist es eigentlich immer möglich, nichtleitfähige Materialien durch ableitfähige oder leitfähige Materialien zu ersetzen.

Zu b): Die maximal zulässigen Flächen können dem Cenelec Report TR50404:2003, Abschnitt 4.4, entnommen werden [1]. Es ist jedoch nicht immer möglich, die aufladbaren Flächen auf die vorgeschriebenen Werte zu begrenzen.

Zu c): Es gibt im Handel eine Vielzahl von leitfähigen Beschichtungsmaterialien: Vom leitfähigen Lack über Graphitspray bis hin zu leitfähiger Zinkstaubfarbe. Dasselbe gilt für ableitfähige Beschichtungsmaterialien (z.B. für Gehäuse und Leckschutzauskleidungen). Ein Sonderfall ist eine Ledertasche für Messgeräte und Handys für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen. In der Regel ist es möglich, durch die Umhüllung des Geräts mit einer solchen, nicht aufladbaren Tasche die nicht bedeckten aufladbaren Restflächen so gering zu halten, dass der Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen möglich ist.

Zu d): Durch Aufkleben von Aluminiumfolie, welche in der Regel X-förmig über die zu große Kunststofffläche geklebt und an einer geerdeten Stelle untergeklemmt wird, sowie durch Aufkleben von Papier wird oft ein ausreichender Schutz vor gefährlichen elektrostatischen Aufladungen erzielt, der immer experimentell zu belegen ist. Bei Papieraufklebern und Aluminiumfolie muss außerdem nachgewiesen sein, dass diese nicht durch Feuchtigkeit oder Kälteeinwirkung zerstört werden oder sich unter diesen Bedingungen von der zu schützenden Fläche ablösen können. Bei der Aluminiumfolie muss zusätzlich geprüft werden, ob ein sicherer Kontakt zur geerdeten Umhüllung besteht.

Zu e): Diese Bauform wird insbesondere bei elektrostatisch geschützten Behältern für brennbare Flüssigkeiten eingesetzt. Man unterscheidet dabei zwischen vollflächiger Hinterlegung aus Blech, leitfähigem Karton oder leitfähiger Folie und der Hinterlegung mit einem leitfähigen Netz aus Metall, leitfähigem Kunststoff oder leitfähigem Textilgewebe.

Große Behälter, die auf der Außenseite nur mit einem ableitfähigen Material umgeben sind (z.B. normale Pappe), sind nicht ausreichend elektrostatisch sicher, da durch diese Maßnahme zwar Entladungen von der Behälteraußenseite, nicht aber Büschelentladungen von der Behälterinnenseite ausreichend sicher ausgeschlossen sind. Hierzu bedarf es der ladungsbindenden Wirkung von geerdeten leitfähigen Flächen oder engmaschigen Netzen. Die ladungsbindende Wirkung ist dabei umso größer, je geringer der Abstand zwischen leitfähiger geerdeter äußerer Schutzhülle und Behälterinnenwand und je kleiner die Maschenweite der Schutzhülle ist.

Für brennbare Stoffe der Explosionsgruppe IIA nach DIN IEC 60079-11 [7] ist eine von den Gittermaschen eingeschlossene Fläche von maximal 100 cm<sup>2</sup> unbedenklich [1-5]. Bei Gittermaschen mit der maximal zulässigen Maschenfläche darf ein Abstand von 1 cm bis 2 cm zwischen Gitter und Behälterinnenwand nicht überschritten werden.

Zu f): Eine Möglichkeit zur Erhöhung der ungefährlichen Fläche an aufladbaren Kunststoffen besteht darin, die zu große Fläche durch Nuten und Stege in kleinere Flächen aufzuteilen. Eine generelle Regel, wie groß diese unterteilten Flächen bzw. wie hoch oder tief die Nuten und Stege sein müssen, gibt es nicht. Es ist in jedem Fall experimentell z.B. durch Messung der maximalen übertragenen Ladung von provozierten Büschelentladungen im Trockenklima nachzuweisen, dass die erforderliche Sicherheit gegeben ist. Diese Maßnahme ist in der Regel nicht ausreichend bei den Explosionsgruppen IIB und IIC nach DIN IEC 60079-11 [7].

Zu g): In bestimmten Fällen ist es in den Zonen 1 und 2 möglich, ein nicht durch konstruktive Schutzmaßnahmen explosionsgeschütztes Produkt in explosionsgefährdeten Bereichen einzusetzen. In diesem Fall ist durch Festschreibung der Betriebsbedingungen sicherzustellen, dass gefährliche elektrostatische Aufladungen nicht auftreten können. Beispielsweise dürfen Deckenleuchten in explosionsgefährdeten Bereichen durchaus durch Reibung aufladbar sein, sofern sie einen Warnhinweis „Nur mit einem feuchten Lappen reinigen“ auf ihrem Gehäuse besitzen (es ist zu erwarten, dass die transparente Leuchtenabdeckung gelegentlich gereinigt wird).

Ein anderes Beispiel sind Kabelschächte aus Kunststoff und Kunststoffabflussrohre. Diese müssen so verlegt sein, dass eine Aufladung durch betriebliche Vorgänge ausgeschlossen ist. Dies ist z.B. bei der Montage unter der Decke oder senkrecht unter einem Waschbecken, sodass Reibvorgänge mit Kleidung auszuschließen sind, sichergestellt. Ein Warnschild auf dem Produkt ist in diesem Fall nicht erforderlich, da es nicht zu erwarten ist, dass diese Teile gelegentlich gereinigt werden.

Ein weiteres Beispiel ist die Vermeidung von Büschelentladungen an Kunststoffbehältern für brennbare Flüssigkeiten, welche durch eine gefährliche Aufladung der Kunststoffblase während des Formgebungsverfahrens entstehen können. Die Schutzmaßnahme besteht in diesem Fall darin, dass die Behälter beim Leckagetest mit leitfähigem Wasser gefüllt werden. Bei diesem Prozess werden praktisch alle Aufladungen an der Kunststoffinnenseite abgebaut.

Diese Art von Schutzmaßnahme ist in der Regel in Zone 0 nicht ausreichend. Es ist viel mehr noch eine elektrisch leitfähige eng anliegende Außenumhüllung des Behäl-

ters zur Unterdrückung von Büschelentladungen auf der Innenseite notwendig. Eine Ausnahme bilden lediglich kleine permanent geschlossene Vorratsbehälter, in denen elektrostatische Aufladungsvorgänge durch betriebliche Vorgänge mit Sicherheit auszuschließen sind. Hierzu gehören z.B. Schmiermittelreservoirs, bei denen ein Fett oder Öl mittels langsamer Wasserstoffentwicklung aus dem Reservoir im Verlauf von Jahren in Schmiernippel gedrückt wird.

Zu h): Große, aufladbare Kunststoffflächen, bei denen die Zündsicherheit ausschließlich durch den betrieblichen Ausschluss von Elektroden gewährleistet ist, sind praktisch nicht realisierbar. Denn bei hoher elektrostatischer Aufladung können Entladungen auch zwischen unterschiedlich aufgeladenen Teilbereichen der Kunststofffläche auftreten. Beispielsweise kann man bei genügend rascher Strömung von Flüssigkeiten in transparenten oder transluzenten Kunststoffrohren im Dunkeln hellleuchtende Entladungen zwischen unterschiedlich hoch aufgeladenen Teilflächen sehen. Diese Entladungen sind in diesem Fall jedoch ungefährlich, da das Rohr vollständig mit Flüssigkeit gefüllt ist.

Ähnliche Entladungen treten bei den ersten Betankungsvorgängen von Kraftfahrzeugen mit fluorierten Tankeinfüllstutzen auf. Auch in diesem Fall besteht in der Regel keine Explosionsgefahr, da bei üblichen Ottokraftstoffen selbst im Winter und bei hoher Gasrückführrate nur ein nicht zündfähiges, übersättigtes Kraftstoff/Luft-Gemisch vorliegt. Bei Dieselmotoren besteht wegen des Flammpunkts von über 55 °C sowieso keine Zündgefahr, da das Gemisch für eine Zündung zu mager ist.

Zündgefahren können jedoch auftreten, wenn z.B. im Winter zur Verbesserung der Kälteeigenschaften Dieselmotoren mit Ottokraftstoff gemischt wird. Dieses Verfahren war in früheren Jahren mit rein metallenen Tankeinfüllsystemen und mechanischen Kraftstoffgebern gefahrlos durchführbar, ist aber mit den Tanksystemen moderner Fahrzeuge nicht ungefährlich.

## **8. Schutzmaßnahmen gegen Gleitstielbüschelentladungen**

Bei starker Ladungserzeugung z.B. an der Innenseite eines Kunststoffrohres durch eine sehr schnell strömende aufladbare Flüssigkeit, können Gegenladungen aus der Luft auf die Außenseite des Kunststoffrohres sprühen, die dann bipolar aufgeladen wird. Liegen solche bipolar aufgeladenen Kunststoffflächen vor, dann können die sehr zündwirksamen Gleitstielbüschelentladungen auftreten. Hierbei ist noch nicht einmal die Annäherung einer Elektrode erforderlich, denn Gleitstielbüschelentladungen können auch durch einen elektrischen Durchschlag der Kunststoffwand ausgelöst werden.

Gleitstielbüschelentladungen können durch eine der folgenden Maßnahmen verhindert werden ([1], 4.4.9, Punkte a-c):

- (a) Vermeidung nichtleitfähiger Beschichtungen mit einer Dicke von 10 mm oder weniger auf leitfähigen Materialien, oder
- (b) Erniedrigung des elektrischen Oberflächen- oder Durchgangswiderstands der Kunststofffläche auf weniger als  $10^{11} \Omega$  bei 30 % relativer Luftfeuchte, oder
- (c) Verwendung von Kunststoffflächen mit einer elektrischen Durchschlagsfestigkeit von höchstens 4 kV.

Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Gleitstielbüschelentladungen ist die betriebsmäßige Vermeidung permanenter Aufladung durch einen nicht manuellen Prozess (es ist in der Regel nicht möglich, Gleitstielbüschelentladungen durch manuelle Reibung zu erzielen). Diese Schutzmaßnahme wird in der Praxis häufig angewendet. Beispielsweise müssen aus diesem Grund bei großen Behältern für brennbare Flüssigkeiten gemäß [1], Abschnitt 5.4.6.4, schnelle wiederholte Befüllungen vermieden werden. Es ist die Pflicht des Herstellers, auf solche sicherheitsrelevanten Sachverhalte klar und deutlich hinzuweisen.

Die Vermeidung von Büschelentladungen von isolierenden Kunststoffoberflächen durch die Ladungsbindungswirkung eines nahen geerdeten Leiters ist nur bei normalen Bedingungen, nicht jedoch bei starker Ladungserzeugung, ausreichend.

## **9. Schutzmaßnahmen zur Vermeidung gefährlicher betrieblicher Zustände**

In einigen Fällen ist es möglich, die erforderliche Sicherheit durch ergänzende, leicht einzuhaltende betriebliche Maßnahmen zu erzielen. Hierzu gehören

- Verbot des Reinigens von stationären Leuchten in explosionsgefährdeten Bereichen mit einem trockenen Lappen,
- Verbot der schnellen wiederholten Befüllung von Kunststoffbehältern für brennbare Flüssigkeiten,
- Beschränkung der Strömungsgeschwindigkeit bei Befüllungsvorgängen auf einen vorgegebenen Maximalwert,
- Benutzung bestimmter tragbarer Geräte in explosionsgefährdeten Bereichen nur mit ableitfähiger Tasche,
- Verbot des Ladens oder Batteriewechsels in explosionsgefährdeten Bereichen bei Elektrogeräten usw.

Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass diese betrieblichen Maßnahmen leicht einzuhalten sein müssen, durch ein Warnschild oder zumindest einen Warnhinweis in der Bedienungsanleitung angezeigt werden und nicht zur Umgehung und Herabsetzung des von [1-4] geforderten Sicherheitsniveaus führen dürfen.

## **10. Abschließende Bemerkung**

Die hier diskutierten Ausführungen betreffen ausschließlich Gefahren hinsichtlich gefährlicher elektrostatischer Aufladungen. Zu weiteren Anforderungen, z.B. im Transport- und Gefahrgutrecht sowie der VbF, werden keine Aussagen gemacht. Für weitergehende Fragen wird insbesondere auf die Berufsgenossenschaftlichen Regeln BGR132 „Statische Elektrizität“ [2] verwiesen. Elektrostatikprobleme bei Kraftfahrzeugen sind in [9] behandelt. Da elektrostatische Regeln ständiger Veränderung unterworfen sind, können sich in neueren Regelwerken [10] weitere Anforderungen ergeben, die von den in dieser Arbeit zugrunde gelegten abweichen können.

## **11. Literatur**

- [1] Cenelec Report TR50404:2003, Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity.

- [2] Berufsgenossenschaftliche Regeln BGR132 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, 2004, [www.hvbg.de](http://www.hvbg.de) .
- [3] DIN EN 60079-0:2007 Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2004, modifiziert).
- [4] EN 13463-1:2001, Non-electrical equipment for potentially explosive atmospheres. Part 1: Basic principles and general requirements
- [5] U. von Pidoll, E. Brzostek und H.-R. Froechtenigt, Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures. IEEE Transactions on Industry Applications, 40 (2004), 1467-1475.
- [6] E. Brandes, W. Möller, Sicherheitstechnische Kenngrößen, Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase und Dämpfe. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2008.
- [7] IEC 60079-11:2007, Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche - Teil 11: Eigensicherheit "i" (IEC 31G/132/CD:2004).
- [8] Schnier Elektrostatik, Bayernstr. 13, 72768 Reutlingen, [www.schnier-elektrostatik.de](http://www.schnier-elektrostatik.de) .
- [9] U. von Pidoll, Electrostatic ignition hazards in motor cars – occurrence, detection and prevention. Proceedings ESA/IEEE Joint Meeting on Electrostatics, 24-27.6.2003, University of Arkansas, Little Rock, 78-89.
- [10] CLC TR 50404 [1] wird derzeit von IEC TC101 JWG29 nach IEC überführt, auch von [2-4] gibt es bereits neuere erweiterte Entwürfe.