

# Statische Aufladung

## Entstehung - Gefahren - Verhütung

Dr. Bestmann

Alljährlich ereignen sich zahlreiche Brände durch Funken, die von einer statischen Aufladung herrühren. Wer sich mit vorbeugendem Brandschutz beschäftigt, muß sich deshalb die Frage vorlegen: Wie entsteht eine statische Aufladung, wo ist mit ihrem Auftreten zu rechnen und welche Möglichkeiten gibt es, sie zu verhüten?

Ursache für das Zustandekommen statischer Aufladungen sind die Elektronen. Die Elektronen gelten als die kleinsten Elementarteilchen der Materie. Es gilt heute als erwiesen, daß die Atome, die Bausteine unserer Elemente, aus einem Kern bestehen, der sich insbesondere aus Protonen und Neutronen zusammensetzt. Um diesen Atomkern kreisen, wie die Planeten um die Sonne, die Elektronen. (Bild 1.) Ihre Masse beträgt nur rund 1/2000 der Masse des Wasserstoff-

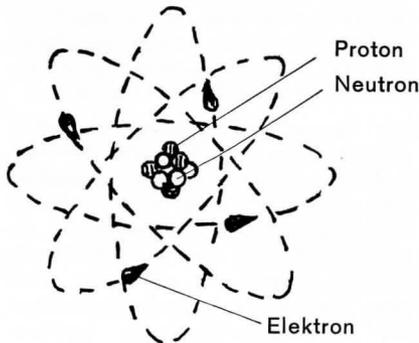


Bild 1. Atommodell.

atoms. Die Zahl der Elektronen richtet sich nach der Anzahl der im Atomkern vorhandenen Protonen. Protonen sind positiv, Elektronen negativ geladen. Die Elektronen sind in dauernder Bewegung. Es gibt Stoffe, in denen ihre Fortbewegung behindert ist, das sind die Nichtleiter. Fließen durch einen Leiter in einer Sekunde  $3,3 \times 10^{18}$  Elektronen, so hat der fließende Strom eine Stärke von einem Ampere (A). Reibt man nun z. B. einen Glasstab mit einem Seidentuch, so werden verhältnismäßig wenige der äußerst zahlreichen Elektronen von dem Seidentuch aufgenommen. Das Glas hat infolgedessen zu wenig, die Seide etwas zuviel Elektronen, weil die Elek-

Dr. Bestmann, Reg.-Gewerbedirektor  
a. D., Hannover

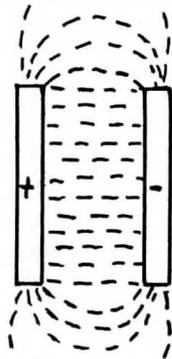


Bild 2. Elektrisches Feld.

tronen hier nicht abwandern können. Den Mangel an Elektronen, der hier beim Glas eingetreten ist, bezeichnet man (aus historischen Gründen) als positive Elektrizität, den Elektronenüberschuß am Seidentuch als negative. Solche elektrischen Aufladungen entstehen also nicht durch Reibung, sondern durch Abtrennung. Wir müssen daher bei allen Vorgängen, bei denen Trennungen fester oder flüssiger Stoffe vorkommen, bei denen also neue Oberflächen oder Berührungsfelder gebildet werden, mit der Entstehung gleicher Mengen positiver und negativer Elektrizität rechnen. Derartige Trennungsvorgänge haben wir in der Praxis z. B. beim Abrollen eines Bandes von einer Rolle, beim Gleiten von Flächen aufeinander, beim Strömen von Flüssigkeiten, beim Aufwirbeln von Staub.

Ist nun einer der abgetrennten Stoffe isoliert, so daß die sich ansammelnde elektrische Ladung nicht abfließen kann, so kann sich die Ladung so verstärken, daß es zum Schluß zu einem Ladungsausgleich durch einen Funken kommt (Durchbruchfeldstärke etwa  $20\,000\text{--}30\,000\text{ V/cm}$ ). Zwischen negativ bzw. positiv aufgeladenen Ladungsträgern besteht ein elektrisches Feld (Bild 2), ähnlich wie bei Magneten. Ein in dieses Feld gebrachter isolierter Leiter wird darin aufgeladen durch die sogenannte Influenz, ohne einen der Ladungsträger zu berühren (Bild 3).

Die Gefahr einer Zündung durch einen Funken infolge elektrischer Aufladung liegt insbesondere dann vor, wenn in dem Raum ein explosionsfähiges Gas- oder Dampf-Luftgemisch oder ein solches Staubgemisch vorhanden ist; dagegen ist die Entzündung fester leicht brennbarer Stoffe nur in Extremfällen

beobachtet worden. Voraussetzung ist, daß der Entladungsfunke eine ausreichende Zündenergie besitzt, denn nicht jeder Funke zündet jedes Gemisch. So beträgt die Mindestzündenergie für Wasserstoff-Luftgemische  $0,019$  Milliwattsekunde, für Propan-Luft  $0,25$ , für Staubluftgemische aber fast das Hundertfache, je nach Staubart  $10$  bis  $80$  Milliwattsekunden. Die Stärke eines durch statische Aufladung entstandenen Funkens hängt vor allem ab von der Spannung, vom Speichervermögen (Kapazität) und von der Form des Ladungsträgers. Sie wird u. a. beeinflusst von der Trennungsgeschwindigkeit beim Ladevorgang und von der Luftfeuchtigkeit. Die Spannung kann bis zu  $100\,000$  Volt (V) und mehr betragen. So treten beim Ausdrücken eines benzingetränkten Wollappens bei ungünstigen Bedingungen mehrere  $1000$  Volt (V) auf, beim Fließen von nicht leitenden Flüssigkeiten in Rohren kann man  $10\,000$  Volt (V) und mehr messen. Mit einer Spezialapparatur wurden beim Aufwirbeln von PVC-Staub bis  $400\,000$  Volt erzielt. Die dabei auftretenden Stromstärken sind allerdings minimal, etwa  $1/100\,000$  Ampere (A).

Funkenentladungen entstehen vornehmlich zwischen Leitern. Vor dem Auftreten von Funkenentladungen können in inhomogenen Feldern Büschelentladungen entstehen, das sind Leuchterscheinungen, die von einem geladenen Körper ausgehen und im Raum enden. Büschelentladungen aus Spitzen sind im allgemeinen nicht zündfähig. Sie können allenfalls Gas- bzw. Dampf-Luftgemische zünden, aber keine Staub-Luftgemische.

Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Aufladungen sind in den Richtlinien zur Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen,

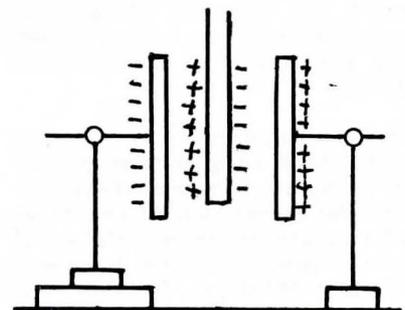


Bild 3. Influenz.

Richtlinie Nr. 4 der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Neufassung von 1971, enthalten. Werden in einem System, in dem durch die beschriebenen Trennungsvorgänge elektrische Aufladungen erfolgen können, die leitenden Teile geerdet, so kann eine Ansammlung von Elektronen an Leitern nicht entstehen, weil über die Erde sogleich ein Ausgleich eintritt. In die Erdung sind nicht nur die im System unmittelbar vorhandenen leitenden Teile einzubeziehen, sondern auch solche, die durch Influenz aufgeladen werden können. Die Erdungsleitungen sollen widerstandsfähig und korrosionsfest sein. Ihre Wirksamkeit soll regelmäßig überprüft werden. Bei ortsveränderlichen Gefäßen und Geräten muß die Erdung durch Kupferlitzen mit Schraubzwingen erfolgen. Ketten sind für diesen Zweck nicht geeignet, weil Schmutzablagerungen an den Kettengliedern zu einer Isolierung führen können.

In gefährdeten Räumen muß der Fußboden leitfähig im Sinne der Elektrostatik sein; d. h. der Widerstand zwischen einer auf den Fußboden aufgesetzten Meßfläche von 20 cm<sup>2</sup> und Erde, der Erdableitwiderstand, darf nicht größer als 10<sup>6</sup> Ohm ( $\Omega$ ) sein. Als leitfähig gelten allgemein Beton, Steinholz, leitfähiger Kunststoff und leitfähiger Gummi, also Stoffe, die durch besondere Zusätze leitfähig gemacht sind. Wird ein solcher Fußbodenbelag geklebt, so muß darauf geachtet werden, daß der Kleber ebenfalls leitfähig ist. Ebenso muß dafür gesorgt werden, daß der Fußboden leitfähig bleibt. Durch Lack- und Ölreste und durch isolierende Fußbodenpflegemittel kann der Erdableitwiderstand unzulässig hoch werden. Teppichböden werden wohl im allgemeinen in explosionsgefährdeten Betriebsräumen nicht benutzt werden. Die Kunststofffasern solcher Bodenbeläge ermöglichen, da sie normalerweise nicht leitend sind, erhebliche Aufladungen z. B. von Personen. Die Ladung pflegt dann bei Berührung geerdeter Einrichtungen wie Türklinken, Installationen usw. auf diese überspringen, was als unangenehm empfunden wird. Es gibt neuerdings auch Teppichböden, bei denen die Aufladungsmöglichkeit auf ein Minimum reduziert ist. Personen können sich durch Berührung von Ladungsträgern (z. B. Kleidung) oder durch Influenz aufladen.

Die Aufladung kann so stark werden, daß bei Annäherung an einen geerdeten Leiter ein Funkenüberschlag erfolgt. Der menschliche Körper ist als Leiter anzusehen; seine Ladung muß deshalb über leitfähiges Schuhwerk und über leitfähigen Fußboden zur Erde abgeleitet werden. Schuhwerk mit üblichen Kunststoff- oder Gummi-

sohlen darf in gefährdeten Anlagen nicht getragen werden. Die Aufladung von Autofahrern, die sich gelegentlich beim Aussteigen und Berühren der Karosserie bemerkbar macht, entsteht meistens durch das Reiben der Kleidung auf den Kunststoffsitzebeugen.

Von nichtleitenden Stoffen kann auf die normale Weise die Ladung nicht durch Erdung abgeleitet werden. Hier kann z. T. durch Zusätze das Material leitfähig gemacht werden, z. B. Gummi durch Zusatz von Azetylenruß oder Benzin durch Alkoholzusatz. Durch Umhüllen von Nichtleitern mit Metallbändern oder durch Auftragen einer antistatischen hygroskopischen Schicht oder durch Aufdampfen einer Metallschicht auf die isolierenden Oberflächen läßt sich auch eine ausreichende Ableitung statischer Aufladungen erreichen.

In Betrieben, in denen die Produktion eine gewisse Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zuläßt, kann durch eine relative Feuchtigkeit von 65 bis 70 % die Entstehung von gefährlichen Aufladungen verhindert werden. Durch die Feuchtigkeit wird der Oberflächenwiderstand von nichtleitenden Körpern im allgemeinen soweit herabgesetzt, daß eine Gefahr nicht besteht. Die Luftfeuchtigkeit kann man durch Klimaanlagen, Sprühdüsen oder besondere Luftbefeuchtungsgeräte erzielen. Sie sollte ständig überwacht werden, denn die erforderliche Wassermenge für immer gleiche Luftfeuchtigkeit ist abhängig von der jeweiligen Temperatur und Feuchtigkeit der angesaugten Außenluft. Wie sich die Luftfeuchtigkeit auf die Stärke der Aufladung von unterschiedlichen Teppichböden auswirkt, zeigt Bild 4.

In Räumen, in denen mit Rücksicht auf die Produktion eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit nicht möglich ist, kann man durch Ionisation der Luft, d. h. durch Erhöhung der Leitfähigkeit der umgebenden Luft gefährliche Ladungen ableiten. Ionen sind Atome, die 1 bis 7 Elektronen zuviel oder zu wenig um ihren Kern haben. Ein aufgeladener Körper zieht solange Ionen entgegengesetzten Vorzeichens an, bis seine Ladung praktisch neutralisiert ist.

Man kann auch sagen, ionisierte Luft wird leitend, weil die Atome Ladungen bekommen, die sie weitergeben. Die Ionisation wird auf verschiedene Weise erreicht. Bringt man an der Entstehungsstelle der Ladung, z. B. an der Ablaufstelle einer Druckwalze, in 10 bis 20 mm Abstand eine kammartige Schiene mit Spitzen an, die geerdet ist, so entstehen an den Spitzen so hohe elektrische Feldstärken, daß die Ladung gewissermaßen abgesaugt wird. Es gibt aber auch Hochspannungsisolatoren, die mit hochgespanntem Wechselstrom arbeiten. Man kann dasselbe auch mit ionisierenden Strahlen erreichen, die beim Durchgang durch die Luft einzelnen Atomen Elektronen wegreißen, die sich an andere Atome anlagern. Bei den beiden letztgenannten Einrichtungen ist Vorsicht geboten wegen der Unfall- bzw. Strahlengefährdung.

Wo wird man in der Praxis mit elektrostatischen Aufladungen rechnen müssen?

### 1. Riementriebe

Die elektrostatische Aufladung erfolgt beim Abheben des Riemens von der Riemenscheibe. Die Höhe der Aufladung ist abhängig vom Material des Riemens und der Riemenscheibe (Leitfähigkeit). Sie wird ferner beeinflusst von der Breite der Berührungsfläche und der Riemengeschwindigkeit, sowie vom Riemenschlupf (Bild 5).

Zur Vermeidung gefährlicher Aufladungen kann man leitendes Riemenmaterial verwenden. Die Riemenscheiben müssen leitend sein; hölzerne Riemenscheiben sind zu entfernen. An schlechtleitenden Riemen sind leitende Riemenschlösser zu vermeiden. Man kann auch Riemen durch Bestreichen mit leitfähigen Lösungen vorübergehend genügend leitfähig machen. Das Verfahren muß aber regelmäßig wiederholt werden. Es muß ferner darauf Rücksicht genommen werden, daß Riemenschutzeinrichtungen aus leitfähigem Material, z. B. Eisengitter, sich durch Influenz aufladen; sie müssen deshalb geerdet werden.

### 2. Strömende Flüssigkeiten

Beim Strömen von nichtleitenden Flüssigkeiten tritt ein ständiger Be-

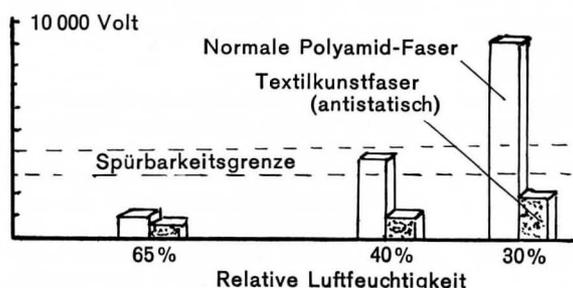


Bild 4.

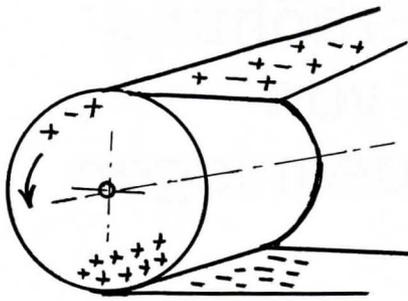


Bild 5.

rührungs- und Trennungsvorgang zwischen Flüssigkeiten und Gefäßwand und zwischen den Flüssigkeitsteilchen untereinander auf. Dadurch laden sich die Flüssigkeit und die Wandungen mit entgegengesetzten Vorzeichen auf. Die Höhe der Aufladung ist neben der Leitfähigkeit von der Viskosität und dem Wassergehalt sowie von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Besonders gefährlich sind wegen der niedrigen erforderlichen Zündenergie Äther und Schwefelkohlenstoff; es folgen die brennbaren Flüssigkeiten, die nicht mit Wasser mischbar sind, im allgemeinen die Flüssigkeiten der Gruppe A der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten\*), also Benzine, Benzol, Kerosine, Petroleum usw. Die brennbaren Flüssigkeiten der Gruppe B, die mit Wasser mischbar sind, also z. B. die Alkohole, sind im allgemeinen genügend leitfähig, so daß mit gefährlichen Aufladungen bei ihnen nicht zu rechnen ist.

Solange nichtleitfähige brennbare Flüssigkeiten in geschlossenen Systemen fließen, ist ihre Aufladung ohne Bedeutung. Beim Austritt aus Leitungen und Apparaturen führt der Ladungsausgleich aber zu Funken und damit zu Verpuffungen und Bränden (Bild 6). Auch bei der Herstellung von Mischungen in Rührwerken, beim Waschen mit brennbaren Flüssigkeiten, beim Aufstreichen von Mischungen mit brennbaren Lösemitteln kommt es zu Aufladungen und Bränden. Gegenmaßnahmen können durch die Verwendung von nicht brennbaren Lösemitteln überflüssig werden.

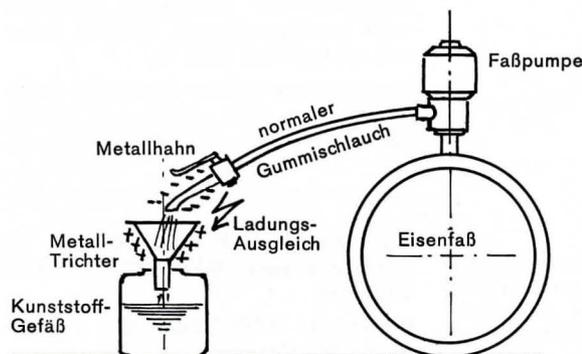


Bild 6.

Sonst ist vor allem für eine einwandfreie Erdung aller Rohrleitungen und Apparaturen zu sorgen. Nicht leitende Leitungsteile sind zu vermeiden bzw. zu überbrücken. Zapfschläuche müssen leitend sein oder sind mit leitfähigen Einlagen zu versehen, an die die leitenden Teile wie Zapfhähne usw. anzuschließen sind. Die Strömungsgeschwindigkeit soll möglichst gering gehalten werden. In den Richtlinien der Berufsgenossenschaft sind dafür die günstigsten Werte in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser angegeben. Waschflüssigkeiten für Woll-, Seiden- und Kunststofffaserstoffe sollen, sofern sie brennbar sind, leitfähig sein. In Betrieben der chemischen Reinigung hat man das Waschbenzin durch Benzinseifen leitfähig gemacht, oder man ist auf nichtbrennbare Lösemittel übergegangen. Im Haushalt ist diese Vorsichtsmaßnahme leider meist unbekannt.

### 3. Staubwolken

Staubwolken können sich aufladen. Die Aufladung erfolgt bei jedem Aufwirbeln von Staubteilchen, also z. B. bei der Förderung, beim Füllen von Bunkern, beim Sandstrahlen, beim Mahlen, beim Abscheiden von Staub in Zyklonen und bei ähnlichen Vorgängen. Dabei kann eine Aufladung der Wolke und eine entgegengesetzte der Behälterwandungen oder anderer Leiter innerhalb der Wolke eintreten. Solche Aufladungen können, wie bereits erwähnt, erhebliche Spannung hervorrufen. Staubwolken können sich auch bipolar aufladen, d. h. die einzelnen Staubteilchen erhalten zunächst Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens, je nach ihrer Größe. Durch Sedimentation erfolgt dann eine Trennung der Ladung, so daß zwei Raumladungsträger mit verschiedenem Potential entstehen. Bei Überschreitung der Durchbruchfeldstärke kommt es dann innerhalb der Wolke zur Funkenentladung wie bei einem Gewitter. Reicht die Gesamtladung hierfür jedoch nicht aus, so können sich an entgegenstehenden Elektroden Büschelentladungen bilden, die aber für die Zündung von Staubwolken im allgemeinen nicht ausreichen. Als Schutzmaßnahme sollten alle mit aufgeladene-

nem Staub in Berührung kommenden Apparateile geerdet werden. Eine Verhütung der Zündung kann, soweit es nach der Art der Produktion durchführbar ist, auch durch eine Anfeuchtung des Staubes oder durch die Verwendung von Inertgas als Trägermedium erzielt werden.

### 4. Strömende Gase

Gase sind im allgemeinen nie ganz frei von kleinen Staubteilchen oder Flüssigkeitströpfchen; diese können ebenfalls eine Aufladung des Gasstrahles wie bei Staubwolken verursachen. Tritt z. B. Azetylen unter hohem Druck aus einer Gasflasche aus, so muß immer mit einer Entzündung des Gasstrahls gerechnet werden; das Gas enthält fast immer Azetontröpfchen, da es in diesem Lösemittel in der Druckgasflasche gelöst ist. Allgemein bekannt sind die Brände beim Füllen von Ballons mit Wasserstoff; hier genügt eine geringe statische Aufladung, da die Mindestzündenergie für Wasserstoff niedrig ist. Die zu treffenden Verhütungsmaßnahmen sind: möglichst geringe Strömungsgeschwindigkeit durch große Rohrquerschnitte, Ableitung von Ladungen durch Erdung aller leitenden Bauteile, die mit dem strömenden Gas in Berührung kommen.

### 5. Aufladungen in der Atmosphäre – Gewitter

Atmosphärische Aufladungen können durch ihre Entladungen, die man üblicherweise als Blitze bezeichnet, zur Zündung von allen brennbaren Gegenständen führen. In der Atmosphäre entstehen durch kosmische oder ultraviolette Strahlung Ionen, also wie erwähnt Atome mit Elektronenüberschuß oder Elektronenmangel; durch die Ionen wird die Luft leitfähig und es entsteht ein ständiger Ladungsausgleich. Wahrscheinlich durch Aufwinde oder Sedimentation wird dieser Ladungsausgleich gestört. Es entstehen Ladungen gegenüber der Erde oder anderen Wolken, die zu Erd- oder Wolkenblitzen führen. Die Spannung von Blitzen kann bis zu schätzungsweise 400 Millionen Volt (V) betragen; als Stromstärke werden 2000 bis 200 000 Ampere (A) angenommen, wobei erfahrungsgemäß 80 % aller Blitze unter 60 000 Ampere (A) liegen. Die plötzlich durch den Ladungsausgleich freiwerdende gewaltige Energiemenge führt zu einer schlagartigen Ausdehnung der Luft. Dies nehmen wir auf der Erde als Donner wahr. Die Brechung der Schallwellen an den Wolken ergibt dann das rollende Geräusch.

\*) Verordnung über die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande (Verordnung über brennbare Flüssigkeiten – VbF) v. 5. 6. 70 (BGBl. I Nr. 54 S. 689) i. d. F. d. Bundesimmissionsschutzgesetzes vom 15. 3. 74 (BGBl. I 1974 Nr. 27 S. 721).