Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 12

Artikel: Zum Problem der Ableitung elektrostatischer Aufladungen fester, staubförmiger und flüssiger Isolierstoffe

Autor: Haase, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915948

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Zum Problem der Ableitung elektrostatischer Aufladungen fester, staubförmiger und flüssiger Isolierstoffe

Von *H. Haase,* Hamburg

621.315.61:621.3.017.142

1. Einleitung

Elektrostatische Aufladungen sind Störungen des Gleichgewichtes zwischen positiven und negativen Ladungen der Grundbausteine der Materie. Ein Körper erscheint nach aussen als elektrisch neutral, wenn sich die Elementarladungen verschiedener Polarität bei ungeordneter, gleichmässiger Verteilung gegenseitig im Gleichgewicht halten und als elektrisch geladen, wenn im ganzen oder örtlich ein Überschuss von Ladungen eines Vorzeichens vorhanden ist.

Nicht neutrale Atome und Moleküle oder sonstige Ladungsträger im molekularen Bereich heissen Ionen, die kleinste, nicht mehr teilbare, elektrische Elementarladung, welche als frei bewegliches Elektrizitätsteilchen vorkommt, ist das negative Elektron. Gibt ein ursprünglich neutraler Körper Elektronen ab, dann entsteht durch Elektronenmangel ein Überschuss von positiven Ladungen, entsprechend entsteht bei Anlagerung von Elektronen ein Überschuss an negativen Ladungen. Der eine Körper erscheint dann als positiv, der andere als negativ geladen. Derartige Ladungstrennungen kommen da vor, wo Kontaktpartner nach inniger Berührung getrennt werden, also zum Beispiel beim Laufen von Folien oder Fäden über Walzen, bei der Zerkleinerung, beim Strömen, Versprühen und Erstarren von Flüssigkeiten und bei Reibungsvorgängen im Inneren elastischer Körper.

Sind beide Kontaktpartner genügend leitfähig, dann findet eine rasche Wiedervereinigung der Ionen zu neutralen Molekülen statt. Ist dagegen mindestens einer der Partner ein Isolierstoff (Nichtleiter), dann bleibt der Ladungsüberschuss nach der Trennung um so länger erhalten, je geringer seine eigene Leitfähigkeit und die seiner Verbindung mit leitfähigen Körpern genügender Grösse ist.

Während das Problem der Verhinderung bzw. der raschen Beseitigung störender und gefährlicher Aufladungen auf Oberflächen heute weitgehend beherrscht wird, bereitet die Ableitung von Ladungen aus dem Inneren von Isolierstoffen noch sehr erhebliche Schwierigkeiten. Im folgenden werden daher die heute bekannten und denkbaren Möglichkeiten und die Grenzen für die Anwendbarkeit und Wirksamkeit der verschiedenen Methoden beschrieben, die zur Bekämpfung räumlich verteilter Ladungen und ihrer Auswirkung dienen.

Zur Auswahl stehen folgende Möglichkeiten und Verfahren:

1. Selbstentladung durch die Eigenleitfähigkeit;
2. Erhöhung der Leitfähigkeit der Isolierstoffe;
3. Ableitung der Aufladungen vor deren Ansammlung;
4. Ableitung von Ladungen aus dem Inneren von Isolierstoffen durch Ionisierung;
5. Abschirmung der Ladungsansammlungen.

2. Selbstentladung durch die Eigenleitfähigkeit

Es gibt keinen Stoff, der elektrisch absolut nichtleitend ist. Bei noch so geringer Leitfähigkeit wird also allmählich ein Ladungsausgleich (also eine Wiedervereinigung getrennter Ladungen) stattfinden. Unter der Voraussetzung, dass die Leitfähigkeit praktisch unabhängig von der Höhe der Aufladung ist, wird die für die Selbstentladung benötigte Zeit nach

$$5\,\tau = \frac{5\,\varepsilon_0\,\varepsilon_r}{\varkappa}$$

berechnet, wobei τ die Zeitkonstante, ε_0 die absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums (auch elektrische Feldkonstante, Verschiebungskonstante oder Influenzkonstante genannt), ε_r die Dielektrizitätskonstante und $\varkappa$ die Leitfähigkeit des Stoffes bedeuten.

Mit $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12}$ As/Vm und $\varkappa$ in $\Omega^{-1}\,m^{-1}$ erhält man die Selbstentladezeit in Sekunden unabhängig von der Geometrie der Anordnung.

In der Mineralölindustrie wird die Leitfähigkeit in cu (conductivity units) gemessen, mit 1 cu $= 1 \cdot 10^{-12}\ \Omega^{-1}\ m^{-1}$.

Beträgt dann die Leitfähigkeit eines Kohlenwasserstoffproduktes beispielswese 10 cu und hat dieses eine Dielektrizitätskonstante von $\varepsilon_r = 2{,}7$, dann errechnet sich die Selbstentladezeit einer zum Beispiel in einen Tank eingefüllten Flüssigkeitsmenge nach deren Beruhigung zu:

$$5\,\tau = \frac{5 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12} \cdot 2{,}7}{10 \cdot 10^{-12}}\ \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}} \cdot \frac{\mathrm{Vm}}{\mathrm{A}} \approx 12\ \mathrm{s}$$

Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten ist allein abhängig von der Anzahl der in ihr vorhandenen Ionen. Ist diese im ungeladenen Zustand so gering, dass durch die von der Aufladung herrührenden Ionen die Anzahl der ursprünglich vorhandenen Ladungsträger merklich geändert wird, dann kann die Selbstentladezeit nicht mehr nach der genannten Beziehung berechnet werden. Je nach Art des Auflademechanismus kann die ursprünglich vorhandene Eigenleitfähigkeit vergrössert oder verkleinert werden, da die Aufladung entweder durch Aufnahme oder durch Abgabe von Ladungsträgern eines Vorzeichens verursacht sein kann. Bei der Auf- und Entladung wird daher die Leitfähigkeit in komplizierter Weise geändert.

Es kann daher nicht mit konstanter Leitfähigkeit gerechnet werden. Es gibt verschiedene Ansätze für die Berechnung der Entladezeit, welche aber nur dann brauchbar sind, wenn der Auflademechanismus im jeweils vorliegenden Einzelfall bekannt ist. Bei der Anwendung der genannten Beziehung kann man in derartigen Fällen weder von der Leitfähigkeit im ungeladenen noch von der im geladenen Zustand ausgehen. Eine weitere Einschränkung erfährt die Gültigkeit der Gleichung dadurch, dass homogenes Medium im Feldraum angenommen wird. Dies ist aber meist nicht der Fall.

Da im ungünstigen Fall mit erheblicher Vergrösserung der Selbstentladezeit gegenüber der nach der angegebenen Beziehung gerechnet werden muss, sollte man diese Beziehung vor allem dann nur mit Vorsicht gebrauchen, wenn sicherheitstechnische Überlegungen, zum Beispiel die Wartezeit für Eingriffe wie Probenehmen und Messungen nach dem Einfüllen, eine Rolle spielen.

Wie sich aus dem Bisherigen ergibt, kann die Selbstentladezeit durch Erhöhung der Eigenleitfähigkeit verkleinert werden. Auf die hiermit im Zusammenhang stehenden Probleme wird unter Abschnitt 3. eingegangen.

3. Erhöhung der Leitfähigkeit der Isolierstoffe

Zweck der Erhöhung der Leitfähigkeit von Isolierstoffen ist es, entweder die Leitfähigkeit der Stoffe selbst oder die ihrer Oberflächen so zu erhöhen, dass möglichst bereits das Entstehen störender oder gefährlicher Aufladungen verhindert und, falls dies nicht möglich ist, angesammelte Ladungsmengen rasch und gefahrlos abgeleitet werden.

Da die Beseitigung eines Ladungsüberschusses im Inneren von Isolierstoffen naturgemäss stets nur durch einen Ausgleich über mindestens eine der Grenzschichten gegen die Umgebung erfolgen kann, hat die Erhöhung der Oberflächenleitfähigkeit auch für die Ableitung von Ladungen aus dem Inneren Bedeutung. Die hierfür geeigneten und in der Praxis üblichen Verfahren sind das Aufsprühen von Antistatika und/oder die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Die Wirksamkeit beider Massnahmen beruht auf der Bildung elektrostatisch leitfähiger Schichten auf der Oberfläche. In Spezialfällen werden auch Metallschichten zum Beispiel durch Verdampfung aufgebracht. Sehr nützlich kann diese Massnahme auch dann sein, wenn beim Aufwickeln von Folien Ladungen mit eingerollt werden oder wenn es gelingt, die Oberflächen der Körner von körnigen oder staubförmigen Gütern bei oder nach der Zerkleinerung mit einem leitfähigen Film so zu überziehen, dass auf diese Weise eine durchgehend leitfähige Verbindung von Korn zu Korn entsteht.

Die Leitfähigkeit der Stoffe selbst erhöht man entweder durch Zusätze oder aber durch Änderung der Stoffstruktur. Beispiele hierfür sind das Leitfähigmachen von Gummi durch kohlenstoffhaltige Beimengungen für Bereifungen, Keilriemen, Transportbänder, Matten und Schuhsohlen und die Herstellung leitfähiger Fussböden aus Asphalt, Kunststoff und keramischen Fliessen durch geeignete Zusätze. Durch Einbau, zum Beispiel Eindiffundieren, von Fremdatomen in Kunststoffe lässt sich deren Leitfähigkeit ebenfalls erhöhen.

Für Flüssigkeiten gibt es eine Reihe von Rezepten für leitfähigkeitserhöhende Zusätze. Für Mineralöle sind antistatische Zusätze entwickelt worden, bei denen Beimengungen von etwa 1 bis 2 g/m³ Flüssigkeit zur ausreichenden Erhöhung der Leitfähigkeit genügen.

An dieser Stelle muss aber darauf hingewiesen werden, dass die genannten Methoden nicht überall eine zuverlässige Dauerlösung darstellen, da in vielen Fällen mit einer zu starken Abnahme der Leitfähigkeit durch Entmischung gerechnet werden muss. Ferner muss geprüft werden, ob durch derartige Zusätze die Eigenschaften der Stoffe nicht etwa in unzulässiger Weise verändert werden.

4. Ableitung der Aufladungen vor deren Ansammlung

Beim Aufwickeln von Folien auf Rollen, beim Stapeln, bei der Befüllung von Behältern mit Flüssigkeiten oder staubförmigen Produkten können gefährlich grosse Ladungsmengen angesammelt werden. Aus Sicherheitsgründen ist es daher oft notwendig, derartige Ladungsansammlungen zu begrenzen. Möglichkeiten hierzu sind die unter Abschnitt 3. bereits genannten Massnahmen zur Erhöhung der Leitfähigkeit, die Ableitung von Oberflächenaufladungen vor deren Ansammlung durch Ionisation der Luft, die Vermeidung grosser Fallhöhen und als letzte, heute vielfach noch notwendige, aber sehr unerwünschte Methode die Reduzierung der Geschwindigkeit.

5. Ableitung von Ladungen aus dem Inneren von Isolierstoffen durch Ionisierung

Eine grundsätzliche Möglichkeit, die Zeit für die Neutralisierung von Überschussladungen im Inneren von Isolierstoffen erheblich zu verkürzen, besteht in der Anwendung ionisierender Zerfallstrahlung, also Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung. Alphastrahlen scheiden für diesen Zweck aus, da diese zum Beispiel bereits durch ein Blatt Papier vollständig absorbiert werden. Die Eindringtiefe von Betastrahlen

beträgt für Karton etwa 1 bis 2 cm, während die Gammastrahlung mehrere Dezimeter in derartige Stoffe eindringt. Umgekehrt proportional zur Reichweite dieser Strahlen ist deren Ionisierungsdichte. Um eine merkliche Ionisierung im Inneren der Isolierstoffe und damit eine ausreichende Erhöhung der Leitfähigkeit zu erzielen, müssten ausserordentlich starke Strahler verwendet werden. Zur Erläuterung möge dienen, dass sich in Luft die räumlichen Ionisierungsdichten von Alpha- zu Beta- zu Gamma-Strahlen etwa wie 10 000 : 100 : 1 verhalten. Dabei reichen selbst relativ starke Alphastrahler nicht zur Beseitigung von Oberflächenaufladungen bei grösseren Geschwindigkeiten aus. Aus Strahlenschutzgründen müssten so umfangreiche Sicherheitsmassnahmen getroffen werden, dass diese Methode praktisch ausscheidet.

Es bleibt zu prüfen, ob Hochspannungsionisatoren, wie diese mit gutem Erfolg zur Beseitigung von Oberflächenladungen verwendet werden, mit Aussicht auf Erfolg für die Neutralisierung von Aufladungen im Inneren von Isolierstoffen eingesetzt werden können.

Die Wirkung derartiger Geräte beruht auf der Ionisation der Luft unter dem Einfluss eines sehr starken elektrischen Feldes zwischen einer meist langgestreckten, drahtförmigen Hochspannungselektrode und einer geerdeten Gegenelektrode, deren Spitzen oder Kanten in kleinem Abstand längs der Hochspannungselektrode angeordnet sind. Die grosse Feldstärke erzeugt an den Spitzen oder Kanten Koronaentladungen, welche ihrerseits die Luft ionisieren. Die Ionen bewirken eine starke Erhöhung der Leitfähigkeit der Luft, mit deren Hilfe Oberflächenladungen abgeleitet werden.

Während bei Magneten Nord- und Südpole stets nur paarweise auftreten, können sich elektrische Ladungen einer Polarität als Überschuss ansammeln. Jede elektrische Ladung versetzt die Umgebung in einen eigentümlichen Zustand, der als elektrisches Feld bezeichnet wird. In diesem Felde herrschen starke elektrische Kräfte, welche bewirken, dass sich positive und negative Ladungen gegenseitig anziehen und gleichnamige Ladungen sich gegenseitig abstossen. Hierdurch ist eine starke Tendenz zur Wiedervereinigung getrennter Ladungen vorhanden. So werden von einer positiven Aufladung auf der Oberfläche eines Stoffes negative Elektronen elektrisch angezogen, so dass ein Ladungsausgleich stattfindet, ebenso vereinigen sich die negativen Überschussladungen auf der Oberfläche eines Stoffes mit den positiven Luftionen zu neutralen Molekülen. Freie Elektronen oder Ionen der Luft vermögen nicht in Isolierstoffe einzudringen, sodass — und zwar völlig unabhängig von der Erzeugungsart dieser Ionen — stets nur eine Oberflächenentladung stattfinden kann.

Keinesfalls reicht das schwache Streufeld auch des stärksten Hochspannungsionisators aus, um das Innere fester oder flüssiger Materie zu ionisieren und auf diese Weise leitfähig zu machen. Ein direkter Einfluss des Streufeldes auf die Ladungsverteilung im Inneren von Isolierstoffen ist erst recht nicht vorhanden. Gegenteilige Behauptungen, wie diese gelegentlich aufgestellt werden, sind falsch und irreführend.

Seit einiger Zeit ist «Strukturentladung» als neues Schlagwort aufgetaucht. Diese Entladungsart soll auf einer angeblichen Tiefenwirkung des Streufeldes von Hochspannungsionisatoren beruhen. Wenn man versucht, der Wortbildung «Strukturentladung» einen Sinn zu geben, dann könnte diese doch wohl nur bedeuten, dass die innere Struktur eines Stoffes durch Ladungsüberschuss gestört ist, und diese Störung durch Beseitigung des Ladungsüberschusses verschwindet.

Eine derartige Strukturveränderung kann dann auftreten, wenn eine Polarisation derart verursacht wird, dass die Elementardipole zum Beispiel beim Erstarren einer Flüssigkeit wie Paraffin oder dgl. unter Einwirkung eines elektrischen Feldes ausgerichtet werden. Dann entsteht ein «Elektret» in ähnlicher Weise wie ein Magnet durch Ausrichtung der Elementarmagnete im Eisen unter Einwirkung eines Magnetfeldes. Ein Elektret besitzt also keine Überschussladungen, bei ihm sind die Dipole, die sonst umgeordnet vorhanden sind, nur in einer Richtung orientiert, so dass das eine Ende als positiver und das andere als negativer Pol so in Erscheinung treten wie der Nord- und Südpol eines Magneten. Mit derartigen Vorgängen haben aber die Aufladungen nichts zu tun, bei denen ein Überschuss von Ladungen eines Vorzeichens durch die genannten Massnahmen neutralisiert werden soll.

6. Abschirmung der Landungsansammlungen

Um Belästigungen und Gefahren durch Entladevorgänge aus Ansammlungen in Rollen eingewickelter Ladungen zu verhindern, kann man die Rollen in eine leitfähige Umhüllung packen oder einfach die äussere Oberfläche durch Einsprühen mit einem Antistatikum leitfähig machen. Die Wirksamkeit der Massnahme kann noch verbessert werden, wenn die Folie auf ein Rohr aus leitfähigem Material als Innenelektrode gewickelt und beide Elektroden verbunden werden. Dann verläuft das von der eingewickelten Ladung ausgehende Feld im wesentlichen zwischen der Innenelektrode und der Umhüllung. Bei Durchführung dieser Massnahme muss aber unbedingt dafür gesorgt werden, dass die Rolle stets ausreichend leitfähig mit der Erde verbunden ist, da bei Unterlassung dieser Massnahme die Entladungen sehr stark und gefährlich werden können. Mit diesen Massnahmen wird im übrigen gleichzeitig eine Verkürzung der Selbstentladezeit erreicht, wie aus den Ausführungen in Abschnitt 2. hervorgeht.

Als Ergebnis der Betrachtungen ist festzustellen, dass die allein Erfolg versprechende Methode zur Verkürzung der Entladezeit oder der Verhinderung von Aufladungen im Inneren von Isolierstoffen die Erhöhung der Eigenleitfähigkeit des Stoffes in Verbindung mit einem geeigneten Feldverlauf ist. Versuche, Überschussladungen aus dem Inneren mit Hilfe eines von aussen wirksamen elektrischen Feldes zu neutralisieren, sind aussichtslos.

Neuerdings ist es gelungen, elektrostatische Aufladungen im Inneren von Flüssigkeiten in Rohrleitungen mit Hilfe spezieller geerdeter Spitzen an der Grenze zwischen der Flüssigkeit und einer 5 cm dicken Schicht aus Isolierstoff an der Innenwandung eines Rohrstückes weitgehend zu neutralisieren bzw. abzuleiten. Über dieses interessante Verfahren wird gesondert berichtet, sobald weitere Erfahrungen vorliegen und einige noch offene Fragen geklärt sind.

Adresse des Autors:
Dr. *Heinz Haase,* Ibsenweg 20, D–2 Hamburg 55, Blankenese.