

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 26

Artikel: Statikelektrizität als Gefahr

Autor: Prinz, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915487>

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: 27.01.2026

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



Statikelektrizität als Gefahr

Von H. Prinz

1. Einleitung

Es hat eine Zeit gegeben, in der die bewunderungswürdigen und erstaunlichen Wirkungen einer Statikelektrizität mit höchster Aufmerksamkeit bedacht worden sind, vornehmlich in Ansehung des Bewusstseins, die verborgenen Kräfte des Naturgeschehens tiefer ergründen zu sollen und darauf ausgerichtete Nützlichkeiten zu erschliessen. Als besonders beachtenswert sind damals ihre spektakulären Effekte angesehen worden, die den Experimentatoren jener Zeit ein hohes Mass an Respekt und Ansehen zugleich einzubringen vermochten. Zu solcherlei Art von Effekten gehörte es, eine Person auf einem Pechkuchen mit Elektrizität zu beladen und ihr wenig später das einverleibte Fluidum als stechende oder brennende Funken wieder zu entlocken. Noch eindrucksvoller musste es gewesen sein, die Wirkungen einer funkenden Elektrizität dergestalt zu erproben, indem die Dämpfe einer leicht flüchtigen Flüssigkeit dazu benutzt wurden, ein elektrisches Feuer zu entzünden. Später ist zu dessen Nützlichkeit die elektrische Pistole hinzugekommen, mit deren Hilfe durch Entzünden brennbarer Luft Korkpfropfen weggeschleudert werden konnten, und dies ganz ohne Pulver.

Das dazugehörige Experimentier-Zeremoniell – sei es zum ernststen Ergründen oder zum belustigenden Spiel – hat sich entweder in dafür zugereichteten Kabinetten abgespielt, wo alle notwendigen Requisiten verfügbar waren oder aber bei Liebhabern und Freunden der Physik unter Nutzung vorhandener Zurüstungen. Bei der Vergnüglichkeit, mit der ein Experimentieren mit Elektrizität damals vonstatten ging, sind Künste solcher Art bisweilen unter der Ägide Hochfürstlicher Durchlauchtigkeiten im Beisein löblicher Damen des Hofstaates vorgestellt worden, die es sich mitunter nicht nehmen liessen, das Ereignis eines Elektrisiertwerdens in spannender Erwartung über sich ergehen zu lassen (Fig. 1). Bei dergestaltiger Unbeschwertheit konnte es nicht verwunderlich sein, dass das elektrische Fluidum als vorzüglich handhabbares Medium angesehen worden ist, ohne sichtbare Gefahr für die Beteiligten. So ist es damals gewesen.

537.2 : 614.80

Heute, rund 200 Jahre später, ist die Statikelektrizität zu einem Agens geworden, das aus der Sicht seiner unerwünschten Wirkungen nicht immer mit der gebotenen Aufmerksamkeit bedacht wird, obgleich die Aufladungseffekte durch die Verarbeitung hochisolierender Kunststoffe in einer Vielfalt technologischer Prozesse häufiger und auch wirkungsvoller geworden sind und zudem immer mehr Menschen von Kunststoff für alle erdenklichen Zwecke umgeben sind. Für diese Verhaltensweise scheint es zwei Gründe zu geben: Ein erster Grund mag der sein, dass die Statikelektrizität ebenso aus der Sicht ihrer erwünschten Effekte nicht gebührend beachtet wird, obwohl sich in dieser Hinsicht eine kaum glaubliche Anwendungstechnik entwickelt hat. Ein zweiter Grund könnte darin zu suchen sein, dass das elektrostatische Feld gegenüber dem elektromagnetischen in seinem gefährdenden Wirkungsbereich zumeist unterschätzt wird, weil seine Energiedichte um einige Zehnerpotenzen tiefer liegt und demzufolge eine mögliche Gefahr von vornherein ausgeschlossen wird. Dabei wird übersehen, dass bei Aufladungseffekten bereits kleine und kleinste Energiemengen genügen, um Explosionen der verschiedensten Art mit katastrophalen Folgen zur Auslösung zu bringen. Dieses unzureichende Einschätzvermögen hat letztlich dazu geführt, dass statische Aufladungen als mögliche Gefahr in einem ingenieurmässigen Systemdenken nur noch ganz selten zu finden sind, wenn überhaupt. So kommt es von Zeit zu Zeit zu Überraschungseffekten in Form von Bränden und Explosionen, sei es in allen möglichen Industrieanlagen (Fig. 2) oder auch bei sonstigen Aktivitäten, wofür das Explosionsunglück in Bitburg, das schon einige Zeit zurückliegt, sowie auch die kurz nacheinander erfolgten Explosionen auf drei Superöltankern typische Beispiele sind. Solche Ereignisse sind dann ein Warnsignal zu neuem Nachdenken.

All dies schien dem Verfasser Grund genug zu sein, einem grösseren Leserkreis die Problematik einer modernen Statikelektrizität aus der Sicht ihrer Gefahr möglichst einprägsam vorzustellen. In diesem Vorgehen war es nützlich,

das umfangreiche Informationsmaterial mit zu Rate zu ziehen, das in Konferenzberichten einer Reihe nationaler und internationaler Tagungen zusammengestellt worden ist, die – soweit es den europäischen Raum anbelangt – in den Jahren 1953, 1967 und 1971 in London, im Jahre 1960 in Grenoble und in den Jahren 1970 und 1973 in Wien und Frankfurt/Main stattgefunden haben. Die mehr auf die Raumfahrt zugeschnittenen Probleme der Statikelektrizität sind 1968 in Miami Beach, 1970 in San Diego und 1972 in Las Vegas [42]¹⁾ behandelt worden und sollen 1975 in Culham erneut zur Diskussion gestellt werden. In experimenteller Hinsicht konnte auf Erfahrungen zurückgegriffen werden, die aus Anlass verschiedener Experimentalvorträge über Statikelektrizität gesammelt werden konnten sowie auch im Rahmen einer Vorlesung, die erstmals im Sommersemester 1974 an der Technischen Universität München gehalten worden ist.

Um die nachfolgenden Betrachtungen besser verständlich zu machen, sollen zunächst einige Erläuterungen vorangestellt werden, in welcher Weise statische Aufladungen zustande kommen und welche Art physikalischer Vorgänge dabei eine Rolle spielt. In technischer Hinsicht interessiert insbesondere, in welcher Größenordnung solche Aufladungen im allgemeinen zu erwarten sind und welche Energiemengen dabei wirksam werden.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Der Aufladevorgang

Für die folgenden Überlegungen werde davon ausgegangen, dass die Oberflächen zweier fester, aber verschiedener Stoffe sich zunächst möglichst gut berühren mögen und dann aber voneinander getrennt werden sollen. Der sich dabei abspielende Aufladevorgang lässt sich gemäss Schema von Fig. 3 in drei Phasen zerlegen, und zwar in eine erste Phase, innerhalb der ein Ladungsaustausch vor sich geht, dann in eine zweite Phase, in der die Ladungen voneinander getrennt werden, und schliesslich in eine dritte Phase, in der ein teilweiser Ladungsausgleich zustande kommt. Je nach Schnelligkeit dieses Ladungsausgleiches können sich die beiden Phasen 2 und 3 zeitlich mehr oder weniger überdecken.

Was zunächst die erste Phase anbelangt, so findet an den Berührungsstellen der beiden Oberflächen ein Hinwegwandern von Elektronen statt, und zwar immer in Richtung desjenigen Stoffes, der die höhere Austrittsarbeit besitzt, wobei unter Austrittsarbeit W jene Energie in eV verstanden wird, die notwendig ist, um ein Elektron mit seiner Elementarladung von $1,602 \cdot 10^{-19}$ C aus der Oberfläche des betreffenden Stoffes in eine als Vakuum gedachte Umgebung herauszulösen. Nachdem im vorliegenden Beispiel $W_2 > W_1$ ist, wird sich die Oberfläche des Stoffes 2 negativ²⁾ aufladen müssen und dementsprechend jene des Stoffes 1 positiv. Damit ist eine Polarisierung in Form einer Doppelschicht



Fig. 1 Expérience d'une femme électrisée [14]

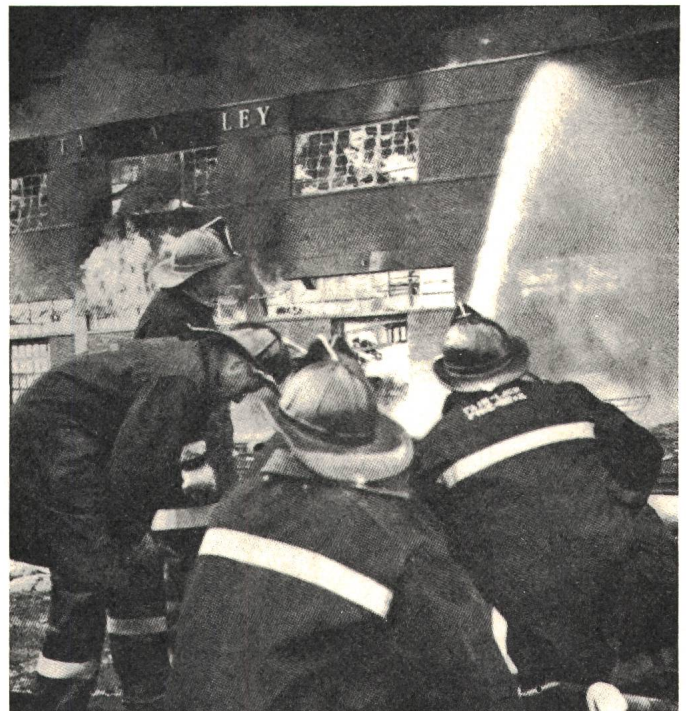


Fig. 2 1967: Staubexplosion in einer Stärkemehlfabrik [28]

zustande gekommen, die bereits auf Vorstellungen eines Hermann Helmholtz aus dem Jahre 1879 zurückgeht [13], und von der angenommen wird, dass an ihr eine Spannung von Bruchteilen von Volt wirksam ist. Für den Vorgang an sich ist nur die Berührung der Oberflächen massgeblich, unab-

²⁾ Am besten merke man sich: Stoffe der «notablen» Austrittsarbeit laden sich negativ auf. Die noch oft zitierte Regel von Alfred Coehn des Jahres 1898 [15], dass sich Stoffe mit der niedrigeren Dielektrizitätskonstanten negativ aufladen, sollte nur mit Vorsicht angewendet werden.

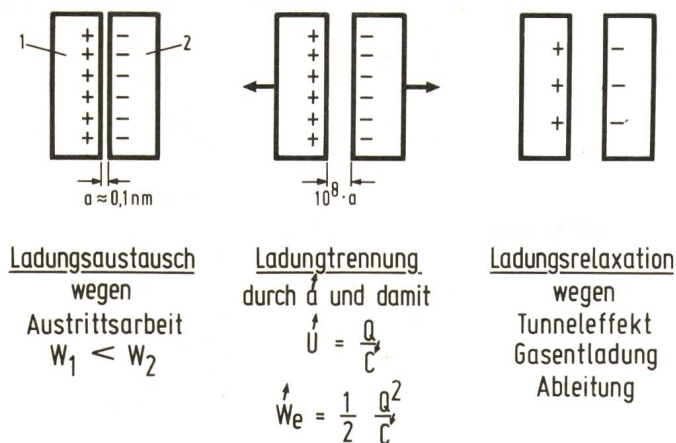


Fig. 3 Der Aufladevorgang

hängig davon, ob die beiden Stoffe in Ruhe sind oder gegeneinander bewegt werden, wie im Falle der klassischen Erzeugung von Elektrizität durch Reibung.

In der zweiten Phase der Ladungstrennung werden die beiden Stoffe voneinander wegbewegt, wodurch es im Hinblick auf die Abstandsvergrößerung um mehrere Zehnerpotenzen zu einer Verkleinerung der Kapazität kommt, was wiederum ein Anheben der Spannung um mehrere Zehnerpotenzen bis in einen kV-Bereich hinein und zugleich aber auch eine Vergrößerung der wirksam werdenden elektrischen Energie bis in einen mWs-Bereich hinein zur Folge haben muss. Diese Vergrößerung der wirksamen Energie, die für die noch zu behandelnden Zünd- und Explosionseffekte eine entscheidende Rolle spielt, ist letztlich ein Äquivalent für jene mechanische Energie, die zum Trennen der beiden Stoffe von aussen her aufgebracht werden muss. Hieraus ergibt sich die wichtige Erkenntnis, dass statische Aufladungen nur dann nach aussen hin wirksam werden können, wenn dem elektrischen Feld mechanische Energie zugeführt wird. Ausserdem zeigt sich deutlich, dass für eine Betrachtung statischer Aufladungsprobleme stets von der als eingepreist anzusehenden Ladung ausgegangen werden muss und die sich einstellende Spannung erst eine Folge dieser Ladung im Zusammenwirken mit der jeweiligen Kapazität sein kann. Dieses Denken in Ladungen unterscheidet sich ganz wesentlich von dem uns selbstverständlich gewordenen Denken in Spannungen, das sich um die Jahrhundertwende aus dem Konzept eines Konstant-Spannung-Systems entwickelt hat.

In der sich anschliessenden dritten Phase vollzieht sich ein mehr oder minder starker Ladungsausgleich als Folge von drei Effekten, nämlich dem Tunneffekt, der durch Ladungsrückfluss einen nicht unerheblichen Anteil von Ladungen abziehen vermag, dann dem Gasentladungseffekt, der infolge des wirksamen elektrischen Feldes einen gewissen Ladungsausgleich erzwingt und nicht zuletzt dem Ableitungseffekt, der je nach Grösse des Isolationswiderstandes ρ sowie der Dielektrizitätskonstanten ϵ über die bekannte Beziehung

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

mit der Relaxationszeitkonstanten $\tau = \rho \cdot \epsilon$ abläuft. Demgemäss würde sich für einen Isolationswiderstand von $2,8 \cdot 10^{12} \Omega \text{ cm}$ und einer Dielektrizitätszahl von 4 eine

Zeitkonstante von etwa einer Sekunde ergeben, so dass nach etwa 5 s die ganze Ladung abgeflossen sein würde. Soll der Ladungsabfluss schneller erfolgen, so bleibt als wirksame Massnahme nur eine Verkleinerung des Isolationswiderstandes, da die Dielektrizitätszahl im allgemeinen als vorgegeben betrachtet werden muss und sich wirksame Änderungen auch nicht erreichen liessen.

Anhand dieser Prinzipalanalyse des Aufladungsvorganges kann nunmehr gut übersehen werden, welche Massnahmen zu seiner Beeinflussung möglich sind. Nachdem es offenkundig bisher nicht gelungen ist, in die erste Phase des Ladungsaustausches wirkungsvoll einzugreifen und die zweite Phase des Ladungstrennens durch die Technologie des vorliegenden Problems bestimmt wird, verbleibt nur, auf die dritte Phase der Ladungsrelaxation Einfluss zu nehmen. Hier bieten sich die folgenden drei Möglichkeiten an: Zum ersten eine Verminderung des Isolationswiderstandes durch Einbringen leitfähiger Komponenten zum Zwecke des Ladungsausgleiches innerhalb eines Systems und durch zusätzliche Erdung zum Zwecke des Ladungsausgleiches gegenüber der Umgebung. Zum zweiten die relative Feuchtigkeit auf etwa 65 % anzuheben und zum dritten vom Prinzip der Ladungsabsaugung Gebrauch zu machen, was durch aktive oder passive Entlader oder durch den Einbau eines Radioaktivstrahlers geschehen kann. Zu den Aktiventladern gehören Koronastrecken, zu den Passiventladern Saugkämme oder Saugspitzen, die hochspannungspotential- oder erdpotentialgebunden eingesetzt werden können. Welche von den gegebenen Möglichkeiten am besten geeignet ist, muss fallweise entschieden werden.

3. Richtwerte

Für die Beurteilung der Frage, mit welchen Richtwerten bei derartigen Aufladungen gerechnet werden muss, sollte von dem praktisch wichtigen Fall ausgegangen werden, dass die Oberfläche eines Metalles mit der Austrittsarbeit W_M sich mit der Oberfläche eines Dielektrikums der Austrittsarbeit W_D kontaktieren möge. Die Grösse und Polarität der sich dabei einstellenden Flächenladungsdichte σ_D des Dielektrikums folgt dann aus der Beziehung:

$$\sigma_D = 1,6 (W_M - W_D) \text{ nC/cm}^2$$

Sie ist also der Differenz der beiden Austrittsarbeiten proportional, die sich aus folgenden Zahlenwerten errechnen lässt:

W_M in eV für reine Metalle nach Hermann/Wagner [20]	W_D in eV nach D. K. Davies [33]
→ Al 4,2	Nylon 4,08
→ Cu 4,45	Polystyrol 4,22
Ag 4,46	Polycarbonat 4,26
→ Fe 4,49	Polyamid 4,36
Ni 4,96	PVC 4,85
Pt 5,36	

In Kombination mit den befürworteten Metallen wird sich Nylon demzufolge stets positiv und PVC stets negativ aufladen müssen. Des weiteren ergibt sich für ein Zusammenwirken von Aluminium und PVC eine Flächenladungsdichte $\sigma_D = 1,6 (4,2 - 4,85) \approx -1 \text{ nC/cm}^2$, die als Richtwert betrachtet werden soll. Die theoretisch maximal mögliche Flächenladungsdichte würde unter der Annahme einer Ho-

mogenfeldstärke von 30 kV/cm bei 2,66 nC/cm² liegen. Gemessen worden sind demgegenüber schon 2,3 nC/cm² [27].

Unter der Annahme einer Oberfläche von 1000 cm² ergeben sich für 1 nC/cm² die folgenden Richtwerte:

σ_D	Q	C	U	W_e
1 nC/cm ²	1 μ F	100 pF	10 kV	5 mWs

Eine genauere Berechnung ist zum derzeitigen Wissensstand wenig sinnvoll, nachdem sich gezeigt hat, dass die Flächenladungsdichte in ausserordentlichem Mass vom Oberflächenzustand, von der umgebenden Feuchtigkeit und vor allem von Spuren von Verunreinigungen abhängig ist. Falls exaktere Werte notwendig sind, verbleibt nur, die Gesamtladung zu messen, wozu eine Vorrichtung nach Fig. 4 nützlich sein kann. Diese besteht aus zwei voneinander isolierten Metallbehältern, deren gegenseitige Kapazität bekannt sein muss. Sobald nun in den inneren Behälter das zu prüfende Objekt eingebracht wird, ladet sich dieser auf, so dass die zwischen Innen- und Aussenbehälter nunmehr anliegende Spannung mit einem Digital-Elektrometer gemessen und hieraus über die bekannte Kapazität die eingebrachte Ladung bestimmt werden kann. Das Instrument ist somit direkt in nC oder μ C einzeichbar.

Nach dieser allgemein gehaltenen Einführung sollen nunmehr einige typische Aufladungseffekte in Form von 11 Themen vorgestellt und anhand von Demonstrationen und nützlichen Erfahrungen erläutert werden, ohne zu unterlassen, auf die eine oder andere historische Begebenheit hinzuweisen.

4.1 Thema 1: Personenaufladung

Im ersten Thema soll der Aufladevorgang einer Person beim Hinweschreiten über einen Teppich näher betrachtet werden. Dieser Effekt muss schon sehr lange bekannt sein, denn *E. C. Magnus* berichtet über eigene Erfahrungen im Winter 1872 wie folgt [16]:



Fig. 4 Messung statischer Aufladungen

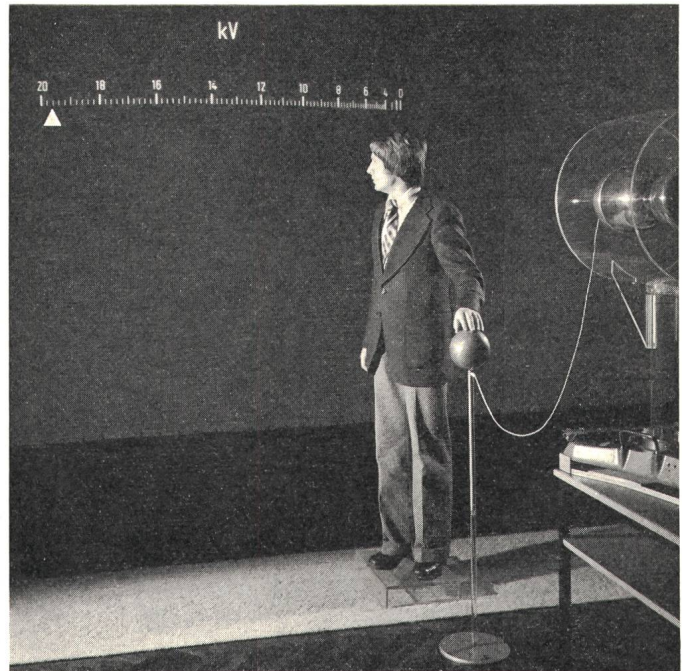


Fig. 5 Personenaufladung

«Nach einigen schleifenden Schritten auf dem Teppich war man elektrisch geladen und ein hörbarer Funke sprang über, wenn man einen Gegenstand oder Menschen im Zimmer berührte, z. B. mit der Fingerspitze die Nase, was besonders empfindlich war. Starke, lange Funken zogen die Heizkörper mit denen man unversehens in Berührung kam. Damals war die Beleuchtung durchweg Gas. Das Gas haben wir oft, mit einem aus dem Finger springenden Funken entzündet, nachdem wir nach schleifenden Schritten auf einen Stuhl stiegen, den man nur mit den Füssen berühren durfte; ein anderer musste den Gashahn öffnen.»

Zur Demonstration eines Aufladeeffektes in etwas moderner Gestaltung kann eine Anordnung nach Fig. 5 dienlich sein, zu der ein Kunststoffteppich sowie ein kleiner Plexiglasschemel zum Sichtbarmachen der Ladungstrennung erforderlich sind. Als Anzeigeeinstrument kann ein elektrostatisches Voltmeter nach Möglichkeit mit Projektionsskala verwendet werden. Sobald sich nun der Experimentierende mit einigen schleifenden Schritten über den Teppich hinwegbewegt und dann den Isolierschemel betritt, stellt sich der Skalenzeiger je nach Höhe der erreichten Aufladung auf eine Spannung ein, die seiner Eigenkapazität entspricht – im demonstrierten Fall auf nahezu 20 kV bei etwa 100 pF, was einer Energie von etwa 20 mWs entspricht. Voraussetzung für ein gutes Gelingen dieses Experimentes ist jedoch, dass die Raumfeuchtigkeit unterhalb von 65 % liegt, da sonst die Ladungen zu schnell abgeleitet werden.

Während sich der Aufladevorgang verhältnismässig langsam vollzieht, indem es bei jedem Schritt zu einem Berühren und Trennen von Schuhsohle und Teppich kommt, läuft der Entladevorgang, der beispielsweise beim zufälligen Berühren eines Wasserhahnes zustande kommen kann, extrem schnell ab, nämlich mit der Zeitkonstanten $\tau = R \cdot C$, wie bei der Entladung eines Impulsgenerators. Wird für $C = 100$ pF und für $R = 1000 \Omega$ als Körperwiderstand gesetzt, dann ergibt sich $\tau = 0,1 \mu$ s, so dass innerhalb von $0,5 \mu$ s der Entladestrom von seinem Anfangswert – im Beispiel von $I = U/R = 20\,000/1000 = 20$ A auf Null abgeklungen ist. Durch den fliessenden Strom kommt es – trotz seiner Kurz-

zeitigkeit – zu einer Reizwirkung, die die betroffene Person als unangenehmen Schlag empfindet. Dies ergibt sich gleichermassen aus der abzuführenden Energie, die im gegenständlichen Beispiel 20 mWs beträgt, wenn bedacht wird, dass die untere Reizbarkeitsgrenze bei etwa 1 mWs liegt, was vergleichsweise jener Energie entspricht, die beim Herunterfallen einer Stecknadel aus 1 m Höhe wirksam wird. Auch die Stechwirkung der fallenden Nadel würde bereits als störender Reiz empfunden werden.

In diesem Zusammenhang mag noch der Hinweis eingefügt werden, dass eine echte Personengefährdung erst bei Energien in der Grösse von 1 Ws erwartet werden kann [45], das ist also der 1000fache Betrag der unteren Reizschwelle. Vergleichsweise liegt das Verhältnis von Gefährdungs- zu Reizschwelle im Falle eines 50periodigen Stromes um zwei Zehnerpotenzen tiefer.

Zu einer Gefahr können sonst harmlose elektrische Schläge dann werden, wenn sie sich auf Gerüsten oder Leitern ereignen, da in diesem Fall mit möglichen Sturzschäden gerechnet werden muss.

Höchste Gefährdung ist zu erwarten, wenn die Ladungsabfuhr mit einer Funkenbildung verbunden ist und sich innerhalb eines Raumes ereignet, in dem leicht entzündbare Gase oder Dämpfe vorhanden sind, so dass es nach Art eines elektrischen Feuers zu einem Brand oder sogar zu einer Explosion kommen kann. Eine eindrucksvolle Demonstration dieses Zündeffektes ist aus Fig. 6 ersichtlich, bei der der Experimentator einen Funken von seinem Zeigefinger auf eine mit Feuerzeugbenzin gefüllte Schale überspringen lässt. In explosionsgefährdeten Räumen muss deshalb Vorsorge getroffen werden, dass eine Selbstaufladung von Personen von vorneherein verhindert wird, wozu die in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) von der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie herausgebrachten Richtlinien [39] das Verlegen von Fussböden mit ausreichend kleinem Ableitwiderstand in Verbindung mit dem Tragen leitfähiger Fussbekleidung fordern.

Nicht unerheblich ist es zu wissen, dass statische Aufladungen der gleichen Grössenordnung ebenso beim Aufstehen von einem Kunststoffstuhl oder beim Ausziehen von Kleidungsstücken erwartet werden müssen, weshalb in explosionsgefährdeten Räumen in dieser Hinsicht höchste Anforderungen zu stellen sind [39].

4.2 Thema 2: Walzenelektrizität

Erheblich stärkere Aufladungen können dergestalt verursacht werden, dass Papier- oder Folienbahnen über zylindrische Walzen hinweglaufen, um bestimmte technologische Effekte zu erzielen.

Erstaunlicherweise ist bereits im Polytechnischen Journal des Jahres 1842 ein Hinweis von der Art zu finden, dass bei der Satinage endlosen Papiers die Elektrizität auf eine merkwürdige Weise hervortritt. Es heisst dort nämlich [10]:

«Augenblicklich entsteht ein starkes Knistern; schon auf eine bedeutende Entfernung äussert sich für das Gesicht das spinnnetzartige Gefühl und die Haare sträuben sich empor. Zieht man die Druckschrauben an, so verstärken sich die Phänomene auffallend und erreichen den höchsten Grad, wenn die Cylinder gewärmt werden. Alsdann geht das Knistern in ein fortdauerndes Rauschen über, und wenn man den Knöchel der Papierfläche nähert, sieht man des Abends, wenn das Satinoir nur nicht von directem Lampenlichte erleuchtet ist, positiv elektrische Strahlen-

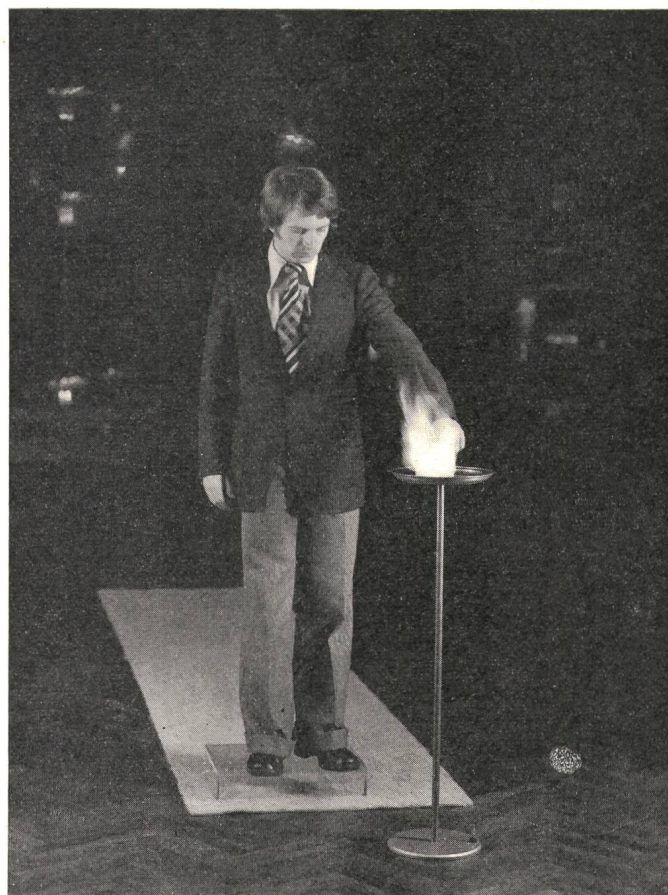


Fig. 6 Das elektrische Feuer

büschel rasch hintereinander auf 6 bis 10 Zoll Entfernung in denselben fahren.»

Den angegebenen Entladungslängen von 15 bis 25 cm nach zu schliessen, mussten damals Spannungen in der Grösse von 100 kV und mehr aufgetreten sein.

Nicht ganz so hohe Spannungen konnten an einer Demonstrationsanlage gemessen werden (Fig. 7), die aus einer elektromotorisch angetriebenen Wickelvorrichtung und dazwischen liegenden Walzen besteht, über die die Papierbahn mit einer Geschwindigkeit von 2,3 m/s hinweggeführt werden kann. Nach Anlauf der Anlage steigt die Spannung sehr schnell an und erreicht Werte von einigen 10 kV, bis es zu einem Überschlag auf das geerdete Gestell kommt, wonach der Vorgang von Neuem beginnt. Wenn bedacht wird, dass in der Papierfabrikation heute mit Geschwindigkeiten von 30 m/s bei Papierbreiten bis zu 3 m gearbeitet wird, so mag verständlich ein, dass es dabei zu beachtlichen Aufladungen kommen kann, sofern nicht für eine genügende Ladungsabfuhr gesorgt wird. Dem Prinzip nach arbeitet eine solche Anlage wie ein selbsterregter Van De Graaffscher Bandgenerator, dem ein bestimmter konstanter Strom eingepreßt wird und der an der vorgegebenen Kapazität seine Spannung solange steigern kann, bis es zu einem Überschlag kommt. Demzufolge bestimmt also die elektrische Festigkeit des umgebenden Mediums die maximal mögliche Spannung.

Störende Aufladungen sind ebenso an den früher allgemein üblich gewesenen Treibriemen beobachtet worden, worüber schon im Jahre 1847 berichtet worden ist [11].

Gefährlich werdende Aufladungen können an Folienwickelmaschinen auftreten, vor allem im Bereiche leicht ent-

zündlicher Lösungsmitteldämpfe, so dass in diesem Fall besondere Vorsicht geboten ist. In dieser Beziehung vorzüglich entladungsverursachend sind die unmittelbar nach dem Folienabzug entstehenden Zwickel zwischen Walze und Folie, da es dort zu erheblichen Feldkonzentrationen kommen kann.

4.3 Thema 3: Strömende Flüssigkeiten

Wie auch im Falle einer Grenzflächenberührung zweier fester Stoffe kommt es bei der Kontaktierung einer Flüssigkeitsschicht mit einer Feststoffschicht an Rohr- oder Behälterwandungen zu einem Ladungsaustausch, jedoch mit dem Unterschied, dass nunmehr nicht Elektronen beteiligt sind, sondern Ionen, die von geringsten Spuren an Verunreinigungen etwa des Anteiles von ppm (10^{-6}) bis zu ppb (10^{-9}) herrühren. Sobald die Flüssigkeit zu strömen beginnt, kommt es wiederum zu einer Ladungstrennung, wobei die zumeist positiven Grenzschichtionen der Flüssigkeit von der Strömung als eine Art Raumladungswolke mitgenommen und in andere Zonen des Strömungssystems gleichsam verschleppt werden, wo sie möglicherweise zu einer Ladungsanhäufung beitragen können, wie beispielsweise in Behältern und Tankanlagen, so dass es nach Erreichen einer genügend hohen elektrischen Feldstärke zu Entladungen kommen kann, die ihrerseits wiederum Brände und Explosionen zu initiieren vermögen, sofern zündfähige Gemische im Entladungsbe- reich vorhanden sind. Die bei solchen Flüssigkeitsströmungen zu erwartenden Raumladungsdichten liegen in der Größenordnung von $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$. Bemerkenswerterweise können in dieser Hinsicht auch Wasserteilchen wirksam sein, sofern sie sich nicht in der betreffenden Flüssigkeit zu lösen vermögen und es sich vorzugsweise um Strömungsturbulenzen handelt.

Besonders starke Aufladungen sind bei Querschnittsverengungen durch Armaturen oder auch beim Hindurchströmen von Flüssigkeiten durch Filteranlagen als Folge der dadurch bewirkten Aufwirbelungen zu erwarten. Um diesen

Effekt anschaulich darstellen zu können, wurde eine kleine Demonstrationsanlage gemäss Fig. 8 gebaut, die aus einem Plexiglasgefäss mit einer daran angeschlossenen Rohrleitungsschleife besteht, über die ein Ölstrom von mässiger Geschwindigkeit wahlweise über ein Filter oder auch über dessen Umgehungsweg geleitet werden kann. Sobald der Ölstrom über das Filter geführt wird, kommt es zu statischen Aufladungen – zuerst sehr langsam beginnend, dann aber rascher werdend –, die sich an dem metallischen Teil der Rohr- schleife durch ein beachtliches Anheben der daran gemessenen Spannung bemerkbar machen. Bei dieser Gelegenheit lässt sich sehr schön die Wirkung einer auf Erd- oder Hochspannungspotential befindlichen Saugspitze demonstrieren, deren abgesprühte Ladungen die Spannung auf jede beliebige Höhe zu begrenzen vermag. Durch ein Einbringen mehrerer solcher Spitzen in den Flüssigkeitsstrom wird von dieser Spitzenwirkung auch technisch Gebrauch gemacht.

In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass *T. A. Ellison* auf der bereits erwähnten Las-Vegas-Konferenz von folgenschweren Leckagen berichtet hat, die dadurch zustande gekommen sind, dass sich Kunststoffschläuche beim Durchströmen von Kühlflüssigkeit bis auf 60 kV aufgeladen haben, und dann wegen mangelnder elektrischer Festigkeit durchschlagen worden sind [38].

Statische Aufladungen als Folge von Flüssigkeitsströmungen können auch sonst zu folgenschweren Schäden führen, vor allem bei jeglichem Hantieren mit Treibstoffen, sei es beim Hersteller in Raffinerieanlagen oder sei es beim Verbraucher während des Auf- und Umfüllens, wo es wiederholt zu schweren Explosionsunglücken gekommen ist (Fig. 9). Als wirksamste Schutzmassnahme bietet sich an, den Isolationswiderstand des Treibstoffes durch Beimengung leitfähiger Anteile soweit zu vermindern, dass die Grenzschichtladungen schnell abgeleitet werden und demgemäss auch nicht zur Wirksamkeit kommen können. Dies ist – wie auch langjährige Erfahrungen gezeigt haben – für einen Bereich unter $10^{12} \Omega \text{ cm}$ der Fall. Als hervorragend geeignet hierfür hat

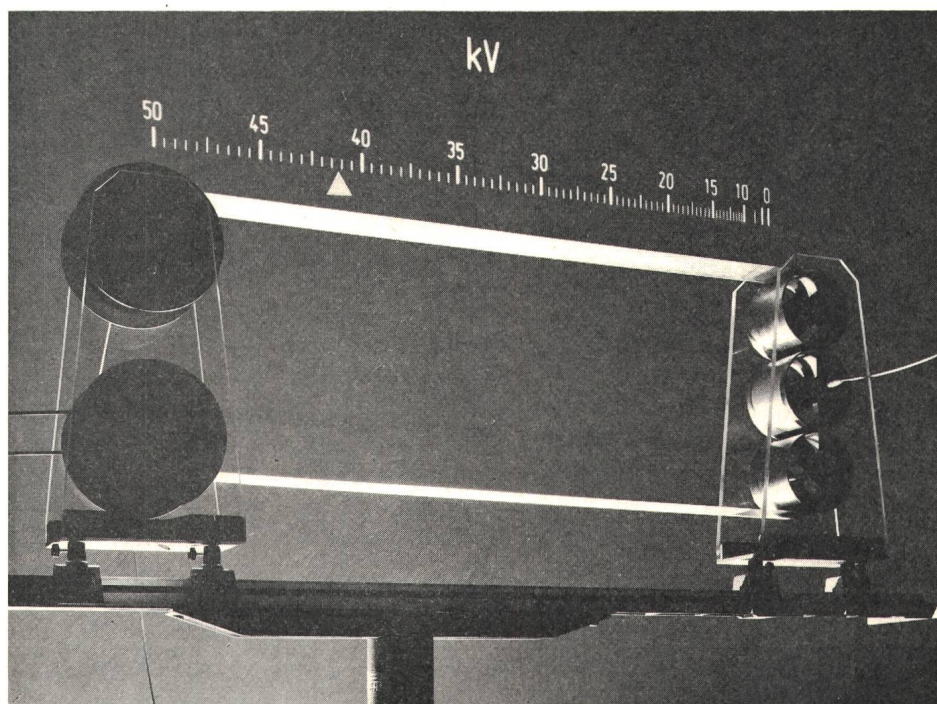


Fig. 7
Walzenelektrizität

Papierbreite	9,5 cm
Papierstärke	10 μm
Geschwindigkeit	2,3 m/s
Walzendurchmesser	13,5 cm

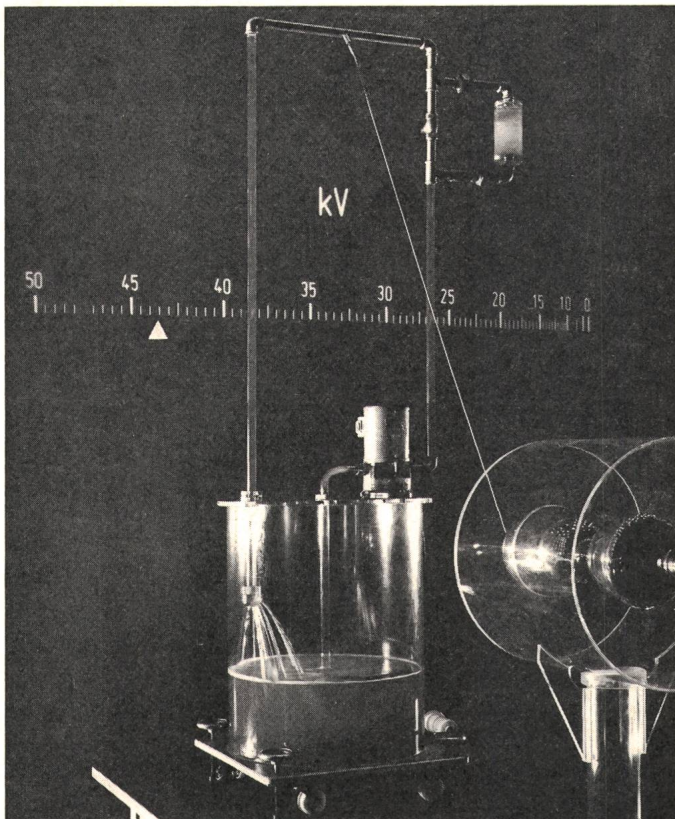


Fig. 8 Aufladungen nach dem Durchströmen eines Ölfilters

Plexiglasgefäß 0,1 m³
Strömungsgeschwindigkeit 0,75 m/s

sich ein von der *Shell* entwickeltes Drei-Komponenten-Anti-staticum der Kurzbezeichnung ASA 3 erwiesen, das dem Treibstoff mit 0,5 ppm Gewichtsanteile – das sind 0,5 g je Tonne – beigemischt wird. In jüngster Zeit sind die Anlagen für die Herstellung von gedoptem Treibstoff soweit ausgebaut worden, dass heute etwa $\frac{1}{5}$ des gesamten Treibstoffbedarfes der Welt abgedeckt werden kann.

Bei einer so erfolgreichen Entwicklung sollte abschließend nicht unerwähnt bleiben, dass es *A. Klinkenberg* und *J. L. Van Der Minne* gewesen sind, die vor genau 20 Jahren nach einer Explosion in der holländischen Ö Raffinerie Pernis dieses Problem erstmals aufgegriffen und damit seine Bedeutung richtig erkannt haben [21].

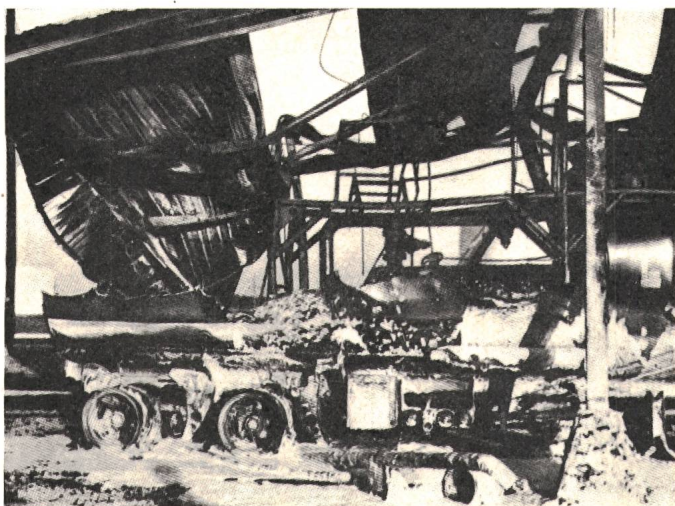


Fig. 9 Explodierter Kerosin-Tankwagen [31]

4.4 Thema 4: Gasexplosionen

Schon immer gehörten Gasexplosionen zu den überraschendsten Effekten einer Statikelektrizität. Dieser Meinung musste einstmal auch der Regensburger Theologe *Jacob Christian Schäffer* gewesen sein, als er im Vorbericht seiner gelehrsamten Schrift des Jahres 1778 über die elektrische Pistole vermerkte [4], dass bereits angefangen worden sei, mit Hilfe von Elektrizität ganz ohne Pulver zu schießen. Um diesen vergnüglichen Versuch verrichten zu können, müsse nach dem Laden der Pistole mit brennbarer Luft – wie das Sumpfgas damals genannt wurde – und nach dem Aufladen des Elektrizitätsträgers – wie das Elektrophor in jener Zeit hieß – folgendermassen verfahren werden (Fig. 10):

«Zu gleicher Zeit nimmt man die geladene, und mit dem Stöpsel verschlossene Pistole in die rechte Hand, und zwar so, dass man mit dem Daumen auf der einen Seite, und mit dem Mittelfinger auf der anderen Seite, den runden Theil der Zinnfolie

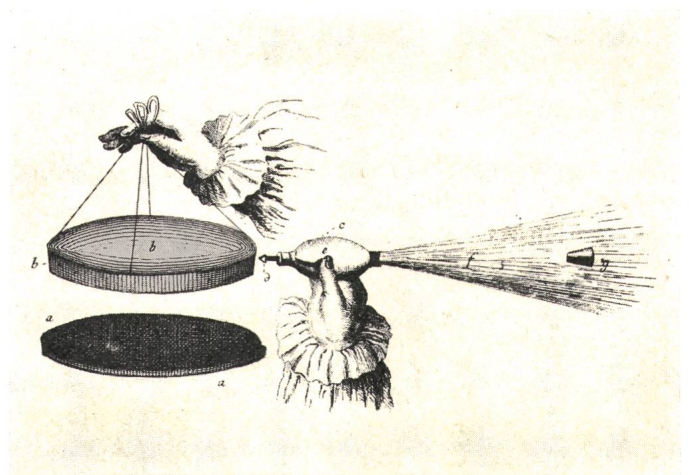


Fig. 10 1778: Elektrische Pistole nach Schäffer [4]

- a, b Untere und obere Scheibe des Elektrizitätsträgers
- c Pistole
- d Knöpfgen
- e Zinnfolie
- f Feuerstrom
- g Stöpsel

bedeckt; und nähert sich, mit dem Knöpfgen der Pistole, der Oberscheibe des Electricitätsträgers. Augenblicklich wird nicht nur ein Funke zwischen dem Electricitätsträger und dem Knöpfgen, sondern auch in der Pistole entstehen; aber sogleich auch die innere brennbare Luft dadurch entzündet, und die ganze Pistole voll Feuer werden. Doch nicht nur dieses. Es wird auch in dem nämlichen Augenblicke der Stöpsel mit dem stärksten Knalle eines Pistolen- oder Flintenschusses, unter einem ganzen Strom von Feuer, weggeschlagen werden.»

Und, so fügte der Autor hinzu:

«Dies ist der ungemein schöne, und, ohne es selbst zu sehen, sich kaum prächtig genug vorzustellende Pistolenschuss.»

Mindestens ebenso ungemein schön und zugleich prächtiger lässt sich die Explosionswirkung statischer Aufladungen nach der Art eines Ballonexperimentes demonstrieren (Fig. 11), das in der Weise abläuft, dass ein Kinderballon über eine kleine Funkenstrecke gezogen und dann über einen Schlauch mit einem Gemisch von Azetylen und Sauerstoff im Verhältnis 1 : 3,7 gefüllt wird. Sobald nun der Experimentator mit ein paar Schritten über einen Kunststoffteppich hinwegschreitet und dann den wenigstens 10 m entfernten Konduktor mit der Hand berührt, kommt es zu einer Entla-

dung an der Funkenstrecke und damit zu einer Entzündung des explosiblen Gasgemisches, was den Ballon unter lautem Knall auseinanderreisst. Bei dieser Gelegenheit muss ausdrücklich erwähnt werden, dass das Anschliessen des gefüllten Ballons nur unter grösster Vorsicht und nur bei geerdetem Konduktor erfolgen darf, da kleinste statische Aufladungen zu einer vorzeitigen Explosion und damit zu einer Gefährdung des Experimentierenden führen können. Bei Acetylen-Sauerstoff-Gemischen genügt nämlich eine Mindestenergie von $0,2 \mu\text{Ws}$ – also weniger als ein Millionstel Ws oder weniger als ein Tausendstel der physiologischen Reizgrenze –, um möglicherweise eine Explosion auszulösen.

Für Gas-Luft-Gemische und Dampf-Luft-Gemische von 1013 bar und 20°C liegt die Mindestzündenergie im Bereiche von 0,01 bis 2 mWs [39], so dass ebenso in Verbindung mit Luft allergrösste Vorsicht geboten ist.

4.5 Thema 5: Die Inhalationsnarkose

Es gehört wohl mit zu den höchste Bewunderung erregenden Experimenten eines *Humphry Davy*, der – damals noch 21jährig – bei seinen Untersuchungen an Stickoxydul, das ihn in vieler Hinsicht zu interessieren schien, von Zeit zu Zeit einige Proben davon einatmete und dann sich selbst beobachtend feststellte, wie sehr viel lustiger und schmerzunempfindlicher er sich fühlte. Dies musste ihn dazu bewogen haben,

dass er im Sommer des Jahres 1799, als ihn heftiger Zahnschmerz plagte, wiederum einige Proben davon nahm – dieses Mal in sehr kräftigen Atemzügen –, worüber er in seinen Aufzeichnungen das folgende vermerkte [6]:

«On the day when the inflammation was most troublesome, I breathed three large doses of nitrous oxide. The pain always diminished after the first four or five inspirations; the thrilling came on as usual, and uneasiness was for a few minutes, swallowed up in pleasure.»

Von den erstaunlichen Wirkungen dieses Gases offenbar überzeugt, das wegen seiner belustigenden Effekte später auch Lachgas genannt worden ist, glaubte er, dass es ebenso bei Operationen nützliche Dienste verrichten könne, denn er schrieb weiter:

«As nitrous oxide in its extensive operation appears capable of destroying physical pain, it may probably be used with advantage during surgical operations in which no great effusion of blood takes place.»

Nachdem später ähnliche Wirkungen auch an Schwefeläther beobachtet worden sind, kam es im Jahre 1842 zu der vermutlich ersten Äthernarkose, in deren Verlauf ein junges Mädchen eine Zahnextraktion praktisch reaktionslos hingenommen hatte [30]; bald danach wurde eine solche Narkose öffentlich vorgeführt (Fig. 12).

In der modernen Chirurgie sind Inhalationsnarkosen nicht mehr wegdenkbar, wenngleich damit trotz aller Be-

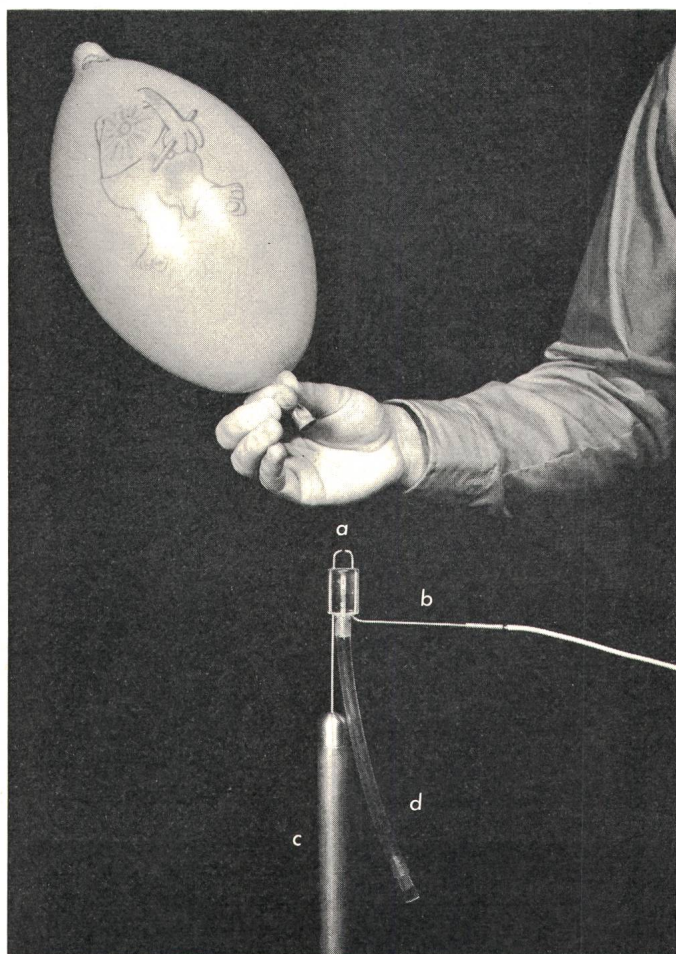


Fig. 11 Ballonexperiment

- a 2-mm-Funkenstrecke bei 1,2 mm Abstand
- b Konduktoranschluss
- c Erdungsanschluss
- d Füllschlauch



Fig. 12 Um 1850: Erste öffentliche Vorführung einer Äthernarkose [30]

dachtsamkeit gewisse Gefahren verbunden sind, die zum Teil mit den latenten Wirkungen einer Statikelektrizität in Zusammenhang stehen. Wie aus einer umfassenden Statistik von *H. J. Harder* zu entnehmen ist [26], sind von insgesamt 617 Unglücksfällen, die Brände und Explosionen innerhalb des Operationstraktes zur Folge hatten, rund 25 % durch statische Aufladungseffekte im Verlaufe von Inhalationsnarkosen verursacht worden, wovon wiederum rund die Hälfte Äthernarkosen betroffen haben und die andere Hälfte zu etwa gleichen Anteilen auf Narkosen mit Äthylen und Cyclopropan entfallen sind. Das besondere Gefahrenrisiko hängt einfach damit zusammen, dass diese Anaesthetica zu- meist in Mischung mit Sauerstoff zum Einsatz kommen, was zur Folge hat, dass ihre Mindestzündenergien im Vergleich zur Luft als Mischkomponente um fast zwei Zehnerpotenzen kleiner werden, wie aus einer von *Harder* stammenden Tabelle [26], jedoch *-Werte nach [39], überzeugend hervorgeht:

	In Verbindung mit Luft		In Verbindung mit Sauerstoff	
	Vol. %	Mindest-zündenergie mWs	Vol. %	Mindest-zündenergie mWs
Diäthyläther	5,1	0,19	14	0,001
Cyclopropan	6,3	0,17	16	0,001
Äthylen	7	0,07 *	23	0,0009 *

Die Beimengung von Sauerstoff bringt zudem eine starke Aufweitung der Explosionsgrenzen, wie beispielsweise bei Diäthyläther von 1,7 bis 36 % auf 2,1 bis 82 %. Damit wird verständlich, dass schon geringste Aufladungen innerhalb eines breiten Explosionsbereiches höchst gefährlich werden können.

Auf Grund verschiedener Unfallanalysen hat sich herausgestellt, dass eine mögliche Gefahr vor allem dann gegeben ist, wenn die einzelnen Elemente eines Narkosegerätes nicht leitend miteinander verbunden sind, so dass es innerhalb des Systems zu statischen Aufladungen kommen kann. Auch der Atembeutel muss als latente Gefahrenquelle angesehen werden, sofern nicht für eine gute Ladungsabfuhr durch das Verwenden von Leitgummi gesorgt wird. Schliesslich muss auch das Narkosegerät als ganzes System gut geerdet sein. Welche Folgen ein Nichtbeachten dieser Massnahme bedeuten kann, zeigt sehr deutlich der Fall einer Sauerstoff-Äther-

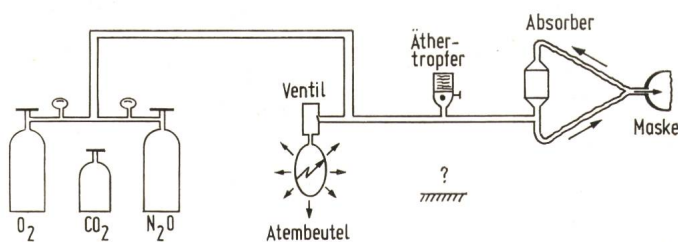


Fig. 13 Explosion bei einer Sauerstoff-Äther-Narkose [18]

Narkose [18], in deren Verlauf es durch das Nichterden des Apparatesystems zu einer Explosion des Atembeutels kommen konnte (Fig. 13), die zu Trommelfellschäden beim operierenden Personal geführt hat. Glücklicherweise war dem Patienten die Maske noch nicht aufgesetzt gewesen, denn sonst wäre es wohl zu einer Lungenruptur gekommen. Über zwei ähnlich abgelaufene Fälle wird an anderer Stelle berichtet [23] und ein weiterer Fall hat zu fatalen Folgen geführt [17].

Erfreulicherweise bemüht sich eine Anaesthesie der jüngsten Zeit sehr darum, Narkotika auf der Basis bestimmter Fluorverbindungen einzusetzen, die den grossen Vorteil haben, nicht entflammbar zu sein. Es bleibt allerdings abzuwarten, ob Stoffe wie Halothan, Fluoromar oder Penthran sich auch in klinischer Hinsicht bewähren [46].

4.6 Thema 6: Antistatikgarne

In einem von der Royal Society, London, am 1. Februar 1759 vorgelesenen Brief ihres Fellow Mitgliedes *Robert Symmer* heisst es wie folgt [1]:

«I had for some time observed, that upon pulling off my stockings in an evening they frequently made a crackling or snapping noise; and in the dark I could perceive them to emit sparks of fire.»

Diese überraschende Erfahrung musste *Symmer* dazu veranlassen haben, einige Experimente dergestalt vorzunehmen, indem er Strümpfe von verschiedener Machart anzog, etwa 10 min anliess und dann wieder auszog und abschliessend vermerkte, dass baumwollene Strümpfe keinerlei Spuren von Elektrizität zeigten, wohingegen wollene und seidene einermassen elektrisch zu sein schienen. Noch viel mehr Elektrizität war beim Erproben von weiss- und schwarzfarbigen Seidenstrümpfen erkennbar, indem sich diese aufweiteten und gegenseitig anzogen, wie es später *Abbé Nollet* noch überzeugender darzustellen gelang (Fig. 14). Unbestreitbar sind damit erste Vorstellungen vom Vorhandensein elektrostatischer Aufladungen an Woll- und Seidengarnen entwickelt worden.

Durch die zunehmende Verwendung von Kunststoffen in der Textilbranche ist das Problem elektrostatischer Aufladungen höchst aktuell geworden und hat sich sogar bis in die perfektionierte Technik des bemannten Raumfluges hinein spielen können, wie Astronauten des Apollo-Programmes bei wiederholt empfangenen elektrischen Schlägen in ihren Nylonanzügen erfahren mussten. Aber auch sonst haben sich statische Aufladungen durch Spreiz- und Anschmutzungseffekte sehr störend bemerkbar gemacht. Darüber hinaus sind Fälle bekannt geworden, wo statische Aufladungen das Entfalten von Fallschirmen verhindert haben [44].

Demzufolge sind naturgemäss Fortschritte jeglicher Art zu begrüßen, die darauf abzielen, den aus einem Variationsreichtum von Kunststoffen herstellbaren Fasern, Garnen und Geweben ein möglichst antistatisches Verhalten zu verleihen, wozu bereits bemerkenswerte Vorschläge vorliegen, zu deren Verwirklichung im technischen Prozessbereich aber noch ein langer Weg zu gehen sein wird. Die Schwierigkeit der Problematik ist vor allem darin zu suchen [44], dass die für Textilgarne geeigneten Antistatika über eine ausreichende Anzahl von Waschprozessen hinweg wirksam bleiben müssen und das denkbare Miteinweben dünnster Metallfäden oder das Aufdampfen noch dünnerer Metallschichten zu teuren Artikeln führt. Die wohl eleganteste Lösung, das Garngefüge über das Kunststoffmolekül antistatisch zu machen, hat bisher zu keiner brauchbaren Technologie geführt, was natürlich eine zukünftige Lösung nicht ausschliesst. In diesem Sinne verbleibt der Chemie, eine vordringlich gewordene Aufgabe ehestens zu lösen.

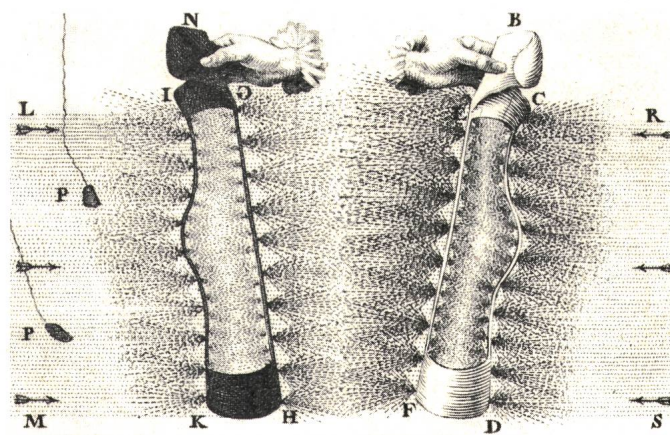


Fig. 14 1767: Nolllets Strumpffexperiment [2]

N schwarzer Seidenstrumpf
B weisser Seidenstrumpf

4.7 Thema 7: Staubexplosionen

Sehr schnelle Aufladungen sind interessanterweise bei einer Bewegung von Staub-Luft-Gemischen zu beachten, besonders, wenn es sich um feinste Staubteilchen im Bereich von μm handelt. Bei Massendichten von 0,1 bis 4 kg/m^3 und Strömungsgeschwindigkeiten von 10 bis 20 m/s kann immerhin mit Raumladungsdichten von 100 bis $1000 \mu\text{C/m}^3$ gerechnet werden.

Für eine Demonstration von Aufladungen dieser Art hat sich ein fahrbarer Aufbau nach Fig. 15 bestens bewährt. Er besteht aus zwei gleich grossen und isoliert aufgestellten Behältern, die über zwei Kunststoffrohre miteinander verbunden sind. Ein dazwischen eingebauter Lüfter erregt eine Kreisströmung derart, dass die staubhaltige Luft beispielsweise in den rechten Behälter hineingeblasen und von dort über das bepfeilte Plexiglasrohr wieder abgesaugt wird; das gleiche trifft in umgekehrter Reihenfolge für den linken Behälter zu. Als Staub kann irgendein gekörntes, jedoch nicht brennbares Pulver mit 100 bis $200 \mu\text{m}$ Teilchendurchmesser Verwendung finden. Sobald der Lüfter angelaufen ist, steigt die Spannung der beiden Behälter in 10 bis 15 s auf 80 bis 100 kV an, so dass es zu Überschlügen gegen das geerdete Fahrgestell kommt, wonach der Vorgang von neuem beginnt.

Aufladungen solcher Art können dann zu einer Gefahr werden, wenn die Mindestzündenergien von Staub/Luftgemischen erreicht werden, die in der Grösse von 5 bis 100 mWs liegen [39]. Diese Werte sind zwar um 2 Zehnerpotenzen höher als jene von Gas-Luft-Gemischen, aber die Erfahrung lehrt, dass solche Mindestwerte in technischen Anlagen tatsächlich erreicht werden können. So sind im März 1966 [29] in einer amerikanischen Polykarbonat-Anlage innerhalb von 6 Tagen zwei 130 m^3 fassende Biphenol-Silos explodiert, und zwar offenkundig deshalb, weil beide Silos nur zu einem Viertel gefüllt waren, so dass sich ein turbulentes Staub-Luft-Gemisch ausbilden konnte. Biphenol ist brennbar und in seinem Staubverhalten um ein Vielfa-

ches gefährlicher als Kohlenstaub. Kurze Zeit später wurde die Anlage mit inertem Stickstoff betrieben. Ein Jahr darauf hat sich in einer amerikanischen Stärkefabrik eine Staubexplosion ereignet, bei der zu dem hohen Sachschaden von 3,9 Millionen Dollar auch 11 Menschenleben zu beklagen waren [28].

In dieser Hinsicht mag noch eine Statistik interessant sein, die sich in einem Beitrag von H. F. Eden [43] findet und eine Zusammenstellung der wichtigsten Staubexplosionen in den USA seit dem Jahre 1900 enthält:

Staubart	Insgesamt Explosionen	Verursachung durch		
		unbekannt	elektrische Funken	Statik-elektrizität
Kunststoff	35	7	3	3
Papier	35	—	2	1
Kork	40	8	—	5
Metall	81	19	5	3
Stärke/Korn	56	17	5	6
Schwefel	34	6	—	6
Insgesamt:	281			24 = 8,5 %

Von allen Staubexplosionen sind somit nahezu 10 % durch statische Elektrizität verursacht worden. Die erste Staubexplosion soll sich 1884 in einer englischen Kohlengrube ereignet haben [37].

4.8 Thema 8: Wasserdampfelektrizität

Zwei hervorragende Gelehrte sind es gewesen – *Antoine-Laurent Lavoisier* war der eine, als Chemiker berühmt geworden und während der französischen Revolution hingerichtet und *Pierre Simon de Laplace* der andere, als Mathematiker ebenso berühmt –, die im Laufe des Jahres 1781 herausgefunden hatten, dass beim Verdampfen von Wasser Elektrizität erregt wird. Zum Nachweis dieses neuartigen Phänomens benutzten sie vier isoliert aufgestellte eiserne Öfen, die sie mit einem Voltaschen Elektrometer – dem empfindlichsten der damaligen Zeit – verbunden hatten und dann darauf Wasser ausgossen, das sofort verdampfte. In einem Bericht an die Pariser Akademie der Wissenschaften heisst es dazu [3]:

«Ayant fait chauffer quatre poêles de fer battu, les ayant isolés & les ayant fait communiquer avec l'électromètre, & ayant versé de l'eau dessus, ils nous ont donné dans trois expériences successives, des signes non équivoques d'électricité qui nous a paru négative dans la première, mais qui dans les autres étoit incontestablement positive.»

Dann ist dieses staunenswerte Phänomen in Vergessenheit geraten – wie es so oft in der Geschichte der Elektrizität geschehen ist –, bis 60 Jahre später in dem englischen Orte Seghill, nur wenige Kilometer von Newcastle entfernt, das Sicherheitsventil eines Dampfkessels am Verbindungsflansch undicht geworden war, so dass erhebliche Dampfmengen ausströmen begannen. Dies wäre wohl unbeachtet geblieben, wenn nicht der Maschinist bei seinem Versuch, das Ventil neu einzustellen, einen empfindlichen Schlag bekommen hätte, verständlicherweise zu seinem grössten Erstaunen, worüber in einem Bericht des Advokaten und Artillerieingenieurs *William George Armstrong* folgendes zu lesen ist [7]:

«... the engine-man, having one of his hands accidentally immersed in the issuing steam, presented the other to the lever of

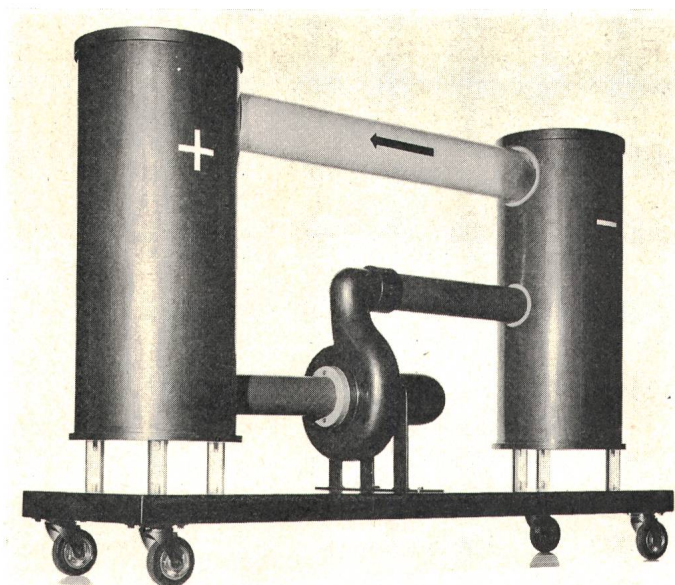


Fig. 15 Nachweis von Staubelektrizität

Behälter 0,35 m Durchmesser, 0,8 m Höhe
Bepfeiltes Plexiglasrohr 0,12 m Durchmesser
Durchströmungsgeschwindigkeit $5,6 \text{ m/s}$

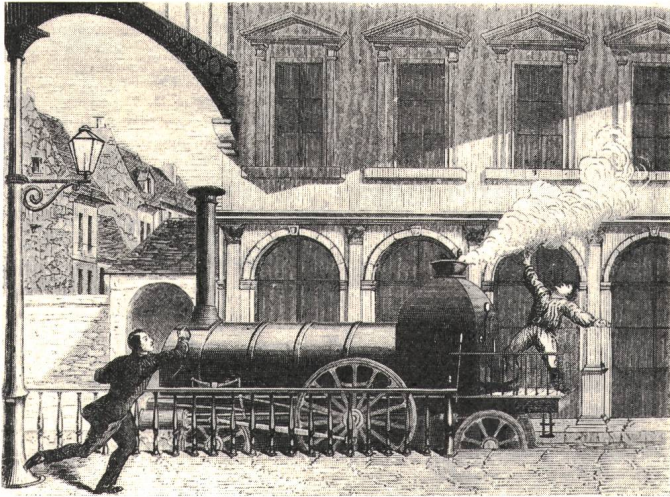


Fig. 16 1840: Elektrisierender Wasserdampf [12]

the valve, with the view of adjusting the weight, when he was greatly surprised by the appearance of a brilliant spark, which passed between the lever and his hand, and was accompanied by a violent wrench in his arms, wholly unlike what he had ever experienced before. The same effect was repeated when he attempted to touch any part of the boiler, or any iron-work connected with it, provided his other hand was exposed to the steam.»

Nunmehr schien das Phänomen interessant genug zu sein, um weiter untersucht zu werden, was bald dazu führte, dass an Lokomotiven der damaligen Newcastle and North Shields Railway ebensolche schlagversetzende Aufladungen festgestellt worden sind, wovon Fig. 16 einen realistischen Eindruck vermittelt.

Besonderes Kopfzerbrechen musste damals die Frage nach der Polarität des Dampfes bereiten, vor allem in Form eines plötzlich eintretenden Polaritätswechsels, den auch schon *Lavoisier* und *Laplace* beobachtet hatten. Dies veranlasste *Armstrong*, den Einfluss von Beimengungen systematisch zu untersuchen, wobei er feststellen konnte, dass Pottasche einen positiven Dampfstrahl und Spuren von Salpetersäure oder Kupfernitrat einen solchen negativer Polarität verursacht [9]. Im Verlaufe seiner weiteren Versuche

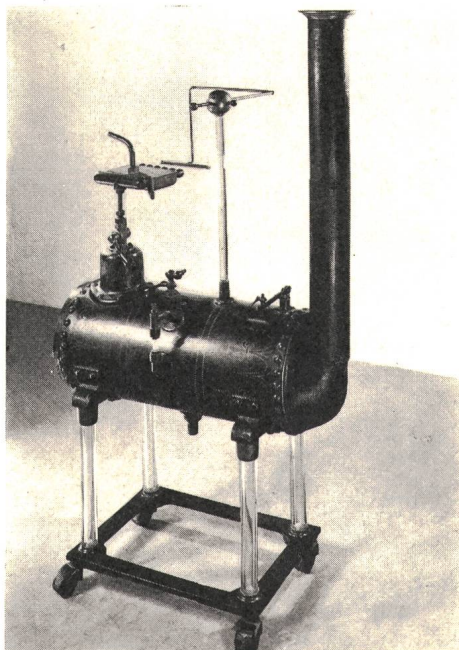


Fig. 17
Um 1850:
Dampfelektrisie-
maschine
nach Armstrong

kam er zu der Überzeugung, dass es einfacher sein würde, die Elektrizität über einen isoliert aufgestellten Kessel zu sammeln als über den ausströmenden Dampf, was ihn später auf die Idee brachte, hydroelektrische Maschinen zu bauen und die damit erzeugbare Elektrizität in das Haus zu leiten, denn er meinte [9]:

«I find the most convenient way of using my apparatus is to place it out of doors, and to convey the electricity into the house by means of a wire.»

Auf diese Weise sind die Armstrongschen Dampfelektrisierungsmaschinen entstanden, von denen ein im Deutschen Museum befindliches Original in Fig. 17 abgebildet ist. Doch die Entwicklung ist andere Wege gegangen, da zu jener Zeit bereits leistungsfähige Maschinen der Magnetelektrizität zur Verfügung gestanden haben.

Dessen ungeachtet lohnt es sich, auch diese Art von statischen Aufladungen in einer Demonstration sichtbar zu machen. Dazu genügt ein etwa 15-l-Autoklav für einen Druck von 3 bar, der mittels einer Heizplatte auf eine Temperatur von etwa 150 °C hochgefahren werden kann (Fig. 18). Der damit erzeugbare Dampf wird dann über einen Schlauch

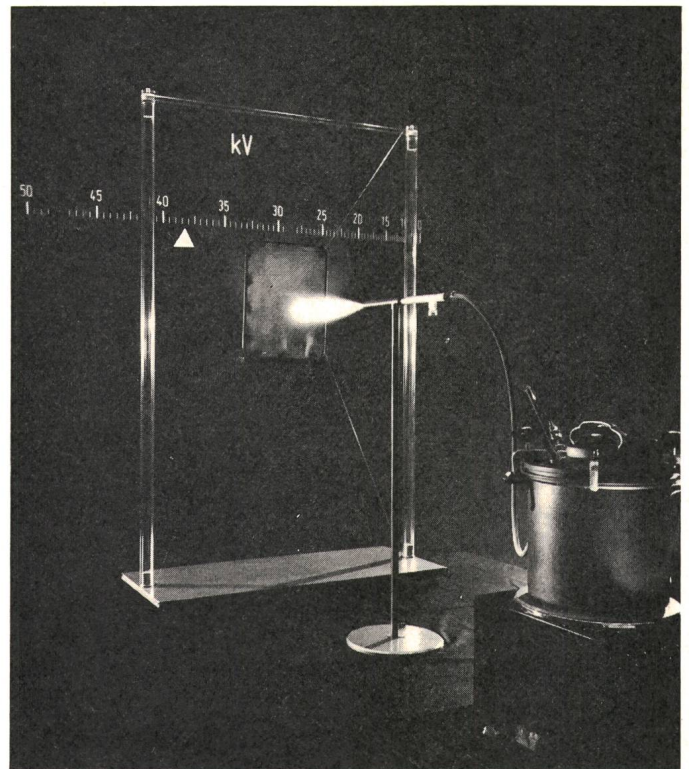


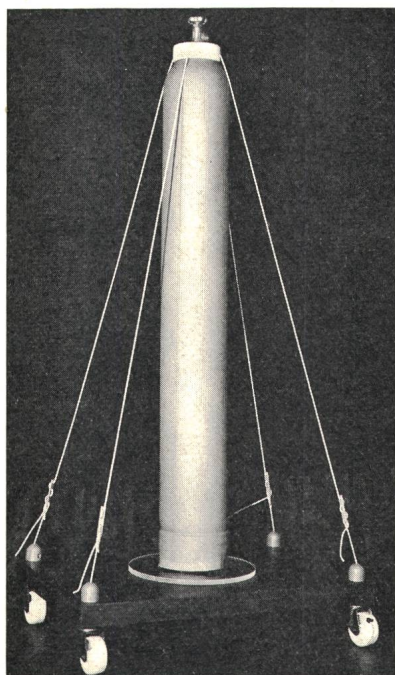
Fig. 18 Wasserdampfelektrizität

einer Düse zugeführt und als Dampfstrahl auf ein isoliertes Gitter hingeleitet, das sich ausserordentlich schnell auf einige 10 kV aufladet, so dass eine daran angeschlossene Funkenstrecke im Zeitabstand einiger Sekunden kontinuierlich anspricht. So ist aus Leitungswasser Elektrizität erzeugbar!

4.9 Thema 9: Jeteffekte

Interessanterweise hat sich *Armstrong* im Verlaufe seiner Dampfexperimente auch die Frage vorgelegt, ob nicht gleichermassen beim Ausströmen von verdichteter Luft eine Anregung von Elektrizität erwartet werden könne [8]. Seine in dieser Richtung veranlassten Versuche haben sehr bald er-

Fig. 19
Isolierte Druckluftflasche



kennen lassen, dass sich ein auf Glasstützen ruhender Druckbehälter ausserordentlich rasch negativ aufladet, sobald ihm komprimierte Luft von etwa 8 bar entströmt und dass nur in wenigen Fällen sich der Druckbehälter positiv aufladet. Demgemäss war die Aufladung des Luftstromes vorzugsweise positiv und nur in seltenen Fällen negativ.

Demgegenüber hat sich bei einem Demonstrationsexperiment mit einer isoliert aufgestellten Druckgasflasche von 40 l Inhalt und 150 bar Innendruck (Fig. 19), die über eine 5 mm Düse innerhalb von 2 min abgelassen wurde, stets ein negativer Luftstrom eingestellt, was mit immer vorhandenen Spuren von Wasser in Zusammenhang steht.

Dass beim Ausströmen hochverdichteter Gase gefährliche Aufladungen entstehen können, beweist am eindringlichsten das bereits angesprochene Explosionsunglück in Bitburg. Am Unglückstag – den 23. September 1954 – war beabsichtigt gewesen, einem Kreis von geladenen Gästen die Wirksamkeit einer CO₂-Löschanlage eindrucksvoll vorzustellen, wozu in einen unterirdisch eingebauten Brennstofftank von 5000 m³, der zu diesem Zeitpunkt bis zu einem Viertel mit Kerosin gefüllt gewesen war, probeweise 12 der 120 Flaschen umfassenden CO₂-Anlage eingeblasen werden sollten. Für diese Vorführung hatten sich die Gäste auf der Betondecke des Tanks versammelt. Etwa 1 min nach dem Auslösen der Löschanlage ereignete sich dann die Explosion, die die Betondecke mit den darauf befindlichen Personen in die Höhe schleuderte und dann in sich zusammenfallen liess. Dabei sind 29 Personen getötet und 9 verletzt worden. Der Bericht kommt abschliessend zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit einer Zündung durch aufgeladene Kohlensäure sehr gross gewesen sein musste, da ebenfalls nach etwa einer Minute – gemessen vom Zeitpunkt des Auslösens der Löschanlage – die Aufladung der Kohlensäure ihren Höchstwert erreicht [19]. Später durchgeführte Untersuchungen haben dieser Meinung in zweierlei Hinsicht recht gegeben: Einmal dadurch, dass bei Ausströmversuchen statische Aufladungen in der Grösse von 0,01 bis 30 µC/kg CO₂ beobachtet worden sind und zum anderen, dass bei

einem Test, bei dem innerhalb eines abgedunkelten Raumes 12 Flaschen – wie auch am Unglückstag – abgelassen wurden, sowohl an der Ausströmdüse als auch im Raume Leuchterscheinungen festgestellt werden konnten [22].

4.10 Thema 10: Wasserstaub

Im Journal der Physik des Jahres 1790 ist zu lesen, dass dem Berner Naturforscher *Johann Georg Tralles* vor einigen Jahren bei dem Anblick des bekannten Staubbachs unweit Lauterbrunnen plötzlich der Gedanke gekommen sei, ob der Wasserstaub nicht wohl elektrisch sein sollte [5]. Nach daraufhin vorgenommenen geschickten Beobachtungen mit seinem Taschenelektrometer konnte er zu seiner Freude feststellen, dass der abgesprühte Wasserstaub stets mit negativer Elektrizität beladen war. Das gleiche Resultat hat sich bei dem prächtigen Fall des Reichenbachs und noch an anderen Stellen ergeben, wo der Sturz des Wassers für eine Zerteilung in feinsten Wasserstaub heftig genug gewesen war. So ist die Wasserfallelektrizität bereits 100 Jahre früher entdeckt worden, als allgemein angenommen wird.

Dass Wasserstaub zu höchst gefährlicher Elektrizitätsanregung führen kann, hat sich im Dezember 1969 bei der bereits erwähnten Explosion von drei Superöltankern erwiesen [35]. Dazu hat *E. T. Pierce* für die San-Diego-Konferenz 1970 eine bemerkenswerte Studie vorgelegt [32], die von der Überlegung ausging, die in einem Badezimmer beim Zerstäuben von Leitungswasser zu erwartende Raumladungsdichte mit jener zu vergleichen, die beim Zersprühen von Seewasser während der Reinigung eines Öltanks entsteht. Zu diesem Zweck wurde zunächst sowohl für das Badezimmer als auch für den Öltank der während des Wasserzersprühens aufgetretene Feldstärkeverlauf mit Hilfe einer Feldmühle gemessen und hieraus die jeweilige maximale Feldstärke E_{\max} ermittelt, aus der dann die als konstant angenommene Raumladungsdichte über eine aus dem Poissonschen Ansatz abgeleitete Näherungsgleichung bestimmt wurde, für die E_{\max} als in einem volumengleichen Äquivalentwürfel der Kantenbreite b wirksam gedacht war. Für diesen gilt

$$q \approx \frac{\pi^4 \epsilon E_{\max}}{27b}$$

oder zugeschnitten

$$q \approx 31,94 \frac{E_{\max}}{b} \text{ nC/m}^3$$

mit E_{\max} in kV/cm und b in m. Bei einem solchen Vorgehen hat sich die folgende Gegenüberstellung ergeben:

	Badezimmer	Öltank
	1 l/s Leitungswasser während 5 min	100 l/s Seewasser während 45 min
Länge	3 m	46 m
Breite	2 m	23 m
Höhe	2,5 m	26 m
Volumen	15 m ³	27 500 m ³
Kantenlänge b des volumengleichen Äquivalentwürfels	2,46 m	30,18 m
Gemessene Maximalfeldstärke E_{\max}	-0,006 kV/cm	+0,2 kV/cm
Hieraus errechnete Raumladungsdichte q	-7,77 nC/m ³	+21,16 nC/m ³

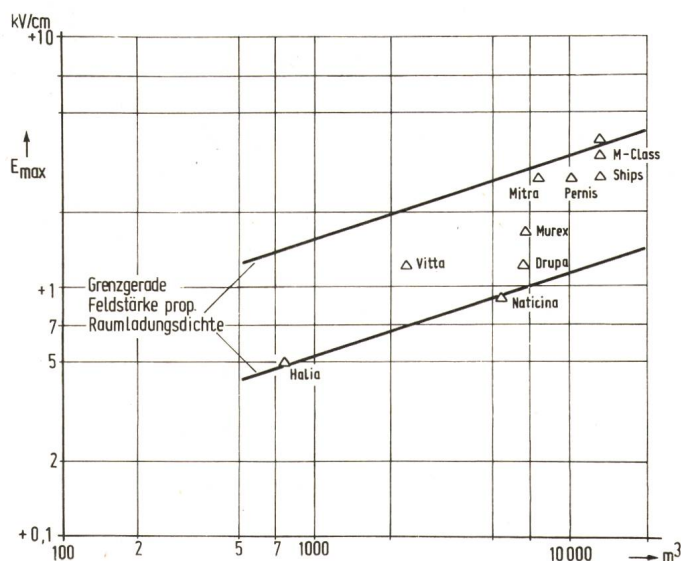


Fig. 20 Bei der Tankreinigung gemessene Maximalfeldstärken abhängig vom Tankvolumen [36]

Bei diesem Vergleich hat sich überraschenderweise gezeigt, dass die Raumladungsdichte – abgesehen von der unterschiedlichen Polarität, die eine Folge des im Seewasser enthaltenen Salzes ist – in der Größenordnung unverändert blieb, obwohl sich die Volumina wie 1 : 1833 verhalten haben. Dies bedeutet aber, dass umgekehrt bei vorgegebener Raumladungsdichte die sich einstellende Maximalfeldstärke nur von der Grösse des Volumens abhängig sein kann und nach obiger Näherungsformel dem Volumen sogar proportional sein muss.

Bedeutungsvoll für die Richtigkeit der Pierceschen Rechnung scheint der Umstand zu sein, dass spätere Messungen [36], die beim Waschen von Öltanks einiger Supertanker vorgenommen worden sind, sich Raumladungsdichten der gleichen Größenordnung ergeben haben und dass auch die Tendenz einer wachsenden Maximalfeldstärke mit zunehmendem Tankvolumen ersichtlich geworden ist (Fig. 20). Allerdings sind in den betreffenden Tanks wesentlich höhere Maximalfeldstärken – etwa von 1 bis 4 kV/cm – gemessen worden, die sich vermutlich durch örtliche Gradientenüberhöhungen an technisch bedingten Inhomogenitäten erklären lassen. Diese Feldstärken liegen aber bereits in einer Grösse, bei der mit elektrischen Entladungen auf alle Fälle gerechnet werden muss. Dies hat die Vermutung nahegelegt, dass die drei Supertanker durch statische Aufladung zur Explosion gekommen sind. Dafür spricht auch der Umstand, dass die Tanks leer waren und zum Zeitpunkt des Schadenereignisses gerade gereinigt worden sind. Kaum glaublich ist jedoch die Koinzidenz der Ereignisse, da sich die Explosionen in rascher Aufeinanderfolge ereignet haben: Zuerst im Tanker Marpessa, der gesunken ist, dann 2 Wochen später im Tanker Mactra und wieder einen Tag später im Tanker King Hakoon. Jedes der 210 000 t-Schiffe verfügt über 5 Zentraltanks von je 24 000 m³ und 8 Flügeltanks von je 15 000 m³, die mit einem Druckwasserstrahl von 10 bar und 40 m/s an der Düse und einer Wassermenge von

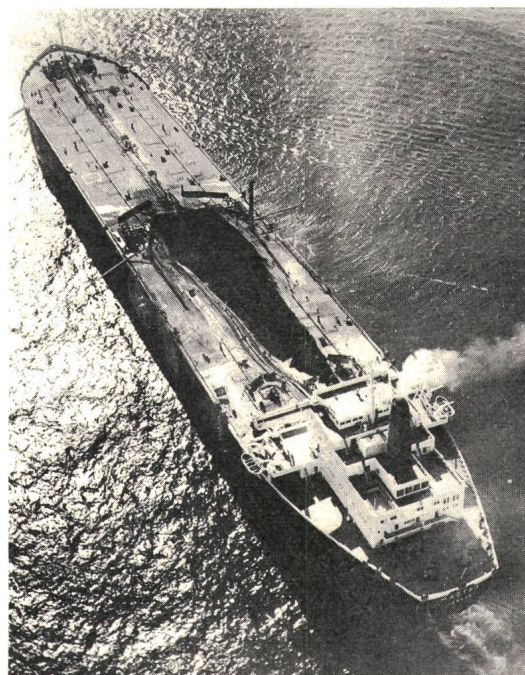


Fig. 21 210 000-t-Superöltanker «Mactra» nach der Explosion im Dezember 1969 [41]

180 m³/h ausgesprüht werden können, um die Ölreste, die bis 0,5 % der Nutzlast ausmachen können, zu entfernen [41]. Zur gleichmässigen Verteilung des Strahles rotiert die Düse mit 1 U./min. Der Waschprozess dauert etwa eine Stunde, das ist gerade die Zeit, nach der die Feldstärke etwa ihr Maximum erreicht. Fig. 21 zeigt den Superöltanker Mactra mit dem durch die Explosion aufgerissenen Deck.

Im Verlaufe der vorerwähnten Untersuchungen hat sich erneut gezeigt, wie ausserordentlich gefährlich es ist, in einen raumladungserfüllten Tank irgendwelche Gegenstände einzubringen, da sich diese sehr schnell aufladen und dann Eigenentladungen verursachen können. So wurde an einer zylindrischen Metallstange von 1,5 m Länge und 13 mm Durchmesser nach Durchfallen der Versuchstankhöhe eine Ladung von 0,19 µC gemessen, was bei einer errechneten Eigenkapazität von 20,6 pF einer Energie von 0,87 mWs entspricht [36].

4.11 Thema 11: Logikkreise

In einem letzten Thema soll die Frage angesprochen werden, in welchem Umfang Logikkreise durch statische Ladungen beeinflusst werden können.

In dieser Hinsicht hat R. W. Ellison in Las Vegas über einige nützliche Erfahrungen berichtet [38], die zeigen, dass Logikkreise aller Art selbst beim Wirksamwerden kleinster statischer Aufladungen gestört werden können, was sich in einer Reihe aufgetretener Ereignisse erwiesen hat. So sind im Verlaufe der ersten Raketenversuche zwei Flugkörper durch eine solche Beeinflussung verloren gegangen, und in späteren Tests ist es infolge falscher Steuerbefehle zu Bahnabweichungen gekommen. Bei der Überprüfung der dazugehörigen Hardware hat sich dann herausgestellt, dass bereits Energien in der Größenordnung von 0,5 mWs und auch weniger ausreichend sind, um Störungen solcher Art auszulösen. Es versteht sich von selbst, dass unter diesen Umständen statische

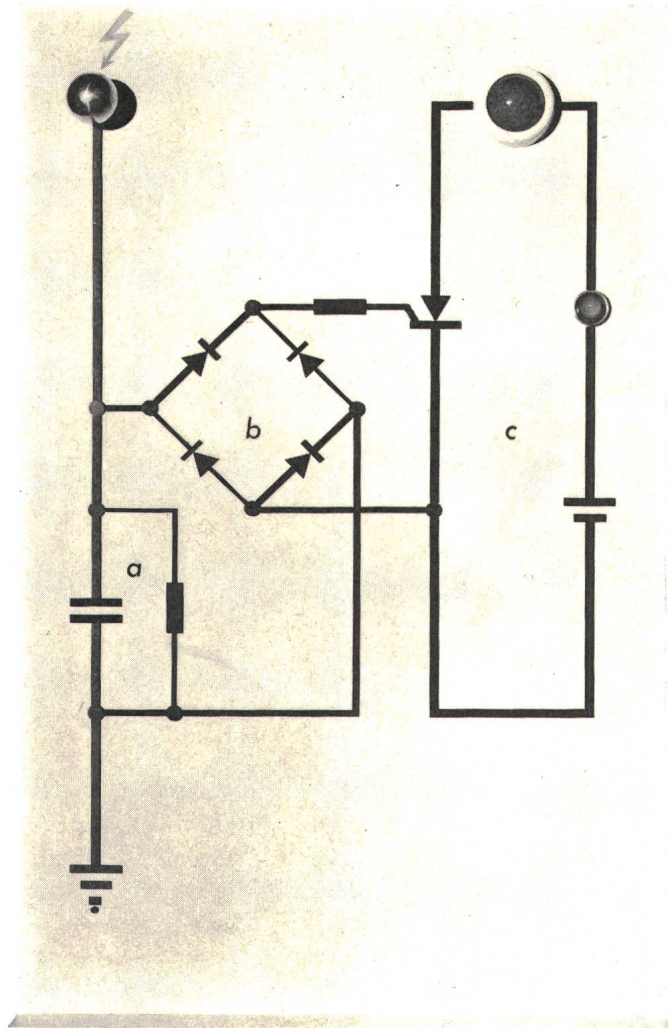


Fig. 22 Logikkreis

- a Steuerkreis ($C = 5,5 \text{ nF}$, $R = 1 \text{ M}\Omega$)
 b Diodenbrücke
 c Signalkreis

Aufladungen zu einer echten Gefahrenquelle werden können, zumal die Halbleiterautomatik in zunehmendem Masse empfindlicher wird und in einer immer breiter werdenden Technik zum Einsatz kommt. In dieser Beziehung bedarf es einer wohlgedachten Abwehrstrategie, um Logikkreise gegen statische Aufladungen vollkommen immun zu machen, etwa durch das Einfügen von reasonableness tests in das betreffende Programm.

Für eine überzeugende Demonstration solcher Effekte wurde eine Schaltung nach Fig. 22 entwickelt, die aus einem extern beeinflussbaren Steuerkreis, einer Diodenbrücke und einem nachgeschalteten Signalkreis besteht. Sobald der Experimentator beispielsweise nach Selbstaufladung die durch einen Hochspannungspfeil gekennzeichnete Kugel berührt, wird die Signallampe über den Thyristor zum Ansprechen gebracht.

5. Zukunftsdenken

Bei der Vielfalt von Tätigkeiten, in denen uns die Statikelektrizität als latentes Medium ständig begleitet und, öfters als gemeinlich angenommen wird, ihren fatalen Tribut bei unbedachter und mitunter fahrlässiger Handlungsweise fordert, wird es zur dringlichen Notwendigkeit, eine breitere

Öffentlichkeit auf die möglichen Gefahren statischer Aufladungen aufmerksam zu machen und dazu die wichtigsten Massnahmen zu ihrer Vermeidbarkeit vorzustellen. Dies gilt vor allem für den Schulunterricht, in dem praktische Hinweise gegeben werden sollten, dann aber auch für den Lehrbetrieb an Fach- und Hochschulen, an denen der Statikelektrizität die ihr heute gebührende Bedeutung zugesprochen werden sollte, und zwar nicht nur aus der Sicht möglicher Gefahren, sondern gleichermassen für die immer wichtiger werdende Anwendungstechnik. Das ist der eine Zukunftsaspekt.

Der andere Zukunftsaspekt bezieht sich auf die nicht minder wichtige Aufgabe, die Probleme einer Verursachung von Statikelektrizität noch mehr als bisher mit den Erfahrungen einer Halbleitertechnik zu durchdringen, mit dem Ziel, ihre Erscheinungsformen besser durchschaubar zu machen und damit die Statikelektrizität wieder zu einem vorzüglich handhabbaren Medium werden zu lassen, wie es in einer Zeit vor 200 Jahren einmal der Fall gewesen sein musste.

Literatur:

- [1] R. Symmer: New experiments and observations concerning electricity. Paper I and II. Philosophical Transactions 51(1759), p. 340...358.
- [2] J. A. Nollet: Lettres sur l'électricité. Troisième partie. Paris, Guérin, 1767.
- [3] A. L. Lavoisier et P. S. de la Place: Sur l'électricité qu'absorbent les corps qui se réduisent en vapeurs. Histoire et mémoires de l'académie royale des sciences, Paris -(1781)-, p. 292...294.
- [4] J. C. Schaffer: Abbildung und Beschreibung der elektrischen Pistole und eines kleinen zu Versuchen sehr bequemen Electricitätsträgers. Regensburg, Montag, 1778.
- [5] J. G. Tralles: Merkwürdige Beobachtungen über die Electricität des Staubbachs bey Lauterbrunn und des Reichenbachs im Hasli Thal. Journal der Physik 1(1790)-, S. 216...219.
- [6] H. Davy: Researches, chemical and philosophical, chiefly concerning nitrous oxide or dephlogisticated nitrous air and its respiration. London, J. Johnson, 1800.
- [7] W. G. Armstrong: On the electricity of a jet of steam from a boiler. Philosophical Magazine 17(1840)-, p. 370...372.
- [8] W. G. Armstrong: On the electricity of expanding air as connected with electrical phenomena of effluent steam. Philosophical Magazine 18(1841)-, p. 133...134.
- [9] W. G. Armstrong: Further experiments on the electricity of effluent steam. Philosophical Magazine 19(1841)-, p. 25...27.
- [10] Über Electricitäts-Entwicklung bei der Fabrication des endlosen Papiers. Polytechnisches Journal 83(1842)-, S. 340...341.
- [11] J. Batchelder: Über Electricitäts-Entwicklung in den ledernen Riemen, welche zur Fortpflanzung der Bewegung in den Fabriken dienen. Polytechnisches Journal 105(1847)-, S. 101...102.
- [12] L. Figuier: Les merveilles de la science, ou description populaire des inventions modernes. Tome 1. Paris, Furne, Jouvet et Cie., 1867.
- [13] H. Helmholtz: Studien über elektrische Grenzschichten. Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge 7(1879)7, S. 337...382.
- [14] E. Alglave et J. Boulard: La lumière électrique. Paris, F. Didot, 1882.
- [15] A. Coehn: Über ein Gesetz der Electricitätserregung. Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge 64(1898)2, S. 217...232.
- [16] E. C. Magnus: Elektrisch geladene Menschen. Die Umschau 36(1932)-, S. 119...120.
- [17] K. Imo: Über die Explosionsgefahr bei Narkosen mit besonderer Berücksichtigung der statischen Elektrizität und deren Verhinderung durch leitenden Gummi. Der Anaesthetist 9(1956)-, S. 283...287.
- [18] R. Blaschke: Explosion bei einer Sauerstoff-Äther-Narkose. Die Heilberufe -(1956)-, S. 330...331.
- [19] G. Schön: Ergebnisse der Untersuchungen zur Aufklärung der Explosionskatastrophe bei Bitburg in der Eifel am 23. 9. 1954. Arbeitsschutz -(1956)-, S. 37...41.
- [20] L. B. Loeb: Static electrification. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1958.
- [21] A. Klinkenberg and J. L. van der Minne: Electrostatics in the petroleum industry. The prevention of explosion hazards. Amsterdam a.o., Elsevier, 1958.
- [22] E. Heidelberg, K. Nabert und G. Schön: Elektrostatistische Aufladung von Kohlendioxyd. Arbeitsschutz -(1958)-, S. 221...228.
- [23] I. Forgács, R. Voszka und I. Orbán: Über Explosionen im Operationssaal. Der Anaesthetist 9(1960)-, S. 357...360.
- [24] E. Effenberger: Gefährdung des Menschen am Arbeitsplatz durch elektrostatistische Aufladungen. Berufsdermatosen 11(1963)-, S. 270...280.
- [25] R. Beach: Preventing static-electricity fires. Chemical Engineering 71(1964)December 21, p. 73...78.
- [26] H. J. Harder: Technische Sicherheitsprobleme im Operationstrakt. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1965.
- [27] N. Gibson and F. C. Lloyd: Icendivity of discharges from electrostatically charged plastics. British Journal of Applied Physics 16(1965)11, S. 1619...1631.
- [28] Starch dust blamed in New Jersey disaster. Chemical Engineering 74(1967)April 10, p. 112...113.
- [29] R. L. Yowell: Bisphenol-A dust explosions. Chemical-Engineering Progress 64(1968)6, p. 58...62.

- [30] E. Keys: Die Geschichte der chirurgischen Anaesthetie. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1968.
- [31] J. B. Godwin: Static electricity in air force refueling systems. Lightning and Static Electricity Conference, Miami Beach 1968, p. 442...452.
- [32] E. T. Pierce: Waterfalls, bathrooms and – perhaps – supertanker explosions. Lightning and Static Electricity Conference, San Diego 1970, p. 89...96.
- [33] D. K. Davies: Charge generation on solids. Proceedings of the first International Conference on Static Electricity, Wien 1970. Advanced in Static Electricity, Vol. 1. p. 10...21.
- [34] M. D. Vickers: Explosion hazards in anaesthesia. Anaesthesia 25(1970)-, p. 482...492.
- [35] D. van der Meer: Electrostatic charge generation during washing of tanks with water sprays. General introduction. Proceedings of the third Conference on Static Electrification, London 1971, p. 153...157.
- [36] J. M. van de Weerd: Electrostatic charge generation during washing of tanks with water sprays. Measurements and interpretation. Proceedings of the third Conference on Static Electrification, London 1971, p. 158...173.
- [37] R. R. Varin: Static electricity – Hazards industry. Industry. Modern Textiles Magazine 52(1971)2, p. 28...31.
- [38] R. W. Ellison: The effects of static electrification on systems. Lightning and Static Electricity Conference, Las Vegas 1972, p. 28...33.
- [39] Richtlinien zur Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie, 1972.
- [40] D. W. Hill: Physics applied to anaesthesia. Second Edition. London, Butterworths, 1972; Section 9: Electrical fire and explosion hazards in the operating room.
- [41] D. van der Meer, J. W. White: Electrostatic charge generation during tank washing. Project summary and introduction. 2. Internationale Tagung über elektrostatische Aufladung. Sondercolloquium: Probleme beim Reinigen von Grosstankern. Frankfurt/Main, 1973.
- [42] H. Prinz: Las-Vegas-Konferenz über Blitz- und Statik-Elektrizität. Bull. SEV 64(1973)15, S. 932...936.
- [43] H. F. Eden: Electrostatic nuisances and hazards. In: A. D. Moore: Electrostatics and its applications. Chapter 18. p. 425...440. New York a.o., John Wiley, 1973.
- [44] D. P. Hersh: Review of electrostatic phenomena on textile materials. In: Elektrostatische Aufladung. 40 Vorträge der 2. internationalen Tagung über elektrostatische Aufladung, Frankfurt/Main 1973. Dechema-Monographien Bd. 72. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie, 1974, S. 199...216.
- [45] N. Gibson: Safety problems associated with electrostatically charged solids. In: Elektrostatische Aufladung. 40 Vorträge der 2. internationalen Tagung über elektrostatische Aufladung, Frankfurt/Main 1973. Dechema-Monographien Bd. 72. Weinheim/Bergstrasse, Verlag Chemie, 1974, S. 343...355.
- [46] H. J. Harder: Technische Sicherheitsprobleme im Operationstrakt. In: Lehrbuch der Anaesthesiologie, Reanimation und Intensivtherapie. 4. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1974.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Hans Prinz, Direktor des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München, Arcisstrasse 21, Postfach 20 24 20, D-8000 München 2.

William Thomson (Lord Kelvin) 1824–1907

Die 1451 gegründete Universität Glasgow wurde 1870 in neue Gebäude auf dem Gilmorehügel verlegt. Von ihr aus überblickt man das Tal des Kelvin-Flusses, der unweit davon in den Clyde mündet. An dieser Universität lehrte William Thomson von 1846 bis 1899.

William Thomson kam am 26. Juni 1824 in Belfast zur Welt. Sein Vater wurde als Mathematikprofessor an die bereits erwähnte Universität Glasgow berufen. Keines seiner Kinder ging zur Schule; er unterrichtete sie alle selbst. Der frühreife William immatrikulierte sich schon mit 11 Jahren. 1841 bestand er in Cambridge sein Examen. Neben dem Studium trieb er Rudersport und spielte Horn. Gute Musik liebte er bis an sein Ende.

Er las Arbeiten *Faradays*, *Fouriers* und *Laplaces*. Nach Erlangung des Doktorgrades (1845) wollte er in Paris um Experimentiererfahrung zu bekommen. Mit 22 Jahren erhielt er die Professur für Naturwissenschaften an der Universität Glasgow, die er bis 1899 innehielt. Während dieser langen Zeit soll er nach dem gleichen Manuskript gelesen haben und war doch ein stets von Studenten umringter, begeisterter Lehrer.

Bei seinen Arbeiten strebte er stets danach, alles mathematisch zu formulieren, um damit rechnen zu können. 1847 hörte er in Oxford einen Vortrag von *Joule*. Von da an befasste er sich intensiver mit Wärmeproblemen. Im Jahre darauf schlug er die beim absoluten Nullpunkt beginnende Thermometerskala vor. Kurz danach gelang ihm der Nachweis, dass sich der Wirkungsgrad einer idealen thermischen Maschine umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur ändert, was die grundlegende Bedeutung der absoluten Temperatur zeigte. Er schlug vor, den Joule-Thomson-Effekt für die Kältetechnik nutzbar zu machen, was später *Linde* verwirklichte.

Thomson machte sich auch Gedanken über die Entwicklung des Kosmos. Auf Grund thermodynamischer Überlegungen kam er zur damals ungeheuer erscheinenden Annahme, dass unser Weltall einen Anfang haben müsse.

1852 heiratete Thomson; seine Frau war leider immer kränklich. Die Fahrt zu einer Kur nach Deutschland bot ihm Anlass zur Begegnung mit *Helmholtz*, mit dem er von da an befreundet blieb. Mit dem Aufkommen des Telegraphen wandte Thomson sein Interesse elektrischen Problemen zu. In einem der Royal Society vorgelegten Bericht zeigte er, dass die elektrischen Signale in Seekabeln infolge der grossen Kapazität verzögert werden. Bei Versuchen zur Überprüfung dieser Ergebnisse beobachtete er Lichtablenkungen, die ihn auf die Idee des Spiegelgalvanometers brachten. 1855 konstruierte er das Quadrant-Elektrometer, ein statisches Spannungsmessgerät.

Als man im folgenden Jahr die «Atlantic Telegraph Company» gründete, wurde Thomson einer ihrer Direktoren. Er drang auf möglichst grosse Reinheit des für die Kabel verwendeten Kupfers und verfügte, dass die Kabeleigenschaften während der Verlegung dauernd überwacht würden. Bei der ersten Transatlantik-Kabellegung mit dem Schiff «Agamemnon» anno 1858 besorgte er diese Messungen sogar selber. Trotzdem versagte das Kabel 3 Monate später seinen Dienst. Erst 1865/66 gelang es, mit der «Great-Eastern» ein verbessertes Kabel zu legen. Nach der Rückkehr von dieser Fahrt wurde Thomson geadelt. In der Folge wurde Sir William bei fast jeder Kabellegung konsultiert.

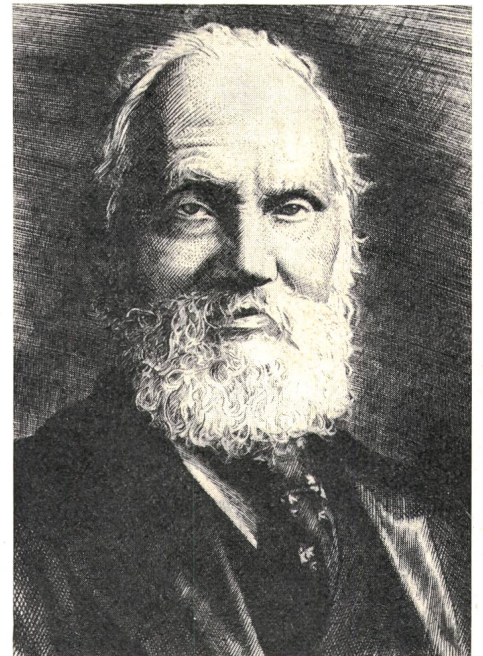
Im Jahr der Verlegung der Universität starb Thomsons Frau. 1875 baute er für sich und seine zweite Frau bei Largs ein Landhaus. Im folgenden Jahr besuchte er die denkwürdige Ausstellung in Philadelphia, an der *Bell* der Welt sein Telefon vorführte. An der Elektrizitätsausstellung in Paris von 1881 und am dortigen Kongress vertrat Thomson Grossbritannien. Er bezeichnete die englischen Masse als absurd, komisch und zeitraubend und setzte sich schon damals energisch, aber leider erfolglos für die Einführung des metrischen Systems in England ein.

1892 wurde Sir William in den Peerstand erhoben unter Verleihung des Titels Baron Kelvin of Largs, oder kurz Lord Kelvin.

Am 3. Juni 1898, ein Jahr vor seinem Rücktritt, gab er als erster bei der Marconi Wireless Company ein bezahltes Telegramm nach den USA auf und markierte damit den Übergang zu einem neuen Zeitalter.

Seine letzten Jahre verlebte Lord Kelvin, dem zu Ehren die absoluten Temperaturen in «Grad Kelvin» angegeben werden, schwer geplagt von Neuralgien, in seinem Landhaus. Kurz nach der Rückkehr von einer Kur im September 1907 erlitt seine Frau einen lähmenden Schlaganfall. Das setzte dem alten Herrn dermassen zu, dass seine Kräfte rapid abnahmen. Am 17. Dezember 1907 starb er; seine sterbliche Hülle ruht in der Westminsterabtei zu London.

H. Wüger



Union internationale des Télécommunications (Genève)