

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 67 (1976)

**Heft:** 2

**Artikel:** Statikelektrizität in der Anwendungstechnik

**Autor:** Prinz, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915105>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

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



### Statikelektrizität in der Anwendungstechnik

Von H. Prinz

#### 1. Einleitung

Manche Erfahrung spricht dafür, dass im ereignisreichen Ablauf eines einstigen Experimentierens mit Statikelektrizität ein allererstes Bemühen erkennbar gewesen ist, ihre oft bestaunten Wirkungen nützlichen Zwecken zuzuführen. Wenn gleich in dieser Hinsicht über viele Jahrzehnte hinweg nur sehr bescheidene Erfolge zu verzeichnen waren, so hat dieses Nützlichkeitsdenken doch dazu beigetragen, die Statikelektrizität im Geschehen ihrer dienstbaren Kräfte zur Geltung zu bringen und manchen Naturgelehrten jener Zeit von der Notwendigkeit zu überzeugen, den Nutzen des elektrischen Fluidums bevorzugen zu ergründen.

Im weiteren Ablauf der Ereignisse konnte es demzufolge nicht ausbleiben, dass die Statikelektrizität nach und nach als vorzüglich handhabbares Mittel angesehen wurde und mancher ihrer Effekte in einer Zeit vor etwa 200 Jahren als besitzenswertes Requisite nützliche Anwendung finden konnte [28]<sup>1)</sup>. So hatte sich damals der Registrator *Johann Friedrich Hartmann* aus Hannover zum Zwecke unterhaltsamen Vergnügens ein Glockenspiel ausgedacht [3], das dergestalt zugerichtet war, dass neun harmonisierende Glocken auf einem Holzbrett ruhten, in der Mitte die Grösste auf einem gläsernen Gefäss befindlich, die über eine metallene Kette mit Elektrizität beladen werden konnte (Fig. 1). Sobald dies geschah, bewegten sich die an Seidenfäden hängenden Messingkugeln rhythmisch hin und her und verursachten ein abwechslungsreiches und zugleich klangvolles Geläute, von dem der Registrator meinte, dass es die anwesenden Personen in eine Art von Betäubung versetzte und sie zuweilen höchst vergnüglich stimmte. Als gleichermassen dienlich wurde ein vom Londoner Astronomen und Maler *James Ferguson* erbautes Planetarium angesehen [6]. Als besonders schätzenswert wurden Tischfeuerzeuge nach der Manier des Basler Bürgers *Fürstenberger* betrachtet, die mit einer im Bodenkasten eingebauten Elektrophor-Zündung versehen waren und oftmals auch künstlerische Gestaltung erfahren haben (Fig. 2).

537.2; 621.319

In dem uns heute umgebenden technischen Geschehen ist die Statikelektrizität aus der Sicht ihrer Nützlichkeit weit über den Rahmen jener Zeit hinausgewachsen und in der modernen Anwendungstechnik in zweierlei Hinsicht zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel geworden. Einerseits vermittelt sie uns die Möglichkeit, hohe und höchste Spannungen unmittelbar aus mechanischer Energie zu erzeugen, ohne den Umweg über das elektromagnetische Feld, wodurch raum- und gewichtsparende Anlagen verwirklicht werden, die in der Hochenergiephysik und Hochspannungsprüftechnik sowie in der Elektromedizin eine bedeutsame Anwendung gefunden haben. In dieser Beziehung hat die Statikelektrizität heute eine einmalige Position, insofern sie als bisher einzige Elektrizitätsart die 20-MV-Grenze erreicht hat. Alles spricht dafür, dass in nicht allzu ferner Zeit Anlagen für eine Betriebsspannung von 50 bis 60 MV verfügbar sind. Vielleicht könnte eines Tages der Wunschraum von einer elektrostatischen Maschine für 100 MV und damit für eine Spannung Wirklichkeit werden, die bisher nur einem Wolkenspeicher im Naturgeschehen eines Gewitters vorbehalten geblieben war.

Andrerseits sind der Statikelektrizität wirkungsvolle Prinzipien eigen, deren Nutzung zu einer Vielfalt technologischer Prozesse geführt haben, die beim Abscheiden und Trennen oder beim Beschichten und Zerstäuben oder beim Drucken und Kopieren in irgendeiner Form eine mitunter entscheidende Rolle spielen, und die sich ebenso bei der Konservierung von Elektrizität wie auch bei der Verwirklichung eines für kleine Schubkräfte geeigneten Ionen- und Kolloidantriebes erdnaher Satelliten bewährt haben. Im Verlauf der letzten Jahre konnte ein elektrostatischer Drucker entwickelt werden, der sehr viel schneller als die bisher bekannten Druckverfahren arbeitet, und dies praktisch geräuschlos. Höchst erstaunlich sind auch die bei Teilchenauf Ladungen wirksam werdenden elektrostatischen Kräfte, die unter optimierten Bedingungen das Einmillionenfache der Schwerkraft erreichen können.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

All dies sollte Anlass genug sein, im Anschluss an die Veröffentlichung über die Statikelektrizität als Gefahr [28] – als der Thematik der *ungewollten* Aufladungen – nunmehr einem grösseren Leserkreis auch die Probleme einer modernen Statikelektrizität aus der Sicht ihrer Anwendungstechnik – als der Thematik der *gewollten* Aufladungen – möglichst einprägsam vorzustellen. Im Rahmen der folgenden Betrachtungen werden zuerst jene Probleme behandelt, die mit der Erzeugung hoher Gleichspannungen zusammenhängen, wobei der besseren Übersicht wegen einige Betrachtungen über das Prinzip der dabei angewandten Energiewandlung vorangestellt werden sollen. Anschliessend wird der Unterschied zwischen Gradienten- und Coulomb-Kraft herausgestellt und ein Überblick über jene Technologien gegeben, in deren Funktionsablauf statische Aufladungen eine Rolle spielen. Nachdem die überwiegende Anzahl dieser Effekte im wesentlichen darauf beruht, dass Stoffteilchen durch die Wirksamkeit des elektrischen Feldes in eine bestimmte Richtung bewegt und dann auf Objekte der verschiedensten Art abgeschieden werden, schien es sinnvoll zu sein, die sich dabei abspielenden Vorgänge vorweg zu erläutern. Darüber hinaus sollen einige Themen anhand von Demonstrationen und nützlichen Erfahrungen erläutert werden.

## 2. Erzeugung hoher Gleichspannungen

### 2.1 Das Prinzip der Energiewandlung

Bei den im folgenden näher zu besprechenden Hochspannungsgeneratoren handelt es sich um Energiewandler, die mechanische Energie unmittelbar in elektrische Energie umzusetzen vermögen. Ihrem prinzipiellen Aufbau nach können derartige Wandler als ein Dreikomponentensystem angesehen werden, das einen Injektor für die Ladungserzeugung, ein Trägermedium für die Ladungstrennung und einen Kollektor für die Ladungssammlung umfasst. Das Trägermedium wiederum kann bestehen aus einem Metallschild (Elektrophor), einem Isolierband (Bandgeneratoren) oder einer Isolierkette (Pelletron, Laddertron), einem Isolierzylinder (Trommelgenerator) oder einem Fluidum entweder als polare Isolierflüssigkeit (Polarfluid-Generator) oder als Trägergas hoher Geschwindigkeit (Jet-Generator).

Das entscheidende Bauelement solcher Energiewandler ist somit das Trägermedium, das durch seine elektrische Beanspruchbarkeit und seine Dielektrizitätskonstante die maximal mögliche Energiedichte bestimmt, die sich bei einer Homogenfeldstärke von 30 kV/cm in Luft von Atmosphärendruck zu rund 40 Ws/m<sup>3</sup> errechnen lässt. Dieser Wert entspricht einem Luftspaltfeld mit einer magnetischen Flussdichte von 0,01 T, während im Elektromaschinenbau tatsächlich mit Flussdichten von 1 T gearbeitet wird, was der 10000fachen Energiedichte des elektrischen Feldes gleichkommt. In dieser Gegenüberstellung dokumentiert sich die Problematik des Baues von Elektrostatikgeneratoren hoher Energiedichte, wofür sich dem Prinzip nach die folgenden zwei Möglichkeiten anbieten:

- Erhöhung von  $E$ : Druckgas von 10 bis 30 bar: Faktor 100
- Erhöhung von  $\epsilon_r$ : Polarflüssigkeiten wie Nitrobenzol ( $\epsilon_r = 35,7$ ) oder Äthylalkohol ( $\epsilon_r = 25,8$ ). Schwierig ist, den Isolationswider-

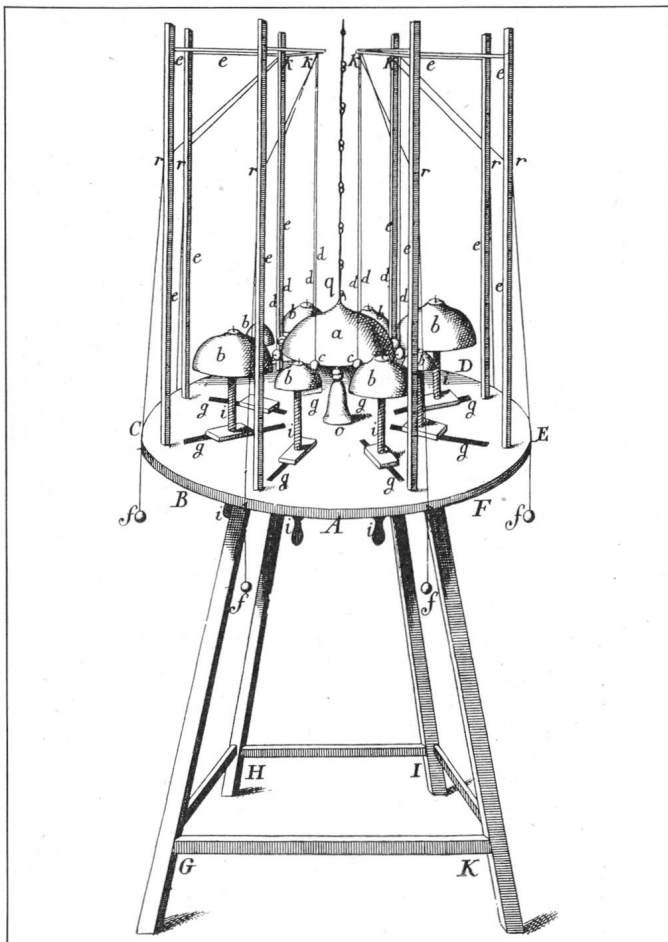


Fig. 1 1759: Elektrisches Glockenspiel nach Johann Friedrich Hartmann [3]

- |                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| A bis F Holzbrett               | f Bleikugeln als Gegengewicht |
| G bis K Fussgestell             | g Schlitze und Schieber       |
| a Grosse Glocke                 | i Holzschrauben               |
| 7 Zoll Durchmesser, 3 Zoll tief | o Gläsernes Gefäss            |
| b Glocken verschiedener Grösse  | q Kette                       |
| c Messingkugeln                 |                               |
| d Seidenfäden                   |                               |
| e Winkelstäbe                   |                               |



Fig. 2 Um 1780: Elektrisches Tischfeuerzeug nach Fürstenberger mit Elektrophor-Zündung im Bodenkasten. Künstlerische Gestaltung mit Romeo und Julia (Deutsches Museum)

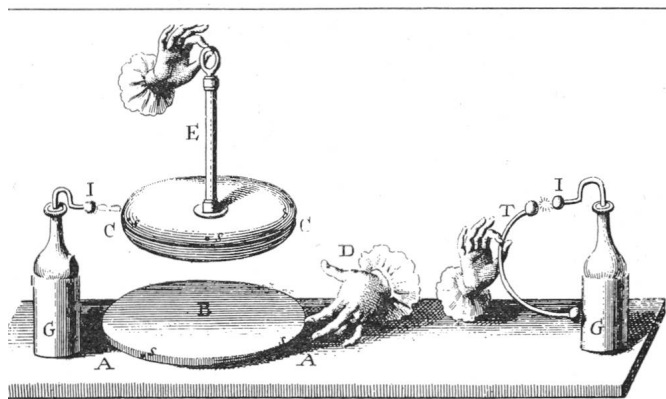


Fig. 3 1775: Alessandro Voltas Elettroforo Perpetuo [7]

- |              |                    |
|--------------|--------------------|
| AA Teller    | G Leydener Flasche |
| B Harzkuchen | I Hacken           |
| C Schild     | T Funkenzieher     |
| E Griff      |                    |

tand auf  $> 10^{11}$  Ohm · cm anzuheben und diesen Wert im Betrieb u halten: Faktor 250

– Wunschtraum wäre ein ferro-elektrisches Medium mit  $\epsilon_r = 1000$  md hoher elektrischer Festigkeit.

Obwohl in dieser Hinsicht mancher Fortschritt erzielt werden konnte, hat bisher nur die Druckgasisolation technische Anwendung gefunden.

Neben der Energiedichte ist die Leistungsdichte von Be-leutsamkeit, in die zusätzlich die Geschwindigkeit des Träger-mediums mit eingeht.

### 1.2 Elettroforo Perpetuo

Im Jahr 1775 verfasste *Alessandro Volta*, damals Gymnasial-lehrer für Physik in Como, ein Sendschreiben an den gräflichen Hauslehrer in London, *Joseph Priestley*, das er in der *Scelta di Opuscoli interessanti di Milano* veröffentlichen liess [7], worin er erstmalig von einer Gerätschaft berichtete, mit deren Hilfe leuchtende Funken hervorrufbar seien. *Volta* beschreibt diese Gerätschaft dergestalt (Fig. 3), dass eine aus Terpentin, Kolophonium und Wachs bestehende Harzmischung nach dem Kochen auf einen zinnernen Teller zu giessen sei, wonach sich nach dem Erkalten eine glatte und glänzende Oberfläche bilde. Darüber befinde sich ein mit Goldpapier überzogener Holzschild mit einem Handgriff aus Glas und Siegellack. Das Experiment vollzieht sich dann in der Weise, dass der vorher elektrisch gemachte Harzkuchen auf dem Schild Ladungen induziert, von denen die auf der Schildoberseite sitzenden gleichnamigen Ladungen durch ein kurzzeitiges Berühren zur Erde abgeleitet werden, während die ungleichnamigen Ladungen nach dem Abheben des Schildes durch einen zur Leydener Flasche überspringenden Funken zur Wirksamkeit kommen können. Dieser Vorgang lasse sich beliebig oft wiederholen, bemerkte er abschliessend, und wenn es nicht missfalle, möchte er seiner kleinen Gerätschaft den Namen *Elettroforo Perpetuo* geben.

Es hat nicht lange gedauert, bis diese kleine Gerätschaft, deren Form- und Namengebung das unbestreitbare Verdienst von *Volta* geblieben ist, zu dem unerlässlichen Bestand der damaligen Experimentierkabinette gehörte. Später haben sich hieraus allererste Formen von Elektrisiermaschinen entwickelt, wohl aus der Überlegung heraus, die Anhäufung von Elektrizität auf diese Weise wirkungsvoller zu gestalten.

Aber selbst heute noch kann dieses Gerät als nützliches Requisite vor allem im Lehrbetrieb angesehen werden, weil sich

daran der besprochene Aufladevorgang überzeugend vorführen lässt. Für eine derartige Demonstration kann eine geerdete Metallplatte als Teller, eine PVC-Platte als Harzkuchen und eine Messingscheibe als Schild dienen (Fig. 4). Wie im historischen Versuch, lässt sich nach jedem Abheben des Schildes der Leydener Flasche erneut Elektrizität zuführen, deren Menge sich aus der am Hochspannungsvoltmeter ablesbaren Spannungszunahme als

$$Q = (C_1 + C_2) \cdot \Delta U = (1700 + 30) \cdot 10^{-12} \cdot 700 = 1,2 \mu\text{C}$$

ermitteln lässt. Nachdem sich während des Abhebvorganges die Schild/Teller-Kapazität von etwa 750 pF auf 15 pF verringert, folgt für die Schildspannung

$$U = \frac{1,2 \mu\text{C}}{15 \text{ pF}} = 80 \text{ kV.}$$

Damit wird erneut deutlich, dass erst durch das Einbringen mechanischer Energie – im vorliegenden Fall durch das Abheben des Schildes – hohe Spannungen wirksam werden können, die sich dann als Funken bemerkbar machen.

### 2.3 Bandgeneratoren

Erstaunlicherweise hat bereits 1784 *Walkiers de St-Amand* aus Brüssel eine Bandmaschine mit einem gefirnisserten Taftband als Trägermedium nach Fig. 5 entworfen, von der im Magazin für das Neueste aus Physik und Naturgeschichte des Jahres 1785 zu lesen ist [9], dass diese Maschine aus einem Gestell mit zwei drehbaren hölzernen Zylindern und einem darüber gezogenen etwa 1,5 m breiten Taftband bestehe und so das Aussehen eines Seidenweberstuhles habe. Zum Abnehmen der erregten Elektrizität könne entweder ein mit Spitzen versehener negativer

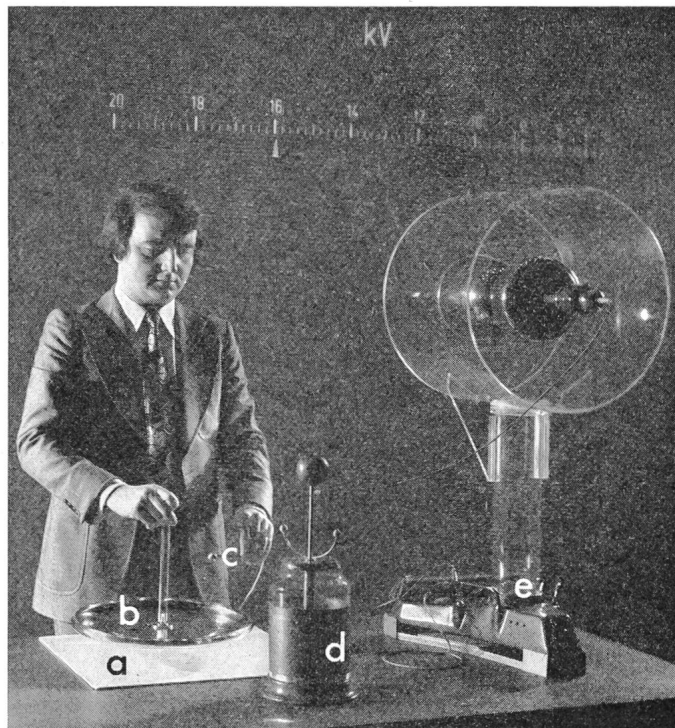


Fig. 4 Demonstration eines Elektrophors

- a Geerdete Metallplatte (Teller) mit darauf befindlicher 3 mm starker PVC-Platte (Harzschicht)
- b Messingscheibe (Schild) mit Isoliergriff
- c Erdungselektrode
- d Leydener Flasche ( $C_1 = 1700$  pF)
- e Hochspannungsvoltmeter ( $C_2 = 30$  pF)



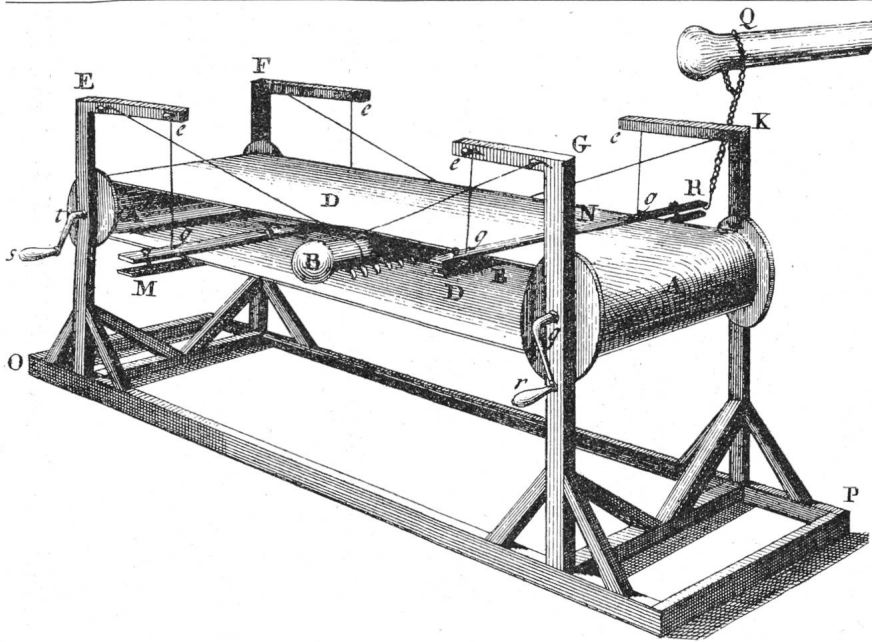


Fig. 5

Taftmaschine nach Walkiers de St. Amand [10]

- AA Hölzerner Zylinder
- B, Q Konduktoren
- D Gefirnisster Taft
- E, F, G, K Gestelle
- M, N Reibzeuge
- OP Fussgestell
- QR Konduktorkette

Konduktor oder ein am Reibzeug befestigter positiver Konduktor benutzt werden. Wie weiter zu lesen ist, konnte sich seinerzeit eine Kommission der Pariser Akademie der Wissenschaften, der damals auch *De La Place* angehörte, von der Wirkungskraft dieser Maschine anhand einiger Experimente überzeugen, wobei Funken bis zu 40 cm Länge herausziehbar waren, so dass es kein Kommissionsmitglied wagte, soviel Elektrizität mit eigenen Händen zu entnehmen. Als versucht wurde, eine grosse Leydener Flasche damit aufzuladen, ist diese gleich im ersten Augenblick von der Gewalt der Elektrizität zerschmettert worden.

Verständlicherweise hat der effektvolle Ausklang der damaligen Experimente mit dazu beigetragen, dass die Taftmaschine *Walkiers* mit grossem Beifall beehrt worden ist. Ungeachtet dieses Erfolges ist es aber in der Folgezeit um solche Maschinen sehr ruhig geworden, bis der Zeitpunkt zu neuerlichem Überdenken gekommen war.

Ein solches Überdenken hat sich als notwendig erwiesen, als in den dreissiger Jahren die Hochenergiephysiker mit Teilchenbeschleunigern im MV-Bereich experimentieren wollten, zu deren Verwirklichung neben Greinacherkaskaden vor allem Bandgeneratoren hervorragend geeignet zu sein schienen. Von dieser Idee begeistert, hat sich *Robert J. van de Graaff* intensiver mit dieser Thematik befasst, so dass im Jahre 1931 eine Erstanlage in Zweisäulenbauweise für 1,5 MV fertiggestellt werden konnte. Bereits 2 Jahre später folgte – unter Mitwirkung von *John G. Trump* – der Round Hill Generator, der in seiner positiven Säule 2,4 MV und in seiner negativen 2,7 MV

zuverlässig abzugeben vermochte, somit zwischen den Elektroden 5,1 MV. Schon damals sind die Grenzen einer unter Atmosphärendruck arbeitenden Bandmaschine klar erkennbar gewesen, so dass damit der Weg zur Technik der Drucktankgeneratoren freigeworden war, wodurch die Leistungsdichte um den Faktor 100 auf einige  $W/cm^2$  angehoben werden konnte.

In den ersten Nachkriegsjahren ist es dann vor allem die damals neu gegründete *High Voltage Corporation* gewesen, die sich um die Weiterentwicklung von Bandgeneratoren in Hinsicht auf höhere Spannungen und damit höher erreichbare Teilchenenergien bemüht hat. In diesem Zusammenhang konnte erstmals der Gedanke verwirklicht werden, das zu beschleunigende Teilchen die vorgegebene Spannung zweimal durchlaufen zu lassen, zuerst in Richtung auf die Hochspannungselektrode und dann – nach einer dort vorgenommenen Umpolarisation des Teilchens – von der Hochspannungselektrode weggerichtet. Eine erste Ausführungsform der nach diesem Prinzip arbeitenden Tandemmaschinen ist im Jahre 1958 gebaut worden, und bald folgten auf diese erste 5-MV-Maschine – vor allem für die Schwerionen-Forschung – Anlagen für 6 und 10 MV und später sogar für 20 MV. Im englischen *Daresbury Nuclear Physics Laboratory* ist derzeit eine Tandemmaschine für 30 MV im Bau, die in einem 70 m hohen Turm untergebracht wird [26]. Tabelle I soll eine Vorstellung von den Abmessungen solcher Tandemanlagen vermitteln, die inzwischen zu einem hochwertigen Instrument einer modernen Kernphysik geworden sind.

Tabelle I

Elektrodenpotential	10 MV	20 MV	30 MV
Druckgas	N <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> , 16 bar	SF <sub>6</sub> , 8 bar	SF <sub>6</sub> , 8 bar
Tankdurchmesser	5,5 m	7,6 m	8,14 m
Elektroden Durchmesser	1,9 m	1,9 m	2,72 m
Elektrodenlänge	2,5 m	3,1 m	4,5 m
Länge der Beschleunigungssäule	2 × 7,3 m	2 × 9,1 m	2 × 13,8 m
Spezifische Säulenlänge	0,73 m/MV	0,46 m/MV	0,46 m/MV
Tanklänge	24,7 m	30,4 m	45,2 m
Gewicht der Maschine	200 t	345 t	ca. 1100 t
davon Gasfüllung	6,5 t	65 t	120 t
Anordnung	horizontal	horizontal	vertikal

Dazu vermittelt Fig. 6 einen Einblick in den Tank einer 16-MV-Maschine mit der darin befindlichen Beschleunigungssäule. Bei einer Bandbreite von 0,5 m und einer Bandgeschwindigkeit von 15 m/s liegt der ihr entnehmbare Strom bei etwa 1 mA.

Um eine bessere Ladekonstanz solcher Maschinen in Verbindung mit einem günstigeren Betriebsverhalten zu erreichen, ist in jüngster Zeit das klassische Isolierband durch mehrere parallel geschaltete Ketten – Pelletrons – ersetzt worden, die aus kleinen Metallzylindern mit dazwischen liegenden Isolierstücken bestehen. Für die *Daresbury*-Maschine wurde als Variante ein Laddertron nach Fig. 7 entwickelt, das nach Art einer endlosen Leiter aus Metallsprossen mit isolierenden Verbindungsstücken aufgebaut ist. Die Geschwindigkeit dieses mechanisch stabileren Trägermediums liegt wie bei klassischen Bandgeneratoren um 15 m/s.

Trotz dieser ausgeprägten Tendenz, Bandmaschinen in zunehmendem Masse auf Extremspannungen auszurichten, hat diese Art von Generatoren auch in einem Spannungsbereich einiger 100 kV nützliche Anwendung gefunden, vor allem im Lehrbetrieb, weil sich damit manches Experiment in einfacher und zugleich anschaulicher Weise verwirklichen lässt.

#### 2.4 Trommelgeneratoren

Wohl der Gedanke, dass es sinnvoll sein könne, das endlose Trägermedium eines Bandgenerators durch einen Isolierzylinder zu ersetzen, mag den Grenobler Professor *Noël Felici* in den fünfziger Jahren mit dazu bewogen haben [14], die Entwicklung eines Trommelgenerators zu initiieren, der heute in Druckgasausführung für einen Anwendungsbereich von 50 kV/15 mA bis zu 700 kV/3 mA zur Verfügung steht und mit einem Zylinderdurchmesser von 0,5 m sogar die erstaunliche Grenze von 1000 kV/5 mA erreicht hat. Die Wirkungsweise ist so, dass dem als Trägermedium wirkenden Kunststoffzylinder auf der einen Hälfte beispielsweise Minusladung aufgesprüht wird, die dann auf der Hochspannungsseite durch einen Kollektor abgenommen werden muss. Innerhalb des Kunststoffzylinders befindet sich zum Zwecke der Spannungsvergleichmässigung ein etwas leitfähiger Steuerring. Um die

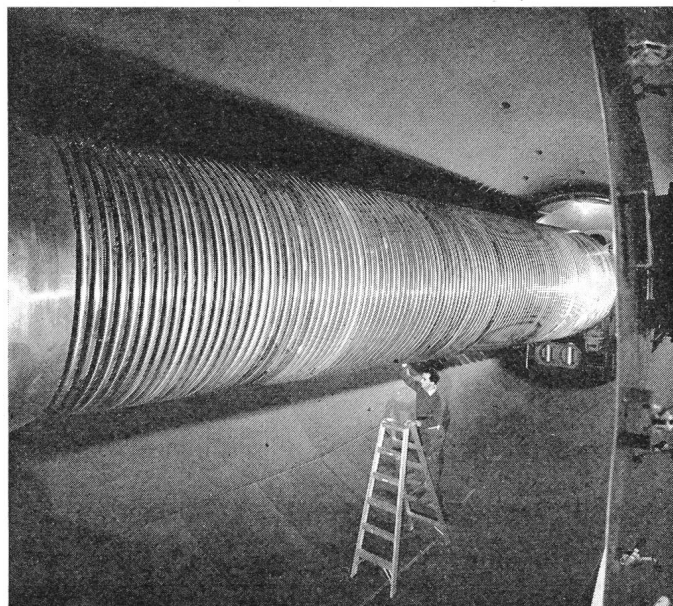


Fig. 6 Beschleunigungssäule einer 16-MV-Tandemaschine mit SF<sub>6</sub>-Füllung von 8 bar

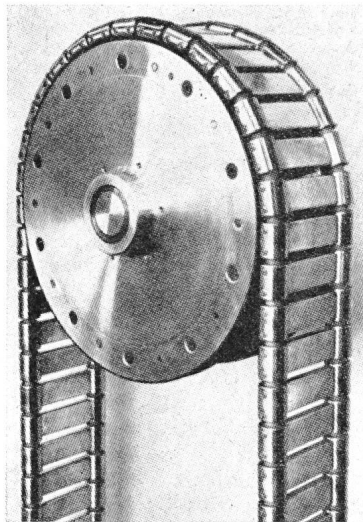


Fig. 7 Laddertron mit Antriebsrad für die 30-MV-Daresbury-Maschine [26]

Leistungsdichte zu erhöhen, wird der gesamte Mechanismus in einen Druckzylinder eingebracht, der mit Wasserstoff von etwa 15 bar gefüllt ist. Dies bietet zugleich den Vorteil erhöhter Wärmeleitfähigkeit und geringerer Reibungsverluste. Damit sind wie im Falle von Bandgeneratoren Leistungsdichten in der Größenordnung einiger W/cm<sup>2</sup> erreichbar, die aber immer noch um den Faktor 1000 kleiner sind als jene eines magnetischen Energiewandlers in Form eines grossen Turboläufers mit Wasserstoffkühlung.

#### 2.5 EFD-Generatoren

Bei dieser Sachlage wird das stete Bemühen verständlich, elektrostatische Generatoren zu entwickeln, bei denen als Trägermedium entweder eine polare Isolierflüssigkeit oder ein Trägergas, vorzugsweise im Überschallbereich, zum Einsatz kommt mit dem Ziel, auf diese Weise die Leistungsdichte an jene eines magnetischen Wandlers heranzuführen (EFD *Electro-Fluid Dynamics*).

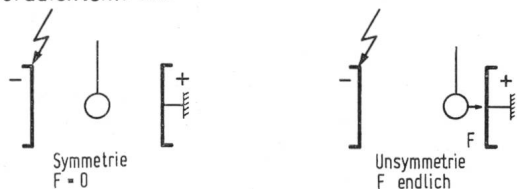
Ein erster Lösungsweg besteht darin, als Trägermedium eine polare Flüssigkeit zu verwenden, die jedoch ein solches Isoliervermögen besitzen muss, dass nach dem Hinwegströmen eines Flüssigkeitsteilchens der Geschwindigkeit  $v$  über die Isolierstrecke  $a$  – dem Abstand zwischen Hochspannungs- und Erdpotential – möglichst wenig Ladung abwandern kann, was dann der Fall ist, wenn für die Relaxationszeit  $\tau > a/v$  gilt oder für den Isolationswiderstand

$$\varrho > \frac{a}{v \cdot \varepsilon}$$

wird. Mit  $a = 1$  m und  $v = 10$  m/s ergibt sich für Nitrobenzol ( $\varepsilon_r = 35,7$ ) ein Isolationswiderstand  $\varrho > 3 \cdot 10^{10}$  Ohm · cm. Da polare Flüssigkeiten von Natur aus ionenleitend sind, müssen besondere Anstrengungen unternommen werden, um so hohe Isolationswiderstände zu erreichen, was nur durch eine hochwertige Reinigung in Elektrodialysezellen gelingt. Noch schwieriger ist es, das gute Isoliervermögen im Betrieb aufrechtzuerhalten. Immerhin ist es in Grenoble gelungen, ein ionenfreies Nitrobenzol von  $10^{12}$  Ohm · cm mit einer Durchschlagfestigkeit von 400 kV/cm herzustellen, wodurch Leistungsdichten von 40 W/cm<sup>2</sup> erreicht werden konnten – das ist ein Faktor 40 gegenüber Drucktankgeneratoren.

Ein zweiter Lösungsweg, die Leistungsdichte zu erhöhen, kann darin gesehen werden, als Trägermedium einen Gasstrom im Überschallbereich zu verwenden. Nach eingehenden Ver-

### Gradientenkraft:



### COULOMB-Kraft:

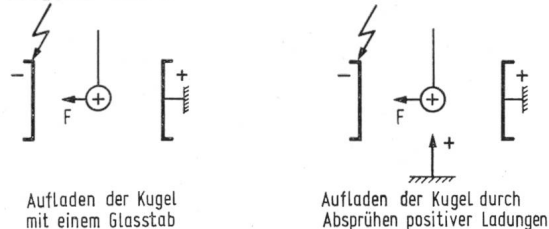


Fig. 8 Gradienten- und Coulomb-Kraft

suchen von *Decaire* [23] hat sich nämlich gezeigt, dass die Leistungsdichte mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit des Trägermediums ansteigt, so dass mit  $v = 470 \text{ m/s}$  und Wasserstoff von 20 bar eine Leistungsdichte von  $750 \text{ W/cm}^2$  erreicht werden konnte. Damit hat der Jet-Generator praktisch die Leistungsdichte eines magnetischen Wandlers erreicht, was seine technischen Aspekte interessant erscheinen lässt.

## 3. Technologische Effekte

### 3.1 Ladungsinjektion

Die überwiegende Anzahl technologischer Effekte beruht im wesentlichen darauf, dass Stoffteilchen unter der Wirkung des elektrischen Feldes in einer bestimmten Richtung bewegt und dann auf Objekten der verschiedensten Art abgeschieden werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich die Kraftwirkung erheblich verstärken lässt, wenn die Teilchen vorher durch einen Injektor aufgeladen werden, wozu eine Koronastrecke oder eine Sprühdüse nützlich sein kann. Als Stoffteilchen können in Frage kommen:

- die in Abgasen enthaltenen Staubteilchen von Kraftwerken, Zementfabriken, Hüttenwerken oder chemischen Betrieben
- der in der Nahrungsmittelindustrie anfallende Nutzstaub wie Stärkemehl, Puddingpulver, Puderzucker oder Kakao
- die beim Beschichten verwendeten Farbpulver
- die in der Kunststoffindustrie hergestellten pulverisierten Artikel
- der in der Textilindustrie auf Trägergewebe oder Trägerfäden aufzubringende Flok
- die in der Landwirtschaft benutzten Pflanzenschutzmittel.

Die Grösse dieser Teilchen überdeckt einen ziemlich grossen Bereich von etwa  $0,01$  bis  $100 \mu\text{m}$ , wobei nicht übersehen werden sollte, dass die Oberfläche der Teilchen umgekehrt proportional mit dem Teilchenradius zunimmt und im Falle von  $1 \mu\text{m}$ -Teilchen bereits die Grössenordnung von  $3000 \text{ m}^2/\text{kg}$  Stoff erreicht.

In der sich anschliessenden Bewegungsphase werden die aufgeladenen Stoffteilchen durch das elektrische Feld beschleunigt – und sofern dieses Feld wirksam genug ist und die Massenkräfte als vernachlässigbar angenommen werden können – in Richtung dieses Feldes bewegt, um dann an der Oberfläche einer Elektrode oder eines zu beschichtenden Objektes abgeschieden zu werden.

### 3.2 Gradienten- und Coulomb-Kraft

Innerhalb eines elektrischen Feldes können zwei in der Verursachung voneinander verschiedene Kräfte wirksam sein: Einmal kann es eine Kraft sein, die durch das Einbringen eines metallischen oder dielektrischen Körpers in das elektrische Feld und die dadurch verursachte Änderung der elektrischen Energie  $W_e$  zur Wirksamkeit kommt und sich demgemäss als eine Gradientenkraft zu

$$\vec{F} = - \text{grad } W_e$$

bestimmen lässt, die immer in Richtung des stärkeren Feldes wirkt. Es ist einleuchtend, dass diese Gradientenkraft nur in einem unsymmetrischen Feld auftreten kann und in einem Symmetriefeld zu Null werden muss. Zum anderen kann es eine Kraft sein, die sich aber nur an aufgeladenen Körpern zu äussern vermag und deren Grösse sich nach der aus dem Coulombschen Gesetz ableitbaren Grundgleichung

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

bestimmen lässt mit  $Q$  als der dem Körper aufgeprägten Ladung und  $E$  als der darauf einwirkenden elektrischen Feldstärke. Diese Coulomb-Kraft kommt auch in einem symmetrischen Feld zur Wirksamkeit, sobald Ladungen durch Abstreifen oder Absprühen auf den im Feld befindlichen Körper gebracht werden. Diese Gegenüberstellung der beiden Kräftearten lässt sich sehr eindrucksvoll anhand eines Experimentes demonstrieren (Fig. 8), indem in ein Plattenfeld von einigen  $\text{kV/cm}$  Feldstärke eine metallisierte Styroporkugel von etwa  $10 \text{ cm}$  Durchmesser an einem Nylonfaden hängend eingebracht wird. Dabei zeigt sich auch, dass die Coulomb-Kraft sehr viel grösser ist als die Gradientenkraft.

Für die folgenden Betrachtungen werde angenommen, dass innerhalb eines Homogenfeldes der Feldstärke  $E_{\text{hom}}$  eine ungeladene dielektrische Kugel der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_2$  in einem gasförmigen Dielektrikum der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_1$  durch positive Ionen aufgeladen werde. Im ungeladenen Ausgangszustand stellt sich zunächst eine Feldverteilung ein, die aus Gründen ihrer Symmetrie keinerlei äussere Kraftwirkung auf die Kugel auszuüben vermag (Fig. 9 links) und die – was nicht unerwähnt bleiben sollte – bereits vor über 100 Jahren von *William Thomson*, dem späteren *Lord Kelvin*, exakt berechnet worden ist [13]. Sobald sich jedoch die Kugel aufzuladen beginnt, wird das elektrische Feld zunehmend unsymmetrischer, indem immer mehr Feldlinien von der Kugel weggeführt werden und immer weniger dort enden, so dass nunmehr eine Coulomb-Kraft in Richtung des stärkeren Feldes zu wirken beginnt (Fig. 9 Mitte). Im weiteren Verlauf des Ladevorganges wird schliesslich ein Zustand erreicht, in dem nur noch Feldlinien von der Kugel weggeführt werden und keine Feldlinien mehr dort endigen, was dann der Fall ist, wenn die Feldstärke im oberen Scheitelpunkt der Kugel Null geworden ist. Dann können auch keine Ladungsträger mehr die Kugel erreichen: Die Kugel ist somit vollständig positiv aufgeladen (Fig. 9 rechts). Die sich dabei einstellende maximale Ladung folgt auf Grund feldtheoretischer Überlegungen zu

$$Q_{\text{max}} = \frac{12 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \epsilon_1 \cdot E_{\text{hom}}}{1 + 2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$

mit  $r$  als dem Kugelradius. Für die dazugehörige maximale Coulomb-Kraft wird  $\vec{F}_{\text{max}} = Q_{\text{max}} \cdot \vec{E}_{\text{hom}}$ .

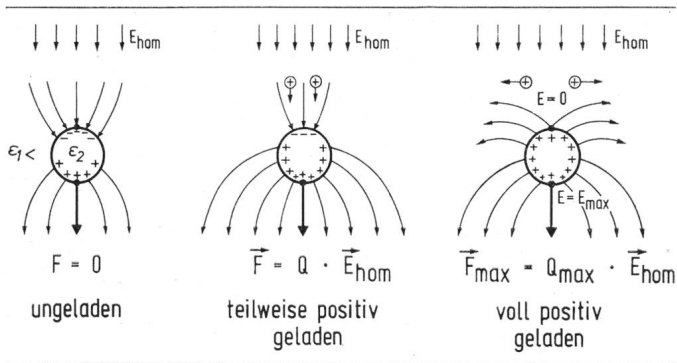


Fig. 9 Elektrisches Feld einer Kugel im Homogenfeld

Erwartungsgemäss nimmt das Kräfte maximum mit dem Quadrate der wirksamen Feldstärke zu und erreicht seinen grössten Wert für eine Metallkugel, für die die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_{r2} = \infty$  und damit  $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0$  wird. Für dielektrische Kugeln liegt das Maximum um etwa 30 bis 50% tiefer.

Besonders eindrucksvoll dokumentiert sich die Coulombkraft in einem Vergleich mit der Massenkraft kleinster Stoffteilchen, für den bei angenommener Kugelform die Beziehung

$$\frac{|F_{\text{max}}|}{F_m} = \frac{9 \cdot \epsilon_1 \cdot E_{\text{hom}}^2}{\left(1 + 2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right) \cdot r \cdot \rho_m \cdot a}$$

gilt, mit  $\rho_m$  als der Massendichte des Teilchens und  $a$  als dessen Beschleunigung. Daraus folgt, dass die Coulombkraft gegenüber der Massenkraft um so mehr überwiegt, je kleiner der Teilchenradius wird. So würde sich beispielsweise für ein dielektrisches Teilchen von  $1 \mu\text{m}$  Radius eine Coulomb-Kraft ergeben, die bereits 3600mal grösser ist als die Schwerkraft, sofern mit Feldstärken von  $10 \text{ kV/cm}$  gearbeitet wird. Dieser Effekt hängt damit zusammen, dass die Massenkraft eine Volumenkraft ist, während sich die Coulombkraft als Oberflächenkraft äussert.

In diesem Zusammenhang erhebt sich abschliessend noch die Frage, inwieweit innerhalb eines technischen Bereiches von diesen kaum vorstellbaren Kräften Gebrauch gemacht werden

kann. Dazu muss überlegt werden, welche maximale Feldstärke für den jeweils vorliegenden Fall noch als zulässig angesehen wird. In dieser Hinsicht folgt zunächst feldtheoretisch für die bei einer  $Q_{\text{max}}$ -Aufladung zu erwartende Maximalfeldstärke im unteren Scheitelpunkt des kugelförmig gedachten Stoffteilchens

$$\frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{hom}}} = \frac{6}{1 + 2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$

so dass bei dielektrischen Stoffen mit Feldstärkeüberhöhungen von 3 bis 4 und im Sonderfall der Metalle von 6 zu rechnen ist. Die höchstmögliche Feldstärke  $(E_{\text{hom}})_a$  wird aber letztlich durch die Anfangsfeldstärke  $E_a$  begrenzt, das ist jene Feldstärke, bei der die Stoffteilchen beginnen, wieder Ladung an die Umgebung abzugeben, weshalb

$$(E_{\text{hom}})_a = \frac{E_a}{4}$$

gesetzt werden kann, wenn die Feldstärkeüberhöhung zu 4 angenommen wird. Die Anfangsfeldstärke ist nach Fig. 10 eine Funktion des Teilchenradius, woraus sich für  $r = 1 \mu\text{m}$  ein extrapoliertes  $E_a = 500 \text{ kV/cm}$  ablesen und demzufolge ein  $(E_{\text{hom}})_a = 125 \text{ kV/cm}$  errechnen lässt. Für diesen Teilchenradius ergäbe sich dann eine Coulomb-Kraft, die nahezu das Einmillionenfache der Schwerkraft betragen würde und für noch kleinere Teilchen würde diese Kraft um weitere Zehnerpotenzen grösser sein. In dieser Hinsicht scheinen sich noch bemerkenswerte Aspekte einer zukünftigen Statikelektrizität abzuzeichnen.

### 3.3 Das Elektrofilter

Eigentlich ist es erstaunlich, dass bereits um die Wende des 16. Jahrhunderts der königliche Leibarzt *William Gilbert* im Verlauf seiner Experimente über die anziehende Wirkung geriebener Elektrizität beobachtet hatte, dass Rauch eines ausgelöschten Kerzenlichtes davon angezogen wird [1]. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts hat sich dann der Turiner Professor für Experimentalphysik *Giambattista Beccaria* in seinem berühmten Buch über die künstliche Elektri-

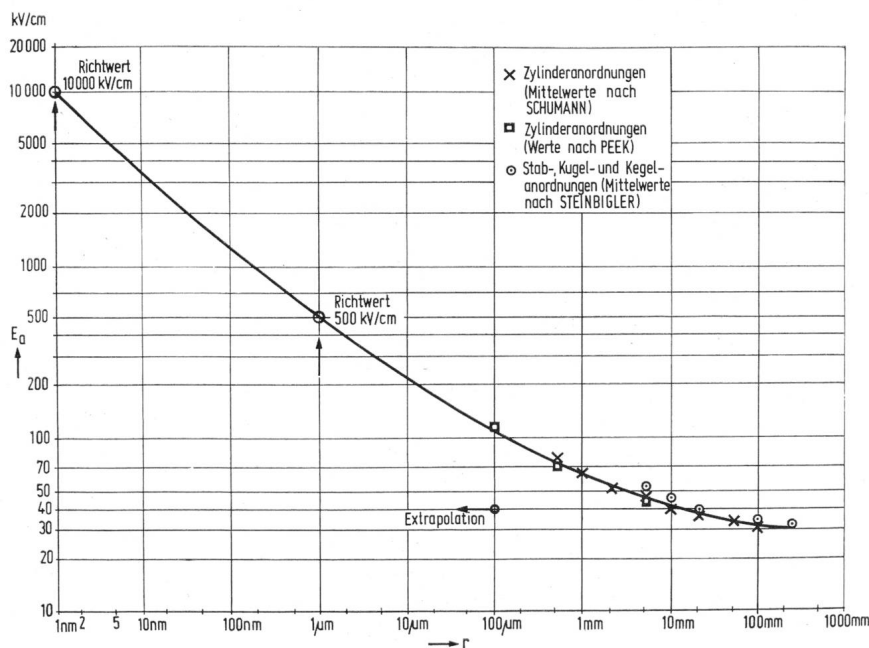


Fig. 10 Anfangsfeldstärke  $E_a$  in Abhängigkeit vom Krümmungsradius  $r$



azität eingehender mit dem Verhalten von Rauchpartikeln innerhalb eines elektrischen Feldes befasst und auch deren Bewegung studiert [5]. Doch erst 50 Jahre später findet sich ein erster Hinweis von der rauchabscheidenden Wirkung der Elektrizität in einem Beitrag des Leipziger Mathematikers *M. Hohlfeld*, der im Archiv für die gesamte Naturlehre des Jahres 1824 davon berichtete, dass in einer Glasflasche befindlicher Rauch sich in dem Augenblick niederschlägt, als ihm über eine Drahtspitze geräuschlos Elektrizität zugeführt wird [11]. Und im Jahre 1850 beschreibt der Engländer *C. F. Guillard* ein ähnliches Experiment mit einem Glaszylinder, an dessen Wandungen sich Tabakrauch kondensiert, sobald ein darin befindlicher Draht mit Elektrizität beladen wird [12].

Aber erst um die Jahrhundertwende werden erfolgreiche Initiativen erkennbar, die – mitgetragen von *Frederick Gardner Cottrell* der Universität Berkeley – zu einer leistungsfähigen Elektrofiltertechnik geführt haben [17], wobei Abscheidegrade bis zu 99,99% erreicht werden konnten, was etwa einer nicht mehr sichtbaren Staubmenge von 1 mg je Normalkubikmeter Gasvolumen<sup>2)</sup> entspricht. Die grössten Filter werden heute im Kraftwerksbau zum Zwecke der Rauchgasreinigung eingesetzt, wobei je 100 MW Kraftwerksleistung mit rund 100 Nm<sup>3</sup>/s Durchsatz zu rechnen ist.

Obwohl im Elektrofilterbau im Laufe der Zeit beachtenswerte Fortschritte erzielt werden konnten [30], bleiben noch Probleme zu lösen, um insbesondere bei hochisolierenden Staubteilchen ein besseres Abscheiden ohne die störenden Rücksprühreffekte zu erreichen und zudem Partikel unter 1 µm herauszufiltern.

### 3.4 Beschichtungseffekte

Gleichsam als Pendant zu einer neuzeitlich ausgerichteten Abscheidetechnik hat sich in allerjüngster Zeit eine elektrostatische Beschichtungstechnik in einer Reihe von Technolo-

<sup>2)</sup> 1 Normalkubikmeter = 1 Nm<sup>3</sup> bezogen auf 0 °C und 1013 mbar.

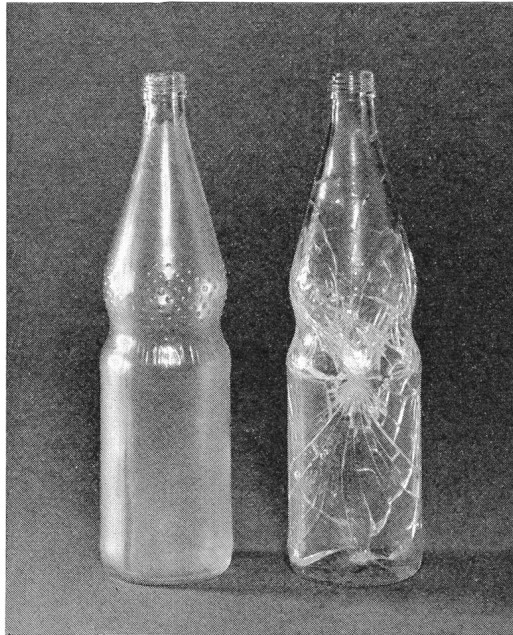


Fig. 12 Pulverbeschichtete zersplitterfreie Glasflasche

gien entwickelt, um auf diese Weise die jeweils aufzubringenden Stoffteilchen noch wirkungsvoller an das zu beschichtende Objekt heranzuführen, wodurch es möglich geworden ist, neuartige technologische Effekte zu verwirklichen oder wenigstens gewisse Qualitätsverbesserungen zu erzielen.

In der Reihe der neuen Technologien muss wohl in erster Linie das Pulverbeschichten genannt werden, das dem Prinzip nach darin besteht, die jeweiligen Farbpigmente in pulverisierter Form aufzuladen und dann auf der einzufärbenden Oberfläche möglichst gleichmässig abzusetzen. Der Vorteil dieses neuartigen Verfahrens besteht vor allem darin, dass durch das lösungsmittelfreie Beschichten ein absolut porenfreier Farbüberzug hoher mechanischer Schlag- und Biegefestigkeit erreicht wird und dass ausserdem dünne Farbüberzüge bis herunter zu 20 µm Stärke möglich sind. Die Verwirklichbarkeit einer derartigen Beschichtungstechnik hängt entscheidend davon ab, inwieweit es gelingt, die betreffenden Farbpigmente optimiert aufzuladen. Demzufolge hat beispielsweise die Firma Gema in St. Gallen eine Spritzpistole entwickelt, bei der die Farbteilchen durch eine in die Sprühdose eingebaute Vierelektrodenanordnung stark durchwirbelt und dann über eine Prallplatte verteilt werden. Dabei ist erstmalig der Gedanke verwirklicht worden, den gesamten Hochspannungsteil – bestehend aus Transformator und elektronischer Greinacher-Kaskade für 75 kV und 25 µA – in die kunststoffisolierte Pistole mit einzubauen, so dass sich das Beschichten gefahrlos und unkompliziert vollziehen lässt. In der Zwischenzeit hat die Erfahrung gelehrt, dass sich auf diese Weise beliebig geformte Objekte einwandfrei farbbeschichten lassen und dass die Farbteilchen auch in dünnste Spalte und sonstwie im Feldschatten gelegene Objekträume eindringen (Fig. 11). In Sonderfällen lassen sich ebenso nichtmetallische Objekte wie Glaskörper beschichten, woraus eine zwar zerbrechliche, aber nicht mehr zersplitterbare Glasflasche entsteht (Fig. 12). Nach allem kann kein Zweifel darüber bestehen, dass sich das Pulverbeschichten gegenüber dem klassischen Farbspritzen mehr und mehr durchsetzen wird und in diesem Sinne als Beschichtungsverfahren der Zukunft angesehen werden muss.



Fig. 11 Nach dem Gema-Verfahren pulverbeschichtete Objekte

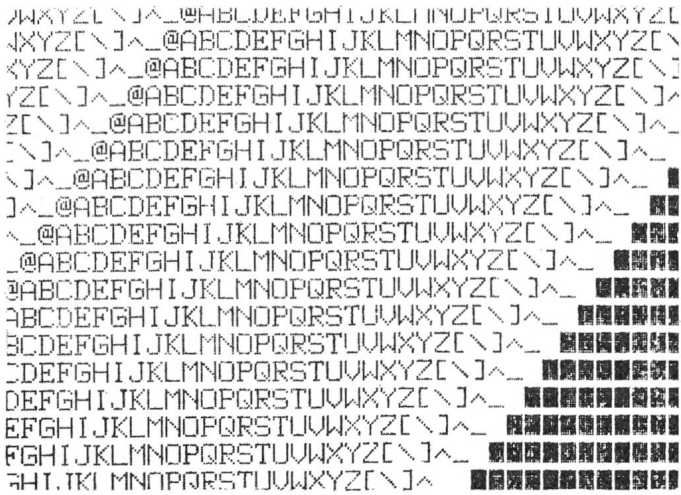


Fig. 15 Schriftbild eines elektrostatischen Gould-Schnelldruckers

Dass durch ein Aufsprühen von Ladungen tatsächlich Schriftbilder geschrieben oder Figuren gezeichnet werden können, die dann nachträglich durch Farbpartikel sichtbar werden, lässt sich auf einfache Weise mit Hilfe eines elektrischen Griffels demonstrieren (Fig. 16), mit dem Ladungen einer kleinen Elektrisiermaschine nach Massgabe der zu schreibenden Schriftzüge auf eine vorher ladungsfrei gemachte weisse PVC-Platte aufgebracht werden können. Die anschliessend aufgestäubten Farbteilchen des Toners werden dann zu diesen Ladungen elektrostatisch hingezogen und bewirken damit ein Sichtbarmachen des vorher geschriebenen Zeichens.

In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass es sich bei dieser Art des Hervorbringens von Schriftzügen um das gleiche Prinzip handelt, das im Jahre 1777 den Natur- und Geisteswissenschaftler *Georg Christoph Lichtenberg* beim Experimentieren mit einem 2 m grossen Elektrophor die später nach ihm benannten Staubfiguren entdecken liess. Eines Tages beobachtete er nämlich, dass sich auf dem Harzkuchen seines Elektrophors Staub abgesetzt hatte, der zu seinem höchsten Erstaunen an bestimmten Stellen mannigfaltig geformte Figuren hervorbrachte, die anfangs nur schwer zu erkennen waren. Doch als er dann absichtlich feinstes Schwefel- oder Harzpulver aufgestreut hatte, waren diese sehr deutlich und schön zu sehen. Diese Wunderwürdigkeit der Natur lasse sich – so meinte *Lichtenberg* – zu einer Art Geheimschrift verwenden, denn wenn mit dem Knopf einer Leydener Flasche auf der Oberfläche eines Elektrophors die verschiedenartigsten Bewegungen ausgeführt werden, so lassen sich diese nach Aufstreuen von Pulver noch nach mehreren Tagen sehr deutlich sichtbar machen [8].

### 3.7 Kopiertechnik

Zu den spektakulärsten Anwendungen der Statikelektrizität gehört das elektrophotographische Kopieren von Schriftstücken aller Art, das in einer vielgestaltigen Apparatechnik weltweite Verbreitung gefunden hat. Auch bei dieser Technik spielt das Aufsprühen und Sichtbarmachen von Ladungen sowie das Bewegen geladener Teilchen im elektrischen Feld

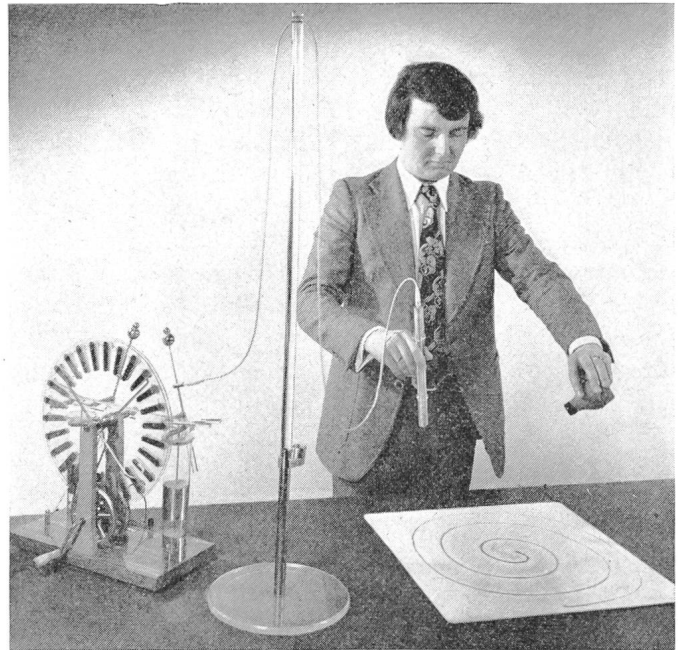


Fig. 16 Sichtbarmachen einer mit einem elektrischen Griffel gezeichneten Spirale durch Farbpartikel (Toner)

eine wichtige Rolle. Im nachfolgenden soll das Prinzip der Xerographie anhand der in (Fig. 17) dargestellten fünf Arbeitsschritte kurz erläutert werden:

Zunächst werden in einem Schritt 1 einer Selen-schicht, die sich auf einer Aluminium-Trägerplatte befindet, positive Ladungen aufgesprüht. Dann wird in einem Schritt 2 das zu kopierende Original über eine optische Linse auf die Selen-schicht projiziert, wodurch an den belichteten Stellen der Widerstand der Selen-schicht abnimmt und deshalb dort die vorhandenen Ladungen abfliessen können. Damit entsteht ein Latentbild des Originals. In einem Schritt 3 wird dieses Latentbild durch negativ aufgeladene Farbteilchen von etwa 10 µm (Toner) sichtbar gemacht. Danach muss in einem Schritt 4 das Tonerbild auf ein Papierblatt übertragen werden, was sich durch ein Aufsprühen positiver Ladungen erreichen lässt. Schliesslich bleibt für einen Schritt 5 das übertragene Tonerbild durch eine nachfolgende Wärmebehandlung zu fixieren.

### 3.8 Ladungskonservierung

In einem mit Datum vom 7. Juni 1732 versehenen Brief, der an den damaligen Sekretär der Royal Society London gerichtet war, stellt der auch sonst an der Elektrizität interessierte

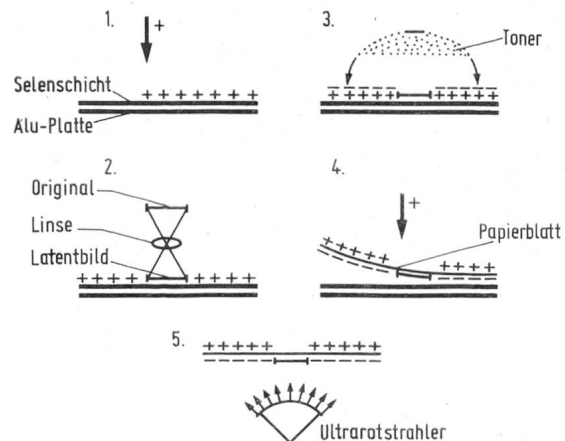


Fig. 17 Die fünf Arbeitsschritte der Xerographie

In seiner neuesten Arbeit weist *Senichi Masuda*, Professor der Universität Tokyo, darauf hin [31], dass sich das Pulverbeschichten mit dem von ihm entwickelten elektrischen Vorhang – worunter ein nach dem Wanderfeldprinzip arbeitender kontaktloser Staubconveyer zu verstehen ist – kombinieren lässt und damit eine rasche Umstellung der Anlage auf neue Farbpigmente ermöglicht wird. Gleichermassen erfolgreich kann der elektrische Vorhang zum Pulverbeschichten dünner Metallrohre für die Trinkwasserversorgung eingesetzt werden.

Eine weitere bemerkenswerte Anwendung hat das Elektrostatikbeschichten in der Landwirtschaft zur wirkungsvollen Sedimentation von Pflanzenschutzmitteln gefunden, nachdem unter der ausschliesslichen Einwirkung des Schwerfeldes nur etwa 10 bis 20% der ausgebrachten Wirkstoffe die Pflanzen erreichen und somit der grössere Anteil unkontrollierbar der Abdrift unterliegt [15; 19].

In der Reihe der neuen Technologien hat ebenso das elektrostatische Beflocken eine gewisse Bedeutung erlangt, das darin besteht, feinstgeschnittene Textilfilamente – der Flok – unter der Wirkung eines elektrischen Feldes aufzuladen und dann auf einem Trägerfaden oder -gewebe abzuscheiden, wodurch Textilartikel mit samtartigem Griff und Aussehen entstehen. In gleicher Weise lässt sich ein elektrostatisches Besanden erreichen, indem anstelle des Flok feine Sandteilchen in das elektrische Feld eingebracht werden.

### 3.5 Erzaufbereitung

Eine ganz anders geartete Aufgabe liegt im Falle der Erzaufbereitung dergestalt vor, dass die vorzugsweise nichtleitenden Bestandteile vom leitenden Reinerz getrennt werden müssen, um eine Verbesserung der Erzqualität zu erreichen. Die Wirkungsweise des Trennvorganges lässt sich am besten anhand der in Fig. 13 dargestellten Demonstrationsanlage erläutern. Von einer Vorrattstrommel wird das aufzubereitende Erz, dessen nichtleitende Bestandteile durch Isolierscheiben und dessen leitende Bestandteile durch Metallscheiben simuliert werden, auf eine motorisch angetriebene Metallwalze aufge-

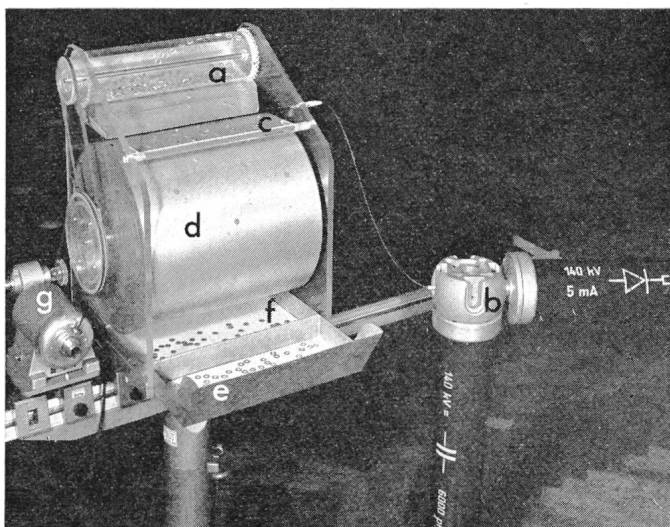


Fig. 13 Elektrostatistische 15-kV-Sortieranlage

- a Vorrattstrommel
- b Gleichspannungsanlage
- c Sprühdraht
- d Metallwalze mit darauf haftenden Isolierscheiben
- e Behälter mit Metallscheiben
- f Behälter mit Isolierscheiben
- g Antrieb

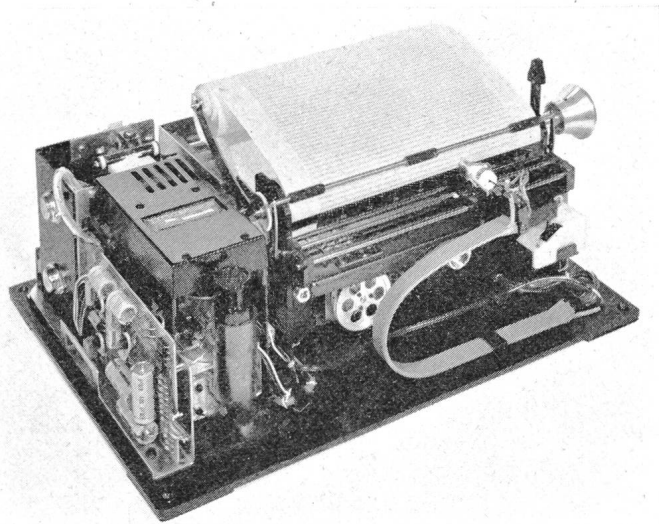


Fig. 14 Casio-Tintenstrahldrucker

schüttet. In der sich anschliessenden Bewegungsphase werden dann die einzelnen Scheiben der negativen Koronaentladung eines dünnen Sprühdrahtes ausgesetzt, wobei die Metallscheiben ihre Ladung sofort an die Trommel abgeben und ihrer Schwerkraft zufolge in den vorderen Behälter (e) hineinfallen, während die Isolierscheiben ihre Ladung behalten und durch die wirksame elektrostatische Kraft an der Walze haften bleiben, bis sie ein Schaber in den rückwärtigen Behälter (f) fallen lässt.

Die grösste Sortieranlage dieser Art ist auf den kanadischen *Wabush Mines* in Labrador mit einem stündlichen Durchsatz von 1000 Tonnen Erz mit der Zielsetzung errichtet worden, den 8prozentigen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des Roherzes auf 2 Prozent zu mindern und so die Erzqualität ganz erheblich zu verbessern.

### 3.6 Drucktechnik

Eine bemerkenswerte Anwendung hat die Statikelektrizität in der Drucktechnik in Form der Tintenstrahldrucker gefunden, die gegenüber mechanischen Druckern den grossen Vorteil haben, nahezu geräuschlos zu arbeiten und zudem mit Schreibgeschwindigkeiten bis zu 45000 Zeichen je Minute. Dieses kontaktlose Druckverfahren beruht beim Typ eines Ink-Jet-Printers darauf, dass mittels eines piezoelektrischen Vibrators von etwa 100 kHz Impulsfrequenz eine sich schnell fortbewegende Reihe etwa gleich grosser Tintentröpfchen entsteht, von denen jedes mit Hilfe eines elektrischen Drucksignalgebers so aufgeladen wird, dass nach Durchlaufen von Ablenkplatten nach der Art eines Kathodenstrahloszillographen Buchstaben und Zahlen in vorprogrammierter Folge auf einem vorbeilaufenden Papierstreifen ausgedruckt erscheinen (Fig. 14).

Noch wesentlich höhere Schreibgeschwindigkeiten, die die Grenze von nahezu einer halben Million Zeichen je Minute erreicht haben, lassen sich in der Weise verwirklichen, dass von einem feststehenden Schreibkopf, der 4 bis 8 Schreibstifte je Millimeter Zeilenlänge enthält, auf einen daran vorbeiziehenden Spezialpapierstreifen Ladungen in Zeichenform aufgesprüht werden, die dann beim Durchlaufen einer Tonerwalze sichtbar gemacht werden können. Das damit erreichbare Schriftbild ist trotz der kaum vorstellbaren Schnelligkeit seines Entstehens gut leserlich (Fig. 15) und zum Ausdrucken von Kurven und Diagrammen gleichermassen geeignet.



Stephen Gray die bemerkenswerte Frage, ob ein Weg gefunden werden könne, die Eigenschaften der elektrischen Anziehung in Körpern beständiger zu machen. Nach mühevollen Experimenten, in deren Verlauf er Stoffe wie Schellack, Schwefel, Bienenwachs und Harz aus der Schmelze erkalten liess und danach ein sehr viel wirksameres Kräftespiel sogar über Monate hinweg beobachten konnte, kommt er schliesslich zu der Meinung [2], «That we have now discovered that there is a perpetual attractive Power in all Electric Bodies». Dies geschah in einer Zeit eines allerersten Beginns, die Erscheinungsformen der Elektrizität mehr und mehr zu erkennen.

Heute werden permanente elektrostatische Dipole – also Elektrete – in der Weise hergestellt, dass einem Dielektrikum im geschmolzenen oder plastischen Zustand Ladungen eingepägt werden, die dann durch den Abkühlungsprozess gleichsam einfrieren. Diese Technik hat sich in allerjüngster Zeit als brauchbares Hilfsmittel erwiesen, seitdem es gelungen ist, hochwertige Elektrete auch in Folienform herzustellen und für die verschiedensten Anwendungsgebiete einzusetzen, wie beispielsweise für Kondensatormikrophone, die ohne Batterie betrieben werden können und bis zu Temperaturen von 170 °C funktionsfähig bleiben. Dazu dient ein 7,6 µm Polycarbonatfilm mit einer aufgedampften 0,89 µm Goldschicht. Aber auch für den Bau kleiner elektrostatischer Generatoren haben Elektrete eine nützliche Verwendung gefunden [24].

### 3.9 Ionen- und Kolloidantrieb

In einem letzten Thema sollen einige Aspekte des Ionen- und Kolloidantriebes aufgezeigt werden, dem in allerjüngster Zeit – vor allem wegen seiner feinen Dosierbarkeit – zunehmendes Interesse entgegengebracht wird, um Kurskorrekturen von Raumfahrzeugen vorzunehmen oder auch Flugkörper, wie Nachrichtensatelliten, in Erdnähe zu betreiben. Dem Prinzip nach besteht ein solcher Antrieb aus drei Betriebs-elementen, nämlich einer dafür geeigneten Ionenquelle, einem Hochspannungsfeld, in dem Ionen beschleunigt werden, und einem Neutralisator, der den Ionenstrahl kurz vor seinem Verlassen des Raumkörpers unelektrisch zu machen hat, da sonst schubmindernde Eigenaufladungen befürchtet werden müssen [21].

Im Bereich der Ionenantriebe hat sich als Ionenquelle in erster Linie dampfförmiges Caesium oder Quecksilber durchsetzen können, während bei den nicht minder interessanten Kolloidantrieben eine dielektrische Flüssigkeit wie Glycerin durch feinste Kapillare in eine Reihe kolloidaler Teilchen von wesentlich unter 1 µm zersprüht wird, wodurch Schübe in der Grössenordnung einiger mN entstehen, die jedoch zur Steuerung eines Satelliten von etwa 1000 kg ausreichend sind. Bei einem dazugehörigen Leistungsbedarf von etwa 100 W kann der Brennstoffverbrauch dementsprechend niedrig gehalten werden, worin der grosse Vorteil eines Kolloidantriebes zu sehen ist [29].

Die auf dem Gasentladungsprinzip beruhenden Antriebe sind bereits erstmalig im Jahre 1744 in Form des vom Erfurter Professor *Andreas Gordon* erdachten Ionenrades verwirklicht worden, das später aus Gründen einer besseren Ausnutzbarkeit als Mehrfachsystem gebaut worden ist, etwa in der Art des von *Abbé Nollet* vorgeschlagenen Vierfachrades (Fig. 18). Eine für Demonstrationszwecke geeignete Form ist in Fig. 19 dargestellt, wobei zur Erhöhung der wirksamen Feldstärke noch geerdete Toroide angesetzt worden sind.

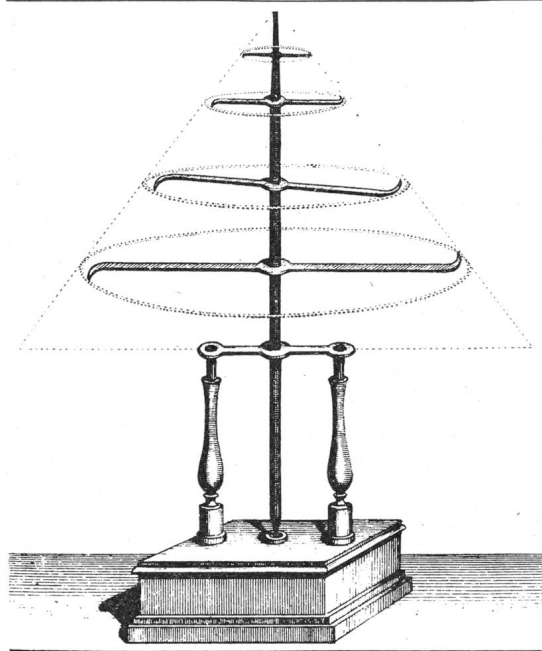


Fig. 18 1766: Vierfach-Ionenrad nach Abbé Nollet [4]

### 4. Ausblick

Aus einer Zeit um die Mitte des 18. Jahrhunderts herausgewachsen, hat sich die Statikelektrizität zu einer bedeutsamen Disziplin entwickelt, die in einem kaum glaublichen Variationsreichtum nützliche Anwendung gefunden hat. Soweit es sich um die Erzeugung extrem hoher Spannungen handelt, wird die Schwerionenphysik in der weiteren Zukunft noch leistungsfähigere Einrichtungen erwarten können, und im technologischen Bereich kann wohl davon ausgegangen werden, dass neuartige Effekte zu einer Bereicherung möglicher Anwendungstechniken führen. In dieser Beziehung sollte es sich lohnen, die komplexe Problematik einer Bewegung kleinster Teilchen noch weit mehr als bisher mit wissenschaftlicher Gründlichkeit zu durchdringen, um auf diese Weise zu einem besseren Verstehen der Zusammenhänge zu kommen. Vor allem wird es aber erforderlich sein, das Raumladungsfeld mit Hilfe moderner mathematischer Methoden zu erforschen und in seinen denkbaren Auswirkungen auf bestehende und zukünftige Technologien zu überdenken.

Bei einem solchen Vorgehen, das vornehmlich von der Unermesslichkeit einfallreichen Denkens getragen sein wird, darf erwartet werden, dass sich uns die Statikelektrizität in einem zukünftigen technischen Geschehen als hilfreiches In-

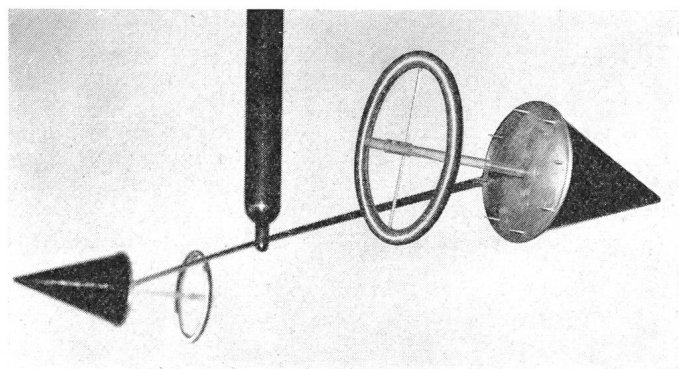


Fig. 19 Demonstrations-Ionenrad



strument offenbart, dessen Nützlichkeit schon in einer Zeit des beginnenden Umgehens mit Elektrizität kaum bezweifelt werden konnte.

#### Literatur

- [1] *W. Gilbert*: De magnetibus, London, Petrus Short, 1600.
- [2] *S. Gray*: A letter from Mr. Stephan Gray to Dr. Mortimer containing a farther account of his experiments concerning electricity. Philosophical Transactions 37(1732), p. 285...291.
- [3] *J. F. Hartmann*: Beschreibung eines electrischen Glockenspiels. Hamburgisches Magazin 24(1759)1, S. 3...10.
- [4] *Abbé J. A. Nollet*: Application curieuse de quelques phénomènes d'électricité. Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec les Mémoires de Mathématique et de Physique (1766)-, p. 323...337.
- [5] *G. B. Beccaria*: Eletticismo artificiale. Torino, Stamperia reale, 1772.
- [6] *J. Ferguson*: An introduction to electricity on six sections. Second edition. London, W. Strahan and T. Cadell, 1775.
- [7] *A. Volta*: Articolo di una lettera del signor D. Alessandro Volta al signor dottore Giuseppe Priestley, Como, 10 giugno 1775. Scelta di Opuscoli interessanti di Milano 9(1775), p. 91...107+10(1775), p. 87...113.
- [8] *G. C. Lichtenberg*: Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen (Lichtenbergsche Figuren). Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 246. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.-G. 1956.
- [9] Magazin für das Neueste aus Physik und Naturgeschichte. 3(1785) 1. Stück, S. 118...121.
- [10] *A. Margarotto*: Franklini theoria de electricitatis principio. Padua, 1805.
- [11] *M. Hohlfeld*: Das Niederschlagen des Rauchs durch Elektrizität. Archiv für die gesamte Naturlehre 2(1824)2, S. 205...206.
- [12] *C. F. Guitard*: Condensation by electricity. The Mechanics Magazine, London 53(1850), p. 346.
- [13] *W. Thomson*: Reprint of papers on electricity and magnetism. London, Macmillan, 1872.
- [14] *N. J. Felici*: Elektrostatistische Hochspannungsgeneratoren und ihre industrielle Anwendung. Karlsruhe, Braun, 1957.
- [15] *H. Göhlich*: Untersuchungen zur Verbesserung der Niederschläge von Pflanzenschutzmitteln durch elektrostatistische Aufladung. Dissertation der Universität Göttingen 1957. VDI-Forschungsheft 467. Düsseldorf, VDI-Verlag 1958.
- [16] *M. Pauthenier*: La purification électrique des gaz. Un problème fondamental du fonctionnement des électrofiltres: La contre-émission. Rev. Gén. Electr. 69(1960)3, p. 175...184.
- [17] *H. J. White*: Industrial electrostatic precipitation. Oxford a.o., Pergamon Press, 1963.
- [18] *E. Durand*: Electrostatique. Tome III: Méthodes de calcul diélectriques. Paris, Masson, 1966.
- [19] *J. Adams*: Über die natürliche und künstliche Aufladung beim Verstäuben von Pflanzenschutzmitteln. Fortschrittsberichte VDI-Zeitschrift Reihe 14, Nr. 6. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1967.
- [20] *H. Löb* und *J. Freisinger*: Ionenraketen. Braunschweig, Vieweg, 1967.
- [21] *G. F. Au*: Elektrische Antriebe von Raumfahrzeugen, physikalische Grundlagen und technologische Entwicklungen. Karlsruhe, Braun, 1968.
- [22] *A. W. Bright*: Progress in research on electrostatic generators. In: Proceedings of the third Conference on Static Electrification, London, May 1971; p. 285...296.
- [23] *A. D. Moore*: Electrostatics and its applications. New York a.o., Wiley, 1973.
- [24] *S. Masuda*: Elektrostatik und ihre technischen Anwendungen. Gastvorlesungen an der Technischen Universität München, Mai/Juni 1973.
- [25] *L. Naylor*: Calculations of voltages surges in Van de Graaff accelerators. Daresbury/Lancashire, Science Research Council Daresbury Laboratory, 1973.
- [26] *D. A. Bromley*: Large electrostatic accelerators. Amsterdam/Oxford, North-Holland, 1974.
- [27] *H. Prinz*: Nachdenkenswertes über nützliche Elektrizität. Bull. SEV/VSE, 65(1974)1, S. 1...24.
- [28] *H. Prinz*: Statikelektrizität als Gefahr. Bull. SEV/VSE 65(1974)26, S. 1867...1881.
- [29] *A. W. Bright*: Modern electrostatics. Physics Education 9(1974)6, p. 381...389.
- [30] *S. Masuda*: Recent progress in electrostatic precipitation. Review Speech at the 4th Conference on Static Electrification, 5. ... 8. May 1975, London.
- [31] *S. Masuda, S. Mori* und *T. Itoh*: Applications of electric curtain in the field of electrostatic powder coating. Speech at the 1975-Conference of the Electrostatic Society of America, June 24...26, 1975, University of Michigan.

#### Adresse des Autors

Prof. Dr. Ing. *Hans Prinz*, Hochspannungslaboratorium, TU München, Arcisstrasse 21, D-8000 München 2.

## Claude Burdin 1788–1873

Trotz den grundlegenden Arbeiten der *Bernoulli* und insbesondere von *Euler* über Wasserkraftmaschinen herrschte bei deren Bau noch lange Zeit die Empirie. Claude Burdin – die Franzosen nennen ihn «Vater der Turbine», da er den von ihm gebauten Maschinen diesen Namen gegeben hatte – kommt das Verdienst zu, solche zu berechnen. Er trachtete danach, stossfreien Eintritt des Wassers in das Turbinenrad und möglichst geschwindigkeitslose Wasserrückgabe zu verwirklichen. Damit erreichte er auf einen Schlag eine Verbesserung des Wirkungsgrades von etwa 50 auf 67 %.

Burdin, am 18. Mai als Savoyarde in Lépin geboren, besuchte in Frankreich die Ecole polytechnique und die Ecole des mines. Er arbeitete dann in verschiedenen Stellungen im Service des mines, wo er bis zum Direktor aufstieg. 1817 naturalisierte er sich in Frankreich, nachdem er Professor an der Ecole des mines in St. Etienne geworden war. 1822 liess er die erste Turbine nach seinen Plänen bauen, die er in der Folge noch verbesserte. *Fourneyron*, einer seiner Schüler, entwickelte die Konstruktion weiter.

Später wandte sich Burdin, allerdings mit weniger Erfolg, andern Problemen zu. Er wollte den Abtransport der Kohlen aus den Minen verbilligen. Da sich in England Dampfwagen auf den schlechten Strassen nicht bewährt hatten und er den Bau von Eisenbahnen zu diesem Zweck nicht als lohnend ansah, liess er in Chaillod ein mit Dampf betriebenes Gerät bauen, das zwar die Strassen benützte, aber abwechslungsweise zwei mitgeführte Schienenstücke befuhr. Mit dieser Einrichtung wollte er 15 t Kohle samt dem für den Transport nötigen Kohlenvorrat an einem Tag etwa 80 km weit befördern. Das Vorhaben kam aber nicht über eine Versuchsausführung hinaus, wobei Burdin viel Geld verlor.

1842 wurde Burdin korrespondierendes Mitglied der Académie des Sciences und kurz darauf Chevalier der Légion d'honneur. Noch einmal machte er von sich reden, als er nach vielen Studien (die bis ins Jahr 1836 zurückgingen) 1864 vorschlug, für den Maschinenantrieb statt Wasserdampf hochkomprimierte Heissluft zu verwenden. Dabei dachte er an ähnlich wie Ventilatoren gebaute mehrstufige Gasturbinen. Doch dieser Vorschlag war seiner Zeit weit voraus. Burdin, kinderlos verheiratet, starb am 12. November 1873 in Clermont-Ferrand.

*H. Wüger*



Académie des Sciences, Paris