

# Kapitel 1

## Elektrische Ladungen und Felder

### 1.1 Elektrische Ladungen

Bisher haben wir uns in der Vorlesung mit der Mechanik und der Thermodynamik beschäftigt. Nun wollen wir uns mit Erscheinungen befassen, die sich nicht mit Hilfe der Mechanik und der Thermodynamik erklären lassen, dem Elektromagnetismus.

In der Mechanik ist das zentrale Thema die Gravitationskraft (Schwerkraft und Planetenbewegung). Im Folgenden werden wir zwei weitere Kräfte, die elektrische und die magnetische Kraft kennen lernen. Später werden noch die schwache Kraft (radioaktiver Zerfall) und die starke Kraft (Kernkraft) hinzukommen. Es wird sich eine zentrale Frage der Physik auftun: Lassen sich diese Kräfte zu einer einzigen Kraft vereinen?

#### 1.1.1 Positive und negative Ladungen

Schon im Altertum war THALES VON MILET (um 600 v. Chr.) die Eigenschaft von Bernstein bekannt, nach dem Reiben leichte Gegenstände anzuziehen. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch andere Materialien.

##### Versuch 1.1

Wir reiben einen Hartgummistab an einem Katzenfell und halten ihn über Papierschnipsel. Wir beobachten, dass die Schnipsel von dem Stab angezogen werden (s. Abb. 1.1.1).

Diese neue Eigenschaft der Materie benannte man nach dem Stoff, an dem man sie beobachtete  $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\upsilon\nu$ , lies „Elektron“ (griechisches Wort für Bernstein) - also **Elektrizität**. Die neue Eigenschaft soll nun genauer untersucht werden:

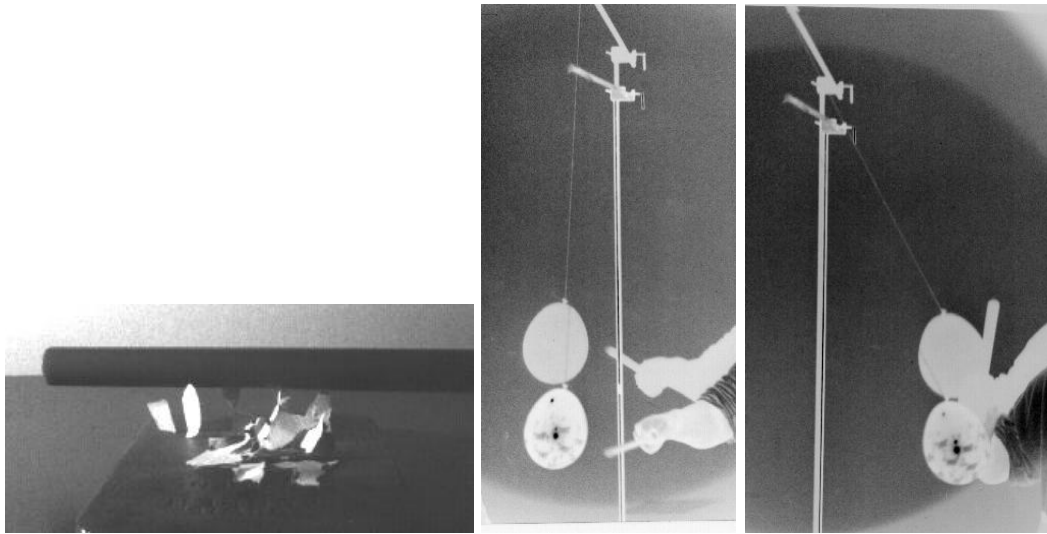


Abbildung 1.1: Versuchsergebnisse

## Versuch 1.2

1. Wir reiben mit einem Fell über einen Luftballon und einen PVC-Stab. Wir nähern den Stab dem Luftballon und beobachten, dass der Luftballon von dem Stab abgestoßen wird.
2. Nun reiben wir einen Plexiglasstab an einem Seidentuch und nähern ihn dem Luftballon. In diesem Fall wird der Luftballon angezogen (s. Abb. 1.1.1).

Der gleiche Effekt zeigt sich, wenn man anstelle des Luftballons Stäbe aus gleichem Material, z.B. Plexiglas nimmt (s. Abb 1.2, entnommen aus [7]). Reibt man diese an einem Seidentuch, so stoßen sich die Stäbe ab. Tauscht man einen Plexiglasstab gegen das Seidentuch aus, so ziehen sie sich an.



Abbildung 1.2: Gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an

Diese Erkenntnisse wurden zuerst um 1733 von DU FAY (1698 – 1739) und dem amerikanischen Physiker B. FRANKLIN (1707 – 1790) gewonnen. Sie erkannten, dass es zwei Arten von Elektrizität gibt und legten folgende Konvention fest:

|                          |                                      |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Bernstein-, PVC-, Seide- | Elektrizität: <b>negative Ladung</b> |
| Plexiglas-, Katzenfell-  | Elektrizität: <b>positive Ladung</b> |

Im letzten Versuch haben wir gesehen, dass die elektrischen Ladungen Kräfte aufeinander ausüben. Gleich geladene Körper stoßen sich ab, entgegengesetzt geladene ziehen sich an. Die Abbildung 1.3 (aus [15]) zeigt die Wechselwirkungen zwischen gleichen und entgegengesetzten Ladungen und die auf sie wirkenden Kräfte. Wir halten fest:

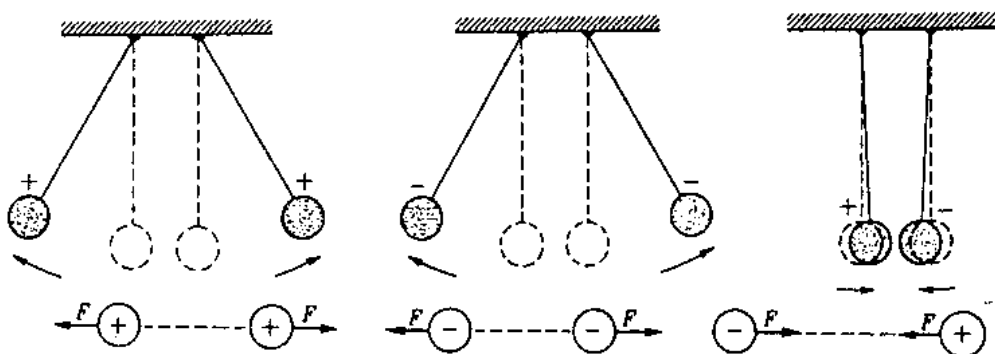


Abbildung 1.3: Kräfte auf Ladungen

Zwei Körper mit gleicher Ladung (positiv oder negativ) stoßen sich ab; haben sie entgegengesetzte Ladung, so ziehen sie sich an.

(1.1)

### 1.1.2 Ladungstrennung

Offensichtlich besitzen alle Körper eine große Anzahl elektrischer Ladungen. Im Allgemeinen merken wir nichts davon, da die Wirkungen der positiven und negativen Ladungen sich kompensieren.

Um Ladungen beobachten zu können, müssen wir sie trennen, d.h. wir müssen positive Ladungen irgendwo anhäufen, wodurch zwangsläufig woanders ein gleich großer negativer Ladungsüberschuss entsteht. Alle Vorgänge bei den bisherigen Versuchen mit der **Reibungselektrizität** beruhen auf **Ladungstrennung**.

- Wird ein Kunststoffstab an einem Katzenfell gerieben, so werden Elektronen an das Harz gebunden.
- Aus einem Teflontrichter tropfendes Wasser ist positiv geladen, weil die  $\text{OH}^-$ - Ionen am Trichter hängen bleiben.

Bei der Ladungstrennung müssen die negativen Ladungen von den positiven Ladungen losgerissen werden, und außerdem die positiven auf einem Haufen und die negativen auf einem anderen Haufen gehalten werden. Dazu ist eine Kraft bzw. Arbeit erforderlich.

Bei den bisherigen Versuchen haben wir gesehen, dass bei mehrfachem Reiben (= größerer Arbeit!), auch größere Ladungsmengen entstehen.

Es scheint also so, dass man immer nur einen Bruchteil der einen oder anderen Ladung entfernt. Entfernt man Elektronen, so bleibt positive Ladung zurück, fügt man Elektronen von einem anderen Körper hinzu, wird der Körper negativ geladen.

Wenn wir also hier von Ladung sprechen, dann meinen wir damit "Überschussladung".

### 1.1.3 Leiter und Isolatoren

Versucht man, von einem geriebenen Kunststoffstab durch Berührung Ladung auf einen Metallstab zu übertragen, so gelingt dies nicht, wenn der Metallstab in der Hand gehalten wird. In diesem Fall fließt die gesamte Ladung des Metallstabes in die Hand ab. Hält man den Stab jedoch an Kunststoffgriffen, so üben die beiden Stäbe Kräfte aufeinander aus, und das Aufladen gelingt. Bei der Berührung mit der Hand wird der Metallstab sofort wieder vollständig entladen. Bei dem Kunststoffstab hingegen ist es anders. Er kann nur in dem Bereich entladen werden, der durch die Hand berührt wird. Die unterschiedliche Ladungsverteilung auf einer geladenen Metallplatte und einer geladenen Kunststoffplatte zeigt folgender Versuch.

#### Versuch 1.3

1. Wir laden eine isoliert gehaltene Metallplatte mit einem geriebenen PVC-Stab auf. Bringen wir nun eine Glimmlampe an eine Stelle der Platte, so leuchtet die Lampe auf. Wiederholen wir diesen Vorgang an unterschiedlichen Plattenstellen so führt es jedoch zu keinem weiteren Aufleuchten.
2. Bei einer geladenen Kunststoffplatte kann das Lämpchen wiederholt an verschiedenen Stellen der Platte zum Leuchten gebracht werden.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Materialeigenschaft unterscheidet man zwischen **Leitern** (z.B. Metallplatte) und **Nichtleitern** bzw. **Isolatoren** (Kunststoffplatte).

Die Ladungen in einem Leiter, hier also im Metallstab und dem menschlichen Körper, sind quasi frei beweglich. Daher fließt bei Berührung die Ladung vom Metallstab sofort über die Hand und den übrigen menschlichen Körper zur Erde ab. Auf einem Leiter breitet sich eine an einer Stelle aufgebrachte Ladung in mehr oder weniger kurzer Zeit über

den gesamten Körper aus. Bei einem Isolator (Kunststoffstab) ist die Ladung hingegen nicht frei beweglich, sondern fest an die Atome gebunden. Bei Berührung fließt nur jeweils ein Teil der Ladungsmenge ab. Eine Auflistung verschiedener Leiter und Isolatoren findet man in nachstehender Tabelle.

|                     |   |
|---------------------|---|
| Gute Leiter         | Metalle, Kohle, Wasser, Säure- und Salzlösungen, der menschliche Körper, stark erhitzte Gase, ... |
| weniger gute Leiter | Holz, Papier, Stroh, Alkohol, ...   |
| Isolatoren          | Quarz, Glas, Porzellan, Kunststoff, Bernstein, Seide, Öle, Luft, Gase, ...                        |

Es gibt keine vollkommenen Isolatoren, jedoch kommen einige Stoffe (z.B. Bernstein und Quarz) diesem Grenzfall sehr nahe. Dass Luft nicht leitet, ist gerade die Voraussetzung dafür, dass eine durch Reiben erzeugte Ladung beobachtet werden kann. Ist jedoch die Luftfeuchtigkeit zu hoch, fließt die Ladung schnell wieder ab, da feuchte Luft besser leitet.

### 1.1.4 Ladungsmessung

Die beobachtete Abstoßung gleichnamiger Ladungen wird zum Erkennen und Messen elektrischer Ladungen herangezogen. Einige **Elektroskope** zeigt Abb. 1.4 (aus [1]).

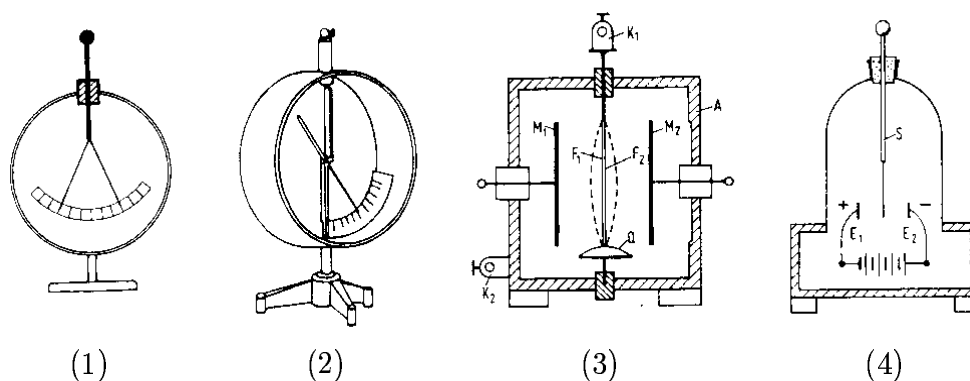


Abbildung 1.4: Elektroskope

#### 1. Blättchen-Elektroskop

Im Inneren eines Metallgehäuses hängen an einer von oben isoliert eingeführten Metallstange zwei Blättchen aus Aluminium- oder Goldfolie. Wird das kugelförmige Ende der Metallstange mit einem geladenen Körper berührt, so spreizen sich die Folien, da sich die Ladungen auf der Kugel, der Stange und den Folien verteilen. Da die Folien die gleiche Ladung haben, stoßen sie sich ab, d.h. spreizen auseinander, und zwar um so mehr, je größer die Ladung ist. Eicht man das Instrument, so erhält man einen einfachen Ladungsmesser, das **Elektrometer**.

## 2. BRAUNsches Elektrometer

Statt zweier beweglicher Blättchen wird hier ein leichter, in Spitzen gelagerter, Aluminiumanzeiger benutzt. Der Zeiger wird von dem feststehenden Teil abgestoßen, sobald über diesen Ladung zugeführt wird, da nun beide gleichnamig geladen sind. Das Rückstellen erfolgt durch das Gewicht des Zeigers. (F.BRAUN, 1891)

## 3. WULFsches Zweifadenelektrometer

Der Aufbau dieses empfindlicheren Elektrometers geht aus der Abb. 1.4 hervor. Durch die Deckplatte eines Metallgehäuses ( $A$ ) ist, sehr gut isoliert, ein Metallstift ( $E$ ) geführt, der an seinem oberen Ende die Anschlussklemme  $K_1$  trägt, und von dessen unterem Ende zwei sehr dünne Drähte von ca.  $4\ \mu\text{m}$  Durchmesser und 5 bis 10 Zentimeter Länge herabhängen. Die beiden Drähte sind mit ihren unteren Enden an einem elastischen Quarzbügel ( $Q$ ) befestigt, durch den sie schwach gespannt werden. Führt man den Fäden  $F_1, F_2$  über die Klemme eine elektrische Ladung zu, so spreizen sie sich auseinander. Ihr Abstand kann in der Fadenmitte, wo er maximal ist, mit Hilfe eines Mikroskops sehr genau gemessen werden. Damit die Fäden beim Auseinandergehen in der Bildebene des Mikroskops bleiben, sind beiderseits in der Fadenebene zwei schmale Metallplatten ( $M_1$  und  $M_2$ ) angebracht, die mit dem geerdeten Gehäuse verbunden sind und somit die geladenen Fäden anziehen.

## 4. BOHNENBERG'sches- Elektroskop

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Instrumenten, die das Vorhandensein von Ladung und ihre Menge nachweisen, liefert dieses auch das Vorzeichen. Zwischen zwei Platten, den sogenannten Elektroden ( $E_1$  und  $E_2$ ), hängt an einer von oben isoliert eingeführten Metallstange ( $S$ ) ein einzelnes schmales Aluminiumplättchen. Die beiden Elektroden ( $E_1$  und  $E_2$ ) sind durch eine besondere, meist im Gerät eingebaute Elektrizitätsquelle dauernd entgegengesetzt geladen. Infolgedessen wird das Aluminiumplättchen bei Aufladung von der einen Elektrode angezogen und von der anderen abgestoßen. Die Richtung des Ausschlages lässt dann einen Schluss auf das Vorzeichen zu.

### 1.1.5 Ladungsverteilung in elektrischen Leitern

Die Ladungsverteilung auf elektrischen Leitern lässt sich an folgendem einfachen Versuch diskutieren.

#### Versuch 1.4

Drei Elektroskope werden mit Metallbügeln untereinander verbunden. Auf ein Elektroskop wird mit Hilfe eines geriebenen Hartgummistabes Ladung aufgebracht. Man beobachtet auf allen drei Elektroskopen den gleichen Ausschlag, d. h. die auf ein Elektroskop aufgebrachte Ladung hat sich gleichmäßig auf alle Elektroskope verteilt.

Berührt man nun ein Elektroskop mit dem Finger, so verteilt sich die Ladung auf den Körper und den Fußboden (Bem.: Man sagt: Das Elektroskop ist **geerdet**). Auf allen Elektroskopen ist der Ausschlag auf null zurückgegangen.

Aus dem ersten Teil des Versuches folgt, dass die Ladungen versuchen sich zu trennen und einen größtmöglichen Abstand einzunehmen. Dies gelingt ihnen nur, wenn sie auf der Oberfläche sitzen. Daraus folgt auch, dass das Innere von Leitern ladungsfrei ist. Dies gilt auch für Hohlräume, wie folgender Versuch zeigt:

#### Versuch 1.5

Auf einem Elektroskop wird ein FARADAY-Becher, ein Becher aus Metall, angebracht (s. Abb 1.5, entnommen aus [15]). Dieser Becher wird mit Hilfe der Reibungselektrizität geladen. Nun wird mit einem **elektrischen Löffel** (Metallkugel an einem isolierenden Kunststoff-Griff, die zum Übertragen von Ladungen dient) versucht, aus dem Inneren des Bechers Ladung zu entnehmen und auf ein zweites Elektroskop zu übertragen. Dies gelingt nicht, da im Inneren keine Ladungen vorhanden sind!

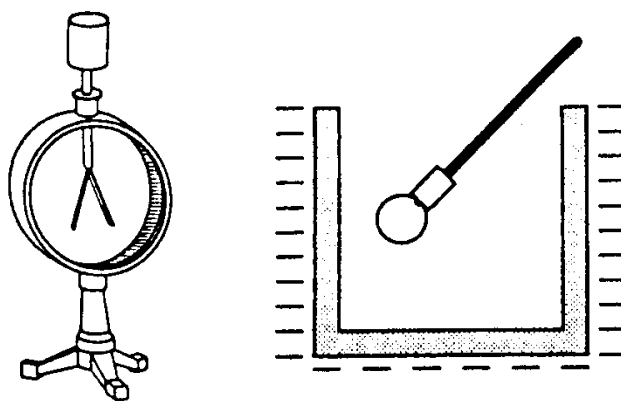


Abbildung 1.5: Faradaybecher

## 1.1.6 Die Influenz

### Versuch 1.6

Wir führen einen positiv geladenen Plexiglasstab an ein geerdetes Elektroskop heran, ohne dieses jedoch zu berühren. Obwohl keine Ladung übertragen wurde, beobachten wir am Elektroskop einen Ausschlag. Entfernen wir den Stab aus dem Umfeld des Elektroskopes, geht der Ausschlag auf null zurück.

Offensichtlich ist bei dem Versuch **keine Ladung übertragen** worden, sonst hätte das Elektroskop auch noch einen Ausschlag angezeigt, als der Plexiglasstab entfernt wurde. Wie lässt sich nun dieses Phänomen erklären? Bedenken wir folgendes: a) Der Plexiglasstab ist positiv geladen. b) Der Teller, der feststehende Teil und der Zeiger des Elektroskops bestehen aus einem metallischen Leiter, in dem sich Ladungen frei bewegen können. Nähert man also den positiv geladenen Plexiglasstab dem Teller des Elektroskops, so wer-

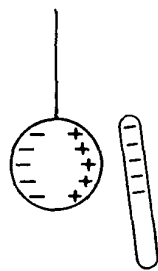


Abbildung 1.6: Influenz

den in dem Elektroskop die negativen Ladungen zu dem Stab gezogen, während die positiven abgestoßen werden und deshalb in den feststehenden Teil und den Zeiger wandern. Da in diesen beiden Teilen jetzt gleichnamige Ladung vorliegt, wird der Zeiger abgestoßen. Man beobachtet einen Ausschlag. Wird der Plexiglasstab wieder entfernt, so gleicht sich die Ladungsverteilung im Elektroskop wieder aus und der Ausschlag geht auf Null zurück (s. auch Abb. 1.6, entnommen aus [1]).

## 1.1.7 Halbieren von Ladungsmengen

Wir haben gesehen, dass durch Berührung Ladung übertragen werden kann. Was passiert, wenn man einen geladenen und einen ungeladenen Leiter in Kontakt bringt? Diese Frage soll in dem folgenden Versuch geklärt werden.



## Versuch 1.7

Wir verbinden zwei gleich große Konduktorkugeln (Leiterkugeln) jeweils mit einem Elektroskop. Eine der Kugeln wird geladen und ihre Ladung mit dem Elektroskop angezeigt. Jetzt wird die gleich große ungeladene Kugel mit der geladenen Kugel in Berührung gebracht. Auf beiden Elektroskopen beobachten wir nun den gleichen Ausschlag (s. Abb. 1.7, aus [15]).

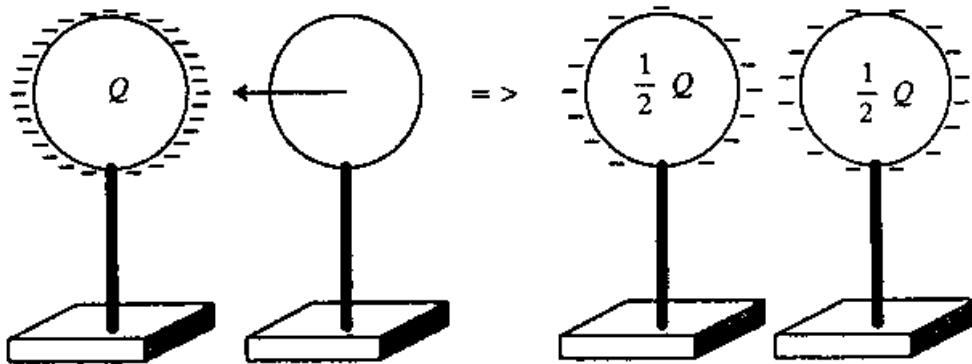


Abbildung 1.7: „Teilen“ von Ladungsmengen

Beim Kontakt der beiden Kugeln findet ein Ladungsübertrag statt, und zwar so, dass jede Kugel die gleiche Menge an Ladung besitzt. Auf jeder der beiden gleich großen Kugeln befindet sich nach dem Berühren  $\frac{1}{2}Q$ .

### 1.1.8 Ladungserhaltung

Bei der Ladungshalbierung kommt sofort die Frage auf, ob diese unendlich oft erfolgen kann oder ob es eine kleinste Ladungsportion gibt. In diesem Fall würde uns die Größe einer solchen Elementarladung interessieren.

## Versuch 1.8

Ein Hartgummistab wird an einem Katzenfell gerieben und anschließend wird das Fell auf ein Elektroskop gelegt. Das Elektroskop schlägt aus. Nun wird der geladene Stab am Elektroskop abgestreift und man sieht, dass der Zeigerausschlag auf null zurück geht.

Offensichtlich treten beim Reiben positive und negative Ladungen in gleicher Menge auf. B. FRANKLIN und J. D. WATSON schlossen 1747 aus ähnlichen Beobachtungen:

Die Summe aller Ladungen in einem abgeschlossenen System ist erhalten. Insbesondere ist die Summe aller Ladungen im Kosmos konstant. (1.2)

Bei allen Vorgängen der Ladungstrennung gilt dieser fundamentale Satz der Ladungserhaltung.

Ein sehr anschauliches Beispiel für die Ladungserhaltung bietet die Paarerzeugung in der Elementarteilchenphysik. Beim **Paarbildungseffekt** (Abb. 1.8 aus [15]) zerfällt im Feld eines Kerns ein energiereiches Photon in ein Elektron-Positron-Paar ( $e^- - e^+$ -Paar), wenn gilt:

$$E_\gamma = W_{Ph} > W_0 = 2m_e c^2 \approx 1,02 \cdot 10^6 \text{eV}, \quad (1.3)$$

wobei  $m_e$  die Masse des Elektrons bedeutet. (1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es die Spannung von 1 V durchläuft.) Dies bedeutet, dass die Energie des Photons vollkommen in Masse umgewandelt wird. Diese Umwandlung von Energie in Ma-

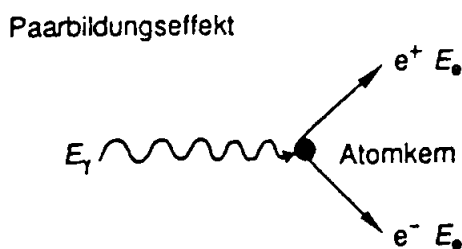


Abbildung 1.8: Paarbildung

terie (und umgekehrt) ist aufgrund der Relativitätstheorie, insbesondere  $E = mc^2$  möglich. Bei der Paarbildung muss beachtet werden, dass Ladungen nur paarweise entstehen

können, dies bedeutet, dass zwar neue Ladungen entstehen können, aber nur paarweise und sie müssen entgegengesetzt geladen sein. Abb. 1.9 (aus [15]) zeigt eine Blaskammer-Aufnahme einer  $e^+e^-$ - Paarerzeugung in den BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY (USA).

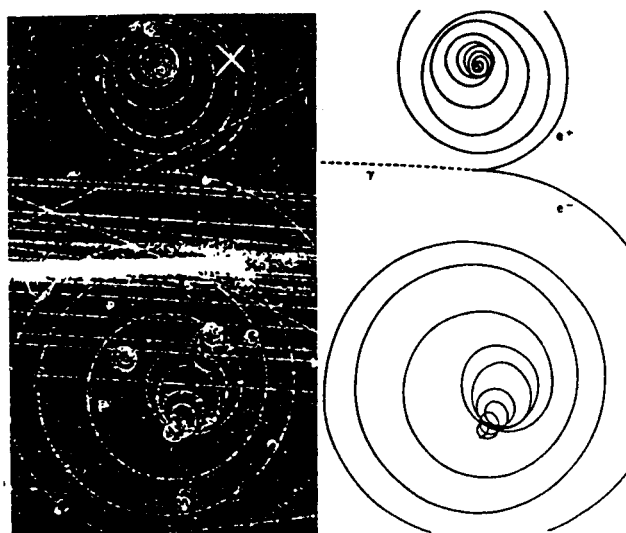


Abbildung 1.9: Blaskammer-aufnahme

### 1.1.9 Elementarladung

Um den Ladungszustand eines Körpers zu charakterisieren, benutzt man den Begriff der **Ladungsmenge**  $Q$  bzw.  $q$ . Man verbindet mit der elektrischen Ladung die Vorstellung einer nichtmateriellen Substanz (ähnlich wie bei der Wärmemenge), die in verschiedenen Mengen in einem Körper vorliegen kann. Die Ladungsmenge lässt sich im allgemeinen in kleinere Ladungsmengen unterteilen, wobei es eine untere Grenze gibt, die **Elementarladung**  $e$  oder **elektrisches Elementarquantum**, welche zuerst von R. A. MILLIKAN (1868 – 1953) gemessen wurde. Er erhielt dafür 1923 den Nobelpreis. Seine Versuche (siehe Abschnitt 1.7.2, Seite 48) zeigten, dass die Ladung **quantisiert** ist, d.h. es gibt eine

kleinste elektrische Ladung:

Die kleinste zu beobachtende freie Ladung ist die **Elementarladung**. Sie ist eine Naturkonstante, die folgenden Wert hat:

$$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{C} \quad \text{mit C = Coulomb}$$

(1.4)

Die Einheit „Coulomb“ ist die SI-Einheit für die Ladung. Sie wird später in Abschnitt 1.2.3 auf Seite 17 definiert. Ferner ist die Ladung quantisiert, d.h. **eine Ladung existiert nur als ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung  $e$** , die genau der Ladung des Elektrons entspricht. Die Ladung von  $e^-$  und  $e^+$  oder  $e^-$  und Proton  $p$  sind entgegengesetzt gleich. Es entstehen immer gleich viele positive wie negative Ladungen. Dieser Sachverhalt wird heute experimentell mit einer Genauigkeit von  $10^{-20}$  bestätigt. Bei theoretischen Betrachtungen zum Aufbau der Elementarteilchen wurden jedoch 1964 von M. GELL-MANN (\*1929) Quarks mit Ladungen von  $-\frac{1}{3}e$  und  $+\frac{2}{3}e$  postuliert (Nobelpreis 1969). Diese Ladungen wurden bisher noch nicht frei nachgewiesen, obwohl ihre Existenz außer Zweifel steht. Die Quarks scheinen nur in Bindungszuständen mit ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung zu existieren.

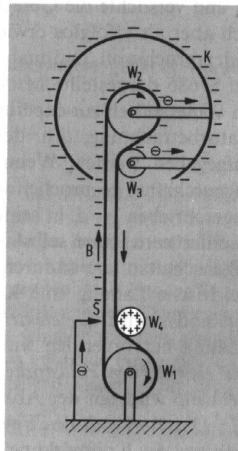


Abbildung 1.10: Bandgenerator

### 1.1.10 Erzeugung hoher Ladungsmengen

Benötigt man größere Ladungsmengen, dann erzeugt man diese mit Hilfe eines VAN-DE-GRAAFF- oder **Bandgenerators**.

Die ersten Entwicklungen dieses Gerätes gehen auf LORD KELVIN (1870) zurück, bekannt wurde der Hochspannungsgenerator aber erst durch VAN-DE-GRAAFF (1932).

Einen derartigen Bandgenerator zeigt Abb. 1.10 (aus [8]). Er enthält ein endloses Band  $B$  aus einem isolierenden Stoff (meist Gummi), das über vier drehbare Walzen läuft. Die Walzen  $W_1$ ,  $W_2$  und  $W_3$  sind aus Metall, Walze  $W_4$  (auch Erregerwalze genannt) hingegen ist aus isolierendem Kunststoff, z.B. Plexiglas. Durch eine Handkurbel mit Übersetzungsgetriebe oder durch einen Motor kann die Walze  $W_1$  angetrieben werden, so dass sich das Band in Pfeilrichtung bewegt. Durch die Berührung zwischen Band und Erregerwalze und die nachfolgende Trennung werden beide elektrisch geladen, und zwar das Band negativ und die Walze positiv (oder umgekehrt). Gegenüber der Erregerwalze befindet sich ein Spitzenkamm (S), auf dem durch die positiv geladene Erregerwalze eine negative Influenzladung erzeugt wird, die aufgrund der Spitzenwirkung auf das sich nach oben bewegende Band aufgesprüht wird. Die oben ankommende negative Ladung wird dem Band durch die Metallwalzen  $W_2$  und  $W_3$  entnommen und auf eine große, isoliert aufgestellte, metallische Hohlkugel  $K$ , die **Dom** genannt wird, abgeleitet, auf deren äußeren Oberfläche sie sich verteilt. Das Transportband verlässt die Kugel ungeladen; der Vorgang wiederholt sich dann in gleicher Weise. Durch laufende Zuführung weiterer Ladung kann die Elektrizitätsmenge auf der Kugel immer wieder gesteigert werden; die Kugel nimmt die ihr auf der Innenseite zugeführten neuen Ladungen ohne weiteres auf, da diese sofort auf die äußere Oberfläche abgeleitet werden.

## Versuch 1.9

Wir nehmen den Bandgenerator in Betrieb und nähern seinem Dom eine kleine Kunktorkugel, die an einem isolierenden Stab befestigt ist. Befindet sich auf dem Dom genügend Ladung, so springt ein Funke von dem Dom zur Kunktorkugel über.

Auf diese Weise können sehr hohe Flächenladungsdichten erzeugt werden. Mit solchen Bandgeneratoren werden Hochspannungen bis  $12 \cdot 10^6$  Volt erzeugt. In der Kernphy-

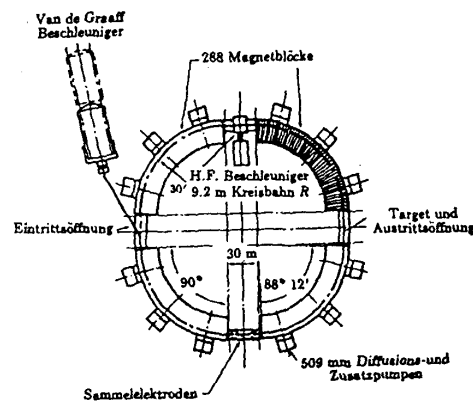


Abbildung 1.11: Kosmotron

sik werden VAN-DE-GRAAFF-Generatoren zur Beschleunigung von Elektronen und den leichtesten Atomkernen eingesetzt. Die Abb. 1.11 (aus [15]) zeigt das KOSMOTRON der BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY mit einem VAN-DE-GRAAFF-Beschleuniger, bei dem die Paarerzeugung nachgewiesen wurde.

## 1.2 Das COULOMBSche Gesetz

Wir haben gesehen, dass elektrische Ladungen Kräfte aufeinander ausüben. Im Folgenden sollen nun die Abhängigkeiten dieser Kräfte näher untersucht werden.

### 1.2.1 Die $1/r^2$ - Abhängigkeit

Als erster erkannte bereits C. F. GAUSS (1777-1855), dass ein  $1/r^2$ -Gesetz für das elektrische Feld gelten muss, wenn jeder Punkt im Inneren einer geladenen Kugel feldfrei ist. Hier soll mit Hilfe einer Argumentation von J. PRIESTLY (1733-1804) gezeigt werden, dass diese Annahme richtig ist. Wir führen in das Innere einer geladenen Hohlkugel mit Ra-