

Influenzmaschine

Quelle:

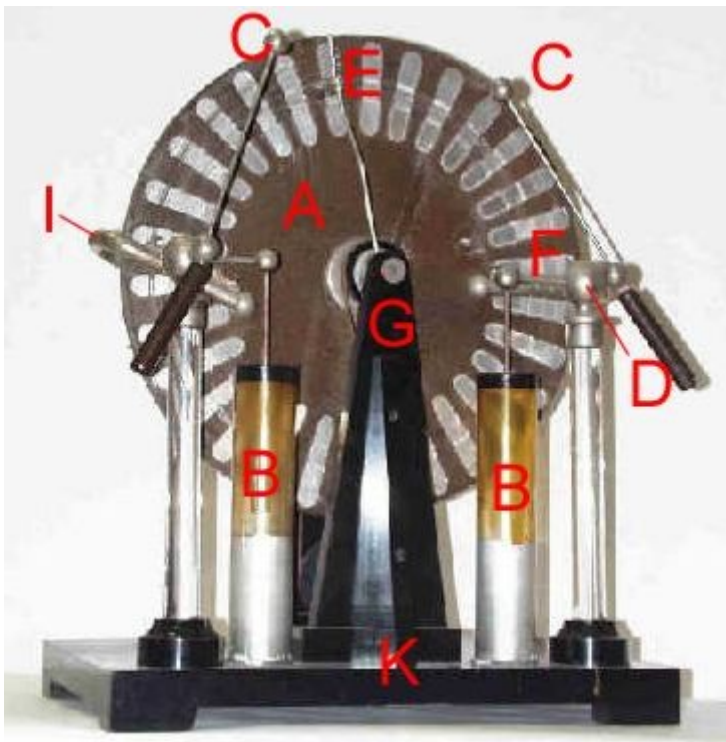
<http://de.wikipedia.org/wiki/Influenzmaschine>

Influenzmaschinen sind elektrostatische Generatoren, die zur Spannungserzeugung das Prinzip der Trennung elektrischer Ladungen durch Influenz nutzen. Im Gegensatz zu elektrodynamischen Generatoren nutzen Influenzmaschinen die Kraftwirkung des elektrischen Feldes auf elektrische Ladungen.

Aufgrund der manchmal nicht offensichtlichen Funktionsweise der Influenzmaschinen halten sich hartnäckig Gerüchte, nach denen Effekte außerhalb der bekannten Physik für die Funktion von Influenzmaschinen verantwortlich sein sollen. Für die Funktion von Influenzmaschinen sind jedoch keine anderen als die in der Elektrostatik bekannten Gesetzmäßigkeiten nötig. In einigen Sekten und in Parawissenschaften werden Abwandlungen von Influenzmaschinen als Basis von Antrieben für fliegende Untertassen (sogenannte „Levitationsscheiben“) oder als Overunity-Maschinen zur Energiegewinnung gezeigt.



Influenzmaschine (Wimshurstmaschine) in Betrieb



- A: Scheiben
- B: Leidener Flaschen (Hochspannungsunempfindliche Kondensatoren)
- C: Elektroden mit Funkenüberschlag
- D: Ausgleichskonduktoren
- E: Saugbüschel
- F: Kontakt zu den Leidener Flaschen
- G: Hartgummibalken (Scheiben-Lager)
- I: Kontakt zu gegenüberliegenden Büscheln
- K: Klemmen zur Stromentnahme

Quelle:

http://www.leifiphysik.de/web_ph10/versuche/01influenzmaschine/influenzmasch.html

Erklärung der Maschine:

Die Influenzmaschine erzeugt statische Elektrizität hoher Spannung und geringer Stromstärke. Die beiden Scheiben sind mit einer bestimmten Anzahl von Staniolbelägen belegt und rotieren in geringem Abstand in entgegengesetzter Richtung. Auf den beiden Glassäulen befinden sich Konduktoren zur Ladungsaufnahme, die mit einem mit Saugbüschel versehenen Arm die Ladung von den Staniolbelägen absaugen. Jede Scheibe besitzt einen Konduktor mit zwei Metallbüscheln. Die Maschine erregt sich selbst. Ist irgendein Staniolbelag z.B. der vorderen Scheiben zufällig elektrisch negativ geladen, so erregt er in einem bei ihm vorbei rotierenden Belag durch Influenz der hinteren Scheibe positive Ladung, die durch Abfließen der Elektronen über die Bürsten in den Konduktor kommt. Bei weiterer Drehung induziert diese positive Ladung auf der hinteren Scheibe auf den Staniolstreifen der vorderen Scheibe negative Ladung, die durch Elektronenfluss über die Bürsten aus dem vorderen Konduktor kommt. Durch die versetzte Anbringung der Bürsten schaukelt sich das gegenseitige Aufladen der Konduktoren immer mehr auf. Diese Ladung sammelt sich nun in den Konduktoren und den Leidener Flaschen. Bei zu großer Spannung springt dann Ladung in Form eines kräftigen Funkens zwischen den Elektrodenkugeln über.

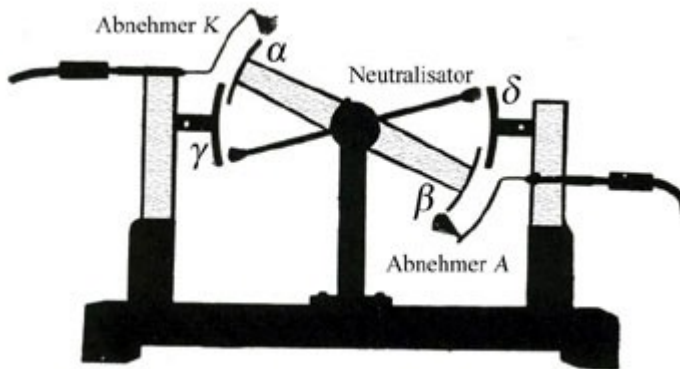
Influenzmaschine

Diese Seiten beschäftigen sich eingehend mit der Funktion und dem Betrieb einer Influenzmaschine, wie sie von James Wimshurst konstruiert wurde. Die wichtigsten dieser Influenzmaschinen waren Varley's Maschine (um 1860) und Töplers und Holzens Maschine (um 1865). Alle diese frühen Maschinen hatten den Nachteil, dass sie bei feuchtem Wetter gar nicht erst ansprangen oder dauernd ihre Polarität wechselten, was das Experimentieren mit ihnen schwierig machte. 1878 gelang es James Wimshurst, dieses Problem zu lösen und er verbesserte die Maschine von Holtz. Er brachte viele schmale Metallsegmente auf den rotierenden Scheiben an und fügte erstmals zwei Leidener Flaschen zur Maschine hinzu. Dann, im Jahre 1883, erschien die Wimshurst-Influenzmaschine, welche sich als sehr zuverlässig erwies und auch bei feuchtem Wetter lief. Ausserdem blieb die Polarität beim Betrieb erhalten. Der grösste Wimshurst-Generator wurde 1885 gebaut. Er hatte Glasscheiben mit 2 m Durchmesser und 1 cm Dicke. Damit liessen sich Funkenlängen von bis zu 56 cm erreichen.



Funktionsweise

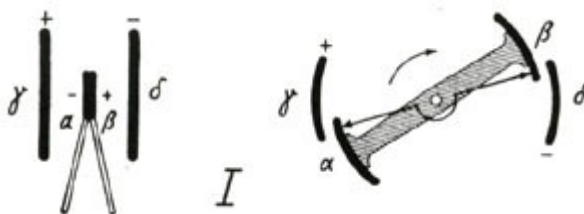
In der Regel liefern Influenzmaschinen sehr kleine Ströme mit sehr hohen Spannungen. Dies erreichen sie, indem sie Elektrizitätsträger paarweise durch Influenz aufladen, dann trennen und den Abstand der Ladungen durch mechanische Bewegung vergrößern. In folgender Abbildung ist die Wirkungsweise einer der einfachsten Influenzmaschinen gezeigt. Diese bildet das Grundprinzip der Wimshurst Influenzmaschine und soll deshalb etwas genauer angeschaut werden.



Wie in der Abbildung zu sehen ist, besitzen die Platten γ und δ eine Ladung. Platte γ ist positiv, Platte δ negativ geladen. Diese Ladung kann durch Anbringen einer Gleichspannungsquelle an die Platten erreicht werden. Diese beiden Platten wirken wie ein Plattenkondensator. Zwischen diesem Plattenkondensator werden nun die zwei, von einander isolierten Elektrizitätsträger α und β gebracht.

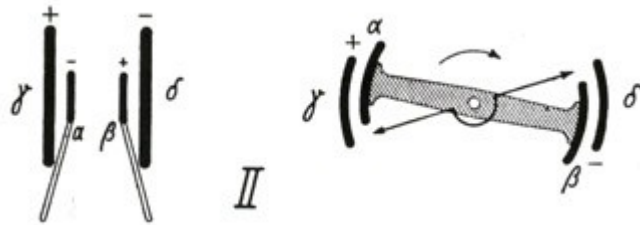
Zeichnung I:

Durch den Schleifkontakt, der mit zwei verbunden Pfeilen dargestellt ist, werden die Elektrizitätsträger α und β elektrisch leitend miteinander verbunden. Durch Influenz werden die Ladungen in diesen verbundenen Elektrizitätsträgern durch das elektrische Feld der Platten γ und δ getrennt. Links in der Abbildung ist das Prinzip dargestellt, rechts das gleiche mit Rotation, was eine periodische Wiederholung des Vorgangs ermöglicht. (In den Zeichnungen I - V sind Isolatoren schraffiert eingezeichnet!)



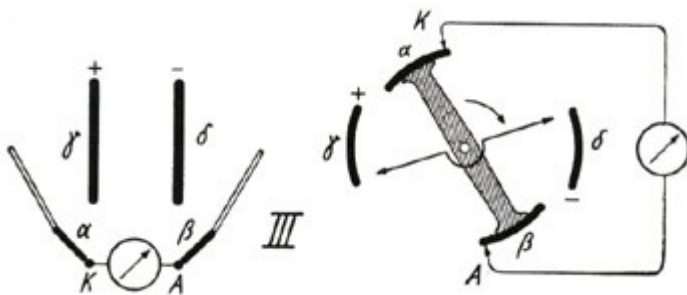
Zeichnung II:

Wenn die Elektrizitätsträger α und β den Schleifkontakt verlassen, so werden die Träger von einander wieder isoliert, und somit sind auch die influenzierten Ladungen getrennt worden. Die negativen Elektronen sind jetzt auf Platte α . Diese fehlen auf der Platte β , was bedeutet, dass es dort einen Überschuss an positiven Atomrümpfen gibt.



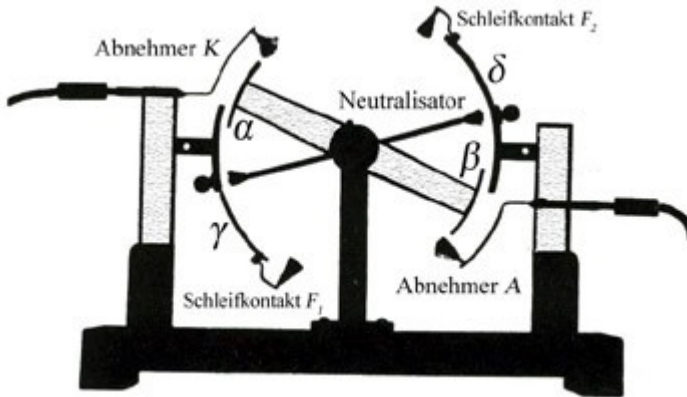
Zeichnung III:

Diese nun getrennten Ladungen können über die Schleifkontakte A und K abgenommen werden und über einen Verbraucher einander wieder zugeführt werden. Zwischen diesen Ladungen herrscht eine gewisse Spannung, welche durch die Gleichung $U = Q/C$ gegeben ist. Je höher die getrennte Ladung Q , bei gleich bleibender Kapazität C der Platten α und β , desto grösser wird auch die Spannung U zwischen diesen Platten. Die Menge der getrennten Ladungen hängt dabei von dem elektrischen Feld zwischen den Platten γ und δ ab.



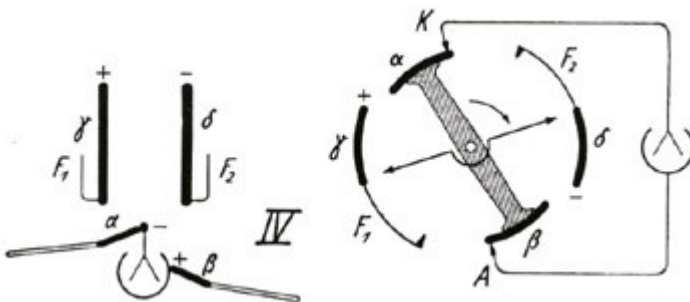
Das Multiplikatorverfahren

Mit einer Zusatzeinrichtung kann nun die Ladung der influenzierten Kondensatorplatten γ und δ auf höhere Werte gebracht werden. Für diese Zusatzeinrichtung wurden zwei verschiedene Verfahren erfunden. Das Erste ist das so genannte Multiplikatorverfahren, welches in folgender Abbildung zu sehen ist. Der Trick besteht darin, dass man die durch Influenz gewonnenen Ladungen nicht ganz dem Verbraucher zuführt, sondern einen Rest auf den Elektrizitätsträgern lässt und diesen auf die Platten γ und δ überträgt. Somit verstärkt sich das für den nächsten Influenzvorgang verfügbare elektrische Feld.



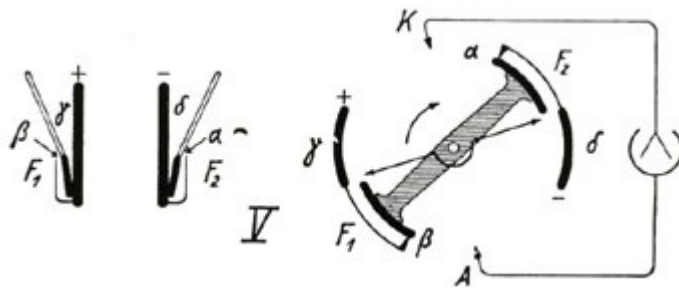
Zeichnung IV:

Die - wie in Zeichnungen I - III dargestellt - getrennte Ladung wird nicht dem Verbraucher, sondern einem Kondensator zugeführt und somit gespeichert. Die Elektrizitätsträger α und β behalten dabei einen Rest der Ladung, da sie nicht alle Ladung an den Kondensator abgeben können.



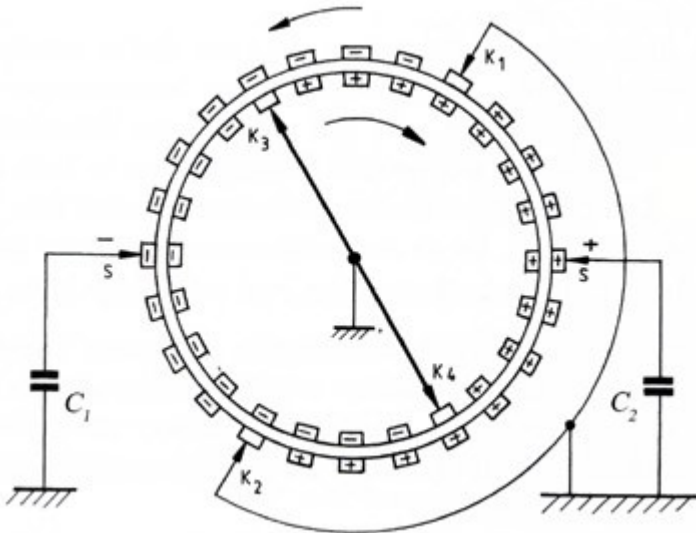
Zeichnung IV:

Diese Restladung auf den Elektrizitätsträgern α und β werden nun über die Schleifkontakte F_1 und F_2 auf die Platten γ und δ übertragen. Somit hat es auf diesen Platten eine höhere Ladung als vorher, was bedeutet, dass auch das elektrische Feld zwischen diesen Platten verstärkt wurde. Die Flächendichte, gegeben durch $\sigma = Q/A$, hat auf den Platten zugenommen. Je grösser Q , bei gleich bleibendem A , desto grösser ist die Flächendichte σ , was wiederum bedeutet, dass die elektrische Feldstärke zunimmt!



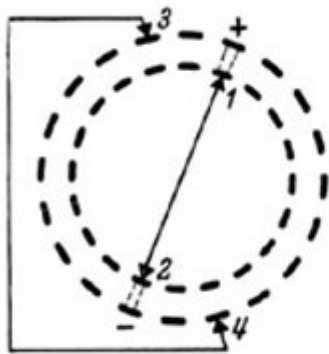
Wenn die Elektrizitätsträger nun wieder an dem Neutralisator vorbeikommen, bei dem sie kurzgeschlossen werden, wird auch eine höhere Ladung auf ihnen induziert. Von denen sie wieder einen Teil auf den Speicherkondensator abgeben usw. Dabei steigt die Spannung über dem Kondensator immer mehr ($U = Q/C$, $C = \text{konstant}$)! Mit diesem Multiplikatorverfahren werden nach wenigen Umdrehungen schon sehr hohe Spannungen mit mehreren tausend Volt erreicht.

Das zweite Verfahren ist eigentlich die Weiterentwicklung des Multiplikatorverfahrens. Es werden abermals Ladungen durch Influenz getrennt und vermehrt. Die Erneuerung bestand aber darin, dass die Platten α , β und γ , δ in grösserer Anzahl vorhanden sind. Dies wurde mit zwei gegenüberstehenden, entgegengesetzt rotierenden Scheiben realisiert, auf die viele leitende Platten geklebt wurden. Folgende Abbildung zeigt schematisch eine solche Influenzmaschine. Auch hier gibt es die Schleifkontakte. Diese, beschriftet mit K1- K4, sind paarweise leitend miteinander verbunden. Die Schleifkontakte, die so genannten Neutralisatoren, sind mit Massepotential verbunden. Die Abnehmer der Ladung sind mit S bezeichnet. An den Abnehmern sind auch die Speicherkondensatoren (C1 und C2) zu sehen, von denen je eine Platte auf Massepotential liegt. Die eigentlich hintereinander liegenden Segmentkränze sind zur bessern Übersicht konzentrisch liegend gezeichnet.

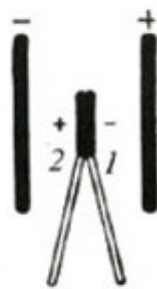


Zeichnung I:

Auf dem Segment gegenüber von Segment 1 des ‚äußeren‘ Kranzes habe es durch Zufall einen kleinen Elektronenmangel, d.h. eine positive Ladung. Diese übt ein schwaches elektrisches Feld auf sein Umfeld aus. Also auch auf Segment 1, welches mit Segment 2, durch den Neutralisator leitend verbunden ist. Auf Segment 1 wird eine negative Ladung induziert, was bedeutet, dass Segment 2 positiv geladen wird und somit eine negative Ladung auf das Segment des äußeren Kranzes induziert. Zwischen den Trägern "+" und 1, sowie den Trägern "-" und 2 herrscht ein schwaches elektrisches Feld, welches durch zwei Feldlinien dargestellt ist.

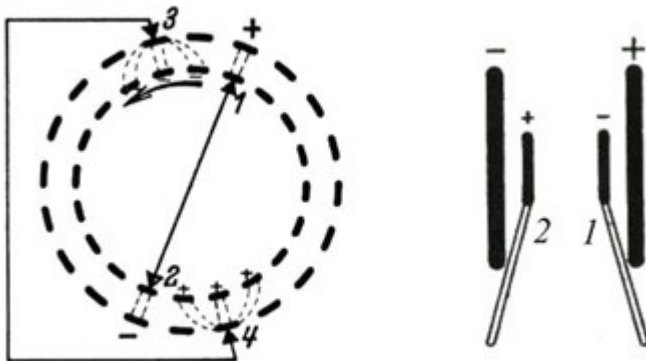


(I)



Zeichnung II:

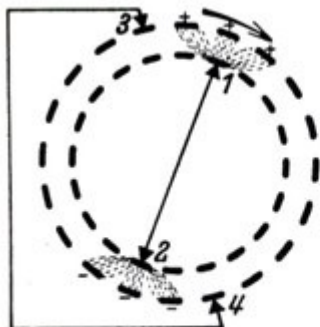
Der innere Kranz wird um drei Segmente im Gegenuhrzeigersinn gedreht. Je drei Träger des inneren Kranzes haben durch Influenz Ladungen erhalten. Wenn nun die Segmente bei 1 und 2 den Schleifkontakt verlassen, werden sie und auch damit die Ladungen getrennt. Auf dem Segment, welches sich bei 1 befand, haben wir somit eine negative Ladung, und auf dem gegenüberliegenden Segment, welches bei 2 war, eine positive. Bei all den anderen Segmenten, die an 1 und 2 vorbeistreichen, geschieht dasselbe. Die drei Segmente nach 1 sind jetzt alle negativ, alle Segmente nach 2 positiv geladen. Der springende Punkt ist der, dass die Feldlinien von all den geladenen Segmenten zu den beiden Segmenten 3 und 4 übergreifen! Das geschieht deshalb, weil die Segmente 3 und 4 leitend verbunden sind und somit auch den kürzesten Weg für einen Ladungsaustausch der geladenen Segmente darstellen würden, wenn sie nicht durch die Scheiben von einander isoliert wären. In diesen Segmenten 3 und 4 wird nun die Ladung durch Influenz viel stärker getrennt, als bei Zeichnung I dargestellt, weil das elektrische Feld durch insgesamt 6 geladene Segmente viel grösser ist als nur durch 2!



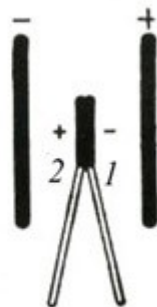
(II)

Zeichnung III:

Jetzt wird der innere Kranz festgehalten und nur der äussere um drei Segmente im Uhrzeigersinn gedreht. Die Ladungstrennung bei den Segmenten 3 und 4 geschieht im gleichen Prinzip wie in Zeichnung II. Nur, wie oben erwähnt, wirken nun insgesamt 'sechs Feldlinien'. Die influenzierten Ladungen sind nun dreimal so gross wie die Ausgangsladungen im inneren Kranz. Jetzt enden, 'Feldlinien' an den Segmenten 1 und 2, was bedeutet, dass auf diesen, durch den Neutralisator verbundenen Segmenten noch eine grössere Ladung influenziert wird. Die Ladung, die bei Zeichnung I gegenüber dem Segment 1 lag, hat sich nun schon verdreifacht. Natürlich hat sich auch die Ladung gegenüber dem Segment 2 verdreifacht.

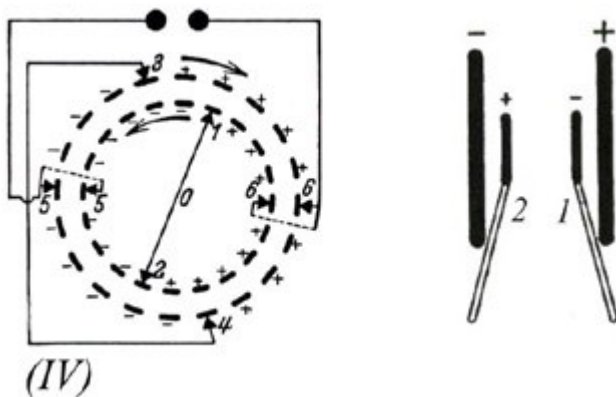


(III)



Zeichnung IV:

Jetzt wird wieder der innere Kranz gedreht. Wie oben schon erwähnt wirken jetzt 18 Feldlinien, was dazu führt, dass noch mehr Ladungen auf die Segmente, welche an 1 und 2 vorbeistreichen, influenziert werden, usw. Anstatt der abwechselnden Drehung, die hier nur für einen besseren Überblick sorgt, werden die Scheiben natürlich gleichzeitig in entgegengesetzter Drehrichtung rotiert. Auf allen Segmenten, die sich zwischen 1 und 4 auf der rechten Seite befinden hat man positive Ladungen. Auf der anderen Seite hat man zwischen 2 und 3 alle negativ geladenen Segmente mit Elektronenüberschuss. An den Segmenten 5 und 6 bringt man nun die Saugkämme an, die einen Teil der Ladungen abnehmen und dann in den Leidener Flaschen gespeichert werden.

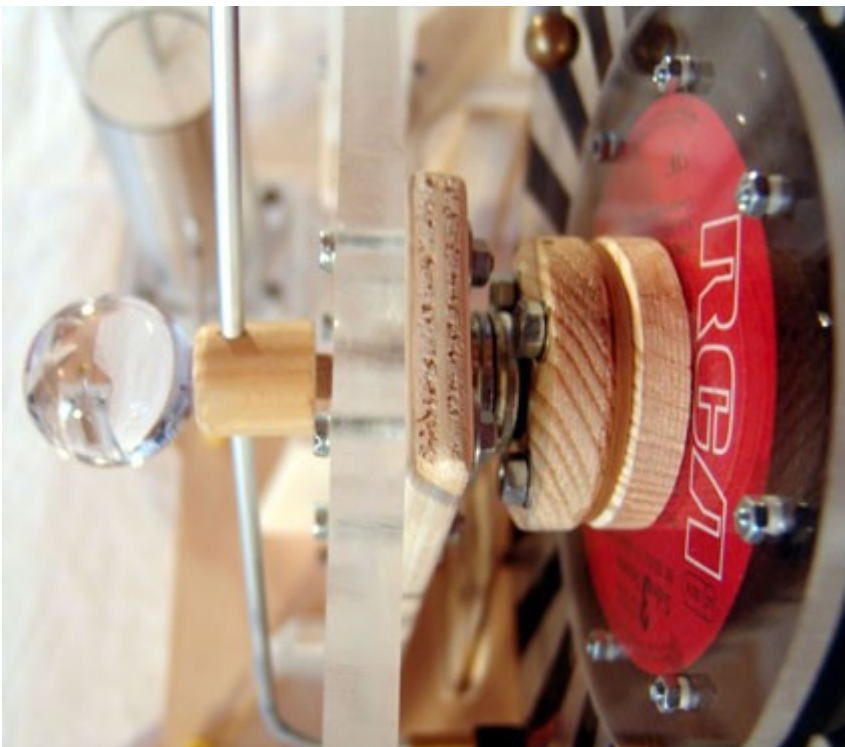


Die Scheiben

Die Scheiben stellen sicher das Kernstück der Influenzmaschine dar, da sie eine Ladungstrennung erst möglich machen. Die Scheiben bestehen aus einem Isolator und sollten eine möglichst hohe Dielektrizitätszahl aufweisen, da die Scheiben das Dielektrikum vieler kleiner Plattenkondensatoren darstellen. Ich verwendete für die Scheiben 2 alte Vinyl-Schallplatten. Der Vorteil dabei war, dass sie einen Durchmesser von 30 cm haben, nur etwa 1 mm dick und auch recht stabil sind. Zuerst wollte ich die Scheiben aus Plexiglas fertigen, aber Plexiglas in dieser Grösse ist recht teuer. Dafür hat Vinyl keine so hohe Dielektrizitätszahl wie Plexiglas. Ausserdem müssen die Scheiben absolut schön rund laufen, denn bei hoher Drehzahl würden die Scheiben sonst zu Umwucht neigen und könnten die Aufhängung beschädigen. Bei den Vinyl-Schallplatten besteht dieses Problem nicht, da sie diese unerwünschte Eigenschaft schon als Schallplatte nicht aufweisen dürfen und somit schon 'von Haus aus' ein absolut zentriertes Mittelloch besitzen, durch welches die Achse für die Aufhängung geführt werden kann.



Auf die Scheiben wurden je 30 Segmente, die aus Aluminiumklebband ausgeschnitten wurden, aufgeklebt. Die Segmente sollten nicht zu breit sein, da es sonst beim Betrieb der Maschine zu Überschlagen zwischen den Segmenten kommt. Auch sollten an den Segmenten überall die Kanten abgerundet werden, da sich dort trotz hoher Feldstärken keine allzu grossen Sprühentladungen bilden können. Damit die Scheiben fast reibungslos drehen, habe ich je 2 Kugellager ins Getrieberad einer Scheibe montiert. Später stellte sich heraus, dass die Scheiben mechanisch nicht stabil genug waren, und so habe ich noch eine kleinere 5mm dicke Plexiglasscheibe auf ihnen montiert. Für die Riemen, welche die Kraft der Handkurbel auf die Scheiben übertragen, wurden zuerst 2 dünne Gummiriemen verwendet. Diese bewährten sich nicht, da sie spröde wurden und immer wieder rissen. Die Scheiben müssen gegenläufig rotieren, dass es zu einer Ladungstrennung kommen kann. Dies erreicht man durch einen Trick, indem man einen der beiden Riemen so überschlägt dass sich eine Acht bildet und so wieder ins Führungs- und Getrieberad hängt. Eine gute Lösung war, die Riemen aus einem Stück Hochstart-Gummiseil, wie es für Modell-Segelflugzeuge verwendet wird, zu benutzen. Es ist aber wichtig, dass die Riemen den richtigen Umfang haben. Sie sollten eng auf den Getriebe- und Führungsrädern anliegen, dabei aber keinen zu festen Zug auf sie ausüben, da sonst die Achsen beschädigt würden. Die Aufhängung der Achse, auf welcher die beiden Führungsräder und auch die Kurbel montiert sind, wird mit zwei Kugellagern in die zwei Sperrholz-Stützen gesteckt. Auf diese Stützen wird auch die Achse der beiden Scheiben montiert. Die Scheiben sollten in möglichst geringem Abstand zu einander stehen, aber sie dürfen einander nicht berühren. Bei dieser Maschine beträgt der Abstand der Scheiben 4 mm, welcher durch Unterlegscheiben auf der Achse gehalten wird. Auch sonst ist darauf zu achten, dass die Scheiben nicht verrutschen können. Dies kann ebenfalls durch Unterlegscheiben erreicht werden.



Die Neutralisatoren

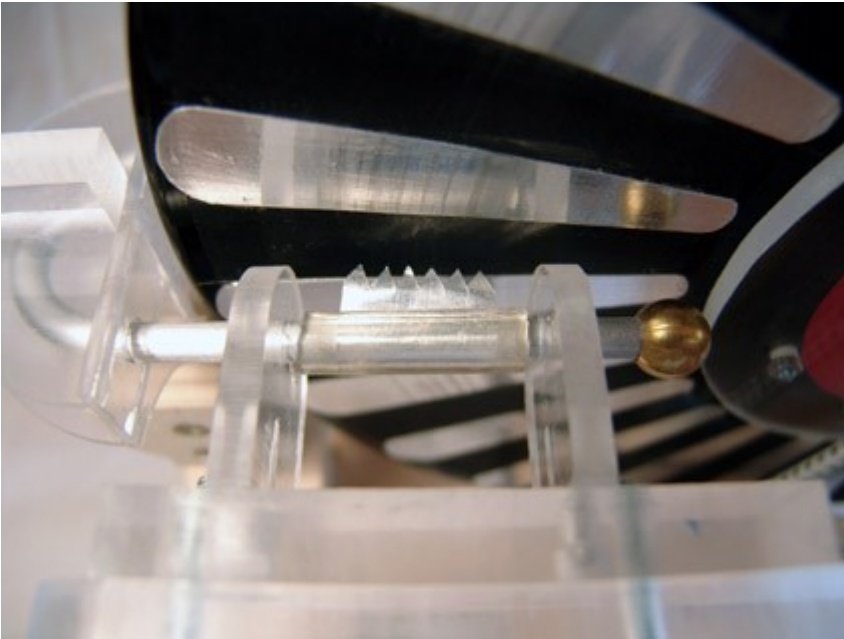
Die Neutralisatoren spielen für die Funktion der Maschine eine zentrale Rolle, da es ohne sie zu keiner Ladungstrennung kommt und damit auch keine Spannung aufgebaut würde. Die Neutralisatoren wurden aus 4mm dickem Aluminiumdraht gefertigt. Die Halterung der Neutralisatoren wurde aus einem Stück Rundholz gefertigt, so dass sie auf der Achse der Scheiben verstellbar aufgesteckt werden konnten. An ihnen wurde auch noch eine Plexiglaskugel befestigt. Sie waren ursprünglich dazu gedacht, dass man die Neutralisatoren auch bei laufender Maschine verstellen konnte. Sie sollten dabei eine isolierende Funktion übernehmen. Später habe ich gemerkt, dass das gar nicht nötig gewesen wäre, da an den Neutralisatoren gegenüber Massepotential keine hohe Spannung vorhanden ist.



Es ist zwingend notwendig, dass die Pinsel an den Enden der Neutralisatoren die Segmente auf den Scheiben berühren. Sonst funktioniert die Maschine nicht! Die Pinsel sollten aus weicher Kupferlitze oder aus etwa 10 sehr dünnen Kupferdrähten bestehen. Die Kupferdrähte können aus sehr dünnen Kabeln entnommen werden. Zu dicke, widerstandsfähige Drähte beschädigen oder zerkratzen die Segmente beim Betrieb. Die Pinsel sollten die Segmente auch bei weichen Drähten nur ganz leicht berühren. Auch sollte darauf geachtet werden, dass die Pinsel auswechselbar sind. So ist es möglich beschädigte oder oxidierte Pinsel leicht zu ersetzen. Ausserdem kann man so ein wenig mit der Breite, Art und Material der Pinsel experimentieren.

Die Abnehmer

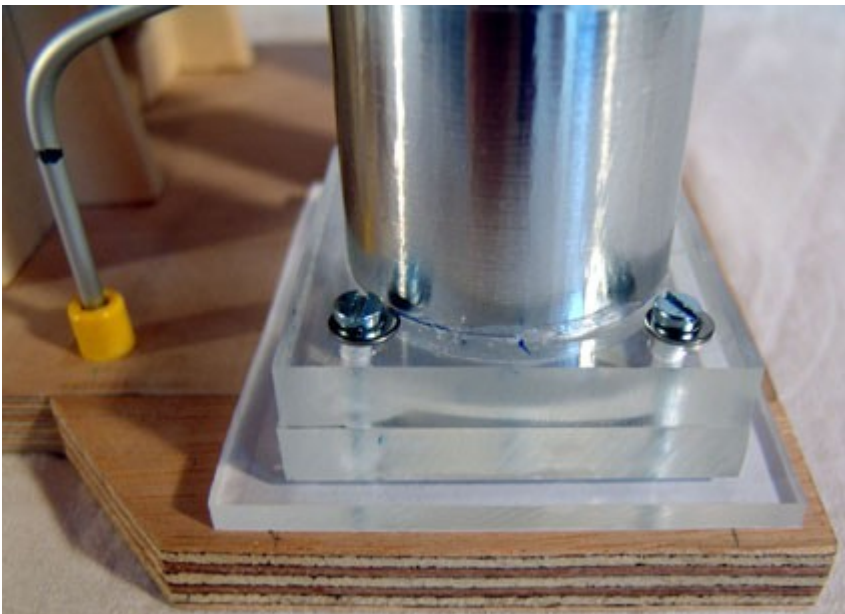
Die Abnehmer sollen die getrennte Ladung von den Segmenten ‚abnehmen‘ und zu den Kondensatoren befördern. Zwei Aluminiumstangen mit 6 mm Durchmesser wurden gebogen und auf die richtige Länge zugeschnitten. Ich habe viel mit verschiedensten Abnehmern und Befestigungen experimentiert. Am besten bewährt als Abnehmer hat sich ein breites Stück Alufolie, in das an einer Kante etwa 6 Zacken hinein geschnitten wurde. Befestigt habe ich alle 4 Abnehmer, indem ich die ungezackte Kante um die Aluminiumbögen gewickelt und einen aufgeschnittenen PVC- Schlauch darüber gestülpt habe. Somit sind die Abnehmer fixiert und doch verstellbar, so dass man sie austauschen oder auch den Abstand zu den Scheiben verstellen konnte.



Am Anfang hatte ich gedacht, dass die Abnehmer, gleich wie die Neutralisatoren, die Segmente berühren müssen. Die Segmente wurden durch die breiten Kämme der Abnehmer jedoch stark zerkratzt und die Scheiben erfuhren ausserdem eine grosse Reibung und waren nicht mehr so leicht zu drehen. Ich merkte durch Zufall, dass die Abnehmer die Segmente nicht berühren müssen um ihre Funktion zu erfüllen. Seither haben die Zacken der Abnehmer eine Abstand von etwa 1 - 2 mm zu den Segmenten.

Die Kondensatoren

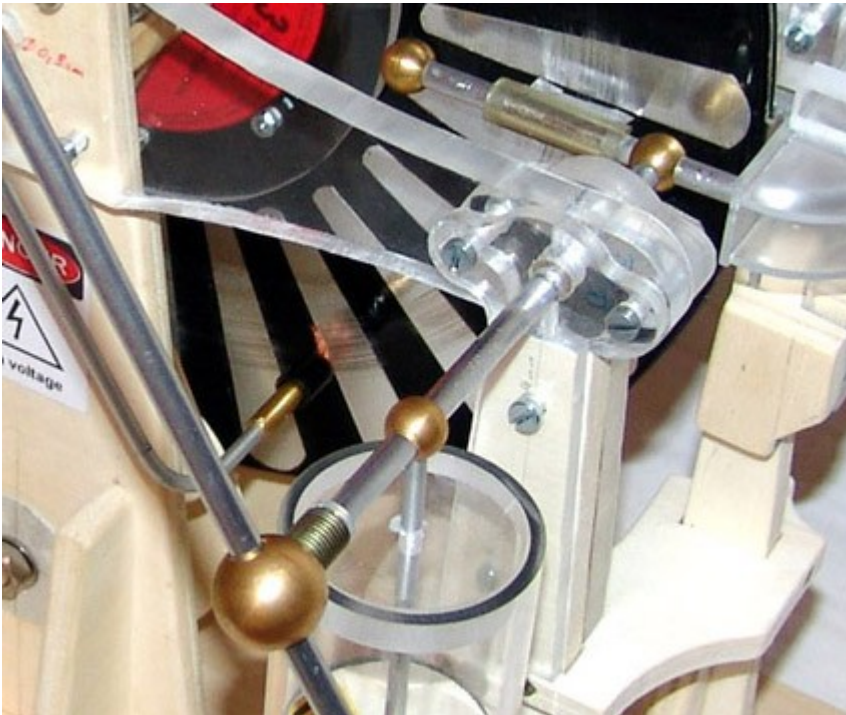
Die Kondensatoren dienen dazu, die durch Influenz getrennten Ladungen zu speichern und so bei einem Funkenüberschlag mehr Strom und dadurch auch mehr Energie bereitzustellen. Die Kondensatoren müssen Spannungen über 120 kV standhalten. Deshalb werden bei Influenzmaschinen meistens so genannte Leidener Flaschen verwendet. Das ist nichts anderes als ein Zylinder-Kondensator. Wegen der hohen Spannungen stellte sich die Herstellung der Kondensatoren wesentlich schwieriger heraus als angenommen. Es bedurfte vier Verbesserungen, bis sie ihre Aufgabe korrekt erfüllen konnten. Normalerweise verwendet man für Leidener Flaschen Glasgefäße, die sich jedoch nicht bearbeiten lassen. Die Kondensatoren dieser Influenzmaschine bestehen deshalb aus je einem Plexiglasrohr mit 5 cm Aussendurchmesser und 3 mm Wandstärke. Plexiglas ist einfach zu bearbeiten und ist mit einer Dielektrizitätszahl von 3,4 auch für Kondensatoren geeignet. Auf das zugeschnittene Rohr wurde ein Boden aufgeklebt. Das Rohr wurde nun innen und aussen mit selbstklebender Alufolie beklebt. Die Alufolie sollte dabei nicht zu hoch am Rohr hinaufgezogen werden, da es sonst zu Funkenüberschlägen kommt. Den Anschluss für die innere ‚Platte‘ macht ein 4 mm dicker Aludraht, der von oben in der Mitte bis auf den beklebten Boden des Zylinders führt. Mit einem Bügel aus 4 mm Aludraht werden die Aussenflächen der Kondensatoren miteinander verbunden und gemeinsam auf Massepotential gelegt.



Der beklebte Zylinder bekam einen Boden aus 1 cm dickem Plexiglas, der genau in die Röhre eingepasst wurde. Das Ganze wurde dann in einen Plexiglasring gestellt und mit Silikon ausgefüllt, so dass ein Funke eine Strecke von 2 cm durch Silikon überbrücken müsste. Da Silikon ein guter Isolator ist und dabei auch noch flexibel, gab es seither keine Überschläge mehr, und die Flaschen konnten auf mehr als 100 kV aufgeladen werden. Die Verbindungsstange zur inneren Alufolie wird mit zwei Plexiglas-Ringen in der Mitte des Zylinders zentriert. Ausserdem wurde, zur Erhöhung der Kapazität, die Alufolie noch weiter nach oben gezogen. Dies erforderte natürlich auch wieder eine extra Isolation aus Plexiglas, um den Deckel gegen die äussere Alufolie abzuschirmen.

Die Entladeelektroden und die Verbindung der leitenden Elemente

Damit die Maschine hohe Spannungen aufbauen kann, sind scharfe Kanten, Ecken sowie Spitzen an den leitenden Teilen zu vermeiden. Denn durch sie kann sich wegen den auftretenden Sprühentladungen keine hohe Spannung aufbauen. Natürlich sind die Neutralisatoren und die Abnehmer davon ausgeschlossen, denn diese müssen Spitzen haben. Alle elektrisch leitenden Verbindungen und Abschlüsse sollten durch Kugeln realisiert werden. Gut eignen sich dabei Aluminium- oder Messingkugeln. Ich verwendete Messingkugeln, da diese billiger und einfacher zu beschaffen sind als Alukugeln. Stahl-, oder Eisenkugeln sind zu schwer und ausserdem lässt sich praktisch kein Loch in solche Kugeln bohren. Die Verbindung von Abnehmer, über den Kondensator, zur Entladestange auf beiden Seiten ist aus einer 6 mm Alustange gefertigt worden.



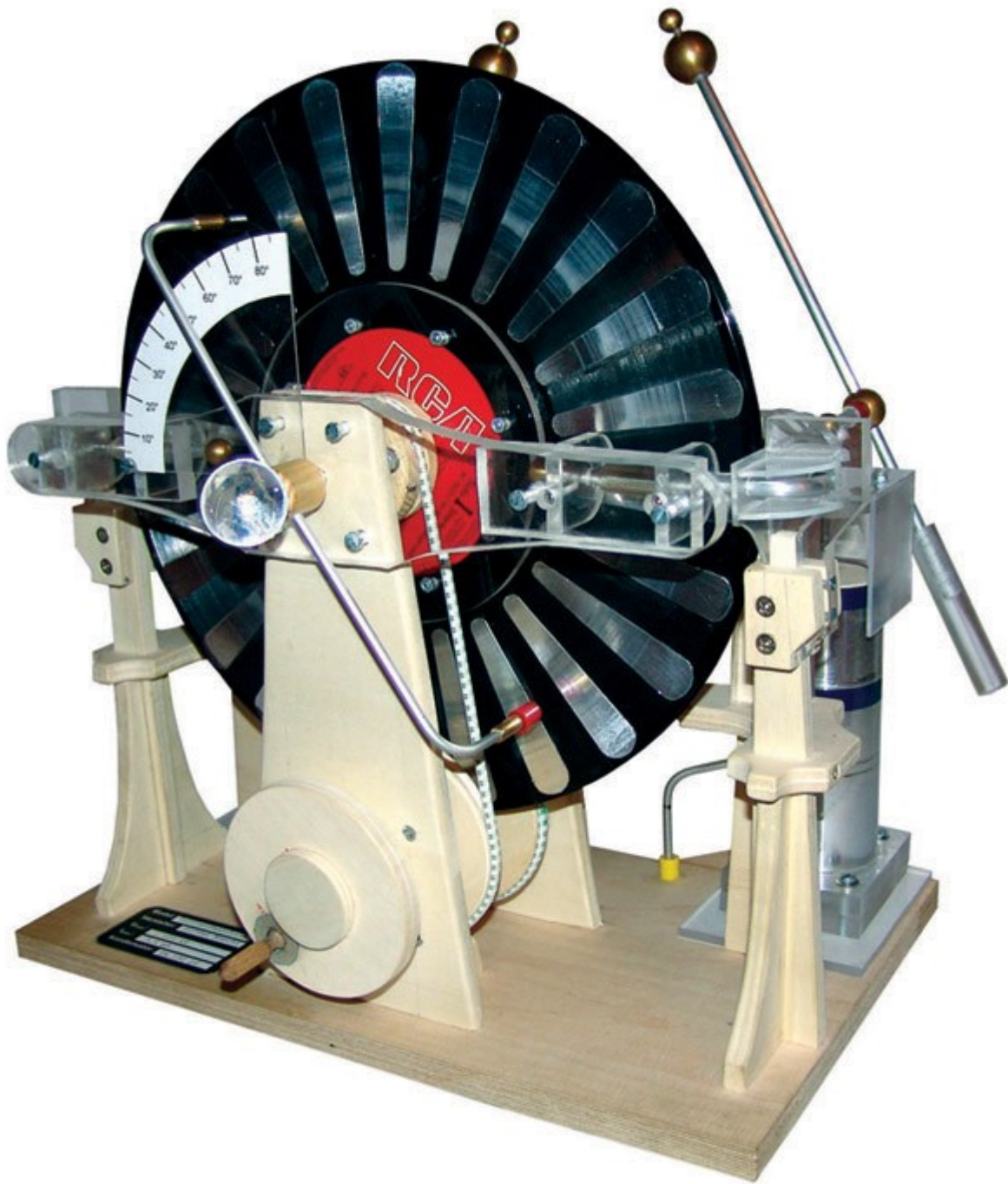
Auf den Bildern, die ich gesammelt hatte, waren die Entladeelektroden immer als Doppelkugeln ausgeführt. Ich habe mich also entschlossen, dies gleich zu tun. Die grössere Kugel hat einen Durchmesser von 2.5 cm und die kleinere 1 cm. Die Kugeln sind mit einem 4 mm Aludraht miteinander verbunden und werden auf die 6 mm dicke Entladestange gesteckt.



An der Entladestange wird noch ein Griff aus Plexiglas befestigt, so dass man den Abstand der Elektroden bei Betrieb der Maschine einstellen kann. Die Entladestange wird mit einer Kugel mit 1.5 cm Durchmesser drehbar an der Querverbindung von Abnehmer und Kondensator verbunden.

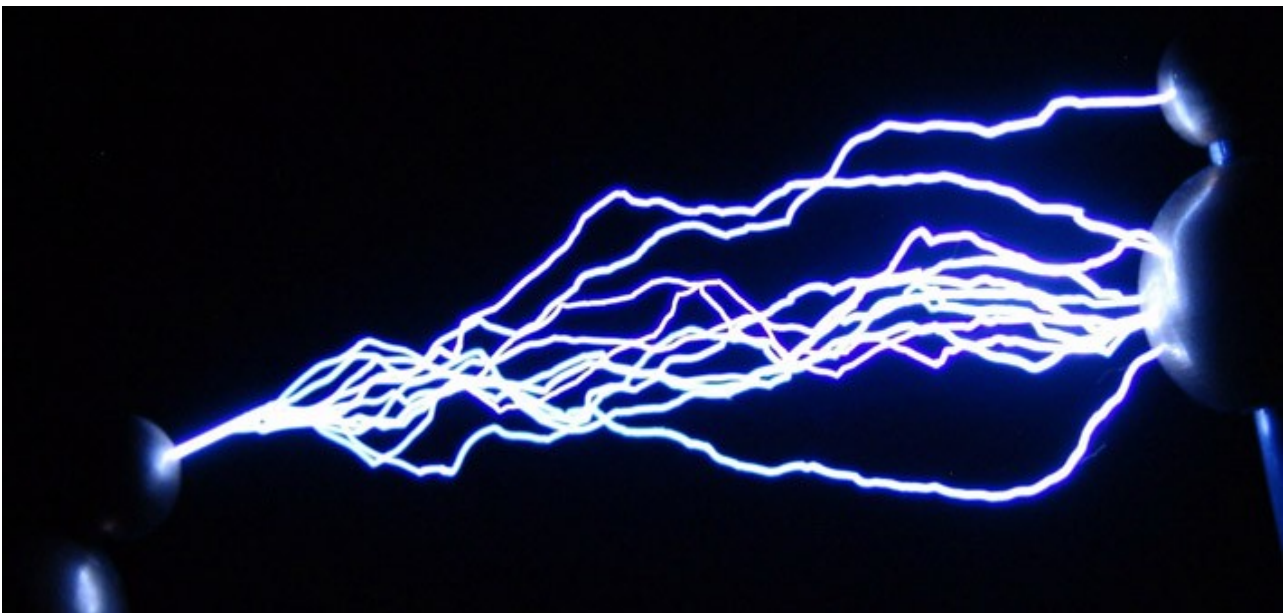
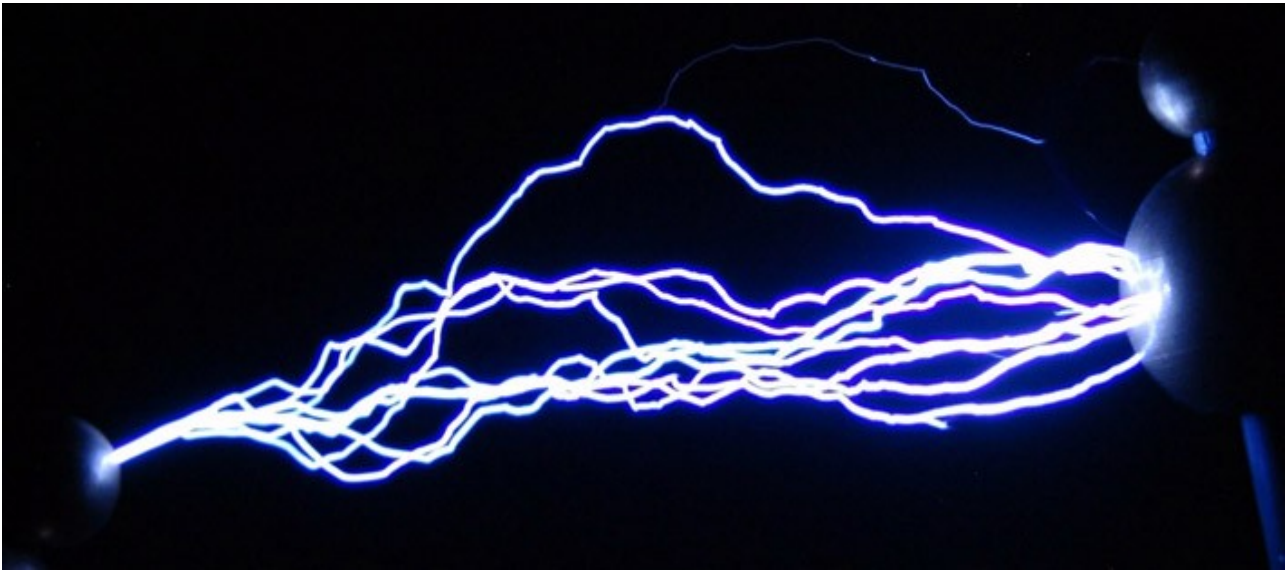
Die fertige Maschine



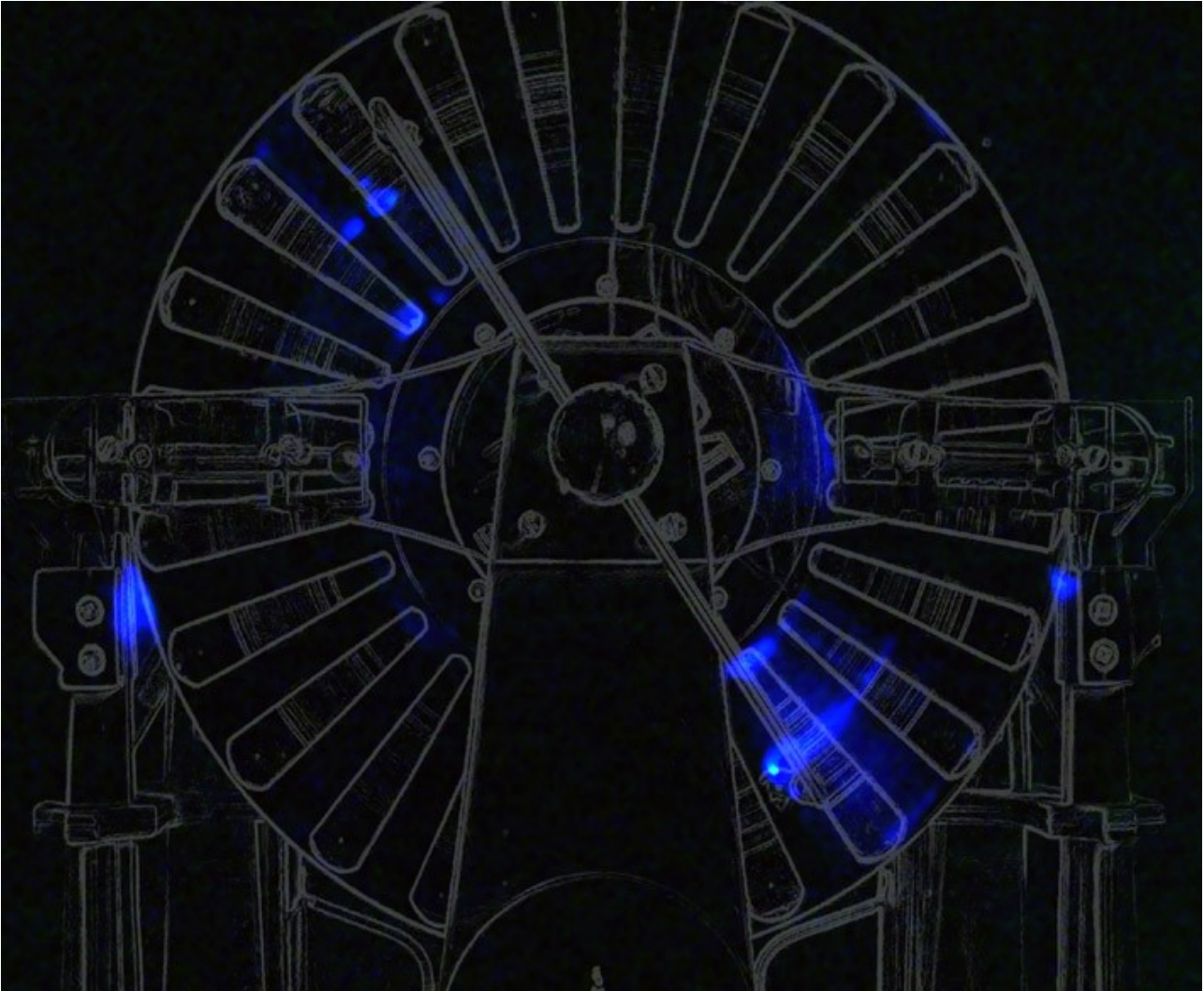


Die Entladungen

Folgende Bilder zeigen die beeindruckenden Entladungen der Influenzmaschine. Von der Gestalt her haben sie grosse Ähnlichkeit mit echten Blitzen. Der Vorgang ist eine Kondensatorentladung, die sehr schnell abgeschlossen ist. Die Spannung baut sich so schnell auf, sodass sich die freien Elektronen den Weg mit dem geringsten Widerstand durch die Luft suchen, wodurch diese charakteristischen Verästelungen entstehen, wie man es sich bei Blitzen gewohnt ist. Die Bilder sind Langzeitaufnahmen (5 - 10 Sekunden), sodass auf einem Bild mehrere Funkenüberschläge zu sehen sind.



Das folgende Bild ist eine Langzeitaufnahme der Influenzmaschine im Betrieb. Man sieht sehr schön die Koronaentladungen an den Neutralisatorspitzen und an den Rändern der Scheiben. Diese Koronaentladungen sind äusserst unerwünscht, denn sie bedeuten einen Ladungsaustausch und damit eine 'entladung' des Generators. Da die Influenzmaschine sowieso nur sehr kleine Ströme liefern kann, haben solche Koronaentladungen schon grosse negative Auswirkungen auf die Effizienz der Maschine. Diese Entladungen vollständig zu unterdrücken ist praktisch unmöglich. Um dieses Problem zu lösen hatte man früher diese Generatoren in einem Druckbehälter in Wasserstoffgas unter Druck betrieben.



Quelle:

<http://homemade-electronics.com/index.php?s=Influenzmaschine>

Geschichtliche Entwicklung und Typen

Elektrostatischer Generator

Elektrostatische Generatoren sind mechanische Vorrichtungen zur Erzeugung [elektrischer Spannung](#) mit Mitteln der [Elektrostatik](#) durch die Trennung [elektrischer Ladungen](#). Allgemein sind sie geeignet, hohe Spannungen zu erreichen, können aber keine hohe [Leistung](#) liefern. Die erreichbaren Spannungen sind nur durch Isolationsprobleme wie z. B. [Kriechstrom](#) und [Spitzenentladungen](#) begrenzt.

Geschichte



Reibungselektroskopmaschine

Die ersten elektrostatischen Generatoren arbeiteten nach dem Prinzip der [Reibungselektrizität](#) und wurden bis zum Ende des 19. Jahrhunderts als *Elektriermaschinen* bezeichnet. Ab 1883 wurden Generatoren entwickelt, die nach dem Prinzip der [Influenz](#) arbeiten. Diese Generatoren werden als [Influenzmaschinen](#) bezeichnet.

[Otto von Guericke](#) entwickelte 1663 den ersten elektrostatischen Generator, eine Schwefelkugel mit einer Drehachse, die er 1672 [Gottfried Wilhelm von Leibniz](#) überließ. Dieser erzeugte damit die ersten künstlichen elektrischen [Funken](#).^[1] Anfang des 18. Jahrhunderts begann die systematische Erforschung der Elektrizität. Elektrostatische Generatoren waren bis zur Entwicklung der [Voltaschen Säule](#), um 1800 durch [Alessandro Volta](#), die einzige Quelle künstlich erzeugter Elektrizität.

Gegenwärtig noch eingesetzt werden für Unterrichtszwecke und in [Teilchenbeschleunigern](#) [Van-de-Graaff-Bandgeneratoren](#) und [Pelletrons](#). Bei kleinen Bandgeneratoren erfolgt die anfängliche Ladungstrennung durch Reibung, sie sind also weiterentwickelte Elektriermaschinen. Bei den großen [Van-de-Graaff-Beschleunigern](#) und Pelletrons wird die anfängliche Ladungstrennung mittels [Spitzenentladung](#) einer aus dem Stromnetz gewonnenen Spannung bewirkt, aber die Erhöhung der Spannung erfolgt dann mit elektrostatischen Mitteln.

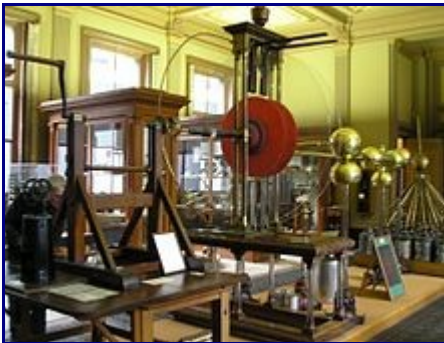
Funktionsweise

Elektrostatische Generatoren können in zwei Klassen unterschieden werden:

- Elektrisiermaschinen, die nach dem Prinzip der Reibungselektrizität arbeiten;
- [Influenzmaschinen](#), die den Effekt der elektrischen Influenz nutzen.

Charakteristisch für Elektrisiermaschinen ist die Reibung zwischen Isolatoren (zum Beispiel Schwefel, Glas, Holz und Gummi). In Influenzmaschinen entsteht die Aufladung dagegen durch [Influenz](#) in Metallteilen.

Elektrisiermaschinen



[Martinus van Marums](#) elektrostatischer Generator in [Teylers Museum](#)

Durch mechanische Reibung zweier Materialien mit unterschiedlicher [Elektronenaffinität](#) werden die Elektronen an ihren Oberflächen unterschiedlich stark zwischen ihnen verteilt. In Elektrisiermaschinen wird die so gewonnene, je nach Bauart entweder positive oder negative Ladung abgeleitet und in [Kondensatoren](#), wie zum Beispiel [Leidener Flaschen](#), gesammelt.

[Reibungselektrizität](#) ist ein Spezialfall der [Berührungs- oder Kontaktelektrizität](#). Durch die Reibung ist der Kontakt zwischen den Materialien stärker und der Austausch von Ladungsträgern intensiver als bei der bloßen Berührung.

Die am weitesten verbreitete Bauform besteht aus einem oder mehreren Glaskörpern in Form von Hohlkugeln, Walzen oder Glasscheiben. An die rotierenden Glaskörper werden Reibzeuge gedrückt, zum Beispiel Lederkissen mit einem Überzug aus [Amalgam](#).

An einer Stelle hinter dem Andruckpunkt der Reibzeuge nimmt ein Konduktor (ein elektrischer Leiter, zum Beispiel ein kleiner metallener Pinsel) die elektrische Ladung von der Glasoberfläche auf und leitet sie direkt zu einem Experiment oder in einen Kondensator ab. Die Reibzeuge sind meistens [geerdet](#), so dass die vom Konduktor abgeleitete Ladung ausgeglichen wird. Einige Maschinen arbeiten nach dem umgekehrten Prinzip, bei dem der Konduktor geerdet ist und die elektrische Ladung an den Reibzeugen abgenommen wird, und es gab Maschinen, bei denen zwischen Konduktor- und Reibzeugerdung gewechselt werden konnte.

Neben Glas wurden Holz und Gummi für Scheiben von Elektrisiermaschinen verwendet. Bei den ersten Elektrisiermaschinen diente anstelle von Reibzeug und Konduktor die menschliche Hand zugleich zum Reiben und zur Aufnahme der elektrischen Ladung. Der Reibende wurde „elektrisiert“, was zur Bezeichnung Elektrisiermaschine führte.

Die größte Scheiben-Elektrisiermaschine (der Durchmesser der Glasscheiben beträgt 1,65 m) steht in Teylers Museum in [Haarlem](#) und wurde von dem Arzt Martinus van Marum (1750-1837) 1785 der Öffentlichkeit präsentiert^[2]. Am Bau war auch der Instrumentenmacher Cuthbertson aus Amsterdam beteiligt. Van Marum war damals gerade Direktor von Teylers Museum geworden und

befasste sich seit über 10 Jahren noch in Groningen mit der Verbesserung der Elektrisiermaschinen, mit denen er neue Entdeckungen auf dem Gebiet der Elektrizität machen wollte und die er u.a. Oersted und 1781/2 Volta präsentierte. Sie kann Funken in einer Funkenstrecke von bis 61 cm Abstand erzeugen. 1881 erhielt sie eine Ehrenmedaille auf der Weltausstellung in Paris. Ein genauer Nachbau, der 1968 an der Universität Eindhoven gebaut wurde (Prof. H. J. de Weyer) kann Spannungen von über 500.000 Volt erzeugen. Sie wurde als holländischer Beitrag auf der 200-Jahr-Feier der USA 1976/7 präsentiert.

Influenzmaschinen



Wimshurstmaschine mit zwei Leidener Flaschen

Die Ladungstrennung wird bei Influenzmaschinen nicht durch Reibung, sondern durch den Effekt der elektrischen Influenz erreicht. Ein leitender Körper, der von einem weiteren, gegenüber diesem elektrisch aufgeladenen Körper räumlich entfernt wird, erhöht sich bei gleichbleibender Ladung die Spannung zwischen beiden elektrischen aufgeladenen Körpern. Es wird dabei die mechanische Arbeit zur Überwindung der elektrostatischen Anziehung in Energie des elektrischen Feldes gewandelt. Wird die auf den voneinander entfernten Körpern angehäuften Ladung elektrisch abgeleitet, kann man bei sehr hoher Spannung (bis über 100 kV) einen geringen Strom (einige 10 μA) entnehmen.

Die Körper bestehen bei Influenzmaschinen aus auf Isolierscheiben aufgetragenen Metallfolien-Segmenten, es werden jedoch nach dem gleichen Prinzip auch andere Formen und Körper verwendet. Die maximale Spannung ist durch die Anzahl und den Abstand der Segmente sowie durch den Scheibendurchmesser begrenzt.

Entscheidend für die Funktion einer Influenzmaschine sind die Existenz und Beweglichkeit von Ladungsträgern. Aus diesem Grund werden für Influenzmaschinen Metalle eingesetzt. Die Schritte

1. Annäherung eines Metallkörpers an eine elektrische Ladung bzw. Aufladung des Körpers
2. Wegtransport des Metallkörpers von seinem Bezugspotential und Abnahme der Ladung durch einen Ableiter (Spitzenentladung)
3. Neutralisierung des Metallkörpers (Ausgleich der abgezogenen elektrischen Ladung) durch weiche, leitfähige, bei manchen Maschinen über Kreuz verbundene Bürsten

finden bei jeder Umdrehung wiederholt statt.

Die Wimshurstmaschine nutzt die abgenommene elektrische Ladung zusätzlich zur Verstärkung des elektrischen Feldes des Induktors und verstärkt den Effekt dadurch stetig. Durch diese Selbstverstärkung benötigt sie, anders als die Maschinen von Töpler/Holtz, keine anfängliche Aufladung ihrer Induktoren, da auch zu Beginn des Betriebs immer zumindest ein kleiner Ladungsunterschied vorhanden ist.

Das Prinzip der Influenzmaschine [3] lässt sich auch umkehren, indem eine ähnliche Anordnung mit Hochspannung gespeist wird und dann als Motor arbeitet.

Eine sehr ungewöhnliche Influenzmaschine ist der [Kelvin- oder Wassertropfengenerator](#), der Wassertropfen influenziert und sie zum Transport der elektrischen Ladung verwendet. Er benötigt ebenfalls keine anfängliche Aufladung und erreicht allein durch zwei getrennt laufende Wasserstrahlen nach 20 bis 30 s eine Spannung von 4 bis 6 kV.

Eine kleine Holtzsche Influenzmaschine liefert typische Ströme von 10 μA , womit sich eine Leidener Flasche mit einer Kapazität von 10 nF in 30 s auf 30 kV aufladen lässt. Das genügt, um in einer parallel geschalteten Kugelfunkenstrecke von 1 cm Abstand knallende Funken überspringen zu lassen. Die Funken dauern rund 1 μs und haben somit eine maximale Stromstärke von 300 A. [4]

Geschichte

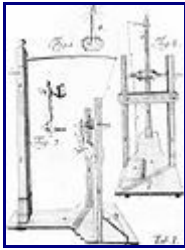
Die Erforschung der Elektrizität und die Weiterentwicklung elektrostatischer Generatoren waren vom 17. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts eng miteinander verknüpft. Erkenntnisse in der Elektrizitätsforschung führten zu Verbesserungen der Generatoren, und verbesserte Generatoren erlaubten neue Erkenntnisse über die Natur der Elektrizität.

Die folgende Tabelle soll eine kurze Übersicht über die gegenseitig befruchtende Geschichte geben:

| Jahr | Entdecker/Erfinder | Beschreibung |
|-----------|--|--|
| 1663 | Otto von Guericke | Bau der ersten Elektrisiermaschine, einer drehbaren Schwefelkugel, die mit der Hand gerieben wurde |
| 1671 | Gottfried Wilhelm von Leibniz | Erste gezielte Erzeugung eines elektrischen Funkens mit der Schwefelkugel von Guericke's [1][5] |
| 1675 | Jean Picard | Entdeckung des Leuchtens von Quecksilber im Vakuum geriebener Glasröhren [6] |
| 1706 | Francis Hauksbee | Entwicklung der ersten Generatoren mit Glaskugeln [6] |
| 1730 | Stephen Gray | Entdeckung der elektrischen Leitung [7] |
| 1743 | Georg Matthias Bose | Einführung des Konduktors zur Ableitung der elektrischen Ladung von der geriebenen Glaskugel und Einführung von Reibekissen, die das Reiben mit der Hand ablösen [8] |
| um 1745 | Johann Heinrich Winkler | Bierglasgenerator; Vorläufer der Elektrisiermaschinen mit Glaszylindern |
| 1745/1746 | Ewald Georg von Kleist/Musschenbroek | Erfindung der Leidener Flasche , des ersten elektrischen Kondensators [9] |
| 1755 | Martin de Planta | Generatoren mit runden Glasscheiben |
| 1777 | Martinus van Marum | Elektrisiermaschine mit Gummischeiben, die im Quecksilberbad laufen |
| 1784 | Walkiers de St. Amand | Erster Bandgenerator mit 7,5 m langen Seidenbändern, die über Holzrollen gespannt und gerieben wurden; Vorläufer des Van-de-Graaff-Generators [10] |
| 1840 | Sir William Armstrong | Dampfelektrisiermaschine |
| 1843 | Michael Faraday | Nachweis des Wirkmechanismus der Dampfelektrisiermaschine; Nachweise der Reibung von Wassertröpfchen als Ursache der Elektrizitätserzeugung [11] |

| | | |
|------------|--------------------------------------|--|
| 1867 | Lord Kelvin | Wassertropfengenerator |
| 1872 | Augusto Righi | Generator mit Metallzylindern an einem isolierenden Seil; Vorläufer des Pelletrons [10] |
| 1883 | Wilhelm Holtz | Bau der ersten, kontinuierlich arbeitenden Influenzmaschine |
| 1929 | Robert Van de Graaff | Entwicklung von Bandgeneratoren; Verwendung zum Beispiel im Van-de-Graaff-Beschleuniger und in heutigen Labors |
| um 1965 | Raymond Herb | Pelletron -Beschleuniger; isoliert verbundene Metallglieder in einem unter Hochdruck stehenden, isolierenden Gas [10] |

Kuriositäten



Bierglas-Elektriermaschine von Johann Heinrich Winkler, um 1730-1740



Der „elektrische Kuss“, um 1740



Behandlung von Zahnschmerzen mit Elektrizität

Nachdem seit 1730 die Bekanntheit der Experimente und Forschungen zur Elektrizität deutlich zunahm (wissenschaftliche Wochenzeitschriften berichteten jetzt regelmäßig darüber), sorgten bereits nach kurzer Zeit allerlei Kuriositäten und Attraktionen für Aufsehen. Sehr beliebt war der „elektrische Kuss“. Am Eingang zu einigen Etablissements erwartete den Besucher eine elektrisch aufgeladene Dame. Gab ihr der Besucher einen Kuss auf die Lippen, erhielt er einen kleinen elektrischen Schlag.

Aus praktischen Erwägungen heraus entstand der Bierglasgenerator von Johann Heinrich Winkler. Elektrisiermaschinen aus Glas waren in den Kreisen der Experimentatoren üblich (weil kostengünstig). Die Verwendung von Biergläsern machte den Bau einer Elektrisiermaschine noch ein wenig billiger und an Ersatzteilen herrschte kein Mangel. Durchsetzen konnte sich diese Bauform kaum. Trotzdem begründete sie eine eigene Entwicklungslinie von Walzen-Elektroisiermaschinen, bei denen Glaswalzen zum Einsatz kamen.

Neue Einsatzgebiete für die Elektrizität wurden gesucht, wobei unter anderem die Behandlung von Zahnschmerzen mit Stromstößen versucht wurde. Mit welchem Erfolg das geschah, ist nicht überliefert. Etwa zur selben Zeit (um 1740 bis 1750) wurden erstmals Tiere durch künstlich erzeugte Elektrizität getötet und die Behandlung von Menschen wurde zunächst wieder aufgegeben.

Einzelnachweise

1. ↑ ^{a b} [Von Gottfried Wilhelm Leibniz, Zweite Reihe, Erster Band, Akademie Verlag, ISBN 3-05-004187-0, S. 339, Abschnitt 108.](#)
2. ↑ Ausstellungsführer, Teylers Museum, Haarlem
3. ↑ <http://www.hcrs.at/INFLUENZ.HTM> Beschreibung Wimshurst-Influenzmaschine und elektrostatischer Motor
4. ↑ Pohl *Elektrizitätslehre*, 21. Auflage 1975, S.31
5. ↑ Der zugehörige Briefwechsel von 1671 ist abgedruckt in Fritz Fraunberger *Elektrizität im Barock*, Aulis Verlag, Köln, S.35f. Dort wird deutlich, dass Guericke selbst keine Funken erzeugt hat. Er schreibt dort u.a., dass ihm von Wärmeerzeugung nichts bekannt wäre und er nur ein Leuchten im Dunkeln kennt.
6. ↑ ^{a b} [Die Lehre von der Reibungselektricität, Zweiter Band, Peter Theophil Riess, Berlin, 1853, S. 146 ff](#)
7. ↑ Philosophical Transactions, Band XXXVII, Royal Society, London, 1732
8. ↑ ^{a b} Georg Matthias Bose, Die Electricität nach ihrer Entdeckung und Fortgang mit poetischer Feder entworfen, 2 Bde. (Wittenberg: bey Johann Joachim Ahlfelden, 1744), in: Bibliothèque raisonnée t. 34 (1745), partie 1, S. 3-20
9. ↑ [Auszug aus der Familienbiografie der Kleists mit Link auf den Originalabdruck des Schreibens an Krüger](#)
10. ↑ ^{a b c} [Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications, Ragnar Hellborg, ISBN 3-540-23983-9](#)
11. ↑ [Experimental Researches on Electricity Volume II, Michael Faraday, London, 1844](#)

Literatur

- Weber, Heiko: *Die Elektrisiermaschinen im 18. Jahrhundert*. Berlin: Verlag Wissenschaft und Bildung 2011. (= Ernst-Haeckel-Haus-Studien, Monographien zur Geschichte der Biowissenschaften und Medizin, Band 7) [ISBN: 978-3-86135-487-1]
- Edmund Hoppe *Geschichte der Elektrizität*, Leipzig 1884
- Hans Schimank *Geschichte der Elektrisiermaschine bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts*, Zeitschrift für technische Physik Bd.16, 1935, S.245
- B.Dibner *Early electrical machines*, Norwalk, Connecticut 1957
- Fritz Fraunberger *Elektrizität im Barock*, Aulis Verlag, München

Elektrische Ladung

| Physikalische Größe | | |
|-------------------------|-------------------------------|---|
| Name | elektrische Ladung | |
| | Q, q | |
| Formelzeichen der Größe | Größen- und Einheiten- system | |
| | Einheit | Dimension |
| | SI | $C = A \cdot s \quad I \cdot T$ |
| | CGS | $Fr \quad M^{1/2} \cdot L^{3/2} \cdot T^{-1}$ |

Die **elektrische Ladung** oder **Elektrizitätsmenge** ist eine der grundlegenden Größen der Physik. Sie wird gemäß dem internationalen Einheitensystem in der Einheit Coulomb angegeben und mit dem vom lateinischen Wort ‚quantum‘ abgeleiteten Formelzeichen Q oder q ausgedrückt. Die elektrische Ladung ist eine mit den elementaren Materiebausteinen verbundene Eigenschaft, und sie ist ein Spezialfall des allgemeineren physikalischen Ladungsbegriffs. Ist eine Verwechslung ausgeschlossen, wird meist einfach nur von „Ladung“ gesprochen.

Elektrisch geladene Teilchen unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung, die zu den vier Grundkräften der Physik zählt. Die Kräfte zwischen elektrischen Ladungen bewirken den Zusammenhalt der Atome, Moleküle und Festkörper sowie den elektrischen Strom und sie erzeugen Phänomene wie Gewitter und das Knistern beim Haarekämmen.

In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller elektrischen Ladungen unveränderlich und ein ganzzahliges Vielfaches einer kleinsten, unteilbaren Menge, der Elementarladung $e = 1,602\,176\,565\,(35) \times 10^{-19} \text{ C}$ [1]. Von den Bausteinen der Atome tragen Proton und Elektron die Ladung $+e$ bzw. $-e$, das Neutron keine (elektrische) Ladung.

Alltagsbeobachtungen



Blitz zwischen Wolken

Eine eindrucksvolle Folge elektrischer Aufladungen durch [Reibungselektrizität](#) sind [Gewitterblitze](#). Luft ist normalerweise ein [Isolator](#), bei zu großen Aufladungen kommt es zu einem [Durchschlag](#). In Blitzen kommt es zu einem schlagartigen Ladungsausgleich zwischen unterschiedlich geladenen Bereichen in der Gewitterzelle oder – seltener – zwischen einem Bereich in der Gewitterzelle und dem Erdboden. Kleine [Funken](#), die von einem Knistern begleitet werden, können auch beim An- und Ausziehen von Kleidungsstücken oder beim Kämmen entstehen.



Aufgestellte Haare nach Aufladung mit Reibungselektrizität

Der Mensch besitzt kein spezifisches [Sinnesorgan](#) für elektrische Ladung. Er kann sie lediglich indirekt wahrnehmen, wenn durch [Ladungsausgleich](#) ein elektrischer Strom durch den Körper fließt. Die Wahrnehmung eines leichten elektrischen Schlages beim oben schon erwähnten Ausziehen von Kleidungsstücken entspricht der Erfahrung, wenn man über einen Teppichboden geht und anschließend eine Türklinke berührt. Elektrischer Strom kann ziehende Schmerzen im Zahnnerv auslösen, wenn im Mund elektrochemisch unterschiedliche Metalle (beispielsweise Aluminiumfolie und [Amalgam](#)) in Kontakt sind und sich ein [Lokalelement](#) bildet. In gleicher Weise wird das Kribbeln der Zunge durch Stromfluss hervorgerufen, wenn man mit feuchter Zunge beide Pole einer geeigneten [Batterie](#) berührt.

Geladene Gegenstände können sich auch durch Kräfte bemerkbar machen. Wenn Verpackungsmaterial, zum Beispiel kleine [Polystyrolteilchen](#), scheinbar von selbst Bewegungen ausführt, steckt physikalisch betrachtet die Abstoßung bzw. Anziehung von gleich- bzw. ungleichnamig aufgeladenen Teilchen dahinter.

Nahezu alle im Alltag beobachtbaren physikalischen Phänomene gehen entweder auf die [Schwerkraft](#) oder die Wechselwirkung elektrischer Ladungen zurück. Zur Erklärung der [chemischen Prozesse](#) und allgemein der erfahrbaren Eigenschaften der Materie sind elektromagnetische Kräfte zwischen den Elektronenhüllen von Atomen wesentlich – auch wenn man zum vollen Verständnis oft [quantenmechanische](#) Eigenschaften wie etwa den [Spin](#) berücksichtigen muss.

Geschichte

Namensgebung

Vermutlich wurden bereits um 550 v. Chr. von [Thales von Milet](#) im antiken Griechenland Experimente durchgeführt, bei denen die von elektrischen Ladungen ausgehenden Kräfte beobachtet wurden. Es wurde beispielsweise eine von einem Stück [Bernstein](#) (griechisch ηλεκτρόν – gesprochen *elektron*) anziehende Kraft auf Vogelfedern oder Haare festgestellt, nachdem der Bernstein an einem trockenen Fell gerieben wurde.



[William Gilbert](#) gilt als der Begründer der Elektrizitätslehre.

Der Hofarzt der Königin [Elisabeth I.](#), [William Gilbert](#), setzte die Arbeiten von [Petrus Peregrinus](#) aus dem 13. Jahrhundert fort und fand heraus, dass andere Stoffe ebenfalls durch Reibung elektrisiert werden können.^[2] Er führte in seinem 1600 erschienenen Buch *De Magnete, Magnetisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (deutsch etwa: *Über den Magneten, Magnetische Körper und den großen Magneten Erde*) den dem [Neulateinischen](#) entlehnten Begriff „*electrica*“ für die Erscheinungen ein, die er im Zusammenhang mit dem Bernstein entdeckte. Später wurde dieser Begriff als *Elektron* zur Bezeichnung für den Träger der negativen Elementarladung, das 1891 von [George Johnstone Stoney](#) so bezeichnete und 1897 von [Joseph John Thomson](#) nachgewiesene [Elektron](#) (auch der geriebene Bernstein nimmt eine negative Ladung an).^[3]

Eine oder zwei Ladungsarten

Gilbert gilt wegen seiner Arbeiten als Begründer der Elektrizitätslehre.[3] Er unterschied als erster zwischen elektrischer und magnetischer Anziehung. Seine Erklärung für die Anziehungskraft eines geriebenen Bernsteins auf andere Körper bestand darin, dass er ein in allen durch Reibung beeinflussbaren Körpern befindliches Fluidum annahm, welches durch die Wärme bei der Reibung austräte und den Körper wie eine Dunstwolke umgäbe. Andere Stoffe würden beim Eindringen in diesen Dunst angezogen, analog zur Anziehung eines Steins durch die Erde.[3] In Gilberts Beschreibung klingt aus heutiger Sicht etwas vom modernen Begriff des Feldes an. Die Unterschiede sind jedoch beträchtlich, insbesondere weil der Dunst aus ausgetretenem Fluidum besteht.

Otto von Guericke beschäftigte sich in seinen späten Arbeiten mit statischer Elektrizität, von seinen Ergebnissen ist allerdings wenig erhalten. Er erfand 1672 eine einfache Elektrisiermaschine[2], mit deren Hilfe er eine ganze Reihe von Phänomenen beobachten konnte, etwa die Influenz, die Leitung von elektrischer Ladung, die Leuchtwirkung (Elektrolumineszenz) und die Tatsache, dass sich zwei gleichnamig elektrisierte Körper abstoßen. Bis dahin wusste man nur von der Anziehungswirkung der Elektrizität, Gilberts Erklärungsversuch des einen Fluids reichte nun nicht mehr aus.[3]

Charles du Fay erkannte 1733 bei Versuchen mit der Reibungselektrizität, dass sich die beiden Arten von Elektrizität gegenseitig neutralisieren konnten. Er bezeichnete die Elektrizitätsarten als *Glaselektrizität* (französisch *électricité vitreuse*) und *Harzelektrizität* (französisch *électricité résineuse*). Dabei entspricht die Glaselektrizität heute (nach der Festlegung durch Benjamin Franklin, die im deutschsprachigen Raum vermutlich vor allem durch Leonhard Euler bzw. Georg Christoph Lichtenberg verbreitet wurde) einer positiven Ladung.[2] Jean-Antoine Nollet entwickelte aus diesen Versuchen die sogenannte „Zweiflüssigkeitstheorie“.[3] Demnach umgeben die beiden Elektrizitätssorten als „zwei Fluide“ (das *Effluvium* und das *Affluvium*) die elektrisierten Körper.[2][3] Diese Sprechweise prägte das Denken über die Natur der Elektrizität im 18. Jahrhundert und lebt noch heute in den „zwei Ladungsarten“ weiter.



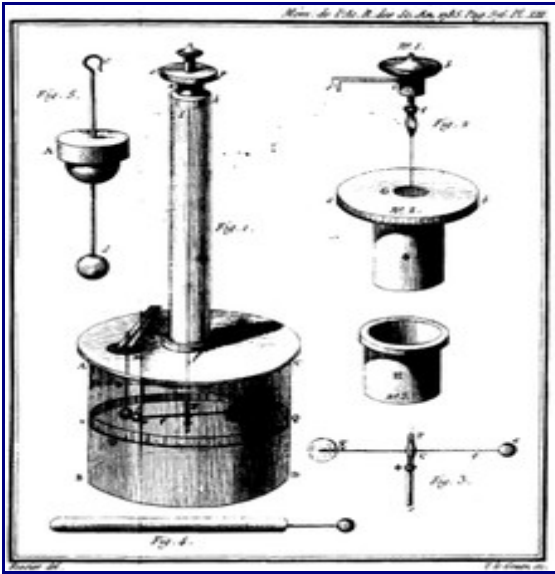
[Benjamin Franklins](#) Drachen-Experiment während eines Gewitters: Er interpretierte als Erster Blitze als gigantische Funken.

Benjamin Franklin verfasste ein Buch *Experiments and Observations on Electricity* zu elektrischen Erscheinungen. Darin prägte er die Bezeichnung *Ladung* (engl. charge). Vorher musste von „Körpern, die in einen elektrischen Zustand versetzt worden sind“ gesprochen werden, Franklin führte eine Sichtweise wie beim belasteten und unbelasteten Konto ein, wo durch Reibung Umverteilungen eintraten. Franklin sprach also von „einer Ladungsart“ (einem Fluid), welche nur ihren Aufenthaltsort verändert und somit (positive oder negative) Aufladung verursacht. [2] [William Watson](#) kam zur selben Zeit zu einer vergleichbaren Einschätzung. Franklin konnte mit seiner Sichtweise nicht erklären, weshalb zwei gleichermaßen von Ladung entleerte Körper einander abstoßen, erst [Franz Maria Aepinus](#) behob diesen Mangel. In heutiger Sprechweise sah er die Stoffteilchen beim Entfernen der Ladungen gewissermaßen in einem ionisierten Zustand. [2]

Die Annahme Franklins, dass die Elektrizität des Glases existent und die Harzelektrizität ein Mangel ist und dass bei der Berührung von geladenen und ungeladenen Körpern die Elektrizität immer nur in eine Richtung strömt, legte die Annahme nahe, dass sich stets die positiven Ladungen bewegen (siehe [Technische Stromrichtung](#)). Vermutlich wurde Franklin zu dieser Annahme durch die Art der beobachtbaren Leuchterscheinungen bei seinen Versuchen mit geladenen Metallspitzen geleitet.

Mit dieser neuerlichen Theorie der Elektrizität als „einem Fluid“ wurde der Idee der Ladungserhaltung zum Durchbruch verholfen. Die Ladungen werden durch Reibung nicht erzeugt, sondern lediglich voneinander getrennt. Da die Krafrichtung zwischen zwei Ladungen mit Hilfe des Zweiflüssigkeitsmodells einfach mit dem Vorzeichen der beteiligten Ladungen beschrieben werden kann, nahm [Charles Augustin de Coulomb](#) das dualistische Modell der „zwei Fluide“ an und legte die Existenz zweier Ladungsarten zugrunde. [2] Aus heutiger Sicht kann man mit beiden Modellen das gleiche Ergebnis erhalten. [2]

Quantitative Experimente



[Coulomb](#) konstruierte eine Torsionsdrehwaage, die eine Messung der zwischen Ladungen wirkenden Kraft ermöglichte.



[Michael Faradays](#) Labor auf einem Aquarell von [Harriet Moore](#) (1801–1884)

[Robert Boyle](#) stellte 1675 fest, dass elektrische Anziehung bzw. Abstoßung auch durch ein Vakuum hindurch erfolgt,^[2] [Francis Hauksbee](#) vertiefte diese Untersuchungen anhand von elektrischen Leuchterscheinungen im Vakuum. [Stephen Gray](#) teilte 1729 Materialien in [elektrisch leitfähig](#) und [elektrisch isolierend](#) ein und demonstrierte, dass auch der elektrische Körper Strom leiten konnte.^[3]

Im letzten Viertel des 18. Jahrhunderts verlagerte sich der Schwerpunkt der mittlerweile (seit durch die [Leidener Flasche](#) ein eindrucksvolles Experimentiermittel gefunden worden war) sehr populären Auseinandersetzung mit der Elektrizitätslehre hin zu quantitativen Untersuchungen zur Elektrostatik. Besondere Beiträge zur Forschung wurden von [Joseph Priestley](#) und [Charles Augustin de Coulomb](#) erbracht. Coulomb veröffentlichte 1785 das [coulombsche Gesetz](#), welches besagt, dass der Betrag dieser Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln proportional zum Produkt der beiden Ladungsmengen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Kugelmittelpunkte ist. Die Kraft wirkt je nach Vorzeichen der Ladungen anziehend oder abstoßend in Richtung der Verbindungsgeraden der Mittelpunkte.

Die 1832 von [Michael Faraday](#) formulierten [faradayschen Gesetze](#) stellen einen Zusammenhang zwischen geflossener elektrischer Ladung und Stoffumsatz (an den [Elektroden](#) abgeschiedene Stoffmenge) bei der [Elektrolyse](#) her. In einem 1833 vor der [Royal Society](#) gehaltenen Vortrag wies Faraday nach, dass die bis dahin als „verschiedene Elektrizität“ aufgefasste „statische“ (oder

„gewöhnliche“), die „atmosphärische“, die „physiologische“ (oder „tierische“), die „Volta’sche“ (oder „Berührungselektrizität“) und die „Thermoelektrizität“ in Wahrheit nur verschiedene Aspekte des einen – von ihm „Magnetelektrizität“ bezeichneten – physikalischen Prinzips darstellten. [2] Somit war auch klar, dass die elektrische Ladung die Grundeigenschaft der Materie für alle diese Phänomene ist. Ein wichtiger Beitrag von Michael Faraday zur Theorie der Elektrizität war die systematische Einführung des [Feldbegriffs](#) zur Beschreibung elektrischer und magnetischer Phänomene.

Im Jahre 1897 konnte [Joseph John Thomson](#) nachweisen, dass [Kathodenstrahlen](#) aus Elektronen bestehen. Durch ein stark verbessertes [Vakuum](#) konnte er für diese das Verhältnis von Ladung zu Masse bestimmen. Thomson vermutete, dass die Elektronen bereits in den Atomen der [Kathode](#) vorhanden waren, und stellte 1903 erstmals ein [Atommodell](#) auf, das den Atomen eine innere Struktur zuschreibt.

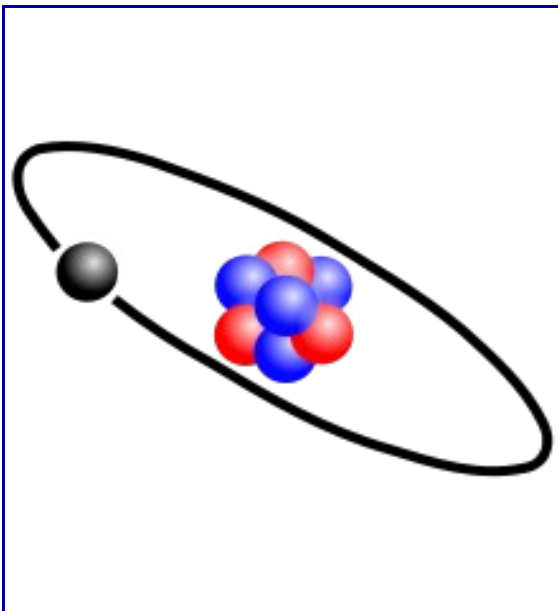
Der [diskrete](#) Charakter der elektrischen Ladung, der im 19. Jahrhundert von Faraday im Zuge seiner Elektrolyse-Versuche vorhergesagt wurde, konnte 1910 von [Robert Andrews Millikan](#) im sogenannten [Millikan-Versuch](#) bestätigt werden. In diesem Versuch wurde der Nachweis geführt, dass geladene Öltröpfchen stets mit einem ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung geladen sind, er lieferte auch einen brauchbaren Zahlenwert für die Größe der Elementarladung.

Eigenschaften der elektrischen Ladung

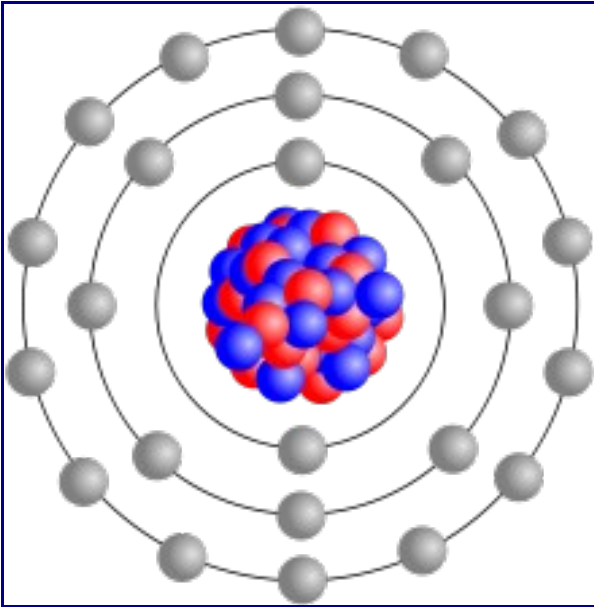
Gesamtladung

Die elektrische Ladung kann positive oder negative Werte annehmen. Man spricht oft von zwei Arten von elektrischen Ladungen. [4] Beispielsweise hat ein [Elektron](#) oder ein [Myon](#) die Ladung $-1 e$, ein [Positron](#) oder ein [Proton](#) die Ladung $+1 e$.

Ein Teilchen und sein [Antiteilchen](#) besitzen genau die entgegengesetzt gleiche Ladungsmenge. Beispielsweise trägt das [Antiproton](#), Antiteilchen des Protons, die Ladung $-1 e$.



[Li²⁺](#) mit drei Protonen (rot), vier Neutronen (blau) und einem Elektron (grau)



Fe^{2+} mit 26 Protonen (rot), 30 Neutronen (blau) und 24 Elektronen (grau)

Die *absolute Ladung* eines Körpers bzw. einer Stoffmenge ist die Summe aller enthaltenen Elementarladungen. Dafür werden auch die Bezeichnungen *Gesamtladung*, *Nettoladung* oder *Überschussladung* verwendet. Da beim Aufsummieren das Vorzeichen der Ladung berücksichtigt wird, kann die Zahl der vorhandenen Ladungen deutlich größer sein als die Gesamtladung.

Beispielsweise tragen sowohl das Δ^{++} -Teilchen, das Li^{2+} -Ion und Fe^{2+} -Ion die Gesamtladung „zweifach positiv“. Das Δ^{++} -Teilchen besitzt seine Ladung, da es aus drei up-Quarks mit jeweils der Ladung $+\frac{2}{3}$ zusammengesetzt ist. Beim Li^{2+} -Ion ergibt sich die Gesamtladung aus den drei positiven Protonen im Atomkern und dem einen negativen Elektron in seiner Elektronenhülle, beim Fe^{2+} -Ion sind 50 Ladungsträger beteiligt, 26 Protonen und 24 Elektronen. Die absolute Ladung und die insgesamt vorhandene Ladungsmenge sind also in der Regel nicht identisch.

Als *elektrisch neutral* wird einerseits ein Teilchen bezeichnet, welches keine Ladung trägt (zum Beispiel ein Neutrino). Andererseits wird auch ein Körper neutral genannt, der gleich viele positive und negative Elementarladungen trägt (etwa ein Eisen-Atom mit 26 Protonen und 26 Elektronen). Da elektrische Felder auf alle vorhandenen Ladungen wirken, nicht nur auf Überschussladungen, wird in obigem Beispiel das neutrale Eisen-Atom durchaus von der elektromagnetischen Wechselwirkung beeinflusst. Es treten hier Effekte wie die Polarisierbarkeit auf.

Bei Ladungstrennungen innerhalb eines Körpers bzw. Bauteils ist die Angabe der Gesamtladung ebenfalls nicht ausreichend. Beispielsweise kann die Gesamtladung sowohl des geladenen wie des ungeladenen Kondensators Null sein. Während dann der ungeladene Kondensator auch auf jeder Platte elektrisch neutral ist, tragen beim geladenen Kondensator beide Platten gegensätzliche (aber gleich zahlreiche) Überschussladungen – in diesem Fall verursacht die Ladungstrennung ein elektrisches Feld, welches Energie speichert.

Ladungserhaltung

→ Hauptartikel: Ladungserhaltung

Unter Ladungserhaltung versteht man das Phänomen, dass in jedem abgeschlossenen System die vorhandene Menge an elektrischer Ladung zeitlich konstant bleibt. Dieses Phänomen hat Konsequenzen: Wenn aus elektromagnetischer Strahlung bzw. Photonen Materie entsteht, dann

muss dies so geschehen, dass keine Ladung erzeugt wird. Es entsteht deswegen bei der [Paarbildung](#) beispielsweise gleichzeitig ein Elektron und dessen Antiteilchen, das Positron. Damit ist die erzeugte Gesamtladung Null, die Ladungsmenge bleibt erhalten. Ebenso verhält es sich bei der Umkehrung dieses Vorgangs, der [Paarvernichtung](#) eines Teilchen-Antiteilchen-Paares, bei der die vernichtete Gesamtladung ebenfalls Null ist.

Wie bei jedem grundlegenden physikalischen [Erhaltungssatz](#) beruht der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung auf Beobachtungen und Experimenten. Bisher haben alle diesbezüglich relevanten Experimente die elektrische Ladungserhaltung bestätigt – zum Teil mit sehr hoher Genauigkeit. In der formalen theoretischen Beschreibung der Elektrodynamik wird die Ladungserhaltung durch eine [Kontinuitätsgleichung](#) ausgedrückt, die eine Folgerung aus den [maxwellschen Gleichungen](#) ist (siehe Abschnitt [Ladung und elektrischer Strom](#)). Eine abstraktere Eigenschaft der Elektrodynamik ist ihre Invarianz (oft auch [Symmetrie](#) genannt) unter [Eichtransformationen](#), aus der sich die Quantenelektrodynamik als [Eichtheorie](#) ergibt. Nach dem [noetherschen Theorem](#) ist mit der Invarianz der Elektrodynamik unter Eichtransformationen ebenfalls die elektrische Ladung als [Erhaltungsgröße](#) verknüpft.

Im scheinbaren Widerspruch zur Ladungserhaltung steht die Redeweise von einer *Ladungserzeugung* oder *Aufladung*. Damit ist aber eine lokale Anhäufung von Ladungen eines Vorzeichens gemeint, also eigentlich eine Ladungstrennung (und keine Erzeugung).

Aufladung

Zur Aufladung (im Sinne einer Überschussladung) eines zuvor neutralen Körpers muss er Ladungsträger aufnehmen oder abgeben. Aber auch bei einer ungleichmäßigen Ladungsverteilung in einem insgesamt neutralen Körper spricht man von „Aufladung“. Dies geschieht etwa aufgrund eines anliegenden [elektrischen Feldes](#) oder durch Bewegungen in molekularem Maßstab. Bei einem [polarisierten](#) Material liegt die Ladung gebunden vor, bei der [Influenz](#) werden „frei bewegliche“ Ladungsträger in einem Leiter verschoben.

Ein aus dem Alltag bekannter Mechanismus zur Trennung von Ladungen ist die [Reibung](#). Wenn man beispielsweise einen Luftballon an einem Pullover reibt, dann werden Elektronen von einem Material auf das andere übertragen, so dass Elektronen und der zurückbleibende [Atomrumpf](#) getrennt werden. Solche [Reibungselektrizität](#) ist ein Spezialfall der [Berührungselektrizität](#). Der [Bandgenerator](#) nutzt sowohl Berührungselektrizität als auch Influenz.

In [Batterien](#) und [Akkumulatoren](#) werden [chemische Reaktionen](#) ausgenutzt, um eine große Menge von Ladungsträgern (Elektronen bzw. [Ionen](#)) umzuverteilen. Wie beim Kondensator bleibt die Gesamtladung Null. Anders als bei diesem steigt jedoch die Spannung dabei nicht nahezu linear an, sondern bleibt etwa konstant. Deshalb wird die Kapazität als Energiespeicher beim Kondensator in [Farad](#) (Coulomb pro Volt) angegeben, während die Kapazität einer Batterie als Ladungsmenge charakterisiert wird – in [Amperestunden](#), wobei 1 Amperestunde gleich 3600 Coulomb gilt.

Ladungstrennung kann auch durch [elektromagnetische Wellen](#), zum Beispiel [Licht](#), hervorgerufen werden: Lässt man Licht ausreichend hoher Frequenz auf eine Metalloberfläche treffen und platziert im Vakuum eine zweite Metallplatte in der Nähe, entsteht eine Ladungsdifferenz zwischen ihnen, weil durch das Licht Elektronen aus der ersten Platte herausgelöst werden, die sich teilweise zur zweiten Platte bewegen ([äußerer photoelektrischer Effekt](#)).

Relativistische Invariante

Die Ladung Q eines Körpers ist nicht nur eine Erhaltungsgröße, sondern auch unabhängig von seiner [Geschwindigkeit](#). Das heißt, die elektrische Ladung ist eine [relativistische Invariante](#), die

Gesamtladung eines Gegenstandes wird nicht durch die [Längenkontraktion](#) verändert. Diese Eigenschaft hat die Ladung mit der invarianten Masse eines Systems gemeinsam, unterscheidet sie aber beispielsweise von der [Energie](#). Aus diesem Beispiel kann man erkennen, dass relativistische Invarianz selbst für Erhaltungsgrößen nicht selbstverständlich, sondern eine zusätzliche Eigenschaft ist.

Auf rechnerischer Ebene lässt sich die relativistische Invarianz der Ladung Q verstehen, indem man sie als Volumenintegral über die Ladungsdichte ρ auffasst

$$Q = \int \rho d^3x$$

Unter einer Lorentz-Transformation transformiert sich die Ladungsdichte wie die Zeitkomponente eines Vierervektors, erfährt also eine Veränderung analog der Zeitdilatation; das Volumenelement d^3x erfährt dagegen eine Lorentz-Kontraktion. Diese beiden Effekte heben sich genau auf, so dass die Ladung selbst unverändert bleibt.

[Interferenzversuche](#) (beispielsweise von [Claus Jönsson](#)) mit Elektronen verschiedener Geschwindigkeiten zeigen direkt, dass ihre Ladung unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Außerdem müsste sich sonst bei Temperaturänderung die Ladung eines Festkörpers ändern, weil die Geschwindigkeit seiner Bestandteile aufgrund der gestiegenen [thermischen Energie](#) zugenommen hat, die Elektronen aber im Mittel eine viel größere Geschwindigkeit erhalten als die massereicheren positiven Atomkerne.

Quantencharakter

Elektrisch geladene Materie kann keine beliebigen Ladungsmengen tragen. Die Ladungen aller bekannten [Elementarteilchen](#) sind experimentell vermessen worden mit dem Ergebnis, dass alle [Leptonen](#) und ihre [Antiteilchen](#) immer ganzzahlige Vielfache der Elementarladung e tragen. Der aktuell genaueste Wert dieser [Naturkonstanten](#) beträgt $e = 1,602\,176\,565\,(35) \cdot 10^{-19} \text{ C}$.[\[1\]](#) Zwar tragen [Quarks](#) die Ladung $-\frac{1}{3} e$ oder $+\frac{2}{3} e$, aber Quarks treten niemals frei auf (siehe [Confinement](#)), sondern immer nur in [gebundenen Zuständen](#), den [Hadronen](#), welche wiederum immer ganzzahlige Vielfache der Elementarladung tragen. Somit tragen alle frei auftretenden Teilchen ganzzahlige Vielfache der Elementarladung.

Dies wird theoretisch im [elektroschwachen Modell](#) begründet, indem die elektrische Ladung auf die schwache Hyperladung und den schwachen Isospin zurückgeführt wird. Warum jedoch die schwache Hyperladung und der schwache Isospin nur bestimmte Werte annehmen, kann durch das Modell nicht erklärt werden. Daher ist bislang auch die "Ursache" der beobachteten [Quantisierung](#) der Ladung ungeklärt; sie gehört nach Meinung namhafter Wissenschaftler zu den größten Geheimnissen der Physik.[\[5\]](#) Nach [Paul Diracs](#) Überlegung zu einem [magnetischen Monopol](#) würde die Existenz eines solchen Teilchens die Ladungsquantisierung zwanglos auf die Quantisierung des [Drehimpulses](#) zurückführen.

Elektrische Ladung in der Quantenfeldtheorie

Im Rahmen der Quantenfeldtheorie ist die Elementarladung die [Kopplungskonstante](#) der elektromagnetischen Wechselwirkung. Aus dem Blickwinkel der [Renormierungsgruppe](#) sind allerdings die Kopplungskonstanten von Quantenfeldtheorien keine Konstanten, sondern von der Energieskala abhängig. Auch die Elementarladung ist abhängig von der Energieskala, wobei sie mit steigender Energie größer wird. Das bedeutet, dass bei sehr hohen Energien die Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen stärker ist. Als Folge davon sind bei hohen Energien Teilchenreaktionen durch die elektromagnetische Wechselwirkung wahrscheinlicher. Die Wahrscheinlichkeit dass beispielsweise beim Zusammenprall zweier Elektronen ein Elektron-Positron-Paar gebildet wird, steigt mit der Energie des Zusammenpralls.

Das [elektroschwache Modell](#) besagt, dass der Elektromagnetismus nur eine effektive Wechselwirkung bei niedrigen Energien ist, die nach einer [spontanen Symmetriebrechung](#) mittels des [Higgs-Mechanismus](#) übrig bleibt. Bei höheren Energien treten demnach zwei Wechselwirkungen an die Stelle des Elektromagnetismus und die elektrische Ladung wird durch die schwache Hyperladung und den schwachen Isospin ersetzt. Demnach kann die elektrische Ladung in gewissem Sinne als aus diesen beiden Ladungstypen zusammengesetzt betrachtet werden.

Die Symmetrie positiver und negativer Ladung ist für die Quantenfeldtheorie von Bedeutung. Die Transformation, die in einem Teilchensystem alle Vorzeichen der elektrischen Ladungen umkehrt wird *C* genannt. Weitere wichtige Transformationen im Folgenden sind *P*, die Punktspiegelung des Raumes am Nullpunkt, und *T* die Umkehr der Zeitrichtung. Das [CPT-Theorem](#), eine fundamentale Aussage über alle Quantenfeldtheorien, besagt, dass Streuprozesse genau gleichartig ablaufen, wenn man alle diese drei Transformationen auf das System anwendet. Dies gilt nicht für die einzelnen Transformationen. Es gibt [paritätsverletzende](#) Prozesse, die anders ablaufen, wenn nur *P* angewandt wird, und von [CP-Verletzung](#) spricht man, wenn ein Prozess anders abläuft als seine raum- und ladungsgespiegelte Entsprechung.

Zusammenhang mit anderen Größen

Elektrische Ladung als Fundament der Elektrizitätslehre

Elektrisch geladene Körper erzeugen [elektrische Felder](#) und werden selbst von solchen Feldern beeinflusst. Zwischen den Ladungen wirkt die [Coulombkraft](#), deren Stärke – verglichen mit der [Gravitationskraft](#) zwischen den Ladungsträgern – sehr groß ist. Sie wirkt zwischen einer positiven und einer negativen Ladung anziehend, zwischen zwei gleichnamigen Ladungen abstoßend. Dabei spielt im [coulombschen Gesetz](#) auch der Abstand der Ladungen eine Rolle. Mit ruhenden elektrischen Ladungen, Ladungsverteilungen und den elektrischen Feldern geladener Körper beschäftigt sich die [Elektrostatik](#).

Bei der Aufladung von Körpern muss man [Energie](#) aufwenden, um entgegengesetzte Ladungen, die sich gegenseitig anziehen, zu trennen. Diese Energie liegt nach der Ladungstrennung als elektrische Feldenergie vor. Die [elektrische Spannung](#) gibt an, wie viel Arbeit bzw. Energie nötig ist, um ein Objekt mit einer bestimmten elektrischen Ladung im elektrischen Feld zu bewegen.

Wenn sich elektrische Ladungen bewegen, spricht man von [elektrischem Strom](#). Die Bewegung von elektrischen Ladungen führt zu [magnetischen Kräften](#) bzw. [elektromagnetischen Feldern](#); dies wird durch die [maxwellschen Gleichungen](#) und die [spezielle Relativitätstheorie](#) beschrieben. Mit bewegten Ladungen in allgemeinerer Form beschäftigt sich dabei die [Elektrodynamik](#). Die

Wechselwirkung geladener Teilchen, die mittels [Photonen](#) erfolgt, ist wiederum Gegenstand der [Quantenelektrodynamik](#).

Ladungsdichte und elektrisches Feld

Diese Beschreibung von elektrischen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen ist in der Physik praktisch nur bei Systemen mit wenigen Teilchen durchführbar. Für viele Betrachtungen reicht es jedoch völlig aus mit räumlich und zeitlich geeignet gemittelten Größen zu arbeiten, weil die nicht beachteten Details für diese [makroskopische](#) Sichtweise vernachlässigbar sind. In diesem Sinne wurden die Gleichungen der Elektrodynamik aufgestellt, ohne den submikroskopischen Aufbau der Materie kennen zu müssen. Durch den Vorgang der Mittelwertbildung werden die Grundgleichungen der Elektrodynamik formal nicht verändert. Ob gemittelte oder exakte Gleichungen gemeint sind, ergibt sich aus dem [Kontext](#).

Die Beschreibung der Ladungsverteilung erfolgt mit der Raumladungsdichte ρ beziehungsweise der Flächenladungsdichte σ . Ausgehend vom Coulombfeld einer [Punktladung](#) ergibt sich für das von der Raumladung ρ erzeugte elektrische Feld \vec{E} im Vakuum das [gaußsche Gesetz](#):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

Dabei ist ϵ_0 die [elektrische Feldkonstante](#). Anschaulich bedeutet das gaußsche Gesetz, dass elektrische [Feldlinien](#) von positiven Ladungen ([Quellen](#)) ausgehen und in negativen Ladungen ([Senken](#)) enden.

In der Relativitätstheorie wird das elektrische Feld mit dem Magnetfeld im [Feldstärketensor](#) zusammengefasst. Die Raumladungsdichte ρ (mit der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert) bildet zusammen mit der elektrischen [Stromdichte](#) \vec{j} einen [Vierervektor](#).

Ladung und elektrischer Strom

Wegen der Ladungserhaltung ändert sich die Ladungsmenge in einem bestimmten Raumbereich nur genau in dem Maße, wie Ladungen in diesen Raumbereich hinein- bzw. herausfließen. Solch ein Fließen von elektrischer Ladung wird als [elektrischer Strom](#) bezeichnet, die Ladungsmengenveränderung pro Zeiteinheit wird als [elektrische Stromstärke](#) I bezeichnet.

Die Ladungserhaltung entspricht somit der [Kontinuitätsgleichung](#). Die betrachtete Ladung ist dabei gleich dem Volumenintegral der [Ladungsdichte](#) ρ innerhalb des Raumbereichs V . Die zeitliche Änderung dieser Ladung ist gleich dem Flächenintegral der [Stromdichte](#) j über die geschlossene Oberfläche S des Volumens ($S = \partial V$, lies „Rand von V “), und ist gleich der elektrischen Stromstärke I . Die Stromrichtung aus dem Volumen heraus ist dabei als positiv definiert:

$$-\frac{d}{dt} \iiint_V \rho dV = \oiint_{\partial V} \vec{j} \cdot d\vec{S} = I$$

In anderer Schreibweise entspricht die Kontinuitätsgleichung der Aussage:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(t, \vec{x}) + \nabla \cdot \vec{j}(t, \vec{x}) = 0,$$

dabei ist $\rho(t, \vec{x})$ die Ladungsdichte und $\vec{j}(t, \vec{x})$ die Stromdichte.

Einfach gesagt entspricht der Zusammenhang von elektrischem Strom I und der Ladung Q der Aussage:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Die Ladungsmenge, die in der Zeitspanne zwischen t_0 und t bewegt wurde, folgt aus der Integration beider Seiten:

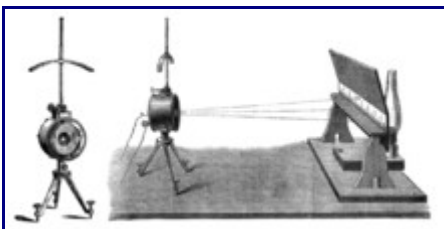
$$Q(t) = Q(t_0) + \int_{t_0}^t I(t) dt$$

Für einen zeitlich konstanten Strom vereinfacht sich der Zusammenhang zwischen Ladung und Strom zu:

$$I = \frac{Q}{t} \Leftrightarrow Q = I \cdot t$$

Anhand dieser Gleichung wird auch besonders einfach klar, dass die Einheit Coulomb sich als $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ darstellen lässt. Durch diese Beziehung der Basiseinheiten [Ampere](#) und [Sekunde](#) ist das Coulomb im [Internationalen Einheitensystem](#) festgelegt.

Messung der elektrischen Ladung



Thompsons Spiegelgalvanometer

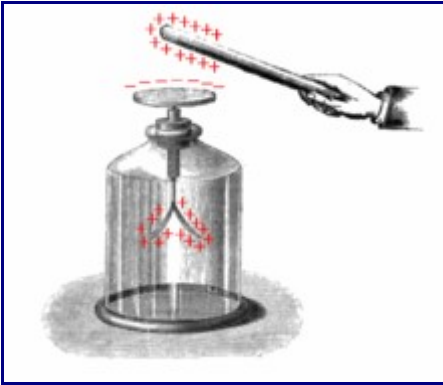
Die Ladungsmenge von 1 Coulomb entspricht etwa $6,24 \cdot 10^{18}$ Elementarladungen. Zur Bestimmung von Gesamtladungen können deswegen in der Regel nicht einfach die Ladungsträger abgezählt werden.

Indirekt kann die ab- oder zugeflossene Ladungsmenge über die Messung der Stromstärke bestimmt werden: Fließt ein Strom konstanter Stärke I während der Zeit t , so transportiert er die Ladung $Q = I \cdot t$. Allgemein ist die Ladung, die in oder durch einen Körper geflossen ist, das Integral des elektrischen Stromes über der Zeit. Ist die Entladezeit kurz gegenüber der Schwingungsdauer eines [ballistischen Galvanometers](#), so lässt sich die Ladung direkt als Amplitude der angestoßenen Schwingung ablesen.

Grundsätzlich kann man den Wert einer Ladung Q auch dadurch bestimmen, dass man in einem elektrischen Feld bekannter Feldstärke \vec{E} den Betrag der Kraft F auf einen geladenen Testkörper misst. Die Definition der Feldstärke liefert die Beziehung

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

Diese Methode unterliegt starken Einschränkungen: Der Testkörper muss klein, beweglich und elektrisch sehr gut isoliert sein. Seine Ladung darf das elektrische Feld nicht merklich beeinflussen, was aber schwer überprüfbar ist. Deshalb soll die Ladung gering sein – dann ist aber auch die Kraft schwierig messbar.



Elektroskop im Lehrbuch von 1881

Die aufgeführten Nachteile besitzt eine weitere Methode nicht, sie gelingt auch bei recht großen Ladungen. Grundlage ist die Beziehung zwischen der Kapazität C eines Kondensators und der elektrischen Spannung U :

$$Q = C \cdot U.$$

Mit der zu messenden Ladung wird ein Kondensator bekannter Kapazität aufgeladen und dann dessen Spannung gemessen. Diese Messung muss allerdings *hochohmig* erfolgen, d. h. so, dass sie dem Kondensator nur vernachlässigbar wenig von der gespeicherten Ladung entnimmt. Das geschieht mit einem Elektroskop oder besser mit einem Impedanzwandler. Allerdings muss bei dieser Methode die Kapazität der Ladungsquelle bekannt sein, da ein Teil der Ladung dort verbleibt. Die spannungslose Messung mit einem Integrierer (ohne Eingangswiderstand auch als Ladungsverstärker bezeichnet) vermeidet dieses Problem.

Literatur

Quelle:

http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Ladung

Allgemein

- Richard P. Feynman: *Feynman-Vorlesungen über Physik*. Oldenbourg, München/Wien 2007, [ISBN 978-3-486-58444-8](#).
- Paul A. Tipler: *Physik*. 3. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage. 1994, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin, 2000, [ISBN 3-86025-122-8](#).
- Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer: *Elektromagnetismus*. In: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 2, 9. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin 2006, [ISBN 978-3-11-018898-1](#).
- Wolfgang Nolting: *Elektrodynamik*. In: *Grundkurs Theoretische Physik*. Bd. 3, 8. Auflage. Springer, Berlin 2007, [ISBN 978-3-540-71251-0](#).

Zur Geschichte

- Károly Simonyi: *Kulturgeschichte der Physik*. Harri Deutsch, Thun, Frankfurt a. M. 1995, [ISBN 3-8171-1379-X](#), S. 320ff.
- Hans-Peter Sang: *Geschichte der Physik (Band 1)*. Klett, Stuttgart 1999, [ISBN 3-12-770230-2](#), S. 47ff.

Elektrophor

Der schwedische Physiker [Johan Carl Wilcke](#) beschrieb 1762 erstmals den sogenannten [Elektrophor](#), welche als erste Influenzmaschine gilt. [Alessandro Volta](#) entwickelte ihn 1775 weiter, so dass er für Experimente besser genutzt werden konnte. Der ursprüngliche Elektrophor liefert konstruktionsbedingt keine kontinuierliche Gleichspannung.

Im Jahre 1865 mechanisierte [Wilhelm Holtz](#) die Funktionsweise des Elektrophors um kontinuierliche Gleichspannungen zu liefern. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts lieferten Influenzmaschinen dauerhaftere und gleichmäßigere Hochspannung als die zuvor verwendeten Elektrisiermaschinen, die [Reibungselektrizität](#) nutzten.

Kelvin-Generator

Eine eigene Form der Nutzung von Influenz hat [Lord Kelvin](#) 1867 mit seinem [Kelvin-Generator](#) gefunden. In diesem so genannten Wassertropfengenerator wird die Influenzierung von Wassertropfen zur Trennung elektrischer Ladungen eingesetzt, wodurch Spannungen von bis zu 20 kV erzeugt werden können.

Wimshurstmaschine

Der Erfinder [James Wimshurst](#) konstruierte ab 1878 die nach ihm benannte [Wimshurstmaschine](#) mit mehreren parallel auf einer Achse angebrachten und gegensinnig rotierenden Scheiben, die eine kontinuierliche Gleichspannung liefern konnte. Sie diente unter anderem zur Stromversorgung von [Röntgenröhren](#). Es können damit praktisch bis zu ungefähr 100 kV erzeugt werden, theoretisch auch mehr. Allerdings reichen dann in typischen Bastelaufbauten die nötigen weiten Isolierungstrecken nicht mehr aus und es kommt zu Entladungen und Überschlägen, welche die Spannung nach oben hin limitieren.

Pelletron

Modernster Vertreter der Influenzmaschine sind [Pelletrons](#), die in [Teilchenbeschleunigern](#) zum Einsatz kommen. Sie gleichen in ihrem Aufbau einem Bandgenerator, besitzen jedoch anstelle des Bandes eine isolierende Kette, an der Rohrstücke oder Kugeln befestigt sind. Pelletrons können Spannungen bis zu 32 MV erzeugen.

Allgemeines

Alle Influenzmaschinen beruhen auf dem Prinzip der Ladungsverschiebung und -trennung, indem von der Umgebung isolierte und elektrisch leitfähige, meist metallische Körper im Einflussbereich elektrischer Felder bewegt werden. Infolge der Wirkung des [elektrisches Feld](#) auf [elektrische Ladungen](#) im metallischen Körper kommt es dabei aufgrund der [Influenz](#) zu einer Ladungsverschiebung innerhalb des metallischen Leiters. Durch eine entsprechende räumliche Bewegung des metallischen Leiters, wobei [Arbeit](#) unter anderem gegen die elektrischen Feldkräfte verrichtet werden muss, kombiniert mit zeitlich synchronisierten elektrischen Kontakt- und Trennvorgängen, welche je nach Typ der Influenzmaschine verschiedenartig ablaufen, werden so hohe [Gleichspannungen](#) im Bereich einiger 100 [V](#) bis zu 100 kV erzielt.

Höhere Spannungen sind mit einfachen Demonstrationsgeräten nicht erreichbar, weil dafür die [Isolationswiderstände](#) der Aufbauten zu gering sind, es zu Sprühentladungen wie der

Koronaentladungen an den spitzen Ecken und Kanten der elektrischen Leiter kommt oder weil die räumlichen Abstände für höhere Spannungen zu gering gewählt sind und es zu Überschlägen an der Isolation kommt.

In einer Influenzmaschine wird folgender Ablauf durchlaufen:

- Verringern des Abstandes zu anderen Körpern, die entgegengesetzt geladen sind
- Annähern einer Hilfsladung (Einwirken eines äußeren elektrisches Feldes)
- Kontaktieren auf der abgewandten Seite
- Entfernen der Hilfsladung
- Vergrößerung des Abstandes zu anderen Körpern
- Übertragung der Ladung auf den Ausgang bzw. in einen Kondensator

Im Regelfall wird versucht jede schwerfällig wirkende hin- und hergehende Bewegung durch eine rotierende Anordnung zu ersetzen und man gelangt auf diese Weise beispielsweise zu dem Aufbau wie bei der Wimshurstmaschine mit zwei gegensinnig rotierenden Scheiben aus isolierendem Plexiglas mit aufgeklebten Metallfolien.

Der Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{\text{elektrische Energie}}{\text{zugeführte mechanische Energie}}$$

liegt bei nur wenigen Prozent. Aus diesem Grund haben Influenzmaschinen als elektrische Maschinen, außer im Bereich der Ausbildung und als Demonstrationsgerät, keine wesentliche technische Bedeutung.

Literatur

- Gottlieb Christoph Bohnenberger: *Beschreibung unterschiedlicher Elektrizitätsverdoppler von einer neuen Einrichtung, nebst einer Anzahl von Versuchen über verschiedene Gegenstände der Elektrizitätslehre, etc..* Tübingen 1798.
- Wilhelm Holtz: *Über eine neue Elektrisirmaschine..* In: Johann Poggendorff, C. G. Barth (Hrsg.): *Annalen der Physik und Chemie.* 126, Leipzig 1865, S. 157 - 171.
- Wilhelm Holtz: *Über die höhere Ladung isolierender Flächen durch Seitenanziehung und die Übertragung dieses Princips auf die Construction von Influenz-maschinen..* In: Johann Poggendorff, C. G. Barth (Hrsg.): *Annalen der Physik und Chemie.* 130, Leipzig 1867, S. 128 - 136.
- Wilhelm Holtz: *Zur Influenzmaschine.* In: F. Poske (Hrsg.): *Annalen der Physik und Chemie.* Julius Springer, Berlin 1904 (siebzehnter Jahrgang, viertes Heft).
- O. Lehmann: *Dr. J. Fricks physikalische Technik.* 2, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1909, S. 797 (Abteilung 2).
- F.Poske: *Neue Formen von Influenzmaschinen..* In: F. Poske (Hrsg.): *Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht.* Julius Springer, Berlin 1893 (siebter Jahrgang, zweites Heft).

Weblinks

- de Queiroz, Antonio Carlos M., "[Electrostatic Machines](#)": Nachbauten und Übersicht über viele Varianten (engl.)
- [Influenzmaschine von Wimhurst](#) (dt.)
- [Nachbau der ersten Bohnenberger-Maschine](#) (engl.)
- [Erklärung und Wartungshinweise](#) (dt.)