



Christopher Seibel, \*1996  
Jonas Witzzenrath, \*1996

Schule:  
Herzog-Johann-Gymnasium, Simmern

Eingang der Arbeit:  
Juli 2013

Zur Veröffentlichung angenommen:  
August 2013

## Mit Wassertropfen Hochspannung erzeugen

### Theoretische und praktische Untersuchungen zur Funktionsweise des Kelvingenerators

Ein Kelvingenerator besteht aus vier Konservendosen, etwas Kabel, wenigen Millilitern Wasser und Styropor. Wir haben uns mit der Funktionsweise beschäftigt und überprüft, ob der Kelvingenerator als Stromquelle genutzt werden kann.

#### 1 Einleitung

Ist es nicht erstaunlich, dass man aus vier Konservendosen, etwas Kabel, Styropor und wenigen Millilitern Wasser mehr Spannung erzeugen kann, als sie in manchen Hochspannungsleitungen herrscht? Und dass diese Apparatur schon vor 150 Jahren bekannt war? [1, 2] Als wir zum ersten Mal in Kontakt mit dem Kelvingenerator kamen, hat uns die Einfachheit und Genialität dieses Aufbaus beeindruckt und nicht mehr losgelassen. Wir wollten genau verstehen, wie die Maschine arbeitet und ob sich entgegen vieler Meinungen nicht doch ein nutzbarer Strom erzeugen lässt. Der Kelvingenerator war bereits mehrfach Gegenstand von Untersuchungen, oftmals im Rahmen von Examensarbeiten oder ähnlichem [z. B. 2, 3]. Diese beschäftigten sich jedoch fast nur mit der Verbesserung des Aufbaus und nicht mit der Wirkungsweise. Deren Erkenntnisse waren uns beim Bau unseres Generators sehr hilfreich.

#### 2 Das Grundprinzip

Der Kelvingenerator trennt Ladungen durch heruntertropfendes Wasser und weist einen symmetrischen Aufbau auf: Ein Wasserreservoir speist zwei Wasserleitungen, an deren Ende sich jeweils eine Düse befindet, aus der das Wasser herauströpfelt. Die Tropfen durchqueren auf jeder Seite einen Metallring und werden jeweils in einem Becher aus Metall aufgefangen (siehe Abb. 1). Die Metallringe sind jeweils durch ein Kabel mit dem gegenüberliegenden Becher leitend verbunden [3]. Dabei werden auf beiden Seiten elektrische Ladungen getrennt, die im Wasser enthalten sind, und es entsteht Hochspannung von mehreren Tausend Volt.

#### 3 Aufbau unseres Generators

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Generators. Weil eine sehr gute Isolierung extrem wichtig für das Funktionieren des Generators ist, besteht das Grundgerüst aus Styropor. Außerdem

ist es wasserabweisend, weshalb sich kein leitender Oberflächenspiegel bilden kann, der die Isolation zunichte macht.

Zur besseren Stabilität wurde unter der untersten Styroporplatte ein Holzbrett befestigt. Der Wasserbehälter ist eine Plastikflasche ohne Boden, in deren Deckel zwei Aquariumsschläuche eingelassen sind, die zu den Düsen, abgeschnittenen Enden von Tropfpipetten, führen. Der Wasserdurchfluss lässt sich mit zwei an den Schläuchen angebrachten Klemmen regulieren. Die Metallringe und die Becher sind Konservendosen. Die Ringe besitzen keinen Boden. Ihr Durchmesser beträgt 7 cm und ihre Höhe 11 cm. Die Becher haben einen Durchmesser von 10 cm und eine Höhe von 12 cm und werden im Weiteren als Dosen bezeichnet.

Der ganze Aufbau misst etwa 60 cm x 15 cm x 90 cm (L x B x H). Damit die Höhe der Ringe variabel ist, ließen

wir in die Seiten Metallschienen von 25 cm Länge ein, auf denen wir die Ringe verschieben können. Die RingEinstellung wird durch den Begriff der „Höhe“ wiedergegeben. Sie nutzt als Bezugspunkt die Mitte des Rings. Der Nullpunkt der Höhe liegt bei 10,5 cm über dem oberen Dosenrand, was einem minimalen Abstand zwischen Ring und Dose von 5 cm entspricht. Die angebrachte Skala reicht von 0 cm bis 20,5 cm, was gleichzeitig der maximalen Höhe entspricht. Sie sind das einzige, was von uns dem in den Quellen beschriebenen Aufbau hinzugefügt wurde. Die Dosen sind über Kreuz mit dem Ring der gegenüberliegenden Seiten leitend verbunden, gegeneinander sind sie aber gut isoliert.



Abb. 1: Der für diese Arbeit gebaute Kelvingenerator.

## 4 Theorie

### 4.1 Funktionsweise

Wenn man Wasser in das Wasserreservoir füllt, fließt es über die beiden Schläuche zu den Düsen, wo es als Strahl austritt. Im Fall zersetzt dieser sich zu Tropfen und diese fallen durch die Ringe in die Dosen. Dadurch wird Hochspannung erzeugt.

Das grundlegende Funktionsprinzip des Kelvingenerators ist die Influenz, das heißt, ein elektrisches Feld wirkt auf eine elektrische Ladung ein. Weil Wasser ein Ampholyt ist, besitzt es eine

Autoprotolysereaktion mit einem Ionenprodukt von  $1,000 \cdot 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{l}^2$  bei  $22^\circ\text{C}$  [8], das heißt im Wasser sind zu gleichen Teilen negativ geladene Hydronium- und positiv geladene Hydroxid-Ionen enthalten ( $\text{H}_3\text{O}^+$  bzw.  $\text{OH}^-$ ). Der erste Anstoß für die Ausbildung einer Spannung geschieht zufällig: Da die von Wasser ausgebildeten Wasserstoffbrückenbindungen mit einer Bindungsenergie von 170 kJ/mol

im Bereich der Einfachbindungen liegen, genau wie die im Wassermolekül selbst vorliegenden OH-Bindungen, zerreißt irgendwann an der Stelle, an der sich der Strahl in Tropfen zersetzt, eine dieser OH-Bindungen und zwei Wassermoleküle dissoziieren zu einem  $\text{H}_3\text{O}^+$  und einem  $\text{OH}^-$  Ion. Eines dieser Ionen liegt nun in Überzahl im fallenden Tropfen vor; der Tropfen ist geladen. Diese Ladung gibt er in der Dose ab, wodurch der Ring auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls geladen ist. Dieser Anstoß kann auch durch ein Netzgerät, Reiben o. ä. verursacht werden.

Ist nun einer der Ringe geladen, so stößt seine Ladung gleichnamig geladene Ionen im Wasser ab und zieht ungleichnamig geladene an, das heißt hier geschieht eine Ladungstrennung (s. Abb. 2). Wenn nun der Tropfen abreißt, ist er durch den Überschuss an Ionen einer Art geladen. Diese Ladung gibt er in der Dose ab; der Ring auf der gegenüberliegenden Seite wird also auch geladen. Hier geschieht der gleiche Prozess, nur mit umgekehrten Ladungen. Das heißt, war der Tropfen auf der anderen Seite positiv geladen, trägt er auf dieser Seite negative Ladung. Dadurch wird auch die Dose negativ geladen, wodurch der Ring auf der anderen Seite stärker negativ aufgeladen wird. Jetzt kann der Tropfen dort stärker positiv geladen

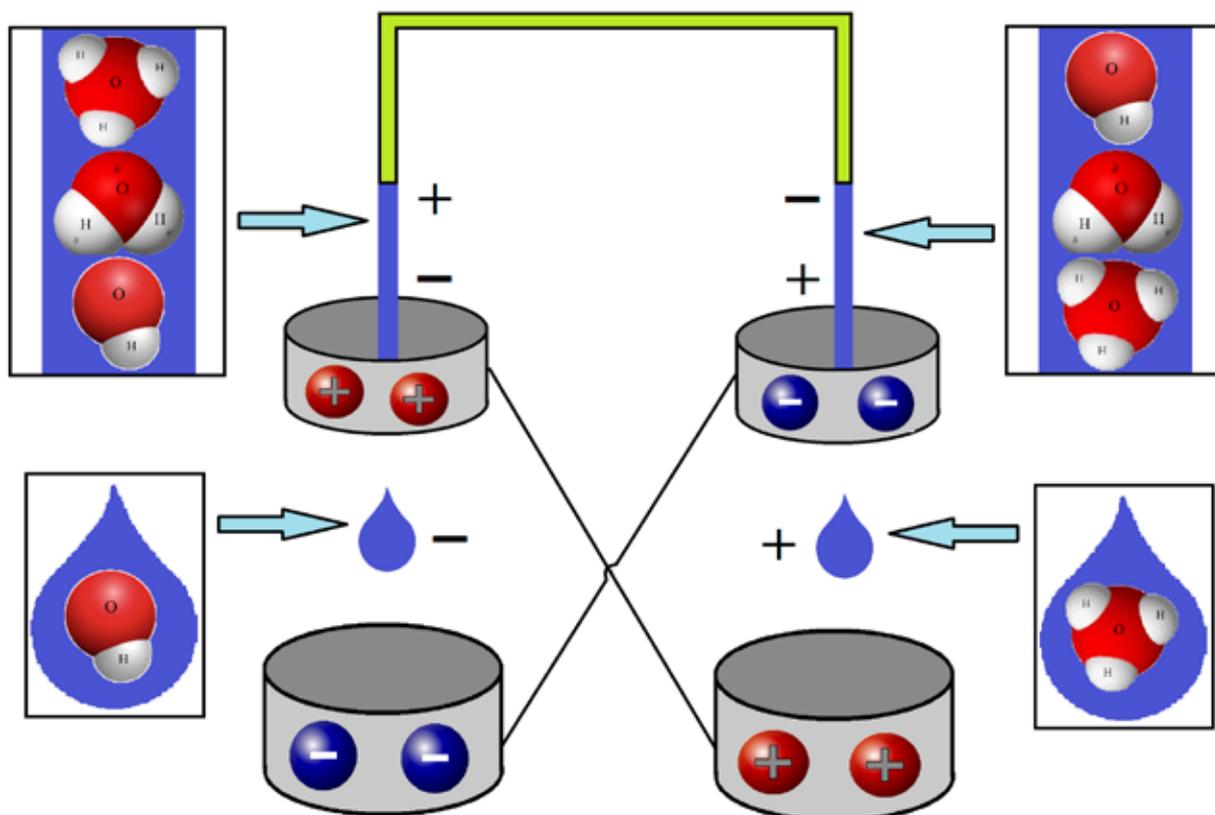


Abb. 2: Das Funktionsprinzip des Kelvingenerators.

werden, wodurch auch der Ring hier stärker positiv geladen wird. Dann kann auch der Tropfen stärker negativ aufgeladen werden, wodurch der Ring auf der anderen Seite stärker negativ geladen wird und so weiter. Auf diese Weise schaukelt sich die Spannung zwischen den Dosen bzw. Ringen hoch und kann binnen Sekunden mehrere tausend Volt betragen. Um einen Ladungsfluss zu verhindern, muss die Spannung mit einem stromfreien Voltmeter, in unserem Fall einem Elektroskop, gemessen werden.

Allerdingen verschlechtert sich im Betrieb die Isolierung mit der Zeit, da Tropfen von den Ringen elektrostatisch angezogen werden und sich an ihnen entladen oder wegen der Ablenkung im elektrischen Feld immer mehr Tropfen die Dosen verfehlen. Außerdem kann der Generator seine Ladung nicht vollständig halten, da trotz der Isolierung immer ein kleiner Teil der Ladung abfließt. [vgl. 3, 4] Daher fällt die Spannung nach einer Weile wieder ab.

### 4.2 Einfluss des elektrischen Feldes auf die Ionen

Uns stellte sich die Frage, ob die Kraft des elektrischen Feldes um die Ringe tatsächlich ausreicht, um Ionen zu trennen. Dieser Frage gehen wir in den folgenden Berechnungen nach. Zu Beginn sei noch angemerkt, dass wir im Folgenden immer nur das  $H_3O^+$ -Ion betrachten, da es etwas größer und etwas schwerer als das  $OH^-$ -Ion ist. Wenn die Kraft also für das Hydroniumion ausreichend ist, ist sie das auch für das Hydroxydion. Betrachten wir zunächst, was das Ion nach unten zieht. Da sind zum einen seine Gewichtskraft  $F_G$  und die Gewichtskraft der auf ihm lastenden Wassersäule  $F_W$  und seine Trägheit. Die beiden Kräfte lassen sie sich unter  $F_{NU}$  zusammenfassen, die Trägheit wird später betrachtet. Die Gewichtskraft berechnet sich mit  $F_G = m \cdot g$

Über die Stoffmenge  $n = 6,022 \cdot 10^{23}$  mol (ein Teilchen) und die molare Masse  $M(H_3O^+) = 19 \frac{g}{mol}$  erhalten wir die Masse  $m(H_3O^+) = 1,14 \cdot 10^{-24}$  kg. Diese multipliziert mit der Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  ergibt die Gewichtskraft:

$$F_G(H_3O^+) = 1,116 \cdot 10^{-23} N$$

Um  $F_W$  zu bestimmen, nehmen wir zunächst an, dass Atome Kugeln mit festen Radien sind und in Molekülen mit praktisch keiner Berührfläche zusammen-

hängen, sodass sich die Oberfläche eines Moleküls aus der Summe der Oberflächen der einzelnen Atome ergibt. Auch nehmen wir an, dass die Moleküle stochastisch gedreht („irgendwie“) im Wasserstrahl liegen. Dann berechnet sich die durchschnittlich in eine Richtung zeigende Fläche mit

$$A = \frac{1}{3} \cdot (4\pi r_1^2 \cdot 4\pi r_2^2 \cdot \dots)[5]$$

(Mit  $r_1, r_2, \dots$  als die Radien der Atome im Molekül). Über die in [6] angegebenen van-der-Waals-Radien ergibt sich  $A(H_3O^+) = 2,63 \cdot 10^{-19} m^2$ . Auf diese Fläche  $A$  drückt nun die Wassersäule der Höhe  $h$ , wobei die Höhe der Säule natürlich mit der Zeit immer geringer wird. Wir rechnen mit der Ausgangshöhe  $h_0 = 0,45$  m und betrachten also den „ungünstigsten“ Fall.

Mit  $F_W = A \cdot h \cdot \rho \cdot g$  erhalten wir  $F_W(H_3O^+) = 1,16 \cdot 10^{-15} N$ . Dann ist  $F_{NU}(H_3O^+) = 1,16 \cdot 10^{-15} N$ . Weil  $F_G$  deutlich kleiner ist als  $F_W$  (acht Zehnerpotenzen) fällt sie hier nicht wesentlich ins Gewicht; weshalb auch  $F_W$  und  $F_{NU}$  gleich zu sein scheinen. Nachdem wir nun die Kraft kennen, die die Ionen nach unten zieht, müssen wir nun die Kraft betrachten, die sie oben hält. Die elektrische Kraft, die auf die Ionen wirkt, heißt Coulombkraft  $F_C$ :

$$F_C = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}$$

Die Ladung eines Ions im Wasser ist immer eine Elementarladung  $e$ , und da alle Ladungen Vielfache der Elementarladung sind, kann die Ladung auf dem Ring mit  $x \cdot e$  bezeichnet werden, also  $Q_1 Q_2 = x e^2$ . Der Abstand  $r$  der Ladungen verändert sich mit dem Winkel  $\alpha$  zum Ringrand, während das Ion fällt (siehe Abb. 3), er lässt sich mit  $r = \frac{r_0}{\cos \alpha}$  beschreiben. Für  $F_C$  gilt somit:

$$F_C = k \cdot \frac{\cos^2 \alpha \cdot x e^2}{r_0^2}$$

$$\text{Mit } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,97 \cdot 10^{-9} \frac{Nm^2}{C^2}$$

Die Coulombkraft  $F_C$  besitzt eine x-Komponente  $F_x$  und eine y-Komponente  $F_y$ , (siehe Abb. 4) Unter der Annahme, dass der Strahl durch die Mitte des Rings läuft, wirkt von allen Seiten die Coulombkraft auf die Ionen. Daher kann die x-Komponente vernachlässigt werden, weil ihr immer eine gleich große Kraft von der gegenüberliegenden Seite entgegenwirkt.

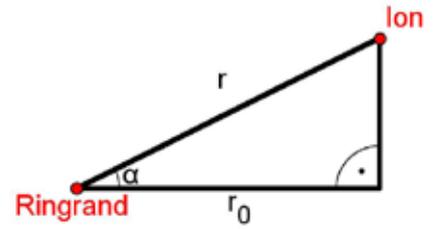


Abb. 3: Geometrie beim Fallen der Ionen.

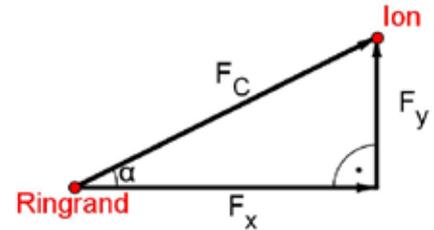


Abb. 4: Die Komponenten der Coulombkraft, die auf das Ion beim Fallen wirken.

Für die Betrachtung der vertikalen Kraft  $F_y$  stellen wir uns sämtliche Ladung auf einen Punkt am oberen Rand des Ringes konzentriert vor, da es egal ist, ob sich die Kräfte der einzelnen Ladungen addieren oder wir die Kraft aus der Summe aller Ladungen betrachten. Dann ergibt sich

$$F_y = \sin \alpha \cdot F_C = \sin \alpha \cdot k \cdot \frac{\cos^2 \alpha \cdot x e^2}{r_0^2}$$

Damit die Ionen aufgehalten werden, muss  $F_y$  mindestens gleich  $F_{NU}$  sein. Setzen wir das nun in die obige Gleichung ein, und lösen sie nach der Anzahl der Ladungen auf dem Ring  $x$  auf, so ergibt sich:

$$x(\alpha) = \frac{F_{NU} \cdot r_0^2}{k \cdot e^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}$$

Diese Funktion gibt nun die benötigte Anzahl an Elementarladungen in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  an, damit  $F_y = F_{NU}$  ist.

Natürlich muss  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegen, da wir bei  $0^\circ$  keine Vertikalkraft hätten und Winkel außerhalb von  $90^\circ$  für uns nicht relevant sind. Diese Funktion  $x(\alpha)$  hat im betrachteten Intervall den in Abb. 5 dargestellten qualitativen Verlauf und weist ein Minimum auf. Das ist die kleinste Ladungsmenge, die benötigt wird, um die Ionen zu trennen. Über die erste Ableitung lässt sich diese Stelle  $\alpha_{min}$  bestimmen:

$$\alpha_{min} = \arcsin \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ also etwa } 0,615 \text{ im Radianten oder } 35,26^\circ$$

Rechnen wir das um auf unseren Generator ( $r_0 = 3,5$  cm), liegt dieser Punkt etwa 2,5 cm oberhalb des oberen Ringrandes. Wir haben also gezeigt, dass die Coulomb-

kraft der geladenen Ringe gleichnamig geladene Ionen am Fallen hindert. Somit findet eine Ladungstrennung im Strahl statt, die für geladene Tropfen sorgt. Wir sind bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass die Ionen sich „irgendwie“ im Wasserstrahl befinden und deshalb angenommen, dass die durchschnittlich in eine Richtung zeigende Fläche  $\frac{1}{3}$  der gesamten Oberfläche ist. Natürlich ist klar, dass nicht alle diesem Durchschnittswert entsprechen. Manche liegen günstig, so dass die Fläche kleiner ist, manche im Durchschnitt, andere ungünstig, so dass sie größer ist. Das heißt, wenn überhaupt, werden die Ladungen dort getrennt; und zwar, von oben kommend, erst die Günstigen, dann die Durchschnittlichen, dann die Ungünstigen. Wenn die Trennung also nicht bis dort geschehen ist, findet sie auch unterhalb nicht mehr statt, da dann die Kraft nicht mehr ausreicht, um das Ion oben zu halten.

Nun die Betrachtung der energetischen Verhältnisse: Die anfängliche kinetische Energie des Ions wird in Lageenergie bezüglich des elektrischen Feldes umgewandelt. Das muss bis zum oben beschriebenen Punkt geschehen sein. Die kinetische Energie berechnet sich mit

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

Die Massen haben wir bereits weiter oben berechnet; es bleibt also noch die Geschwindigkeit. Mit der Annahme, dass durch beide Schläuche gleich viel Wasser fließt und über die Zeit  $t$ , die eine bestimmte Menge Wasser  $V$  zum Durchlaufen braucht, sowie dem Durchmesser  $d$  der Düse lässt sich die Geschwindigkeit  $v$  eines Moleküls im Strahl berechnen:

$$v = \frac{2 \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot t}$$

Mit den Werten des Generators ( $V = 0,0002 \text{ m}^3$ ;  $d = 0,002 \text{ m}$ ;  $t = 69\text{s}$ ) ergibt sich die Austrittsgeschwindigkeit eines Moleküls von etwa  $0,46 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Dazu kommt noch Beschleunigung durch die Gravitationskraft, allerdings vernachlässigen wir sie für unsere Berechnungen. Das ist möglich, wenn die Düse relativ dicht über dem Ring sitzt. Mit der Geschwindigkeit und der Masse können wir die kinetische Energie ausrechnen:

$$E_{kin}(H_3O^+) = 2,41 \cdot 10^{-25} \text{ J}$$

Diese kinetische Energie muss in potentielle (Lage-)Energie umgewandelt werden. Dazu muss Arbeit verrichtet werden:

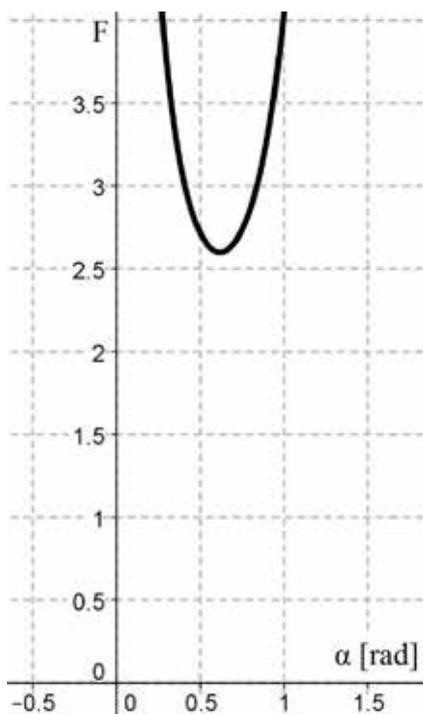


Abb. 5: Qualitativer Verlauf der Anzahl von Ladungen auf dem Ring  $x(\alpha)$ .

$$W = F \cdot s$$

Die Kraft ist die y-Komponente der Coulombkraft; es bleibt also noch der Weg  $s$ . Zu seiner Betrachtung nehmen wir das Dreieck aus Abb. 6. Der Winkel  $\alpha$  ist das oben errechnete Optimum;  $\text{Ion}_1$  der Punkt, an dem die Kraft anfängt, auf ein Ion einzuwirken;  $s$  ist dann der Weg, entlang dessen die Kraft wirken kann;  $\text{Ion}_2$  bezeichnet den Ort des Ions, an dem seine kinetische Energie umgewandelt ist und es ruht (spätestens bei  $\alpha_{\min}$ );  $\beta$  ist aus der Zeichnung ersichtlich. Wir können also zwei Arbeiten berechnen:  $W_\alpha$  und  $W_\beta$ , wobei  $W_\beta$  die Arbeit bezeichnet, die entlang des Weges  $r_0 \cdot \tan \beta$  verrichtet wird. Entsprechendes gilt für  $\alpha$ . Die Arbeit  $W_E$ , die effektiv genutzt werden kann, ist

$$W_E = W_\alpha - W_\beta$$

Nach der Formel zur Berechnung der Arbeit, dem oben beschriebenen Weg und der Formel für die y-Komponente der Coulombkraft können wir für die Arbeit in Abhängigkeit vom Winkel  $\beta$  folgende Funktion aufstellen:

$$W(x, \beta) = \frac{x e^2 \cdot k}{r_0} \cdot (\cos \beta - \cos^3 \beta)$$

Gleiches gilt natürlich für  $\alpha$ . Um diese Funktion allein abhängig von  $\beta$  zu machen, nehmen wir  $x$  als die Anzahl an Elementarladungen, die benötigt wird, um

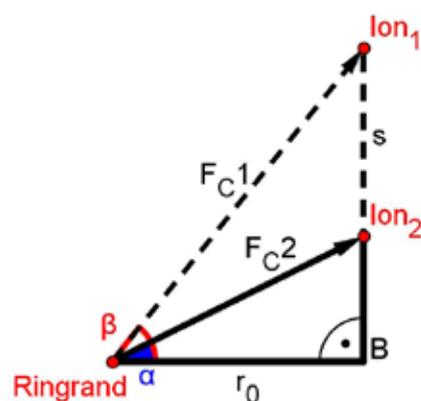


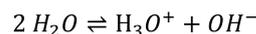
Abb. 6: Geometrische Verhältnisse beim Durchlaufen des Coulombfeldes.

ein „durchschnittliches“ Ion bei optimalem Winkel  $\alpha_{\min}$  aufzuhalten. Sie beträgt nach  $x(\alpha)$  etwa  $1,18 \cdot 10^{10}$  Elementarladungen. Nun lässt sich für  $\frac{x e^2 \cdot k}{r_0}$  der Wert  $9,05 \cdot 10^{-17} \text{ Nm}$  bestimmen.

Wenn  $\alpha$  der optimale Winkel ist, können wir  $W_\alpha$  berechnen:  $W_\alpha = 2,46 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ . Wie oben bereits erwähnt muss  $E_{kin} \leq W_E = W_\beta - W_\alpha$  sein. Also muss auch  $W_\beta \geq E_{kin} + W_\alpha$  sein. Die Funktion von  $W_\beta$  hat den Verlauf in Abb. 7. Wie wir nun am Graphen sehen können, liegt der Wert von  $E_{kin} + W_\alpha = 2,46 \cdot 10^{-17} \text{ J}$  deutlich unterhalb der Amplitude von  $W(\beta)$  von etwa  $3,5 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ . Das heißt die Arbeit reicht auf alle Fälle aus, um ein Ion, das bei optimalem Winkel aufgehalten worden wäre, genügend abzubremsen. Somit haben wir nun theoretisch gezeigt, dass die Kraft des elektrischen Feldes um die Ringe ausreicht, um die Ionen zu trennen.

### 4.3 Einfluss des elektrischen Feldes auf die Wassermoleküle

Nachdem wir nun den Einfluss des elektrischen Feldes auf die Ionen untersucht haben, stellt sich die Frage nach den Auswirkungen auf die Wassermoleküle. Die natürliche Autoprotolysereaktion des Wassers lautet:



Wir vermuten, dass das elektrische Feld um die Ringe die Hinreaktion begünstigt, da beim Wassermolekül, bedingt durch seinen Dipolcharakter, der positiv bzw. negativ polarisierte Teil des Dipols angezogen bzw. abgestoßen wird, was zu Instabilität des Moleküls führt. Das könnte eine Bindungsspaltung bewirken. Da Bindungsspaltungen endotherme Reaktionen sind, entziehen sie ihrer Umgebung Energie.

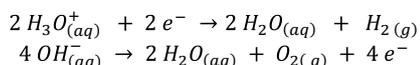
Weil in unserem Fall die Spaltung direkt oberhalb der Ringe vonstatten geht, müsste man also eine Abkühlung der Luft in diesem Bereich feststellen. Diese Abkühlung ist allerdings so gering, dass sie im Rahmen unserer Möglichkeiten nicht messbar ist.

#### 4.4 Modell zum Spannungsanstieg

Nehmen wir zunächst an, dass zu Beginn des Versuches der rechte Ring eine positive und der linke eine negative Elementarladung trägt. Wenn nun Wasser durch den Generator läuft, trägt der erste Tropfen auf jeder Seite – angenommen – ebenfalls eine Ladung. Diese gibt er in der Dose ab, somit tragen die Ringe nun jeweils zwei Ladungen. Dann tragen die nächsten Tropfen zwei Ladungen und die Ringe anschließend vier. Darauf die Tropfen vier und dann die Ringe acht, und immer so weiter. Also wird die Spannung, die ja aus der Ladung resultiert, exponentiell ansteigen. Allerdings sind im Wasser ja nur eine begrenzte Menge Ionen enthalten, das heißt, nach einer bestimmten Anzahl an Tropfen können nicht mehr Ionen getrennt werden; die Ladung eines Tropfens bleibt also konstant. Also wird der exponentielle Spannungsanstieg in einen linearen übergehen.

#### 4.5 Ladungsabgabe der Ionen

Zum Schluss unserer Überlegungen stellt sich noch eine Frage: Getrennte Ionen allein erzeugen noch keine Ladung auf den Ringen. Da die Ionen nicht durch das Metall wandern können, muss eine Reaktion stattfinden, bei der Elektronenübergänge zwischen der Dose und den Ionen stattfinden. Es ergeben sich folgende Redoxgleichungen:



Das heißt, dass bei jedem Durchlauf des Generators in geringem Maß Gase frei werden. Diese Mengen sind allerdings sehr klein, sodass sie nur schwer nachgewiesen werden können. Würde man das Experiment allerdings sehr oft mit demselben Wasser wiederholen, könnte sich irgendwann ein Verlust an Wasser bemerkbar machen.

### 5 Versuche mit dem Kelvingenerator

#### 5.1 Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme

Nun wollten wir diesen Effekt an unserem Generator beobachten, allerdings ergaben sich dabei einige Schwierigkeiten. Nach

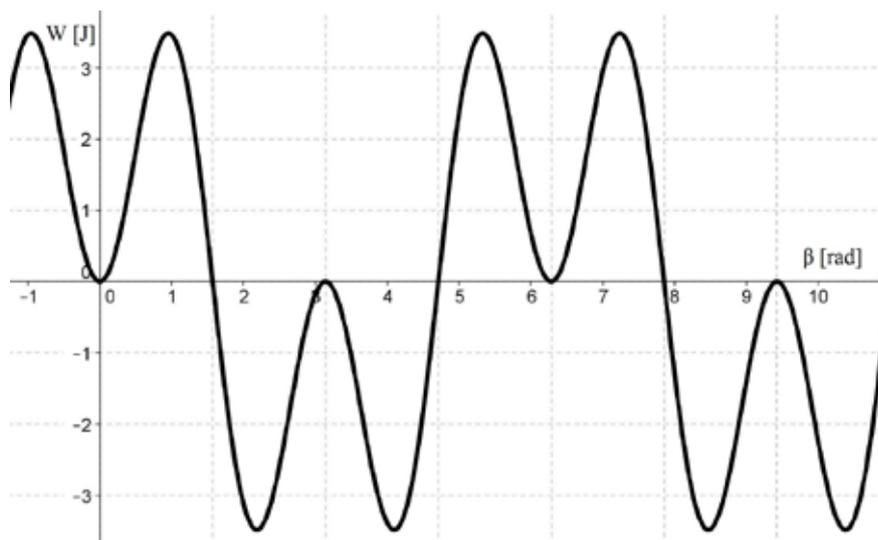


Abb. 7: Graph von  $W(\beta)$ , 1 LE der y-Achse entspricht  $10^{-17}$  Joule.

seiner Fertigstellung überprüfen wir die Funktionstüchtigkeit des Generators mit einer Funkenstrecke zwischen den Dosen und konnten dabei ein positives Ergebnis (regelmäßige Funken) erzielen. In den nächsten Versuchen baute sich allerdings keine Spannung auf. Deshalb testeten wir verschiedene äußere Umstände, die möglicherweise für das Versagen des Generators verantwortlich sein könnten. Änderungen an den Parametereinstellungen, z. B. Höhe der Ringe, Widerstand des Wassers und Außentemperatur, brachten kein Ergebnis und selbst als wir den Generator in einem mit  $CO_2$  gefüllten Behälter, der für eine geringere Luftfeuchtigkeit sorgte, laufen ließen, war keine Spannung messbar.

Nachdem wir uns die Arbeit der Gruppe der Universität Erlangen [3] noch einmal angeschaut und festgestellt hatten, dass sie die Dosen mit einer Initialspannung aufgeladen hatten, konnten wir Spannungen messen, als wir die Dosen ebenfalls mit 15 V aufluden. Der Durchbruch gelang uns, als wir den Generator auf eine Styroporplatte stellten; so konnten wir die besten und zuverlässigsten Ergebnisse erzielen.

#### 5.2 Versuche

In Anlehnung an die Vorgehensweise der Forschergruppe Erlangen [3] haben wir alle Versuche mit einer Videokamera aufgenommen und später ausgewertet. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, haben wir alle Parameter zu jedem Versuch in einer Tabelle notiert.

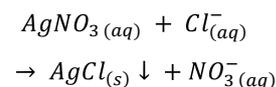
##### 5.2.1 pH-Wert Messungen

Um die Ionentrennung nachzuweisen, haben wir den pH-Wert des Wassers vor

dem Durchlauf und dann im Strahl gemessen. Da der pH-Wert ein direktes Maß für die Konzentration von  $H_3O^+$  ist, müsste man in den Tropfen über der positiv geladenen Dose einen höheren pH-Wert messen können als in den anderen. Dazu haben wir gleichzeitig auf beiden Seiten etwa 30 ml Tropfen aufgefangen, den pH-Wert bestimmt und die Werte miteinander und mit dem Ausgangswert verglichen. Leider erwiesen sich die Werte als nicht aussagekräftig, da die pH-Werte sich nicht änderten. Das liegt daran, dass die Menge an getrennten Ionen zu klein ist um im Rahmen unserer Möglichkeiten gemessen werden zu können.

##### 5.2.2 Silbernitratstest

Löst man Kochsalz ( $NaCl$ ) im Wasser, ist die Ionenkonzentration deutlich höher; man kann die Ionentrennung also wesentlich einfacher nachweisen. Da die Salzionen ( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ) genauso getrennt werden wie die Wasserionen, kann man die Ionentrennung also auch über die Änderung der Menge an  $Cl^-$ -Ionen nachweisen. Dazu haben wir den Silbernitratstest durchgeführt. Er ist ein gängiger Nachweis für Halogenide. In unserem speziellen Fall findet dabei folgende Reaktion statt:



Die Chlorid-Anionen reagieren mit dem Silbernitrat zu schwerlöslichem Silberchlorid, welches die Lösung unterschiedlich trübt in Abhängigkeit von der Menge an  $Cl^-$  Ionen. Um die Ionentrennung zu überprüfen, luden wir den Generator mit einer konstan-

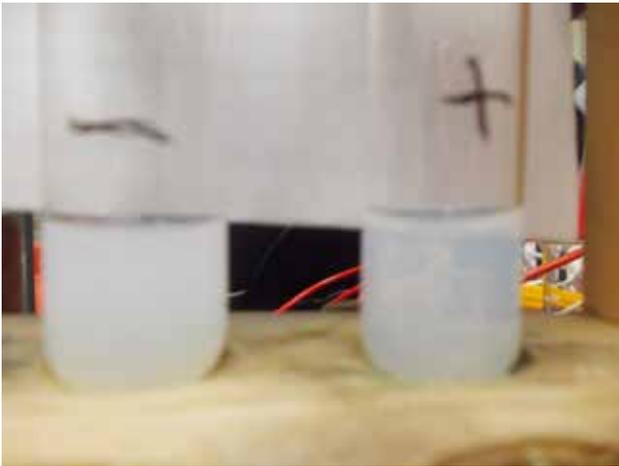


Abb. 8: Ergebnis des Silbernitrattests mit Proben aus den positiv(+) und negativ(-) geladenen Dosen.

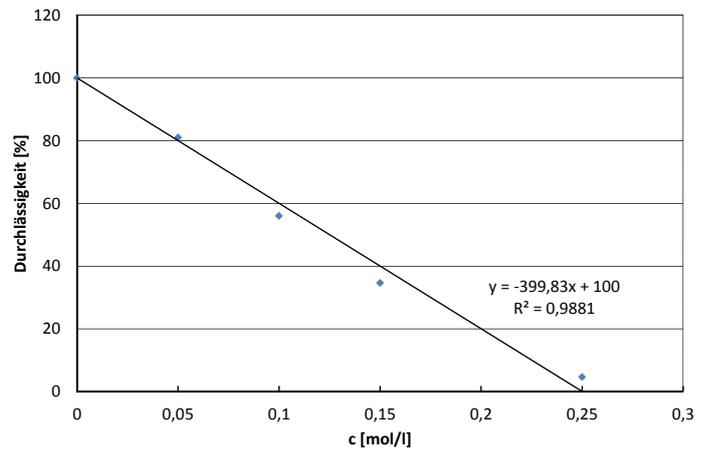


Abb. 9: Durchlässigkeit beim Silbernitrattest für verschiedene NaCl Lösungen.

Pol	D in %
+	32,1
-	16,1
+	38,3
-	18,0
+	25,1
-	15,0

Tab. 1: Durchlässigkeit von Silbernitratproben bei 570 nm bei unterschiedlich gepolten Dosen (100 % entspricht der Referenz mit destilliertem Wasser).

ten Spannung von 7.000 V auf, um ein möglichst deutliches Ergebnis zu erzielen. Wie bei den Hydronium und Hydroxid-Ionen müsste die Konzentration an Chlorid im Tropfen über der negativ geladenen Dose höher sein, das heißt diese Probe sollte trüber werden. 2 ml einer Probe wurden mit 0,2 ml Silbernitrat versetzt. Das Ergebnis zeigt Abb. 8, konnte aber in weiteren Versuchen nicht reproduziert werden, da der Unterschied mit dem Auge nicht zu erkennen war. Deshalb nutzen wir ein Spektrophotometer zur Messung des Unterschiedes der Trübung. Das Spektrophotometer misst die Lichtdurchlässigkeit einer Lösung.

Um die Lichtdurchlässigkeit zu erhöhen, wurden die Proben mit 10 ml destilliertem Wasser verdünnt. Die Tabelle 1 zeigt die Messergebnisse mehrerer Proben (Wellenlänge 570 nm, H<sub>2</sub>O<sub>(dest.)</sub> als Referenz). Alle Proben wurden bei 10 kV entnommen. Die Polung in der Tabelle 1 bezieht sich auf die Dosen. Logischerweise ist der darüber montierte Ring entgegengesetzt und der Strahl (bzw. Tropfen) gleich geladen.

Die Werte am +Pol sind immer etwa doppelt so hoch wie die des -Pols, was bedeutet dass die Lösung mit der Probe vom -Pol deutlicher trüber war, das heißt es lag mehr Silberchlorid vor. Damit ist die Trennung der Ionen qualitativ nachgewiesen.

In einem weiteren Versuch mit Entnahme der Proben aus den Dosen zeigte sich kein Unterschied. Somit ist auch die Theorie der Ladungsabgabe der Ionen bewiesen. Jetzt interessierte uns, wie viele Ionen tatsächlich quantitativ getrennt werden. Dazu stellten wir unterschiedlich konzentrierte NaCl Lösungen her und führten den oben beschriebenen Versuch zur Bestimmung der Durchlässigkeit beim Silbernitratstest durch. Das Ergebnis zeigt Abb. 9.

Wie in Abb. 9 zu sehen ist, kann der Verlauf mit einer Geraden der Gleichung  $D(c) = -400c + 100$  gut beschrieben werden. Damit lässt sich die Ionentrennung berechnen. Man betreibt den Generator mit einer Lösung einer bestimmten Konzentration (bei uns 0,1 mol/l) und entnimmt bei einer gewissen Spannung Proben aus den Strahlen und kann über den Unterschied zur Durchlässigkeit der Ausgangskonzentration die Anzahl der getrennten Ionen berechnen. Bei 3000 V ergab sich eine Ionendifferenz von 0,05 mol/l ebenso wie bei 5000 V. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass diese Spannungen bereits in dem von uns vermuteten Bereich des linearen Spannungsanstiegs liegen. Bei einem exponentiellen Anstieg würden sich die Ionendifferenzen unterscheiden, weil sich die Zunahme an Ladung bzw. Spannung verändern würde. Das untersuchen wir nun noch genauer mit einem Elektrofeldmeter.

### 5.2.3 Messungen mit dem Elektrofeldmeter

Das Elektrofeldmeter (EFM) ist ein Messgerät, das in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke kleine Ströme ausgibt. Die Ladungen auf den Dosen und Ringen rufen ein solches Feld hervor. Da die Feldstärke direkt abhängig ist von der Ladung, und diese wiederum die Spannung erzeugt, lässt sich mit dem EFM indirekt die Spannung unseres Generators messen. Diese Messmethode besitzt im Vergleich zum Elektroskop große Vorteile: Sie lässt eine viel genauere Beobachtung des Spannungsaufbaus zu, da nicht nur 1000 V-Schritte betrachtet werden können, sondern sehr kleine Feldstärkenänderungen, also Spannungsänderungen.

Außerdem lässt sich damit die Maximalspannung messen, weil der Messbereich frei wählbar ist und somit nicht verlassen werden kann. Weiterhin ergeben sich im Gegensatz zum Elektroskop keine Kapazitätsänderungen des Aufbaus durch Kabel und Messgerät, was die Messung genauer macht. Um das EFM zur Spannungsmessung benutzen zu können, erstellten wir eine Eichgerade (Abb. 10), die den Strom in Abhängigkeit der Spannung angibt. Dazu wurde der Generator mit verschiedenen Spannungen aufgeladen und die Stromstärke als Maß der Feldstärke in einem bestimmten Abstand von den Ringen (8 cm), der während aller Messungen unverändert blieb, gemessen. Mit dieser Eichgerade lässt sich nun der Spannungsanstieg in Abhängigkeit der Zeit genau verfolgen. Wie in Abb. 11 zu erkennen ist, steigt die Spannung erst exponentiell und dann linear.

Das bestätigt die Beobachtungen des Sil-

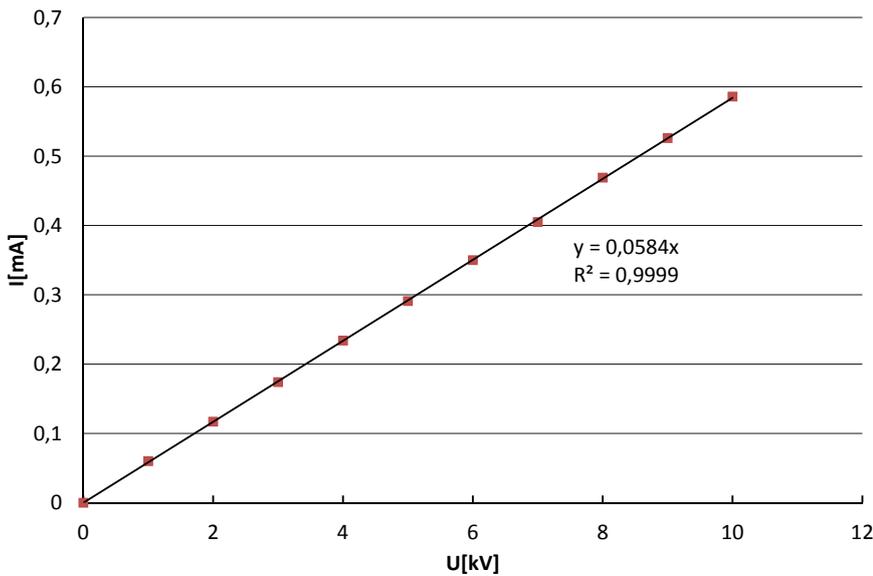


Abb. 10: Abhängigkeit des EFM Stroms von der am Kelvingenerator angelegten Spannung (Eichgerade).

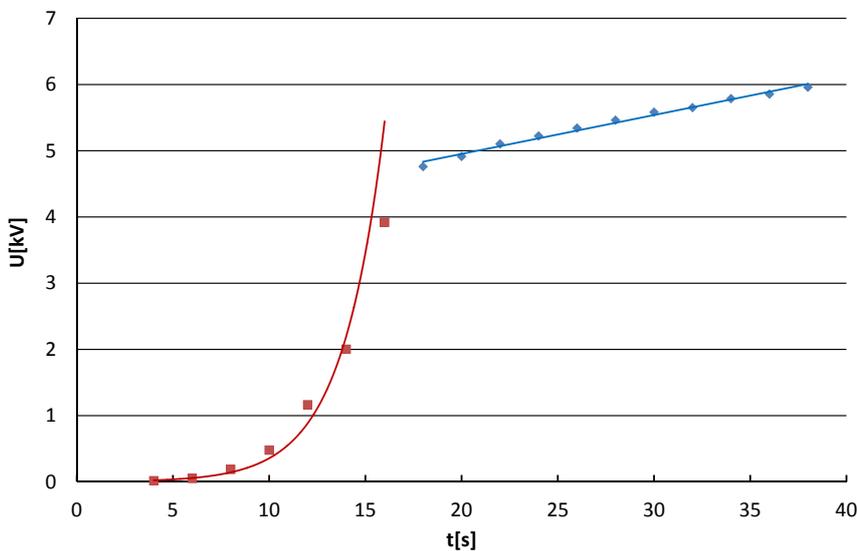


Abb. 11: Spannungsanstieg am Kelvingenerator in Abhängigkeit von der Zeit, gemessen mit dem Elektrofeldmeter

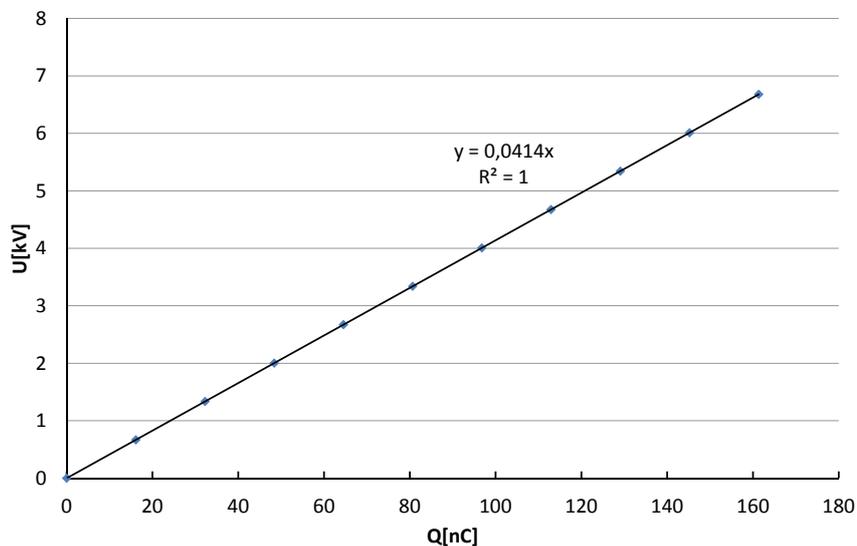


Abb. 12: Abhängigkeit der Generatorspannung von der Ladungsmenge.

bernitrattests und unseres Modells. Mit der Genauigkeit des EFMs lässt sich noch ein weiteres Problem lösen, nämlich die Abhängigkeit von Ladung und Spannung, also die Bestimmung der Kapazität unseres Generators. Dazu erstellten wir ein Diagramm, das die Abhängigkeit zwischen Ladung und Strom beschreibt, indem wir den Generator mit einer definierten Ladungsmenge aufluden und wieder die Feldstärke über die Stromstärke maßen. Die definierte Ladung erreichten wir mit einem geladenen Kugelkondensator, dessen Ladungsmenge einfach berechnet werden kann. Damit „löfleten“ wir dann Ladungen auf unseren Generator. Allerdings ergaben sich bei diesem Verfahren einige Probleme. Denn allein das Einschalten des Netzgeräts zum Aufladen des Kugelkondensators führte zu so starken Feldern, dass diese von unserem Elektrofeldmeter registriert wurden und damit die Messungen verfälschten. Also mussten wir das Netzgerät mehrere Meter weit weg stellen, was aber wieder problematisch war, da unser Generator trotz sehr guter Isolierung seine Ladung relativ schnell verliert. Obwohl wir die Ladung so schnell wie möglich „löfleten“, weist unsere Gerade eine leichte Neigung auf, die vom Ladungsabfluss herrührt. Das zeigt, dass mit einer besseren Isolierung noch höhere Spannungen erreicht werden und diese noch schneller ansteigen können. Die Messungen sind in Abb. 12 dargestellt. Es gibt die Ladungsmenge an, die einer bestimmten Spannung zugrunde liegt. Aus dieser Kurve lässt sich jetzt die Kapazität  $C = \frac{Q}{U} = 24,15 \text{ pF} = 2,415 \cdot 10^{-11} \text{ F}$  bestimmen. Außerdem kann man die Energie mit  $W = \frac{1}{2} CU^2$  berechnen, die im mit einer bestimmten Spannung aufgeladenen Generator mit steckt.

## 6 Stromgewinnung

Nachdem wir uns mit der Funktionsweise beschäftigt haben, widmen wir uns der Stromgewinnung. Am Kelvingenerator liegen zwar hohe Spannungen an, aber es sind nur sehr geringe Ladungsmengen vorhanden. Man könnte die Dosen leitend verbinden, dann würde auch für einen Augenblick ein sehr hoher Strom fließen, aber danach würde es wieder etwas dauern bis sich neue Ladung angesammelt hat und erneut ein Strom fließen kann. Dieses Problem umgehen wir, indem wir Kondensatorplatten an die Dosen stellen, die dann durch das elektrische Feld aufgeladen werden (siehe Abb. 13). Diese können nun leitend verbunden werden, sodass ein Strom

fließt, ohne dabei die Ladung auf dem Generator zu beeinflussen und somit den Prozess der Ionentrennung zu behindern. Mit Kondensatorplatten aus Alufolie und einer Messverstärkerschaltung konnten wir tatsächlich einen konstanten Stromfluss von ca. 100 fA oder  $10^{-13}$ A messen. Das ist sehr wenig, war in Anbetracht der geringen Ladungsmenge aber zu erwarten. Mit dem gleichen Aufbau um die Ringe und einer Parallelschaltung der beiden Stromquellen könnte man eine Verdopplung der Stromstärke erreichen.

### 7 Fazit

Würde man ein ganzes Fußballfeld mit Kelvingeneratoren unserer Bauart bedecken, würde das nicht ausreichen, um eine einzige kleine LED zum Leuchten zu bringen. Man sieht also, dass ein kommerzieller Nutzen des Kelvingenerators nicht möglich ist. Trotzdem bietet er noch viele Möglichkeiten für weitere Untersuchungen. Man könnte beispielsweise die Auswirkungen von mehrfach geladenen Salzionen oder mehrprotonigen Säuren im Wasser untersuchen oder das Wasserreservoir zwischen die Platten eines Plattenkondensators stellen, um eine vorzeitige Ionentrennung zu bewirken oder Wassermoleküle zu spalten, also für insgesamt mehr Ionen zu sorgen. Insgesamt ist es uns gelungen einen funktionstüchtigen Generator zu bauen und dessen Funktionsweise vollständig zu erklären. Außerdem konnten wir einige Modelle bilden und belegen. Abschließend kann man sagen, dass der Kelvingenerator ein hochinteressantes Forschungsobjekt bietet, das viele Aspekte aus Physik und Chemie vereint und dessen Einfachheit und Genialität immer wieder verblüfft.

### Danksagung

Als erstes möchten wir uns bei unserer Betreuerin Dr. Ilka Meyer, die uns mit konstruktiven Ideen und Anregungen unterstützte, herzlichst bedanken. Ebenso danken wir Dr. Friedrich Kayser sowie der Johannes Gutenberg Universität Mainz für Ihre Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt auch der Firma Heinz & Feld GmbH, die uns kostenlos wichtige Metallteile zum Bau unseres Generators anfertigte. Bei unserer Schule möchten wir uns für die Räumlichkeiten und Gerätschaften bedanken. Auch unseren Familien sei ganz besonders gedankt für ihre Unterstützung. Sollten wir andere hilfreiche Geister hier unerwähnt gelassen haben, so gilt auch Euch ein herzliches Dankeschön!

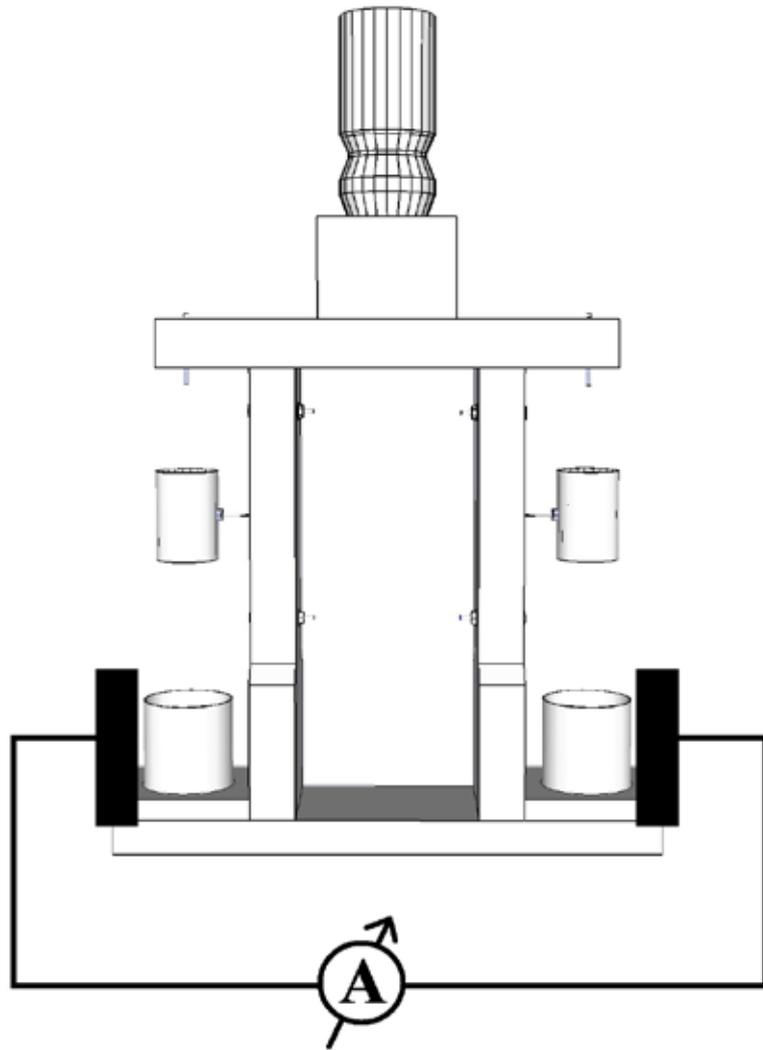


Abb. 13: Ergänzung des ursprünglichen Aufbaus um Strom zu gewinnen.

### Quellenverzeichnis

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Generator>: 21.12.12, Der Kelvingenerator
- [2] [http://home.arcor.de/GDN2/Seiten/Publikationen/quant\\_ladungsm\\_am\\_kelvingen.pdf](http://home.arcor.de/GDN2/Seiten/Publikationen/quant_ladungsm_am_kelvingen.pdf): 21.12.12, Hagen Schmidt, Untersuchungen am Kelvingenerator
- [3] <http://pp.physik.uni-erlangen.de/groups/ws0506/ppg7/pdf/Kelvingenerator.pdf>: 21.12.12, Projektgruppe 7: Daniel Göring, Sandy Peterhänsel, Johannes Reinhard, Christian Scholz, Markus Spanner, Ralph Wiegner, Bau eines Kelvingenerators
- [4] [http://www.forscherland-bw.de/fileadmin/Bilder/Videos\\_Experimente/Kelvingenerator.pdf](http://www.forscherland-bw.de/fileadmin/Bilder/Videos_Experimente/Kelvingenerator.pdf): 21.12.12, Daniel Kunert, Bau eines Kelvingenerators
- [5] <http://www.chemieonline.de/forum/showthread.php?t=65299>: 16.12.12, zwei Photonen, bezieht sich auf Stochastische Drehung eines Moleküls im Raum (Bezug auf S.S. Andrews: Using Rotational Averaging To Calculate the Bulk Response of Isotropic and Anisotropic Samples from Molecular Parameters, J. Chem. Ed. 81 (2004) 877)
- [6] [http://www.uniterra.de/rutherford/tab\\_waal.htm](http://www.uniterra.de/rutherford/tab_waal.htm): 29.12.12, Uni Terra, Van-der-Waals Radien
- [7] Küpfmüller Karl, Mathis Wolfgang, Reibiger Albrecht: Theoretische Elektrotechnik, Berlin Heidelberg 1932, 17. Auflage 2006
- [8] Hübschmann Ulrich, Links, Erwin: Tabellen zur Chemie, Hamburg 1998, 6. Auflage
- [9] Asselborn Wolfgang, Jäckel Manfred, Risch Karl T. (Herausgeber): Chemie heute SII Gesamtband, Braunschweig 2009
- [10] Breuer Hans: Dtv-Lexikon Physik Band 2, München 1996, 4. Auflage