

*Von Gasentladungsröhren zu bewegten
Elektronen*

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften
an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Manuel FELDBACHER

am Institut für Experimentalphysik der TU-Graz

Begutachter: Gernot Pottlacher, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.
Dr.techn.

Graz, 2016

Abstract:

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer Weihnachtsvorlesung mit dem Titel „Vakuumpipen und Leuchterscheinungen“, welche Herr Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot am 17.12.2014 an der Technischen Universität Graz abhielt. Dabei wurde die Thematik, welche in dieser behandelt wurde, aufgegriffen und neu aufbereitet.

Die entstandene Arbeit gliedert sich grob in drei Teile. Der erste befasst sich mit theoretischen Grundlagen, welche dem Leser zu einem besseren Verständnis der darauffolgenden Teile verhelfen soll. Im zweiten Teil wird ein historischer Überblick mit Hilfe ausgewählter Autoren und Wissenschaftler gegeben, welche sich im 19.Jahrhundert Gasentladungsröhren und deren Phänomene beschäftigten. Anschließend darauf folgt der dritte und umfangreichste Teil. In diesem werden 29 Experimente aus der Vorlesung vorgestellt und näher beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Übersichtlichkeit gelegt. Ziel der Arbeit soll es einerseits sein, dem Leser einen Einblick in die Welt der Gasentladungsphysik zu geben, andererseits auch ein physikalisches Verständnis der dabei auftauchenden Phänomene zu fördern. Zusätzlich soll sie auch eine Anregung für Physiklehrer sein, in deren Kabinetten sich des Öfteren noch die ein oder andere Röhre wiederfindet, diese zu verwenden und sinnvoll in ihren Unterricht zu integrieren.

Um einen besseren Lesefluss zu gewährleisten, wurde in der Rechtschreibung nur die männliche Form verwendet, wobei die Arbeit natürlich als genderneutral anzusehen ist.

Abstract:

This thesis is based on the Christmas Lecture of Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot, which was held on 17.12.2014 at the Technical University of Graz. The subject which has been treated in this, was taken up and edited in a new way.

The resulting work is divided into three parts. The first deals with theoretical foundations, which should help the reader to better understand the subsequent parts. The following second part is a historical overview and includes selected authors and scientists, which dealt in the 19th century with gasdischarge tubes and described the occurring phenomena. In the third part 29 experiments are presented and described in more detail. Particular attention was paid to the clarity. The aim of the work is on the one hand to give the reader an insight into the world of the gasdischarge physics, on the other hand to encourage a physical understanding of the emerging phenomena. In addition, the thesis should be a motivation for physics teachers, who have still the one or other tube in their cabinets, to use and integrate these into their teaching.

In order to ensure a better flow of reading, only the masculine form has been used in the spelling. Nevertheless the work is considered as gender neutral.

Danksagung:

Diese Arbeit bildet den Teil des Abschlusses eines Studiums und damit auch den Abschluss eines Lebensabschnittes. Aus diesem Grund möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich auf diesem Wege bei einigen Personen zu bedanken.

Vorangestellt möchte ich dabei meine Eltern Gottfried Feldbacher und Gerda Feldbacher nennen, welchen ich für die behütete Kindheit, eine gute Erziehung, die Unterstützung (sowohl finanziell als auch emotional) und Begleitung auf meinem bisherigen Lebensweg großen Dank aussprechen möchte. Im Zuge dessen sollen auch meine Schwestern Corinna und Sandra Feldbacher, aber auch meine Großeltern Franz und Monika Eichler, sowie Georg und Maria Feldbacher erwähnt werden.

Als unersetzbare emotionale Stütze in den letzten Monaten, gilt ebenfalls meiner Lebensgefährtin Anna Binder ein lieber Dank.

Für die Unterstützung und eine hervorragende Betreuung im Hinblick auf die Erstellung der Arbeit, möchte ich außerdem den Dank an meinen Betreuer und Mentor, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot richten.

Ohne die gründliche und zeitaufwendige Rechtschreibkorrektur, wäre diese Arbeit in der Form und Qualität nicht zustande gekommen, wobei ich dafür Monika Binder-Danninger dankend hervorheben möchte.

Schlussendlich möchte ich noch meinen engeren Freundeskreis, sowie Studienkollegen unterstreichen, welche mich im Laufe meines Weges ebenfalls prägten und unterstützten.

Inhalt

0. VORWORT	3
1. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	4
1.0. Kapitelübersicht	4
1.1. Gasentladungsphysik	5
Stromtransport in Gasen	5
Elektronenstoßionisation	6
Die Gasentladung	8
Die Glimmentladung	10
1.2. Gasentladungsröhren	14
Allgemeine Information	14
1.3. Ausgewählte Betriebsgeräte	15
1.3.1. Leydener Flasche	15
1.3.2. Voltasche Säule	16
1.3.3. Chromsäureelement	18
1.3.4. Funkeninduktor (= Induktorium/Ruhmkorff)	20
1.3.5. Influenzmaschine	22
1.3.6. Tesla-Transformator	24
1.3.7. Bandgenerator	25
1.3.8. HV – Netzgeräte	27
1.3.9. Mikrowelle	28
2. HISTORISCHER ÜBERBLICK	29
2.0. Kapitelübersicht	29
2.1. Die Anfänge	30
2.2. Michael Faraday	31
2.3. Johann Heinrich Geißler	32
2.4. Julius Plücker	35
2.5. Johann Wilhelm Hittorf	37
2.6. William Crookes	39
2.7. Eugen Goldstein und Wilhelm Wien	41
2.8. Philipp Lenard	42
2.9. Wilhelm Conrad Röntgen	43
2.10. Joseph John Thomson	45

3. VERSUCHSREIHEN	46
3.0. Kapitelübersicht	46
3.1. Gasentladungsröhren abseits der Forschung	48
3.1.1. Adventkranz mit Geißlerröhrchen	48
3.1.2. Geißlerröhrchen mit fluoreszierenden Flüssigkeiten	50
Röhre 1:	50
Röhre 2:	51
Röhre 3:	53
3.1.3. Geißlerröhre mit Fluoreszenzstoff	55
3.1.4. Blumenstraußbukett	56
3.1.5. Fluoreszenzröhre mit drei Steinen	58
3.2. Crookes'sche Röhren	60
3.2.1. Crookes Nr. 14, Kathodenstrahlröhre	60
3.2.2. Crookes Nr. 2, Fluoreszenzglas	61
3.2.3. Crookes Nr. 6, Y-Röhre	63
3.2.4. Crookes Nr. 9, Malteserkreuz	64
3.2.5. Crookes Nr. 7a und 7b, druckabhängige Ausbreitung	66
Crookes Nr. 7a:	66
Crookes Nr. 7b:	67
3.2.6. Crookes Nr. 21, Wärmeentwicklung	68
3.2.7. Crookes Nr. 1, Dunkelraum	69
3.3. Weitere Röhren in der Forschung und Wissenschaft	71
3.3.1. Kanalstrahlröhre nach Wien	71
3.3.2. Holtzsche Röhre	72
3.3.4. Elektronenstrahl und Magnet	74
3.3.5. Greinacher Röhre	75
3.3.6. Druckabhängigkeit der Gasentladung	77
3.3.7. Vakuumskala nach Cross	79
3.3.8. Hittorfsche Umwegröhre	81
3.3.9. Lecherleitung	82
3.3.10. Brownsche Röhre	84
3.3.11. Fadenstrahlrohr	86
3.3.12. Elektronenbeugung	87
3.3.13. Feldelektronenmikroskop	89
3.3.14. Röntgenröhre	91
3.4. Zusatz	93
3.4.1. Crookes'sche Lichtmühle	93
4. FAZIT	95
5. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	96
6. LITERATURVERZEICHNIS	99

0. Vorwort

Diese Arbeit basiert auf der Grundlage einer am 17.12.2014 abgehaltenen Weihnachts-vorlesung meines Betreuers Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot mit dem Titel „Vakuurröhren und Leuchterscheinungen“. Dabei wurde das Thema Gasentladungsröhren und der Weg von diesen zur Erforschung und Entdeckung des Elektrons neu aufgerollt. Diese entführte in die Welt der Labore und Kabinette namhafter Physiker und Gasentladungsforscher des 19. Jahrhunderts und gewährte einen Einblick in die wissenschaftliche Arbeitsweise der damaligen Zeit. Ermöglicht wurde das vor allem durch eine, teilweise aus dem gleichen Jahrhundert stammende, breite Sammlung von verschiedenen Röhren, sowie durch originalgetreue Versuche, wie sie einst auch von Plücker, Hittorf, Röntgen und Co in ihren Kabinetten durchgeführt wurden. Für den Betrieb kamen vorwiegend Apparate, wie z.B. (Abk.: zum Beispiel) der Ruhmkorff, zum Einsatz, welche auch schon den damaligen Forschern zur Verfügung standen. Dadurch wurde die Authentizität der Versuche zusätzlich verstärkt.

Diese Arbeit soll zu einem großen Teil die präsentierten Inhalte (Kapitel 2) und Versuche (Kapitel 3) wiedergeben und damit die Möglichkeit schaffen, einen Einblick in die Welt der Gasentladungsforschung dieses bedeutenden Jahrhunderts zu erhalten. Andererseits werden zum besseren Verständnis physikalische Grundlagen zu dieser Thematik erörtert und zusätzlich ergänzt (Kapitel 1), um dem Leser ein erweitertes Verständnis dieses umfassenden Gebietes zu ermöglichen.

1.Theoretische Grundlagen

1.0. Kapitelübersicht

Dieses Kapitel soll im ersten Teil einen groben Überblick über die physikalischen Grundlagen geben, auf welchen die später vorkommenden physikalischen Phänomene basieren. Begonnen wird dabei allgemein mit der Gasentladungsphysik. Der weitere Verlauf spezifiziert sich zunehmend auf die, für die Arbeit, relevanten Themen dieses großen physikalischen Bereiches.

Der zweite, etwas kürzere Teil des Kapitels spezialisiert sich allgemein auf die Gasentladungsröhren. Dabei soll einerseits über die Definition eine Basis für das Verständnis der weitem Arbeit gebildet werden. Andererseits soll die Bedeutung in der Wissenschaft und Forschung derselben unterstrichen werden.

Im dritten und letzten Teil des Kapitels, wird auf eine Reihe von Geräten eingegangen, mit welchen Gasentladungsröhren betrieben werden können. Der Schwerpunkt wurde dabei vor allem auf jene gesetzt, die in der Vorlesung präsentiert wurden. Ausgewählte Apparaturen die in der fachspezifischen Literatur immer wieder auftauchen, sind ergänzend beigefügt.

1.1. Gasentladungsphysik

Stromtransport in Gasen

Gase, die zum Teil oder vollständig ionisiert sind, werden als Plasma bezeichnet. Diese gehören zu den sogenannten „gemischten Leitern“. Der Transport der Ladungen erfolgt dabei sowohl durch Elektronen, aber auch durch positive sowie negative Ionen. Die Plasmen sind meist quasineutral, d.h. (Abk.: das heißt), die Summe aller positiven Ladungen entspricht der der negativen Ladungen¹. Diese Quasineutralität ist jedoch nur über ein Gesamtvolumen gemittelt gegeben und ist in den Raumladungsgebieten bei den Gasentladungen nicht der Fall².

Der Stromtransport hängt vor allem von der Konzentration der Ladungsträger und damit von der Ladungsträgerdichte ab. Diese ist in einem quasineutralen Plasma durch:

$$n^+ \approx n^- = n \quad (1)$$

(mit n = Ladungsträgerdichte, n^+ = Dichte der positiven Ladungsträger, n^- = Dichte der negativen Ladungsträger)

beschrieben und durch die Erzeugerrate und Vernichtungsrate der Ionenpaare bestimmt. Der überwiegende Vernichtungsprozess ist dabei die Rekombination, also die Bildung eines neutralen Atoms bzw. (Abk.: beziehungsweise) Moleküls, bei Zusammenstoß eines Elektrons mit einem positiven Ion. Die kinetische Energie der Reaktionspartner vor dem Stoß wird entweder durch die Emission eines Photons, oder an einen dritten Reaktionspartner (Ion, Molekül, Atom, oder die Atome der Wand des Behälters) abgegeben.

Ströme von negativen Teilchen, also Elektronen, werden dabei als Kathodenstrahlen bezeichnet, da sie beispielsweise in Gasentladungsröhren von der Kathode ausgehen. Heutzutage ist jedoch der Begriff Elektronenstrahlen gängiger.

Die positiven Teilchenströme, also positiv geladene Ionen, werden als Anodenstrahlen oder auch Kanalstrahlen bezeichnet, welche ihren Namen ihrer Erzeugung verdanken. Dabei werden die positiven Ionen durch Anlegen eines elektrischen Feldes Richtung Kathode beschleunigt. Diese ist mit Löchern,

¹ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 64)

² Vgl.: (Jäger, S. 1)

sogenannten Kanälen, versehen, um den Ionen den Durchtritt zu ermöglichen³. Auch die Bezeichnung „Kanalstrahlen“ ist schon veraltet und wurde durch den Begriff der positiv geladenen Ionenstrahlung ersetzt.

Elektronenstoßionisation

Die Elektronenstoßionisation ist neben der thermischen Ionisation und der Photoionisation ein Erzeugermechanismus für Ladungsträger⁴. Da gerade dieser der vorwiegende Ionisationsvorgang bei der Glimmentladung und damit auch bei der Entladung in Gasentladungsröhren ist, wird auf ihn in dieser Arbeit explizit eingegangen.

Grundvoraussetzung dafür ist das Vorhandensein von Ionen im Gas. Dies ist schon durch die einfallende kosmische oder radioaktive Strahlung permanent gewährleistet, da aufgrund dessen immer ein gewisser Prozentsatz an Atomen und Molekülen als Ionen vorliegen.

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung entsteht ein elektrisches Feld, welches die Elektronen beschleunigt.

$$F = E * e \equiv m * a \quad (2)$$

(mit F = Kraft, E = elektrische Feldstärke, e = elektrische Ladung, m = Masse, a = Beschleunigung)

Wobei die Elektrische Feldstärke von der Spannung und dem Abstand der Elektroden abhängen.

$$E = \frac{U}{d} \quad (3)$$

(mit E = Elektrische Feldstärke, U = elektrische Spannung, d = zwischen den unterschiedlichen Potentialen)

³ Vgl.: (Lexikon der Physik, 2016)

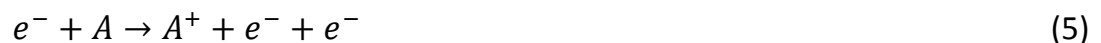
⁴ Vgl.: (Jäger, S. 16)

Das Teilchen erhält über die Länge des Weges bis zum Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen eine kinetische Energie von:

$$W = F * \lambda \quad (4)$$

(mit W = kinetische Energie, F = Kraft, λ = mittlere freie Weglänge)

Aufgrund der viel kleineren Masse der Elektronen gegenüber den Ionen erreichen diese dadurch höhere Geschwindigkeiten wodurch auch die Anzahl der Stöße, welche die Elektronen entlang des Weges verursachen, viel größer ist. Daher sind sie bei Gasentladungen in Bezug auf Ionisation und Anregungen die primäre Ursache. Dieser Vorgang kann allgemein mit der Formel



(mit e^- = Elektron, A = (neutrales) Atom, A^+ = (positiv geladenes) Ion)

beschrieben werden⁵.

Wie oft es zum Stoß kommt, bzw. ob diese Stöße zur Ionisierung von Molekülen und Atomen führen, hängt von zwei eben schon erwähnten Faktoren ab: Der angelegten Feldstärke und der freien Weglänge, welche über den Gasdruck mit der Formel

$$\lambda = \frac{1}{n}, \quad n \sim p \quad (6)$$

(mit λ = mittlere freie Weglänge, n = Teilchendichte, p = Gasdruck)

bestimmt werden kann⁶.

⁵ (Demtröder, 2009, S. 65)

⁶ Vgl.: (Jäger, S. 16)

Die Gasentladung

Damit durch Stoßionisation überhaupt neue Ladungsträger erzeugt werden können, müssen die Elektronen im E-Feld während der freien Weglänge zwischen zwei Stößen so beschleunigt werden, dass sie mindestens eine Energie aufnehmen, die groß genug ist, um das angestoßene neutrale Teilchen mit seiner Ionisierungsenergie zu ionisieren. Diese Energieaufnahme im elektrischen Feld wird durch

$$W_{ion} \leq e^- * E * \lambda \quad (7)$$

(mit W_{ion} = Ionisierungsenergie, e^- = Ladung des Elektrons, E = elektrische Feldstärke, λ = mittlere freie Weglänge)

gegeben⁷.

Ein Strom, bei dem eine Anzahl von N Elektronen in einer definierten Zeit von einem Feld in eine gegebene Richtung x beschleunigt werden, erzeugt entlang der Strecke dx

$$dN = \alpha N dx \quad (8)$$

(mit dN = Anzahl der neu erzeugten Ladungsträgerpaare, α = Ionisierungskoeffizient, N = Anzahl der „alten“ Ladungsträger, dx = Streckenabschnitt)

neue Ladungsträgerpaare⁸.

Die durchschnittliche Anzahl der von einem einzelnen Elektron pro Längeneinheit neu erzeugten Paare wird durch den „Townsend'schen Ionisierungskoeffizienten“

$$\alpha = \frac{dN}{N} \frac{1}{dx} \quad (9)$$

⁷ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 67)

⁸ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 67)

(mit α = Townsendscher Ionisierungskoeffizient, dN = Anzahl der neu erzeugten Ladungsträgerpaare, N = Anzahl der „alten“ Ladungsträger, dx = Streckenabschnitt)

beschrieben, woraus sich für die Anzahl der Paare, die über die Strecke zwischen den Elektroden durch Stoßionisation erzeugt wurden

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (10)$$

(Mit N_d = Anzahl der Ladungsträgerpaare nach dem Durchlaufen des Elektrodenabstandes, N_0 = der beim Zeitpunkt t_0 vorhandene Elektronenstrom, α = Townsendscher Ionisierungskoeffizient, d = Abstand der Elektroden)

ergibt^{9 10}.

Was ebenfalls aus der Formel hervorgeht, ist die exponentielle Zunahme an Elektronen, je weiter man sich in Richtung Kathode bewegt.

Aufgrund der Proportionalität von Strom (verursacht durch die wandernden Ladungsträger) und Ladungsträgerpaaren kann der Strom auch mit der Formel

$$i_d = i_0 e^{\alpha d} \quad (11)$$

(Mit i_d = neu entstandener Strom der beim Überstreifen der Ladungsträger über die Länge d entsteht, i_0 = der beim Zeitpunkt t_0 vorhandene Strom, α = Townsendscher Ionisierungskoeffizient, d = Abstand der Elektroden).

beschrieben werden. Aufgrund der „lawinenartigen“ Zunahme an Ladungsträgerpaaren wird i_d auch als „Lawinenstrom“ bezeichnet¹¹.

Nach den vorhergegangenen Ideen muss α vor allem vom Gasdruck abhängen. Ist der Druck im Gas nämlich klein, treffen die Elektronen von der Kathode zur Anode kaum Teilchen. Damit kann auch keine Vermehrung der Ladungsträger stattfinden. Andererseits können die Elektronen bei hohem Druck und die dadurch sehr kurze

⁹ (Demtröder, 2009, S. 68)

¹⁰ Vgl.: (Jäger, S. 17)

¹¹ Vgl.: (Jäger, S. 17)

freie Weglänge nicht genug kinetische Energie aufbauen, um andere Teilchen zu ionisieren. Dabei nimmt α am Anfang bei steigendem Druck aufgrund der zunehmenden Teilchenstöße parabelförmig zu, bis ein gewisser Höchstwert erreicht ist. Nach diesem beginnt α aufgrund der klein werdenden freien Weglänge parabelförmig abzunehmen.

Bei der Stoßionisation kommt es ebenfalls auch zur Bildung von positiven Ladungsträgern. Diese bewegen sich zur Kathode hin und lösen dort sogenannte Sekundärelektronen aus, welche den Elektronenstrom noch zusätzlich erhöhen.

Für den Gesamtstrom (Elektronen plus Ionen) gilt also:

$$I_{Gesamt} = I_{Elektronen} + I_{Ionen} = Constant \quad (12)$$

(Mit I_{Gesamt} = Gesamtstrom, $I_{Elektronen}$ = Elektronenstrom, I_{Ionen} = Ionenstrom)

Daraus folgt auch, dass an jedem Punkt zwischen Anode und Kathode der gleiche Strom fließen muss.

Die Glimmentladung

Grundsätzlich können mehrere Typen von Gasentladungen unterschieden werden. Glimmentladungen (oder auch Niederdruckentladungen), Bogenentladungen und Funkenentladungen sind dabei die Fundamentalsten. Der größte Unterschied zwischen den einzelnen Arten erweist sich dabei im Druck des Gases, in welchem die Entladungen stattfinden. So sind Glimmentladungen bei niedrigen Drücken von ca. 10^{-4} bis 10^{-2} bar charakteristisch¹², wogegen Bogenentladungen und Funkenentladungen erst ab ca. 1 bar in Erscheinung treten. Da bei Letzteren der Druck um ein Vielfaches höher ist, müssen daher auch die Ströme bei den Entladungen vergleichsweise hoch sein. Die Stromstärken, welche bei Funken- und Bogenentladung vorkommen, beginnen bei ca. 1 Ampere, können aber durchaus auch Werte bis zu 10^4 Ampere erreichen¹³.

¹² (Demtröder, 2009, S. 69)

¹³ Vgl.: (Jäger, S. 41)

Da die Gasentladungsröhren, mit denen wir uns in den nächsten Kapiteln befassen werden, in den Bereich der Glimmentladungen fallen, werden wir uns mit dieser etwas näher befassen.

Wie bereits erwähnt, finden Glimmentladungen bei niedrigen Gasdrücken und relativ kleinen Stromstärken (im Milliampere-Bereich) statt. Dabei sind verschiedene Leuchterscheinungen zu beobachten, deren Bild sich mit der angelegten Spannung und dem Gasdruck ändern.

Die relevantesten Strukturen, welche vor allem auch in den nachstehenden Kapiteln über Gasentladungsröhren von Bedeutung sind, werden im Folgenden aufgelistet. Die Reihenfolge der erklärten Phänomene richtet sich dabei nach dem Verlauf von Kathode zur Anode (siehe dazu auch Abbildung 1).

Astonscher Dunkelraum:

Die Elektronen, welche aus der Kathode austreten, kommen in diesem Abschnitt nicht auf die Energie, die benötigt wird, um Gasteilchen anzuregen. Die Raumladung ist in diesem Bereich negativ¹⁴.

Kathodenschicht:

In diesem Abschnitt haben die Elektronen die benötigte Energie erreicht und können Gasteilchen anregen. Diese Anregung nimmt mit der steigenden Elektronenenergie ab, jedoch werden immer mehr Teilchen ionisiert. Die Lichtintensität sinkt mit dem weiteren Weg zur Anode¹⁵.

Hittorfscher Dunkelraum:

Wie der Name schon andeutet, ist auch dieser Teil dadurch gekennzeichnet, dass keine Lichtemission stattfindet. Die Interaktionen zwischen den Teilchen beschränken sich hauptsächlich auf Ionisationen. Ein weiteres Merkmal dieses Abschnitts ist die starke positive Raumladung, da sich die Elektronen wesentlich schneller als die Ionen bewegen. Die Feldstärke ist im Schnitt noch relativ groß, nimmt jedoch ab. Der Spannungsabfall zwischen der Kathode und dem im nächsten Abschnitt erwähnten Glimmsaum wird auch als „Kathodenfall“ bezeichnet. Am weiteren Weg in Richtung Anode gleichen sich die Elektronen und Ionen zahlenmäßig immer mehr an, wodurch die Feldstärke zunehmend abnimmt. Dadurch werden die Elektronen immer weniger beschleunigt und sind nur noch in der Lage, Teilchen anzuregen, was wiederum zu einer Lichtemission führt¹⁶.

¹⁴ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

¹⁵ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

¹⁶ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

Negatives Glimmlicht:

Als negatives Glimmlicht wird die helle Leuchtschicht bezeichnet, welche nach dem Hittorfschen Dunkelraum folgt und diesen scharf abgrenzt (Glimmsaum). Die Feldstärke erreicht in diesem Abschnitt minimale Werte. Durch die Teilchenstöße nimmt die Energie der Elektronen ab, bis sie schließlich nicht mehr in der Lage sind, Anregungen zu verursachen. Damit sinkt auch wieder die Lichtintensität. Die negative Raumladung erhöht sich¹⁷.

Faradayscher Dunkelraum:

Bewegt man sich weiter Richtung Anode, erreicht man den Faradayschen Dunkelraum, welcher sehr große Teile in den Gasentladungsröhren einnehmen kann. In diesem Bereich haben die Elektronen eine zu geringe Energie für Stöße, um eine Anregung von Teilchen bewirken zu können. Jedoch erfahren sie wieder eine Beschleunigung, die zwar gering ist, aber dennoch dazu führt, dass sie auf dem weiteren Weg zur Anode Energie aufnehmen, die groß genug ist, um im nächsten Abschnitt wieder Teilchenanregungen verursachen zu können¹⁸.

Positive Säule

Anschließend auf den Faradayschen Dunkelraum folgt die sogenannte positive Säule, welche, je nach Druck und Gasfüllung, als helles Band oder in getrennten Schichten in Erscheinung tritt. In diesem Abschnitt regen die Elektronen wieder Atome und Moleküle an, welche wiederum Licht emittieren. Zusätzlich kommt es verstärkt zu Rekombinationen von den Elektronen mit den von der Anode kommenden Ionen. Die Feldstärke in diesem Bereich ist gering, das Plasma quasineutral. Die positive Säule reicht fast bis zur Anode¹⁹.

Anodendunkelraum:

Kurz vor der Anode befindet sich, äquivalent zum Kathodendunkelraum (auch Hittorfscher Dunkelraum), der Anodendunkelraum. In dieser Schicht beginnt die Feldstärke erneut anzusteigen. Die ablaufenden Vorgänge sind mit denen des nächsten Abschnittes, der Anodenglimmschicht, verbunden²⁰.

Anodenglimmschicht

Da die Elektronen, aufgrund der geringen Masse, zur Anode hin schneller wandern als die positiven Ionen von dieser abgestoßen werden, führt das zu einem

¹⁷ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

¹⁸ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

¹⁹ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

²⁰ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

Spannungsabfall (ähnlich dem Kathodenfall). Während es im Anodendunkelraum vorwiegend zur Teilchenionisation kommt, spielt in der Glimmschicht der Anode die Anregung von Teilchen die tragende Rolle²¹.

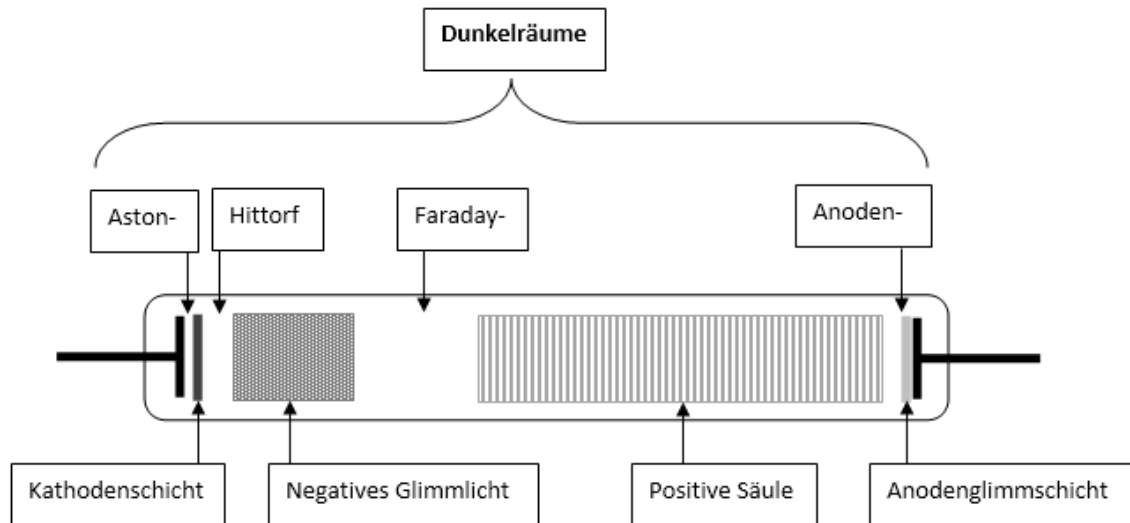


Abbildung 1: Schematische Darstellung der einzelnen Abschnitte der Glimmentladung

²¹ Vgl.: (Jäger, S. 33 f)

1.2. Gasentladungsröhren

Allgemeine Information

Gasentladungsröhren sind, allgemein definiert, evakuierte oder evakuierbare Glasröhren (wobei der Begriff „Röhre“ mehr die Funktion als die Form beschreibt) mit eingebrachten Elektroden, die zur Erzeugung einer Gasentladung verwendet werden²².

Sowohl die Form des Glaskörpers, als auch die Anordnung und Anzahl der Elektroden, können dabei stark variieren. Außerdem können in die Röhre verschiedenste zusätzliche Elemente, wie fluoreszierende Steine, Glaskörper etc. eingebracht sein um schöne Effekte zu erzielen.

Durch das Vakuum innerhalb der Röhre entsteht eine Glimmentladung. Wie diese in Erscheinung tritt, bzw. welche Phänomene beim Betreiben der jeweiligen Röhre sichtbar werden, hängt vorwiegend von der Größe des Vakuums und von der angelegten Spannung ab. Somit können bei ein und derselben Röhre, bei einer Druck- oder Spannungsänderung, völlig unterschiedliche Effekte beobachtet werden. Dadurch war es vor allem in den Anfängen der Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert eine große Herausforderung, zum einen Röhren mit einem möglichst hohen Vakuum zu erzeugen, andererseits geeignete Spannungsquellen zu finden, welche eine hohe und zusätzlich gleichmäßige Spannung lieferten.

Bedeutung:

Neben der technischen Nutzbarkeit, sowie Show- bzw. Dekorationszwecken, bieten die Gasentladungsröhren vor allem die Möglichkeit, Untersuchungen der elektrischen Entladung in Gasen bei vermindertem Druck durchzuführen. Das erklärt auch die Bedeutung und Relevanz der Röhren für die Wissenschaft und die Gasentladungsforschung ab dem 19. Jahrhundert.

Verweis:

Eine breite Auswahl an verschiedensten Röhren kann in den einzelnen Kapiteln des Abschnitts „3. Versuchsreihen“ nachgelesen werden.

²² Vgl.: (spektrum.de, 2016)

1.3. Ausgewählte Betriebsgeräte

1.3.1. Leydener Flasche

❖ *Beschreibung:*

Dieses Gerät wurde in der Vorlesung nicht explizit genannt. Aus dem gleichen Grund wie bei der Voltaschen Säule möchte ich auch diese trotzdem erwähnen.

Die Leydener Flasche verdankt ihren Namen der niederländischen Stadt Leiden, in der sie entwickelt wurde. Sie stellt die älteste Bauform eines Kondensators dar und wurde in ihren Anfängen oft als Attraktion auf Jahrmärkten eingesetzt, um Stromschläge zu demonstrieren. Doch fand sie auch bald in der Wissenschaft Einzug, unter anderem durch Benjamin Franklin, welcher eine Leydener Flasche mit einem Drachen in Verbindung brachte, um Ladungen in Gewitterwolken nachzuweisen²³.

Mit den Geräten konnten durchaus hohe Spannungen erzeugt werden. Jedoch waren die Entladungen zeitlich extrem kurz und mit nur sehr kleinen Stromstärken verbunden. Das führte dazu, dass die Erscheinungen sehr kurz und ungleichmäßig waren, wodurch die Beobachtungen nur wenig genau gemacht werden konnten²⁴. Außerdem werden zum Beladen der Flaschen, gleich wie bei einem Kondensator, Apparaturen, bzw. Methoden benötigt. Daher fand sie vor allem, gekoppelt mit anderen Geräten, Anwendung²⁵.

❖ *Aufbau:*

Die Leydener Flaschen sind in Ihrem Aufbau sehr einfach. Dabei wird auf der Innen- und der Außenseite einer Glasflasche eine Metallschicht aufgebracht. Diese Schichten stehen aber nicht direkt in Kontakt, sondern sind durch das Glas voneinander isoliert, getrennt. Meistens wurde die auf der Innenseite der Flasche liegende Metallschicht mit einem Leiter verbunden, der aus dem Glas ragt, um die Ladung besser abgreifen zu können²⁶.

²³ Vgl.: (Zoth, 2016, S. 7)

²⁴ Vgl.: (Falk Müller, 2006)

²⁵ Vgl.: (Müller, 2004, S. 12)

²⁶ Vgl.: (Zoth, 2016, S. 7)

❖ **Funktion:**

Leydener Flaschen stellen, wie schon angemerkt, die ersten gefertigten Kondensatoren dar. Daher ist auch das Funktionsprinzip äquivalent zu dem eines Plattenkondensators. Wird die Innenseite mithilfe einer Ladungsquelle beispielsweise negativ beladen, so findet auf der Metallschicht der Außenseite eine Trennung der Ladung statt, wobei sich die positiven Ladungen in Richtung der Flascheninnenseite anordnen. Ein elektrisches Feld baut sich auf, die Gesamtladung auf der Außenseite ist jedoch immer noch neutral. Durch eine Erdung der Metallschicht außen ladet sich diese nun entgegengesetzt der inneren Schicht²⁷.

1.3.2. Voltasche Säule

❖ **Beschreibung:**

Zwar wurde diese Art der Betreibung in der Vorlesung nicht angeführt, dennoch möchte ich sie erwähnen, da ihr vor allem historisch ein hoher Stellenwert zukommt und sie in den Anfängen der Geschichte der Gasentladungsröhren Anwendung fand.

Die Voltasche Säule kann als erste verwendbare Batterie gesehen werden. Entwickelt wurde diese von Alesandro Volta (1745-1827), welcher diese 1800 vor der Royal Society präsentierte. Diese Erfindung war so bedeutend, dass ihm für diese die höchste Auszeichnung zukam – nach ihm wurde die Einheit für die elektrische Spannung „Volt“ benannt²⁸.

Sie ist im Prinzip eine Erweiterung der galvanischen Zelle und beruht auf der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie.²⁹ Durch die Trägheit der chemischen Reaktion bedingt, können Spannungen über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden, die sich jedoch, bei wenig zusammengeschlossenen Elementen, meist nur im einstelligen Voltbereich befinden. Um mit bloßen voltaschen Säulen, genügend hohe Spannungen erzeugen zu können, mit denen auch Gasentladungsröhren betrieben werden können, müssen somit hunderte bis tausende Grundeinheiten in Reihe geschaltet werden, was eine Verwendung für diesen Zweck sehr kostspielig machen würde.

²⁷ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 20)

²⁸ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 72 f)

²⁹ Vgl.: (Charles E. Mortimer, 2010, S. 363 f)

❖ **Aufbau:**

Eine Voltasche Säule besteht aus galvanischen Zellen, welche die Grundeinheiten bilden, die übereinander in Reihe gestapelt sind. Eine Grundeinheit ist aus 3 Teilen aufgebaut: einer Zinkplatte, einer Kupferplatte und einer dazwischenliegenden Elektrolytschicht, die meistens aus einem elektrolytgetränkten Stück Leder oder Karton besteht. Diese Einheiten sind sandwichartig aufeinandergestapelt.³⁰ Diese Stapelung ist im Prinzip eine Reihenschaltung der Grundeinheiten und liefert aus diesem Grund ein Vielfaches der Einzelspannung einer einzelnen galvanischen Zelle.

❖ **Funktion:**

Das Funktionsprinzip besteht darin, dass sich unterschiedliche Metalle in ihrer Bereitschaft unterscheiden, Elektronen abzugeben und aufzunehmen. Diese Bereitschaft wird mit Hilfe von sogenannten Normalpotenzialen beschrieben. Es gilt: Je positiver ein Normalpotenzial eines Metalls ist, desto „edler“ ist es³¹.

Werden nun zwei Metalle mit unterschiedlichem Normalpotential, also ein edleres und ein unedleres Metall (Normalpotential von $\text{Cu}^{2+} +0,337 \text{ E}^0/\text{V}$, $\text{Zn}^{2+} -0,7628 \text{ E}^0/\text{V}$)³² in eine elektrolytische Lösung getaucht und mit einem Leiter miteinander verbunden, beginnt Strom zu fließen. Grund dafür ist, dass sich beim Eintauchen der Elektroden in den Elektrolyten, aufgrund des Konzentrationsgefälles zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten, positive Metallionen vom Metall lösen. Da beim unedleren Metall mehr Ionen (in Form von positiven Zn^{2+} -Ionen) erzeugt werden, bleibt eine negative Gesamtladung aufgrund des Elektronenüberschusses in dieser Elektrode übrig. Diese verursacht schließlich, bei einer leitenden Verbindung mit der Kupferelektrode, einen Elektronenstrom von der Zinkanode in Richtung Kupferkathode. Chemisch gesehen findet eine Redoxreaktion statt, bei der die Kupferkathode die ankommenden Ionen reduziert und die Zinkanode das Oxidationsmittel darstellt^{33,34}.

³⁰ Vgl.: (Dibner, 1964, S. 135 f)

³¹ Vgl.: (Charles E. Mortimer, 2010, S. 366 f)

³² (Charles E. Mortimer, 2010, S. 369 f, Tabelle)

³³ Vgl.: (Demtröder, 2009, S. 72)

³⁴ Vgl.: (Zoth, 2016)

1.3.3. Chromsäureelement

❖ *Beschreibung:*

Ein Chromsäureelement, welches auch in der Vorlesung vorgestellt wurde, ist eine weiterentwickelte Form des Bunsen-Elements und basiert, wie auch beispielsweise die Voltasche Säule, auf dem Prinzip der galvanischen Zelle³⁵.

Das Bunsen-Element wurde von Robert Wilhelm Bunsen erfunden. Johann Christian Poggendorff (1796-1877) versuchte noch im gleichen Jahr 1842, in dem es Bunsen veröffentlichte, dieses zu verbessern und tauschte die im Bunsen-Element verwendete Salpetersäure mit Chromsäure aus³⁶. Damit schaffte er, neben einer geruchsarmen Form des Bunsen-Elements, eine Leerlaufspannung von ca. 1,96 Volt.^{37,38} Das Element ist allerdings (gleich wie das Bunsenelement) immer nur kurzzeitig belastbar, da die in der Apparatur stattfindende Depolarisation nur sehr langsam vor sich geht.

Dadurch war es vor allem beim Experimentieren mit Gasentladungsröhren nötig, sehr viele Zellen in Reihe zu schließen, um eine adäquate Spannungsquelle für den Betrieb zu erhalten.

Des Öfteren taucht diese Erfindung Poggendorffs auch unter dem Namen „Grenet Cell“ auf. Der Name leitet sich von dem Namen Eugene Grenet Jr. ab, der das Poggendorff-Element für die praktische Anwendung etwas einfacher gestaltete und anschließend sein verbessertes Chromsäureelement 1859 auch patentierte³⁹.

❖ *Aufbau (nach Poggendorff)*

Es besteht aus einem galvanischen Element, bei welchem man eine saure Lösung aus Chromsäure (welche entsteht, wenn Kaliumdichromat zu Schwefelsäure gegeben wird) und verdünnter Schwefelsäure verwendet. In die Säure taucht man eine Elektrode aus Zink, welche die Anode bildet, und eine aus Kohle, bzw. Graphit, welche die Kathode darstellt. Da durch die Bauweise die Zinkanode in direktem Kontakt mit der Schwefelsäure steht, beginnt sich diese allmählich aufzulösen. Um dieses möglichst zu reduzieren, sind die Elektroden mit einer Hub-/Absenkvorrichtung verbunden, die sich auf der Oberseite der Apparatur befindet und ein Absenken bzw. das Herausziehen der Elektroden aus der Säure ermöglicht.

³⁵ Vgl.: (Charles E. Mortimer, 2010, S. 364)

³⁶ Vgl.: (Wilke, 1893, S. 23 f)

³⁷ Vgl.: (Akademischer Verlag, 2016)

³⁸ (Ayrton, 1891, S. 222 ff (online))

³⁹ Vgl.: (DiLuciano, 2016)

Da Anode und Kathode direkt in die Säure „getaucht“ werden, wird dieses Element auch als „Tauchelement“ bezeichnet. Die einzelnen Komponenten sind in einem Rundkolben eingeschlossen.



Abbildung 2: Chromsäureelement
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page8.html>)

❖ **Funktion**

Da auch diese Art der Spannungsquelle eine abgeleitete Form der Galvanischen Zelle darstellt, ist auch die Funktionsweise wiederum äquivalent (siehe dazu auch 1.3.2. Voltasche Säule). Werden also die Elektroden mithilfe der Hub-/Absenkvorrichtung in das Säuregemisch getaucht, beginnt sich zwischen den Elektroden und dem Säuregemisch ein Konzentrationsgefälle (verursacht durch den Übergang von Metallionen in die Säure) zu bilden. Die Konzentrationsgefälle sind in den zwei Elektroden unterschiedlich stark, wodurch ein Potentialunterschied in Form einer elektrischen Spannung entsteht. Werden die beiden Elektroden nun leitend miteinander verbunden, fließen Elektronen von der Zinkanode zur Kohlekathode⁴⁰.

⁴⁰ (Demtröder, 2009, S. 72 f)

1.3.4. Funkeninduktor (= Induktorium/Ruhmkorff)

❖ *Beschreibung:*

Ruhmkorff brachte mit der Erfindung des Funkeninduktors einen entscheidenden Sprung in die Gasentladungsforschung⁴¹. Seit jeher gab es Probleme, eine geeignete Spannungsquelle zu finden, um die Röhren zu betreiben. Um eine ordentliche Funktion der Gasröhren zu gewährleisten sind Spannungen von einigen tausend Volt notwendig. Diese konnten zwar mit Influenzmaschinen und Leydener Flaschen durchaus erreicht werden, jedoch nur für eine sehr kurze Zeitspanne, was es sehr schwierig machte, genaue Beobachtungen anstellen zu können.⁴² Natürlich war auch damals schon die Möglichkeit gegeben, anstatt dessen Batterien zu verwenden, die Spannungen über einen passablen Zeitraum hinweg halten können. Jedoch tauchten bei dieser Variante die Schwierigkeiten im finanziellen Bereich auf, da Modelle, die eben Spannungen über tausend Volt lieferten, mit extrem hohen Kosten verbunden waren. Somit betrat Ruhmkorff mit seinem Spulen-Induktorium eine Marktlücke, da diese die Vorteile, nämlich sowohl adäquate Spannungen von mehreren 100 kV⁴³ über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten zu können, als auch für den Ottonormalverbraucher leistbar zu sein, vereinte.

So kam es dazu, dass Röhren meist schon in Kombination mit einem Ruhmkorff und einem Chromsäureelement geliefert wurden. Als ganzes Set (wie man es auch in der Vorlesung zu sehen bekam) wurden diese als Spiel- und Baukästen auch in diversen Läden angeboten. Somit fanden die Röhren schnell auch in der Gesellschaft außerhalb der Physikkabinette Anklang und standen des Öfteren in den Wohnzimmern wohlhabender Familien.

❖ *Aufbau:*

Das Ruhmkorffsche Induktorium ist im Prinzip ein Hochspannungstransformator. Dieser besteht aus einer Primärspule, einer Sekundärspule und einem Kern (meistens aus Eisen). Herzstück ist der Unterbrecher, in diesem Falle ein Wagnerscher Hammer, um einen Wechselstrom zu erzeugen, da sich ein Gleichstrom nicht hochtransformieren lassen würde. Ein Kondensator, die Funkenstrecke mit Elektroden und für den Betrieb eine Gleichstromquelle (in früheren Zeiten des Öfteren ein Chromsäureelement) sind ebenfalls wichtige Bestandteile.

⁴¹ Vgl.: (Falk Müller, 2006)

⁴² Vgl.: (Müller, 2004, S. 12)

⁴³ Vgl.: (Spektrum Akademischer Verlag, 2016)



Abbildung 3: Funkeninduktor mit eingespannter Gasentladungsröhre
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page8.html>)

❖ **Funktion:**

Durch die Gleichstromquelle fließt Strom über die Primärspule, welche ein Magnetfeld erzeugt und die Kondensatoren auflädt. Dieses Magnetfeld wird durch den Eisenkern verstärkt, wodurch der Kopf des Wagnerschen Hammers angezogen wird. Damit ist der Stromkreis unterbrochen, das Magnetfeld bricht zusammen und der Kopf schellt zurück. Der Stromkreis schließt sich erneut und der Vorgang beginnt von neuem. Durch die Gleichstromimpulse, welche durch diese periodischen Unterbrechungen stoßweise erzeugt werden, wechselt das Magnetfeld im Eisenkern, was wiederum in der Sekundärspule eine Wechselspannung induziert. Diese kann, abhängig von den Wicklungen der Spulen, einige hunderttausend Volt betragen⁴⁴.

⁴⁴ Vgl.: (Spektrum Akademischer Verlag, 2016)

1.3.5. Influenzmaschine

❖ *Beschreibung:*

Die Influenzmaschinen gehören neben dem Van de Graaff Generator und dem Tesla-Transformator zu den bekanntesten und vor allem in der Physiklehre zu den am häufigsten gezeigten Geräten der Hochspannungserzeugung⁴⁵. Sie erzeugen mit Hilfe mechanischer Energie eine elektrische Spannung. Influenzmaschinen basieren, wie der Name schon vermuten lässt, auf dem Prinzip der Influenz, also der Trennung von frei beweglichen Ladungen in leitenden Stoffen (wie beispielsweise Metalle) unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Dabei gibt es eine breite Anzahl an Apparaturen die sich diesen Effekt zu Nutze machen, wodurch der Begriff Influenzmaschine etwas unscharf wird. Das Gerät, das meistens mit dem Namen Influenzmaschine in Verbindung gebracht wird, ist die Wimshurst Maschine, wie sie auch in der Vorlesung gezeigt wurde. Entworfen wurde diese Art der Influenzmaschinen 1883 von James Wimshurst in England. Ähnliche Erfindungen wie die von Wimshurst wurden bereits 1869 von Poggendorff konstruiert⁴⁶. Generell können mit Influenzmaschinen hohe Spannungen (mehrere 100 kV) mit nur geringen Stromstärken erzeugt werden.

❖ *Aufbau*

Grundelemente der Wimshurstmaschine bilden zwei gegenläufige, aus isolierendem Material bestehende Scheiben, auf denen sich Metallstreifen befinden. Diese sind kreisförmig und in regelmäßigen Abständen voneinander entfernt angeordnet. Auf den einzelnen Seiten ist jeweils ein Neutralisator montiert, der die gegenüberliegenden Metallstreifensegmente durch Abnehmer leitend verbindet. Zwei weitere Abnehmer, die an den Seiten angebracht sind, greifen jeweils die positiven bzw. die negativen Ladungen von den Metallstreifen ab und führen zu den Induktoren. Zwischen den Induktorkugeln befindet sich die Funkenstrecke, wo sich, bei Betrieb, die Induktoren elektrisch entladen. Zusätzlich werden diese des Öfteren mit Kondensatoren (z.B. Leydener Flaschen, etc.), verbunden, durch welche die Potentialdifferenz zusätzlich erhöht werden kann. Zum Betrieb ist entweder ein Motor oder eine Handkurbel notwendig, um die Scheiben in Rotation zu versetzen.

⁴⁵ Vgl.: (Weisstein, 2016)

⁴⁶ Vgl.: (Queiroz, 2016, S. Wimshurst)

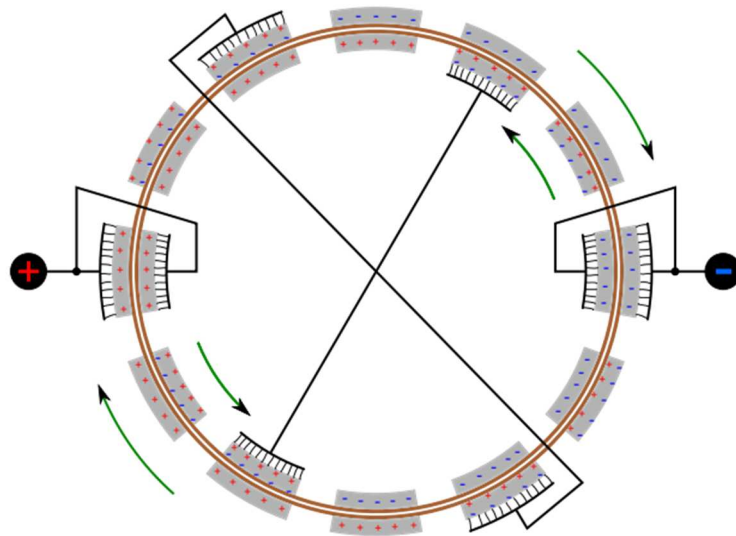


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Influenzmaschine

© Bergmann, L., Schaefer C. (1999). Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2. Elektromagnetismus und Optik. Berlin: De Gruyter S.28

❖ **Funktion**

Um eine Funktion überhaupt zu gewährleisten, ist eine Grundladung auf zumindest einen der Metallstreifen nötig. Meistens ist diese schon vorher vorhanden, kann aber auch mithilfe von Ladungstrennung durch Reibung (z.B. mit einem Baumwolltuch) geschaffen werden.

Werden die Scheiben beim Einschalten des Motors bzw. dem Ankurbeln in Rotation versetzt beginnt der Betrieb. Das Funktionsprinzip basiert dabei auf dem Effekt der Influenz. Dadurch erfolgt eine permanente Ladungstrennung auf den Metallblättchen, wobei, wie bei einer Metallplatte in einem Plattenkondensator, eine Seite des Plättchens positiv, die andere negativ geladen ist. Die Gesamtladung ist aber immer noch neutral. Erreichen nun diese Metallblättchen anschließend einen Neutralisator (pro Scheibe einer), kommt es dazu, dass die Außenseiten von zwei gegenüberliegenden Plättchen leitend miteinander verbunden werden. Dies führt zu einem Ladungsausgleich der Außenseiten, die nun neutral geladen sind. Die Gesamtladung der einzelnen Metallplättchen entspricht nun der Ladung der jeweiligen Innenseite. Diese Ladungen werden anschließend von den Bürsten der Induktoren abgegriffen. Der eben beschriebene Verlauf wiederholt sich immer wieder, wodurch die Kondensatoren und die damit verbundenen Induktoren zunehmend aufgeladen werden. Ist die Spannung schließlich groß genug, erfolgt ein Funkenüberschlag über die Funkenstrecke. Die Induktoren werden dadurch entladen und der Vorgang beginnt erneut^{47,48}.

⁴⁷ Vgl.: (chemgapedia.de, 2016, S. Influenzmaschine)

⁴⁸ Vgl.: (Queiroz, 2016, S. Operation of the Wimshurst machine)

1.3.6. Tesla-Transformator

❖ **Beschreibung:**

Der Tesla-Transformator ist nach seinem Erfinder Nicola Tesla (1856-1943) benannt. Wie die Influenzmaschine und der Bandgenerator ist auch der Tesla-Transformator eines der bekanntesten und meist verwendeten Geräte, welches in der Lehre als Vorzeigeobjekt zum Erzeugen von Hochspannung verwendet wird. Daher wurde er natürlicherweise auch in der Vorlesung gezeigt.

Waren die von Tesla entwickelten Transformatoren auch schon im 19. Jahrhundert ein eindrucksvolles Showobjekt, wurden sie ebenso zu Versuchen mit den Gasentladungsröhren verwendet. Das stellte auch Rudolf Bock bei seinen Recherchen fest und schrieb es in seinem Werk „Elektrische Entladungen in Gasen bei vermindertem Druck“ nieder: „*GEISSLERsche Röhren können [...] auch durch TESLA-Ströme zum Leuchten angeregt werden [...]. Das geschieht auch, wenn nur eine Elektrode mit einem Pol des TESLA-Transformators verbunden und die andere geerdet ist. Das Erscheinungsbild des Leuchtens weicht aber völlig vom üblichen Verhalten ab:*“⁴⁹ (siehe dazu auch 1.1. Gasentladungsphysik)

Teslas Transformator ist ein sogenannter „Resonanztransformator“ und dient der Erzeugung einer hochfrequenten Wechselspannung⁵⁰. Dabei sind bei großen Anlagen Spannungen bis zu 100 kV und einer Frequenz von 500 kHz möglich.

❖ **Aufbau:**

Im Grundaufbau besteht der Tesla-Transformator aus zwei Schwingkreisen. Der Primärschwingkreis besteht aus einer Primärspule (mit einer geringen Anzahl an Windungen), einem Kondensator und einer Funkenstrecke. Leitet die Funkenstrecke, ist der Primärschwingkreis geschlossen. Gespeist wird der Primärschwingkreis von einem Hochspannungstransformator. Sekundärspule (mit einer hohen Windungszahl - meist mehrere hundert bis zu zweitausend) und ein metallischer Torus sind die Bauteile des Sekundärschwingkreises. Die Spulen der beiden Schwingkreise sind dabei so angeordnet, dass die Primärspule die Sekundärspule umschließt, jedoch nicht berührt. Die Sekundärspule ist an der Unterseite geerdet⁵¹. Ein wichtiges Detail, welches die Funktion erst ermöglicht, ist, dass die beiden Schwingkreise zumindest einen gleichen und hohen Eigenfrequenzbereich besitzen.

⁴⁹ (Bock, 2008, S. 373)

⁵⁰ Vgl.: (leifiphysik.de, 2016)

⁵¹ Vgl.: (Norbert Großberger, 2016)

❖ **Funktion:**

Der Primärkreis wird durch Einschalten des Hochspannungstransformators angeregt. Dabei beginnt sich vorerst der Kondensator aufzuladen, solange bis die Durchbruchspannung der Funkenstrecke erreicht ist und zum Überschlag des Funkens führt. Der Funke führt dabei zum Schließen des primären Schwingkreises (Kondensator und Primärspule), welcher in seiner Resonanzfrequenz zu schwingen beginnt. Da der Widerstand des Funkens bei derartig hohen Spannungen vernachlässigbar ist, lädt sich der Kondensator nicht erneut auf, solange die Funkenentladung stattfindet. Erst wenn der Funke abreißt, beginnt eine Neuaufladung des Kondensators und die Vorgänge wiederholen sich.

Die Sekundärspule wird durch die induktive Kopplung zum Primärkreis (wobei Eigenresonanzfrequenz der Sekundärspule mit der Resonanzfrequenz des Primärkreises übereinstimmen) angeregt. Dadurch werden in der Sekundärspule magnetische Wechselfelder mit einer hohen Frequenz erzeugt, was zusätzlich eine induktiv erzeugte, hochfrequente Wechselfeldspannung hervorruft. Diese wird durch die Selbstinduktion der Sekundärspule noch verstärkt. Da das untere Ende der Sekundärspule geerdet ist, liegt am anderen Ende eine hochfrequente Hochspannung vor^{52,53}.

1.3.7. Bandgenerator

❖ **Beschreibung:**

Bandgeneratoren sind elektrostatische Generatoren, die eine hohe elektrische Gleichspannung erzeugen. Der wohl bekannteste ist der Van de Graaff Generator, der nach seinem Erfinder, dem amerikanischen Physiker Robert Van de Graaff benannt wurde, welcher sich ab 1929 mit der Entwicklung von Generatoren dieser Art beschäftigte⁵⁴.

Übliche Bandgeneratoren liefern relativ hohe Spannungen von bis zu 100 kV (moderne Generatoren sogar über 10 MV), wobei die Ströme von ca. 1 mA nur sehr klein und damit ungefährlich sind⁵⁵. Aufgrund dieser Sicherheit und des anschaulichen und einfachen Aufbaus werden diese auch gerne in der Lehre als Vorzeigeobjekte für Hochspannungsgeneratoren genutzt.

⁵² Vgl.: (Rößler, 2016, S. 11)

⁵³ Vgl.: (Kind, 1978, S. 6 ff)

⁵⁴ Vgl.: (wikipedia.org, 2016)

⁵⁵ Vgl.: (Kind, 1978, S. 23 f)

Die hohen Spannungen machen einen Betrieb von Gasentladungsröhren möglich. Nachteilig dabei ist aber, wie auch bei der Leydener Flasche, die rasche Entladung, was eine genaue Beobachtung der Effekte in den Röhren sehr schwierig macht.

❖ **Aufbau:**

Der Aufbau eines Van de Graaff Generators ist im Prinzip simpel und beschränkt sich auf relativ wenige Bauteile. Die Basis bildet eine Ladungsquelle. Diese kann beispielsweise aus Rollen bestehen, mittels derer eine Ladungstrennung durch Reibung erfolgt. Ein weiteres wichtiges Bauteil ist ein isolierendes Band, beispielsweise aus Gummi, welches von der Ladungsquelle zum Kopf der Apparatur führt und über einen Motor (oder auch manuell) angetrieben wird. Am oberen Ende befindet sich der sogenannte Kamm, welcher oft aus (leitenden) metallischen Bürsten gebildet wird. Dieser ist leitend mit dem Kopf verbunden, für den meistens eine Hohlkugel aus Metall verwendet wird.

❖ **Funktion:**

Mithilfe der Ladungsquelle werden elektrische Ladungen auf das Band aufgebracht. Diese „Beladung“ erfolgt bei neueren Modellen meistens durch eine sehr stark inhomogene Elektrodenanordnung, bei der die von der Spitzenelektrode zur Gegenelektrode wandernden Ladungsträger vom Band abgefangen werden. Eine andere Variante stellt die oben beschriebene Aufladung durch Reibungselektrizität dar⁵⁶.

Durch die isolierende Eigenschaft des Bandes, bleiben die Ladungsträger sozusagen an Ort und Stelle auf dem Band „haften“. Somit können diese beim Antreiben des Bandes, zum Kopf des Apparats transportiert werden. Im oberen Bereich angekommen werden die Ladungen über den Kamm vom Band abgenommen. Von dort aus fließen sie weiter zum Kopfteil, welcher sich bei laufendem Betrieb mit der Zeit immer stärker auflädt. Dadurch entsteht eine elektrische Spannung, die solange erhalten bleibt, bis der metallische Kopf „von Hand“ entladen wird, oder sich dieser aufgrund des zu hoch werdenden Potentialunterschiedes zwischen Hohlkugeloberfläche und Luft, durch eine Funkenentladung entlädt.

⁵⁶ Vgl.: (Kind, 1978, S. 22)

1.3.8. HV – Netzgeräte

❖ **Beschreibung:**

HV- Netzgeräte (HV für „High-Voltage“) sind moderne Apparaturen, für die Erzeugung von Hochspannung. Diese wandeln durch verschiedenste Schaltungen, Transformatoren, etc. die vom allgemeinen Stromnetz bereitgestellte elektrische Spannung in eine für den Endverbraucher brauchbare elektrische Spannung um. Im Falle eines HV- Netzgerätes, wird die elektrische Spannung vom Netz auf eine Hochspannung transformiert. In Laborgeräten können Eingangsfrequenz und -spannung in beliebige Ausgangsfrequenzen und -spannungen geformt werden, was vor allem in der Wissenschaft von großer Bedeutung ist.

Da (wie bereits erwähnt) solche Hochspannungsnetzgeräte sowohl den Vorteil bringen, diese direkt an das bestehende Stromnetz anschließen zu können, aber auch die Spannungen sowohl in ihrer Höhe und in ihrer Frequenz kontrolliert regeln zu können, werden diese heute ebenfalls für den Betrieb von Gasentladungsröhren bevorzugt verwendet. Aufgrund des hohen Innenwiderstands in den Geräten kann jedoch mit nur relativ kleinen Strömen gearbeitet werden, was für den Betrieb der Röhren jedoch keine wirklichen Einschränkungen darstellt, da bei Glimmentladungen ohnehin die elektrische Spannung die ausschlaggebende Größe darstellt und sich die Stromstärke in einem vergleichsweise niedrigen Bereich befindet.

❖ **Aufbau:**

Der Aufbau der Netzgeräte, hängt vorwiegend von dem jeweiligen Verwendungszweck ab. Grundsätzlich gehören zu den zentralen Bauteilen Transformatoren in unterschiedlichsten Ausführungen.

❖ **Funktion:**

Die grundlegende Funktion von HV-Netzgeräten besteht darin, die aus dem regulären Netz stammenden vergleichsweise niedrigen Spannungen auf hohe Spannungen zu transformieren.

1.3.9. Mikrowelle

❖ **Beschreibung:**

Obwohl die Mikrowelle eigentlich kein übliches Gerät ist, um eine Gasentladungsröhre zu betreiben. Nachdem sie auch in der Vorlesung gezeigt wurde, soll sie auch hier als etwas unkonventionelles Mittel für das Betreiben der Röhren darstellen.

Wenn von Mikrowellen gesprochen wird, ist im Volksmund meistens der Mikrowellenherd gemeint. In der Physik versteht man unter Mikrowellen jedoch einen Teil des elektromagnetischen Spektrums, welcher einen Wellenlängenbereich von ca. 10^{-3} Meter bis ca. 10^{-1} Meter abdeckt⁵⁷.

Es ist anzumerken, dass nicht jede Gasentladungsröhre mit einer Mikrowelle zum Leuchten gebracht werden kann. Dabei kommt es vorwiegend auf das Absorptionsspektrum des Gases an, welches sich in der Röhre befindet.

❖ **Aufbau:**

Kernstück eines Mikrowellenherds ist das Magnetron, welches Mikrowellen erzeugt, die mithilfe eines Hohlleiters in den Garraum geleitet werden. Dieser ist metallisch ausgekleidet, um die Umgebung außerhalb des Geräts von den Mikrowellen abzuschirmen (Vgl.: Faradayscher Käfig). Für den Betrieb des Magnetrons ist eine hohe Spannung (bis 5 kV) nötig, welche von einem Hochspannungstransformator geliefert wird. Die Kühlung des Magnetrons erfolgt mittels eines Ventilators⁵⁸.

❖ **Funktion:**

Wird der Mikrowellenherd eingeschaltet, erzeugt das Magnetron elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich. Ein Teil davon wird auf die sich in der Garraum befindende Gasentladungsröhre gelenkt, wodurch auf die dipolaren Moleküle im Gas ein Drehmoment ausgeübt wird. Diese werden damit in Rotation versetzt.

Durch die Reibung der rotierenden Gasmoleküle an den Nachbarmolekülen erhöht sich auch die Temperatur des Gases und somit gleichzeitig die innere Energie. Ist die von außen (in Form von Mikrowellenstrahlung) zugeführte Energie groß genug, führt das zu einer Emission von Licht durch die Gasmoleküle⁵⁹. Bei längerem Betrieb beginnen die sich im Mikrowellenherd befindenden Glühlampen, zu zerspringen. Grund dafür ist der zunehmende Druck, der durch die Temperaturerhöhung der Gasmoleküle verursacht wird.

⁵⁷ Vgl.: (Charles E. Mortimer, 2010; S. 61)

⁵⁸ Vgl.: (Budihardja, 2016; S. 10)

⁵⁹ Vgl.: (Rathje, 2016)

2. Historischer Überblick

2.0. Kapitelübersicht

Dieses Kapitel befasst sich mit dem geschichtlichen Verlauf der Gasentladungsforschung des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts. Dabei soll ein grober Überblick, einerseits über die einzelnen Stufen der Erkenntnisse, aber auch zum Teil über die Interaktion der einzelnen Wissenschaftler untereinander gegeben werden.

Natürlich gab es zu dieser Zeit bereits erheblich mehr Forscher, die Arbeiten zu diesem physikalischen Bereich anstellten. Aufgrund der Fülle und den gesetzten Schwerpunkten wird dabei nur ein kleiner Auszug an Personen wiedergegeben, die, subjektiv betrachtet, durch ihre Publikationen und Werke, für diese Diplomarbeit relevant sind. Die genaue Historie kann den Werken, auf die im Literaturverzeichnis verwiesen wird (siehe dazu auch 5. Literaturverzeichnis), entnommen werden.

Die Reihung der anschließend genannten Autoren und Wissenschaftler folgt dabei nicht zwingend ihrer Lebenszeit, sondern mehr den gemachten Entdeckungen. Grund dafür ist, dass zum Teil parallel von mehreren Personen gleiche Phänomene untersucht und publiziert wurden. Beispiel dafür sind die gleichzeitig laufenden Forschungen in England und Deutschland.

2.1. Die Anfänge

Die sich eröffnenden technischen Möglichkeiten, welche die Entdeckung und Anwendung der Elektrizität mit sich brachte, forcierte zunehmend die Forschung auf diesem Gebiet. Dazu gehörte es auch, fundamentale Fragen, wie beispielsweise die Natur der Teilchen, Moleküle und Ladung, als auch die des elektrischen Stromes zu klären. Dabei boten sich unter anderem Versuche zu elektrischen Entladungen in Gasen an. Um zu klären, ob der elektrische Strom an Teilchen gebunden ist, war es naheliegend, Experimente zu entwickeln, welche darauf abzielten, festzustellen, ob eine elektrische Entladung auch ohne Teilchen, also im Vakuum, erfolgen kann. Versuchsapparaturen, welche zur Klärung dieser Frage erstellt wurden, waren mit Elektroden versehene Glaskolben, die möglichst gut evakuiert wurden – die Gasentladungsröhren. Beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden zeigten sich bis dahin völlig unbekannte Phänomene. Ein neues Forschungsfeld war geboren.

Mit der Zeit tauchten dabei zunehmend Probleme in der Experimentiertechnik auf. Das wohl anfangs größte dabei war das Vakuumproblem: Schon zu Beginn stellte sich die Frage, ob es überhaupt einen „leeren Raum“ geben kann, was aber durch die Versuche von Torricelli und Otto von Guericke schließlich doch bewiesen werden konnte⁶⁰. Ein Nebenprodukt von Guericques Arbeiten war eine Kolbenpumpe, welche er zum Abpumpen der Luft entwickelte und damit ein Vakuum erzeugen konnte. Dieses stellte sich aber für die Experimente mit den elektrischen Entladungen bei vermindertem Druck bald als unzureichend heraus. Das Problem konnte (zum Teil) erst durch Johann Heinrich Geißler (siehe dazu auch 2.3. Johann Heinrich Geißler) und seinem „Geißleraspirator“ behoben werden.

Die Versuche, die in den Anfängen zu diesem neuen Zweig der Gasentladungsphysik gemacht wurden, beschäftigten sich hauptsächlich mit der Wirkung von Magnetfeldern auf die Leuchterscheinungen in den Röhren, dem Spannungs- und Temperaturverlauf in den Röhren, sowie physiologischen Effekten und Spektraluntersuchungen des Röhrenlichtes. Natürlich wurden im Laufe der Zeit und mit Zunahme neuer Erkenntnisse die Untersuchungen präzisiert und ausgeweitet, was auch im Zuge des Kapitels noch verdeutlicht werden wird.

⁶⁰ Vgl.: (Bock, 2008, S. 10)

2.2. Michael Faraday

Der englische Naturforscher Michael Faraday (1791-1867)⁶¹ befasste sich um 1834 - 1838 im Zuge seiner Forschungsarbeiten zur Elektrizität ebenfalls mit dem Durchgang von Strom durch verdünnte Luft.⁶² Damit kann er ohne Zweifel zu den Pionieren der Gasentladungsforschung gezählt werden.

Eine fundamentale Beobachtung, die er erstmals beschrieb, ist der nach ihm benannte Faradaysche Dunkelraum:

„...Zwei Messingstäbe waren von den gegenüberliegenden Seiten her in eine Glaskugel eingelassen und mit ihren Enden in Berührung gebracht; auch war die Luft stark verdünnt. Nun wurde eine elektrische Entladung aus der Maschine durch sie hindurchgeleitet, und während diese fortfuhr, wurden die Enden voneinander getrennt. Im Moment der Trennung erschien auf dem Ende des negativen Stabes ein andauerndes Glimmen, während das positive Ende ganz dunkel blieb. Bei der Vergrößerung der Entfernung erschien ein purpurfarbiger Streifen auf dem Ende des positiven Stabes und schritt auswärts direkt auf den negativen Stab zu; er verlängerte sich bei der Vergrößerung des Zwischenraumes, vereinigte sich aber niemals mit dem negativen Glimmen, indem immer ein kurzer dunkler Raum dazwischen blieb.“⁶³

Darauf folgte eine (vorläufige) grobe Einteilung in drei Hauptzonen, welche die Leuchterscheinungen in Gasentladungsröhren aufweisen, nämlich in „Kathodenlicht“, „Faradayschen Dunkelraum“ und „Positives Licht“.

Ebenfalls zog er den Schluss, dass die elektrische Entladung über die dunklen Stellen des Raums erfolgen muss, woraus sich ergibt, dass stark verdünnte Luft, auch ohne Leuchterscheinungen, einen elektrischen Strom leiten kann.⁶⁴

Mit seinem Elektrolysegesetz konnten ebenfalls bedeutende Erkenntnisse abgeleitet werden. Aus diesem ergibt sich, dass es eine kleinste Einheit einer Elektrizitätsmenge geben muss. Damit wurden die ersten Schritte auf dem Weg zur Elementarladung und somit auch zur Bestimmung der Ladungsmenge des Elektrons gemacht.

⁶¹ (wikipedia.org, 2016)

⁶² Vgl.: (Bock, 2008, S.20 f)

⁶³ (Faraday, 2016)

⁶⁴ Vgl.: (Bock, 2008, S.21)

2.3. Johann Heinrich Geißler

Geißler selbst war zwar kein namhafter Physiker oder Forscher, mit seinen außerordentlichen Leistungen in der Herstellung von Gasentladungsröhren leistete er dennoch einen bedeutenden Beitrag in der Gasentladungsforschung, welcher in der Literatur aber oft nur nebensächlich erwähnt wird. Um seinem Werk etwas gerechter zu werden, wird mit dieser Arbeit sein Schaffen etwas intensiver beleuchtet.

Johann Heinrich Geißler war ein aus Thüringen stammender Glasbläser und Instrumentenmacher. Anfang der 1850er-Jahre⁶⁵ ließ er sich in Bonn nieder, wo er auch jenen Mann kennenlernte, dem er zu fundamentalen Ergebnissen in den Anfängen der Gasentladungsforschung verhelfen sollte – Julius Plücker (siehe dazu auch 2.4. Julius Plücker).

Bekanntheit schaffte sich Geißler vor allem mit seinen Röhren, welche die Grundlage für eine gezielte Erforschung der Phänomene, die in bei elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen zu Tage kommen, bildeten. Diese fertigte er in allen möglichen Formen mit unterschiedlichsten Füllungen an, zu denen eine breite Palette an Gasen, aber auch fluoreszierende und phosphoreszierende Stoffe und Flüssigkeiten zählen, die bei der Inbetriebnahme in vielen verschiedenen Farben leuchten. So kam es, dass es die Geißlerröhren (wie man sie später auch bezeichnete) von den damaligen wissenschaftlichen Kabinetten, auch in die Wohnzimmer der wohlhabenderen Schichten schafften.

Der Grund für die Popularität der Röhren von Geißler lag dabei in der außerordentlich guten Qualität. Diese erreichte er unter anderem mit einer, speziell für diese Zwecke entwickelten, Quecksilberpumpe, dem sogenannten Geißleraspirator, mit welchem er eine bis zu tausendfach höhere Evakuierung der Röhren erreichte, als mit den Kolbenpumpen, die bis dahin verwendet wurden.

Zusätzlich schaffte Geißler es, die Elektroden direkt im Glas einzuschmelzen, anstatt sie, wie andere Instrumentenmacher es bewerkstelligten, in die Röhren einzukitten. Dadurch wurde die Haltbarkeit der Röhren um ein Vielfaches gesteigert^{66,67}.

Auf diese gläsernen Kunstwerke die aus Geißlers Hand stammen, wurde auch sein späterer Kollege Julius Plücker aufmerksam, welcher sich, wie Geißler, ebenfalls in Bonn niederließ. Dieser merkte in einer 1857 veröffentlichten Publikation an:

„Solche Röhren, welche verschiedenartige Gase und Dämpfe enthalten, werden von Hrn. Geissler hierselbst unter den verschiedenartigsten Formen angefertigt und bieten zum Theil einen unvergleichlich schönen Anblick dar. Geißler'sche Röhren - ich gebe ihnen und gewißs mit Recht, diesen Namen, obgleich die ersten Röhren nicht von ihm

⁶⁵ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 13)

⁶⁶ Vgl.: (Riecke, 1923, S. 142 f)

⁶⁷ Vgl.: (Meyer, 1858)

angefertigt worden sind – wurden schon in den ersten Monaten dieses Jahres auf dem physikalischen Kabinete geprüft, [...]“⁶⁸

Obwohl Plücker als Professor für Mathematik und Geißler als Instrumentenmacher sehr unterschiedliche Arbeitsbereiche hatten, pflegten die beiden eine enge Zusammenarbeit. Geißler wandte sich neben seinem Beruf als Instrumentenmacher und Geschäftsmann hin und wieder auch der Forschung zu. So verbanden ihn und Plücker auch bald einige gemeinsame experimentelle Arbeiten, bei denen Geißler, neben dem Herstellen der benötigten Röhren, ebenfalls diverse Experimente für ihn vorbereitete⁶⁹. Diese Begeisterung für die Wissenschaft führte schließlich zudem, dass dem gelernten Glasbläser auch der Titel eines Dr.phil.h.c. zu Teil wurde⁷⁰. Jedoch bedauerte Geißler, dass seine Arbeiten zu wenig von Plücker gewürdigt worden wären⁷¹.

Ein Problem, welches im Gegensatz zu dem der unzureichend niedrigen Drücken, von Geißler und Plücker noch nicht gelöst worden war, bestand darin, ein geeignetes Gerät zu finden, mit dem die Röhren betrieben werden können. Natürlich gab es Leydener Flaschen, mit denen schon beachtlich hohe Spannungen erreicht werden konnten (siehe dazu auch 1.3.1. Leydener Flasche), jedoch war aufgrund der raschen Entladung, für Beobachtungen nur ein relativ kurzer Zeitraum vorhanden. Im Gegensatz diesen ersten Kondensatoren standen wiederum die Vorgänger der heutigen Batterien, wie die Voltasche Säule (siehe dazu auch 1.3.2. Voltasche Säule) und Chromsäureelemente (siehe dazu auch 1.3.3. Chromsäureelement) es waren. Mit diesen war man zwar in der Lage, über lange Zeit eine Spannung aufrecht zu erhalten, jedoch in einem zu geringen Größenbereich, um eine Entladung in den Röhren hervorzurufen. Um einen Betrieb gewährleisten zu können, mussten daher zahlreiche Einzelelemente in Serie geschaltet werden, was die Verwendung für diese Zwecke sehr kostenintensiv machte. Die Schwierigkeit bestand also darin, eine Spannungsquelle zu finden, die außerordentlich hohe Spannungen erzeugt, diese über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann und dabei noch möglichst kostengünstig in der Anschaffung und im Betrieb ist.

Eine Lösung für dieses Problem lieferte Heinrich Daniel Ruhmkorff mit der Entwicklung einer speziellen Apparatur – dem Funkeninduktor (auch „Ruhmkorff“ oder „Induktorium“ genannt) (siehe dazu auch 1.3.4. Funkeninduktor)⁷². So kam es, dass diese Maschine in der Gasentladungsforschung mit Röhren bald zum Standardequipment gehörte und es nicht verwunderlich ist, dass auch Röntgen bei seinen Versuchen einen solchen Apparat verwendete⁷³.

⁶⁸ Vgl.: (Plücker, 1857, S. 88)

⁶⁹ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 15)

⁷⁰ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 30)

⁷¹ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 15)

⁷² Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 13 f)

⁷³ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 30)

Zurück zu Geißler: Seine Geißlerröhren wurden im Laufe der Zeit so bekannt, dass von diesen auch bald auf der Britischen Halbinsel die Rede war. So schrieb beispielsweise der Physiker Faraday in einem seiner Tagebücher über die Arbeiten mit den „Bonn tubes“. Diese erhielt er wahrscheinlich über Plücker, der einige der Geißlerröhren zu einem Treffen der *British Association for the Advancement of Science* in die Stadt London mitbrachte⁷⁴.

Somit hatte bald ein großer Teil der Forscher, die sich näher mit den elektrischen Gasentladungen beschäftigten, eine von Geißler angefertigte Röhre. Ein neues Problem, das jedoch bald auftauchte, kam dadurch zu Stande, dass die neuen mitgelieferten Quecksilberpumpen zum Evakuieren der Röhren sehr empfindlich waren und allzu oft den Transport nicht überlebten. Aus diesem Grund schickte Geißler oft nur noch fertig evakuierte und zugeschmolzene Röhren zu seinen forschenden Kunden. Diese konnten zwar weiterhin ihre Experimente mit Magneten, Drehspiegel etc. durchführen, jedoch war meistens nicht mehr bekannt, welches Gas sich im Inneren ihrer Instrumente befand⁷⁵, was natürlich ein Defizit für eine gute wissenschaftliche Praxis darstellte.

⁷⁴ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 22 f)

⁷⁵ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 23 f)

2.4. Julius Plücker

Julius Plücker (1801-1868) war, wie auch Geißler (siehe dazu auch 2.3. Johann Heinrich Geißler), an der Universität in Bonn beschäftigt. Vorerst war er als Professor in Mathematik tätig, leitete aber schließlich von 1847- 1868 auch den Bereich für Physik⁷⁶.

Obwohl seine Forschungen und Arbeiten in Deutschland anfangs wenig Beachtung fanden, stießen dieselben in Frankreich und Großbritannien auf großen Anklang, wo er sogar 1866 mit einer von der Royal Society verliehenen Auszeichnung geehrt wurde. So war es nicht wirklich verwunderlich, dass Plücker sehr viel im Ausland unterwegs war, um dort seine Forschungen zu präsentieren und sich mit Kollegen auszutauschen.

Besonders hervorzuheben ist die große Bandbreite an Experimenten, die Plücker anstellte. Sein Hauptinteresse lag dabei auf der Einwirkung von Magnetfeldern auf die Leuchterscheinungen, sowie den Spektren der Gase in den Röhren⁷⁷. Einen Vorteil gegenüber seinen Forschungskollegen hatte Plücker durch die enge Zusammenarbeit mit Geißler, der ihm nicht nur die benötigten Versuchsröhren herstellte, sondern zum Teil auch die Experimente vorbereitete.

Anfangs führte Plücker Arbeiten über die Leitfähigkeit des Vakuums an, wobei er den Schluss zieht, dass absolutes Vakuum, nicht elektrisch leitend sein kann⁷⁸. Die Entstehung der Leuchterscheinungen erklärt er sich mit der Erhitzung des Gases, welches dadurch Licht emittiert⁷⁹. An denselben führte er mit seinem Schüler Johann Wilhelm Hittorf (siehe dazu auch 2.5. Johann Wilhelm Hittorf) verschiedene Spektraluntersuchungen durch, wobei ihnen dabei eine der bedeutendsten Entdeckungen auf diesem Gebiet gelang, nämlich, dass eine Substanz zwei völlig unterschiedliche Spektren erzeugen kann⁸⁰.

Zur Einwirkung von Magneten auf die Leuchterscheinungen führte er zahlreiche Versuche durch. Bei der positiven Säule stellte er fest, dass die Leuchterscheinungen, abhängig von der Polung des Magneten und der Richtung des Stromes, angezogen bzw. abgestoßen werden. Weiters untersuchte er die Schichtungen und den Einfluss des Magnetfeldes auf diese.

Den Faradayschen Dunkelraum versucht Plücker, gleich wie die Schichtung der positiven Säule, nämlich mit unterschiedlichen Dichten des Gases in der Röhre, zu erklären.

Bei genaueren Studien des Lichtes, welches von der negativen Elektrode ausgeht, stellte er fest, dass sich bei der Einwirkung eines Magnetfeldes völlig andere Effekte

⁷⁶ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 30)

⁷⁷ Vgl.: (Bock, 2008, S. 78 f)

⁷⁸ Vgl.: (Bock, 2008, S. 78)

⁷⁹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 82)

⁸⁰ Vgl.: (Bock, 2008, S. 82)

zeigen⁸¹.

Aus seinem daraus gezogenen Schluss, „dass „elektrisches Licht“ magnetisch ist“⁸², lässt sich seine Vorstellung bezüglich der Natur der Vorgänge in der Röhre erahnen.

Plücker weist auch erstmals auf das „grüne Licht“ hin, welches bei starker Evakuierung an der Glaswand auftaucht, geht aber nicht wirklich näher auf die Erscheinung ein⁸³. Sein Schüler Hittorf wird nur wenig später, mithilfe einer ähnlich gemachten Beobachtung, erste genauere Untersuchungen zu diesem anstellen und damit eine bahnbrechende Erkenntnis veröffentlichen.

⁸¹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 92)

⁸² (Bock, 2008, S. 94)

⁸³ Vgl.: (Plücker, 1857, S. 101)

2.5. Johann Wilhelm Hittorf

Hittorf war ein Schüler Plückers, womit auch sein Zugang zur Forschung der Entladungen in verdünnten Gasen geklärt ist. Nach dem Tod seines Lehrers führte er die Versuche und Arbeiten in diesem Bereich weiter fort, wobei er auch besonderes Interesse für die Elektrizitätsleitung in den Röhren zeigte.

Herausragend waren unter anderem Hittorfs Messungen zum Spannungsverlauf in den Röhren. Diese Untersuchungen stellte er an, indem er in definierten Abständen zusätzliche Elektroden in die Röhren einbrachte.

Eine weitere Errungenschaft Hittorfs, welche die Gasentladungsforschung in seiner Zeit besonders prägen sollte, war die Entdeckung der Elektronenstrahlen (welche Hittorf selbst als „*Glimmlicht*“ bezeichnete⁸⁴). Diese besondere Strahlungsart war eine von ihm eher zufällig gemachte Beobachtung, nämlich dem Fluoreszieren des Glases an jener Stelle, die sich gegenüber dem (Hittorf'schen) Glimmlicht an der Kathode befand (siehe dazu auch 3.2.5. Crookes Nr. 7b). Nach weiteren anschließenden Untersuchungen erkannte er schließlich, dass es sich hierbei um eine völlig neue Art von Strahlung handeln musste, welche sich noch in keine der Wissenschaftstheorien seiner Zeit einordnen ließ⁸⁵. (Auf einige Besonderheiten dieser neuen Entdeckung deuteten schon Plückers Untersuchungen hin, wobei aber erst Hittorf diese Beobachtungen zu deuten wusste)

Erschwert wurden die Forschungsarbeiten der neu entdeckten Strahlungsart im Weiteren dadurch, dass sie in den jeweiligen Publikationen anfangs unterschiedlich bezeichnet wurde. Plücker verwendete beispielsweise den Begriff „negatives Licht“, Hittorf sprach, wie bereits erwähnt, vom Glimmlicht oder der „Glimmstrahlung“, Goldstein führte sie als „Kathodenstrahlung“ aus, wobei sich bis heute aber doch der Begriff „Elektronenstrahlen“ durchsetzen konnte.⁸⁶

Im Zuge weiterer Arbeiten auf diesem Gebiet konnte Hittorf manifestieren, dass es sich bei der positiven Säule und dem negativen Glimmlicht um zwei unterschiedliche Arten von Strahlung handeln musste (siehe dazu auch 3.2.3. Crookes Nr. 6, Y Röhre). Dieses schaffte er unter anderem mit Hilfe von gebogenen Röhren, bei denen er die Ausbreitung der jeweiligen Leuchterscheinungen betrachtete und zeigte, dass das „positive Licht“ der Biegung der Röhre folgt und sich der Kathode zuwendet, sich das „negative Licht, geradlinig ausbreitet“⁸⁷.

⁸⁴ Vgl.: (Bock, 2008, S. 124)

⁸⁵ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 31)

⁸⁶ Vgl.: (Bock, 2008, S. 124)

⁸⁷ Vgl.: (Falk Müller, 2006, S. 102)

Hittorf führte zahlreiche Experimente mit dieser noch relativ jungen Entdeckung durch.

Im Folgenden werden von diesen, einige ausgewählte Untersuchungsschwerpunkte und Erkenntnisse überblicksmäßig wiedergegeben:

Bezüglich der Ausdehnung des Glimmlichts untersuchte er den Einfluss des Druckes, der Stromstärke und des Röhrendurchmessers auf diese. Dabei stellte er fest, dass das Glimmlicht sich mit abnehmendem Druck und steigender Stromstärke über den Raum zunehmend ausdehnt.⁸⁸ Diese Beobachtung kann aber lediglich bei Röhren mit relativ großem Durchmesser gemacht werden. In sehr schmalen Gasentladungsröhren konnte Hittorf ein genau gegensätzliches Verhalten feststellen: nämlich eine Verkleinerung der Ausdehnung bei fallendem Druck (siehe dazu auch 3.3.6. Druckabhängigkeit der Gasentladung)⁸⁹.

Weiters konnte Hittorf die geradlinige Ausbreitung der Elektronenstrahlen beweisen. Dies gelang ihm mit gleich drei verschiedenen Experimenten: Einerseits durch die Bildung eines scharf abgegrenzten Schattens, wenn ein genügend undurchlässiger Gegenstand in die Bahn des Elektronenstrahls gestellt wird (siehe dazu auch 3.2.4. Crookes Nr. 9).

Einen zweiten Beweis, welcher die geradlinige Ausbreitung belegt, schaffte er mit einer, schon im Vorfeld erwähnten, Röhre, die rechtwinkelig geknickt war. Damit konnte er zeigen, dass die „negativen Strahlen“ nicht der Krümmung folgten, sondern sich auf einer geraden Bahn bis zum Knick bewegen⁹⁰ (siehe dazu auch 3.2.3. Crookes Nr. 6, Y-Röhre).

Mit dem dazugehörigen dritten Experiment bewies er, mit einer dazu entsprechend aufgebauten Röhre, seine Hypothese, dass die Ausbreitung der Strahlen, unabhängig von der Richtung der positiven Säule, sein muss, wenn sich die Strahlen der Kathode geradlinig fortsetzen.

Untersuchungen zum Einfluss des Röhrendurchmessers auf den Gesamtwiderstand der Röhre und dem negativen Glimmlicht, führte Hittorf zur Entwicklung der „Hittorfschen Umwegröhre“ (siehe dazu auch 3.3.8. Hittorfsche Umwegröhre).

Weitere Arbeiten führte er zum Thema „Abstand der Elektroden“, der „Schichtung des negativen Lichtes“ und „Temperaturen des Glimmlichts und der Kathode“ durch⁹¹.

⁸⁸ Vgl.: (Bock, 2008, S. 126 f)

⁸⁹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 127 f)

⁹⁰ Vgl.: (Bock, 2008, S. 128 f)

⁹¹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 130 ff)

2.6. William Crookes

Obwohl die Veröffentlichungen Plückers und Hittorfs in Deutschland nur wenig Begeisterung fanden, erfuhren dieselben in England großen Anklang. Ausschlaggebend dafür war William Crookes, ein britischer Physiker, Chemiker und Wissenschaftsjournalist, der wahrscheinlich durch seine Rolle als Herausgeber der Zeitschrift „Chemical News“ auf die Abhandlungen der Deutschen stieß.

Crookes war ebenfalls begnadet, was den Bau und die Konstruktion von Glasröhren anging. So entwickelte er eine breite Palette an verschiedensten Objekten, welche gezielt als Lehrmittel und Vorzeigeobjekte für die jeweiligen Gasentladungsphänomene dienen sollten (siehe dazu auch 3.2. Crookes'sche Röhren).

Einige davon präsentierte er auf der 49. Jahresversammlung der britischen Association zur Förderung der Wissenschaften in Sheffield am 22. August 1879⁹². In seinem Vortrag spezialisierte sich Crookes vor allem, wie auch der Titel „Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand“ schon vermuten lässt, auf die von Hittorf entdeckte Elektronenstrahlung (wobei der Begriff in diesem Zusammenhang etwas irreführend ist, da weder Crookes, Hittorf, noch ihren Vorgängern bewusst war, dass es sich hierbei um bewegte Elektronen handelt). Da für Crookes und auch den Rest der Welt die Natur dieser neu gefundenen Strahlungsart noch völlig unbekannt war, bzw. das Publikum seines Vortrags überhaupt zum ersten Mal von dieser „Strahlenden Materie“, wie Crookes selbst sie bezeichnete, erfuhr, waren die Experimente und Untersuchungen mit dieser umso reizvoller, wodurch auch geklärt sein dürfte, weshalb die Resonanz, die dieser Vortrag mit sich zog, so enorm war. Die wichtigsten inhaltlichen Punkte aus dem Vortrag, welche großteils direkt mit Experimenten der von ihm hergestellten Röhren belegt wurden, waren im Folgenden:

„Mittlere freie Weglänge. Strahlende Materie“⁹³

(siehe dazu auch 3.2.7. Crookes Nr. 1, Dunkelraum)

„Strahlende Materie übt eine kräftige phosphorogene Wirkung, wo sie auftritt“⁹⁴

(siehe dazu auch 3.2.2. Crookes Nr. 2, Fluoreszenzglas)

„Strahlende Materie bewegt sich in geraden Linien“⁹⁵

(siehe dazu auch 3.2.3. Crookes Nr. 6, Y-Röhre und 3.2.5. Crookes Nr. 7a und 7b)

⁹² Vgl.: (William Crookes, 1879, S. 1)

⁹³ (William Crookes, 1879, S. 4)

⁹⁴ (William Crookes, 1879, S. 4)

⁹⁵ (William Crookes, 1879, S. 4)

„Strahlende Materie, von einem festen Körper aufgefangen, wirft einen Schatten“⁹⁶

(siehe dazu auch 3.2.4. Crookes Nr. 9, Malteserkreuz)

„Strahlende Materie übt eine kräftige mechanische Wirkung aus, wo sie auftrifft“⁹⁷

„Strahlende Materie wird von einem Magneten abgelenkt“⁹⁸

(siehe dazu auch 3.2.1. Crookes Nr. 14, Kathodenstrahlröhre)

„Strahlende Materie erzeugt Wärme, wenn ihre Bewegung gehemmt wird“⁹⁹

(siehe dazu auch 3.2.6. Crookes Nr. 21, Wärmeentwicklung)

Im Grunde genommen waren die vorgetragenen Inhalte keine Neuheiten, da sie schon von vorigen Kollegen, die auf gleichem und ähnlichem Gebiet forschten, publiziert worden waren. Interessant war aber die Hypothese von Crookes, dass es sich bei den Strahlen um geladene Materieteilchen bzw. um Moleküle handeln musste. Diese Meinung stand im Gegensatz zu den damaligen Ansichten von Plücker, Hittorf und anderen, welche die Strahlen als eine besondere Art von Licht hielten¹⁰⁰.

Wie sehr man diese Annahme von Crookes als wissenschaftlich untermauert sehen kann, ist jedoch nicht ganz klar, da er auch die Teilchennatur des Lichtes mithilfe seiner Lichtmühlen ebenfalls insofern erklären wollte, dass Rotation der Mühlen, von den Stößen der „Lichtteilchen“ verursacht werden würde (was sich jedoch als falsch herausstellte).

Zusammenfassend kann man Crookes die Verbreitung des Wissens über die seinerzeit bekannten (Röhren-)Phänomene in die wissenschaftlichen Kreise Großbritanniens hoch anrechnen. Besondere wissenschaftliche Innovationen von Crookes sind die von ihm erstmals entwickelten Hohlkathoden (ermöglicht eine relativ gute Fokussierung des Elektronenstrahls), die Crookes'schen Lichtmühlen (die auch als Radiometer bekannt wurden und eigentlich von Crookes als Nachweis für die Impulsübertragung der „Lichtteilchen“ gedacht waren), sowie das Spinthariskop (zum Nachweis Ionisierender Strahlen).

⁹⁶ (William Crookes, 1879, S. 4)

⁹⁷ (William Crookes, 1879, S. 4)

⁹⁸ (William Crookes, 1879, S. 4)

⁹⁹ (William Crookes, 1879, S. 4)

¹⁰⁰ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 32)

2.7. Eugen Goldstein und Wilhelm Wien

Obwohl sich Goldstein, aber auch Wien, mit einer breiten Palette der in Gasentladungsröhren auftauchenden Phänomene beschäftigten, wird sich im Folgenden vorwiegend auf die Entdeckung der positiven Strahlen und ihre Untersuchungen zu diesen, konzentriert.

Entdeckt wurden sie ursprünglich von Eugen Goldstein, der die „Goldstein’schen Kanalstrahlen“, wie sie anfangs bezeichnet wurden, 1886, bei seinen Versuchen zur Schichtung des negativen Glimmlichts, beobachten konnte. Dabei wurde ein goldgelbes Leuchten hinter der Kathode sichtbar, welches sich bis ans hintere Ende der Glaswand des Kathodenbereichs zog¹⁰¹. Für genauere Untersuchungen modifizierte er seine Röhren, indem er ein Loch in die Kathode bohrte (siehe dazu auch 3.3.1. Kanalstrahlröhre nach Wien).

Auch Wien führte Experimente mit den positiven Strahlen durch. Dabei wies die leichte Abschirmbarkeit, welche schon durch einen dünnen Streifen Papier erzielt werden konnte, auf eine Teilchennatur der Strahlen hin. Weiters überprüfte er die Einwirkung von Magneten, wobei er, im Gegensatz zu Goldstein, mit relativ starken Magnetfeldern eine geringfügige Ablenkung nachweisen konnte. Aus diesen ließ sich auf die große Masse der Teilchen schließen. Durch weitere Messungen zur Bestimmung des Ladungs-Masse-Verhältnisses stellte Wien selbst schon die These auf, dass es sich bei den „Kanalstrahlen“ (zumindest teilweise) um ionisierte Moleküle des Gases in der Röhre handeln muss¹⁰².

¹⁰¹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 221 f)

¹⁰² Vgl.: (Bock, 2008, S. 423)

2.8. Philipp Lenard

Lenard spezialisierte sich hauptsächlich auf die von Hittorf entdeckten Elektronenstrahlen. Um genauere Untersuchungen durchführen zu können, entwickelte er eigens dafür eine spezielle Röhre, mit der er Experimente mit den Strahlen auch außerhalb von dieser machen konnte. Das gelang ihm mit einem Aufbau, der als sogenannte „Lenardröhre“ bekannt wurde. Die Besonderheit bestand dabei in dem Loch, welches sich gegenüberliegend der Kathode in der Röhre befand und mit einer 0,003 Millimeter dicken Aluminiumfolie verklebt war – das sogenannte „Lenardfenster“¹⁰³. Damit war er der Erste seiner Zeit, der neben den üblichen Versuchen mit den Elektronenstrahlen im Vakuum, Versuche auch in Luft und bei normalem Atmosphärendruck durchführen konnte. Dazu gehörten: Die diffuse Streuung der Strahlen, die Ionisierung der Luft durch diese, die Erregung von Phosphoreszenz und die Durchlässigkeit von Festkörpern und Gasen, um nur ein paar davon aufzuzählen¹⁰⁴.

Zusätzlich führte er weitere Untersuchungen mit den Elektronenstrahlen im Vakuum mit verschiedenen Gasen durch, wie z.B. das Verhalten der Strahlen beim Evakuieren, die Ausbreitung derselben im Vakuum, die Ablenkung durch Magnetfelder bei variierendem Gasdruck und einige mehr. Genauere Betrachtungen des Absorptionsverhaltens verschiedener Materialien ließen ihn darauf schließen, dass die Teilchen der Strahlen eine negative Ladung aufweisen mussten.

Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Wilhelm Conrad Röntgen, (mit dem er ebenfalls durch seine Arbeit mit den von Hittorf entdeckten Strahlen in Verbindung stand) bezog er diese ebenfalls zu seinen Studien und Interpretationen mit ein.

1905 wurde ihm, zusammengefasst für seinen Beitrag an der Erforschung der Elektronenstrahlen, der Nobelpreis überreicht¹⁰⁵.

¹⁰³ Vgl.: (Bock, 2008, S. 350)

¹⁰⁴ Vgl.: (Bock, 2008, S. 351)

¹⁰⁵ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 37)

2.9. Wilhelm Conrad Röntgen

„Lässt man durch eine Hittorf'sche Vacuumröhre, oder einen genügend evacuirten Lenard'schen, Crookes'schen oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines grösseren Ruhmkorff gehen und bedeckt die Rohre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Carton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in die Nähe des Apparates gebrachten, mit Baryumplatincyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoresciren, gleichgültig ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluorescenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar.“¹⁰⁶

So formulierte Wilhelm Konrad Röntgen die Einleitung seiner Publikation mit der er seine sensationelle Entdeckung der Physikwelt mitteilte. Dabei handelte es sich um nichts Geringeres als die „Röntgenstrahlung“ (auch „X-Strahlen“ oder „X-Rays“). Diese Entdeckung gelang ihm im Zuge von Nachprüfungen von Lenards Experimenten mit den Elektronenstrahlen¹⁰⁷. Dabei untersuchte Röntgen, ob die Strahlen auch ohne Fenster die Röhre verlassen können, wobei er einige Änderungen an den ursprünglichen Versuchen Lenards (beispielsweise einen starken Ruhmkorff als Spannungsquelle) vornahm (siehe dazu auch 3.3.13. Röntgenröhre).

Im Zuge genauerer Untersuchungen zu seiner neuen Entdeckung stellte Röntgen fest, dass die Strahlen nicht innerhalb der Röhre, sondern in der Glaswand erzeugt werden.

Weitere Versuche machte er zur Durchdringungsfähigkeit der Strahlen mit verschiedenen Materialien. Dabei konnte diese ein 1000-seitiges, eingebundenes Buch ohne Probleme durchdringen. Im Gegensatz dazu schwächte eine 15 Millimeter dicke Aluminiumplatte die Strahlung beträchtlich ab. Weitere Versuche wurden mit Blei, Holz, bleihaltiger Farbe, etc. durchgeführt, wobei schlussendlich festgehalten wurde, dass das Durchdringungsvermögen mit der Dichte des getesteten Stoffes abnimmt.¹⁰⁸.

Die Schattenbildung weist außerdem, wie auch bei den Elektronenstrahlen, auf eine geradlinige Ausbreitung hin. Unterschiede bestehen zwischen den beiden jedoch nicht nur in ihrer Durchdringungsfähigkeit, sondern auch in der magnetischen Ablenkung, die bei der Röntgenstrahlung nicht gegeben ist.

Durch Experimente mit verschiedenen Röhren stellte Röntgen fest, dass die damit erzeugten Strahlen, Stoffe unterschiedlich gut durchdringen konnten. Dadurch ergab sich eine Differenzierung der Röntgenstrahlen in eine „weichere“ und „härtere“ Strahlung.

¹⁰⁶ (Röntgen, 1898, S. 1)

¹⁰⁷ Vgl.: (Frauenberger, 1988, S. 33)

¹⁰⁸ Vgl.: (Röntgen, 1898, S. 2 f)

Weitere Forschungsergebnisse, die wenig später nach Röntgens Publikation gemacht wurden, sind die Ionisierung von Luft des durchstrahlten Bereiches und die Entstehung von Röntgenstrahlung auch bei anderen Festkörpern, die nicht aus Glas bestehen.¹⁰⁹

Röntgen erhielt 1901 für seine Entdeckung den Nobelpreis. Lenard, welcher Röntgen Röhren zur Verfügung stellte und auch bei den Experimenten beratend wirkte, war über diese Tatsache sehr enttäuscht, da er in keiner der Publikationen erwähnt wurde. Außerdem war er der Meinung, dass er diese Beobachtung ein wenig später auch gemacht hätte.

Die Bedeutung, welche der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Laufe der weiteren Geschichte, bis in unser Jahrzehnt, zuzuschreiben ist, zeigt sich in der breiten Anwendung wieder. Sowohl bei technischen Materialanalysen, als bildgebendes Verfahren in der Medizin, als auch in der Forschung, finden sich die Spuren der Gasentladungsröhren, bis hin zu Röntgens Entdeckung wieder.

¹⁰⁹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 394 f)

2.10. Joseph John Thomson

Joseph John Thomson stellte Versuche zu verschiedenen Bereichen der Gasentladungen bei vermindertem Druck an. Seine Grundhypothesen waren ähnlich den Vorstellungen, wie sie auch Crookes schon hatte, nämlich von elektrisch geladenen Teilchen, welche sich mit einer hohen Geschwindigkeit durch die Röhre bewegen. So begann er seine Arbeiten mit Experimenten, welche Aufschluss über die Art der Stromleitung in den Röhren geben sollten. Dabei versuchte er die Geschwindigkeit der Ausbreitung der Entladung zu bestimmen. Als er dabei auf Werte um $160\,000\text{ km/s}^{110}$ stieß, brachte diese ihn zu dem Schluss, dass die elektrische Leitung nicht aus geladenen Atomen oder Molekülen bestehen kann, da sich diese nicht mit vergleichbar hohen Geschwindigkeiten bewegen.

Thompson vertritt im weiteren Verlauf eine in seiner Zeit weit verbreitete Theorie Newtons, die „Korpuskel-Theorie“, nach der Licht aus sehr kleinen negativ geladenen (siehe dazu auch 2.8. Philipp Lenard) Teilchen bestehen soll. Diese wendet er auch für eine Erklärung der „Kathodenstrahlen“ (Elektronenstrahlen) an.¹¹¹ Durch Experimente probiert er den e/m -Wert dieser „Korpuskeln“ zu ermitteln. Dabei erreicht er annähernd gut den e/m -Wert, der heute dem Elektron zugeordnet wird.

J. J. Thomson führt auch Studien zu den von Goldstein entdeckten „Kanalstrahlen“ (positive Strahlung) durch. Seine Arbeiten dazu bereiteten den Weg zur Entdeckung der Isotope.

Außerdem gilt er als einer der Wegbereiter der Massenspektrometrie.¹¹²

Die Anstrengungen Thompsons ergaben fundamentale Ergebnisse und verhalfen der Entdeckung und Erforschung der subatomaren Teilchen, welche in der Physik eine neue Ära einleitete.

Thompson erhielt 1906 für seine Arbeit „Elektrische Ströme in verdünnten Gasen“ den Nobelpreis.

¹¹⁰ (Bock, 2008, S. 266)

¹¹¹ Vgl.: (Bock, 2008, S. 477 f)

¹¹² Vgl.: (Bock, 2008, S. 278 ff)

3. Versuchsreihen

3.0. Kapitelübersicht

Dieses Kapitel, welches einen zentralen Teil der Diplomarbeit bildet, zeigt den größten Teil, der in der Vorlesung von Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot präsentierten Röhren und Versuche mit denselben. Aufgelistet werden dabei 28+1 Experimente rund um Gasentladungsröhren.

Neben einer Illustration wird jedes genannte Element zusätzlich im Detail beschrieben. Um einen besseren Überblick zu bewahren, wurden die einzelnen Experimente in fünf Unterpunkte unterteilt: Materialien/ verwendete Geräte, Beschreibung, Beobachtung, Interpretation und Kommentar.

Materialien/ verwendete Geräte:

Dieser Unterpunkt enthält eine Liste an Materialien, welche für den jeweiligen Versuch verwendet wurden. Diese enthält auch das jeweilige Betriebsgerät, welches verwendet wurde. Bei Letzterem ist noch anzumerken, dass natürlich auch andere Mittel für den Betrieb verwendet werden können. Die genannten Methoden beschränken sich auf diejenigen, welche in der Vorlesung verwendet wurden.

Beschreibung:

Hier sind einige Informationen zum jeweiligen Versuch zu finden. Außerdem wird auf den Versuchsaufbau und -ablauf genauer eingegangen.

Beobachtung:

In diesem Unterpunkt sind die Phänomene und Effekte aufgelistet, die während des Versuches wahrnehmbar sind. Anzumerken ist dabei, dass bei einigen durchaus mehr beobachtbar ist, jedoch aus didaktischen Gründen bei manchen nur jene angeführt sind, die für das jeweilige Experiment als relevant erscheinen.

Interpretation:

Hierbei wird versucht, den physikalischen Bezug zu den Phänomenen, die im Unterpunkt „Beobachtung“ angeführt wurden, herzustellen und zu erklären. Diese

erfolgt zum Teil stichwortartig, wobei für ein besseres Verständnis immer in den „Theoretischen Grundlagen“ der Diplomarbeit nachgelesen werden kann (siehe dazu auch 1. Theoretische Grundlagen).

Kommentar:

In diesem Unterpunkt werden verschiedene zusätzliche Informationen und Ergänzungen zum jeweiligen Versuch angeführt.

Achtung:

Es wird angemerkt, dass bei den folgenden Versuchen (wenn bei den Meisten auch nur in geringem Maß), Röntgenstrahlung frei wird!

3.1. Gasentladungsröhren abseits der Forschung

3.1.1. Adventkranz mit Geißlerröhrchen

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Diverse Geißlerröhren

❖ *Beschreibung*

Gezeigt wurden von Geißler gefertigte Gasentladungsröhren in verschiedensten Ausführungen. Im Folgenden wird davon eine ausgewählte, besonders effektreiche Röhre näher beschrieben.

Der Grundaufbau der Röhre ist der eines elektrischen Eies, bei dem die Elektroden am oberen und unteren Ende angeordnet sind. Innerhalb der Geißlerröhre sind mehrere unterschiedliche Elemente eingeschmolzen. Am unteren Teil befindet sich ein Glasgebilde, welches an eine Vase oder einen Kelch erinnert. In diese taucht man eine spiralförmige Kapillare, die sich nach oben in Richtung Elektrode windet.



Abbildung 5: Geißlerröhre als Zierobjekt
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page6-3.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Bei Betrieb der Röhre ist ein violetter Strahl zu erkennen, der von der Anode wegführt
2. Der Strahl verläuft gebündelt über den Rand des vasenförmigen Glaskörpers und geht in diesen hinein, wo er schließlich auf die Kapillare trifft
3. In dem kapillarförmigen Abschnitt wird der Strahl hell weiß und folgt dem spiralförmig angelegten Verlauf
4. An der Mündung der Kapillare endet der Strahl und ein dunkler Raum folgt
5. Nach diesem kurzen dunklen Abschnitt ist ein intensives bläuliches Leuchten zu sehen, das bis zur Kathode geht und deren vorderen Teil umschließt
6. Der Kelch leuchtet grünlich

❖ **Interpretation**

1. Positive Säule
2. Zu sehen ist der Entladungsweg bzw. der Weg des Elektronenflusses der positiven Säule
3. Durch die Verengung kommt es zu einer Bündelung der Ladungsträger, wodurch vermehrt Gasteilchen auf einem kleineren Raum angeregt werden. Damit steigt auch die Intensität der Emission.
4. Faradayscher Dunkelraum
5. Negatives Glimmlicht
6. Fluoreszenz des Glases, welches durch Elektronenstöße verursacht wird

❖ **Kommentar**

Der eher künstlerische Aufbau lässt darauf schließen, dass die Röhre mehr als Anschauungsobjekt, als für wissenschaftliche Versuche verwendet wurde. Trotzdem können anhand dieser Röhre einige Phänomene der Glimmentladung gezeigt werden.

Auffallend ist auch der Titel des Versuchs „Adventkranz mit Geißlerröhrchen. Dieser wurde aufgrund der besonderen Inszenierung gewählt. Dabei wurde mit zwei aufgestellten Spiegeln eine Illusion erzeugt, wodurch für die Zuschauer die einzelne Röhre vervierfacht zu sehen war und dieses Bild somit einem Adventkranz ähnelte.

3.1.2. Geißlerröhrchen mit fluoreszierenden Flüssigkeiten

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Verschiedene Geißlerröhren mit fluoreszierenden Flüssigkeiten

❖ *Beschreibung*

Gezeigt wurden 3 verschiedene Modelle von Geißlerröhren mit fluoreszierenden Flüssigkeiten.

Der grundlegende Aufbau kann in zwei Teile gegliedert werden: Einen gasgefüllten Haupttröhrenteil, der im Prinzip dem Aufbau einer normalen Gasentladungsröhre mit einem innerhalb verlaufenden Kapillarenteil entspricht, und einem zusätzlichen zweiten Teil, welcher den Abschnitt mit der Kapillare umgibt und mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit gefüllt ist.

Die Kapillaren in der ersten und dritten Röhre sind dabei kunstvoll gewunden. Die in der zweiten Röhre ist durch eine regelmäßige Folge von sich abwechselnden Verengungen und Verdickungen gekennzeichnet.

Eine Zusammensetzung der Gase, bzw. der Flüssigkeiten in den Röhren, ist nicht bekannt.

Röhre 1:



Abbildung 6: Geißlerröhre mit einer kapillaren Verengung und fluoreszierender Flüssigkeit

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page6-2.html>)

❖ *Beobachtungen (von der Kathode Richtung Anode gehend)*

1. Punktförmiges, weißliches Leuchten der Kathodenspitze
2. Schmäler, dunkler Streifen
3. Violett leuchtendes Band
4. Dunkler Streifen
5. Heller, weiß leuchtender Streifen in der Kapillare, welches dem Verlauf der Kapillare folgt; nach der Kapillare wird dieser bläulich
6. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet schwach grünlich
7. Heller, bläulich leuchtender Bereich um die Anode

❖ *Interpretation*

1. Glimmhaut
2. Hittorffscher Dunkelraum
3. Negatives Glimmlicht
4. Faradayscher Dunkelraum
5. Positive Säule: Durch die Verengung kommt es zu einer Bündelung der Ladungsträger, wodurch vermehrt Gasteilchen auf einem kleineren Raum angeregt werden. Damit steigt auch die Intensität der Emission. Durch die Vergrößerung des Raumes nach dem Kapillarenabschnitt kann der gegenläufige Effekt beobachtet werden.
6. Fluoreszenz
7. Anodenglimmschicht

Röhre 2:

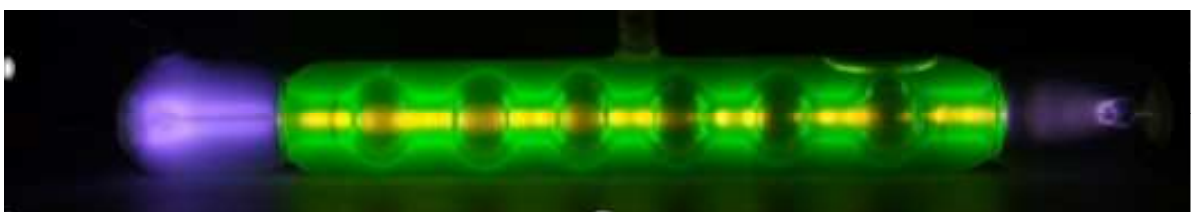


Abbildung 7: Geißleröhre mit regelmäßigen Verengungen und fluoreszierender Flüssigkeit

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page6-2.html>)

❖ **Beobachtungen (von der Kathode Richtung Anode gehend)**

1. Punktförmiges Leuchten der Kathodenspitze
2. Violette, schwach- leuchtendes Band
3. Dunkler Streifen
4. Gelber, schmaler, hell leuchtender, geschichteter Streifen, der sich über die gesamte Kapillare zieht und durch dunkle Streifen an den verbreiterten Stellen der Kapillare unterbrochen ist
5. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet intensiv grün
6. Heller, violett leuchtender Bereich, ab der Anode
7. Direkte Umgebung um die Anode ist zusätzlich intensiv ausgeleuchtet

❖ **Interpretation**

1. Glimmhaut
2. Negatives Glimmlicht
3. Faradayscher Dunkelraum
4. Positive Säule: Da in der gesamten Entladungsröhre von der Kathode zur Anode der gleiche Strom fließen muss, kommt es an den engeren Stellen, wie der Kapillare, zu einer erhöhten Dichte an Ladungsträgern. Dadurch kommt es wiederum zu einer vermehrten Anregung von Teilchen und damit auch zu einer verstärkten Lichtemission. Die Farbänderung des Strahls ins Gelbe, die beim Durchfahren des mit der fluoreszierenden Flüssigkeit befüllten Teils der Röhre entsteht, wird durch das Absorptions- und Emissionsverhalten der fluoreszierenden Flüssigkeit verursacht. Die ursprünglich hellviolett bis weiße Farbe des Streifens ist am Eingang zur Kapillare noch zu erkennen. Die dunklen, breiteren Unterbrechungen, die an den Verbreitungen zu sehen sind, basieren auf dem invertierten Prinzip der Verengung. Dabei nimmt in diesen Bereichen die Ladungsträgerdichte rasant ab, wodurch Stöße, die zur Anregung von Teilchen führen, kaum mehr stattfinden.
5. Fluoreszieren der Flüssigkeit
6. Da dieser Bereich nicht mehr von der fluoreszierenden Flüssigkeit umgeben und auch nicht mehr verengt ist, kann an dieser Stelle die eigentliche Erscheinung der positiven Säule beobachtet werden.
7. Anodenglimmlicht

Röhre 3:



Abbildung 8: Geißlerröhre mit kunstvoll gewundenen Kapillarteilen und verschiedenen fluoreszierenden Flüssigkeiten

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page6-2.html>)

❖ **Beobachtungen (von der Kathode Richtung Anode gehend)**

1. Dunkler Bereich, der die Kathode umgibt, nur einzelne Teile der Kathode schwach leuchtend
2. Punktförmiges, weiß-violettes Leuchten der Kathodenspitze
3. Etwas dunkler werdendes, schmales Band
4. Violettes, (schwach-) leuchtendes Band
5. Pinker, schmaler, hell leuchtender, durchgehender Streifen, der sich über die gesamte Kapillare zieht
6. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet intensiv rosa, vor allem an den Glasrändern der Kapillare
7. Sehr gut sichtbarer, definierter Streifen, der einen Bogen in die zweite Kapillare zieht (an dem breiteren Eingangsbereich etwas dunkler)
8. Hellgrüner, schmaler, hell leuchtender, durchgehender Streifen der sich über die gesamte Kapillare zieht
9. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet intensiv grünlich, vor allem an den Glasrändern der Kapillare
10. Sehr gut sichtbarer, definierter Streifen, der einen Bogen in die dritte Kapillare zieht (an dem breiteren Eingangsbereich etwas dunkler)

11. Violett-weißer, schmaler, hell leuchtender, durchgehender Streifen der sich über die gesamte Kapillare zieht
12. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet violett und an den Glasrändern der Kapillare hell weißlich
13. Sehr gut sichtbarer, definierter Streifen, der einen Bogen in die vierte Kapillare zieht (an dem breiteren Eingangsbereich etwas dunkler)
14. Gelb-oranger, schmaler, hell leuchtender, durchgehender Streifen der sich über die gesamte Kapillare zieht
15. Flüssigkeit, welche die Kapillare umgibt, leuchtet orange, vor allem an den Glasrändern der Kapillare ist das Leuchten sehr intensiv
16. Heller bläulich-violett leuchtender Bereich der den ganzen Anodenraum ausfüllt (direkte Umgebung um die Anode ist zusätzlich intensiv ausgeleuchtet)

❖ *Interpretation*

1. Astonischer Dunkelraum
2. Kathodenschicht
3. Hittorffscher Dunkelraum
4. Negatives Glimmlicht
5. Positive Säule: Da in der gesamten Entladungsröhre von der Kathode zur Anode der gleiche Strom fließen muss, kommt es an den engeren Stellen, wie der Kapillare, zu einer erhöhten Dichte an Ladungsträgern. Dadurch kommt es wiederum zu einer vermehrten Anregung von Teilchen und damit auch zu einer verstärkten Lichtemission. Die Farbänderung des Strahls, die beim Durchfahren des, mit der fluoreszierenden Flüssigkeit, befüllten Teils der Röhre entsteht, wird durch das Absorptions- und Emissionsverhalten der fluoreszierenden Flüssigkeit verursacht. Die ursprünglich hellviolette bis weiße Farbe des Streifens ist vor dem Eintritt des flüssigkeitsgefüllten Bereiches der Kapillare noch gut zu erkennen. Innerhalb der Kapillare hat der Elektronenstrahl bei allen vier Abschnitten die gleiche Farbe.
6. Fluoreszenz (die verschiedenen Farben ergeben sich aus den unterschiedlichen Flüssigkeiten und deren Absorptions- und Emissionsspektrum)
7. Elektronenstrahl
8. Siehe 5.
9. Siehe 6.
10. Elektronenstrahl
11. Siehe 5.
12. Siehe 6.
13. Elektronenstrahl
14. Siehe 5.
15. Siehe 6.
16. Anodenglimmschicht

❖ *Kommentar*

Obwohl die Röhren vorwiegend für dekorative Zwecke gedacht waren, können einige sehr interessante Effekte beobachtet werden, die bei den elektrischen Entladungen bei niedrigen Drücken zu Tage kommen.

3.1.3. Geißlerröhre mit Fluoreszenzstoff

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Geißlerröhre mit Fluoreszenzstoff

❖ *Beschreibung*

In der Geißlerröhre befindet sich ein fluoreszierender Stoff



Abbildung 9: Geißlerröhre mit Fluoreszenzstoff (außer Betrieb)

© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz

❖ *Beobachtung*

1. Beim Betrieb der Röhre ist ein fadenförmiger, gebündelter Strahl zu erkennen, der von der einen zur anderen Elektrode verläuft
2. Neben dem Strahl ist ein Aufleuchten des Fluoreszenzstoffes zu erkennen
3. Nach dem Abschalten leuchtet der Leuchtstoff kurz nach

❖ *Interpretation*

1. Elektronenstrahl
2. Fluoreszenz
3. Das Nachleuchten weist auf eine zusätzliche Phosphoreszenz hin

❖ *Kommentar*

Diese Röhre ist ein Vorläufer der heutigen Leuchtstoffröhren.

3.1.4. Blumenstraußbukett

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Blumenstraußfluoreszenzröhre

❖ *Beschreibung*

Die Röhre ist ein runder bis eiförmiger Glaskolben, mit jeweils einer Elektrode am oberen und am unteren Ende. Zwischen den Elektroden befinden sich gleich zwei Elemente: Oben beginnend befindet sich ein horizontal bewegliches Rad mit Flügeln, welches einem Windrad ähnelt. Darunter befinden sich mehrere blumenartig geformte, verschieden fluoreszierende Materialien.



Abbildung 10: Geißlerröhre mit „Blumenstraußbukett“ aus fluoreszierenden Materialien

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-3.html>)

❖ **Beobachtung (von oben nach unten gehend)**

1. Beim Betrieb der Röhre ist ein leuchtender Streifen zu erkennen, der an der oberen Elektrode, der Kathode, entspringt und geradlinig zum Strahl der anderen Elektrode zeigt
2. Dort wo der Strahl verläuft, beginnt das Rad in verschiedenen Farben zu leuchten
3. Das Rad beginnt sich zu drehen
4. Das Blumenstraußbukett leuchtet in verschiedenen Farben
5. An den Stellen des Buketts, über dem sich ein Flügel des Rades befindet, ist ein scharf abgegrenzter Schatten zu erkennen, das heißt, das Bukett ist an diesen Stellen farblos
6. Am unteren Ende des Buketts ist wieder ein Strahl zu sehen, der in Richtung Anode verläuft

❖ **Interpretation**

1. Kathoden Glimmlicht
2. Fluoreszenz verschieden fluoreszierender Stoffe
3. Mechanische Bewegung des Rades, welche durch den Elektronenstrahl ausgelöst wird
4. Fluoreszenz verschieden fluoreszierender Stoffe
5. Die Elektronenstrahlen verlaufen geradlinig und können leicht abgeschirmt werden
6. Positive Säule

❖ **Kommentar**

Diese Röhre beeindruckt vor allem mit der großen Menge an verschiedenen Effekten, die gezeigt werden können. Es können die Fluoreszenz von Glas und diversen anderen Materialien, eine mechanische Bewegung des Rades, welche durch den Elektronenstrahl ausgelöst wird, die geradlinige Ausbreitung der Elektronenstrahlen, die magnetische Ablenkbarkeit, die Abschirmung der Strahlen durch bereits relativ dünne Materialien, sowie einige typische Glimmlichterscheinungen, beobachtet werden.

3.1.5. Fluoreszenzröhre mit drei Steinen

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Gasentladungsröhre mit verschiedenen fluoreszierenden Steinen

❖ *Beschreibung*

In der kugelförmigen Röhre sind verschiedene fluoreszierende Steine fixiert. Beim Auftreten des Elektronenstrahls auf diese können verschiedene Leuchteffekte beobachtet werden.



Abbildung 11: Geißlerröhre mit fluoreszierendem Stein (außer Betrieb)

© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz

❖ *Beobachtung*

Wird die Röhre in Betrieb genommen, beginnen die Steine in der Röhre in verschiedenen Farben zu leuchten. Außerdem ist ein grünliches Leuchten des Röhrenglases zu erkennen.

❖ *Interpretation*

Das Leuchten der Steine ist auf die Fluoreszenz zurückzuführen. Die unterschiedlichen Farben kommen dabei von den unterschiedlichen Absorptions- und Emissionsspektren, was von der chemischen Zusammensetzung des jeweiligen Steins abhängt. Calcit fluoresziert beispielsweise rot, Scheelit blau, Magnesit violett, Willemit grün und Opatit gelb.

Das grüne Fluoreszieren des Glases weist auf Röntgenstrahlenemission hin.

❖ *Kommentar*

Interessant ist hierbei einerseits die Fluoreszenz von speziellen Feststoffen selbst, andererseits auch die unterschiedliche Emission von Licht der verschiedenen Stoffe, die ohne Bestrahlung von der Form und Farbe her, kaum zu unterscheiden sind.

3.2. Crookes'sche Röhren

3.2.1. Crookes Nr. 14, Kathodenstrahlröhre

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 14 (Kathodenstrahlröhre)

Magnet

❖ *Beschreibung*

Nach der Kathode wird der ausgehende Elektronenstrahl mittels einer Metallplatte, die den Querschnitt der Röhre abdeckt, abgeschirmt. Lediglich durch einen schmalen Spalt, der sich horizontal in der Platte befindet, können die Elektronen weiter in Richtung Anode fließen. Der aus dieser Anordnung resultierende Elektronenstrahl ist streifenförmig und liegt in der Ebene des Spaltes. Im mittleren Teil der Röhre ist eine Wand integriert, welche normal auf den Spalt steht und die Bahn des Elektronenstrahls kreuzt. Auf dieser befindet sich ein Fluoreszenzmittel wodurch der Elektronenstrahl als scharfer grüner Strahl sichtbar wird. Somit können sehr anschauliche Versuche bezüglich der Ablenkbarkeit des Strahles durch Magnetfelder angestellt werden.



Abbildung 12: Röhre Crookes Nr. 14

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-3.html>)

❖ **Beobachtung**

Der Strahl lässt sich mit dem Magneten ablenken. Dabei wird er je nach zugewandtem Pol von diesem abgestoßen bzw. angezogen.

❖ **Interpretation**

Die Ablenkung kommt aufgrund der Lorentzkraft

$$F_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (13)$$

(mit F_L = Lorentzkraft, q = elektrische Ladung, \vec{v} = (Fließ-) Geschwindigkeit der Ladung, \times Vektorprodukt, \vec{B} = magnetische Flussdichte)

zu Stande. Da der Kathodenstrahl aus fließenden Elektronen besteht, werden, je nach Flussrichtung und Magnetfeldverlauf, diese in eine definierte Richtung abgelenkt.

❖ **Kommentar**

Die Röhre Crookes Nr. 6 wurde von William Crookes gebaut, um die Auswirkung eines Magneten auf den Kathodenstrahl (heute wird bevorzugt der Begriff „Elektronenstrahl“ verwendet) zu zeigen.

3.2.2. Crookes Nr. 2, Fluoreszenzglas

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 2

❖ **Beschreibung**

Die Röhre Crookes Nr. 2 ist aus fluoreszierendem Glas angefertigt. Die Elektroden sind an den Enden angebracht. Durch die hohe Evakuierung sind der Druck und somit die Teilchendichte innerhalb der Röhre sehr niedrig.

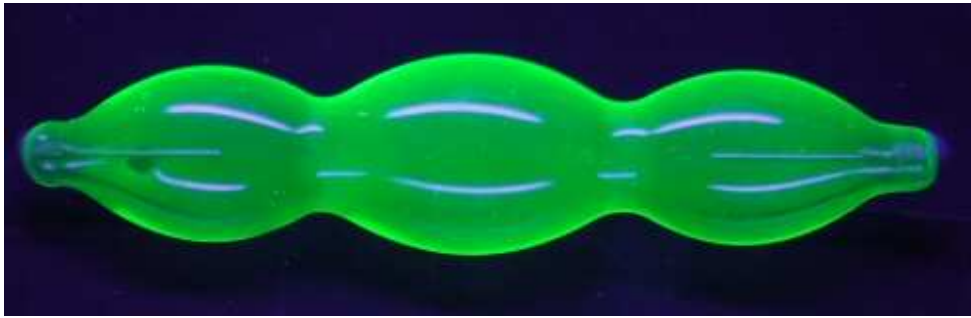


Abbildung 13: Fluoreszenzröhre aus Uranglas
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ **Beobachtung**

Das Glas der Röhre leuchtet grünlich

❖ **Interpretation**

Das Leuchten kommt vom Fluoreszieren des Glases. Aufgrund der niedrigen Teilchendichte, welche durch die hohe Evakuierung zustande kommt, stoßen die Elektronen kaum noch mit Gasteilchen zusammen und erreichen somit hohe kinetische Energien.

❖ **Kommentar**

Die grüne Farbe wird durch die Beschaffenheit und die Zusammensetzung des Glases bestimmt und ist charakteristisch für alte deutsche Gläser. Bei Gläsern, welche im alten England angefertigt wurden, kann ein bläuliches Fluoreszieren beobachtet werden. Ein starkes Fluoreszieren des Glases kann auch ein Hinweis auf Röntgenstrahlung sein.

3.2.3. Crookes Nr. 6, Y-Röhre

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 6 (Y- Röhre)

❖ *Beschreibung*

Die Röhre Crookes Nr. 6 wurde von William Crookes gebaut, um die geradlinige Ausbreitung der Elektronenstrahlen zu zeigen.

In eine Y- förmige (mehr V-förmige) Gasentladungsröhre sind zwei Elektroden oben an den Enden und eine unten am Schenkel eingeschmolzen.

Am Anfang des Versuchs wird dann eine Elektrode an der Spitze und die Elektrode am Schenkel angeschlossen und die Röhre damit in Betrieb genommen. Anschließend daran wird von der ersten, eben angeschlossenen Elektrode an der Spitzes auf die andere gewechselt.

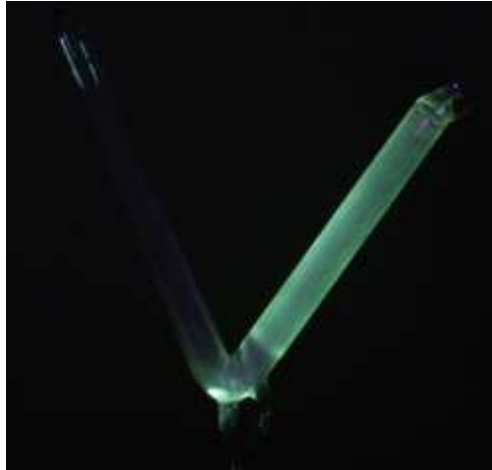


Abbildung 14: Röhre Crookes Nr. 6
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ *Beobachtung*

1. Bei der Inbetriebnahme leuchtet, je nach Anschluss, nur der linke oder nur der rechte Arm.
2. Das Glas leuchtet grünlich

❖ *Interpretation*

1. Einerseits ist hier die geradlinige Ausbreitung der Elektronenstrahlen zu beobachten. Die Elektronen gehen dabei direkt von der Kathode zur Anode.
2. Das Leuchten des Glases ist Fluoreszenz.

❖ *Kommentar*

Für die geradlinige Ausbreitung der Elektronenstrahlen sollten zusätzlich auch die Röhren Crookes Nr. 7a und 7b betrachtet werden (siehe dazu auch 3.2.5. Crookes Nr. 7a und 7b, druckabhängige Ausbreitung).

In welcher Farbe das Glas fluoresziert, hängt von dessen Zusammensetzung ab. Alte englische Gläser leuchten beispielsweise bläulich, alte deutsche Gläser grünlich.

3.2.4. Crookes Nr. 9, Malteserkreuz

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 16 (Malteserkreuz)

Magnet

❖ *Beschreibung*

In der Röhre ist ein bewegliches Metallplättchen in Form eines Malteserkreuzes eingearbeitet, welches, je nach Bedarf, aufgestellt und umgelegt werden kann.

Zusätzlich können mit einem Magneten bezüglich der Einwirkung von Magnetfeldern auf die Elektronenstrahlen Versuche gemacht werden.



Abbildung 15: Röhre Crookes Nr. 9
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Beim Einschalten leuchtet das Glas grünlich
2. Das Kreuz wirft, wenn es in der Röhre aufgestellt ist, einen Schatten auf dem sonst grün ausgeleuchteten Glas
3. Bringt man einen Magneten in die Nähe der Röhre, wird der Schatten abgelenkt
4. Lässt man die Röhre etwas mit aufgestelltem Kreuz laufen und legt dieses dann um, leuchtet das Glas an den Stellen, an denen vorher der Schatten des Kreuzes zu sehen war, viel intensiver als am Rest des Glases – es ist ein helles, grün leuchtendes Kreuz zu sehen

❖ **Interpretation**

1. Fluoreszenz des Glases
2. Die Elektronenstrahlen breiten sich geradlinig aus und können das Metall nicht durchdringen
3. Die Elektronenstrahlen werden durch ein Magnetfeld abgelenkt
4. Die Fluoreszenz des Glases beginnt mit der Zeit zu „ermüden“

❖ **Kommentar**

Diese Röhre bietet wieder eine Fülle an Effekten, die gezeigt werden können.

3.2.5. Crookes Nr. 7a und 7b, druckabhängige Ausbreitung

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhren Crookes Nr. 7a und 7b

❖ *Beschreibung*

Die Röhren sind kugelförmig, mit jeweils drei eingeschmolzenen Elektroden. Die Röhre Crookes Nr. 7a enthält einen relativ hohen Druck, das sogenannte „de la Rive-Vakuum“, wogegen die Röhre Crookes Nr. 7b nur noch einen sehr geringen Druck aufweist.

Die Elektroden werden zuerst an die Crookes Nr.7a auf verschiedenste Weise angeschlossen und der Verlauf des Elektronenstrahls beobachtet. Anschließend wird der Versuch mit der Crookes Nr. 7b wiederholt.

Crookes Nr. 7a:



Abbildung 16: Röhre Crookes Nr. 7a, hoher Druck
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-2.html>)

❖ *Beobachtung*

Der Elektronenstrahl verläuft immer von der einen zur anderen angeschlossenen Elektrode

❖ *Interpretation*

Durch die noch relativ hohe Teilchenzahl im de la Rive-Vakuum kommt es zu vielen Stößen zwischen diesen. Es bildet sich ein Strom aus, der von der Elektrode mit dem höheren Potential, zur Elektrode mit dem niedrigeren Potential fließt.

Crookes Nr. 7b:



Abbildung 17: Röhre Crookes Nr. 7b, niedriger Druck
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-2.html>)

❖ *Beobachtung*

Egal wie und welche Elektroden angeschlossen sind, verläuft der Elektronenstrahl immer geradlinig und erzeugt ein Leuchten auf der gegenüberliegenden Wandseite

❖ *Interpretation*

Aufgrund des geringen Drucks interagieren die Elektronen des Elektronenstrahls kaum mehr mit anderen Teilchen, wodurch sie kaum gebremst und dadurch abgelenkt werden. Somit erreichen sie geradlinig die gegenüber von der Elektrode liegende Glaswand, welche daraufhin zur Fluoreszenz angeregt wird.

❖ *Kommentar*

Bei diesem Röhrenaufbau ist sehr schön zu sehen, dass Crookes speziell geformte Elektroden benutzte. In diesem Fall wählte er eine hohle Kathodenform, was zu einer

Fokussierung des Elektronenstrahls führt. Damit können feinere Ergebnisse erzielt werden. Crookes gehörte zu den Pionieren, der sich speziell mit der Form der Kathoden näher beschäftigte.

3.2.6. Crookes Nr. 21, Wärmeentwicklung

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 21

❖ *Beschreibung*

In der kugelförmigen Röhre sind die Elektroden gegenüberliegend angebracht. Auffallend ist wieder die schon erwähnte schalenförmige Form, welche von Crookes selbst entwickelt wurde. In der Mitte zwischen den Elektroden befindet sich ein sehr dünnes Metallplättchen, in diesem Fall Platin, auf das der Elektronenstrahl trifft.



Abbildung 18: Röhre Crookes Nr. 21

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ **Beobachtung**

Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf das Platinplättchen beginnt dieses punktförmig aufzuglühen

❖ **Interpretation**

Durch das Aufglühen des Platinplättchens an den Stellen, wo der Elektronenstrahl auftrifft, kann die Wärmeentwicklung durch die Elektronenstrahlen gezeigt werden. Crookes richtete bei einem seiner Versuche den Elektronenstrahl auf die Glaswand der Röhre, was schließlich zur Zerstörung von dieser führte.

❖ **Kommentar**

Hierbei kann eindrucksvoll die Wärmeentwicklung gezeigt werden, welche durch das Auftreffen der Elektronenstrahlen auf das Metallplättchen hervorgerufen wird. Bei manchen alten Röhren ist das Metallplättchen leider mit einem Loch versehen. Dieses kommt zu Stande, wenn die Röhre über einen zu langen Zeitraum in Betrieb genommen wird, was wiederum zur Überhitzung und dem damit verbundenen Schmelzen des Plättchens führt.

3.2.7. Crookes Nr. 1, Dunkelraum

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Funkeninduktor

Röhre Crookes Nr. 1

❖ **Beschreibung**

Die Röhre Crookes Nr. 1 wurde von William Crookes gebaut um den „Dunklen Raum“ zu demonstrieren.

Eine Elektrode befindet sich dabei in der Mitte der Röhre. An den beiden Enden befinden sich jeweils die Gegenelektroden, welche dasselbe Potential aufweisen (in der Vorlesung wurde die Elektrode in der Mitte als Kathode geschaltet, die beiden Elektroden an den Enden als Anoden).

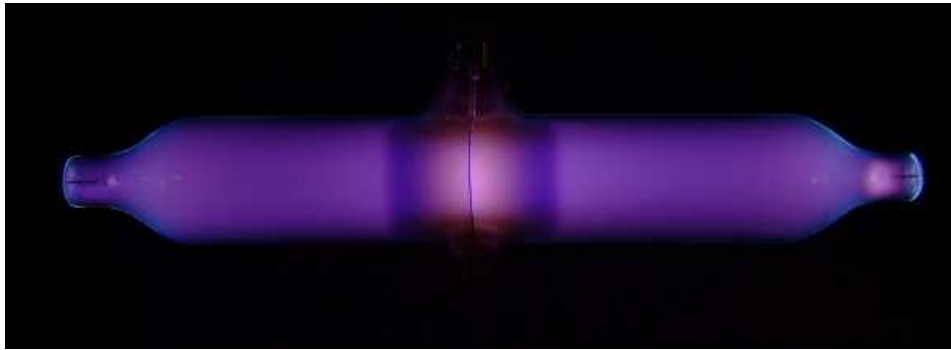


Abbildung 19: Röhre Crookes Nr. 1
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ **Beobachtung**

Bei der Inbetriebnahme ist der mittlere Teil um die Kathode hell rosafarben beleuchtet. Von der Mitte links und rechts symmetrisch weggehend, kann man scharf abgegrenzte Streifen erkennen. Nach diesen folgt wieder, ebenfalls scharf abgegrenzt, eine hellere, violett-leuchtende Schicht, die bis zur Anode reicht.

❖ **Interpretation**

Der helle Streifen wird als negatives Glimmlicht bezeichnet. Der darauffolgende, dunkle, scharf abgegrenzte Bereich, ist der sogenannte Faradaysche Dunkelraum. In diesem Bereich haben die Elektronen noch eine zu geringe Energie für Stöße, welche eine Anregung von Teilchen verursachen könnten. Somit kann auch kein Licht emittiert werden.

Anschließend an diese folgt die positive Schicht, in welcher wieder Gasteilchen angeregt werden und damit auch ein Leuchten sichtbar wird.

❖ **Kommentar**

Crookes versuchte den Faradayschen Dunkelraum mit der mittleren freien Weglänge der Moleküle zu erklären. Diese Annahme war jedoch falsch, da im Dunkelraum Stöße sehr wohl stattfinden, jedoch mit einer für Anregungen zu geringen Energieübertragung.

3.3. Weitere Röhren in der Forschung und Wissenschaft

3.3.1. Kanalstrahlröhre nach Wien

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Kanalstrahlröhre nach Wien

Magnet

❖ *Beschreibung*

Die Kanalstrahlröhre ist eine Gasentladungsröhre, die als Besonderheit ein Loch in der Kathode aufweist. Diese ist senkrecht aufgestellt, wobei sich die Anode unten und die durchbohrte Kathode in der Mitte befinden.

Anschließend können wieder mit einem Magneten der Einfluss eines Magnetfelds getestet werden.



Abbildung 20: links: Kanalstrahlröhre nach Wien (außer Betrieb) rechts: Kanalstrahlen

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-2.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Bei Betrieb der Röhre ist am unteren Teil ein grünes Leuchten des Glases zu sehen, welches von der Kathode begrenzt wird.
2. Oberhalb der Kathode ist ein violett leuchtender Faden erkennbar, der ungefähr so breit wie das Loch in der Kathode ist.

❖ **Interpretation**

1. Das grüne Leuchten ist die Fluoreszenz des Glases, welches durch die Anregung der Elektronen des Elektronenstrahls verursacht wird.
2. Der leuchtende Faden ist der sogenannte Kanalstrahl. Dieser besteht aus den positiven Gasteilchen (von den Stößen mit den Elektronen stammend), die durch ihre positive Ladung zur Kathode hin beschleunigt werden. Aufgrund des Loches in der Kathode können diese hindurchtreten und auf der anderen Seite andere Gasteilchen anregen, welche anschließend Licht emittieren.

❖ **Kommentar**

Mit dieser Röhre lassen sich sehr gut die Kanalstrahlen zeigen. Mit einem Magneten kann außerdem gezeigt werden, dass ein Einfluss eines Magnetfelds auf diese kaum gegeben ist. Mittels einer Elektronenstrahlröhre kann ein direkter Vergleich von Elektronenstrahlen und positiven Strahlen gezeigt werden.

3.3.2. Holtzsche Röhre

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Funkeninduktor

Holtzsche Röhre

❖ **Beschreibung**

Die Röhre bildet die Form eines Rechtecks, wobei die Elektroden mittig an den schmalen Seiten angeordnet sind. In der Röhre selbst sind Trichter aus Glas eingebaut, deren Öffnungen bzw. Mündungen in die gleiche Richtung zeigen.

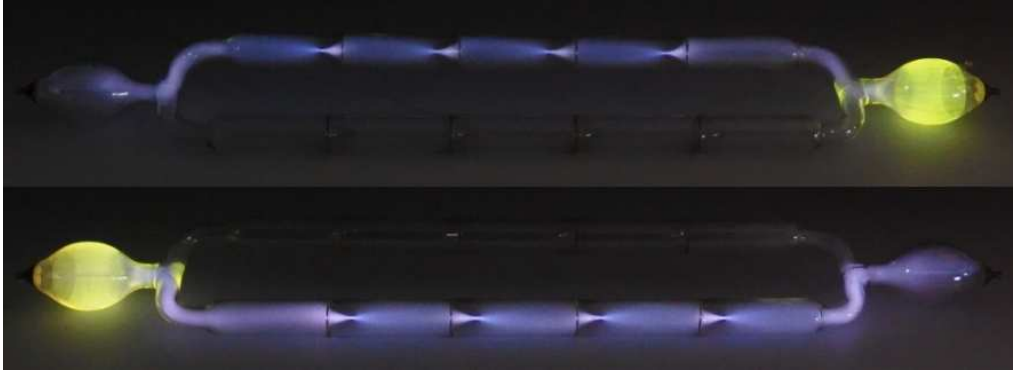


Abbildung 21: Aufgrund der einseitigen Entladung leuchtet nur eine Seite auf, die andere bleibt dunkel

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page6-4.html>)

❖ **Beobachtung**

1. An der Kathode ist ein helles gelbliches Leuchten zu erkennen
2. Beim Anlegen einer Gleichspannung ist, je nach Polung, immer nur eine Seite der Röhre beleuchtet, nämlich diejenige, in die die Trichter verlaufen, also von der Öffnung zur Spitze
3. Wird eine Wechselspannung angelegt, leuchten beide Seiten

❖ **Interpretation**

1. Kathodenglimmlicht
2. Die Richtungsspezifität des Elektronenstrahls ist auf seine Teilchennatur zurückzuführen. Für die Elektronen ist es deutlich einfacher, von der Trichteröffnung in die Spitze zu wandern als umgekehrt, was eben dazu führt, dass Gasmoleküle an nur einer Seite der Röhre angeregt werden.
3. Bei der Wechselspannung wechseln die Elektronen, je nach Frequenz der angelegten Spannung, die Richtung. Dadurch werden abwechselnd auch unterschiedliche Wege gewählt, je nachdem, an welchem Pol sich die Kathode gerade befindet, nimmt der Strahl den Weg von dieser in Richtung Trichteröffnungen zu Trichterspitzen.

❖ **Kommentar**

Mit der Holtzschen Röhre lässt sich zeigen, dass der Elektronenstrahl von materieller Natur sein muss. Die Ladungen bewegen sich immer nur von der Trichteröffnung zur Trichterspitze und nicht umgekehrt. Außerdem kann nachgewiesen werden, ob es

sich bei der angelegten Spannung um eine Gleich- oder Wechselspannung handelt, bei ersterem zusätzlich noch die Richtung des Stroms.

Die direkte Weiterentwicklung der Holtzröhre führte zur Glimmgleichrichterröhre.

3.3.4. Elektronenstrahl und Magnet

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röhre nach De la Rive

❖ *Beschreibung*

Der Grundaufbau der Röhre ist im Eigentlichen der eines „Elektrischen Eies“. Die Besonderheit findet sich am unteren Ende, wo der Eisenkern eines Elektromagneten stabförmig in die Röhre ragt. Die dazugehörige Spule des Magneten findet sich im Stativ wieder. Die Elektroden sind wieder oben und unten angeordnet, wobei die untere Elektrode ringförmig um den Eisenkern des Elektromagneten angeordnet ist. Der Versuch bzw. Röhrenaufbau stammt von De la Rive, der damit zeigen wollte, dass der Elektronenstrahl aus geladenen Teilchen besteht.



Abbildung 22: Elektronenstrahl in der Röhre nach De la Rive
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Ist die Röhre in Betrieb, ist deutlich ein violetter Strahl zu erkennen.
2. Wird der Elektromagnet eingeschalten, beginnt der Strahl auf der ringförmigen Elektrode in eine bestimmte Richtung zu wandern
3. Polt man den Elektromagneten durch Umkehrung der Stromrichtung um, wandert der Strahl in die entgegengesetzte Richtung
4. Das Glas der Röhre leuchtet grünlich

❖ **Interpretation**

1. Elektronenstrahl
2. Das Wandern des Strahls rührt von der Lorenzkraft. Diese wirkt aufgrund dessen, dass der Elektronenstrahl, wie auch schon von de la Rive vermutet, aus geladenen Teilchen besteht. Diese Teilchen sind, wie wir heute wissen, Elektronen.
3. Auch die Richtung, in der der Strahl wandert, wird durch die Lorenzkraft bestimmt
4. Das grüne Fluoreszieren des Glases weist auf Röntgenstrahlung hin

❖ **Kommentar**

Neben dem Beweis, dass der Elektronenstrahl aus geladenen Teilchen besteht, wie von de la Rive beabsichtigt, eignet sich der Versuch hervorragend zum Visualisieren der Lorenzkraft – dem Effekt, dem der eigentliche Beweis zu Grunde liegt. Zusätzlich kann sehr gut der Stromfluss veranschaulicht werden.

3.3.5. Greinacher Röhre

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Ruhmkorff

Greinacher Röhre

❖ **Beschreibung**

Die Greinacher Röhre besteht aus einem Glaskolben, in den zwei lange Elektroden, die sich vom Boden bis an den oberen Teil der Röhre reichen, platziert sind. Die Elektroden sind dabei so ausgerichtet, dass sich ihr Horizontalabstand, nach oben hin vergrößert.

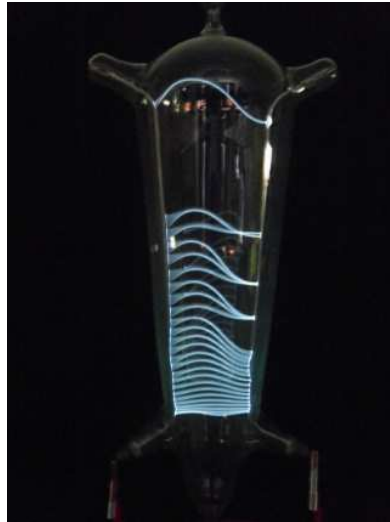


Abbildung 23: Entladung in der Greinacher Röhre (Langzeitaufnahme)

© historische Glasapparate und Lehrmittel Lutz Neumann (<http://www.trixum.de>)

❖ **Beobachtung**

1. Beim Anlegen der Spannung bildet sich am unteren Teil der Röhre ein leuchtender Funke, der zwischen den Elektroden verläuft
2. Der Strahl beginnt nach oben zu wandern
3. Am oberen Ende reißt der Strahl ab, was am unteren Ende zur Bildung eines neuen Strahls führt, der wiederum nach oben wandert

❖ **Interpretation**

1. Elektronenstrahl
2. Durch den Elektronenstrahl werden Gasmoleküle erhitzt. Dadurch beginnen diese in der Röhre nach oben zu steigen und „reißen“ den Strahl mit. Durch die nun vorhandene leitende Verbindung zwischen den Elektroden nimmt die Spannung zwischen diesen ab, was dazu führt, dass, während ein Strahl vorhanden ist, kein zweiter Strahl entsteht.

3. Beim Nachobenwandern wird der Abstand zwischen den Elektroden zunehmend größer. Wird er schließlich in Relation zur angelegten Spannung zu groß, reißt der Elektronenstrahl und somit der Elektronenfluss ab. Der Strom wird unterbrochen, womit sich am unteren Ende ein neuer Strahl bilden kann.

❖ **Kommentar**

Diese Röhre ist ähnlich dem Hörnerblitzableiter. Der Funke in der Röhre ist weitgehend ungefährlich. In der Vorlesung wurde ein weiterer Versuch, die sogenannte „Jakobsleiter“ gezeigt, welche ebenfalls im Aufbau dem Hörnerblitzableiter gleicht. Dieser Versuch findet aber, im Gegensatz zur Greinacher Röhre, an der freien Luft statt. Der Funke der, dabei entsteht, ist lebensgefährlich.

3.3.6. Druckabhängigkeit der Gasentladung

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Netzgerät

Vakuumpumpe

Gasentladungsröhre mit Sauganschluss

❖ **Beschreibung**

An eine Röhre, welche in einem Stativ eingeklemmt ist und an eine Vakuumpumpe angeschlossen ist, wird eine Spannung von 6000 V angelegt. Anschließend wird mithilfe der Vakuumpumpe der Druck in der Röhre zunehmend erniedrigt. Dabei können bei verschiedenen Drücken unterschiedliche Beobachtungen, unter anderem die Stoßionisation, gemacht werden.



Abbildung 24: Gasentladungsröhre mit angeschlossener Vakuumpumpe
 © <http://www.biosensor-physik.de/biosensor/gasentladung.htm>

❖ **Beobachtungen (von der Kathode Richtung Anode gehend und vom hohen zum niedrigen Druck)**

1. Atmosphärendruck: keine Leuchterscheinungen sichtbar
2. Der Druck fällt: Punktförmiges weißliches Leuchten bzw. Glimmen der Kathode
3. Der Druck nimmt weiter ab: eine violette Säule beginnt sich, von der Anode her, über einen großen Teil der Röhre auszubilden
4. Der Druck wird zunehmend geringer: von der Kathode beginnt sich ein blaues Licht auszubilden, welches jedoch, verglichen mit der Säule, die von der Anode ausgeht, relativ schmal ist. Beide Lichter sind von einem dunklen Zwischenraum getrennt.
5. Der Druck fällt noch weiter ab: die von der Anode ausgehende Säule wird kleiner, bzw. der dunkle Zwischenraum wird größer
6. Der Druck wird verringert (bis ca. 1 bis 0,1 mbar): bei der Säule, welche von der Anode ausgeht, beginnt sich eine regelmäßige Schichtung einzustellen

❖ **Interpretation**

1. Die mittlere freie Weglänge ist zu klein, um die Elektronen auf eine genügend hohe Energie zu beschleunigen, die für eine Anregung von Gasteilchen reicht
2. Ab diesem Druck beginnt sich die Glimmhaut der Kathodenschicht auszubilden
3. Sichtbarwerden der positiven Säule
4. Das Negative Glimmlicht tritt in Erscheinung; der dunkle Raum zwischen Negativem Glimmlicht und Positiver Säule, ist der Faradaysche Dunkelraum
5. Der Faradaysche Dunkelraum weitet sich aus
6. Wird ein gewisser Unterdruck erreicht, beginnt sich die positive Säule, als Folge der Stoßionisation, zu schichten

❖ *Kommentar*

Mit diesem Versuch kann direkt beobachtet werden, wie sich der fallende Druck auf die elektrische Entladung im Gas auswirkt. Durch Ein und Ausschalten der Pumpe kann dabei an beliebigen Drücken gestoppt werden und die jeweiligen Phänomene genauer untersucht werden.

3.3.7. Vakuumskala nach Cross

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Netzgerät

Sechs Gasentladungsröhren nach abnehmendem Druck gereiht (10 Torr; 5 Torr; 1,25 Torr; 0,75 Torr; 0,05 Torr; 0,025 Torr)

❖ *Beschreibung*

Der Versuchsaufbau basiert dabei auf jenem von Charles R. Cross (1848 – 1921), der einst am „Massachusetts Institute of Technology“ eine Skala aus Geißlerröhrchen mit definierten Drücken erstellte.

Die Röhren werden, nach abnehmendem Druck gereiht, nebeneinander in ein Stativ gestellt und eine Spannung parallel angelegt. Dabei können die einzelnen Phänomene, die bei den Gasentladungen unter verschiedenen Drücken in Erscheinung treten, nebeneinander beobachtet und direkt verglichen werden.

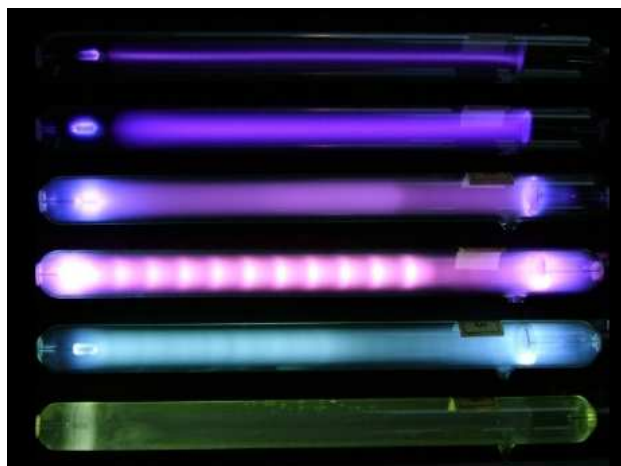


Abbildung 25: Vakuumskala nach Cross (Druck von oben nach unten abnehmend)
Entnommen aus der Präsentation der Weihnachtsvorlesung 2014 Gernot Pottlacher

❖ **Beobachtungen (jeweils von der Kathode Richtung Anode gehend)**

1. 10 Torr: Die Kathode leuchtet an der Spitze. Anschließend folgt ein schmaler, dunkler Zwischenraum. Auf diesen folgt ein schmaler, dunkelvioletter Faden, der sich bis zur Anodenspitze zieht und dort endet.
2. 5 Torr: Der obere Teil der Kathode leuchtet stärker. Der dunkle Zwischenraum bleibt. Der violette Faden ist heller und breiter. Er endet wieder an der Spitze der Anode.
3. 1,25 Torr: Der gesamte Kathodenraum ist beleuchtet. Die Kathodenspitze leuchtet dabei hell weiß. Der Dunkelraum ist verschwunden. Die Lichtsäule zieht sich annähernd homogen über die gesamte Röhre und reicht bis zur Anode, wobei auch der Anodenraum vollständig ausgeleuchtet ist. Lediglich die Farbe ändert sich im Verlauf leicht von bläulich zu violett.
4. 0,75 Torr: Eine Schichtenbildung ist zu sehen. Die Farbe ändert sich zu rosa mit bläulicher Umrandung.
5. 0,05 Torr: Die Farbe ist nun hellblau und die Schichtung verschwindet. Das helle Leuchten der Kathode ist stark zurückgegangen.
6. 0,025 Torr: Im Glasrohr ist kein Strahl mehr zu erkennen. Das Glas leuchtet grünlich, wobei die Intensität zur Anode hin schwächer wird.

❖ **Interpretation**

Die einzelnen Vakua der Skala wurden dabei nach verschiedenen Forschern benannt, die sich mit den verschiedenen Phänomenen in den Gasentladungsröhren beschäftigten und diese beschrieben.

1. „de la Rive-Vakuum“
2. „de la Rue-Vakuum“
3. Geißlersches homogenes Licht
4. „Gassiot-Vakuum“
5. „Tesla-Licht“
6. Crooks'sche Glasfluoreszenz oder auch „Röntgen-Vakuum“

❖ **Kommentar**

Mit dieser Versuchsanordnung lassen sich die unterschiedlichen Phänomene die bei verschieden hoher Evakuierung auftauchen, direkt nebeneinander zeigen und miteinander vergleichen.

3.3.8. Hittorfsche Umwegröhre

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Ruhmkorff

Hittorfsche Umwegröhre

❖ *Beschreibung*

Die Hittorfsche Umwegröhre ist so aufgebaut, dass die Entladung der Elektroden gleich über zwei verschiedene Wege möglich ist. Beim direkten Weg ist der Abstand zwischen den Elektroden sehr kurz gewählt, d.h. die Elektrodenspitzen stehen sich nahe gegenüber. Der zweite mögliche Entladungsweg geht über eine lange und verschnörkelte Kapillare, welchen man durchaus als Umweg, im Vergleich zum viel kürzeren ersten bezeichnen kann.

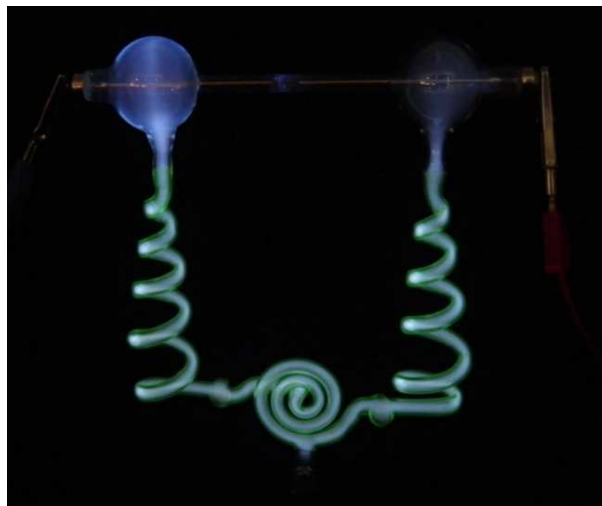


Abbildung 26: Hittorfsche Umwegröhre: Die Entladung findet über die lange Strecke statt

© historische Glasapparate und Lehrmittel Lutz Neumann (<http://www.trixum.de>)

❖ *Beobachtung*

Der kurze Abschnitt zwischen den Elektroden bleibt dunkel, während die gesamte Länge des langen Weges hell leuchtet.

❖ *Interpretation*

Entgegen der Erwartung, dass der lange Weg dunkel bleiben würde und nur im kurzen direkten Wegabschnitt zwischen den Elektroden eine Entladung sichtbar werden würde, leuchtet der gesamte zweite, viel längere Weg hell auf. Die Entladung findet also nicht über den direkten Weg statt, sondern läuft über den Umweg.

Grund dafür ist, dass das negative Glimmlicht und der Faradaysche Dunkelraum eine gewisse Mindestlänge benötigen, die aufgrund des kleinen Abstandes der Elektroden über den ersten Weg nicht gegeben ist.

Das hängt vor allem mit dem Vakuum in der Röhre zusammen. Bei normalem Atmosphärendruck würde eine Entladung über den kurzen Weg stattfinden, wobei es sich dabei nicht mehr um eine Glimmentladung, sondern um eine Funkenentladung handeln würde.

❖ *Kommentar*

Mit der Hittorfschen Umwegröhre kann man zeigen, dass (abhängig vom Druck) ein gewisser Mindestabstand für eine Glimmentladung notwendig ist.

3.3.9. Lecherleitung

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Netzgerät

Lecherleitung

Glasröhre (mit Neon gefüllt)

Glühlampe

❖ *Beschreibung*

Die Lecherleitung besteht aus zwei nebeneinander parallel verlaufenden langen Drähten. Diese können am Ende entweder miteinander verbunden sein oder aber auch offen verlaufen.

Gespeist wird der Aufbau von einem Netzgerät. Um möglichst gute Ergebnisse zu erzielen und schöne Effekte zeigen zu können, sollten die Eingangsfrequenzen möglichst hoch und variabel einstellbar sein.

Bei Betrieb wird als Erstes die Neonröhre auf die parallel verlaufenden Drähte gelegt und längs der Leitung hin und her bewegt. Anschließend wird selbiges mit einer Glühlampe wiederholt.

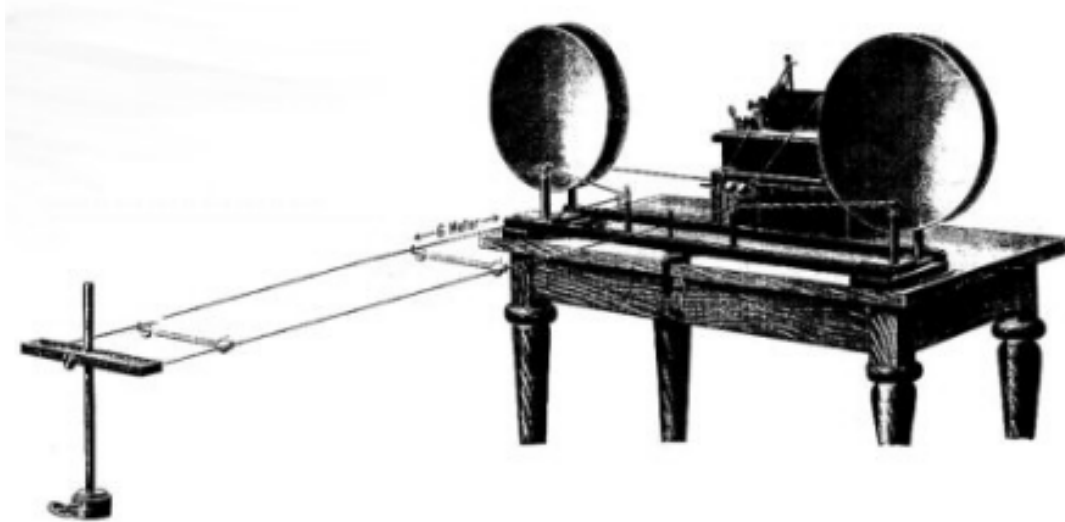


Abbildung 27: Lecherleitung mit „Hertzschem Oszillator“
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-2.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Wird die Neonröhre parallel auf die Leitung gelegt, werden helle Stellen sichtbar, die von dunklen unterbrochen werden. Beim Verschieben der Röhre längs der Leitung ist zu sehen, dass immer nur an speziellen Stellen auf der Leitung Teile der Röhre hell aufleuchten
2. Führt man denselben Versuch mit der Glühlampe durch, ist der gleiche Effekt, also ein abwechselndes Aufleuchten und Dunkelwerden beim Bewegen der Lampe längs der Leitung, sichtbar. Im Vergleich zum Versuch mit der Neonröhre, sind die leuchtenden Stellen verschoben.

❖ **Interpretation**

Beim Anlegen einer Wechselspannung, bzw. eines Wechselstroms bildet sich in der Leitung eine stehende Welle (oder sogenannte Hertzsche Wellen) innerhalb der Leitung aus.

1. Dieser wellenförmige Spannungserlauf in der Leitung, ist durch Spannungsbäuche, also Spannungsmaxima- und Minima gekennzeichnet, welche sich abwechselnd und wiederholend entlang der Leitung ziehen. Da das Eintreten einer Glimmentladung durch eine hohe Spannungsdifferenz und einer niedrigen Stromstärke gekennzeichnet ist, befinden sich die leuchtenden Stellen dort, an denen die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Drähten relativ groß sind, also ein Wellenmaximum im einen Draht auf ein Wellenminimum des anderen Drahtes trifft. An den dunklen Stellen tritt der umgekehrte Fall, ist die Spannungsdifferenz, zwischen den Drähten niedrig.
2. Da Strom und Spannungsverlauf phasenverschoben verlaufen, befinden sich die Strommaxima und -minima von den Spannungsmaxima und -minima, um eine halbe Wellenlänge versetzt in den Drähten. Aufgrund dessen, dass Glühlampen im Gegensatz zur Neonröhre bei höheren Stromstärken und damit geringen Spannungen aufleuchten, sind auch die lichten Stellen der beiden versetzt.

❖ **Kommentar**

Mit der Lecherleitung lässt sich der Strom- und Spannungsverlauf zeigen. Die Abstände der Strom- und Spannungsmaxima, bzw. -minima, lassen sich durch die eingestellte Frequenz beeinflussen. Dabei gilt, dass bei höheren Frequenzen, die stehenden Wellen auch geringere Wellenlängen aufweisen, was dazu führt, dass sich die eben genannten Abstände verringern.

3.3.10. Brownsche Röhre

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Netzgerät

Brownsche Röhre

❖ **Beschreibung**

Die Brownsche Röhre ist eine Kathodenstrahlröhre, die am vorderen Teil einer zylinderförmig verläuft und am hinteren Teil kegelförmig auseinandergeht. Im weiteren Verlauf des röhrenförmigen Abschnittes werden Elektronen von der Kathode, durch eine Hohlanode, die sich am hinteren Ende desselben Teils befindet, beschleunigt und zusätzlich strahlenförmig fokussiert. Nach der Anode folgt ein Abschnitt, indem sich rechteckige Kondensatorplatten befinden, die sich parallel

vertikal gegenüberstehen. Zwischen diesen, verläuft der Kathodenstrahl. An die Kondensatorplatten können Spannungsquellen angeschlossen werden. Am hinteren Ende des kegelförmigen Abschnittes ist das Glas mit einem fluoreszierenden Material beschichtet, um die Stelle sichtbar zu machen, wo der Strahl auftrifft.

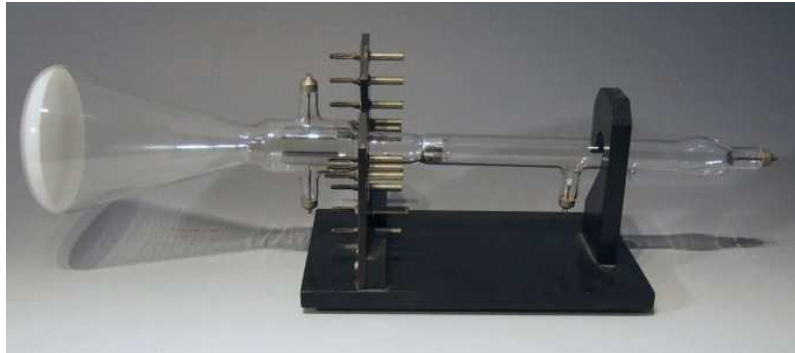


Abbildung 28: Brownsche Röhre (außer Betrieb)

© cristie.com (<http://www.crtsite.com/didactic%20crt.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Wird die Röhre eingeschaltet, ist in der Mitte zentriert ein grüner Punkt zu sehen.
2. Wird an den Kondensatorplatten eine Spannung angelegt, bei der sich der positive Pol oben und der negative Pol unten befindet, steht der Punkt, im Vergleich zum Betrieb ohne beladene Kondensatorplatten, weiter oben
3. Wird an den Kondensatorplatten eine Spannung angelegt, bei dem sich der positive Pol unten und der negative Pol oben befindet, steht der Punkt, im Vergleich zum Betrieb ohne beladene Kondensatorplatten, weiter unten

❖ **Interpretation**

1. Durch den Kathodenstrahl wird an der Stelle, wo dieser auftrifft, der Schirm zur Fluoreszenz angeregt
2. Da der Kathodenstrahl aus Elektronen besteht, welche negativ geladen sind, wird dieser beim Vorbeilaufen an den Kondensatorplatten in Richtung positiver Ladung abgelenkt. Der Effekt beruht auf dem Prinzip der Abstoßung gleichnamiger Ladungen, bzw. der Anziehung ungleichnamiger. Die Kraft, welche dabei auf die Elektronen wirkt, ist die sogenannte Coulomb-Kraft.
3. Siehe 2.

❖ *Kommentar*

Die Röhre stellt das erste primitive Oszilloskop dar. Die verwendete Technik bildet außerdem die Grundlage des Röhrenfernsehers.

3.3.11. Fadenstrahlrohr

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Netzgerät

Fadenstrahlrohr

Helmholtz-Spulenpaar

❖ *Beschreibung*

Das Fadenstrahlrohr besteht aus einer kugelförmigen Gasentladungsröhre, in welche eine Glühkathode eingeschmolzen ist. Die Anode ist hohl und dient einerseits zur Beschleunigung der Elektronen. Sie führt weiters zu einer besseren Fokussierung derselben. Durch die Helmholtzspulen, welche parallel um die Röhre angeordnet sind, wird ein homogenes Magnetfeld erzeugt, welches über den Strom, der über die Spulen läuft, reguliert werden kann.



Abbildung 29: Fadenstrahlrohr mit Elektronenstrahl (weiß)

© Leybold Didactic (<http://www.ld-didactic.de/>)

❖ **Beobachtung**

1. Beim Betrieb der Röhre ist ein fadenförmiger, gebündelter Strahl zu erkennen, der geradlinig verläuft
2. Werden die Spulen hinzugeschaltet, wird der Strahl abgelenkt
3. Durch Justieren der Stärke des Stromes, welcher durch die Spulen fließt, lässt sich die Stärke der Ablenkung beeinflussen. So kann der Strahl auch auf eine Kreis- bzw. Helixbahn gebracht werden.

❖ **Interpretation**

1. Elektronenstrahl bzw. Elektronenstrahl
2. Durch den Strom, der durch die Spulen fließt, baut sich ein homogenes Magnetfeld auf, welches den Elektronenstrahl ablenkt. Der Grund dafür ist die Lorentzkraft, welche von der Ladung der Teilchen (in diesem Fall Elektronen) der Geschwindigkeit derselben, sowie der Stärke des Magnetfeldes abhängt.
3. Wie stark der Elektronenstrahl abgelenkt wird, hängt von der Stärke des Magnetfeldes ab. Fließt ein größerer Strom durch die Spule, verursacht dies ein größeres Magnetfeld, wodurch die Lorentzkraft, die auf die Elektronen wirkt, steigt.

❖ **Kommentar**

Der Versuch eignet sich hervorragend, um die Lorentzkraft zu veranschaulichen.

Außerdem stellt er eine Möglichkeit dar, das Verhältnis von Ladung zu Elektronenmasse e/m zu bestimmen.

3.3.12. Elektronenbeugung

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Netzgerät

Elektronenbeugungsröhre

❖ **Beschreibung**

In einer evakuierten Röhre werden mittels einer beheizten Kathode freie Elektronen erzeugt. Diese werden durch eine angelegte Spannung stark beschleunigt und mithilfe einer Lochelektrode zu einem Elektronenstrahl geformt. In die Bahn des Strahls wird eine hauchdünne Graphitschicht platziert, welche vom Strahl durchdrungen wird. Am schirmförmigen Ende der Röhre ist das Glas mit einem fluoreszierenden Stoff beschichtet.



Abbildung 30: Ringförmiges Interferenzmuster, welches durch die Beugung der Elektronen zustande kommt

Weihnachtsvorlesung 2014, Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz

❖ **Beobachtung**

1. Beim Betrieb der Röhre ist mittig ein Punkt zu erkennen, welcher von hellen und dunklen konzentrischen Kreisen umringt wird.
2. Wird die Beschleunigungsspannung erhöht, werden die konzentrischen Kreise kleiner.

❖ **Interpretation**

1. Die Graphitschicht stellt mikroskopisch ein feines Gitter dar. Durch die Welleneigenschaft der Elektronen werden diese am Gitter gebeugt, wobei ein typisches Beugungsmuster in Form von Ringen entsteht.
2. Durch die Erhöhung der Beschleunigungsspannung erreichen die Elektronen höhere Geschwindigkeiten. Gleichzeitig erniedrigt sich dadurch ihre „de-Broglie“-Wellenlänge. Da bei kleinen Wellenlängen der Beugungseffekt weniger stark ist, sind auch bei schnelleren Elektronen, die eine geringere Wellenlänge aufweisen, kleinere Kreise zu beobachten.

❖ **Kommentar**

In der Vorlesung wurde der Versuch etwas erweitert gezeigt. Dabei wurde die Beschleunigungsspannung direkt gemessen. Damit konnte mithilfe der Formel

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot U \cdot e}} \quad (14)$$

(mit λ_{DB} = „de-Broglie“- Wellenlänge, h = Planksches Wirkungsquantum, m = Masse, U = Spannung, e = Ladung des Elektrons (Elementarladung))

die de Broglie – Wellenlänge bestimmt werden.

3.3.13. Feldelektronenmikroskop

❖ **Materialien/verwendete Geräte**

Netzgerät

Feldelektronenmikroskop

❖ **Beschreibung**

Die Besonderheit dieser Röhre ist im Aufbau der Elektroden zu finden. Der vordere Teil der Kathode ist dabei ein sogenannter Einkristall, welcher vorne kegelförmig zusammenläuft. Der Einkristall ist durch ein Kristallgitter charakterisiert, wobei sich am Rand der Gitterebene nur ein einzelnes Atom befindet. Dieser einatomige Rand bildet gleichzeitig die Spitze der Kathode, wodurch diese extrem fein wird. Die Anode ist auf dem hinteren schirmförmigen Ende der Röhre lokalisiert, wobei das Glas im Anodenbereich mit einem fluoreszierenden Stoff beschichtet ist.

Beim Betrieb entsteht an der extrem feinen Kathodenspitze eine vergleichsweise (sehr) hohe Spannung (aufgrund des Quotienten von Spannung und Radius), wodurch aus dieser Elektronen herausgerissen werden, welche anschließend in Richtung Schirm beschleunigt werden und dort Fluoreszenz anregen

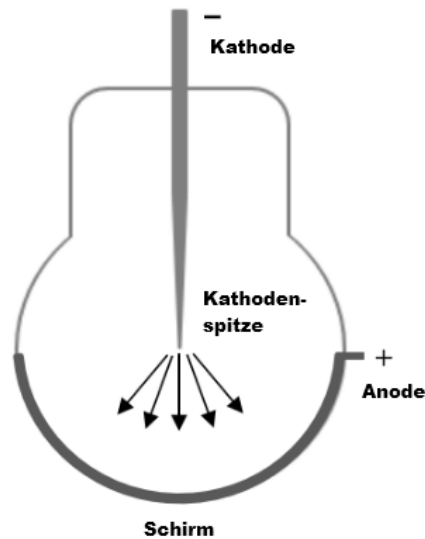


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Feldelektronenmikroskops

❖ **Beobachtung**

Beim Betrieb der Röhre sind helle Felder und dunkle Felder zu erkennen, die musterartig angeordnet sind

❖ **Interpretation**

Das Muster am Schirm ist die vergrößerte Projektion der Netzebene, die von den Atomen am Rand des Einkristalls gebildet wird. Dieses Bild entsteht wiederum durch die herausgerissenen Elektronen der einzelnen Randatome, welche durch die Anode zum Fluoreszenzschirm beschleunigt werden und dort beim Auftreffen eine Anregung des Fluoreszenzstoffes und die damit verbundene Lichtemission an den jeweiligen Stellen verursachen.

❖ **Kommentar**

Mithilfe des Versuches können Informationen auf atomarer Ebene erhalten werden. Von den Ergebnissen können Schlüsse zur Gitterstruktur der jeweiligen verwendeten Metalle gezogen werden.

3.3.14. Röntgenröhre

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Funkeninduktor

Röntgenröhre

Elektrometer

Fluoreszenzschirm

❖ *Beschreibung*

Die Röntgenröhre ist im Aufbau röhrenförmig, mit einer großen, mittig liegenden, kugelförmigen Ausbuchtung. Die Kathode ist eine Glühkathode und befindet sich am Anfang des röhrenförmigen Teils. Die Anode reicht vom anderen Ende bis in die Mitte des kugelförmigen Abschnittes. An der Spitze von dieser befindet sich ein Metallstück, welches in einem Winkel von ca. 45° abgeschrägt ist. Innerhalb der Röhre herrscht ein extrem niedriger Druck.

Am Anfang des Versuches können allgemeine Beobachtungen gemacht werden. Anschließend wird das (geladene) Elektrometer zur Röhre gestellt. Im weiteren Verlauf wird ein Fluoreszenzschirm zur Röhre gestellt und Gegenstände zwischen diesem und der Röhre platziert.



Abbildung 32: Röntgenröhre (außer Betrieb)

© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz

❖ **Beobachtung**

1. Das Glas beginnt grünlich zu leuchten.
2. Das Elektrometer wird entladen.
3. Platziert man Gegenstände zwischen der Röhre und dem Fluoreszenzschirm, kann man den Schatten der Gegenstände auf diesem Erkennen. Dieser ist umso schärfer und deutlicher, je größer die Dichte des Gegenstandes ist.

❖ **Interpretation**

1. Das grüne Fluoreszieren des Glases kommt durch das Auftreffen von Elektronen auf die Glaswand zu Stande. Dieses Leuchten weist auf das Vorhandensein von Röntgenstrahlung hin.
2. Durch die hohe Energie der Röntgenstrahlung werden aus dem Metall des Elektrometers Elektronen herausgeschlagen.
3. Die Röntgenstrahlung breitet sich geradlinig aus. Stoffe mit größerer Dichte können weniger gut durchdrungen werden – die Abschirmbarkeit der Strahlung steigt mit der Dichte des zu durchdringenden Materials.

❖ **Kommentar**

Die Röntgenstrahlung selbst ist bei dem Versuch nicht zu sehen, da diese außerhalb des Wellenlängenbereiches des für uns sichtbaren Spektrums liegt. Diese kann jedoch mithilfe einer Fotoplatte oder diversen fluoreszierenden Stoffen nachgewiesen werden.

Durch das hohe Vakuum in der Röhre werden die Elektronen sehr stark beschleunigt und erreichen damit sehr hohe kinetische Energien. Treffen diese anschließend auf das Metall an der Spitze der Anode auf, werden die Atome im Metall so stark angeregt, dass diese anschließend elektromagnetische Strahlung im Röntgenbereich emittieren.

Achtung: Röntgenstrahlung!

3.4. Zusatz

3.4.1. Crookes'sche Lichtmühle

❖ *Materialien/verwendete Geräte*

Radiometer nach Crookes

Lichtquelle

Kühlmittel (Kohlendioxidfeuerlöscher)

❖ *Beschreibung*

Der Aufbau der Crookes'schen Lichtmühle (auch Radiometer genannt) ist relativ simpel. Sie besteht aus einem evakuierten kugelförmigen Glaskolben, in dem sich in der Mitte ein windmühlenartiges Rad befindet, welches sich horizontal drehen lässt. Die Flügel des Rades sind dabei auf einer Seite schwarz beschichtet (die zweite Seite bleibt blank). Im ersten Teil des Versuches wird die Lichtmühle mit einer Lichtquelle bestrahlt und das Rad beobachtet. Im zweiten Teil wird die Mühle gekühlt. In der Vorlesung wurde dazu ein CO₂-Löscher verwendet.



Abbildung 33: Radiometer nach Crookes
© cristie.com (<http://www.crtsite.com/page7-4.html>)

❖ **Beobachtung**

1. Beim Bestrahlen der Lichtmühle mit der Lichtquelle beginnt sich das Rad zu drehen. Die treibende Kraft scheint dabei auf die schwarze Seite der Platten zu wirken.
2. Wird die Apparatur gekühlt, dreht sich das Rad in die entgegengesetzte Richtung. Die treibende Kraft scheint nun auf die blanke Seite der Platten zu wirken.

❖ **Interpretation**

1. Da die schwarzen Seiten einem schwarzen Strahler gleichen, absorbieren diese nahezu vollständig das einfallende Licht, was zu einer relativ schnellen Erwärmung führt. Die blanken Seiten hingegen reflektieren einen großen Teil des einfallenden Lichts, wodurch eine Temperaturzunahme in einem viel geringeren Ausmaß stattfindet.
Da sich in der Röhre noch eine gewisse Restzahl an Teilchen befindet, werden diese beim Auftreffen auf die erwärmten schwarzen Plattenseiten erhitzt und damit beschleunigt. Aufgrund der Impulserhaltung erfahren die Platten dadurch in die entgegengesetzte Richtung der abprallenden Teilchen eine Beschleunigung.
2. Beim Kühlen ist der umgekehrte Effekt beobachtbar. Durch die kältere Umgebung geben die Platten (aufgrund des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre) Wärme ab. Diese Abgabe erfolgt auf den schwarzen Plattenseiten schneller, wodurch diese auch stärker abkühlen als die blanken Seiten. Durch die nun höhere Temperatur auf der blanken Seite werden nun auf dieser Seite die auftreffenden Restteilchen stärker erwärmt, wodurch das Rad beim Abprallen der Teilchen eine Beschleunigung in die andere Richtung erfährt.

❖ **Kommentar**

Crookes erklärte sich die Drehung des Rades mit dem Strahlungsdruck der durch „Lichtteilchen“ verursacht wird.

Die Kühlung der Mühle im zweiten Teil des Experiments versetzte das Publikum der Vorlesung in Staunen, da bis zu jenem Zeitpunkt der Versuch in dieser Form kaum bekannt war.

4. Fazit

Im Zuge der Arbeit wurde die Bedeutung der Ergebnisse und Erfolge der Gasentladungsforschung aufgezeigt. Die breite Anwendungsmöglichkeit im technischen Bereich ist schon bei den Röhren, welche bereits im 19. Jahrhundert im wissenschaftlichen und privaten Bereich verwendet wurden, sichtbar.

Betrachten wir die einzelnen Abschnitte der Arbeit noch einmal rückblickend, wird auch ein historischer Charakter erkennbar. Dieser zeigt sich zum ersten Mal im Unterkapitel „1.3. Ausgewählte Betriebsgeräte“. Schon in diesem wird erkennbar, wie sich ein zunehmendes Verständnis im Umgang und der Anwendung bezüglich der Elektrizität im Verlauf der Zeit entwickelt. Von einfachen primitiven Kondensatoren, wie der Leydener Flasche, oder den ersten Batterien wie dem Chromsäureelement oder der Voltaschen Säule führt der Weg weiter zu ersten strom- und spannungserzeugenden Maschinen wie Influenzmaschinen oder den Bandgeneratoren. Nebenbei entwickelten sich Geräte wie der Funkeninduktor oder der Tesla-Transformator, welche verstärkt ein gezieltes Regeln und Formen des elektrischen Flusses möglich machten. Den letzten Halt auf dieser Reise bilden in dieser Arbeit moderne, komplex aufgebaute Netzgeräte bzw. der Mikrowellenherd, welcher nicht wirklich als herkömmliches Mittel zur Erzeugung von Elektrizität verwendet wird. Dennoch ist auch durch diesen erkennbar, mit welcher enormen Geschwindigkeit wir uns in der Entwicklung und technischen Fortschritt bewegen.

In Kapitel zwei, welches in enger Verbindung mit dem dritten Kapitel steht, kann neben den allgemeinen Informationen zu den jeweiligen Forschern, ebenfalls die Entwicklung in der Versuchs- und Experimentierpraxis erkannt werden. Neben den Lebenszeiten der genannten Personen bieten dabei eine Betrachtung der Komplexität der Versuchsanordnungen und vor allem die jeweiligen Ziele, die mit diesen zu klären versucht worden waren, gute Anhaltspunkte, um den Fortschritt im zeitlichen Verlauf zu erkennen und zu verstehen.

Durch die genauere Befassung mit dem dritten Kapitel wird neben den grundlegenden Theorien der Gasentladungsphysik auch ein allgemeines Verständnis der Elektrizität gefördert. Der Fluss von Elektronen als Resultat einer angelegten Spannung (also einem Potentialunterschied), oder die Ablenkbarkeit von fließenden Ladungen mittels Magnetfeldern, sind nur einzelne Beispiele dafür.

Zusammengefasst kann man sagen, dass sich die Arbeit nicht nur auf die Gasentladungsröhren und die Experimente mit diesen beschränkt. So wird ein neuer Zugang zu den Methoden der Forschung und der technischen Entwicklung, ermöglicht. Aber auch der didaktische Aspekt, der sich mit den Röhren, speziell bei den Crookes'schen Röhren, eröffnet, sollte nicht übersehen werden.

5. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER EINZELNEN ABSCHNITTE DER GLIMMENTLADUNG	13
(zum Teil nachempfunden aus dem Skript von Jäger, H. Elektrische Gasentladungen. Graz, Steiermark, Österreich	
ABBILDUNG 2: CHROMSÄUREELEMENT	19
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page8.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 3: FUNKENINDUKTOR MIT EINGESPANNTER GASENTLADUNGSRÖHRE	21
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page8.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER INFLUENZMASCHINE	23
© Bergmann, L., Schaefer C. (1999). Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2. Elektromagnetismus und Optik. Berlin: De Gruyter S.28	
ABBILDUNG 5: GEIßLERRÖHRE ALS ZIEROBJEKT	48
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-3.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 6: GEIßLERRÖHRE MIT EINER KAPILLAREN VERENGUNG UND FLUORESZIERENDER FLÜSSIGKEIT... 50	
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 7: GEIßLERRÖHRE MIT REGELMÄßIGEN VERENGUNGEN UND FLUORESZIERENDER FLÜSSIGKEIT .. 51	
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 8: GEIßLERRÖHRE MIT KUNSTVOLL GEWUNDENEN KAPILLARTEILEN UND VERSCHIEDENEN FLUORESZIERENDEN FLÜSSIGKEITEN..... 53	
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 9: GEIßLERRÖHRE MIT FLUORESZENZSTOFF (AUßER BETRIEB)	55
© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz	
ABBILDUNG 10: GEIßLERRÖHRE MIT „BLUMENSTRAUßBUKETT“ AUS FLUORESZIERENDEN MATERIALIEN	56
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-3.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 11: GEIßLERRÖHRE MIT FLUORESZIERENDEM STEIN (AUßER BETRIEB)	58
© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz	
ABBILDUNG 12: RÖHRE CROOKES NR. 14	60
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-3.html abgerufen 02.06.2016)	

ABBILDUNG 13: FLUORESZENZRÖHRE AUS URANGLAS.....	62
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 14: RÖHRE CROOKES NR. 6	63
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 15: RÖHRE CROOKES NR. 9	65
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 16: RÖHRE CROOKES NR. 7A, HOHER DRUCK	66
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 17: RÖHRE CROOKES NR. 7B, NIEDRIGER DRUCK	67
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 18: RÖHRE CROOKES NR. 21	68
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 19: RÖHRE CROOKES NR. 1	70
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 20: LINKS: KANALSTRAHLRÖHRE NACH WIEN (AUßER BETRIEB) RECHTS: KANALSTRAHLEN.....	71
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-2.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 21: AUFGRUND DER EINSEITIGEN ENTLADUNG LEUCHTET NUR EINE SEITE AUF, DIE ANDERE BLEIBT DUNKEL.....	73
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 22: ELEKTRONENSTRAHL IN DER RÖHRE NACH DE LA RIVE.....	74
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 23: ENTLADUNG IN DER GREINACHER RÖHRE (LANGZEITAUFNahme)	76
© historische Glasapparate und Lehrmittel Lutz Neumann (http://cdn02.trixum.de/upload2/7400/7393/2/237429086639f4d1a15529350d53cb73a.jpg abgerufen 13.06.2016)	
ABBILDUNG 24: GASENTLADUNGSRÖHRE MIT ANGESCHLOSSENER VAKUUMPUMPE.....	78
© biosensor-physik.de http://www.biosensor-physik.de/biosensor/gasentladung.htm abgerufen 13.06.2016	
ABBILDUNG 25: VAKUUMSKALA NACH CROSS (DRUCK VON OBEN NACH UNTEN ABNEHMEND).....	79
Entnommen aus der Präsentation der Weihnachtsvorlesung 2014 Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz	

ABBILDUNG 26: HITTORFSCHES UMWEGRÖHRE: DIE ENTLADUNG FINDET ÜBER DIE LANGE STRECKE STATT	81
© historische Glasapparate und Lehrmittel Lutz Neumann (http://cdn03.trixum.de/upload2/7400/7393/2/2561a51b7d966eac3aa6cc32e462a3a6f.jpg abgerufen 13.06.2016)	
ABBILDUNG 27: LECHERLEITUNG MIT „HERTZSCHEM OSZILLATOR“	83
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page6-4.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 28: BROWNSCHE RÖHRE (AUßER BETRIEB)	85
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/didactic%20crt.html abgerufen 02.06.2016)	
ABBILDUNG 29: FADENSTRAHLROHR MIT ELEKTRONENSTRAHL (WEIß).....	86
© Leybold Didactic (http://www.ld-didactic.de/)	
ABBILDUNG 30: RINGFÖRMIGES INTERFERENZMUSTER, WELCHES DURCH DIE BEUGUNG DER ELEKTRONEN ZUSTANDE KOMMT	88
© Weihnachtsvorlesung 2014 Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz	
ABBILDUNG 31: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FUNKTIONSWEISE EINES FELDELEKTRONENMIKROSKOPS	90
© Manuel Feldbacher (Autor)	
ABBILDUNG 32: RÖNTGENRÖHRE (AUßER BETRIEB)	91
© Gernot Pottlacher, Technische Universität Graz	
ABBILDUNG 33: RADIOMETER NACH CROOKES.....	93
© und entnommen von cristie.com (http://www.crtsite.com/page7-4.html abgerufen 02.06.2016)	

6. Literaturverzeichnis

Akademischer Verlag, H. (23. 03 2016). *spektrum.de*. (Von <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/chromsaeureelement/2399> abgerufen)

Ayrton, W. E. (1891). *Practical Electricity*. London: Cassel.

Bock, R. (2008). *Elektrische Entladungen in Gasen bei vermindertem Druck*. Münster/Westf.: PRINCIPAL Verlag.

Charles E. Mortimer, U. M. (2010). *Chemie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

chemgapedia.de. (25. 03 2016). (Von [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/16/elektrizitaetslehre/elektrostatik/influenzmaschine.vlu/Page/vsc/de/ph/16/elektrizitaetslehre/elektrostatik/influenzmaschine/vscml/influenzmaschine_funktion.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/16/elektrizitaetslehre/elektrostatik/influenzmaschine/influenzmaschine.vlu/Page/vsc/de/ph/16/elektrizitaetslehre/elektrostatik/influenzmaschine/vscml/influenzmaschine_funktion.vscml.html) abgerufen)

Demtröder, W. (2009). *Experimentalphysik 2*. Kaiserslautern: Springer.

Dibner, B. (1964). *Alessandro Volta and the electric battery*. Franclin Watts.

DiLuciano, M. (23. 03 2016). *grenetcell.com*. (Von <http://www.grenetcell.com/Home.html> abgerufen)

Falk Müller, G. D. (2006). 1857 – Julius Plücker, Heinrich Geißler und der Beginn systematischer Gasentladungsforschung in Deutschland. *N.T.M.* 14, S. 26-45.

Faraday, M. (. (13. 02 2016). *Royal Society - Philosophical Transactions*. (Von <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/> abgerufen)

Frauenberger, F. (1988). Von Röhren und Strahlen. *Kultur und Technik 1*, S. 28-37.

Jäger, H. (2007). Elektrische Gasentladungen. *Elektrische Gasentladungen*. Graz, Steiermarkt, Österreich.

Kind, D. (1978). *Einführung in die Hochspannungs-Versuchstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

leifiphysik.de. (24. 05 2016). (Von <http://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/transformator-fernuebertragung/ausblick/teslatransformator> abgerufen)

Lexikon der Physik. (23. 05 2016). (Von <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/kanalstrahlen/7750> abgerufen)

Meyer, T. (1858). *Beobachtungen über das geschichtete elektrische Licht sowie über den merkwürdigen Einfluss des Magneten auf dasselbe nebst Anleitung zur experimentellen Darstellung der fraglichen Erscheinungen*. Berlin: Julius Springer.

- Müller, F. (2004). *Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert*. Berlin Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik.
- Norbert Großberger, E. B. (27. 03 2016). *physik-box.de*. (Von <http://www.physik-box.de/tesla/teslatrafo.pdf> abgerufen)
- Plücker, J. (1857). Über die Einwirkung des Magneten auf die elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen. *Annalen der Physik und Chemie*, S. 88-106.
- Queiroz, A. C. (25. 03 2016). *coe.ufrj.br*. (Von <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/electrostatic.html> abgerufen)
- Riecke, E. (1923). *Lehrbuch der Physik, Band 1: Mechanik und Akustik, Wärme, Optik*. Berlin und Leipzig: Walter de Gruyter und Co.
- Röntgen, W. (1898). Ueber eine neue Art von Strahlen. *Annalen der Physik und Chemie*, S. 1-37.
- Rößler, M. (27. 03 2016). *markus.tizara.de*. (Von <http://markus.tizara.de/docs/Elektronik/tesla-fa.pdf> abgerufen)
- spektrum.de*. (02. 05 2016). (Von <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/gasentladungsroehre/5558> abgerufen)
- Weisstein, E. W. (25. 03 2016). *scienceworld.wolfram.com*. (Von <http://scienceworld.wolfram.com/physics/WimshurstMachine.html> abgerufen)
- Wilke, A. (1893). *Die Elektrizität, ihre Erzeugung und ihre Anwendung in Industrie und Gewerbe*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- William Crookes, F. (1879). *Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand*. Sheffield: Dr. Heinrich Gretschel.
- Zoth, C. (21. 03 2016). *Universität Regensburg, Fakultät für Physik*. (Von http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/brack/seminars/EDS_WS08/EDS-3.pdf abgerufen)