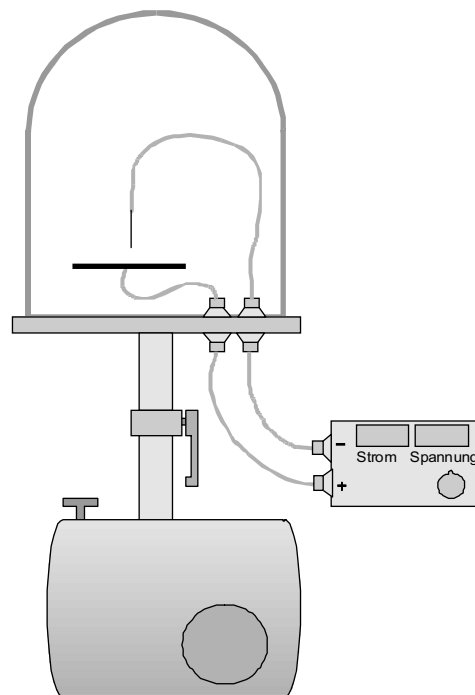


# Untersuchung von Leuchterscheinungen in verdünnten Gasen



**Wettbewerb "Jugend Forscht" 2001**

**Thomas Stegmaier (20 Jahre)**

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"  
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg  
Leitung: StD Thomas Biedermann**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1 Gasentladungen .....	3
1.2 Thermisches Leuchten .....	3
<b>2 Das Lichtschwert - Ein einfacher Versuch .....</b>	<b>4</b>
2.1 Funkenentladungen .....	4
2.2 Glimmentladung .....	5
2.3 Bogenentladung .....	6
<b>3. Verschiedene Entladungen .....</b>	<b>6</b>
3.1 Funkenentladung .....	8
3.2 Glimmentladung .....	9
3.3 Die Bogenentladung .....	10
3.4 Glimmentladung bei verschiedenen Drücken .....	11
<b>4. Anwendungen in der Praxis .....</b>	<b>12</b>
4.1 Glimmlampen .....	12
4.2 Natriumdampf lampen .....	12
4.3 Leuchtstoff lampen .....	13
<b>5. Was wurde bisher ausgeklammert .....</b>	<b>14</b>
5.1 Hochstromentladungen .....	14
5.2 Elektronenstrahlen (Fadenstrahlen) .....	14
5.3 Hohlraumkathoden .....	14
5.4 Hohlraumanoden .....	15
5.5 Spitzen und scharfe Kanten .....	15
<b>6. Fazit .....</b>	<b>15</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>16</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>16</b>

## 1. Einleitung

Ein einsamer Mensch steht am nördlichen Polarkreis und betrachtet den Himmel. Dunkel ist es und still. Mit einem Mal beginnt der Himmel über ihm zu leuchten, der einsame Mensch entdeckt rote, gelbe und grüne Linien, Wolken und Vorhänge aus farbigem Licht. Er sieht das Polarlicht (Abb 1).

In unseren Breiten sieht man so etwas nur sehr selten. Wer unglücklicherweise mitten in der Stadt den Nachthimmel bestaunen will, erblickt aufgrund der vielfältigen Straßenlampen, Reklame- und anderer Lichter wohl überhaupt nichts. Und still ist es noch weniger. Jedoch kommt das viele Licht, das ihm den freien Blick auf den Himmel versperrt, in vielen Fällen aus Lichtquellen, deren Lichterzeugung mit der des Polarlichtes verwandt ist.



Abb. 1: Ein Polarlicht in Alaska

Leuchtstofflampen, Neonröhren, die gelb-orange Straßenbeleuchtung (Natriumdampflampen), sowie die kleinen roten Glimmlampen (Abb. 2) nutzen alle die Tatsache, dass ein Gas bei geringem Druck anfangen kann zu leuchten, wenn man einen Strom durchleitet.

### 1.1 Gasentladungen



Abb. 2: Eine Glimmlampe (Länge: 25mm)

Das Fließen von elektrischem Strom in einem Gas nennt man Gasentladung, da hierbei elektrische Ladungen im Gas transportiert werden. Dies benötigt nicht unbedingt einen geringen Druck, es kann auch beim normalem Luftdruck und sogar bei Überdruck geschehen. So etwa bei einem Lichtbogen, wie er zum Elektroschweißen genutzt wird, bei Funken oder bei einem Blitz.

Bei Gasentladungen entsteht meistens an einer Stelle Licht, jedoch gibt es auch Gasentladungen bei geringen Drücken, welche überhaupt keine oder keine sichtbare Leuchterscheinung zur Folge haben (etwa die sogenannte Townsend-Entladung).

Bei meiner Arbeit betrachte ich jedoch nur Gasentladungen bei geringen Drücken, und von diesen auch nur die, welche direkt sichtbare Leuchterscheinungen zur Folge haben. Ferner beschränke ich mich bei dem verwendeten Gas der Einfachheit halber (vorläufig) auf Luft.

### 1.2 Thermisches Leuchten

Jeder Stoff leuchtet, wenn man ihn stark genug erhitzt. Sichtbares Licht entsteht dann bei Temperaturen ab etwa  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1]. Dieses „Thermische Leuchten“ gibt es auch in Gasen, sofern sie mindestens die erwähnte Temperatur besitzen. Blitze leuchten auf diese Weise, da sie durch einen sehr hohen Strom die Luft auf Temperaturen von mehreren Tausend Kelvin erhitzen und mit der hohen Temperatur ein extrem hoher Luftdruck entsteht. Thermisches Leuchten gibt es allerdings auch bei niedrigen Drücken, etwa in der Korona der Sonne (sieht man z.B. bei einer Sonnenfinsternis).

## 2 Das Lichtschwert - Ein einfacher Versuch

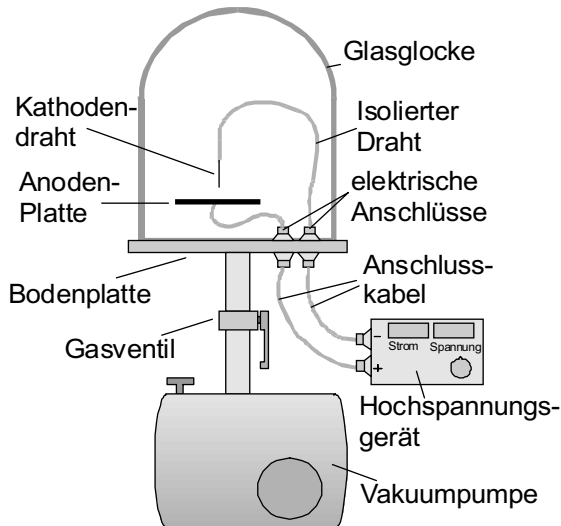


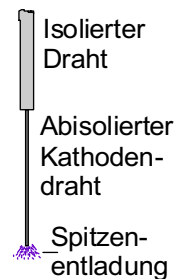
Abb 3: Der Aufbau im Überblick

Im folgenden Versuch werden zunächst nur die auftretenden Leuchterscheinungen kurz beschrieben und benannt, die nähere Erläuterung und Untersuchung der jeweiligen Leuchterscheinung folgt im 3. Kapitel. In einer noch luftgefüllten Vakuumkammer wird ein Draht etwa 2 cm vor einer metallenen Platte senkrecht zu dieser angebracht (Abb. 3). Die vorderen 4,5 cm ist der Draht blank (abisoliert), das andere Ende wird aus der Kammer herausgeführt. Zwischen dem Draht und der Platte wird eine Spannung von etwa 3 kV angelegt. Der Draht ist an den negativen Ausgang der Spannungsquelle angeschlossen und damit eine **Kathode**, der Boden an die positive Seite der Spannungsquelle und damit ein **Anode**. Mittels einer

Vakuumpumpe wird jetzt durch einen Flansch langsam die Luft aus dem Innern der Vakuumkammer herausgepumpt.

### 2.1 Funkenentladungen

Der Druck wird kontinuierlich geringer, und nach einer Weile erscheint an der Spitze des Drahtes eine schwache, violette Leuchterscheinung, die kegelförmig aus der Spitze austritt. Diese Leuchterscheinung bezeichnet man als **Spitzenentladung** (Abb. 4a). Manchmal entsteht auf dem Boden zusätzlich noch ein violetter sehr heller **Leuchtpunkt**. Bei noch geringerem Druck „zündet“ eine violette Entladung zwischen der Spitze des Drahtes und einem Punkt auf dem Boden. Sie entpuppt sich als Folge sehr vieler einzelner **Funkenentladungen** wie es sie bei Normaldruck auch gibt (Abb. 4b). Im Gegensatz zu einer normalen



Anodenplatte

Abb 4a: Spitzenentladung

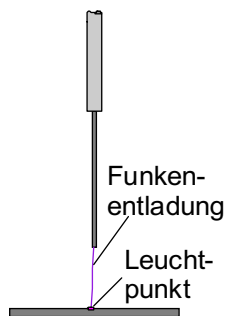


Abb 4b: Funkenentladung

Bogenentladung (siehe unten) bricht bei einer Funkenentladung die Spannung zusammen. Mit weiter abnehmendem Druck weitet sich der vorher hauchdünne, leuchtende Entladungskanal immer mehr auf, bis er einen Durchmesser von mehreren Millimetern erreicht hat. Mit dem Unterschreiten eines bestimmten Druckes tritt keine Funkenentladung mehr auf.

Mit einem etwas leistungsfähigeren Hochspannungsgerät läßt sich das stetige Zusammenbrechen der Spannung bei einem Funken beschränken, wobei die Funkenentladung durch eine andere Entladung ersetzt wird.

## 2.2 Glimmentladung

Um die Glimmentladung und die dabei auftretenden Leuchterscheinungen geht es im Großteil meiner Arbeit. Die unmittelbare Umgebung der Drahtspitze zeigt ein blauviolett leuchtendes Leuchten zu den Seiten und nach vorne hin. Dieses Leuchten ist das sogenannte **Glimmlicht** (Abb. 5a). Es ist ein Teil von mehreren

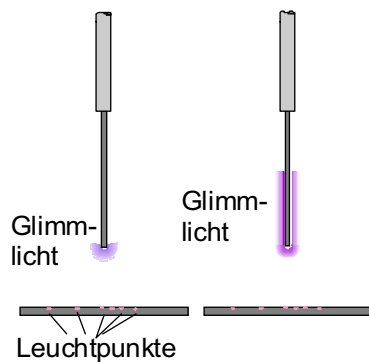


Abb 5: Glimmlicht und Leuchtpunkte

Leuchterscheinungen, die bei der **Glimmentladung** auftreten. Der Boden hingegen besitzt an vielen Stellen einzelne, sehr helle lilafarbene **Leuchtpunkte**. Mit dem Erscheinen des Glimmlichts bricht die Spannung auf etwa 400 bis 450 V ein. Interessant ist dabei, dass dieser Wert beinahe konstant bleibt, nur der Strom lässt sich erhöhen. Sobald die Zündung der Glimmentladung erfolgt ist, macht nur eine Steuerung des Stroms noch Sinn (dazu später mehr). Die Erhöhung des Stromes hat zur Folge, dass das Glimmlicht heller wird und die Drahtkathode „hinaufwandert“ und damit eine größere Fläche bedeckt (Abb. 5b). Unterschreitet man eine bestimmte Stromschwelle (ca. 0,2 mA) fängt das Glimmlicht an zu flackern und erlischt.

Über der Platte entsteht eine weiße, in den Raum ragende flächige Leuchterscheinung, die sogenannte **positive Säule** [2]. Alternativ treten manchmal auf dem Boden an einigen Stellen fahle weiße Trichter auf (Abb. 6). In einigen Fällen sind diese geschichtet. Sie treten an Stelle der Leuchtpunkte.

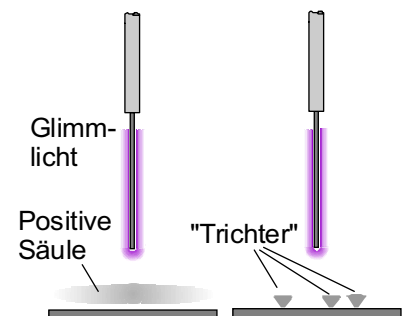


Abb 6: positive Säule und Trichter

Erniedrigt man den Druck weiter, ändert sich die Tiefe der Leuchterscheinung, sie nimmt einen immer größeren Durchmesser an. Gleichzeitig wandert das Glimmlicht wie vorher schon die Drahtkathode hinauf, bis es diese vollständig bedeckt. Eine Erhöhung der Spannung ist nun möglich. (Für alle Star Wars Fans: Die Drahtkathode wirkt jetzt aufgrund der Glimmerscheinung wie ein Lichtschwert, vor allem da man es aus- und einfahren kann ;-)

Mit dem zunehmenden Durchmesser des Glimmlichts zeigt sich eine Feinstruktur (Abb. 7). Direkt auf der Oberfläche des Drahtes leuchtet eine sehr dünne rote Lichthaut, das **Kathodenlicht**. Zwischen

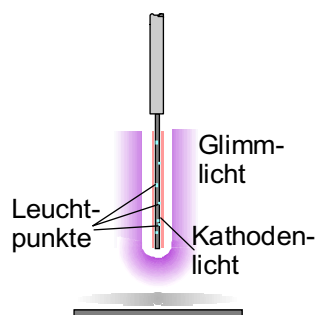


Abb 7: Feinstruktur der Glimmentladung

diesem und der Glimmentladung erstreckt sich der verhältnismäßig dunkle **hittorfsche Dunkelraum**. Jenseits des abrupt einsetzenden und allmählich auslaufenden Glimmlichts erstreckt sich der **faradaysche Dunkelraum**, welcher durch die positive Säule begrenzt wird [3]. Außerdem blitzen auf der direkten Oberfläche der Kathode weiße Leuchtpunkte auf. Selten tritt eine spontane grünleuchtende Leuchterscheinung auf der Kathode ein.

Der abnehmende Druck ist verbunden mit einem allmählichen Verblässen der Leuchterscheinung. Beim Unterschreiten eines bestimmten Druckes bricht die gesamte Entladung zusammen.

## 2.3 Bogenentladung

Bei dem noch recht hohen Druck beim Einsetzen der Glimmentladung konnte ich durch kurzzeitiges Überlasten der Hochspannungsquelle noch eine weitere Entladung erzeugen. Auf dem Kathodendraht leuchten in diesem Fall zahlreiche sehr helle blauweiße und auf der Anodenplatte ebenso helle und zahlreiche rote Leuchtpunkte (Abb. 8). Sporadisch leuchtet die Kathodenoberfläche auch als nicht

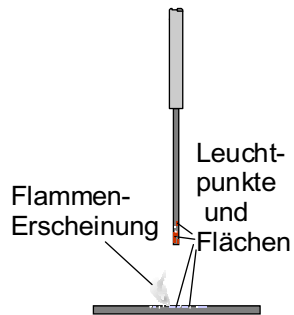


Abb.8: Bogenentladung

durchgängige Fläche weiß auf (kein Glimmlicht), die Anodenoberfläche ebenso. Für alle diese Leuchterscheinungen gilt, dass sie primär an der Spitze des Kathodendrahtes auftreten. Zwischen Kathodenende und Boden spannt sich in manchen Fällen ein schwacher lilafarbener Lichtbogen, dessen untere Seite auf der Anode wandert. An einer oder mehreren Stellen auf der Kathode kann eine weiße flammenähnliche Leuchterscheinung von etwa 1 cm Höhe entstehen. Diese Erscheinungen gehören bereits zu der Bogenentladung, die aus einer Glimmentladung entsteht, wenn der Strom weiter ansteigt. Da meine Hochspannungsquelle einen solchen Strom nicht liefern kann, habe ich diese Entladung

erst einmal nicht weiter untersucht. Auch war die Beobachtungszeit so kurz, dass ich möglicherweise einige Leuchterscheinungen übersehen habe. Im Folgenden werde ich daher diese Erscheinung hauptsächlich theoretisch behandeln.

## 3. Verschiedene Entladungen

Bei den vorherigen Versuchen zeigte sich, dass es bei einer Entladung bei tiefem Druck nicht auf die Spannung sondern auf den Strom ankommt. Hierzu fand sich in der Literatur [6] ein interessanter Graph (Abb. 9) Bei sehr kleinen Strömen von etwa 1 uA entsteht zunächst eine Townsend-Entladung, die ich hier jedoch übergehe, da sie keine Leuchterscheinungen hervorruft. Bei einer Steigerung geht der Verlauf über eine normale Glimmentladung und einer anomalen Glimmentladung hin zur Bogenentladung. Den gleichen Verlauf werde ich im Folgenden auch einschlagen, nur dass ich die Funkenentladung vorschiebe.

Der typische Mechanismus einer allgemeinen Entladung ist folgender [4]: Ein Elektron wird zufällig (z.B. durch Strahlung) aus einer Kathode oder einem Teilchen des Gases ausgelöst. Durch ein elektrisches Feld wird es beschleunigt. Es gibt dann zwei Gegenspieler:

- Das elektrische Feld  $E$
- Die mittlere freie Weglänge.

Das elektrische Feld versucht, das Elektron zu beschleunigen. Die Energie, die das Elektron aufnimmt, ist dann proportional zum zurückgelegten Weg  $d_f$ ,

$$W = F \cdot d = q \cdot E \cdot d_f \quad (1)$$

Um ein konstantes Feld zu erhalten, wird hier von einem Plattenkondensator ausgegangen. Die mittlere

freie Weglänge ist der Weg  $d_p$ , den das Elektron im Durchschnitt zurücklegt, bevor es seine Energie abgibt. Da der Druck proportional zur Dichte der Teilchen im Gas ist, und die Dichte der Teilchen umgekehrt proportional zur freien Weglänge ist, gilt

$$p_0 = k \cdot 1 / d_f \quad (2)$$

Die Energie, die die Elektronen in einem Gas an die Gasteilchen unter Einfluss eines elektrischen Feldes abgeben ist folglich

$$W_A = q \cdot E / p_0 \cdot k \quad (3)$$

Dies gilt natürlich nur solange keine Entladung erfolgt ist, die das elektrische Feld  $E$  hätte beeinflussen können. Unter der Bedingung, dass  $W_A$  groß genug ist, kann das Elektron ein Atom des Gases ionisieren und erzeugt dadurch ein freies Elektron und ein Ion (negative Ionisation findet meist nicht statt [5]). Beide sind jetzt in der Lage, ihrerseits weitere Ionen zu erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron ein Atom ionisiert, ist gaspezifisch. Ist die Ionisationsrate höher als die Rekombinationsrate, tritt eine Kettenreaktion ein. Der Ionisationskoeffizient  $\eta$  gibt an, wie viele Ionisationen von einem Elektron pro durchlaufenem Volt Spannung durchgeführt werden. Der Ionisationskoeffizient ist druckabhängig. Bei einem geringen Druck von einigen Pascal ist der Ionisationskoeffizient noch recht klein, da nicht genügend Gasatome zum Ionisieren vorhanden sind. Mit zunehmendem

Druck steigt auch der Ionisationskoeffizient bis auf ein Maximum. Jenseits von diesem nimmt die Ionisation ab, da die Elektronen aufgrund der geringeren freien Weglänge nicht genügend Energie aufnehmen können um eine Ionisation auszulösen.

Das bei Gasentladungen auftretende Leuchten ist darauf zurückzuführen, dass Atome des Gases angeregt werden können, auf ein höheres Energieniveau zu wechseln. Bei dem darauf folgenden Fall auf ein niedrigeres Energieniveau wird ein Lichtquant freigesetzt. Da ein Atom nur bestimmte Anregungszustände annehmen kann, sind die bei dem Gas enthaltenen Elemente ausschlaggebend für die Art der Entladung, des Ionisationskoeffizienten und des Spektrums. Bei Natrium ist beispielsweise der Ionisationskoeffizient recht gering, die meisten Elektronen führen zu einer Anregung und nicht zu einer Ionisation des Atoms. Deshalb ist die Lichtausbeute bei Natrium trotz eines geringen Stromes hoch (siehe 4.2).

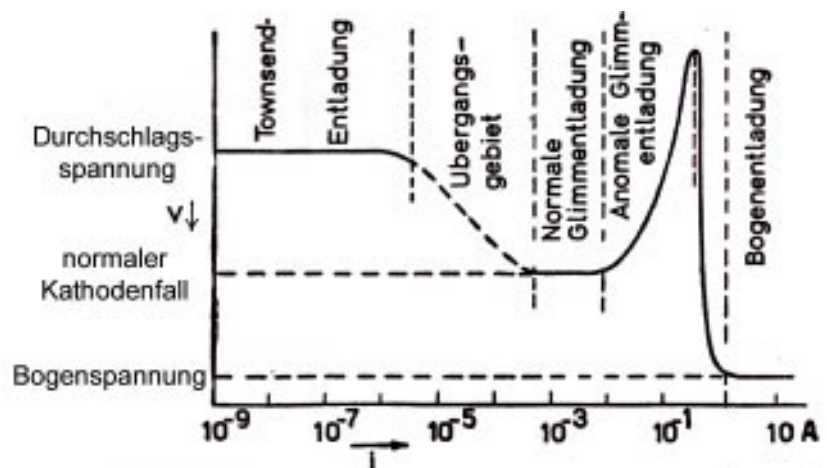


Abb. 9: Schematische Kennlinie einer Entladung.  
Lineare Stromskala, Log. Spannungsskala (aus [6])

### **3.1 Funkenentladung**

Die Entstehung einer Funkenentladung habe ich merkwürdigerweise erst herausgefunden, als ich zufällig ein leistungsschwaches Hochspannungsgerät zur Erzeugung der Spannung verwendete. Dieses hat zwar eine hohe Endspannung, bricht aber bei der kleinsten Belastung (etwa durch eine Entladung) sofort ein. Bei einem leistungsstärkeren Hochspannungsgerät gelang mir die Erzeugung einer Funkenentladung dann bei Verwendung eines vorgeschalteten Widerstandes, der den Strom begrenzte. Im Gegensatz zu Glimmentladungen treten Funkenüberschläge auch bei Normaldruck und sogar bei Überdruck auf.

#### **Ausbildung eines Funkens**

Bei der Ausbildung eines Funkens tritt die oben geschilderte Auslösung einer Elektronenlawine ein. Maßgeblich für die Ausbildung eines Funkens ist eine ausreichend hohe Anzahl von ausgelösten Elektronen in der Kettenreaktion, die mindestens im Bereich von  $10^8$  bis  $10^9$  sein muss. Der Abstand der Elektroden spielt hier insofern eine Rolle, da mit einem größeren Abstand die Zahl der im Gas ausgelösten Elektronen steigt.

Man benötigt also sowohl einen hohen Druck, eine lange Entladungsstrecke und eine hohe Spannung. Im Gegensatz zu den schnellen Elektronen sind die positiven Ionen vergleichsweise langsam, verharren also lange in dem Ionisationskanal und sorgen dort für eine positive Ladung. Damit wird das elektrische Feld beeinflusst, in der Umgebung frei werdende Elektronen werden angezogen und heizen an Ort und Stelle die Ionisation weiter an. Dabei entsteht ein dünner, hoch ionisierter Leitungskanal mit einem geringen ohmschen Widerstand. Die Ladungsdifferenz zwischen Kathode und Anode wird also rasch ausgeglichen, und wenn der Spannungsverursacher den Strom nicht aufrechterhalten kann, bricht der Funke binnen kurzer Zeit zusammen.

#### **Lichterzeugung**

Da die Ionisation des Gases noch mehrere Sekunden erhalten bleibt, kann beim Ansteigen der Spannung ohne Neubildung des Ionisationskanals erneut eine Entladung herbeigeführt werden. Das Licht wird bei der Funkenentladung nicht mehr ausschließlich durch Atomanregung gewonnen, sondern je nach Druck zum großen bis überwiegenden Teil durch thermisches Leuchten aufgrund der hohen Temperatur.

#### **Druckänderung**

Bei meinen Versuchen zeigte sich eine Aufweitung des Entladungskanals bei abnehmendem Druck, was mit dem oben erklärten Funktionsprinzip in Einklang steht. Messungen hierzu habe ich noch nicht vorgenommen. Der Versuch, die Zündspannungen in Abhängigkeit vom Druck zu messen, zeigt zwar eine fallende Tendenz, kann aber keine exakten Werte liefern, da diese je nach Fall stark fluktuieren. An der Anode wird eine Wolke aus ionisierter Luft in manchen Fällen so sehr erhitzt, dass sie anfängt thermisch zu leuchten, und als Flamme nach oben steigt.

### 3.2 Glimmentladung

Die Glimmentladung ist am einfachsten zu verstehen, wenn sie zwischen zwei parallelen Platten untersucht wird, da man hier von einfacheren Verhältnissen des elektrischen Feldes ausgehen kann. Die beobachteten Leuchterscheinungen sind identisch mit denen, die bei dem Versuch in Kapitel 2 beobachtet wurden. Die Glimmentladung entsteht aus der Townsend-Entladung, die ich hier nicht betrachte. Auch hier ist der Vorgang ein Lawinenvorgang wie weiter oben beschrieben, würde man den Strom nicht begrenzen, entstünde eine Bogenentladung. Zunächst jedoch erscheint eine Leuchterscheinung wie in

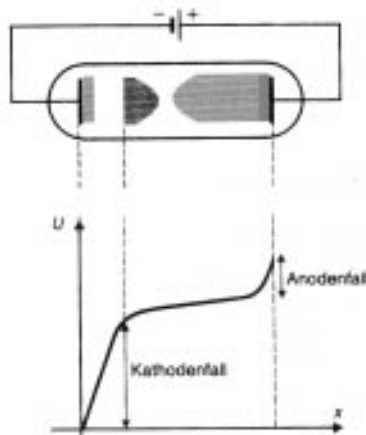


Abb. 10:  
Leuchterscheinungen in einer Glimmlampe. Links die Kathode, rechts die Anode. Darunter der Potentialverlauf

Abb. 10 [3] angegeben. Misst man den Potentialverlauf von der Kathode zur Anode, so stellt man direkt hinter der Kathode einen steilen Anstieg fest, der erst mit dem Glimmlicht endet. Dies ist der sogenannte **Kathodenfall** [6]. Ab dieser Stelle steigt das Potential recht langsam an, nur kurz vor der Anode beschleunigt sich der Anstieg noch im **Anodenfall**.

#### Entstehung der verschiedenen Leuchtbereiche

Der Grund für dieses inhomogene Feld liegt in einer Raumladungswolke aus positiven Ionen im Bereich des vorderen Glimmlichts. Wenn man sich als Modell vorstellt, das von jeder Ladung eine Feldlinie hin zu einer entgegengesetzten Ladung geht, dann fangen die positiven Ionen die Feldlinien von der Kathode vorzeitig weg. Das Feld zwischen Raumladungswolke und Kathode verstärkt sich, das zwischen Raumladungswolke und Anode wird dagegen schwächer. Die Raumladungswolke entsteht, da die positiven Ionen eine wesentlich längere Wirkungsdauer als die Elektronen besitzen [3]. Die

Elektronen beschleunigen aufgrund ihrer geringen Masse sehr schnell und erreichen daher nach kurzer Zeit die Anode. Die Ionen dagegen sind schwer und langsam, sie brauchen wesentlich länger, bis sie von der Kathode neutralisiert werden. Nach außen gesehen ist das System positiv geladen. Die Ionen werden von der Kathode angezogen und erzeugen dort die positive Raumladungswolke. Durch die Beschleunigung der Ionen in dem von ihnen selbst verstärkten Feld (Synergieeffekt) erreichen sie eine Energie, die ausreicht um Elektronen aus der Kathode herauszuschlagen. Die restlichen Ionen, die dafür nicht genügend Energie haben, sorgen durch die Anregung von Atomen für die Entstehung des Kathodenlichts. Aus der Kathode herausgeschlagene Elektronen werden ihrerseits beschleunigt. Im Bereich der Glimmentladung genügt ihre Energie, um Atome zu ionisieren, der ganze Prozess führt zu einem Kreislauf. Einige Elektronen regen die Atome nur an und erzeugen so das Glimmlicht. Da die Energie vorher sowohl für die Ionisation als auch für die Anregung nicht ausreicht, kommt es im hittorfschen Dunkelraum zwischen Kathode und Glimmlicht zu keiner Leuchterscheinung. Ebenso verhält es sich mit dem faradayschen Dunkelraum zwischen Glimmlicht und positiver Säule. Hier müssen die Elektronen erst wieder Energie aufnehmen. In der positiven Säule herrscht ein Plasma, die Ionisation und Rekombination

ist gleich hoch, zusätzlich werden einige Atome angeregt und sorgen für das weißliche Leuchten der positiven Säule. Kurz vor der Anode führt die verstärkte Ionisation durch die Elektronen wieder zu mehr Ionen und daher zu einem stärkeren Spannungsabfall, dem Anodenfall.

Eine Änderung des Drucks und damit eine Änderung der freien Weglänge führt zu anderen Energien bei den Elektronen und somit zu einem veränderten Verhältnis der von ihnen angeregten Zustände. Die Farbe des Glimmlichts ändert sich folglich.

### **Trichter und Leuchtpunkte**

Die von mir beobachteten Trichter auf der Platte tauchten immer wieder an denselben Stellen der Platte auf. Eine Betrachtung zeigt an diesen Stellen Unebenheiten und sehr kleine Löcher. Diese können als Hohlanoden verstanden werden, welche eine trichterförmige positive Säule erzeugen, die um so stärker ist, je kleiner das Loch ist. Dies erklärt, warum die winzigen leuchtenden Punkte durch Trichter an den gleichen Stellen abgelöst werden. An der Kathode sind die aufblitzenden Punkte äquivalente Miniaturglimmlichter. Erstaunlich ist die hohe Helligkeit. Dieses interessante Phänomen, wozu in der Literatur nichts zu finden war, konnte ich bis jetzt leider noch nicht genauer untersuchen (siehe Kapitel „Versäumtes“).

### **Grünes Leuchten**

Als weiteres Phänomen tritt ab und zu sowohl an der Kathode als auch an der Anode ein kurzzeitiges grünes Leuchten auf. Die Farbe von diesem Leuchten stimmt etwa mit dem Spektrum von Kupfer überein. In der Literatur [4] findet sich dazu nur die kurze Bemerkung, dass das Leuchten auf von Ionen herausgeschlagenen Kupferatomen beruht. Weiteres konnte auch ich dazu bisher nicht feststellen.

### **Die normale Glimmentladung**

Solange der Strom nicht ausreicht um über der gesamten Kathode einen Stromfluss zu bewirken, spricht man von einer normalen Glimmentladung. Eine Zunahme des Stromes führt zu einer Zunahme der aktiven Fläche. Dabei ist die Fläche dem Strom proportional, weshalb diese Erscheinung früher als Strommessgerät verwendet wurde.

### **Die anomale Glimmentladung**

Sobald die gesamte Fläche der Kathode leuchtet, kann eine Stromsteigerung nur noch über die Erhöhung der Ionisation führen. Hier wirken speziell die Ionen auf die Kathode, werden diese schneller, so erhöht sich die Anzahl der herausgeschlagenen Elektronen und damit auch die Anzahl der Ionen. Durch die größere Raumladung verschiebt sich das Glimmlicht in Richtung Kathode, der Kathodenfall wird größer und eine höhere Spannung wird benötigt.

## **3.3 Die Bogenentladung**

Ab einem bestimmten Strom wird die Kathode aufgrund des Bombardements durch die Ionen so heiß, dass eine Glühemission von Elektronen auftritt. Damit steigt der Strom, ohne dass eine höhere Spannung nötig wäre. Der Kathodenfall wird sehr klein und eine Bogenentladung entsteht. Ab hier bleibt die Spannung wieder etwa konstant, solange nicht durch die Erhitzung des Gases der Druck steigt.

### 3.4 Glimmentladung bei verschiedenen Drücken

Mit einem Elektrodensatz nach nebenstehender Abbildung 11 habe ich Messreihen aufgenommen, wobei ich bei verschiedenen Drücken die Spannung in Abhängigkeit vom Strom aufgenommen habe. Das Diagramm 1 zeigt den Verlauf der dabei entstandenen Messkurven.



Abb. 11: Plattenanordnung

Auffällig ist das auftreten von zwei verschiedenen Arten von Kurven: bei höheren Drücken (nach 240s, 276s, 286s Pumpzeit) ändert sich die Spannung in Abhängigkeit vom Strom nur geringfügig, während bei den übrigen Verläufen die Spannung proportional mit dem Strom steigt. Auffällig ist auch, dass die Spannung bei abnehmendem Druck steigt.

Bei den ersten drei Drücken handelt es sich um eine normale Glimmentladung, der Theorie entsprechende müsste die Spannung konstant bleiben, was man auch gut erkennen kann. Zwischen der dritten und vierten Kurve geht die Entladung zu einer anormalen Glimmentladung über, was besonders bei den höheren Strömen gut zu erkennen ist. Mit sinkendem Druck nimmt auch die Zahl der Ladungsträger ab, da ein Elektron bei seiner Beschleunigung wegen der größeren freien Weglänge weniger Stöße ausführt. Der Sättigungsstrom der Glimmlampe, bei der diese in die anormale Entladung übergeht, nimmt mit

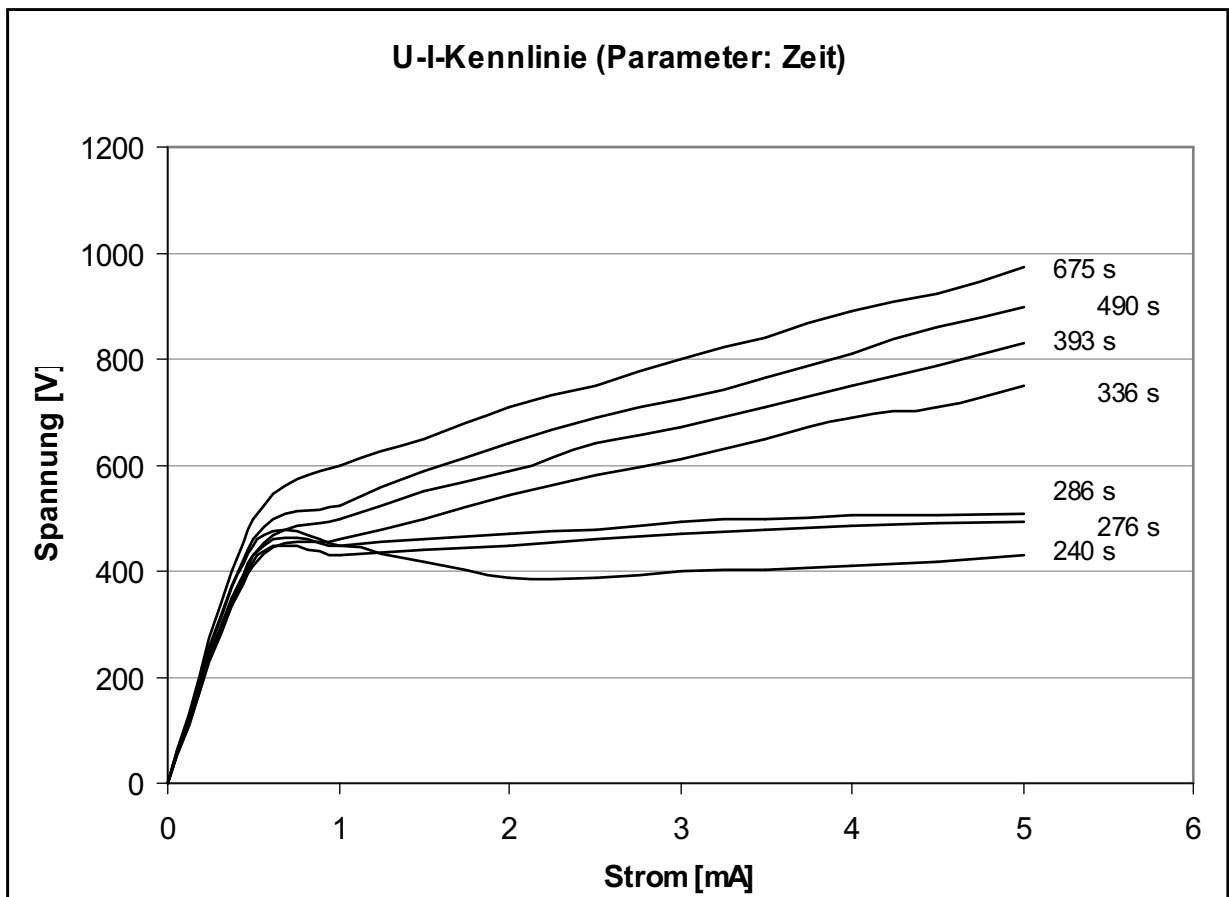


Diagramm 1: Untersuchung der Glimmentladung bei verschiedenen Drücken

sinkendem Druck ab. Damit steigt der Widerstand der Entladungsstrecke und die Spannung nimmt zu. Würde man den Strom noch weiter erhöhen können, würde auch bei den höheren Drücken ein Zunehmen der Spannung festzustellen sein. Bei den niedrigen Drücken erreicht die Spannung gemäß Abb. 9 ein Maximum und es bildet sich anschließend eine Bogenentladung aus. Mit dem von mir verwendeten Hochspannungsnetzgerät sind die dazu notwendigen Ströme leider nicht zu erreichen.

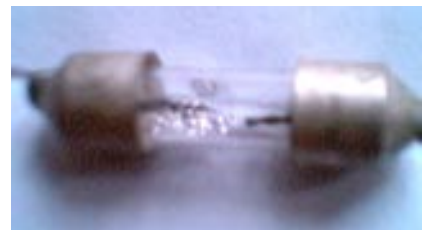
Der etwas irreguläre Verlauf der Kurve bei 240 s ist darauf zurückzuführen, dass die Glimmentladung flackerte und das Hochspannungsnetzgerät deswegen eine etwas höhere mittlere Spannung angezeigt hat. Mit diesen Messreihen werden die in Kap. 3.2 erläuterten Verläufe bei normalen und anormalen Glimmentladungen experimentell bestätigt.

## **4. Anwendungen in der Praxis**

### **4.1 Glimmlampen**

In Glimmlampen befindet sich häufig das Edelgas Neon bei geringem Druck. Zwischen zwei meistens stabförmigen Elektroden entsteht bei einer Spannung von über 200V ein rotes Glimmlicht. Um dem Entstehen einer Bogenentladung vorzubeugen, muss eine Glimmlampe deshalb stets mit einem Vorwiderstand betrieben werden.

Die Lichtausbeute ist gering, da auch nicht sichtbares UV-Licht erzeugt wird und ein beachtlicher Teil der Elektronenenergie in Wärme umgewandelt wird. Der Vorteil von Glimmlampen ist, dass nur ein sehr geringer Strom ( $< 1 \text{ mA}$ ) nötig ist und im Gegensatz zu Leuchtdioden keine Niederspannung vorhanden sein muss. Glimmlampen werden deshalb oft verwendet, um das



*Abb.12: Eine Glimmlampe aus einem Phasenprüfer*

Anliegen einer Netzspannung anzuzeigen. Da diese eine Wechspannung ist, tauschen entweder Anode und Kathode bei jeder Halbwelle oder es wird bei konstanter Kathode jede zweite Halbwelle verwendet. Zu finden sind Glimmlampen etwa in Lichtschaltern, Bügeleisen, Toastern, Kaffeemaschinen, älteren Backöfen und Phasenprüfern (Abb. 12). Ist hingegen eine Elektronik vorhanden, die ohnehin eine Niederspannung benötigt, werden Leuchtdioden bevorzugt. Früher wurden Glimmlampen auch dazu verwendet, eine Spannung unabhängig vom Strom konstant zu halten, da bei der normalen Glimmentladung die Spannung im Gegensatz zum Strom nicht steigt.

Da die glimmende Fläche während der normalen Glimmentladung proportional zum Strom ist, wurden Anfang des 20. Jahrhunderts stabförmige Glimmlampen auch zum Messen von schnell sich ändernden Strömen verwendet. Mit dem Kathodenstrahloszillographen wurde dann jedoch eine schnellere und genauere Messmöglichkeit erfunden [6].

### **4.2 Natriumdampf lampen**

Die Natriumdampflampe nutzt ebenso wie die Leuchtstofflampe nicht das Glimmlicht einer Glimmentladung sondern die positive Säule zur Erzeugung von Licht. In der positiven Säule ist der Spannungsabfall gering, die Elektronen werden deshalb nur langsam beschleunigt. Sie verbleiben also verhältnismäßig lange in

einem Energiebereich, in dem sie die Atome nur anregen und nicht ionisieren können. Folglich wird ein Großteil der Energie in Form von Licht frei, der Rest wird für die Ionisation benötigt. Bei Neon wird leider ein recht großer Teil des Lichtes als UV-Licht frei (74 nm), sehr geeignet ist dagegen Natrium. Die beiden sichtbaren gelben Linien (589 nm und 589,6 nm) machen bei einem geeigneten Druck etwa 80% des Lichtes aus. [7]. Ferner hat das menschliche Auge im Bereich dieser Spektrallinien (bei 555 nm [8]) seine höchste Empfindlichkeit. Da der Dampfdruck von Natrium im reinen Zustand bei Zimmertemperatur zu gering ist um eine Entladung herbeizuführen (weit unter 1 Pa), wird in eine entsprechende Röhre auch noch ein Edelgas hinzugegeben, der Druck beträgt dann 1-5 hPa. Legt man eine Spannung an, zündet zunächst nur das Edelgas und erhitzt dadurch die Röhre. Bei der steigenden Temperatur verdampft genügend Natrium, um von den Elektronen angeregt zu werden. Da das erste anregbare Energieniveau des Edelgases wesentlich höher als das des Natriums liegt, werden im laufenden Betrieb fast nur noch Natriumatome angeregt [7]. Negativ ist allerdings die hohe Betriebstemperatur von 270 °C, da ihre Erhaltung einen großen Teil der Energie benötigt. Die erst allmählich einsetzende Arbeitsweise von Natriumdampflampen kann man beim Einschalten dieser Lampen gut beobachten, es dauert bis zu einer viertel Stunde, bis man keine weitere Helligkeitssteigerung mehr feststellen kann.

Da Natriumdampflampen nur gelbes Licht erzeugen, kann der Mensch bei solch einer Beleuchtung keine Farben unterscheiden. Sie werden deshalb häufig in der Straßenbeleuchtung eingesetzt, da das hier nicht so störend wirkt. Am Arbeitsplatz dagegen ist der Einsatz einer solchen Lampe aus diesem Grund nicht sinnvoll.

### 4.3 Leuchtstofflampen

Leuchtstofflampen gehen einen anderen Weg. Bei ihnen erzeugt Quecksilberdampf zu etwa 60% [9] unsichtbares ultraviolettes Licht. Auf der Innenseite einer Leuchtstofflampe befinden sich fluoreszierende Stoffe, die durch das ultraviolette Licht angeregt werden und sichtbares Licht abgeben. Durch die geeignete Wahl verschiedener Leuchtstoffe kann die Leuchtfarbe gewählt werden.

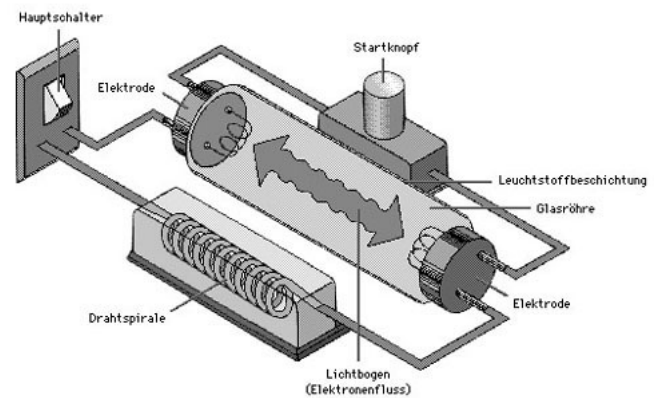


Abb. 13: Aufbau einer Leuchtstofflampe [1]

Die normale Netzspannung reicht zum Zünden der Leuchtstofflampe nicht aus. Deshalb werden zunächst die Elektroden, welche als Glühwendel ausgeführt sind, angeheizt bis thermische Emission von Elektronen auftritt (Abb. 13) [9]. Durch das Ausschalten dieses Vorglüehens nach einer kurzen Zeit durch den Starter ändert sich abrupt der fließende Strom und es wird in der Drossel durch Selbstinduktion eine hohe Spannung erzeugt. Diese genügt in Verbindung mit den bereits freigesetzten Elektronen zum Zünden einer Glimmentladung in der Röhre. Danach reicht die normale Netzspannung zum Betrieb aus, die Drossel sorgt für die Begrenzung des Stromes. Nach dem Ausschalten der Leuchtstoffröhre brauchen

die Ionen einige Sekunden, um zu rekombinieren. Wenn man innerhalb dieser Zeit die Leuchtstofflampe wieder einschaltet, wird der Starter nicht benötigt. Diese Vorgänge kann man hervorragend beim Inbetriebsetzen einer Leuchtstofflampe beobachten. Niederdruckquecksilberdampflampen werden auch ohne Leuchtstoff verwendet, wenn nur die UV-Strahlung benötigt wird, etwa zum Anlocken von Insekten oder in Diskos als Schwarzlichtlampe.

## **5. Was wurde bisher ausgeklammert**

In dieser schriftlichen Arbeit musste ich leider aus Zeitgründen mehrere Hauptthemen weglassen, nämlich die experimentelle Untersuchung einer Bogenentladung, die Auswirkung von speziellen Elektrodenformen auf Leuchterscheinungen und das Zusammenspiel komplexerer Systeme aus mehreren Bauteilen.

### **5.1 Hochstromentladungen**

Diese wurden im Kapitel Bogenentladungen bereits genannt. Die von mir verwendete Hochspannungsquelle konnte nicht genug Strom liefern, um kontrolliert aus dem Bereich der anomalen Glimmentladung in den Bereich der Bogenentladung vorzustoßen. Abgesehen von der Verwendung eines leistungsstärkeren Hochspannungsgerätes ließe sich auch eines der Bisherigen zum Zünden der Bogenentladung verwenden, um danach den Erhalt der Entladung von einem Niederspannungsnetzgerät abhängig zu machen. Das Untersuchen der hohen Spannungsspitze (Abb. 9) zwischen Glimmentladung und Bogenentladung wäre auf diese Weise nicht möglich.

### **5.2 Elektronenstrahlen (Fadenstrahlen)**

In der Schule werden gerne Versuche mit dem Fadenstrahlrohr durchgeführt. Mittels eines Wehneltzylinders, einer Glühkathode und einer Lochanode wird ein feiner Strahl aus schnellen Elektronen erzeugt. Diese sind so energiereich, dass sie ohne Probleme über eine längere Strecke hinweg ein Gas anregen können und bei Auftreffen auf Glas eine Fluoreszenzerscheinung hervorrufen. Versuche mit Fadenstrahlrohren sind sehr gut dazu geeignet, die Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern auf die bewegten Elektronen zu untersuchen. Schnelle Elektronen, wie sie hier auftauchen, sind auch die Auslöser des Polarlichts. Bislang gelang es mir noch nicht, ein ausreichend hohes Vakuum für solche Versuche zu erzeugen, da hierfür Drücke von unter einem Pa nötig sind.

### **5.3 Hohlraumkathoden**

Nimmt man einen Zylinder und legt ihn an eine negative Spannung, so erscheint eine Glimmentladung, das Glimmlicht entsteht im Innern des Zylinders und verläßt diesen trichterförmig in beide Richtungen. Durch Kombination verschiedener Hohlraumkathoden lässt sich das entstehende Glimmlicht



*Abb. 14: Hohlraumkathode/anode aus meinem Aufbau*

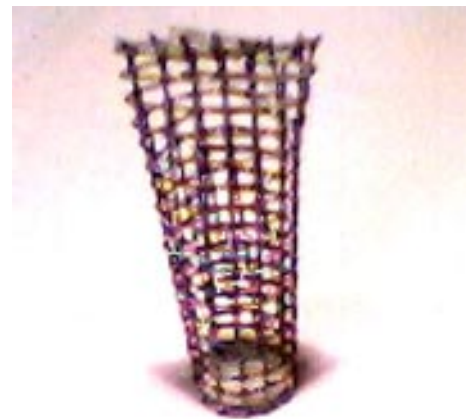
manipulieren. Hohlkathoden lassen sich zur Einführung des Wehneltzylinders (siehe Fadenstrahlen) nutzen, ihnen fehlt nur die Glühkathode. Versuche und auch Messungen zu Hohlraumkathode habe ich bereits durchgeführt (Abb. 14), konnte diese jedoch nicht mehr in die schriftliche Arbeit integrieren.

### 5.4 Hohlraumanoden

Versuche mit sogenannten Hohlraumanoden (also Zylinder mit positivem Anschluss), habe ich auch bereits durchgeführt, es fehlt nur die Auswertung der Messungen. Bei einer solchen Hohlanode erscheint die positive Säule wie ein Tropfen an der Öffnung des Zylinders. Das Innere des Zylinders bleibt dunkel.

### 5.5 Spitzen und scharfe Kanten

Befindet sich irgendwo in der Vakuumkammer eine Spitze oder Kante, die nicht potentialfrei ist, dann fängt diese beim Anlegen einer Spannung an einer beliebigen anderen Stelle der Kammer sofort zu leuchten. So etwa die Abschirmung (Abb. 15) des zu einem Druckmessgerät umfunktionierten Halbleiter-Temperatur-sensor. Die Ursache dafür ist die sehr hohe Feldstärke an spitzen Kanten. Bis auf die Erwähnung einer solchen Spitzenentladung im Zusammenhang mit dem ersten Versuch habe ich diese noch nicht untersucht. Sie lassen sich eventuell nutzen, um bei geringen Spannung Entladungen zu erzeugen, obwohl die Durchbruchspannung noch nicht erreicht ist.



*Abb. 15: Abschirmung des KTY-Messensors. Die Spitzen oben leuchteten weiß, wo auch Anodenhohlraumleuchten auftrat*

## 6. Fazit

Die Erwartungen, die ich an meine Arbeit gerichtet hatte, bestanden im Wesentlichen aus zwei Punkten:

1. *Beobachtung von Entladungen in geringen Drücken, deren Beschreibung und Berechnung zum Erlangen des Verständnisses ihrer Natur und ihrer Anwendung.*
2. *Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse zur Untersuchung von Leuchterscheinungen auch in komplexeren Systemen mit mehreren Elektroden auf unterschiedlichen Potentialen.*

Die Beobachtung und Beschreibung von einfachen Entladungen ist erfolgt, auch ein intuitives Verständnis bildet sich langsam heraus. Die Berechnung dagegen ist noch nicht abgeschlossen. Bis zum Regionalwettbewerb hoffe ich diese noch fertigzustellen und auch weitere quantitative Ergebnisse zu erzielen.

Der zweite Punkt bedarf dagegen noch erheblicher Nacharbeit.

Etwas Zeit bis zum Regionalwettbewerb bleibt ja noch...

## **7. Literaturverzeichnis**

[1] MS-Encarta 98, Stichwort: „Elektrische Beleuchtung“

[2] Schülerduden Physik; Dudenverlag,; 1995; Eintrag „Gasentladungen, selbstständige“

[3] siehe [2], jedoch Eintrag „Glimmentladung“

[4] Elektrische Gasentladungen ;. Autor: Dr. F.M. Penning; Verlag N.V. Servire, 1957;S.36 ff

[5] siehe [4], S. 18

[6] siehe [4], S.41 ff

[7] siehe [4], S.62 mitte

[8] An Introduction to Gas Discharges, 2nd Edition,; A.M. Howatson; Pergamon Press 1976, S.191

[9] <http://www.stiftergym.at/workshop/Faecher/Physik/8b1leuchtstoff.htm>

## **Danksagung**

Einzelarbeit??? Von wegen! An dieser Arbeit waren wesentlich mehr Leute beteiligt als ich alleine. Besonders möchte ich meinem JuFo-Betreuer Herrn Std Thomas Biedermann danken, für seine Hilfe und die Erlaubnis Samstags und Notfalls auch Sonntags experimentieren zu dürfen (wie denn sonst, wenn man beim Bund ist...). Besonderer Dank gilt der gesamten Familie Biedermann, die das alles ertrugen sowie meinen Keksebedarf deckten.

Ohne Vakuumkammer ist schlecht Messen. Danke Ole für die Einarbeitung in ein Thema, um das ich mich nicht mehr kümmern musste. Und Silke. Dafür dass sie in der Uni-Bib als Suchmonster all die Bücher fand, die ich als Fremdling dort nicht finde. An all diejenigen, die mir sonst noch in irgendeiner Art und Weise bei diesem Projekt geholfen haben, und die ich in meinem Eifer vergessen habe, ein ganz großes DANKE!