

## Von der Paschen-Kurve zur Plasmakugel - Ein Praktikumsversuch zur Plasmaphysik

Christian Engst\*, Jürgen Giersch\*

\*Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, Physikalische Praktika,  
Edmund-Rumpler-Str. 9, 80939 München, E-Mail: [Juergen.Giersch@physik.uni-muenchen.de](mailto:Juergen.Giersch@physik.uni-muenchen.de)

### Kurzfassung

An der Ludwig-Maximilians-Universität München absolvieren Studierende im Studienfach Physik mit den Studiengängen Bachelor und Lehramt an Gymnasien ein Fortgeschrittenenpraktikum zur Atomphysik. Für dieses Praktikum wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit ein Experiment zur Plasmaphysik konzipiert und aufgebaut. Ziel war es, neben quantitativen Ergebnissen den Studierenden auch genügend Freiraum für entdeckendes Lernen zu geben. Der Versuch gliedert sich deshalb in zwei quantitative und zwei qualitative Teilversuche.

Erster Teilversuch ist die Aufnahme der Paschen-Kurve. Dabei ergeben sich Messwerte, die sich gut mit einem einfachen Plasmamodell beschreiben lassen. Im zweiten Teilversuch werden verschiedene Probekörper einem Plasma ausgesetzt und die veränderten Oberflächeneigenschaften anhand der Benetzung eines Tropfens deionisierten Wassers mittels Videokamera und Bildanalyse quantitativ ausgewertet. Im dritten Teilversuch werden Leuchterscheinungen einer Plasmakugel bei verschiedenen Gasen und verschiedenen Drücken beobachtet. Hierzu wurde eine handelsübliche Plasmakugel in Zusammenarbeit mit einer Glaserei modifiziert. Im letzten Teilversuch wird ein thermisches Plasma an einer Kerze im Plattenkondensator veranschaulicht.

Eine offene Praktikumsumfrage lässt auf eine sehr positive Resonanz vonseiten der Studierenden schließen.

### 1. Rahmenbedingung der Versuche

Die hier vorgestellten Versuche sind Teil eines Fortgeschrittenenpraktikums im Studienfach Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München. Der thematische Schwerpunkt ist die Atomphysik, darüber hinaus werden Einblicke in Vakuumtechnik und Festkörperphysik gegeben.

Die Studierenden befinden sich im vierten Semester und es ist bereits das vierte Praktikum im Bachelor Studium. Grundlegende Fähigkeiten wie Protokollführung, Versuchsauswertung sowie der Umgang mit Messgeräten werden folglich vorausgesetzt. Die angesetzte Praktikumsdauer beträgt vier Zeitstunden und soll neben der Versuchsdurchführung auch die Auswertung abdecken. Die Ergebnisauswertung erfolgt klassisch in einem Laborbuch und mittels geeigneter Analysesoftware am Computer. Neben dem eigentlichen Versuch und der Auswertung bereiten sich die Studierenden, vor Antritt, mit einem gestellten Skript sowie weiterführender Literatur theoretisch auf den Versuchshintergrund vor. Um ihnen die Vorbereitung etwas zu strukturieren, werden gezielt Stichworte zur Thematik vorgegeben, welche schriftlich zu bearbeiten sind.

### 2. Versuchsinhalte

Der Versuch setzt sich aus vier Teilversuchen zu unterschiedlichen Aspekten der Plasmaphysik zusammen.

#### 2.1. Paschen-Kurve

Im ersten Teilversuch sollen Studierende die Zündspannung einer Glimmladungsröhre in Abhängigkeit von Druck und Elektrodenabstand aufnehmen. Der zu beobachtende Zusammenhang ist als Paschen-Kurve bekannt.

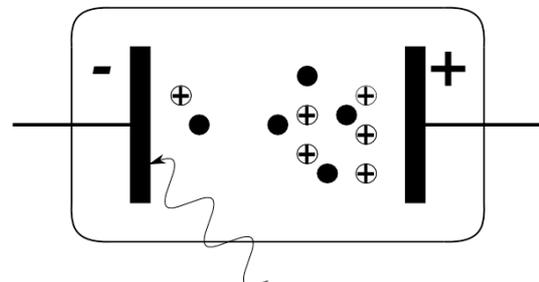


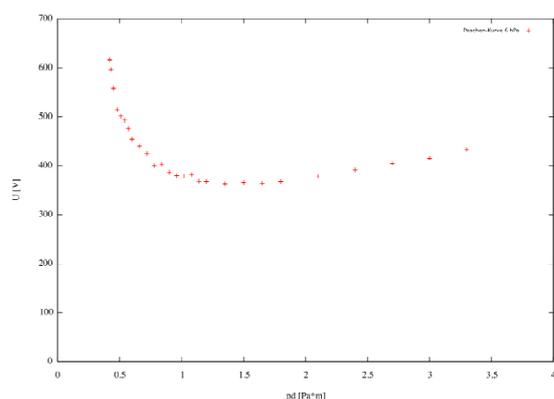
Abb.1: Schematische Darstellung einer Gasentladungsröhre

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Gasentladungsröhre mit einem variablen Elektrodenabstand von einigen Millimetern und einer Elektrodenfläche von ca. einem

Quadratcentimeter (vgl. Abb. 1). Bei dem Gas in der Entladungsröhre handelt es sich um Luft. Der Aufbau wurde von der Lehrmittelfirma PHYWE bezogen.

Der Druck wird mittels einer Drehschieberpumpe und eines Nadelventils auf einen Wert zwischen vier und sechs Hektopascal reduziert und konstant gehalten. Zur Druckmessung dient ein Pirani-Manometer, da dieses im Übergang von Grob- zu Feinvakuum ausreichend exakte Werte liefert.

Zur Ermittlung der Paschen-Kurve werden die einzelnen Durchbruchspannungen einzelner Elektrodenabstände ermittelt. Hierfür können Studierende die Spannung zwischen den Elektroden kontinuierlich erhöhen, bis eine Glimmentladung einsetzt. Der Spannungswert kurz vor der Zündung wird dabei mittels eines Multimeter mit Haltefunktion festgehalten. Die sich ergebenden Wertepaare aus Spannung und Elektrodenabstand werden gegeneinander aufgetragen und ergeben eine Paschen-Kurve für Luft bei einem konstanten Druck (vgl. Abb. 2).



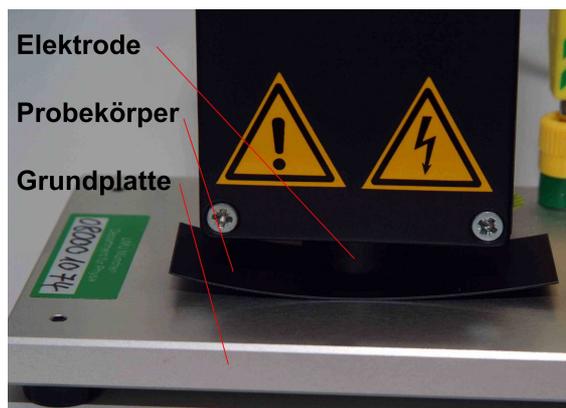
**Abb.2:** Paschen-Kurve für Luft bei einem Druck von 6 hPa

Charakteristisch sind ein exponentieller Anstieg der Spannung bei geringen Elektrodenabständen, die kleinste nötige Durchbruchspannung, bei ca. 400 V im Paschen-Minimum und ein linearer Anstieg der Spannung für zunehmende Elektrodenabstände.

## 2.2. Oberflächenbehandlung

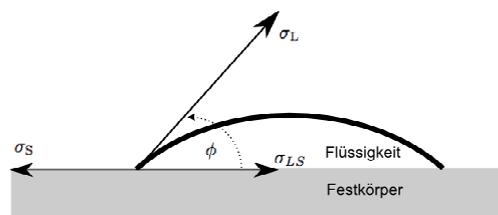
In diesem Teilversuch werden Oberflächen verschiedener Materialien einem Plasma ausgesetzt. Dazu werden Probekörper auf einer metallischen Grundplatte wenige Millimeter unter einer Elektrode positioniert (vgl. Abb. 3). Bei Atmosphärendruck wird zwischen Grundplatte und Elektrode eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 200 Hz und einer Amplitude von 15 kV angelegt, welche ausreichend ist, die umgebende Luft zu ionisieren. Die ionisierten Moleküle wechselwirken mit der Oberfläche des Probekörpers, was eine Veränderung seiner Oberflächenenergie und somit seiner Oberflächeneigenschaften zur Folge hat. Die Dauer der Plasmabehandlung beträgt im Versuch etwa

60 s, kann aber durch die Studierenden auch variiert werden.



**Abb.3:** Elektrode zur Behandlung eines Probekörpers

Eine quantitativ erfassbare Größe, zur Beschreibung der veränderten Oberflächenenergie, ist der Kontaktwinkel, also der Winkel den ein Flüssigkeitstropfen mit der Oberfläche einnimmt. Dieser Kontaktwinkel ist abhängig von den beteiligten Oberflächenenergien, also Festkörper-Luft  $\sigma_s$ , Festkörper-Flüssigkeit  $\sigma_{LS}$  und Flüssigkeit-Luft  $\sigma_L$  (vgl. Abb. 4).



**Abb.4:** Zusammenhang zwischen Oberflächenenergien und Kontaktwinkel

Theoretisch wird dieser Zusammenhang durch die Youngsche-Gleichung beschrieben:

$$\cos(\phi) = \frac{\sigma_s - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$$

Zur experimentellen Charakterisierung der Oberflächenbehandlung wird ein Tropfen deionisierten Wassers eines fest definierten Volumens mit einer Eppendorf-Pipette vor und nach der Plasmabehandlung auf den Probekörper gegeben. Der Kontaktwinkel wird jeweils bestimmt.

Die Studierenden können den Kontaktwinkel dabei auf zwei Arten bestimmen:

- 1) Mittels einer CCD-Kamera wird eine Seitenaufnahme des Tropfens (vgl. Abb. 5) erstellt und mit der Bildanalyse-Software „Measure Dynamics“ am PC analysiert. Der Kontaktwinkel kann dadurch sehr anschaulich vermessen werden.

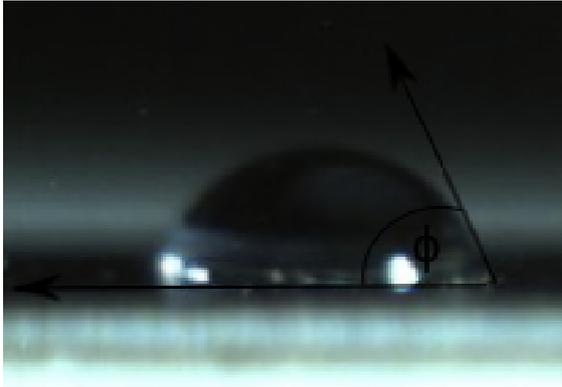


Abb.5: Aufnahme eines Tropfens in Seitenansicht

- 2) Eine indirekte, aber genauere Methode, ist die Betrachtung des Tropfens in der Draufsicht. Hierbei wird ausgenutzt, dass der Tropfen in guter Näherung als Kugelkalotte beschrieben werden kann und dass bei einer Kugelkalotte mit fest definiertem Volumen und ihrem Kontaktwinkel ein einfacher geometrischer Zusammenhang besteht. Da für diese Methode der Tropfendurchmesser absolut bestimmt werden muss, erfordert diese Methode eine Kalibrierung des Tropfenbildes mittels Millimeterpapier (vgl. Abb. 6).

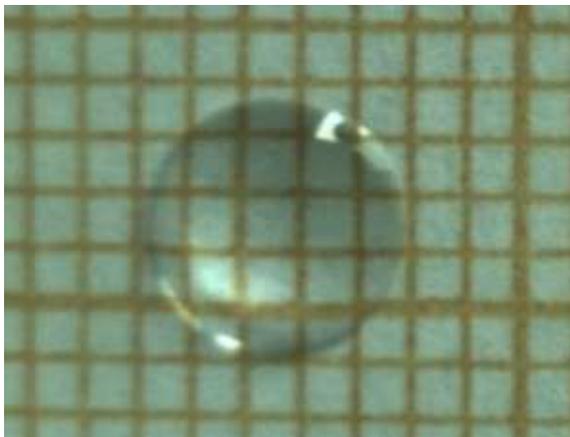


Abb.6: Aufnahme eines Tropfens in Draufsicht, im Hintergrund Millimeterpapier

### 2.3. Plasmakugel

Bei diesem Teilversuch sollen die Studierenden das Zustandekommen der Leuchterscheinungen innerhalb einer Plasmakugel verstehen. Bei einer Plasmakugel handelt es sich um eine durchsichtige evakuierte Glaskugel. Der Innendruck ist meist sehr gering, er beträgt nur wenige Hektopascal. Im Zentrum der Plasmakugel befindet sich auf einem Zylinder eine weitere kleine Hohlkugel. Sie ist auf der Innenseite leitfähig beschichtet und dient somit als kugelförmige Elektrode. Als zweite Elektrode

kann, idealisiert, eine Kugelschale im Unendlichen betrachtet werden.

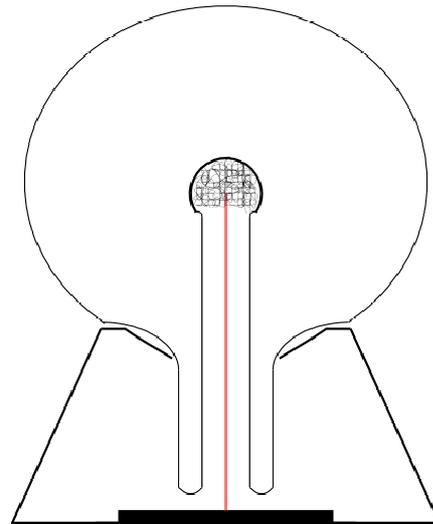


Abb.7: Schematische Darstellung einer Plasmakugel

In der Mitte des Zylinders verläuft ein dünner Draht, welcher von einer Hochspannungselektronik im Fuß der Kugel gespeist wird. Da sich zwischen der leitfähigen Beschichtung und dem Füllgas Glas, also ein Dielektrikum, befindet, gibt es trotz sehr hoher Feldstärken keinen elektrischen Durchschlag. Der Draht ist mit Metallwolle umgeben, um eine Verbindung zur leitenden Beschichtung im Inneren kleinen Kugel herzustellen (vgl. Abb.7).

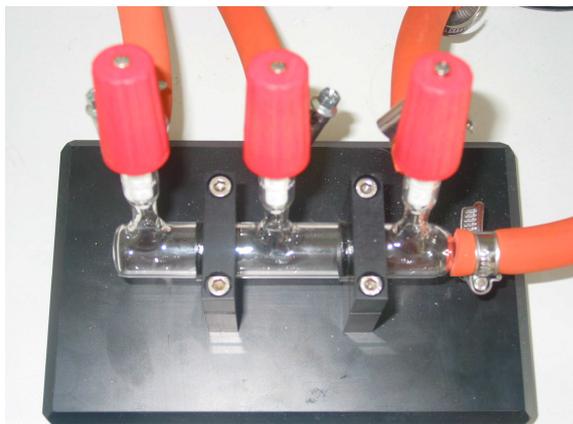
Für diesen Teilversuch wurde eine handelsübliche Plasmakugel leicht modifiziert. Ein Stutzen wurde so angebracht, dass von außen Gas in die sonst abgeschlossene Plasmakugel abgepumpt bzw. eingelassen werden kann (vgl. Abb. 8).



Abb.8: Modifizierte Plasmakugel

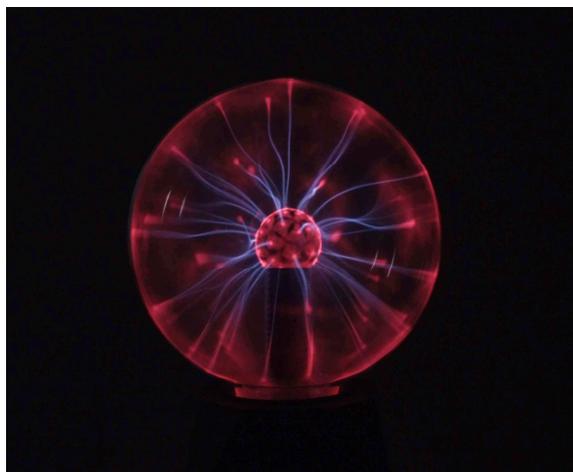
Der Stutzen ist über einen Schlauch mit einem Verteilerrohr verbunden, welches dazu dient eine Drehschieberpumpe, Druckmessgerät und verschiedene Gaskartuschen anzuschließen.

Durch das Verteilerrohr (vgl. Abb. 9) besteht die Möglichkeit verschiedene Gase mit definiertem Druck einzulassen.



**Abb.9:** Verteilerrohr

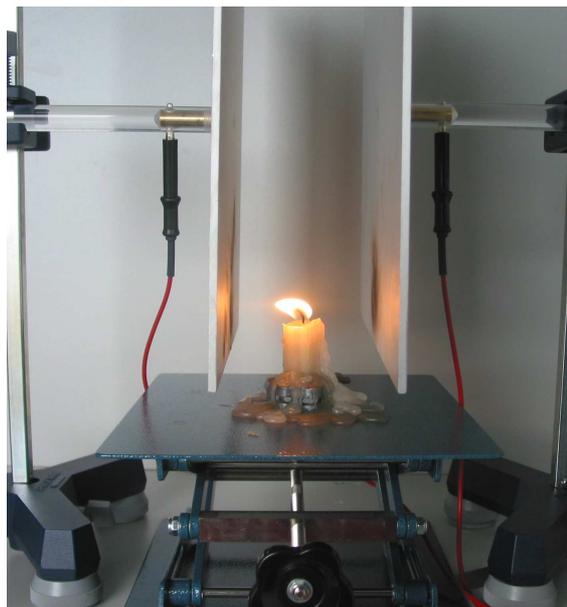
Den Studierenden stehen hierfür eine ganze Reihe von Prüfgasen für freies Experimentieren zur Verfügung. Ferner ist ein elektronisches Spektrometer vorhanden, mit dem Studierende die Wellenlänge des emittierten Lichts untersuchen können. Die charakteristischen Spektralfarben können den unterschiedlichen Gasen zugeordnet werden. In Abb. 10 sind typische Leuchterscheinungen für Luft bei einem Druck von ca. 2 hPa zu erkennen.



**Abb.10:** Entladungen in einer Plasmakugel

#### 2.4. Thermisches Plasma

Im vierten und letzten Teilversuch wird den Studierenden die Möglichkeit gegeben, mithilfe eines sehr einfachen Versuchsaufbaus ein thermisches Plasma bei Atmosphärendruck zu beobachten. Hierzu wird die Flamme einer Kerze in einen Plattenkondensator gestellt (vgl. Abb. 11). Die Studierenden sollen den Einfluss der Hochspannung von ca. 15 kV auf die Flamme beobachten und erklären.



**Abb.11:** Kerze in einem Plattenkondensator

### 3. Studentische Rückmeldung

Der Versuch wurde im Sommersemester 2009 erstmals im Rahmen eines zweiwöchigen Block-Praktikums von ca. 50 Studierenden durchgeführt. In einer anschließenden offenen Praktikumsumfrage wurde der Versuch von den Studierenden äußerst positiv bewertet. Aus Gesprächen mit Betreuern und einzelnen Studierenden lässt sich schließen, dass viele Studierende die Thematik an sich als spannend einschätzen als auch die Kombination aus quantitativ gut beobachtbaren Zusammenhängen (Paschen-Kurve), der Anwendung von modernen Analysemethoden (Bildanalyse mittels PC) und dem freien Experimentieren (Plasmakugel, Kerzenflamme) gut annehmen. Die Kombination könnte in Zukunft auch für die Überarbeitung oder Neukonzeption anderer Praktikumsversuche eine sinnvolle Gestaltungsvorgabe sein.