

Eine 3D-gedruckte Plasmaelektronenquelle für den Physikunterricht

Fabian Bernstein^{*,†}, Sascha Schmeling^{*}, Thomas Wilhelm[†]

^{*}CERN, 1211 Genève 23, Schweiz

[†]Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
fabian.bernstein@cern.ch, sascha.schmeling@cern.ch, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Zur experimentellen Untersuchung von geladenen Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern werden im Physikunterricht der Oberstufe zumeist Elektronen- und Fadenstrahlröhren eingesetzt. Diese weisen verschiedene, primär praktische Vorzüge auf, die allerdings mit didaktischen Nachteilen einhergehen. Insbesondere sind die Bestandteile dieser Lehrmittel konstruktionsbedingt unzugänglich, nicht-alltäglich und nicht modifizierbar – einer explorativen, selbsttätigen Beschäftigung der Schülerinnen und Schüler werden somit enge Grenzen gesetzt.

Am Schülerlabor S’Cool LAB des CERN wurde daher eine 3D-gedruckte Plasmaelektronenquelle entwickelt, die diese Nachteile überwinden soll: Sie ist kostengünstig, modular und leicht modifizierbar und soll erlauben, auf einfache Weise Experimente zur Strahlerzeugung, -fokussierung und -ablenkung durchzuführen. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz einer Plasmaelektronenquelle, die, anders als thermische Elektronenquellen, auch bei vergleichsweise hohen Drücken und in reaktiven Gasen betrieben werden kann.

1. Motivation

Das Verhalten von geladenen Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern ist ein zentrales Thema der Physik der gymnasialen Oberstufe. Die *experimentelle* Auseinandersetzung im Physikunterricht erfolgt üblicherweise anhand der Beschäftigung mit Elektronen- und Fadenstrahlröhren – sofern nicht gänzlich auf die Durchführung von Experimenten verzichtet und stattdessen auf Simulationen, Interaktive Bildschirmexperimente (z. B. [1]) oder Lehrbuchtexte zurückgegriffen wird. Diese typische Herangehensweise unter Verwendung standardisierter Lehrmittel weist, insbesondere in praktischer Hinsicht, wesentliche Vorteile auf: So sind diese Lehrmittel i. d. R. vergleichsweise robust, von begrenzter Komplexität, lehrplankonform, schnell auf- und abgebaut und erlauben eine zuverlässige Reproduktion der interessierenden Phänomene. Darüber hinaus ermöglichen sie gleichermaßen qualitative als auch quantitative Untersuchungen.

Bei genauerer Betrachtung stellen sich jedoch Zweifel ein, ob diese *praktischen* Vorteile nicht durch *didaktische* Nachteile erkauft werden: So ist der direkte, unmittelbar an der Fachsystematik orientierte Ansatz, der die Schülerinnen und Schüler „auf systematische Weise mit meist künstlichen, fiktiven Objekten und gereinigten Phänomenen in Verbindung [...] [bringt], deren einziger Zweck darin besteht, einige isolierte physikalische Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu offenbaren“ [2], wiederholt kritisiert und in seinen Annahmen hinterfragt worden. Der Vorwurf der „kanonisierten Requisite“ [3] liegt hier

nicht fern und tatsächlich können Elektronen- und Fadenstrahlrohr beispielhaft als Elemente jener „synthetischen Wirklichkeit“ [4] aufgefasst werden, die den Schülerinnen und Schülern im Physikunterricht entgeht, jeden Bezug zur alltäglichen Lebenswelt ermangelt, auf diese Weise den Distanzcharakter der physikalischen Betrachtungsweise unterstreicht und somit letztlich den Zugang zur Physik für eine große Zahl von Schülerinnen und Schülern erschwert.

In methodischer Hinsicht schließen diese Lehrmittel aus Kostengründen Schülerübungen in aller Regel aus, so dass allein die Durchführung als Demonstrationsexperiment bleibt. Infolgedessen wird die unterrichtliche Herangehensweise primär durch praktische Rahmenbedingungen diktiert und nicht umgekehrt eine Unterrichtspraxis aus didaktischer Reflexion abgeleitet. Schließlich ließe sich argumentieren, dass die bauartbedingt eingeschränkten Manipulationsmöglichkeiten – kein Teil der Elektronenquelle ist haptisch zugänglich – eine explorative und problemgeleitete Beschäftigung deutlich erschweren.

Um diese Nachteile zu überwinden, wird daher am S’Cool LAB, dem Schülerlabor des CERN, derzeit ein Experimentiergerät entwickelt, das aus alltäglichen Gegenständen zusammengesetzt werden kann, erschwinglich und modular ist und zugleich den Schülerinnen und Schülern eine eigentätige Untersuchung von geladenen Teilchenstrahlen ermöglichen soll. Dabei wurden gezielt die Vorteile des 3D-Druckens für die Konstruktion der Elektronenquelle nutzbar gemacht, um den Zielkonflikt zwischen technischen Erfordernissen einerseits und wirtschaftlichen Randbedingungen andererseits aufzulösen.

2. Konstruktionsprämissen

In technischer Hinsicht basieren Elektronen- und Fadenstrahlröhren auf thermischen Elektronenquellen, die einfach zu fertigen sind sowie kostengünstig und technologisch vollständig beherrscht sind. Allerdings lassen sie sich nur bei vergleichsweise niedrigen Drücken in der Größenordnung von 10^{-5} mbar oder in nichtreaktiven Gasen betreiben [5]. Im Allgemeinen enthalten die Röhren daher ein Edelgas bei einem Druck von ca. 10^{-1} mbar, das gleichzeitig dazu dient, den Elektronenstrahl sichtbar zu machen und zu fokussieren [6]. Daraus folgt jedoch zwingend, dass die Röhre nicht ohne Verlust ihrer Funktionsfähigkeit geöffnet werden kann, was wiederum die Konstruktion eines modularen Systems unmöglich macht.

Aus diesem Grund wurde für die Neuentwicklung eine LowCost-Plasmaelektronenquelle konzipiert, die auf dem Prinzip der Gasentladung beruht und deren Vorteile für die vorliegende Anwendung u. a. darin liegen, dass sie in reaktiven Gasen (wie z. B. Luft) bei vergleichsweise hohen Drücken von ca. 10^{-1} mbar betrieben werden kann [7]. Dies erlaubt, die Bestandteile der Elektronenquelle frei zugänglich zu machen und auf anspruchsvolle Vakuumtechnik, wie sie an Schulen für gewöhnlich nicht zur Verfügung steht, zu verzichten.

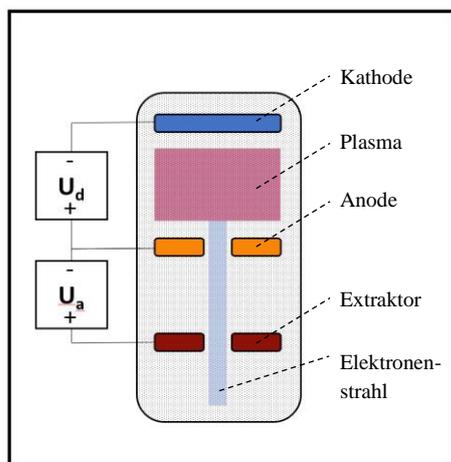


Abb. 1: Schema einer Plasmaelektronenquelle

3. Design und Optimierung

3.1. Prinzip der Plasmaelektronenquelle

Der schematische Aufbau einer Plasmaelektronenquelle ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Drei Elektroden befinden sich in einem Rezipienten, der Luft bei einem Druck von ca. 10^{-1} mbar enthält. Legt man nun zwischen Anode und Kathode eine Spannung an, werden Elektronen im stationären elektrischen Feld zwischen den Elektroden beschleunigt. Entspricht oder übersteigt die kinetische Energie der Elektronen die Ionisationsenergie der Neutralteilchen, so werden durch inelastische Stöße neue Elektron-Ion-Paare erzeugt und die Zahl der freien Ladungsträger vervielfacht sich. Die Ionen driften zur Kathode und können dort Sekundärelektronen aus

dem Metall herausschlagen. Wird nun für jedes freie Elektron sukzessive durch die Produktion von Sekundärelektronen im Mittel mindestens ein neues freies Elektron erzeugt, brennt die Entladung selbstständig und eine Glimmentladung, bei der Elektronen und Ionen ständig rekombinieren und so die charakteristischen Leuchterscheinungen hervorbringen, setzt ein [8]. Zwischen Kathode und Anode bildet sich so ein Niedertemperaturplasma aus, das als Elektronenreservoir betrachtet werden kann, aus welchem durch einen vorgeschalteten Extraktor auf positivem Potential gegenüber der Anode unter bestimmten Bedingungen ein Elektronenstrahl extrahiert werden kann.

Eine grundsätzliche technische Schwierigkeit bei dieser Art von Design stellt das Erfordernis dar, dass die Zündspannung zwischen Anode und Extraktor nicht überschritten werden darf, da andernfalls das zur Beschleunigung dienende elektrische Feld zwischen Anode und Extraktor durch die Ausbildung von entgegengesetzten Ladungsschwerpunkten im Plasma fast vollständig kompensiert wird [9]. Die Zündspannung wiederum hängt in komplexer Weise von verschiedenen Parametern ab, insbesondere von der Gasart, dem Gasdruck und dem Elektrodenabstand. Daneben spielen aber auch die Elektrodenform, die Geometrie des Entladungsgefäßes und – bedingt durch verschiedene Austrittsarbeiten – das Kathodenmaterial eine Rolle [10].

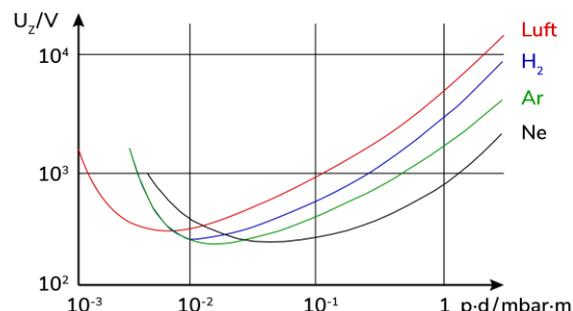


Abb. 2: Paschen-Kurven verschiedener Gase (nach [10])

In vereinfachter Form wird der Zusammenhang zwischen Druck, Abstand der Elektroden und sich einstellender Zündspannung dabei durch die sog. Paschen-Kurven (Abb. 2) beschrieben. Auf der Abszisse ist der Paschen-Parameter, das Produkt von Druck und Elektrodenabstand $p \cdot d$, aufgetragen, auf der Ordinate die Zündspannung. Da mit steigendem Abstand der Elektroden zwar die Zündspannung steigt, gleichzeitig aber die Stoßwahrscheinlichkeit der Elektronen mit den Neutralteilchen zunimmt, bestehen die gängigen Strategien zum Erreichen einer hohen Zündspannung entweder in einer Absenkung des Drucks, was aber die Notwendigkeit der Erzeugung verschiedener Druckregime in den Bereichen von Strahlerzeugung und -beschleunigung nach sich zieht, oder – technisch einfacher – in der Wahl eines möglichst geringen Abstandes zwischen Anode und Extraktor [9]. In der Praxis hängen allerdings zusätzlich die maximale Beschleunigungsspannung und die

Strahldivergenz über die Systemgeometrie, insbesondere den Elektrodenabstand, zusammen, so dass weitergehende Analysen und Simulationen für ein Verständnis der Systemdynamik unerlässlich sind.

3.2. Design der Plasmaelektronenquelle

Der Aufbau des Systems ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

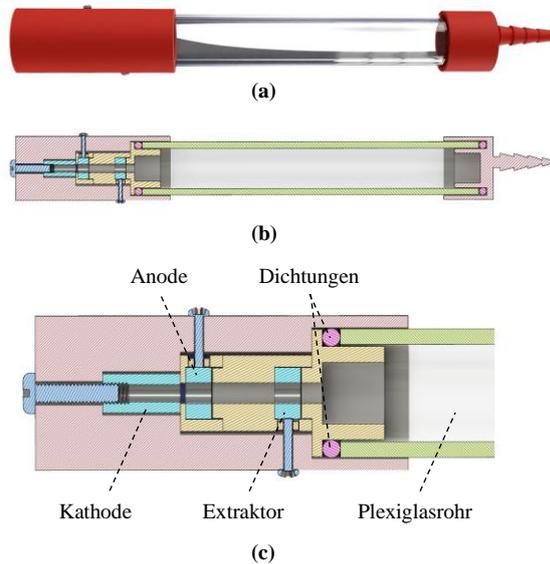


Abb. 3: Design der 3D-gedruckten Plasmaelektronenquelle: (a) Gesamtsystem mit Anschluss für Vakuumpumpe, (b) Schnittbild des Systems, (c) Schnittbild der Elektronenquelle

Um die Kosten gering zu halten, wurde ausschließlich auf 3D-gedruckte Bauteile (Kappe in Standard-ABS) oder handelsübliche Baumarkt-Komponenten (Schrauben, Abstandhalter, Dichtungsringe) zurückgegriffen. Die Kathode ist als Aluminiumzylinder ausgeführt, Anode und Extraktor werden durch einfache Abstandhalter gebildet. Die elektrischen Zuleitungen wurden durch Schrauben realisiert, die zugleich die Kappe dicht gegen den Umgebungsdruck abschließen. Die einzelnen Bestandteile der Elektronenquelle können zur Montage ineinandergesteckt werden. Als Rezipient dient eine Plexiglasröhre, die mittels eines ebenfalls 3D-gedruckten Schlauchanschlusses und einer schulüblichen, einstufigen Drehschieberpumpe auf ca. 10^{-1} mbar evakuiert werden kann. Die Ausbildung einer Gasentladung – als notwendiger Voraussetzung der Plasmaelektronenquelle – in einem vereinfachten, auf diese Weise hergestellten, 3D-gedruckten Rezipienten (Abb. 4) gelingt so problemlos.

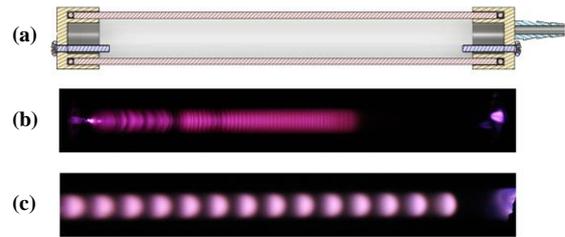


Abb. 4: Design der Gasentladungsröhre: (a) Schnittbild, (b,c) charakteristische Leuchterscheinungen bei ~ 5 mbar (b) und $\sim 10^{-1}$ mbar (c)

3.3. Simulation und Optimierung

Die Extraktion eines Elektronenstrahls, der sich zum Experimentieren in einem unterrichtlichen Kontext eignet, ist technisch anspruchsvoller. Aufgrund des komplexen Zusammenhangs der verschiedenen Designparameter im Hinblick auf die Strahlerzeugung und -formung (s.o.) sind qualitative und einfache analytische Betrachtungen für eine erfolgreiche Optimierung nicht hinreichend. Aus diesem Grund wurden in der Software „Comsol“ Simulationen des elektrischen Potentials und Feldes für unterschiedliche Geometrien und Spannungen durchgeführt, um die experimentell zu evaluierenden Designs auf ein handhabbares Maß zu beschränken (Abb. 5 und 6).

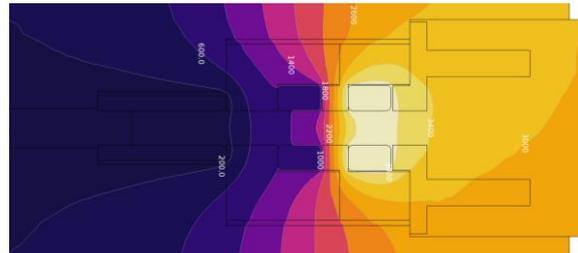


Abb. 5: Simulationen des elektrischen Potentials

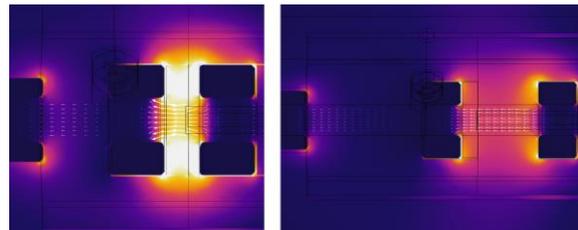


Abb. 6: Simulationen der Feldverteilung für verschiedene Geometrien

So zeigt Abbildung 5 beispielsweise, dass das Potential aufgrund der Geometrie der Elektronenquelle und der erforderlichen Zuleitungen nicht symmetrisch zur optischen Achse ist. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Propagation des Elektronenstrahls durch die Quelle (Abb. 7).

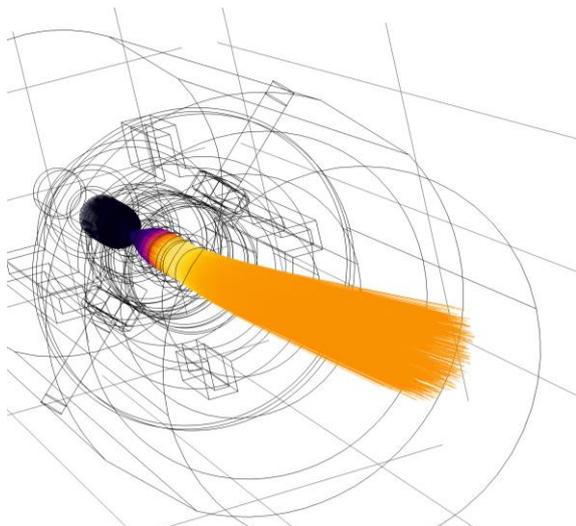


Abb. 7: Simulation der Propagation des Elektronenstrahls für einen Abstand Kathode-Anode von 6 mm und Anode-Extraktor von 3 mm

Genauere Betrachtungen zeigen zudem, dass die Divergenz des Elektronenstrahls mit den Abständen zwischen Kathode, Anode und Extraktor verknüpft ist, wobei gleichzeitig der Abstand von Anode und Extraktor – wie zuvor erläutert – mit der maximal erzielbaren Beschleunigungsspannung zusammenhängt.

3.4. Fazit und Ausblick

Experimentell konnte bisher im Sinne eines proof-of-principle gezeigt werden, dass eine 3D-gedruckte LowCost-Plasmaelektronenquelle grundsätzlich realisierbar ist und die Strahlerzeugung nach diesem Prinzip gelingt (Abb. 8). Gleichsam besteht das Erfordernis, konstruktive Eigenschaften und Strahlqualität weiter zu optimieren, bevor die 3D-gedruckte Plasmaelektronenquelle eine Alternative zu den oben genannten Standard-Lehrmitteln darstellen kann.



Abb. 8: Erfolgreiche Strahlerzeugung mittels Plasmaelektronenquelle in 3D-gedrucktem Rezipienten

4. Literatur

- [1] Bewegung von Elektronen im E- und B-Feld: <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/index.php> (Stand: 5/2019)
- [2] Schlichting, H. J. (1992): Die physikalische Dimension des Sports. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik, S. 4–6. URL: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/153_phys_dim_des_sports.pdf (Stand: 5/2019)
- [3] Toeplitz, O., zitiert nach: Wagenschein, M. (1956): Zum Begriff des exemplarischen Lehrens. In: Zeitschrift für Pädagogik 2. URL: <http://www.martin-wagenschein.de/en/2/W-128.pdf>. (Stand: 5/2019)
- [4] Müller, R.: Physik in interessanten Kontexten. Handreichung für die Unterrichtsentwicklung, URL: <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/physik-in-interessanten-kontexten-rmueller.pdf> (Stand: 5/2019)
- [5] Oks, E. M., & Schanin, P. M. (1999): Development of plasma cathode electron guns. In: Physics of Plasmas 6 (5), S. 1649-1654
- [6] 3BScientific: Bedienungsanleitung zum Lehrsoszilloskop 1000902. URL: https://www.3bscientific.de/product-manual/1000902_DE.pdf (Stand: 5/2019)
- [7] Burdovitsin, V., Oks, E., & Serov, A. (1998): Hollow cathode electron gun for beam generation in forevacuum gas pressure. In: 12th International Conference on High-Power Particle Beams. BEAMS98. Proceedings 1, S. 412-415
- [8] Stroth, U. (2011): Plasmaphysik. Phänomene, Grundlagen, Anwendungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner
- [9] Oks, E. M. (2006): Plasma cathode electron sources. Physics, technology, applications. Weinheim: Wiley-VCH
- [10] Demtröder, W. (2009): Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer