

## Ein Gas, zwei Farben Warum leuchtet die Gasentladung in Luft an Kathode und Anode verschiedenfarbig?

Bärbel Fromme

Universität Bielefeld, Fakultät für Physik, Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld  
bfromme@physik.uni-bielefeld.de

### Kurzfassung

Die Farbe des Lichts einer Gasentladung ist gasspezifisch. Darauf wird in Büchern für Schule und Grundstudium zum Teil explizit hingewiesen. Es wird aber nicht darauf eingegangen, dass bei der Gasentladung in verdünnter Luft zwei Farben auftreten: Das in der Nähe von Kathode und Anode emittierte Licht ist deutlich verschiedenfarbig. Ähnliches ist auch in Stickstoff-Spektralröhren beobachtbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Phänomen der unterschiedlichen Lichtfarbe an Kathode und Anode durch Spektroskopie des emittierten Lichtes untersucht. Es wird gezeigt, dass die unterschiedliche Färbung durch intensive Emissionslinien des ionisierten Stickstoffmoleküls im negativen Glimmlicht an der Kathode hervorgerufen wird, die in den Leuchterscheinungen an der Anode nicht auftreten. Die Experimente sind sowohl für den Physikunterricht als auch für Studierende geeignet. Ihre Ergebnisse und Interpretation sind für Studiums- und Unterrichtsinhalte relevant, insbesondere im Bereich Atomphysik.

### Abstract

The color of the light emitted in a glow-discharge is gas-specific. This is often pointed out in physics books for schools and undergraduate university physics courses. But it is not mentioned, that the light emitted from a glow-discharge tube filled with air of reduced pressure shows two colors: The light emitted near cathode and anode differs distinctly in color. A similar effect is observed in nitrogen tubes for spectroscopy. In this work, the phenomenon of different colors in the same gas is investigated by spectroscopic methods. It is shown, that the different light colors stem from intense emission lines of ionized nitrogen molecules in the light emitted near the cathode, which are missing in the anode-light. The experiments are suitable for teaching at school as well as for university courses. The results and their interpretation are of relevance for the curricula, especially in the field of atomic physics.

### 1. Einleitung und Motivation

Gasentladungen mit ihren häufig farbigen Leuchterscheinungen sind im Alltag und in der Natur ständig präsent, beispielsweise in Leuchtstoffröhren, Energiesparlampen und Leuchtreklamen, aber auch im Blitz und im Polarlicht. Der Faszination historischer, noch funktionierender Geißler- und Crookesröhren (Abb. 1), insbesondere der bei Sammlern beliebten Zierröhren mit fluoreszierenden Mineralien, Gläsern oder Flüssigkeiten (Abb. 2), die auch als Nachbauten erhältlich sind, kann man sich kaum entziehen.

Nicht vergessen werden sollte aber die große historische Bedeutung der Gasentladungsexperimente für die Entwicklung der modernen Physik: Elektronen, Ionen und Röntgenstrahlung wurden bei Experimenten mit Gasentladungsröhren entdeckt. Auch die Entdeckung der Radioaktivität geht indirekt auf Gasentladungsexperimente zurück, denn Röntgens Erwähnung der Fluoreszenz des Glases der Entladungsröhre als Ausgangspunkt der von ihm entdeckten Strahlung

[1] motivierte Henri Becquerel zur Untersuchung fluoreszierender Materialien, die zufällig radioaktiv waren [2, S. 501].

Im Physikunterricht der Schulen und in den physikalischen Grundvorlesungen und Grundpraktika der Hochschulen kommen Gasentladungslampen für die Spektralanalyse zum Einsatz. Zum Teil – aber anscheinend mit abnehmender Tendenz – wird auch die Glimmentladung in Luft mit ihren druckabhängig unterschiedlich strukturierten Leuchterscheinungen im Gasentladungsröhr betrachtet (Abb. 3). Manchmal wird auch der Potentialverlauf im Gasentladungsröhr diskutiert oder sogar gemessen. Entsprechend wird die Gasentladung in Schulbüchern (z. B. in [3, S. 220f], [4, S. 246f], [5, S. 39], [6, S. 325]) und Lehrbüchern für das Grundstudium behandelt (z. B. in [7, S. 615], [8, S. 61f], [9, S. 481f]). Hierbei fällt auf, dass das Gasentladungsröhr i. a. im Rahmen der Elektrizitätslehre und nicht in Zusammenhang mit der Atomphysik diskutiert wird, obwohl sich die Behandlung

der Gasentladung gerade in diesem Rahmen anbietet. Insbesondere wenn das Experiment auch durchgeführt wird, lässt sich damit auf visuell ansprechende, motivierende Art und Weise die Anregung von Atomen und Molekülen durch Elektronenstoß zeigen. Zusammenhänge mit dem Franck-Hertz-Versuch und den Atommodellen können gezeigt und diskutiert werden. Zumeist wird in den Büchern, die die Gasentladung behandeln, aber immerhin auf atomphysikalisch relevante Tatsachen, wie die Erzeugung von Elektronen und Ionen durch Stoßionisation und die Entstehung der Leuchterscheinungen durch Anregung der Gasmoleküle, hingewiesen. Auf die Abhängigkeit der Lichtfarbe von der Gasart und die Druckabhängigkeit der Struktur der Leuchterscheinungen (vgl. Abb. 3) wird i. a. ebenfalls hingewiesen. Die große historische Bedeutung der Gasentladungsexperimente wird jedoch allenfalls am Rande erwähnt. Ein Hinweis auf die Entdeckung der Röntgenstrahlung fehlt komplett.



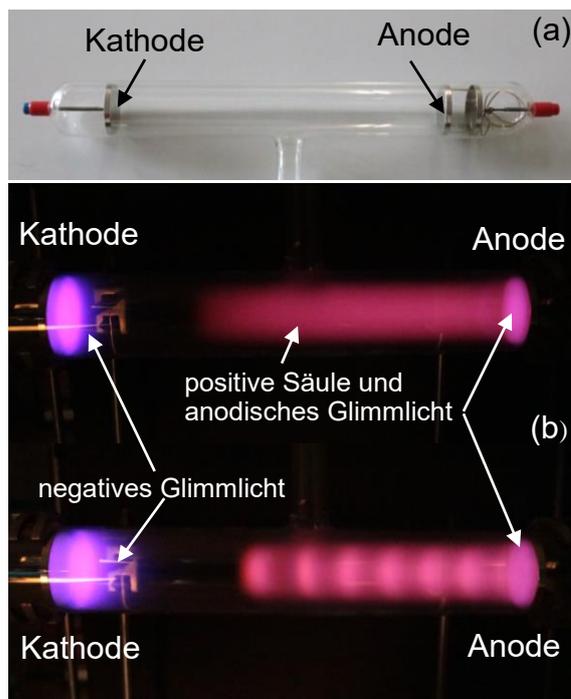
**Abb. 1:** Historische Gasentladungsröhren im Glasapparatmuseum Cursdorf, Thüringen

Bei der Erwähnung des Zusammenhangs von Lichtfarbe und Gasart wird in Schul- und Lehrbüchern aber über die sofort ins Auge fallende Tatsache hinweggegangen, dass bei der Gasentladung in Luft zwei verschiedene Lichtfarben im selben Gas auftreten (Abb. 3). Das sogenannte negative Glimmlicht leuchtet violett, während die positive Säule und das anodische Glimmlicht pink/rötlich aussehen (zu den Bezeichnungen der Leuchterscheinungen siehe z. B. [7, S. 648f]). Unterschiedliche Lichtfarben sind auch in den

Stickstoffspektralröhren (Abb. 4 und 5), die für die Spektralanalyse benutzt werden, zu erkennen. Interessanterweise wurden die Farbunterschiede von unseren Studierenden bisher nicht bemerkt bzw. nicht thematisiert.



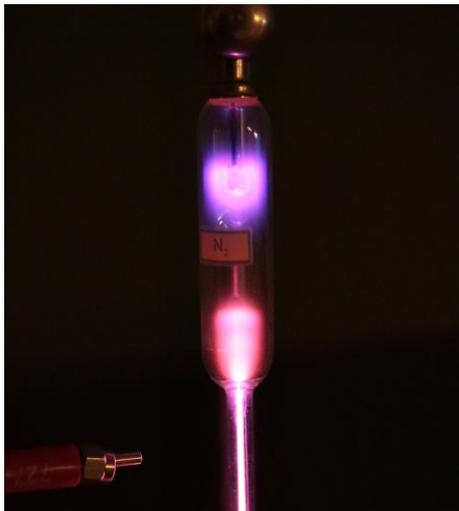
**Abb. 2:** Gasentladungsröhren mit fluoreszierenden Flüssigkeiten.



**Abb. 3:** Gasentladungsröhr (a) und zwei Beispiele für die Leuchterscheinungen der Gasentladung in Luft bei abnehmendem Druck (b). Die unterschiedliche Lichtfarbe an Kathode und Anode ist deutlich erkennbar. Weitere Beispiele für andere Drücke finden sich z. B. in [3, S. 220] und [7, S. 647].

Im Rahmen dieser Arbeit wird nun untersucht, wie die unterschiedlichen Farben zustande kommen: Wieso gibt es im selben Gas bei identischem Druck an Kathode und Anode offensichtlich unterschiedliche Anregungen, bei deren Abregung unterschiedlich

farbiges Licht emittiert wird und was sind das für Übergänge, die da angeregt werden?



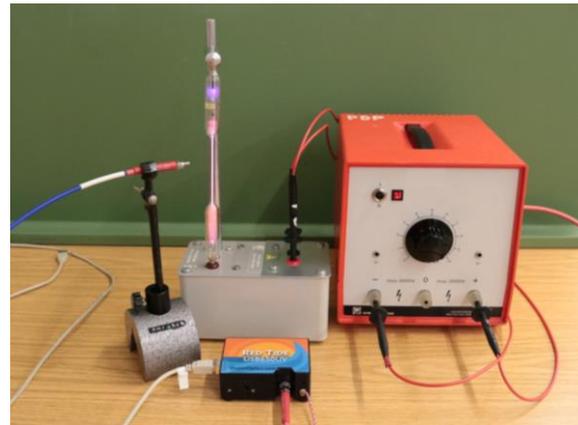
**Abb. 4:** Auch bei der Stickstoffspektralröhre sind die unterschiedlichen Lichtfarben der Entladung an Kathode (oben) und Anode zu erkennen. Links unten der Lichtleitereingang des verwendeten Spektrometers.

## 2. Spektroskopie der Leuchterscheinungen

### 2.1 Experimenteller Aufbau

Mit den heute verfügbaren Computerspektrometern mit Lichtleitereinkopplung lassen sich die Leuchterscheinungen von Gasentladungen relativ einfach spektroskopisch untersuchen. Wir haben für die hier dargestellten Messungen ein für den sichtbaren und nahen UV-Bereich geeignetes Spektrometer der Fa. Ocean-Optics mit für diesen Spektralbereich passender Glasfaser benutzt (Abb. 5). Das Spektrometer misst in 1 nm-Schritten. Auf die Angabe von Nachkommastellen wurde bei den Wellenlängenangaben in den nachfolgend dargestellten Messergebnissen deshalb verzichtet. Die hinreichende Genauigkeit des Spektrometers wurde mit einer Messung der Balmerlinien des Wasserstoff überprüft: Gemessen wurden hier 656 nm und 486 nm für die  $H_{\alpha}$ - und  $H_{\beta}$ -Linie. Die Literaturwerte sind 656.28 und 486.13 nm ([10, S. 11], [11]).

Der experimentelle Aufbau ist für Spektrallampen und Gasentladungsrohr bis auf die zur Evakuierung benötigte Drehschieberpumpe identisch. Als Hochspannungsquelle wurde ein schulübliches Netzgerät benutzt (Abb. 5), das maximal 6 kV liefert. Nach Zünden der selbständigen Gasentladung im Rohr sinkt die Spannung auf Grund der Belastung der Spannungsquelle auf etwa 1 kV ab (gemessen mit statischem Voltmeter), was aber zur Aufrechterhaltung der Entladung ausreicht.



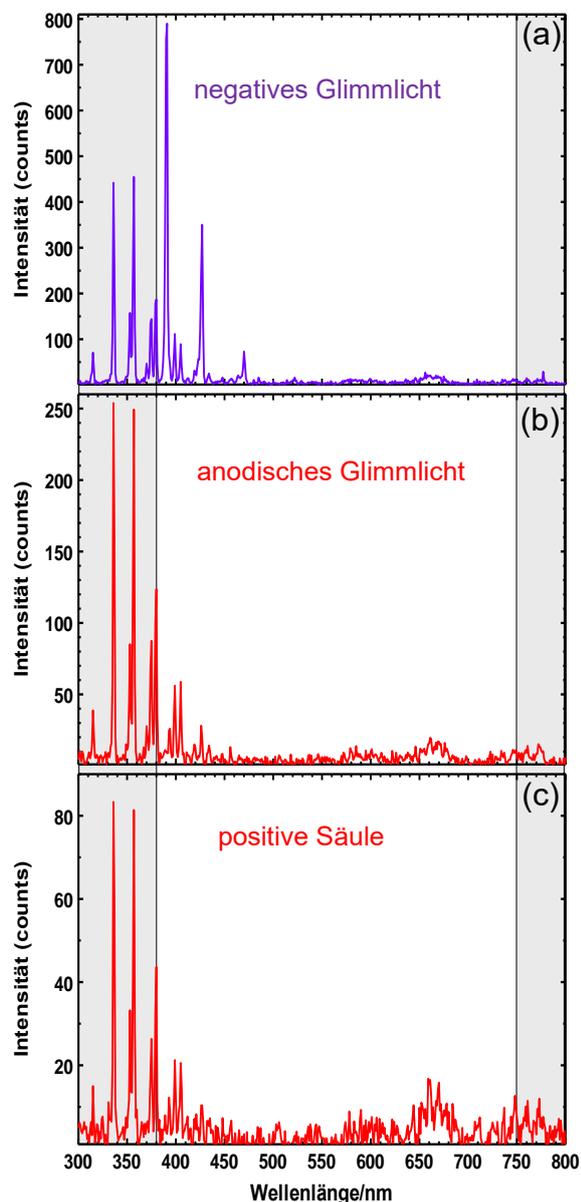
**Abb. 5:** Experimenteller Aufbau. Im Vordergrund das Spektrometer, links der Lichtleiter.

### 2.2 Unterschiedliche Farben an Kathode und Anode

Abbildung 6 zeigt die an Kathode (a) und Anode (b und c) gemessenen Spektren. Aus den unterschiedlichen Spektrallinien an Kathode und Anode lässt sich die vom Auge wahrgenommene Lichtfarbe – unter Anwendung der additiven Farbmischung – sofort analysieren. Das Spektrum des negativen Glimmlichts (Abb. 6a) wird im sichtbaren Spektralbereich dominiert von sehr intensiven violetten und blauen Linien: der violetten Spektrallinie bei 391 nm, die im Spektrum der Leuchterscheinungen an der Anode komplett fehlt, und der ebenfalls sehr ausgeprägten blauen Linie bei 427 nm. Weitere blaue Linien um 400 nm und bei 470 nm sind deutlich zu sehen. Außer einem marginalen Rotanteil (zwischen 650 und 680 nm) und einem noch geringeren gelb-orangen Anteil (ca. 570 – 600 nm, nur in der Vergrößerung zu sehen, vgl. Abb. 9) werden keine anderen Farben emittiert. Das Licht des negativen Glimmlichts wird vom Auge daher als violett-blau empfunden.

Ganz anders die an der Anode aufgenommenen Spektren (Abb. 6b und c): Hier treten im UV-Bereich zwar dieselben Spektrallinien bei etwa 315, 337, 357 und 380 nm wie im negativen Glimmlicht auf – im sichtbaren Spektralbereich unterscheiden sich die Spektren aber deutlich. Es fehlen nicht nur die im Kathodenspektrum prominente violette Linie bei 391 nm und die schwache blaue Linie bei 470 nm, auch die blaue Linie bei 427 nm ist nur noch schwach gegenüber den anderen Linien ausgeprägt (vgl. auch Abb. 8). In der positiven Säule (Abb. 6c) mit ihrer nur geringen Lichtintensität hebt sie sich kaum aus dem Untergrund hervor. Ebenfalls in den Anodenspektren vorhanden sind jedoch die violetten Linien um 400 nm und die roten Linien zwischen 650 und 680 nm. Allerdings beobachtet man deutliche Unterschiede in den Intensitätsverhältnissen dieser Linien beim Vergleich der Spektren: Bei den Leuchterscheinungen an der Anode ist dem violetten Licht der Spektrallinien um 400 nm – anders als beim negativen Glimmlicht

– ein deutlicher Rotanteil beigemischt. Man empfindet das Mischlicht dieser beiden Farben daher als pink bzw. rötlich. Im gelb-orangen (570 – 600 nm) und dunkelroten (um 750 nm) treten weitere schwache Linien auf, die im Anodenspektrum relativ stärker ausgeprägt sind als im Kathodenspektrum. Auch diese Linien tragen zur als rötlich empfundenen Lichtfarbe an der Anode bei.



**Abb. 6:** Spektren des negativen Glimmlichts (a), des anodischen Glimmlichts (b) und der positiven Säule (c). Die nicht-sichtbaren Bereiche der Spektren sind grau hinterlegt.

Zwischen den Spektren der positiven Säule (Abb. 6b) und dem anodischen Glimmlicht (Abb. 6c) gibt es marginale Unterschiede, die den Farbeindruck aber durchaus beeinflussen: Das Intensitätsverhältnis der roten Linien (bei 650 – 680 nm und um 750 nm) zu

den violetten um 400 nm ist bei der positiven Säule noch etwas größer als beim anodischen Glimmlicht. Die positive Säule wird daher als leicht rötlicher als das anodische Glimmlicht wahrgenommen, das deutlich pink aussieht. Dies ist auch im Foto der Abbildung 3 gut zu sehen.

### 2.3 Interpretation der Spektren

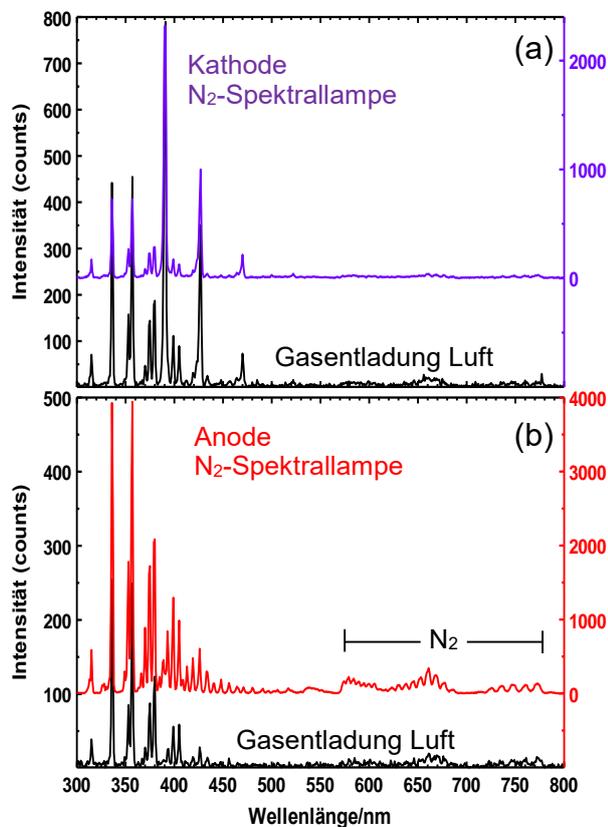
Um die Spektrallinien der Gasentladung in Luft zuzuordnen und die Unterschiede an Kathode und Anode erklären zu können, wurden zum Vergleich die Spektren der Hauptbestandteile von Luft,  $N_2$  und  $O_2$ , mit Hilfe entsprechender Spektrallampen aufgenommen. Solche Spektrallampen sind so gebaut, dass sie eine sehr lange und gegenüber dem negativen Glimmlicht sehr intensive positive Säule besitzen, die i. a. für die Spektralanalyse genutzt wird. Bei der Stickstoffspektrallampe war es möglich, die unterschiedlich farbigen Spektren an Kathode und Anode aufzunehmen. Bei der Sauerstoffspektrallampe konnte das nur sehr schwache negative Glimmlicht nicht analysiert werden. Aber auch hier scheint es – soweit man das bei der nur geringen Intensität beurteilen kann – Farbunterschiede zu geben: Das Licht der positiven Säule erscheint weiß, während das negative Glimmlicht eher bläulich ist.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Kathoden- und Anodenspektren von Gasentladungsröhre und  $N_2$ -Spektrallampe. Abgesehen von Intensitätsunterschieden sind die an Gasentladungsröhre und  $N_2$ -Spektrallampe gemessenen Spektren – bis auf eine sehr intensitätsschwache Linie bei etwa 777 nm (Abb. 6a und 7a), deren Ursache eine Sauerstoffanregung ist (s. u) – sowohl an der Kathode als auch an der Anode identisch. Die Spektrallinien des Gasentladungsröhre mit verdünnter Luft sind also praktisch ausschließlich Anregungen von Stickstoffmolekülen zuzuordnen.

Die langwelligen Übergänge mit nur schwacher Intensität im Bereich 570 – 600 nm, 650 – 680 nm und um 750 nm (Abb. 6 und 7), die maßgeblich für die rötliche Farbe der positiven Säule und des anodischen Glimmlichts sind, sind Anregungen des neutralen  $N_2$ -Moleküls [12]. Abhängig von der jeweiligen Luftfeuchtigkeit zum Zeitpunkt des Experiments ist in diesem Spektralbereich manchmal auch noch die rote Balmerlinie des Wasserstoffs ( $H_\alpha$ -Linie, 656 nm) ganz schwach zu sehen.

Für die weitere Zuordnung der Linien ist der kurzwellige Teil der Spektren der  $N_2$ -Spektrallampe in Abbildung 8 noch einmal separat dargestellt. Neben Linien des neutralen Stickstoffmoleküls treten in diesem Spektralbereich insbesondere auch Linien des einfach ionisierten  $N_2$ -Moleküls auf. Die Zuordnung erfolgte mit Hilfe der übersichtlichen Darstellungen für den fraglichen Spektralbereich in [13] und [14]. (Ausführlich werden die Spektren des Stickstoffmoleküls in [15] behandelt.) Im intensiven Spektrum der positiven Säule der Spektrallampe ist die Bandenstruktur auf Grund verschiedener Schwingungsübergänge des

$N_2$ -Moleküls sehr gut zu erkennen. Die genaue Bezeichnung der elektronischen Übergänge und der beteiligten Schwingungszustände kann [13] entnommen werden.

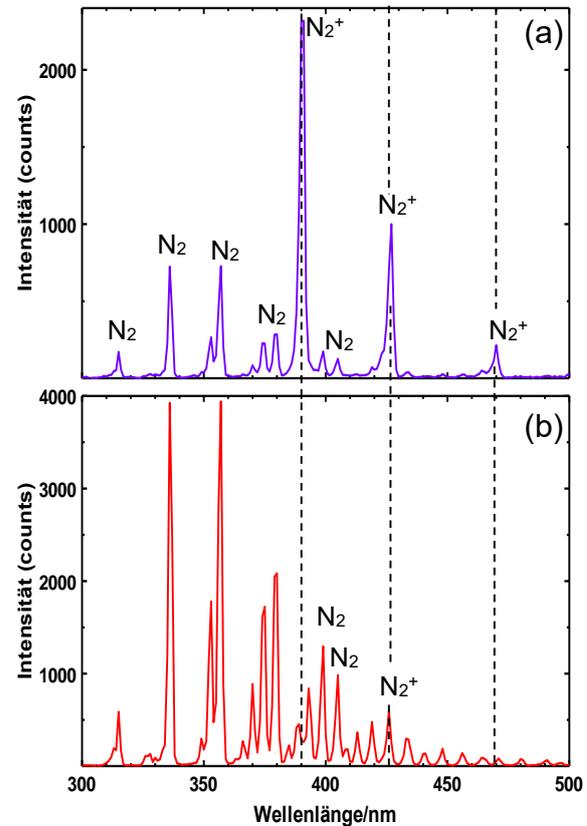


**Abb. 7:** Vergleich der Spektren der Gasentladung in Luft und der  $N_2$ -Spektrallampe. (a) Negatives Glimmlicht. (b) positive Säule bzw. anodisches Glimmlicht. Die Gasentladungsspektren der Abbildung 6a und b sind aus Gründen der besseren Unterscheidbarkeit hier schwarz dargestellt.

Auf Grund der Franck-Condon-Faktoren für die Schwingungsübergänge des  $N_2$ -Moleküls müsste die Emissionslinie bei ca. 337 nm die intensivste im Spektrum dieses Moleküls sein [13]. Diese Linie ist die bekannte, intensive Linie des Stickstofflasers (siehe z. B. [16], S. 20 oder [17]), bei dem auch eine Gasentladung ausgenutzt wird. In unseren Messungen sind jedoch die Peaks bei 337 und 357 nm in etwa gleich hoch. Das liegt an der spektralen Empfindlichkeit des Spektrometerlichtleiters, dessen Transmission zwischen 300 und 400 nm leicht ansteigt.<sup>1</sup> Bei Messungen mit einem anderen Lichtleiter, der im Bereich 300 – 400 nm eine konstantere Transmission aufweist, ist auch in unseren Messungen  $I(337 \text{ nm}) > I(357 \text{ nm})$ . Allerdings war die Transmission dieses

<sup>1</sup> Da die Intensität der UV-Linien für die Zielsetzung dieser Arbeit unerheblich ist, wurde auf eine Korrektur, die aufwändig per Hand erfolgen müsste, verzichtet.

Lichtleiters insgesamt gering, so dass auf weitere Messungen damit verzichtet wurde.



**Abb. 8:** Kurzwelliger Teil des Spektrums der Stickstoff-Spektrallampe. (a) negatives Glimmlicht mit Zuordnung der Emissionslinien zum  $N_2$ - und  $N_2^+$ -Molekül. (b) positive Säule. Hier wurde auf die Bezeichnung einiger auch im Spektrum des negativen Glimmlichts prominent auftretender Linien verzichtet.

Ursächlich für die Unterschiede in den Spektren an Kathode und Anode - und damit für die unterschiedlichen Lichtfarben (2.2) - ist offensichtlich die im Plasma der Gasentladungsröhre auftretende, sich stabil einstellende positive Raumladungswolke und der damit in Zusammenhang stehende starke Spannungsabfall vor der Kathode, der sogenannte „Kathodenfall“. Der Kathodenfall wird in Grundstudiums- und Schulbüchern häufig ausführlich dargestellt (z. B. in [3, S. 221], [6, S. 325], [7, S.648], [8, S. 67], [9, S. 485]). Er entsteht und erhält sich selbst durch Ionisierungsprozesse: Elektronen, die durch Aufprall von Ionen aus der Kathode herausgeschlagen werden, werden im elektrischen Feld in Richtung Anode beschleunigt. Im Bereich des negativen Glimmlichts haben die Elektronen im laufenden Betrieb der Entladung eine genügend hohe Energie, um Luftmoleküle nicht nur anzuregen, sondern auch zu ionisieren. Die

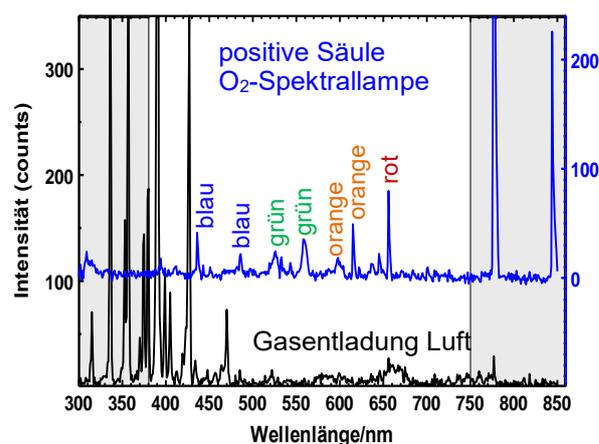
relativ schweren, trägen Ionen werden weniger schnell in Richtung Kathode als die Elektronen in Richtung Anode abgeführt. Kurz vor der Kathode entsteht daher eine stationäre positive Raumladung, die dafür sorgt, dass hier der größte Spannungsabfall im Gasentladungsrohr - der „Kathodenfall“ - entsteht. Auf dem weiteren Weg Richtung Anode werden die Elektronen dann im elektrischen Feld nur noch vergleichsweise moderat beschleunigt, wobei aber auch noch Ionisierungsprozesse stattfinden ([7, S. 649], [9, S. 487]). Ist der Kathodenfall erst einmal entstanden, so sorgt er dafür, dass auch alle nachfolgend aus der Kathode herausgeschlagenen Elektronen dicht an der Kathode stark beschleunigt werden und im Bereich des negativen Glimmlichts wiederum ionisieren können, so dass die positive Raumladung und damit der Potentialverlauf im Gasentladungsrohr stabil erhalten bleibt. In einem Schulbuch wird dieser Effekt daher als Beispiel für Selbstorganisation dargestellt ([6, S. 325], ohne dass hier auf die Anregungsprozesse im Gas eingegangen wird.

Die durch Elektronenstoß bewirkten starken Emissionslinien von  $N_2^+$ -Ionen im negativen Glimmlicht (Abb. 8a), die im Spektrum von positiver Säule und anodischem Glimmlicht praktisch komplett fehlen (Abb. 8b) zeigen die starke Ionenkonzentration und damit die positive Raumladung im Bereich des negativen Glimmlichts. Die Ursache des Kathodenfalls wird also experimentell direkt bewiesen! Die Messungen lassen auch auf eine eher geringe Ionenkonzentration in der positiven Säule schließen.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der Spektren von  $O_2$ -Spektrallampe und Gasentladung in verdünnter Luft. Da bei der Sauerstoff-Spektrallampe das negative Glimmlicht aus Intensitätsgründen nicht spektroskopisch untersucht werden konnte (s. o), kann nur das Spektrum der positiven Säule zum Vergleich herangezogen werden. Das  $O_2$ -Spektrum wird von einer intensiven Spektrallinie im Infraroten (777 nm) dominiert. Die zweitintensivste Linie liegt ebenfalls im Infraroten bei 844 nm. Die beiden Linien können Anregungen des Sauerstoffatoms zugeordnet werden – die intensivsten Emissionslinien des neutralen Sauerstoffs liegen bei diesen Wellenlängen [18, S. 10-70]. Auch die fehlende Bandenstruktur bei diesen intensiven Linien deutet auf eine atomare Anregung hin.

Die 777 nm-Linie tritt auch im negativen Glimmlicht des Gasentladungsrohrs auf. Diese schwache Linie, die im reinen Stickstoffspektrum nicht auftritt (Abb. 7a), kann so eindeutig dem Sauerstoff zugeordnet werden. Im Spektrum von anodischem Glimmlicht und positiver Säule des Gasentladungsrohrs ist die Linie auf Grund der sehr geringen Lichtintensität in unseren Messungen nicht beobachtbar (Abb. 6b und c). Im sichtbaren Spektralbereich zeigt die  $O_2$ -Spektrallampe nur geringe Intensitäten. Auch mit dem Auge wird nur ein relativ schwaches, weiß erscheinendes Leuchten wahrgenommen. Die weiße Farbe ist aus den Farben der emittierten Linien sofort einsichtig,

denn es werden blaue, grüne und rot/orange Linien emittiert, also im Wesentlichen die Grundfarben der additiven Farbmischung. Diese setzen sich zu einem weißen Farbeindruck für das Auge zusammen, sofern die Intensitäten gleich sind, was hier in etwa der Fall ist. Man würde aus den Messungen allenfalls einen leichten Rot/Orangestich des Lichts erwarten. Bei der nur geringen Intensität erlaubt der Seheindruck aber keine sichere Aussage über eine rötliche Einfärbung. Da die rote Linie bei 656 nm auftritt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich hier um die rote Balmerlinie von Wasserstoff handelt, also eine Verunreinigung beim Herstellungsprozess vorliegt.



**Abb. 9:** Vergleich der Spektren der Gasentladung in Luft und der  $O_2$ -Spektrallampe. Dargestellt sind jeweils die Spektren mit der größten Intensität: positive Säule bei der Spektrallampe (blau), negatives Glimmlicht beim Gasentladungsrohr (schwarz). Die nicht-sichtbaren Bereiche der Spektren sind grau hinterlegt.

### 3. Fazit

Die Leuchterscheinungen der Gasentladung in Luft bei vermindertem Druck lassen sich spektroskopisch einfach und schnell untersuchen. Die Messmethode ist sowohl für Studierende als auch für den Unterricht der Sekundarstufe II geeignet. Aus den Ergebnissen ergeben sich Anknüpfungspunkte an vielfältige Studiums- und Unterrichtsinhalte: Die Anregung und Ionisation von Atomen und Molekülen durch Elektronenstoß und die Emission von Licht fester Energie beim Übergang von Elektronen zwischen zwei Energieniveaus (Bohrsches Postulat), die Identifikation der beteiligten Stoffe aus gemessenen Emissionsspektren und die additive Farbmischung können zum Beispiel thematisiert werden. Die Existenz positiver Ionen (positive Raumladung) in Kathodennähe, die als Ursache für den starken, in Gasentladungsrohren mit Zwischenelektroden auch messbaren, Spannungsabfall (Kathodenfall), in der Literatur angegeben wird, kann einfach nachgewiesen werden.

Es lohnt sich durchaus, der Gasentladungsphysik mit ihren auch ästhetisch schönen Leuchterscheinungen in Studium und Unterricht wieder mehr Beachtung zu

schenken. Insbesondere sollte dieses auch zum Anlass genommen werden, die große historische Bedeutung ausführlicher zu thematisieren.

#### 4. Literatur

- [1] Röntgen, Wilhelm Conrad: Über eine neue Art von Strahlen. In: Sitzungsberichte der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft, 28.12.1895 (1895)
- [2] Segrè, Emilio: Die großen Physiker und ihre Entdeckungen – Von den fallenden Körpern zu den Quarks, München: Piper (1997)
- [3] Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, 3. Auflage, Hannover: Schroedel (2005)
- [4] Meyer, Lothar; Schmidt, Gerd-Dietrich (Hrsg.): Duden Lehrbuch Physik Gymnasiale Oberstufe, 2. Auflage, Berlin: Duden (2012)
- [5] Ackermann, Peter et. al.: Fokus Physik Qualifikationsphase SII, 1. Auflage, Berlin: Cornelsen (2014)
- [6] Bader, Franz (Hrsg.): Dorn, Bader Physik Gymnasium SII, Braunschweig: Westermann, Schroedel, Diesterweg (2010)
- [7] Raith, Wilhelm: Bergmann, Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2, Elektromagnetismus, 9. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter (2006)
- [8] Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, 3. Auflage, Berlin: Springer (2004)
- [9] Meschede, Dieter (Hrsg.): Gerthsen Physik, 25. Auflage, Berlin: Springer (2015)
- [10] Raith, Wilhelm (Hrsg.): Bergmann, Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band 4, Teilchen, Berlin: Walter de Gruyter (1992)
- [11] <https://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie> (Stand: 4/2020)
- [12] Deng, X. L.; Nikiforov, A. Yu.; Vanraes, P. Leys, Ch.: Direct current plasma jet at atmospheric pressure operating in nitrogen and air. In: Journal of Applied Physics 113, 023305 (2013)  
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4774328> (Stand: 4/2020)
- [13] Bayram, S. B.; Freamat, M. V.: Vibrational spectra of N<sub>2</sub>: An advanced undergraduate laboratory in atomic and molecular spectroscopy. In: American Journal of Physics 80 (2012), S.664-669  
<http://dx.doi.org/10.1119/1.4722793> (Stand: 4/2020)
- [14] Sharma, M. K.; Saikia, B. K.: Discharge conditions and emission spectroscopy of N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub><sup>+</sup> active species in a variable power *dc* pulsed plasma used for steel nitriding. In: Indian Journal of Pure & Applied Physics 46 (2008), S. 463 - 470  
<https://pdfs.semanticscholar.org/b8a3/6d98b1c2f60364722eebad78449200794b91.pdf> (Stand: 4/2020)
- [15] Lofthus, A.; Krupenie, P. H.: The spectra of molecular nitrogen. In: Journal of Physical and Chemical Reference Data 6 (1977), S. 113 – 307  
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.555546> (Stand:4/2020)
- [16] Müller, Alexander: Laser: Eine Einführung. In: Anwendungen des Lasers, Heidelberg: Spektrum (1998)
- [17] <https://de.wikipedia.org/wiki/Stickstofflaser> (Stand: 4/2020)
- [18] Lide, David R.: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76. Auflage, Boca Raton: CRC (1995)