

Plasmaphysik

2-stündige Einführungsvorlesung

von

Roman Schrittwieser
Institut für Ionenphysik
Universität Innsbruck
Österreich

1. Einführung

1.1. Was ist Plasma? Herkunft des Begriffes "Plasma"

Plasma ist ein (vierter) Materiezustand im Vergleich zum „normalen“ festen, flüssigen und gasförmigen Zustand. Dennoch sollten wir den Begriff "Vierter Aggregatzustand" nur mit Vorbehalt benutzen, denn der Übergang von gasförmiger zu ionisierter Materie ist streng genommen kein echter Phasenübergang. Der Grund dafür ist folgender:

Betrachten wir einen Festkörper von einer bestimmten Masse, der in einem evakuierten Gefäß eingeschlossen sei. Der Einfachheit halber um handle sich dabei nicht um eine Verbindung sondern um ein Element, z.B. ein Stück Natriummetall. Wenn wir dieses Gefäß gleichmäßig erhitzen und damit auch dem Natrium gleichmäßig Wärme zuführen, wird das Natrium bei der entsprechenden Temperatur zu schmelzen beginnen. Während des Schmelzvorganges bleibt die Temperatur des Gemisches aus festem und flüssigem Natrium konstant, und die gesamte zugeführte Energie wird für den Schmelzvorgang verbraucht. Erst wenn das gesamte Natrium verflüssigt ist, wird sich die Temperatur des flüssigen Natriums weiter erhöhen, bis der Siedepunkt des Natriums erreicht ist. Dann bleibt die Temperatur wieder konstant, bis das gesamte Natrium in den gasförmigen Aggregatzustand übergegangen ist. Natürlich befindet sich unter unserer Versuchsannahme streng genommen während dieses gesamten Vorganges das feste bzw. flüssige Natrium immer im Gleichgewicht mit einer Atmosphäre aus Natriumdampf bei dem der jeweiligen Temperatur entsprechenden Dampfdruck. Aber das Prinzip ist klar. Wenn wir nun jedoch in einem Gedankenexperiment (denn es gibt kein Gefäß, das wir auf die notwendige Temperatur erhitzen könnten, ohne dass es zuerst schmelze bzw. dann verdampfte) das Gefäß mit dem Natriumdampf weiter erhitzen, bis die Temperatur etwa 5000 K erreicht, dann würden die Stöße der Natriumatome miteinander so energiereich, dass es zu immer mehr Ionisationsstößen kommt, und sich der Ionisationsgrad immer mehr erhöht, bis bei einer Temperatur von ca. 10000 K der gesamte Natriumdampf ionisiert und damit ein Plasma geworden ist. Aber, und das ist der springende Punkt, dieser Übergang findet nicht bei einer bestimmten Temperatur statt sondern ist ein allmählicher, der über einige Hundert Grad verläuft. D.h., dass nicht die gesamte, ab ca. 5000 K zugeführte Energie in den Ionisationsprozess fließt, sondern dass ein erheblicher Teil nach wie vor für die Erhöhung der thermischen Energie verwendet wird. Dies ist der prinzipielle Unterschied zu den Phasenübergängen fest-flüssig und flüssig-gasförmig, und der Grund, warum wir

eigentlich nicht von einem vierten Aggregatzustand sprechen sollten sondern bestenfalls von einem vierten Zustand der Materie.

1927 untersuchte Irving Langmuir im General Electric Research Lab eine Niederdruckquecksilberentladung und stellte fest, dass sich in einer langen Glasröhre eine kalte leuchtende Entladung ausbreitete, u.z. mit gleichförmigen elektrischen und optischen Eigenschaften und kompletter Raumladungsneutralisation. Wie Crookes in 1870 schon erkannt hatte, handelte es sich um einen besonderen (neuen) Materiezustand, der sich vor allem von der Randschicht (sheath: Plasma in der Nähe der Wand bzw. Elektrode) unterschied. Langmuir suchte daher für diesen Materiezustand einen neuen Namen: $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ (plasma) ist auf griechisch „das Gebildete, das Geformte“.

Erste einfache Definition: Plasma ist Materie in gasförmigem Zustand, die in elektrischer Weise angeregt ist und deren Eigenschaften wesentlich von freien Ladungsträgern bestimmt wird. Normalerweise besteht Plasma aus drei Komponenten:

- 1.) elektrisch neutrale Gasteilchen (Atome, Moleküle, Cluster, Aerosole,...),
- 2.) elektrisch geladene Teilchen (positive bzw. negative geladene schwere Teilchen: Kationen - Anionen, Molekülonen [z.B. C_{60}^-], Staubteilchen, Elektronen),
- 3.) elektromagnetische Quanten (Photonen).

ad 1.) Gasteilchen können entweder im energetischen Grundzustand oder in einem angeregten Zustand (elektronisch, Schwingung, Rotation) sein.

ad 2.) Positive Ionen können einfach oder mehrfach ionisiert sein, während negative Ionen in den meisten Fällen nur einfach ionisiert vorkommen (ebenfalls unterschiedliche Anregungszustände). Staubteilchen in einem Plasma laden sich meistens negativ auf.

In den meisten Fällen entsteht Plasma durch eine elektrische Entladung in einem Gas, kann aber auch durch plötzliches oder kontinuierliches Erhitzen von Materie (über eine Temperatur von einigen 1000 K), durch Laserbestrahlung oder durch chemische Reaktionen entstehen.

Achtung! Es bestehen gravierende Unterschiede zu einem Elektrolyten: Ein Elektrolyt ist zumeist flüssig (einige fest), enthält keine freien Elektronen sowie keine Photonen und alle Teilchen befinden sich im Grundzustand, da sehr häufige (abregende) Stöße stattfinden.

Zweite mathematische Definition:

$$\Sigma q_+ n_+ = \Sigma q_- n_-, \quad (1.1)$$

mit n als der Teilchendichte pro Volumen und $q = Ze$ als dem Ladungszustand. Gl (1.1) entspricht $\Delta E = 0$, d.h., es gibt keine Raumladung.

Die weniger stringente Bedingung:

$$|\Sigma q_+ n_+ - \Sigma q_- n_-| \ll \Sigma q_+ n_+, \quad (1.2)$$

heißt Quasineutralitätsbedingung des Plasmas. Andererseits können in eng begrenzten Schichten (sheaths) hohe Raumladungen und damit Abweichungen von den Gl.en (1.1) und (1.2) und starke elektrische Felder auftreten.

Aufgrund der Anwesenheit von freien Ladungsträgern lässt sich Plasma mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern beeinflussen (manipulieren) und auch auf verschiedene Weise nutzbar machen.

1.2. Was ist Plasma? Herkunft des Begriffes "Plasma"

1600: Das Phänomen der Elektrizitätsleitung in Gasen wurde entdeckt, lange bevor ein eindeutiges Begriffssystem zur Beschreibung vorhanden war. Der Leibarzt der englischen Königin Elisabeth, William Gilbert (1544-1603), beschrieb in seinem Buch „De Magnete“, dass:

- (i) eine Flamme einem geladenen Konduktorium die Fähigkeit nimmt, andere Körper anzuziehen, und dass
- (ii) andererseits ein Elektroskop durch eine Kerzenflamme hindurch (also ohne direkte Berührung) von einem geladenen Konduktorium aufgeladen werden kann.

Bereits die alten Griechen wussten, dass Bernstein durch Reibung für andere leichte Objekte anziehend wurde. Erst Gilbert führte jedoch systematische Untersuchungen darüber durch und den Begriff „Elektrizität“ ein, indem er einen Glasstab, der mit Seide gerieben war, elektrifiziert (amberized) nannte. 1733 fand der Franzose Charles de Cisterany Du Fay, dass Siegellack mit Katzenfell gerieben eine andere Ladung annahm als der Glasstab mit Seide. Benjamin Franklin (1752) nannte diese Arten der Elektrizität positiv und negativ.

1667: In der Florentiner Akademie wurden ähnliche Experimente durchgeführt, ihre Ergebnisse wurden als „Fließen von Elektrizität“ durch die Flamme erklärt.

- 1785: In vielen sorgfältigen Experimenten zeigte Coulomb (1736-1806), dass ein geladener Körper auch durch normale Luft entladen werden kann: durch Verwendung verschiedener Isolatoren konnte er die Entladung über den Isolator von derjenigen durch die umgebende Luft unterscheiden.
- 1752: Benjamin Franklin (1709-1790) erkannte in lebensgefährlichen Experimenten die Ähnlichkeit zwischen dem atmosphärischen Blitz und dem elektrischen Funken (elektrische Überschläge, bei denen der Stromdurchgang durch Gase mit Leuchterscheinungen und Schall verknüpft ist; wurden mit Hilfe von Elektrisiermaschinen erzeugt, ab 1745 mit Leydentöpfen, ab 1800 mit Voltabatterien).
- 1803: Petroff fand bei Versuchen mit einer Voltabatterie (aus 1000 Zellen bestehend) die elektrische Bogenentladung bei Atmosphärendruck (Lichtquelle von bis dahin unbekannter Leuchtstärke).
- 1831: Faraday untersuchte den Stromdurchgang durch evakuierte Glasröhren und entdeckte die Glimmentladung und Dunkelentladung.
- 1851: Heinrich Ruhmkorff erfindet die Induktionsspule und eröffnet damit den Weg zu stromstärkeren und stationären Experimenten jenseits der Niedervoltbogenentladung.
- 1858: Heinrich Geissler entwickelt als Glasbläser in Bonn eine Methode um Platinelektroden direkt ins Glas einzuschmelzen: so entwickelte er die Geisslerröhren.
- 1859: Plücker entdeckt die „Kathodenstrahlen“.
- 1869: Hittdorf entdeckt, dass diese Kathodenstrahlen Schatten werfen; weitere Arbeiten darüber erscheinen von Goldstein (1876: Kathodenstrahlen sind „Wellen im Äther“).

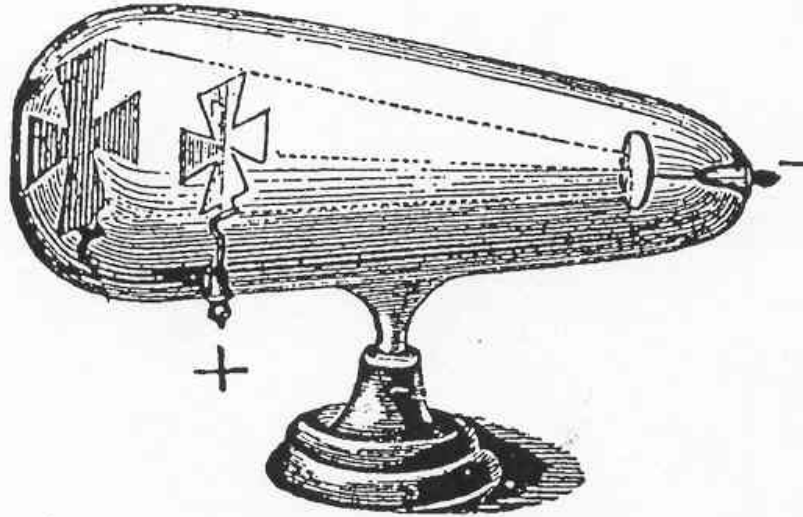


Fig. 5. Cathode rays travel in straight lines. The positive electrode was a cross cut from an aluminum sheet. A dark shadow was cast against a bright green background of the glass excited by the cathode ray bombardment. The cross was on a horizontal hinge so that it could be tipped out of the way, and the shadow disappeared.

Abbildung 1-1:

(Fig.5 in Hirsh, Oskam): Schattenwurf durch Kathodenstrahlen

1874: McLeod entwickelt das Quecksilberdruckmeßgerät.

1879: William Crookes entdeckt nach vielen Jahren der Arbeit mit „vacuum tubes“ die Kathodenstrahlen und erklärt in einem Vortrag für die British Association for the Advancement of Sciences: "So distinct are these phenomena from anything, which occurs in air or gas at the ordinary tension [], that we are led to assume that we are here brought face to face with Matter in a Fourth state or condition". Crookes vertrat im Gegensatz zu Hittdorf die Meinung, dass die Kathodenstrahlen geladene Teilchen (Ionen) sind, die mit großer Geschwindigkeit senkrecht aus der Kathode herausschießen.

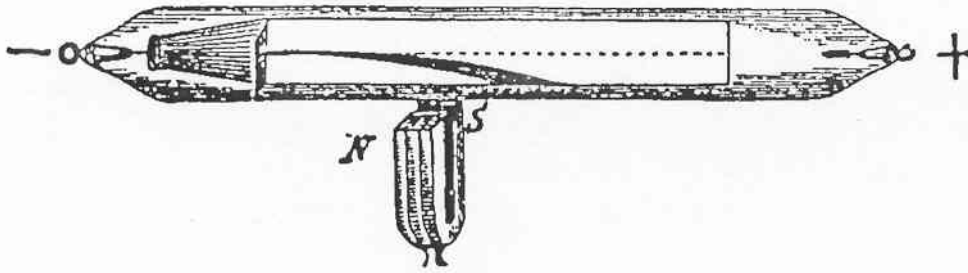


Fig. 4. The deflection of cathode rays by a magnetic field.

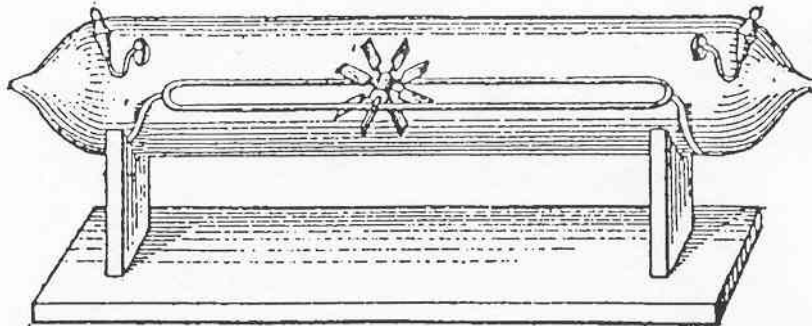


Fig. 6. The railway tube. Cathode rays were observed to produce a mechanical force on bodies which they hit. In the tube, a small wheel with mica paddles could be made to roll from cathode to anode along a glass track.

Abbildung 1-2:

(Fig.4 und Fig.6 in Hirsh, Oskam): Ablenkung im magnetischen Feld und „Eisenbahnröhre“ (hitze Debatten zwischen Crookes und Hittedorf ob dieser Bewegungseffekt rein mechanisch oder durch Erhitzung; Erhitzung konnte nämlich ebenfalls nachgewiesen werden).

Bis 1880: Es gab nur Zylinderpumpen mit bestenfalls 0,1 mbar Enddruck. In der Folge Erfindung der Töplerpumpe (0,01 mbar) und der mechanischen Rotorpumpe (1907) und der Quecksilberdiffusionspumpe (1915) durch Gäde. Damit konnten Experimente bei immer niedrigeren Drücken und immer höheren Spannungen durchgeführt werden, und Details der Gasentladungen wie z.B. komplexe optische Strukturen und die "Identität der entdeckten Strahlen (Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen, Röntgenstrahlen)" aufgeklärt werden.

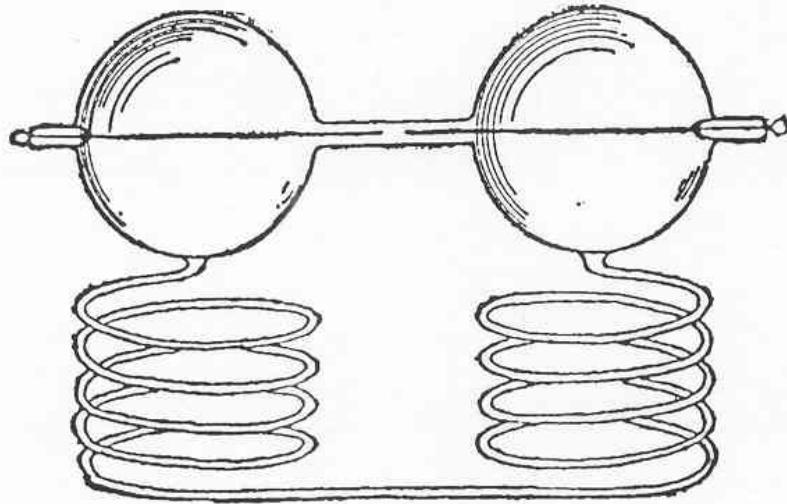


Fig. 2. Demonstration of the Paschen effect. When the pressure of the gas in the bulbs was reduced, the discharge took place through the long tube and not across the small gap between the metal electrodes.

Abbildung 1-3:

Demonstration des Pascheneffekts durch Hittdorfsches Umwegrohr 1884 (Fig. 2 in Hirsh, Oskam).

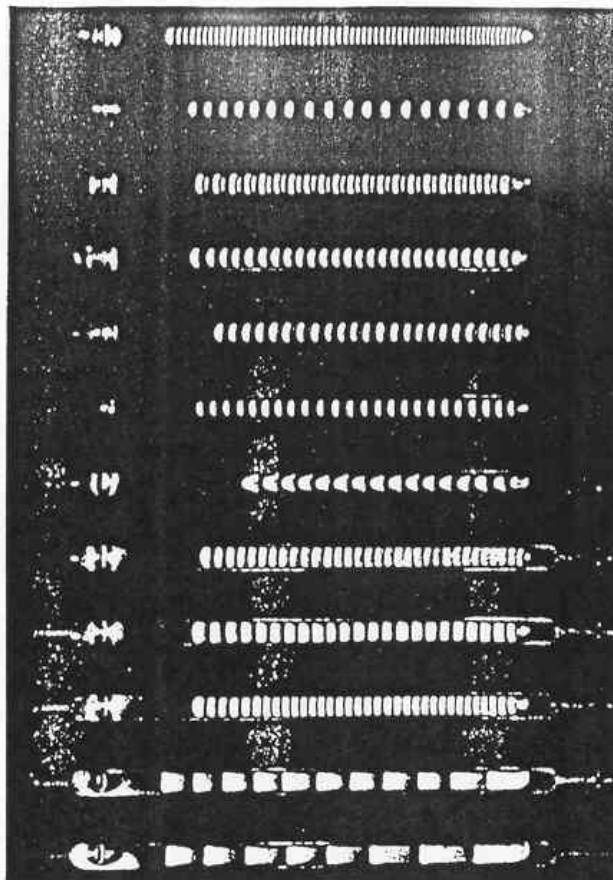


Fig. 7. Many studies were made of the complicated visual structure of the discharge.

Abbildung 1-4:

Verschiedene Erscheinungsformen der Niederdruckgasentladung (Fig. 7 in Hirsh, Oskam).

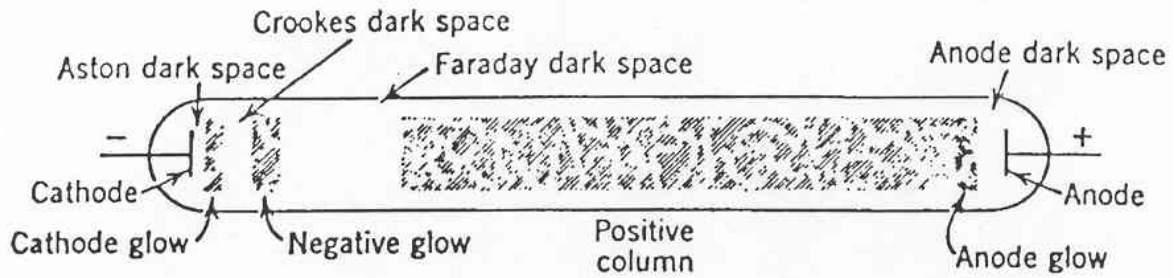


Fig. 8. Nomenclature for various parts of an electrical discharge.

Abbildung 1-5:

Nomenklatur der verschiedenen Teile einer Gasentladung (Fig. 8, in Hirsh, Oskam).

1895: Entdeckung der Röntgenstrahlung mit einer Crooke'schen Fokussierrohr (gebaut um ein Maximum an Kathodenstrahlen von der Anode auf die Glaswand abzulenken und dort angebrachte Substanzen zum Fluoreszieren zu bringen).

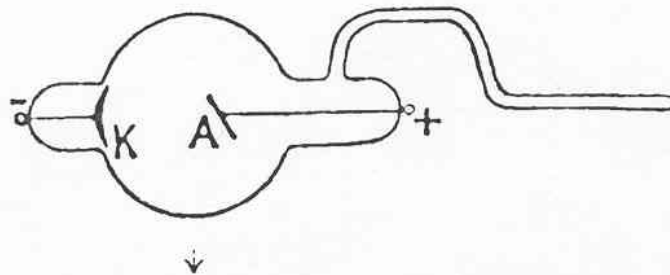


Fig. 10. A Crooke; "focus tube" of the type Röntgen used to study fluorescence and x-rays.

Abbildung 1-6:

Crooke'sche Fokussierrohr (Fig. 10, Hirsh, Oskam).

1896: Thomson und Rutherford untersuchten die Leitung durch Gas (bei Atmosphärendruck), das durch Röntgenstrahlung leitend gemacht wurde. Das Gas zeigte keine Leitung die dem Ohm'schen Gesetz entspricht, sondern mit zunehmender Spannung wird ein Gleichgewichtswert erreicht. Sie schlossen daraus auf die Erzeugung von positiven und negativen geladenen Teilchen, die rekombinieren können (ähnlich wie in einem verdünnten Elektrolyten) und beschrieben den Verlust in einer auch noch heute gültigen Bilanzgleichung.

$$\frac{dn}{dt} = -Rn^2 \quad (1.1)$$

mit R als Rekombinationskoeffizient. Thomson und Rutherford nahmen die Strom-Spannungscharakteristik dieser leitenden Gase auf und bestimmten daraus die Beweglichkeit der positiven und negativen Ionen in verschiedenen Gasen.

1897: Kathodenstrahlen sind Elektronen!

1935: Wurde von Allis und Mitarbeitern die Elektronenenergieverteilung postuliert. Bis dahin wurde nur der Ausdruck „durchschnittliches Elektron“ verwendet. Außerdem war der Fortschritt durch schlechte Vakua behindert. Ultrahochvakuum gab es erst nach 1940.

DISCOVERIES IN GASEOUS ELECTRONICS

Date	Concept	Originator
1600	Electricity	Gilbert
1742	Sparks	Desaguliers
1808	Diffusion	Dalton
1808	Arc (discharge)	Davy
1817	Mobility	Faraday
1821	Arc (name)	Davy
1834	Cathode and anode	Faraday
1834	Ions	Faraday
1848	Striations	Abria
1860	Mean free path	Maxwell
1876	Cathode rays	Goldstein
1879	Fourth state of matter	Crookes
1880	Paschen curve	la Rue and Müller
1889	Maxwell-Boltzmann distribution	Nernst
1891	Electron (charge)	Stoney
1895	X rays	Röntgen
1897	[Cyclotron] frequency	Lodge
1898	Ionization	Crookes
1899	Transport equations	Townsend
1899	Energy gain equations	Lorentz
1901	Townsend coefficients	Townsend
1905	Diffusion of charged particles	Einstein
1906	Electron (particle)	Lorentz
1906	[Plasma] frequency	Rayleigh
1914	Ambipolar diffusion	Seeliger
1921	Ramsauer effect	Ramsauer
1925	Debye length	Debye and Hückel
1928	Plasma	Langmuir
1935	Velocity distribution functions	Allis

Abbildung 1-7:

Übersichtstabelle über wichtige Entdeckungen in der Plasmaphysik (Hirsh, Oskam).

1.3. Bedeutung, Anwendungen

Es gibt zahlreiche Formen von Plasma in der Natur, im Labor und in technischen Anwendungen:

1.3.1. Plasmen in der Natur:

Mehr als 99,99% der sichtbaren Materie in Universum existiert in Form dieses vierten Materiezustandes (Plasma): Sonne und solares Plasma und in allen aktiven Sternen, interplanetare, interstellare, intergalaktische Materie, Ionosphäre und Magnetosphäre der Erde (also kaum 60 km über uns), Blitze usw.

1.3.2. Plasmen im Labor:

Gasentladungen (Glimmentladung, Koronaentladung, Funken, Bogen), Plasmen erzeugt durch Schockwellen oder durch Beschuss mit Ladungsträgern, Gaslaser, Ionenquellen für Massenspektrometrie (z.B. spezielle Plasmaquellen wie: ECR-Quelle, Elektrospray-Quelle).

1.3.3. Plasmen in Technik:

Leuchtstoffröhre, Gasentladungsröhre (Elektronik, Beleuchtung), Plasmaschweißen und Plasmaschneiden, Funkenerosion, Plasmaätzen und Plasmachemie, Plasmadeposition, Plasmabehandlung, Fusionsplasma, Ozonisator, Photokopierer.