

Praktische Plasmaoberflächentechnik

Leitfaden für Studium und Anwendung

Birger Dzur

Erste Auflage mit 85 Abbildungen
und 32 Tabellen

- Fachverlag für
- Oberflächentechnik – Galvanotechnik
 - Produktion von Leiterplatten
und Systemen
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.
LEUZE
VERLAG

109 JAHRE 1902 – 2011

BAD SAULGAU
GERMANY

Vorwort

Dieses Buch beschäftigt sich mit der Anwendung des physikalischen Plasmas in der Oberflächentechnik. Hier gilt es als *Schlüsseltechnologie*, ist aber nur eine von vielen, unterschiedlichsten Verfahrensgruppen. Mein Anliegen ist es, Studierenden und potenziellen Anwendern, insbesondere auch *Nicht-Plasmafachleuten*, in knapper und möglichst verständlicher Form einen Überblick zu Grundlagen, Technologien und Anwendungsmöglichkeiten der modernen Plasmaoberflächentechnik zu geben. Das Buch ist ein Ergebnis meiner Lehr- und Forschungstätigkeit an der *TU Ilmenau*. Es basiert auf dem, was ich hier von meiner leider viel zu früh verstorbenen Mentorin, Frau Prof. *Gabriele Nutsch*, gelernt habe und ist auf fachliche Breite, nicht auf Tiefe ausgelegt. Dieses Konzept wende ich insbesondere für Studierende in Bachelor-Studiengängen an.

Das Plasma ist der 4. Aggregatzustand der Materie. Je nach Quelle befinden sich bis zu 99 Prozent der gesamten bekannten Materie im Plasmazustand. Das restliche Prozent beinhaltet die allgemein vertrauten Zustände *fest*, *flüssig* und *gasförmig* (sowie inzwischen fünf weitere, die aber nur noch ein paar Physikern vertraut sind). Ist es nicht sonderbar, dass selbstverständlich 100 Prozent der Bevölkerung dieses eine Prozent kennen, aber gefühlt nur ein Prozent die restlichen Neunundneunzig? Daran hat auch das Plasma-TV nur unwesentlich etwas geändert.

Und das obwohl physikalische Plasmen und technische Gasentladungen seit mehr als 200 Jahren intensiv erforscht werden. Es gibt heute eine nahezu unüberschaubare Zahl von Konzepten, Technologien und Anwendungen, täglich kommen neue hinzu. Ich behaupte, dass in hoch entwickelten Industrieländern jeder täglich mit Gasentladungen zu tun hat, zumindest aber mit einem Produkt, das es ohne sie nicht geben würde. Die Leuchtstoffröhre ist ein Beispiel dafür. Laserdrucker und Kopierer funktionieren ohne Gasentladungen nicht. Unsere Autos würden ohne Schweißnähte nicht allzu weit kommen, ohne plasma-gestützte und andere Verfahren der Oberflächentechnik auch mit Schweißnähten nicht. Die Halbleiter- und Mikroelektronik ist ohne Plasmatechnik ebenso undenkbar wie die bunt bedruckte Plastiktüte im Supermarkt. Es fällt inzwischen sogar Fachleuten schwer, den Überblick zu behalten.

Der ist aber für Konstrukteure, Dienstleister und Anwender zunehmend wichtig, nicht nur weil auch in der Oberflächentechnik die Technologiegrenzen zunehmend verschwimmen, sondern aus einem ganz trivialen Grund: Geld! Ich habe in einer Prüfung mal einen Studierenden gefragt, warum wir überhaupt so einen enormen Aufwand betreiben, um Oberflächen zu verändern und zu funktionalisieren. Die Antwort kam prompt: *Weil man damit einen Haufen Geld verdienen kann!* Prinzipiell ist das richtig, besser gefallen hätte

mir aber: *Weil man damit einen Haufen Geld sparen kann!* Zumindest wenn man es von Anfang an richtig macht. Außerdem gehört Mut dazu, einem Kunden auch mal vom eigenen Verfahren abzuraten oder sich neuen Möglichkeiten zuzuwenden. Und eben auch der Überblick.

Die vorliegende Abhandlung sehe ich in diesem Sinne nicht als ausgesprochenes Fachbuch, davon gibt es genug. Es kann und soll kein Anspruch auf Vollständigkeit beziehungsweise durchgehend detaillierte Darstellungen erhoben werden. Ich bin auch nicht auf jedem einzelnen Gebiet ein ausgewiesener Experte. Deshalb lade ich ausdrücklich alle Leser ein, sich an der Beseitigung möglicher Fehler oder Ergänzung zu kurz gekommener beziehungsweise gar nicht erwähnter Punkte zu beteiligen.

Ilmenau, im Juli 2011

Birger Dzur

1 Ein kurzer Streifzug durch die Geschichte

Schon die antiken Griechen unterteilten die Materie in Erde (fest), Wasser (flüssig), Luft (gasförmig) und Feuer (Plasma?). Um 500 vor unserer Zeit gingen der griechische Philosoph *Leukipp* und sein Schüler *Demokrit* außerdem davon aus, dass die Materie aus unteilbaren Bestandteilen zusammengesetzt ist, die sie *atomos* nannten. Nach ihren Vorstellungen bewegen sich und interagieren diese Atome in einer großen Leere, dem *Vakuum*. Erst *Evangelista Torricelli* gelang es aber im 17. Jahrhundert, ein Vakuum herzustellen, sein Zeitgenosse *Blaise Pascal* hat im Jahre 1647 das bis dahin umstrittene Phänomen experimentell nachgewiesen. Viele andere Begriffe, die für uns heute selbstverständlich sind, wurden geprägt, als ihre eigentliche Bedeutung und das, was wir heute darüber wissen, noch nicht bekannt war.

Plasmatechnische Verfahren gelten heute allgemein als hochmodern. Sie blicken jedoch inzwischen auf eine über 200jährige Geschichte zurück. Ihr Ursprung ist ebenso wie die Geschichte der Galvanotechnik unmittelbar mit der Verfügbarkeit der ersten leistungsfähigen Stromquellen, der Voltaschen Säulen, verknüpft.

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Graf von Volta beschrieb sie erstmals in einem Brief an die Royal Society in London vom 20. März 1800 als eine Anordnung von Kupfer- und Zinkplättchen, zwischen denen elektrolytgetränkte Papp- und Lederstücke angeordnet waren. Sie basiert auf Berichten von *Luigi Galvani* der mit den nach ihm benannten galvanischen Elementen tote Frösche zum Zucken brachte. Nicht nur UFO-Gläubige, sondern auch seriöse Archäologen, gehen allerdings davon aus, dass bereits die antiken Hochkulturen im Zweistromland und im alten Ägypten über das verfügten, was heute als Batterie allgegenwärtig ist.

Genau 200 Jahre früher taucht aber schon in einer vom Leibarzt der englischen Königin Elisabeth I., *Sir William Gilbert* verfassten Abhandlung über den Magnetismus erstmals der Begriff *Elektrizität* auf. Etwa 100 Jahre später, also immer noch weit vor dem Beginn des eigentlichen Zeitalters der Elektrizität, philosophierte der Franzose *John Theophilus Desaguliers* über den *Funken*. Im Jahre 1709 experimentierte der Engländer *Francis Hauksbee* mit elektrischen Leuchterscheinungen in evakuierten, quecksilberhaltigen Glaskugeln, die er elektrostatisch aufgeladen hat.

1753 fordert das Plasma ein erstes namhaftes Todesopfer, als der russische Professor *Georg Wilhelm Richmann* bei Experimenten mit Gewitterblitzen stirbt. Den lebensrettenden Blitzableiter hat *Benjamin Franklin* zwar bereits 6 Jahre früher erfunden, aller-

dings wohl nicht nach Russland exportiert. Tragisch endeten zum Beispiel auch die Versuche von *Way* mit an Luft betriebenen Quecksilber-Bogenlampen (1840).

Unmittelbar nachdem die ersten leistungsstarken Batterien als Stromquellen verfügbar waren, begannen sich verschiedene Forscher gezielt mit dem elektrischen *Lichtbogen* zu beschäftigen. Einen Entdecker des Lichtbogens gibt es offiziell nicht. Fest steht aber, dass er seinen Namen von *Humphry Davy* erhielt. *Davy* war eigentlich Chemiker und hat unter anderem die Elemente Kalium, Barium, Strontium, Kalzium und Magnesium erstmals in reiner Form durch Elektrolyse dargestellt.

In einer frühen Abhandlung über dem Lichtbogen aus dem Jahre 1904 wird beschrieben [1], dass *Davy* ab 1800 (gesichert ist das Jahr 1808) mit Lichtbögen experimentierte. Der Russe *Petrow* soll schon ab 1802 Lichtbögen betrieben haben, hat dies aber wohl nicht schriftlich überliefert. Seinen heutigen Namen (*arc*) erhielt der Lichtbogen 1821 von *Davy*. Er wurde zunächst hauptsächlich für Beleuchtungszwecke eingesetzt (erste Vorführung 1820). Eine erste vergleichende Studie zu den damals bereits bekannten Leuchtmitteln Glühlampe, Bogenlampe und Niederdruckentladungslampe stammt ebenfalls von *Davy*.

Humphry Davys berühmtester Laborassistent und Nachfolger war *Michael Faraday*, ein gelernter Buchbinder und vielseitiger Autodidakt, der sich auch mit elektromagnetischer Induktion, optischen Gläsern und der Herstellung rostfreier Stähle beschäftigte. Wesentlich sind vor allem seine Arbeiten zur Elektrolyse, der wir unter anderem die Begriffe *Kathode*, *Anode* und *Ionen* (1834) verdanken. Ab 1855 hat er sich auch intensiv mit der Erforschung des Stromflusses in verdünnten Gasen beschäftigt. Er hat trotz all seiner herausragenden Leistungen sogar noch Zeit gehabt, Vorlesungen für Kinder und Jugendliche zu halten. Ein schönes Beispiel für diese *Weihnachtsvorlesungen* sind seine 1861 von *William Crookes* mit stenografierte *Naturgeschichte einer Kerze*. *Crookes* war davon so begeistert, dass er schrieb: *Das Kind, das diese Vorlesungen gehört hat, weiß mehr vom Rätsel des Feuers als Aristoteles!*

Zunehmend geraten so auch durch Arbeiten aus dem Bereich der Elektrochemie das Weltbild des Demokrit und die gute alte Ordnung *fest-flüssig-gasförmig* ins Wanken. Im Jahre 1879 schlug *William Crookes* bei einem Vortrag vor der *British Association for the Advancement of Science* vor, das Plasma als 4. Aggregatzustand der Materie zu betrachten (... *The phenomenon in these exhausted tubes reveal to physical science a new world, a world where matter may exist in a fourth state* ...). Inzwischen haben die Physiker fünf weitere Aggregatzustände beschrieben. *Crookes* hat auch viel mit Elektronenstrahlröhren experimentiert und gilt damit neben *Johann Wilhem Hittorf* als Erfinder der Fernsehbirne.

Noch vor dem Nachweis der *Elektronen* im Jahre 1897 durch *John Thomson* und der Bestimmung ihrer Ladung ein Jahr später, wird der Begriff von *George J. Stoney* für das *Atom der Elektrizität* eingeführt. 1898 ist es wiederum *Crookes*, der den Begriff *Ionisation* erstmals verwendet. *Thomson*, dessen Vorlesungen aus dem Jahre 1897 in Deutschland 1900 unter dem Titel *Die Entladung der Elektrizität durch Gase* erschienen sind [2], hat auch seinen Mitarbeiter *John S. E. Townsend* dazu ermuntert, sich mit Plasmen zu befassen. Dessen Arbeiten zur Theorie der Ladungsträgererzeugung durch Teilchenstöße wurde ab 1900 publiziert [3] und sind heute als *Townsend-Mechanismus* bekannt. Er erhielt im Jahre 1906 als zweiter Plasmaphysiker nach *Philipp Lenard* (1905 für seine Untersu-

chungen an Kathodenstrahlen) den Physik-Nobelpreis. Den letzten Nobelpreis, der laut Begründung ausdrücklich für Beiträge zur Plasmaphysik (extraterrestrische Plasmen) vergeben wurde, erhielt der Schwede *Hannes Alven* im Jahre 1970.

1848 wird in England das erste Patent für ein Lichtbogen-Schweißverfahren erteilt, im Jahre 1885 ziehen russische Erfinder nach. Die ersten Plasmaschneidverfahren werden im zweiten Weltkrieg entwickelt. 1857 führt *Werner v. Siemens* mit einem Ozongenerator das Plasma erstmals in die Technik ein. 1879 folgt in England sein erster Lichtbogen-Schmelzofen.

Ab 1900 beginnt die intensive Erforschung des Weltalls und damit auch der so genannten extraterrestrischen Plasmen. Sie sind dafür verantwortlich, dass sich nach heutigen Vorstellungen 99 % der gesamten bekannten Materie im Plasmazustand befinden.

Bereits im Jahr 1904 erfindet *Nikola Tesla* die wegen ihrer sehr schön umherwabernden Leuchtfäden als Dekoration und bei Wahrsagern heute noch sehr beliebte Plasmalampe. 1931 wird die Natriumniederdrucklampe erfunden, 1936 folgt die erste Leuchtstoffröhre. Ihre Urform ist allerdings wesentlich älter: Der Thüringer Glasbläser *Heinrich Geissler* fertigte schon 1857 ähnliche Röhren.

1911 lässt sich der Schweizer Ingenieur *Max Ullrich Schoob* das *Lichtbogen-Drahtspritzen* patentieren und begründet damit das Plasmaspritzen als heute nicht mehr weg zu denkender Bestandteil thermischer Beschichtungstechnologien. Auf die Idee dazu ist er angeblich gekommen, als er mit einer Pistole auf eine Stahlwand geschossen hat und feststellte, dass die Kugel dort stark deformiert und fest haften blieb. Eigentlich entdeckt hat *Schoob* damals das, was basierend auf Arbeiten der (sinnigerweise) sibirischen Abteilung der *Russischen Akademie der Wissenschaften* seit Mitte der 80er Jahre als *Kaltgasspritzen* die Palette der Beschichtungsverfahren ergänzt. *W. Reinecke* erfindet 1938 das atmosphärische Gleichstrom-Plasmaspritzen, im Jahre 1947 berichtet *G. I. Babat* im Zusammenhang mit spektroskopischen Analyseverfahren erstmals über eine hochenergetische, thermische Hochfrequenzentladung, die heute als *thermisches ICP* bekannt ist. Das Vakuum-Plasmaspritzen wurde 1973 von *E. Mühlberger* in die Technik eingeführt.

Ab 1923 benutzt *Irving Langmuir* das Wort *Plasma* auch für elektrische Entladungen in Gasen. Schriftlich fixiert worden ist es in seinem Aufsatz *Oscillations in Ionized Gases* (1928) [4], im Zusammenhang mit der Beschreibung von Entladungen in Quecksilberlampen. Er erhielt den Nobelpreis im Jahre 1932, allerdings für Chemie.

Auch ... steht hier deshalb, weil der tschechische Mediziner *Johannes Purkinje* bereits wesentlich früher den Begriff für Blutbestandteile verwendete. *Langmuir* verglich damals einfach den Transport von Elektronen und Ionen mit dem von weißen und roten Blutkörperchen. Die so entstandene sprachliche Mehrdeutigkeit prägt aber bis heute nicht nur die Wahrnehmung des Begriffes in der Allgemeinbevölkerung, sondern findet sich so auch als Reihenfolge bei der Erklärung in diversen namhaften Nachschlagewerken. Die Verwirrung wird dadurch komplettiert, dass der Begriff *Plasma* außerdem noch für ein Mineral und für das biologische Protoplasma der Zellen benutzt wird.

Die bis dahin nur unter Begriffen wie Gasentladungen oder Gaselektronik bekannten Phänomene hat u.a. auch der in Greifswald tätige Physiker *Johannes Stark* bereits ab 1899 erstmals in einer umfassenden Monographie zusammengestellt.

1952 hat die Wasserstoffbombe der gesamten Menschheit zunächst einen sehr erschreckenden Eindruck vom bis dahin nur Experten bekannten Phänomen *Plasma* vermittelt, immerhin aber auch zur Idee der Nutzung der kontrollierten Kernfusion zur Energiegewinnung geführt.

Die Halbleiter- und Mikroelektronik sind heute ohne die Anwendung von Plasmaverfahren undenkbar. Die untrennbar dazu gehörenden Technologiegruppen *PVD* und *CVD* definierte *John M. Blocher, jr.* im Jahr 1960. Die Geschichte dünner Schichten beginnt jedoch sehr viel früher. Bereits 1852 berichtete z.B. der deutsche Chemiker *Robert Wilhelm Bunsen* über die Abscheidung von Fe_2O_3 aus gasförmigem Eisenchlorid (FeCl_3) und Wasserdampf. Je nach Begriffsdefinition lassen sich auch noch deutlich ältere Berichte über derartige Prozesse finden. Seit 1983 lassen sich mit CVD-Verfahren sogar Diamantschichten herstellen.

1964 wird unter der Leitung von Professors *Donald Bitzer* (*University of Illinois*) der erste Prototyp dessen vorgestellt, was heute als Plasmadisplay allgemein bekannt ist. Die für ihre Zeit revolutionäre Matrix bestand aus vier hellblau leuchtenden Pixeln von beachtlicher Größe. Das erste echte Plasma-TV-Gerät kommt 1996 in den Handel. Spätestens seit dieser Erfindung ist der Begriff *Plasma* erfreulicherweise auch außerhalb von Expertenkreisen bekannt, obwohl bedauerlicherweise die wenigsten Besitzer (und auch viele Verkäufer) derartiger Geräte wissen wollen, wie sie funktionieren.

Seit 1970 werden Satelliten mit Ionentriebwerken als Steuer- und Lagebahnkorrekturantriebe ausgestattet. Auch Lichtbogentriebwerke werden erprobt und angewendet. Sie haben inzwischen Satelliten bis zum Mond gebracht und dort über Jahre in der Umlaufbahn gehalten. *Star Trek*-Fans wissen, dass der trinkfreudige Wissenschaftler *Zefram Cochrane* im Jahr 2063 den WARP-Antrieb erfinden wird. Der beruht auf einer Materie-Antimaterie-Reaktion im Zusammenspiel mit einer Faltung des Raum-Zeit-Kontinuums. Reine Fiktion? Eine Theorie, wie das funktionieren könnte (das so genannte *Alcubierre-Van den Broeck-Warpfeld*), gibt es seit 1994.

Eigentlich hätte man die Geschichte des Plasmas auch vor 15 Milliarden Jahren, nämlich mit dem Urknall beginnen können. Was da passiert ist und ob es dabei tatsächlich geknallt hat, ist nicht gesichert, es ist aber auf jeden Fall jede Menge Plasma entstanden. Das Leben auf unserer Erde verdanken wir der 4,6 Milliarde Jahre alten Sonne, die sich wie alle Fixsterne im Plasmazustand befindet. Wenn ihr *Brennstoff* (genau genommen brennt bei Plasmen nichts) in einigen Hundert Millionen Jahren aufgebraucht ist, bläht sie sich zu einem roten Riesen auf und wird das Leben auf der Erde auch wieder auslöschen. Oder in beinahe biblischen Dimensionen:

Aus dem Plasma kommen wir und zu Plasma werden wir.

2 **Physikalische Plasmen und technische Gasentladungen – ein Überblick**

Der Begriff *Plasma* stammt vom griechischen Wort $\piλάσμα$ und bedeutet übersetzt *Gebilde*. Die DIN 1326 kennzeichnet das Plasma wie folgt:

Ein Plasma ist ein makroskopisches Vielteilchensystem, das insgesamt elektrisch neutral ist, aber so viele freie elektrische Ladungen enthält, dass deren elektromagnetische Wechselwirkungen untereinander oder mit äußeren elektromagnetischen Feldern die Systemeigenschaften wesentlich bestimmt. Ein Plasma ist daher immer ein elektrischer Leiter.

Etwas weiter gefasst ist das Plasma immer durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Es ist ein elektrisch leitfähiges Gas.
- Es sind nicht mehr zu vernachlässigende Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bestandteilen zu berücksichtigen.
- Es bildet elektromagnetische Felder und kann von äußeren Feldern beeinflusst werden.
- Es sendet Strahlung aus.

Das physikalische Plasma ist damit der 4. Aggregatzustand der Materie. Dies ist *eine* Form den Plasmabegriff zu erklären, eine *Definition*, also dem Wortlaut nach *endgültig* ist das ohnehin nicht. Je nach Betrachtungsweise und Anwendung existieren nämlich unterschiedlichste Möglichkeiten der Klassifizierung von Plasmen z.B. nach:

- wichtigen Parametern, wie
 - Druck: Hoch- und Niederdruckplasmen,
 - Temperatur: thermische (heiße) und nicht-thermische (kalte) Plasmen,
- dem thermodynamischem Verhalten: Gleichgewichts- und Nichtgleichgewichtsplasmen,
- dem Ladungsträgeranteil: partiell und vollständig ionisierte Plasmen,
- der Ladungsträgerdichte: dünne und dichte Plasmen,
- dem Zeitverhalten: stationäre, nichtstationäre und Impulsplasmen,
- dem Feldeinfluss: feldfreie und (magnet-)feldbehaftete Plasmen,
- der möglichen Ausrichtung bestimmter Eigenschaften: isotrope und anisotrope Plasmen,
- der räumlicher Teilchenverteilung: homogene und inhomogene Plasmen.

Zu jeder dieser Plasmaformen gehören spezielle Theorien und daraus abgeleitete Erklärungen des Plasmabegriffs.

Auf der Basis der hier vorgeschlagenen Erklärung lässt sich auch ohne großes Wissen zu den dahinter stehenden Grundlagen Folgendes ableiten:

Ein Laserstrahl ist kein Plasma, weil er nur aus Photonen besteht und keine Ladungsträger enthält. Er besitzt aber eine so hohe Energiedichte (= Energie pro Fläche), dass man mit Laserstrahlen Plasmen erzeugen kann. Die Laser-Plasmaphysik ist ein wichtiges Teilgebiet der Physik und spielt u.a. auch eine wichtige Rolle bei Konzepten zur kontrollierten Kernfusion.

Unsere Umgebungsatmosphäre enthält eine ganze Menge freier Ladungsträger, die Zimmerluft immerhin schon 100 Ionen pro cm^3 . Im Hochgebirge sind es noch wesentlich mehr. Sie werden durch kosmische Strahlung erzeugt und sind von bis zu 15 Wassermolekülen umgeben. Deshalb ist die Luft noch lange kein Plasma, weil die resultierende elektrische Leitfähigkeit praktisch kaum messbar ist.

Heiße Flammen sind kein Plasma, auch wenn dies in diversen namhaften Nachschlagewerken zuweilen zu lesen ist. Sie enthalten zwar eine sehr große Anzahl an freien Ladungsträgern (10^{12} pro cm^3), die Wechselwirkungen mit den in weit größerer Anzahl enthaltenen festen und gasförmigen Bestandteilen unterdrücken, aber ohne externe Eingriffe die Ausbildung von charakteristischen Plasmaeigenschaften.

Ein physikalisches Plasma setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Elektronen,
- ein- und mehrfach geladene, positive Atom- bzw. Molekülionen (Kationen) bzw. negative Atom- bzw. Molekülionen (Anionen),
- angeregte Atome und Moleküle (Radikale),
- Neutralatome und -moleküle,
- Lichtquanten.

Die Gesamtzahl der Teilchen liegt je nach Druck zwischen 10^9 und 10^{21} Teilchen pro cm^3 .

Bei den Wechselwirkungen unterscheidet man prinzipiell Elementarprozesse, Transportprozesse und kollektive Wechselwirkungen. Elementarprozesse sind Wechselwirkungen zwischen einzelnen Teilchen durch Stöße. Die für das Verständnis und auch die Anwendung von Plasmen wichtigsten Elementarprozesse sind die Anregung und die Ionisation. Transportprozesse bestimmen wichtige physikalische Eigenschaften des Plasmas. Die so genannten kollektiven Wechselwirkungen sind zum Beispiel Schwingungen.

Für die Generierung eines Plasmas, also die Erzeugung von Ladungsträgern durch Ionisationsprozesse, ist immer Energie erforderlich (Wärme, Strahlung, elektromagnetische Wellen). Da bei jeder Ionisation immer ein positiv und ein negativ geladenes Teilchen entsteht, sind fast alle Plasmen und Gasentladungen nach außen hin quasineutral. Ausnahmen sind hier nur die technisch bedeutsamen, zu den Korpuskularstrahlen gehörenden Elektronen- und Ionenstrahlen.

Plasmen existieren in der Natur sowohl extraterrestrisch (interstellare Nebel, Fixsterne) als auch terrestrisch (Polarlichter, Elmsfeuer, Gewitterblitze).

Der Begriff *Gasentladung* kennzeichnet dagegen den gezielten Fluss eines elektrischen Stromes durch ein Plasma und damit auch die technische Anwendung von Plasmen. Dazu sind eine äußere Energiequelle und Möglichkeiten zur Energieeinkopplung, zum Beispiel über Elektroden erforderlich.

Jede Gasentladung muss gezündet werden. Darunter versteht man die Bereitstellung primärer Ladungsträger aus einer externen Quelle. Um den Plasmazustand zu erreichen, müssen mit diesen primären Ladungsträgern innere Prozesse der Ladungsträgervielfachung in Gang gesetzt werden. Sind durch diese Prozesse beide Elektroden leitend verbunden, erfolgt der Durchschlag. Er bedeutet den Verlust der Isolationsfähigkeit der Gasstrecke.

Damit eine Gasentladung auch nach dem Durchschlag selbständig existiert, müssen mindestens genauso viele Ladungsträger durch Ionisation erzeugt werden, wie durch die immer gleichzeitig ablaufenden Rekombinationen von Elektronen und Ionen verloren gehen (positive Ladungsträgerbilanz). Ist dies nicht gegeben, handelt es sich um unselbständige Dunkelentladungen, die von der äußeren Ladungsträgerquelle abhängen und sofort verlöschen, wenn diese Quelle wegfällt.

Im Bereich der Oberflächentechnik unterscheidet man meist nur nach thermischen und nicht-thermischen Gasentladungen. Thermische Entladungen sind Hochdruckentladungen, die meisten, aber nicht alle kalten Plasmen werden im Vakuum generiert. Der Druckbereich technischer Plasmaanlagen reicht vom Ultrahochvakuum ($< 10^{-5}$ Pa = 10^{-7} mbar bei Elektronen- und Ionenstrahlen) bis zu etwa 30 bar Überdruck bei einigen speziellen Beschichtungsverfahren.

Eine nennenswerte elektrische Leitfähigkeit bei thermischen Gasplasmen wird erst bei Temperaturen oberhalb von 5000 K beobachtet. Enthält das Gas metallische Dämpfe, reichen 2000 K aus. Die elektrische Leitfähigkeit liegt dann auf einer logarithmischen Skala zwischen der von Metallen und Halbleitern. Heiße Plasmen sind entgegen einer landläufigen Meinung auch keinesfalls immer vollständig ionisiert. Unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen wird dieser Zustand erst ab 20000 K erreicht. Das ist in etwa auch die technisch beherrschbare Obergrenze für die Anwendung von Gasentladungen in der Oberflächentechnik. Die untere Grenze ist die Raumtemperatur.

Hinsichtlich des fließenden Stromes decken technisch genutzte Gasentladungen einen Bereich von Mikroampere (Koronaentladungen) bis zu einigen Hundert Kiloampere (thermische Pinchentladungen) ab. Die Leistungen reichen von Milliwatt bis Megawatt.

3 Plasmaphysikalische Grundlagen

Die DIN 1326 Teil 1 (Oktober 1991) sagt zur Beschreibung des Plasmazustands:

Die elektrischen Ladungen von Plasmen erzeugen elektromagnetische Felder, die ihrerseits wieder Kräfte auf die Ladungen ausüben und deren Bewegung beeinflussen. Die Beschreibung eines Plasmas muss daher in selbstkonsistenter Weise durch Mechanik (Bewegungsgleichungen) und Elektrodynamik (Maxwell-Gleichungen) gemeinsam erfolgen.

Eine detaillierte Behandlung von Plasmen erfordert Methoden der statistischen Physik.

Hält man sich die Vielfalt der im Plasma enthaltenen Teilchen mit ihren unterschiedlichsten Eigenschaften vor Augen und berücksichtigt alle denkbaren Wechselwirkungen dieser Teilchen untereinander (allein bei den Elementarprozessen sind insgesamt 55 Möglichkeiten vorhanden), so wird klar, dass diese Herangehensweise zwar theoretisch möglich ist, praktisch aber schnell an ihre Grenzen stößt.

Eine handhabbare, wenn auch nicht ganz exakte Möglichkeit, ein Plasma zu beschreiben, liefert dagegen die kinetische Gastheorie. Sie gilt streng genommen nur für ideale Gase und basiert ebenso wie es die DIN anmerkt, auf Methoden der physikalischen Statistik, also der Beschreibung ungeordneter Zustände.

3.1 Physikalische Statistik und kinetische Gastheorie

Bereits vor über einhundert Jahren schrieb *J. J. Thompson* in seinem schon erwähnten Buch:

Wenn wir die Beziehung zwischen der Materie und der Elektrizität untersuchen wollen, ist der meistversprechende Weg der, mit der Beziehung zwischen der Elektrizität und der Materie im Gaszustande zu beginnen, denn ... dies ist ferner der Zustand, der Materie, der am genauesten untersucht ist, da uns die kinetische Gastheorie mit den Mitteln versieht, um uns im Geiste ein Bild von den Vorgängen zu schaffen, die in einem Gase vor sich gehen, Hilfsmittel, die wir für die Materie in ihren anderen Zuständen nicht haben.

Maßgeblich wird hier die Maxwell-Boltzmann-Statistik angewendet. Man kann sie aber gut auf Plasmen anwenden, indem man unterstellt, dass ein Plasma ein Gemisch aus idealen Gasen ist. Im idealen Gas ist die dimensionslose Prandtl-Zahl:

$$\text{Pr} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{2}{3} \tag{1}$$

- η – dynamische Viskosität des Fluids
- c_p – spezifische Wärmekapazität
- λ – Wärmeleitfähigkeit

Sie beschreibt das Verhältnis von Zähigkeit (Viskosität) und Temperaturleitfähigkeit eines Fluids. Für die üblichen Druck- und Temperaturbereiche, insbesondere von thermischen Gasentladungen, ist diese Forderung sehr gut erfüllt.

Wahrscheinlichkeit und Verteilungsfunktion

Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses ist definiert als:

$$w = \frac{\text{Zahl günstiger Fälle } (N_i)}{\text{Zahl möglicher Fälle } (N)} < 1 \tag{2}$$

Eine Gesamtheit von N Teilchen kann in sich nicht überlappende Gruppen w_i eingeteilt werden, die durch gewisse Eigenschaften gekennzeichnet sind. Der Wert von w_i gibt an, wie viele Teilchen die Gruppe mit den Eigenschaften N_i enthält und ist damit ein Maß für die Verteilung der Eigenschaft N_i auf die Gesamtheit N. Die Summe aller w_i -Werte ist gleich Eins.

Kann die betrachtete Eigenschaft innerhalb eines Intervalls alle Werte durchlaufen, so ist

$$w(x, dx) = f(x) dx \text{ und } W = \frac{\Delta N_i}{N} = f(x) \Delta x \cdot N \tag{3}$$

die Wahrscheinlichkeit, Teilchen zu finden, bei denen die betrachtete Eigenschaft (z.B. Geschwindigkeit oder kinetischen Energie) zwischen x und (x + dx) liegt. Die Funktion f(x) nennt man Verteilungsfunktion für die Eigenschaft.

Tab. 1: Eigenschaften der Verteilungsfunktion

Mittelwert	$\bar{x} = \int x \cdot f(x) dx$	
Effektivwert	$\bar{x}^2 = \int x^2 \cdot f(x) dx$	$\neq \bar{x}^2!$
vollständiges Integral	$\int_0^\infty f(x) dx = 1$	