

Electrode Configurations for Plasma Jets

An introduction to the state of the art and the
development of a Prototype

Projektarbeit

Autor: Marius Müller

Matrikelnummer: 968739

Studiengang: Medizintechnik (B.Sc.)

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Dara Feili

Trier, 15.01.21

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	I
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Was ist Plasma?	1
2.2 Charakterisierung von Plasma	2
2.3 Vorgänge bei der technischen Plasmaerzeugung	4
2.3.1 Erste Entladungsphase: Townsend-Modus	4
2.3.2 Zweite Entladungsphase: Glimmentladung	4
2.4 Chemische Prozesse bei der Plasmaerzeugung	7
2.5 Plasma in der Medizin	8
2.5.1 Plasma-Interaktion mit Zellen und lebendem Gewebe	8
2.5.2 Anwendungsbereich	9
3 Plasmaquellen.....	10
3.1 Plasmabrenner	10
3.2 Koronaentladung	12
3.3 Dielektrische Barrierenentladung	13
3.3.1 Anordnungsformen.....	14
3.4 Hollow Chathode Entladung	16
4 Plasmajets.....	18
4.1 Häufig genutzte Begriffe und Klassifikationen	19
4.2 Elektrodengeometrien.....	21
4.3 Überblick über Atmosphärendruckplasmajets.....	23
5 Optimierung von Elektrodenkonfigurationen	35
5.1 Auswirkung der Elektrodenanordnung.....	35
5.2 Optimierung von Elektrodenanordnungen	36

5.3	Auswirkung der Elektroden­dimension	38
6	Entwicklung eines Plasmajets	41
6.1	Eigener Prototyp	42
7	Fazit	44
	Literaturverzeichnis	IV
	Index	VII
	Glossar	VII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Plasma als vierter Aggregatzustand	1
Abbildung 2: Plasmabrenner als Transferred und Non-Transferred Arc	12
Abbildung 3: schematischer Aufbau zur Erzeugung einer Koronaentladung.....	13
Abbildung 4: Anordnungsformen der Dielektrischen Barrierenentladung	15
Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Hollow-Cathode-Entladung	16
Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Hollow Cathode Sustained Entladung	17
Abbildung 7: Zusammenfassung der sieben Plasmajet-Geometrien	22
Abbildung 8: Elektrodenanordnungen in Vergleich	35
Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Optimierung von Elektrodenanordnungen.....	37
Abbildung 10: Entladecharakteristik einer koplanaren DBD-Anordnung.....	38
Abbildung 11: Auswirkung verschiedener Parameter auf Entladecharakteristik.....	40
Abbildung 12: Darstellung des Prototyps eines Elektrodensystems für einen Plasmajet.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sammlung von Fachbegriffen	20
Tabelle 2: Sammlung seit 2012 entwickelter Plasmajet-Applikationen.....	33

1 Einleitung

In unserer Welt treffen wir häufig auf Plasmazustände, ohne sie zu erkennen. So bestehen beispielsweise Kerzenflammen oder Gewitterblitze teilweise aus Plasma. Das natürliche Aufkommen von Plasma ist somit keinesfalls eine Seltenheit: Nach dem neusten Stand der Forschung befinden sich etwa 99% des Universums im Plasmazustand [5].

Plasma wird seit über 50 Jahren in etlichen technischen Anwendungen künstlich erzeugt und genutzt, sei es thermisches Plasma für Plasmabrenner oder nicht-thermisches Plasma für Plasmabildschirme. Dabei wurden die meisten technischen Anwendungen vorrangig bei niedrigen Druckverhältnissen durchgeführt, was allerdings teure Vakuumanlagen und aufwendige Fertigungsprozesse bedeutete. Durch Fortschritte in der Technik wurden in den letzten Jahren jedoch mehrere Möglichkeiten entwickelt, Plasma mit hohen, sowie moderaten Temperaturen, bei Atmosphärendruck zu generieren. Dies öffnete neue Türen für Plasmaapplikationen, da Atmosphärendruckplasma einfacher produziert werden kann und vielseitige Anwendungsmöglichkeiten bereitstellt. Plasma wird seitdem im Bereich der Medizin zur Herstellung von medizinisch relevanten Beschichtungen, zum effektiven Abtöten von Mikroorganismen und zur Sterilisierung von Medizinprodukten verwendet. Außerdem wird thermisches Plasma in der Chirurgie, beim Koagulieren und Abtragen von Gewebe verwendet [4].

Diese Arbeit soll die Vorbereitung auf die Entwicklung eines Plasmajets für medizintechnische Anwendungen sein, weshalb der Fokus auf dem Kernstück eines jeden Plasmajets liegt: dem Elektrodensystem. Bei der künstlichen Herstellung von Plasma, wird über Elektroden eine Spannung an ein Gas angelegt, das somit ionisiert wird. Die Wahl der richtigen Elektrodenkonfiguration ist dabei unabdingbar für den Erfolg des entwickelten Plasmajets, da sie die Art, die Form und die Temperatur des erzeugten Plasmas signifikant beeinflusst. Um die erfolgreiche Entwicklung eines Plasmajets zu unterstützen, werden in dieser Arbeit verschiedene, bereits etablierte Plasmajets analysiert und in tabellarischer Form zusammengefasst. So wird dem Leser ein Überblick über die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten eines Elektrodensystems gegeben und gleichzeitig der aktuelle Stand der Technik aufgezeigt, der eine Orientierungshilfe im Entwicklungsprozess bietet.

Damit die teilweise hoch komplexen Vorgänge bei der Plasmaerzeugung verstanden werden können, wird zu Beginn der Arbeit eine Einführung in die grundlegenden chemischen und physikalischen Vorgänge bei der technischen Plasmaerzeugung gegeben. Anschließend werden die unterschiedlichen Plasmaquellen vorgestellt, die sich allesamt im Aufbau der Elektrodenkonfiguration unterscheiden. Im letzten Teil der Arbeit werden einige Optimierungsstrategien für Elektroden-systems aufgezeigt, mit denen die kritischen Parameter der entwickelten Applikation bestimmt und verbessert werden können. Zum Schluss wird ein eigen entwickelter Prototyp einer Elektrodenkonfiguration für einen Plasmajet vorgestellt. Dieser stellt lediglich ein grundlegendes Konzept dar und soll im Rahmen einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit mit den hier gegebenen Optimierungsstrategien aufgebaut, in Experimenten getestet und verbessert werden. Dabei ist die Idee, den Plasmajet mit Hilfe eines 3D-Druckers zu drucken, in den das entwickelte Elektroden-system eingeführt wird. Der Leser dieser Arbeit wird also in der Lage sein die grundlegenden Vorgänge bei der Plasmaerzeugung zu verstehen, die verschiedenen Elektrodenkonfigurationen von Plasmajets zu unterscheiden und ein eigenes Elektroden-system zu entwickeln und anschließend zu optimieren.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Was ist Plasma?

Bei Plasma handelt es sich um ionisiertes Gas, das durch das Zuführen von Energie entsteht. Hierbei unterscheidet man zwischen thermischem Gleichgewichtsplasma mit hohen Temperaturen, Nichtgleichgewichtsplasma mit geringen Temperaturen und abhängig vom Druck des Ausgangsgases zwischen Hoch-, Nieder- und Atmosphärendruckplasma. Genauso, wie bei den Aggregatzuständen *fest*, *flüssig* und *gasförmig*, geht ein Gas oder Gasgemisch in den Plasmazustand über, indem ihm Energie zugeführt wird (*Abb. 1*). Durch die Energiezufuhr kommt es zu Stoßprozessen zwischen freien Elektronen und neutralen Spezies, die die kinetische Energie der Teilchen erhöhen und so angeregte Spezies und Ionen generieren. Plasma enthält somit frei bewegliche Elektronen, Ionen und elektrisch neutrale Teilchen im Grundzustand, sowie im angeregten Zustand. [4]

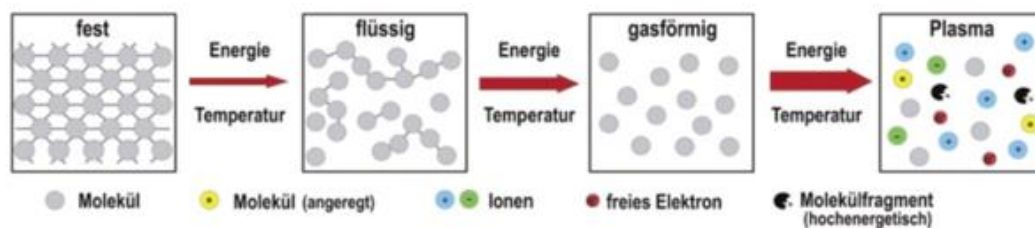


Abbildung 1: Plasma als vierter Aggregatzustand [4]

Der Plasmabegriff im Sinne eines ionisierten Gases wurde erstmals vom amerikanischen Physiker und Chemiker Irving Langmuir (1881-1957) geprägt, den das stark ionisierte und reaktive Gas an Blutplasma erinnerte [4]. Plasma kann auf künstliche Weise im Labor oder in der Industrie produziert werden, kommt jedoch auch auf vielfältige Weise in der Natur vor, beispielsweise in Blitzen oder der Sonnenatmosphäre. Plasma offeriert drei Hauptmerkmale, die besonders attraktiv für verschiedene Applikationen sind [2]:

1. Die *Temperatur und Energiedichte* einiger Plasmakomponenten können deutlich über denen konventioneller Technologien liegen. Hierbei können problemlos Temperaturen von über 10.000K erreicht werden, die beispielsweise für die Produktion von Keramikbeschichtungen unverzichtbar sind. Auch in der Medizin werden solch hohe Temperaturen für die Kauterisation oder das Abtragen von Gewebe verwendet.

2. Plasma ist in der Lage eine *sehr hohe Konzentration an chemisch aktiven Spezies* (Elektronen, positive und negative Ionen, Atome, Ionen und Radikale, angeregte Atome und Moleküle, sowie Photonen in einem großen Spektralbereich) zu produzieren. Eine hohe Konzentration an aktiven Spezies ist elementar für viele Plasmaapplikationen, wie die Sterilisation von Oberflächen, Luft und Wasser.
3. Viele Plasmaapplikationen können außerhalb des thermischen Gleichgewichts betrieben werden, wodurch *eine sehr hohe Konzentration an aktiven Spezies bei Raumtemperatur* erzeugt werden kann, was sehr bedeutsam für den Einsatz von Plasma in der Halbleiter- und Mikroelektronik ist. Aber auch in der Medizin findet kaltes Plasma seinen Einsatz, beispielsweise in der Sterilisation von Haut und anderem lebendem Gewebe, Wundheilung und der nicht-thermischen Blutkoagulation.

2.2 Charakterisierung von Plasma

Natürlich vorkommendes und künstlich hergestelltes Plasma besitzt ein breites Spektrum an Druck, Elektronentemperatur und Elektronendichte. Die Temperatur von Plasma reicht hierbei von Raumtemperatur bis hin zu der Temperatur des Inneren eines Sterns. Solch hohe Plasmatemperaturen sind jedoch wenig praktikabel, weshalb die meisten Plasmen bei Elektronentemperaturen im Bereich von $1 - 20 \text{ eV}$ mit einer Elektronendichte von $10^6 - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ betrieben werden (hohe Temperaturen werden üblicherweise in *Elektronenvolt* angegeben; 1 eV entspricht ungefähr 7736 K [6]). Hierbei müssen jedoch nicht alle Teilchen im Plasma ionisiert sein; in der Plasmachemie ist es üblich, das Arbeitsgas nur teilweise zu ionisieren, weshalb ein Ionisationsgrad angegeben wird, der sich aus dem Verhältnis der Dichte der Ionen zur Dichte des neutralen Gases berechnet. Ist dieser Ionisationsgrad ungefähr eins, bezeichnet man das Plasma als *komplett ionisiertes Plasma*, ist er niedrig, spricht man von *schwach ionisiertem Plasma*. Da eine komplette Ionisierung des Arbeitsgases sehr aufwendig ist, werden üblicherweise Systeme mit einem Ionisationsgrad im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-4} bevorzugt. [2]

Produziert man Plasma im Labor, wird ein elektrisches Feld an das Arbeitsgas angelegt, dass die Elektronen im Gas auf ihrer mittleren freien Weglänge beschleunigt. Auf diesem Weg erhalten die Elektronen Energie vom elektrischen Feld, die am Ende des Weges in einem Stoßprozess an schwere Teilchen übertragen wird. Da die Masse dieser schweren Teilchen

die der Elektronen um einige Größenordnungen übersteigt, verlieren die Elektronen nur einen Teil ihrer Energie. Daher ist die Temperatur der Elektronen anfangs höher als die Temperatur der schweren Teilchen im Gas. Dieser Prozess, der auch als *Joulesche Erwärmung* bezeichnet wird, verringert die Temperaturdifferenz so lange, bis sich ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat (sofern die Energie, bzw. die Zeit nicht begrenzt ist). [2]

Die Temperaturdifferenz zwischen Elektronen und schweren Teilchen ist proportional zum Verhältnis der elektrischen Feldstärke E und dem Druck des Arbeitsgases p . Man unterscheidet zwei Fälle [2]:

1. *Das Verhältnis E/p ist klein.* Dadurch nähern sich die Temperatur der Elektronen und die der schweren Teilchen einander an und es stellt sich ein lokales thermisches Gleichgewicht (LTE) im Plasma ein. In diesem Fall spricht man von *thermischen Plasmen*. Diese sind in der Regel energiereicher als nicht-thermische Plasmen und werden für die Kauterisation oder das Abtragen von Gewebe verwendet. Da die Temperatur des Plasmas durch die Temperatur der schweren Teilchen bestimmt wird, werden hierbei Plasmatemperaturen von bis zu 10.000 K erreicht.
2. *Das Verhältnis E/p ist groß.* Diese Art von Plasma ist weit entfernt vom lokalen thermischen Gleichgewicht und wird durch die Temperatur von verschiedenen Teilchen mit mehreren Freiheitsgraden beschrieben. Hierbei übersteigt die Temperatur der Elektronen T_E die Temperatur der schweren Teilchen T_0 um ein Vielfaches ($T_E \gg T_0$), weshalb man in diesem Zusammenhang von *nicht-thermischen Plasmen* spricht. Da die Energie, bzw. die Temperatur des Plasmas durch die Temperatur der Schwereteilchen bestimmt wird, werden bei nicht-thermischen Plasmen lediglich Temperaturen von 300K - 1000K erreicht. Nicht-thermisches Plasma wird vorwiegend bei niedrigem Druck, niedrigerem Energieniveau oder in gepulsten Entladungssystemen generiert.

2.3 Vorgänge bei der technischen Plasmaerzeugung

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, wird bei der technischen Plasmaerzeugung ein äußeres elektrisches Feld an ein elektrisch neutrales Arbeitsgas angelegt, wodurch die freien Elektronen im Gas beschleunigt werden und es zu Stoßprozessen mit den Atomen und Molekülen des Gases kommt. Bei diesem Stoßprozess werden die Elektronen in einen angeregten Zustand versetzt, aus dem sie gegebenenfalls unter Emission von Photonen in ihren Grundzustand zurückfallen. Haben die Elektronen eine genügend hohe kinetische Energie, kommt es zur Stoßionisation, bei der die Gasatome Elektronen verlieren und somit zusätzliche freie Elektronen und positive Ionen entstehen. Bei diesem Prozess spricht man von einer *Elektronenmultiplikation*. Werden auf diese Weise mehr Elektronen produziert als durch Rekombinationsprozesse vernichtet werden, kommt es zur Gasentladung, d.h. der Stromfluss durch das Gas wird gezündet. Hierbei unterscheidet man zwei Entladungsphasen, den *Townsend-Modus* und die *Glimmentladung*. [2][3][4]

2.3.1 Erste Entladungsphase: Townsend-Modus

Die erste Plasma-Entladungsphase wird als Townsend-Modus bezeichnet. Hier sind noch wenige freie Ladungsträger und somit eine geringe Raumladung vorhanden. Die Sekundärelektronenemission, also das Herausschlagen von Elektronen aus der Kathode durch beschleunigte Ionen, spielt in diesem Modus nur eine untergeordnete Rolle. Die Gasionisierung wird vor allem durch Stoßprozesse zwischen Elektronen und Neutralteilchen aufrechterhalten, weshalb wenig hochenergetische Elektronen vorhanden sind und somit wenige Anregungs- und Abregungsprozesse mit Photonenemission stattfinden. Auf Grund der geringeren Anzahl an Photonenemissionen, ist das Plasma im Townsend-Modus mit bloßem Auge kaum sichtbar. [4]

2.3.2 Zweite Entladungsphase: Glimmentladung

Wird die extern zugeführte Spannung vergrößert, erhöht sich die Anzahl und die kinetische Energie der freien Elektronen und es kommt zum Übergang in die zweite Plasma-Entladungsphase. Hier nehmen die Anregungs- und Abregungsprozesse und somit die Photonenemission zu, wodurch das Plasma sichtbar wird. Daher wird die zweite Entladungsphase als *Glimmentladung* bezeichnet. Außerdem nimmt die Sekundärelektronenemission zu, sodass mehr Elektronen nahe der negativen Kathode in Richtung der positiven Anode beschleunigt werden. Da die zurückbleibenden Ionen jedoch sehr viel schwerer und somit Träger als die Elektronen sind, driften diese nur langsam zur

Kathode, wodurch sich ein starkes elektrisches Feld zwischen den quasi-immobilen Ionen und der Kathode ausbildet, das sich über einige hundert Mikrometer erstreckt. Dieser Bereich wird auch als *Sheath* oder *Cathode-Fall-Region* bezeichnet. Dort werden Elektronen stark beschleunigt und bewirken am Rand der *Sheath-Region* eine starke Photonenemission, die als negative Glimmentladung bezeichnet wird. Aufgrund der hohen Beschleunigung in der *Sheath-Region* ist sie verarmt an Elektronen und somit nicht elektrisch neutral. Da ein Großteil der kinetischen Energie der Elektronen um den negativen Glow herum für Photonenemissionen und Anregungsprozesse übertragen wurde, sind diese jetzt weniger anfällig für weitere Wechselwirkungen. Daher ist der Bereich zwischen dem negativen Glow und der Anode durch ein niedriges Level an optischen Emissionen und eine höhere Elektronendichte charakterisiert. Dieser Bereich wird als *Bulk* bezeichnet und ist quasineutral. Aufgrund der Quasineutralität herrscht in der *Bulk-Region* nur ein schwaches elektrisches Feld. Somit ist eine schmale *Sheath-Region* mit starkem elektrischem Feld und eine Plasma *Bulk-Region* mit schwachem elektrischem Feld typisch für die Glimmentladung. [3][4]

Aber auch bei der Glimmentladung selbst verhält sich die Gasentladung nicht immer auf dieselbe Weise. Unterschieden wird zwischen α -Modus und γ -Modus.

2.3.2.1 α -Modus

Ist die äußere Spannung noch vergleichsweise gering, sind der Entladungsstrom, die Elektronendichte und das elektrische Feld in der *Sheath-Region* noch schwach. Da die Ionenbeschleunigung nur für eine geringe Zahl von Sekundärentladungen ausreicht, wird die Elektronenerzeugung durch die Townsend-Ionisation bestimmt. Man spricht vom α -Glow-Modus oder schlicht vom α -Modus. Im α -Modus steigt der Entladestrom mit steigender äußerer Spannung. [3][4]

2.3.2.2 γ -Modus

Wird die äußere Spannung weiter erhöht, steigt die Zahl der aus der Kathode herausgeschlagenen Sekundärelektronen und übersteigt die Zahl der durch Townsend-Ionisation entstehenden Elektronen. Der Koeffizient, der die Anzahl der Sekundärelektronen, die pro Ion generiert werden, beschreibt, wird oft als γ bezeichnet, weshalb man hier auch vom γ -Modus spricht. Das elektrische Feld der *Sheath-Region* steigt gegenüber dem α -Modus deutlich an, wodurch die Ionisierung und folglich die Leitfähigkeit des Gases zwischen den Elektroden steigt. Dadurch sinkt die Spannung, die zwischen den

Elektroden aufgebaut werden kann, d.h. der Entladestrom sinkt im γ -Modus mit steigender äußerer Spannung. Wird die Spannung dennoch weiter erhöht, wird das Plasma instabil und geht in den nächsten Modus über. [3][4]

2.3.2.3 *Bogenentladung*

Kann der Entladestrom unbegrenzt ansteigen, steigt die Gasleitfähigkeit exponentiell an und es kommt zu einer Abnahme des elektrischen Felds des Kathodenfall. Da die sehr hohe zugeführte Leistung dennoch verwertet werden muss, kommt es zu einer direkten thermischen Emission von Elektronen. Dadurch wird das Plasma instabil und nimmt die Form eines oder mehrerer Lichtbögen an, weshalb man von einer *Bogenentladung* spricht. Hierbei werden sehr hohe Temperaturen und ein lokales thermisches Gleichgewicht zwischen den Elektronen und den Schwereteilchen erzeugt. [3][4]

2.3.2.4 *Streamerentladung*

Bei der Streamerentladung kommt es zur Bildung von filamentartigen Entladungskanälen. Diese entstehen durch Elektronenlawinen, die von einem Startelektron ausgelöst werden und zur Veränderung der elektrischen Feldstärke in der Umgebung führen. Hierbei bleiben die trägeren Ionen im Lawinenschwanz zurück, wodurch die Elektronen im Lawinenkopf eine hohe Feldstärke erzeugen und neue Elektronenlawinen erzeugen. Alle Elektronenlawinen zusammen ergeben einen leitfähigen Kanal, der auch als *Streamer* bezeichnet wird. Mit ausreichender Energie, kann ein Streamer in einen Lichtbogen übergehen. In manchen Applikationen ist das Auftreten von Streamerentladungen unerwünscht. Um diese zu vermeiden, wurden verschiedene Vermeidungsstrategien entwickelt, wie die Verwendung von Helium als Arbeitgas, das Anlegen einer hochfrequenten oder gepulsten Spannung, das Einfügen von strombegrenzenden Dielektrika und das Vermeiden von speziellen Elektrodenformen. [4]

2.4 Chemische Prozesse bei der Plasmaerzeugung

Bei der Erzeugung von Plasma passieren, im Rahmen der Gasentladung, viele komplexe chemische Vorgänge. Die beschleunigten Elektronen kollidieren mit den Gasatomen und Molekülen und sorgen so für eine Erhöhung der thermischen Energie, was zur Folge hat, dass sich das Plasma erhitzt. Dabei werden die Elektronen in höherenergetische Zustände versetzt, aus denen sie unter Emission eines Photons zurück in den Grundzustand fallen. Jedoch gilt dies nicht für alle Elektronen im Gas: Ein Teil der Elektronen wird in einen metastabilen Zustand erregt, aus dem ein Rückübergang in den Grundzustand nicht ohne weiteres möglich ist, was bedeutet, dass die übertragene Energie in diesem Zustand längerfristig gespeichert bleibt. Dies kann einerseits zur Dissoziation von Teilchen im Plasma führen, also den Vorgang der Teilung einer chemischen Verbindung in zwei oder mehrere Moleküle, Atome oder Ionen [7]. Andererseits können freie Radikale gebildet werden. Freie Radikale sind Zwischenprodukte des menschlichen Stoffwechsels und entstehen ständig in jeder Zelle des Körpers. Sie sind hochreaktive, sehr aggressive, chemische Sauerstoffmoleküle oder organische Verbindungen, die Sauerstoff enthalten und sind stets bestrebt, anderen Atomen oder Molekülen Elektronen zu entreißen. Dabei reagieren sie mit diesen und bilden neue Radikale, die wiederum anderen Substanzen ebenfalls Elektronen entreißen. Es kommt zu einer Kettenreaktion, die zu einer stetigen Vermehrung der Radikale im Körper führt und so oxidativen Stress erzeugt. [8] Infolge dieses oxidativen Stresses, zerstören die freien Radikale Blutgefäße, sowie Proteine und Lipide und erhöhen das Risiko für zahlreiche Erkrankungen wie Arteriosklerose, Diabetes mellitus und neurodegenerativen Erkrankungen. Freie Radikale sind jedoch nicht nur schädliche Stoffwechselprodukte, sondern dienen beispielsweise der Immunabwehr, der Zerstörung von Bakterien und der Apoptose, also der körpereigenen Unterdrückung von Krebserkrankungen. [8]

Plasma enthält somit energiereiche Teilchen (Elektronen, Ionen und Photonen), chemisch reaktive Spezies (z.B. freie Radikale) und diverse transiente Felder. All diese Bestandteile können als unterschiedliche Energieform betrachtet werden und interagieren auf komplexe Weise mit den zu behandelnden Materialien. Dabei sind je nach Anwendung verschiedene dieser Komponenten von besonderem Interesse und tragen einzeln oder in Kombination zur gewünschten physikalischen oder chemischen Wirkung bei. Um den geforderten Effekt zu erzielen, spielt die Wahl des Arbeitsgases eine zentrale Rolle, da hiermit die Entstehung

bestimmter reaktiver Spezies gezielt gesteuert und an den Zweck angepasst werden kann. Infolge der Wechselwirkung mit den reaktiven Spezies kommt es zur Rekombination von Ionen und Elektronen, der Bildung negativer Ionen durch Anlagerung von Elektronen, dem Ladungsaustausch zwischen Teilchen und elektrisch neutralen chemischen Reaktionen, wodurch weitere neue Spezies entstehen. Zwei reaktive Spezies sind von besonders großer Bedeutung für die Anwendung in der Medizin [4][9].

1. Reaktive Sauerstoffspezies (ROS)
2. Reaktive Stickstoffspezies (RNS)

Zu beachten ist weiterhin, dass Plasma in den meisten Anwendungen in die Umgebungsluft ausströmt, beispielsweise beim Austritt aus der Düse eines Plasmajets, was zu Vermischungsprozessen führt. So entstehen beim Austritt des Plasmas reaktive Sauerstoffspezies (RNS) wie *NO* durch die Interaktion der im Plasma enthaltenen reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) mit dem in der Luft enthaltenen molekularen Stickstoff N_2 . Auch wenn RNS in vielen Anwendungsbereichen erwünscht sind, ist dieser Prozess in der Regel turbulent und unkontrollierbar und hängt im Wesentlichen mit der behandelten Oberfläche und der Luftführung im Raum zusammen. Dies macht den Einsatz von komplexen Computermodellen erforderlich, um das Plasma physikalisch zu beschreiben. Außerdem können diese Computermodelle genutzt werden, um das Übertragungsverhalten der reaktiven Spezies zu optimieren und den Gehalt der reaktiven Spezies im Plasma, vor und nach der Vermischung mit der Raumluft, zu quantifizieren. [3]

2.5 Plasma in der Medizin

2.5.1 Plasma-Interaktion mit Zellen und lebendem Gewebe

Interagiert Plasma direkt mit menschlichen Zellen oder anderem lebenden Gewebe, kommt es zu einer Vielzahl komplexer biochemischer Prozesse. Anders als beispielsweise ionisierende Strahlung, erzeugt nicht-thermisches Plasma jedoch keine aktiven Spezies direkt in der Zelle, sondern stößt eine Art Kettenreaktion in der Region an, in der das Plasma erzeugt wird. Der *Plasma-Effekt* wird durch den Extrazellarraum übertragen, um dann Biomoleküle oder Zellmembranen zu modifizieren oder durch sie zu diffundieren. Über diesen Mechanismus werden beobachtbare Effekte auf lebende Organismen erzeugt. Vereinfacht kann der Plasma-Effekt mit einem dreilagigen Sandwich verglichen werden:

Aktive Spezies werden im Plasma erzeugt (erste Schicht) und anschließend vom Gaszustand in den Extrazellularraum transportiert (zweite Schicht). Von dort aus können die aktiven Spezies den Intrazellularraum erreichen und dort biochemische Prozesse anstoßen.

2.5.2 Anwendungsbereich

Plasma wird schon seit vielen Jahren im Bereich der Medizin zur Herstellung von medizinisch relevanten Beschichtungen, zum effektiven Abtöten von Mikroorganismen und zur Sterilisierung von Medizinprodukten verwendet. Außerdem wird thermisches Plasma in der Chirurgie, beim Koagulieren und Abtragen von Gewebe, direkt am Menschen angewendet. Auch in der Zahnmedizin werden Plasmaapplikationen verwendet, um Plaque zu entfernen oder spezielle Wurzelbehandlungen durchzuführen. In der richtigen Dosierung kann Plasma nicht nur Bakterien abtöten, sondern auch die Zellproliferation anregen und somit zur Behandlung chronischer Wunden und Hautkrankheiten eingesetzt werden. Diese Möglichkeiten werden momentan weiterentwickelt, um sie im Bereich der Onkologie einzusetzen und somit Krebszellen abzutöten und eine Gewebeneubildung zu fördern. [4]

In den letzten 10 Jahren hat das Forschungsgebiet Plasmamedizin einen großen Aufschwung erlebt, da immer mehr und immer kostengünstigere Applikationen zur Erzeugung von Atmosphärendruckplasma mit moderaten Temperaturen entwickelt werden. Die dauerhafte Verfügbarkeit von kaltem Atmosphärendruckplasma eröffnet neue Perspektiven für die Anwendung an Zellen und Gewebe und somit direkt am Menschen [4]. Um eine Weiterentwicklung voranzutreiben, müssen die bereits bestehenden Systeme erfasst, verstanden und weitergedacht werden.

3 Plasmaquellen

Die Plasmaforschung entwickelt sich ständig weiter, weshalb bis zum heutigen Tage eine große Zahl an Plasmaapplikationen entwickelt und weiterentwickelt wurden. Im Folgenden werden einige dieser Techniken und Geräte zur Erzeugung von nicht-thermischen Atmosphärendruckplasmen erläutert. Dabei wird im Besonderen auf die Koronaentladung und die dielektrische Barrierenentladung eingegangen und wie diese in Form von Plasmajets weiterentwickelt und direkt am Menschen angewendet werden können.

3.1 Plasmabrenner

In den letzten 50 Jahren haben thermische Plasmaprozesse eine große Rolle in der industriellen Technologie gespielt. Durch hohe Energiedichten von $\sim 10^6 - 10^7 \text{ J/m}^3$ und die dadurch resultierenden hohen Energieflussdichten von $\sim 10^7 - 10^9 \text{ W/m}^2$, sind thermische Plasmaapplikationen perfekt geeignet für Plasmaspritzverfahren, Metallzerspanung und Schweißen. Die wohl bekannteste Anwendung von Plasma, ist der Plasmabrenner (engl. *arc plasma torches*), der einen Lichtbogen erzeugt, dessen hohe Temperatur den Werkstoff aufschmilzt und so einen Schneide-, bzw. Schweißvorgang in Gang setzt. [43]

Die meisten Plasmabrenner bestehen aus drei Hauptkomponenten: der Kathode, der plasmaformenden Gasinjektion und einer Anode. In der Apparatur strömt das Gas um die Kathode und durch ein Konstruktionsrohr oder eine Düse, die als Anode fungieren kann, in die Umgebungsluft. Wird an die Elektroden eine entsprechende Spannung angelegt, entsteht ein leitender Pfad durch das Gas und ein Lichtbogen entsteht, der eine starke elektrische Erwärmung erzeugt. Da das System im lokalen thermischen Gleichgewicht betrieben wird, stellen sich sehr hohe Gastemperaturen von über 10.000 K ein, die eine starke Dissoziation und Ionisierung des Gases zur Folge haben. Die meisten kommerziellen Plasmabrenner arbeiten bei Atmosphärendruck mit elektrischen Leistungen im Bereich zwischen $10 - 100 \text{ kW}$. Dabei stellen sich Entladeströme von $250 - 1000 \text{ A}$ bei äußeren Spannungen von $30 - 100 \text{ V}$ und Gasflussraten zwischen $20 - 150 \text{ slm}$ ein. Häufig genutzte Gase sind hierbei Argon, Helium, Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff, bzw. Mischungen dieser. [43][4]

Bei der Bogenentladung (engl. *arc discharge*) wird zwischen zwei Elektrodenkonfigurationen unterschieden: dem *Transferred Arc* und dem *Non-Transferred Arc*. Bei der *Transferred-Arc-Entladung* ist das zu behandelnde Material ein Teil des elektrischen Stromkreises. Dazu wird das Material mit dem Pluspol der Spannungsversorgung verbunden, sodass es als Anode fungiert. Wird nun der negative Pol mit der Kathode verbunden und die Energieversorgung eingeschaltet, entsteht ein langer Lichtbogen zwischen der Elektrode und dem zu bearbeitenden Material (*Abb. 2 (a)*). Da es auf Grund des relativ großen Abstandes zwischen Material und Kathode nur mit größerem Aufwand möglich wäre, einen Lichtbogen zu erzeugen, wird zu Beginn des Einschaltvorgangs, die Kupferdüse kurz mit der Versorgungsspannung verbunden. Dadurch entsteht für eine kurze Periode ein Lichtbogen zwischen Kupferdüse und Kathode, der oft als *Hilfsbogen* bezeichnet wird. Strömt nun das Arbeitsgas durch die Düse, wird es auf Grund der hohen Energie des Lichtbogens sofort ionisiert und in Plasma umgewandelt, das sich durch den Gasdruck in die Umgebungsluft ausbreitet. Da das zu bearbeitende Material mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden ist, konzentriert sich das Plasma auf den Arbeitspunkt auf dem Material und befindet sich ab dann im Normalbetrieb. Aufgrund der direkten Anwendung wird diese Art der Entladung auch als *Direct Arc Plasma* bezeichnet und findet meistens Anwendung in Bereichen, in denen eine maximale Ausnutzung der Wärmeerzeugung des Plasmas gefordert ist (Plasmaschneider und Plasmaschweißgeräte).[43] [4]

Die Funktionalität dieses Aufbaus ist nur solange gesichert, wie ein leitendes Material bearbeitet wird. Muss ein nichtleitendes Material bearbeitet werden, wird die Kupferdüse dauerhaft mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden und fungiert somit als Anode. Das zu bearbeitende Material ist nicht mehr mit der Apparatur verbunden, weshalb diese Elektrodenkonfiguration auch als *Non-Transferred-Arc Entladung* oder *Indirect Arc Plasma* bezeichnet wird (*Abb. 2 (b)*). Hier formt sich der Lichtbogen zwischen der Kathode und der Kupferdüse und wird durch die Gasflussgeschwindigkeit in die Umgebungsluft projiziert. Im Gegensatz zum *Transferred Arc Plasma*, werden hier nur niedrige thermische Wirkungsgrade von $\sim 65 - 75\%$ erreicht, weshalb *Non-Transferred Arc Plasma* typischerweise für Plasmaspritzverfahren oder die Erzeugung von speziellen reaktiven Spezies verwendet wird. [43]

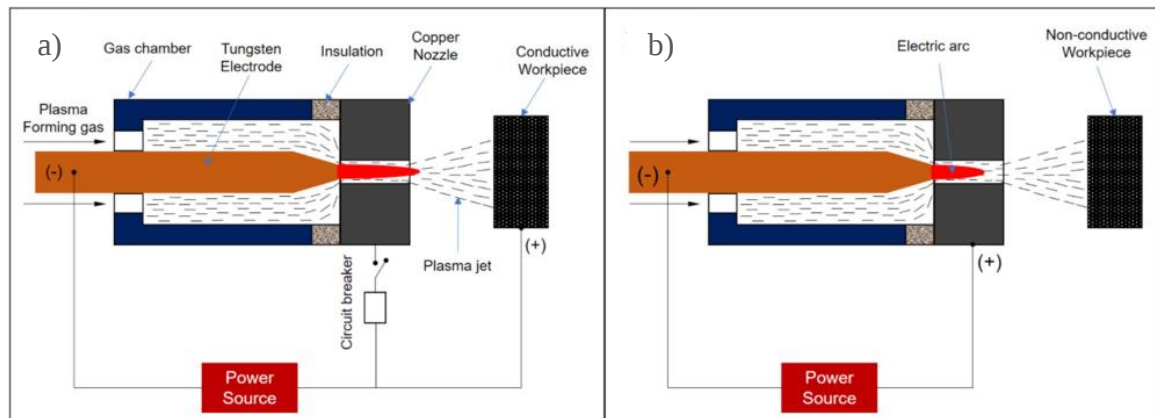


Abbildung 2. (a) Transferred Arc; zu behandelndes Material ist Teil des Stromkreises (b) Non-Transferred Arc; zu behandelndes Material ist nicht mit Plasmabrenner verbunden [50]

3.2 Koronaentladung

Mit der Koronaentladung wird nicht-thermisches Plasma mit geringer Stromdichte generiert, das sich immer dann ausbildet, wenn ein stark inhomogenes elektrisches Feld in einem Entladungsgefäß vorherrscht. Bevorzugt bildet sich eine Koronaentladung an scharfkantigen und unsymmetrischen Elektrodengeometrien aus. Hierbei unterscheidet man zwischen der *Point-to-Plane-Anordnung*, bei der eine Nadelelektrode und eine planare Elektrode verwendet werden und der *Wire-to-Cylinder-Anordnung*, bei der ein Zylinder einen dünnen Draht umgibt. Wird die scharfkantige Elektrode als Anode verwendet, spricht man von positiver Korona. Fungiert die scharfkantige Elektrode im Gegensatz dazu als Kathode, spricht man von negativer Korona. Die Plasmaerzeugung ist mittels Gleichspannung (DC-Betrieb) oder gepulster Spannung (pulsed DC-Betrieb) möglich, die so gewählt werden, dass das elektrische Feld nahe der Elektrode groß genug ist, damit die Energie zur Ionisierung der Gasteilchen ausreicht. Die Ionisierung und Lichtemission konzentrieren sich vor allem auf den Bereich um die scharfkantige Elektrode, wodurch eine Art Lichtkrone entsteht, welche der Entladungsform seinen Namen verleiht (lateinisch *corona* „Kranz, Krone“ [48]). Abhängig vom Ionisationsgrad fließen Entladungsströme im Bereich von μA bis mA , die sich als Streamerentladungen in filamentartigen Entladungskanälen ausbilden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Pulsdauer kurz genug gewählt wird, sodass die Entladung nicht in einen Lichtbogen übergeht und der Entladungsstrom somit gering bleibt.

Das Koronaverfahren ist industriell etabliert und existiert in einer Vielzahl verschiedener technischen Ausführungen. Auch ausgedehnte Elektrodenanordnungen sind möglich, bei denen mehrere parallele Mikrostreamer entstehen. Klassische Anwendungsgebiete ist die Reinigung von Gasen durch Abscheidung von Partikeln oder Mikroorganismen, die Ozonsynthese und die Oberflächenbehandlung im Allgemeinen. Bei der zuletzt genannten Oberflächenbehandlung besteht jedoch die Gefahr, dass der Prozess ein inhomogenes Ergebnis erzielt, da der, bzw. die Streamer, immer an derselben Stelle ansetzen. Aber auch im Bereich der Medizin hat das Koronaverfahren Fuß gefasst. Ein Beispiel hierfür ist das koronabasierte *Hairline-Plasma*, das in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt wird.

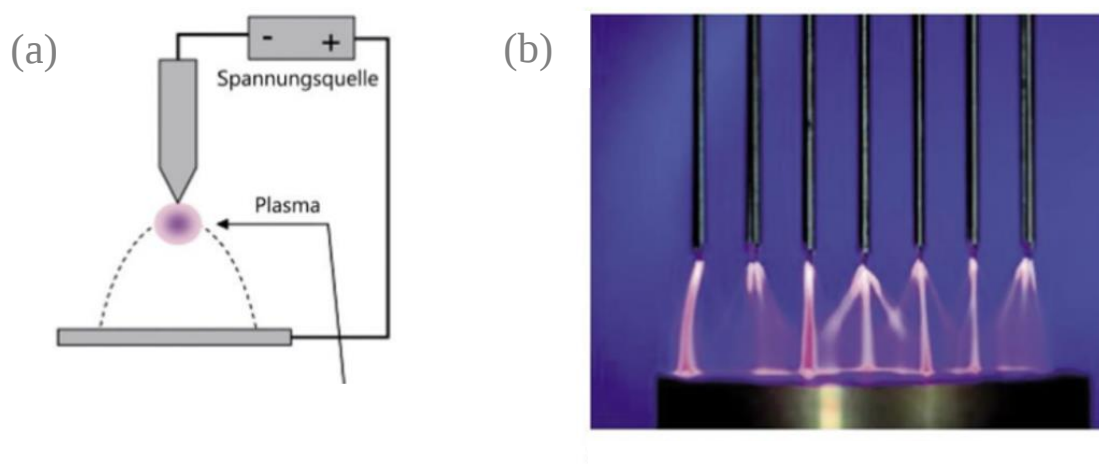


Abbildung 3 (a) schematischer Aufbau zur Erzeugung einer Koronaentladung, (b) gepulste Koronaentladung mit mehreren Nadelelektroden [4]

3.3 Dielektrische Barrierenentladung

Bei der Dielektrischen Barrierenentladung (DBD) wird, wie bei der Koronaentladung, Plasma ohne thermisches Gleichgewicht mit niedriger Temperatur erzeugt. Dabei entsteht das Plasma zwischen zwei Elektroden, von denen mindestens eine mit einem Dielektrikum bedeckt ist. Die Entladung wird durch sinusförmige Wechselspannung oder gepulste Gleichspannung gezündet und setzt sich üblicherweise aus einer Vielzahl von unabhängigen Stromfilamenten (Mikroentladungen) zusammen, die zeitlich und räumlich zufällig verteilt sind. Um eine geringe Erwärmung des Gases und somit eine niedrigere Leistung zu gewährleisten, werden Pulsdauern von 1 – 100 ns gewählt. Je nach Gaszusammensetzung, angelegter Spannung und Frequenz kommt es zu Streamerentladungen oder diffuser Glimmentladung. [4]

Wenn eine Spannung an die Elektroden angelegt wird, erzeugen diese ein elektrisches Feld, wodurch sich die Ladungen an der Oberfläche des Dielektrikums sammeln. Diese angesammelten Ladungen erzeugen ein elektrisches Potential, das der extern angelegten Spannung entgegenwirkt. Kommt es nun zu einem Spannungsdurchschlag, wird der Stromfluss durch die entgegenwirkende Spannung limitiert. Die Aufgabe des Dielektrikums ist es also, den Entladungsstrom zu begrenzen und so die Streamerbildung zu kontrollieren, um den Übergang in einen Lichtbogen, der auch als *Glow-To-Arc Transition* bezeichnet wird, zu verhindern. [10]

Bei der Dielektrischen Barrierenentladung unter Atmosphärendruck, werden hohe Elektrische Feldstärken (bis zu $10^5 V/cm$) benötigt, um eine Plasmaentladung zu generieren. Daher werden in den meisten Applikationen Elektrodenabstände im einstelligen Millimeterbereich gewählt, um die benötigte Spannung so gering wie möglich zu halten. Diese beträgt klassischer circa $10kV$ und wird in den meisten technischen Anwendungen bei Betriebsfrequenzen zwischen $500Hz$ und $500kHz$ betrieben. Dabei entstehen mittlere Elektronenenergien von $1 - 10 eV$ bei Elektronendichten von $10^{14} - 10^{15} cm^{-3}$ und einem Ionisierungsgrad von circa 10^{-4} . [10][4]

3.3.1 Anordnungsformen

Die Dielektrische Barrierenentladung wird im klassischen Sinne in vier Anordnungsformen unterteilt, die alle Anwendung in verschiedenen Anwendungsgebieten finden. Alle vier Anordnungen ermöglichen eine indirekte Behandlung, bei der das zu behandelnde Objekt, bzw. Gewebe, kein Teil der Entladungsanordnung ist, sondern nur mit dem Plasma in Berührung kommt. [10]

1. Klassische Volumenordnung (*volume barrier discharge*)

Bei der Klassischen Volumenordnung befindet sich die Entladungslücke zwischen zwei planaren Elektroden, von denen mindestens eine mit einem Dielektrikum bedeckt ist. Im Gasraum zwischen den Platten bildet sich ein homogenes, elektrisches Feld aus, wodurch sich unter Atmosphärendruck Mikroentladungen (Streamer) ausbilden. Dabei bilden die Oberflächenladungen auf dem Dielektrikum den Fußpunkt der Mikroentladung, von dem aus sich ein Entladungskanal zur entgegengesetzten Elektrode bildet. (*Abb. 4 (a)*). Mit der Klassischen Volumenordnung ist auch eine direkte Behandlung von Objekten, bzw. Gewebe möglich, bei der das betreffende Substrat als zweite Elektrode fungiert [10].

2. *Packed-Bed-Reaktor*

Der *Packed-Bed-Reaktor* bildet einen Spezialfall der Dielektrischen Barrierenentladung. Hierbei ist der Gasraum zusätzlich mit ggf. katalytisch aktiven Dielektrika ausgefüllt (Abb. 4 (b)). Auf diesen oft kugelförmigen Dielektrika können sich weitere Oberflächenentladungen ausbilden. Ein häufiges Anwendungsgebiet für den *Packed-Bed-Reaktor* ist die Abgasnachbehandlung. Da der *Packed-Bed-Reaktor* in der Plasmamedizin jedoch kaum eine Anwendung findet, wird hierauf nicht weiter eingegangen [10].

3. Oberflächenanordnung (*surface barrier discharge*)

Bei der Oberflächenanordnung sind beide Elektroden in direktem Kontakt mit dem Isolator. Das Plasma bildet sich um die Elektroden herum an der Isolatoroberfläche aus, weshalb eine reine Oberflächenentladung vorliegt. Dabei befindet sich die HV-Elektrode auf der Vorderseite des Dielektrikums, während eine rückseitige, metallische Beschichtung die Gegenelektrode bildet (Abb. 4 (c)) [10].

4. Koplanare Anordnung

Bei der koplanaren Anordnung werden Streifenelektroden entgegengesetzter Polarität verwendet, die beide ins Dielektrikum eingebettet sind. Das Plasma entsteht dabei an der Isolatoroberfläche zwischen den Elektroden (Abb. 4 (d))

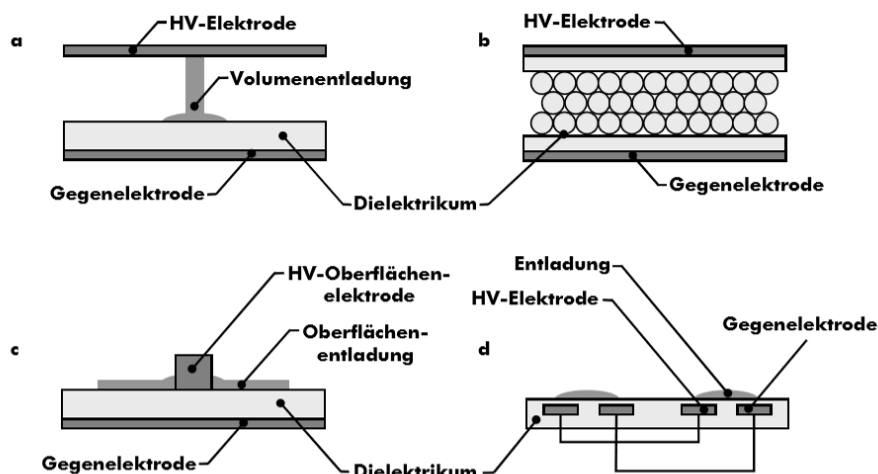


Abbildung 4: (a) Klassische Volumenentladung, (b) *Packed-Bed-Reaktor*, (c) Oberflächenanordnung, (d) Koplanare Anordnung [10]

3.4 Hollow Cathode Entladung

Wird bei Glimmentladung die planare Kathode durch eine Kathode mit hohler (englisch *hollow* „hohl“ [48]) Struktur, wie einem zylindrischen Loch ersetzt, tritt der Negative Glow unter bestimmten Voraussetzungen in der hohlen Struktur der Kathode auf [40]. Der Effekt, der zu diesem Phänomen führt, wird *Hollow Electrode Effect* genannt: Durch das Anlegen einer Äußeren Spannung werden Elektronen von der Kathodenoberfläche emittiert. Da es sich um einen Hohlraum handelt, können die emittierten Elektronen in Richtung der gegenüberliegenden Oberfläche beschleunigt werden und auf dem Weg durch Stoßprozesse die Gasionisierung vorantreiben. Erreicht ein Elektron die gegenüberliegende Seite, wird es vom elektrischen Feld abgestoppt und in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt. Auf diese Weise oszillieren Elektronen zwischen der Kathodenoberfläche, was auch als *Pendel-Effekt* bezeichnet wird. [42]

Somit handelt es sich bei *Hollow-Cathode-Entladung (HCD)* um eine sehr Gaseffiziente Entladungsart, da durch die zusätzlichen Ionisierungsprozesse sehr hohe Stromdichten erzeugt werden können. Bei konstanter äußerer Spannung sind der Entladestrom und die Konzentration an hochenergetischen Elektronen um einige Größenordnungen höher als bei planaren Elektroden. Der klassische Aufbau der *HCE* wird in *Abb. 5* dargestellt und setzt sich aus einer Kathode mit Zylindrischer Einkerbung und einer beliebig geformten Anode zusammen.[42]

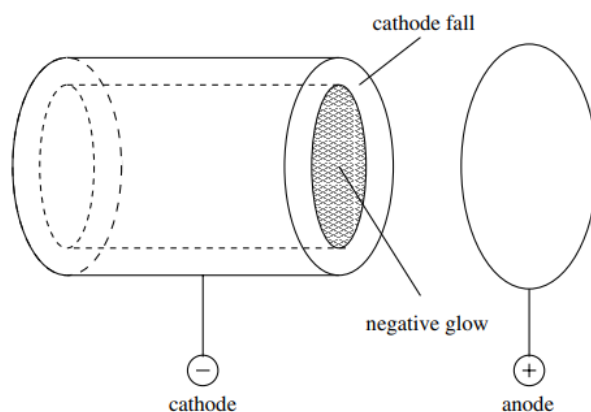


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Hollow-Cathode-Entladung [41]

Da es sich bei der *Hollow-Cathode-Entladung* um eine Abwandlung der klassischen Glimmentladung handelt, muss auch hier die Plasmastabilität beachtet werden. Ein Problem der Glimmentladung ist, dass bei hohem Gasdruck sehr schnell Instabilitäten auftreten, die zu einem Glow-To-Arc Übergang, also dem Übergang der Glimmentladung in einen Lichtbogen führen. Um dies zu verhindern werden die meisten Applikationen, die eine Glimmentladung generieren, bei niedrigen Druckverhältnissen betrieben, was jedoch die bereits angesprochenen Nachteile mit sich bringt (teure Vakuumanlagen, aufwendige Bauweise, etc.). Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Größe der Elektrodenkonfiguration, auf einige Mikrometer verkleinert. Diese Art der Glimmentladung wird auch als Mikroentladung bezeichnet, weshalb man im Kontext der *HCE* auch von *Micro Hollow Cathode Entladung* (MHCD) spricht. MHCDs sind Metall-Isolator-Metall Strukturen, wobei sich in der Kathode ein Hohlraum befindet. Wie beim *HCE* beschränkt sich der Negative Glow auf den Hohlraum in der Kathode, sodass sehr hohe Elektronendichten ($10^{13} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) und Gastemperaturen von Raumtemperatur bis 2000 K erreicht werden können. Da das Volumen zwischen Anode und Kathode jedoch sehr klein ist, sind die Anwendungsmöglichkeiten eher gering. Ein Lösungsansatz hierfür bieten die sogenannten *Micro Hollow Cathode Sustained Entladung* (MCSD). Hierbei wird eine dritte Elektrode, mit positiver Polarität, außerhalb des Hohlraums platziert (Abb. 6). Die Elektronen werden also in Richtung der äußeren Anode beschleunigt, sodass sich das Plasma in Richtung der dritten Elektrode ausbreitet. Der grundlegende Aufbau des MHCD wird also Elektronenquelle eingesetzt, die diffuse Entladung generiert und somit in seiner Gesamtheit als Kathode fungiert. [39]

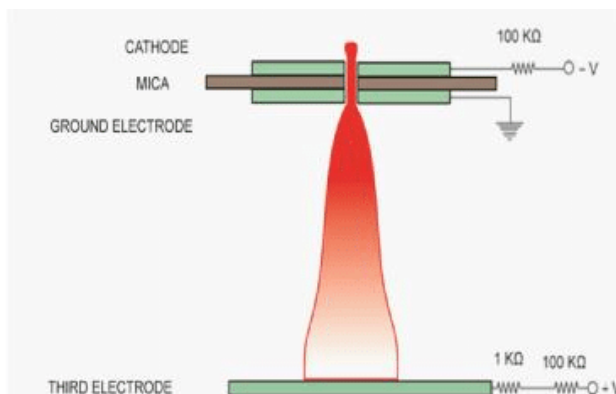


Abbildung 6: Schematischer Aufbau einer Hollow Cathode Sustained Entladung [39]

4 Plasmajets

Um die in *Abschnitt 3* genannten Quellen für Plasmen sinnvoll einsetzen zu können, muss das erzeugte Plasma von der Quelle aus zum Anwendungsbereich projiziert werden. Daher beschäftigt sich die weitere Arbeit mit sogenannten *Plasmajets*, deren Aufbau und Anwendungen analysiert werden.

Bei Plasmajets handelt es sich um verschiedenartige Geräte, aus denen Plasma unterschiedlicher Temperatur, mit Hilfe eines Gasstroms, aus einer Austrittsdüse ausgetrieben wird [4]. Es existieren Applikationen mit den unterschiedlichsten Elektrodenanordnungen und Anregungsarten; von (gepulster) Gleichspannung bis zu Spannungen mit Frequenzen im *MHz*-Bereich ist hier alles vertreten. Die erste Dokumentation von der Idee eines Plasmajets stammt von Gabriel Gianni aus dem Jahr 1957. Dieser entwickelte einen Plasmajet mit hohen Temperaturen für die Antriebstechnik, woraufhin Plasmajets mit Temperaturen von über 10.000K intensiv erforscht wurden. Dabei wurden verschiedenste Applikationen entwickelt (beispielsweise der auch heute noch oft eingesetzte Plasmabrenner, zum Schneiden von Metallen), die jedoch alle Niederdruckplasmen generierten. Ende der 1980er Jahre kamen erste Konzepte von Plasmajets auf, die Plasma bei Atmosphärendruck erzeugen, die den Vorteil hatten, dass keine Vakuumanlage für die Plasmaproduktion benötigt wurden. Bis zum Anfang der 2000er wurde Plasma fast ausschließlich als Wärmequelle verwendet, was sich jedoch durch die Entwicklung von Plasmajets, die keinen Lichtbogen erzeugen, schlagartig änderte. Erreicht wurde dies mit bereits genannten Ansätzen, wie die spitze Elektrodenanordnung bei der Koronaentladung, das Einhüllen von mindestens einer Elektrode in ein Dielektrikum (Dielektrische Barrierenentladung), das Verkleinern der Entladungszone beim Microhollow Cathode Discharge oder die Verwendung von pulsförmigen Spannungssignalen. Man unterschied ab diesem Punkt also thermische Plasmajet, die im lokalen thermischen Gleichgewicht arbeiten und nicht-thermische Plasmajets, die auch Kalte Plasmajets genannt werden und mit Temperaturen zwischen 300 – 1000K arbeiten. Diese Entwicklung brachte neuen Aufschwung in die Welt der Plasmaforschung, weshalb in den Jahren zwischen 2003 und 2014 die Anzahl der Publikationen über Plasmajets von 15 auf 211 angestiegen sind. [13]

4.1 Häufig genutzte Begriffe und Klassifikationen

In der Plasmatechnologie wird der Begriff Plasmajet folgendermaßen definiert:

„Der Begriff Plasmajet beschreibt verschiedene Konfigurationen und Typen von Plasma, die alle gemeinsam haben, dass eine Gasentladung in einer nicht geschlossenen Elektrodenanordnung betrieben und aus der Anordnung in die Umgebungsluft projiziert wird“ [13]

Die Expansion des Plasmas in die Umgebungsluft wird meistens von der Flussgeschwindigkeit des Arbeitsgases hervorgerufen und kann durch die Geometrie des elektrischen Feldes bestimmt werden. Die Klassifikation von Plasmajets kann nach den folgenden Kriterien vorgenommen werden: [13]

1. Entladungsgeometrie, Elektrodenanordnung und Konfiguration des elektrischen Feldes
2. Art des erzeugten Plasmas (thermisch, nicht-thermisch, etc.)
3. Erregerfrequenz (Gleichspannung, Wechselstrom, Mikrowellen) und Art der Erregung (kontinuierlich, gepulst)
4. Zusammensetzung des Arbeitsgases

Die am häufigsten genutzte Klassifikation ist die Elektrodengeometrie- bzw. Anordnung, auf die in den folgenden Kapiteln im Detail eingegangen wird. Auf Grund der vielen verschiedenen, unabhängigen Publikationen existieren sehr viele Fachbegriffe im Bereich der Plasmatechnologie. Daher existieren oftmals verschiedene Begriffe für die gleiche Gruppe von Plasmen oder gleiche Begriffe für Plasmen, die sich in ihren Eigenschaften stark unterscheiden. Um einen Überblick über die an den häufigsten verwendeten Begriffen zu schaffen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine tabellarische Sammlung angelegt (*Tabelle 1*).

Begriff	Definition	Quelle
APPJ	Abkürzung für Atmosphärendruck-Plasmajet	[2]
Arbeitsgas (operation gas)	Gas, das in die innere Elektrodenanordnung eingeführt und dort ionisiert wird	[13]
Dielektrische Barrirentladung (DBD)	Plasmaquelle, bei der Plasma zwischen zwei Elektroden entsteht, von denen mindestens eine mit einem Dielektrikum bedeckt ist	[4]
Far filed region	Region, in der die externen elektromagnetischen Felder, die den Plasmazustand aufrechterhalten, abwesend sind, bzw. nicht ausreichen um weitere Ionisations- oder Anregungsprozesse in Gang zu setzten	[13]
Glimmentladung	Zweite Entladungsphase, bei der die Anregungs- und Abregungsprozesse und somit die Photonenemission zunehmen, wodurch das Plasma sichtbar wird	[3]
Hollow-Cathode Entladung (HCE)	Plasmaquelle, bei der die Kathode eine hohle Struktur besitzt	[42]
Kalter Plasmajet, Nicht-LTE Plasmajet	Plasmajet, der Nicht-LTE Plasma ohne Erhöhung der Temperatur des Arbeitsgases erzeugt	[14]
Non-Transferred Arc	Plasmaquelle, die einen Lichtbogen zwischen zwei Elektroden erzeugt und diesen als Flamme durch kontinuierlichen Gasfluss in die Umgebungsluft projiziert	[15]
Plasmaflamme (Plasma flame)	Gasstrom, der den Plasmajet verlässt und die reaktiven Spezies enthält, die direkt oder indirekt in der Elektrodenanordnung erzeugt wurden	[16]
Plasmajet	Gasentladung, die in einer nicht-geschlossenen Elektrodenanordnung betrieben und aus der Anordnung in die Umgebungsluft projiziert wird	[13]
Plasma torch	Plasmaquelle, die hochenergetische Gasentladungen zwischen zwei Elektroden erzeugt und so durch kontinuierlichen Gasfluss eine Flamme (engl. <i>torch</i>) in die Umgebungsluft projiziert (Plasmabrenner)	[15]
Transferred Arc	Lichtbogenentladung, bei der sich eine Elektrode (meistens das zu behandelnde leitfähige Material) außerhalb des Gehäuses befindet	[15]

Tabelle 1: Sammlung von Fachbegriffen

4.2 Elektrodengeometrien

Eine der am häufigsten genutzten Klassifizierungsmöglichkeiten für Plasmajets ist die Elektrodenanordnung. Dabei unterteilen führende Wissenschaftler die nicht LTE-Jets in die folgenden vier Gruppen [17]:

1. Dielectric-free electrode jets
2. Dielectric barrier discharge (DBD) jets
3. DBD-like jets
4. Single electrode jets

Aus diesen vier Gruppen lassen sich 7 Basis Geometrien für die Elektrodenanordnung ableiten, deren Querschnitte in *Abbildung 7* dargestellt sind. *Geometrie 1* stellt hierbei einen Aufbau für *Transferred Arc Jets* dar, auf die in Abschnitt 3.1 bereits näher eingegangen wurde. Mit kleinerer Bauweise und Spannungsversorgung (DC, AC, RF), kann auch hier nicht-LTE Plasma erzeugt werden. Aus *Geometrie 2* kann man verschiedene Plasmajet Konfigurationen ableiten. Ist die Röhre (engl. *tube*) leitend, fungiert diese als zweite Elektrode, so dass ein *Non-Transferred Arc* entsteht. Will man jedoch nicht-thermisches Plasma erzeugen, ersetzt man die leitende Röhre durch einen Isolator, sodass ein DBD-like Plasmajet entsteht. In manchen Fällen ist die innere Elektrode ebenfalls von einem Dielektrikum umhüllt, was einen DBD-Plasmajet darstellt. Um das lokale elektrische Feld zu verstärken, wird die innere Elektrode in diesen Fällen spitz zulaufen. Eine weitere Möglichkeit eines DBD-Plasmajets bietet *Geometrie 3*, bei der statt einer inneren und einer äußeren Elektrode zwei Ringelektroden verwendet werden. Bei *Geometrie 4* wird eine Abwandlung der *Micro Hollow Cathode Entladung* als Plasmaquelle für einen Plasmajet genutzt. Anstatt eine oder mehrere Elektroden kann Draht um eine gasdurchströmte Röhre gewickelt werden, um elektrische Entladung zu zünden, was in *Geometrie 5* ausgenutzt wird. *Geometrie 6* verwendet einen Hohlraumresonator, um Mikrowellen in die Applikation einzukoppeln und so einen Plasmajet zu erzeugen. *Geometrie 7* stellt einen stark miniaturisierten Plasmajet mit zwei Metallelektroden dar, der auf Grund seiner Größe auch als *Micro Atmospheric Pressure Plasmajet* (μ APPJ) bezeichnet wird. [13]

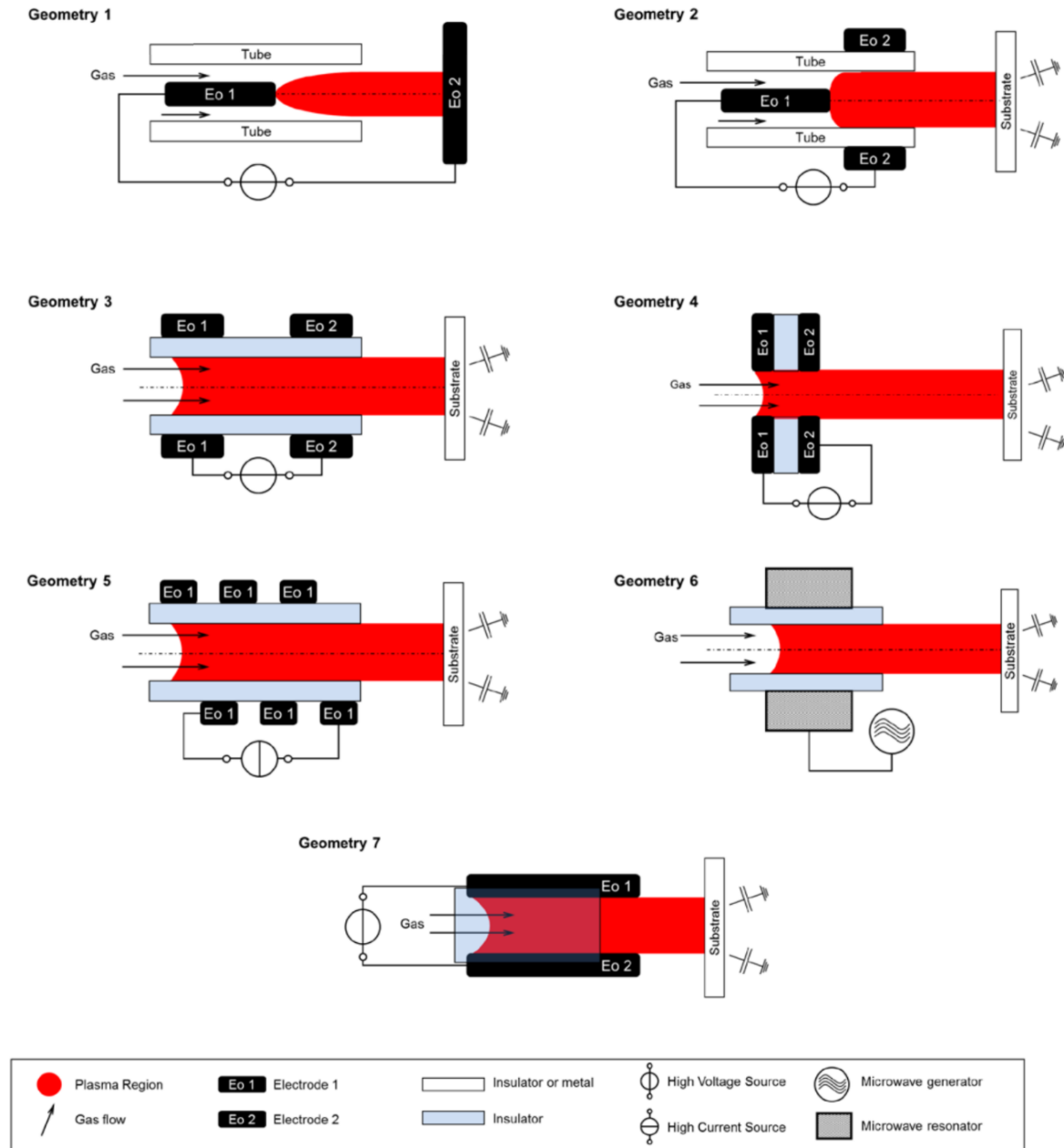


Abbildung 7: Zusammenfassung der sieben Plasmajet-Geometrien [13]

Um eine noch genauere Abgrenzung der Plasmajets untereinander vorzunehmen, wird oftmals die Orientierung des elektrischen Feldes zu der Gasflussrichtung als zusätzliches Klassifizierungskriterium herangezogen. Hierbei unterscheidet man [18] :

1. *Linear Field Jets* bestehend aus zwei parallel angeordneten Ringelektroden, die um eine dielektrische Röhre angeordnet sind. Diese erzeugen ein elektrisches Feld, dass sich parallel zur Gasflussrichtung des Arbeitsgases ausbreitet. *Geometrie 3* und *4* repräsentieren Linear Field Jets.
2. *Cross-Field Jets*, die eine koaxiale Elektrodenausrichtung aufweisen, sodass das elektrische Feld senkrecht auf der Gasflussrichtung steht. *Geometrie 2* und *7* repräsentieren Cross-Field Jets.
3. *End-Field Jets* repräsentieren einen Aufbau, bei dem sich im Gehäuse des Plasmajets, in das das Arbeitsgas eingeführt wird, nur eine Elektrode befindet. Dies ist bei *Geometrie 1* der Fall.

Im Folgenden wird versucht die wichtigsten der unzähligen, bereits bestehenden Plasmajets mit Hilfe dieses Klassifizierungssystems vorzustellen und in tabellarischer Form zusammenzufassen. Die Grundlage dafür liefert die in [13] erstellte Sammlung an Systemen, die hier in abgewandelter Form, teilweise übernommen und mit den seit der Erstellung im Jahr 2015 neuerschiedenen Applikationen ergänzt wurde.

4.3 Überblick über Atmosphärendruckplasmajets

Um die Zahl der zu untersuchenden Plasmajets einzugrenzen, werden hier nur Applikationen vorgestellt, die im Jahr 2012 oder später entwickelt wurden. Auch wenn auf Grund der großen Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten von Vollständigkeit keine Rede sein kann, wird versucht, einen Überblick über die verschiedenen Jets und Technologien zu schaffen und diese in *Tabelle 2* zusammenzutragen. Sortiert wird die Aufzählung nach den in Abschnitt 4.2 vorgestellten Elektrodengeometrien.

Geometrie 1

Die erste hier vorgestellte Applikation ist das Hairline-Plasma [11], bei dem der physikalische Effekt der negativen DC-Koronaentladung verwendet wird, um eine medizinisch relevante Applikation zu entwickeln. Das Gerät kann dazu beitragen, Probleme bei der endodontischen Behandlung in der Zahnmedizin zu überwinden, wenn beispielsweise der Zahnnerv durch eine Infektion irreversibel geschädigt ist und der Wurzelkanal mechanisch behandelt werden muss, um Bakterien zu entfernen. Da diese Regionen nur schwer erreichbar sind, ist es schwierig diese mit Desinfektionsmittel oder

ähnlichem durchzuspülen. Das Hairline-Plasma kann in solchen Fällen direkt auf den Wurzelkanal angewendet werden, sodass die Plasmafasern tief in den Wurzelkanal eindringen und so die Restbakterien abtöten können. Das Kernstück des Systems bildet eine hohle HV-Nadelelektrode, die mit dem negativen Pol der HV-Spannungsquelle verbunden ist. Diese generiert gepulste DC-Spannungen von $1 - 14kV$ mit einer Pulsdauer im Nanosekundenbereich. Auf Grund des hohen Widerstands der Spannungsquelle, ist es für Menschen sicher die Elektrode direkt zu berühren, da die Spannung in diesem Fall sofort zusammenbricht. Die Elektrode ist von einem isolierendem Kapillarröhrchen umgeben, das einen Gaskanal bildet, der sich bis einige Millimeter vor der Elektrode erstreckt. Die zweite Elektrode befindet sich im Abstand von 1-3cm zur inneren Elektrode und ist mit dem geerdeten, positiven Pol der Spannungsquelle verbunden. Bei der Anwendung direkt am Menschen fungiert der Mensch selbst als zweite Elektrode, weshalb hierbei auf elektrische Sicherheit geachtet werden muss, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Als Arbeitsgas wird Argon mit einer Flussrate von $0,5\text{ slm}$ verwendet. Abhängig vom Elektrodenabstand und der angelegten Spannung entsteht eine Plasmafaser mit einer Breite von ungefähr $30\mu m$ und einer Länge von bis zu 1,5cm. Da im Bereich der Spitze der negativen HV-Elektrode die höchste elektrische Feldstärke vorherrscht, haben bläulichen Plasmafasern hier ihren Ursprung und werden in Richtung des Gasflusses gebogen. Die resultierenden Plasmafasern sind typisch für intermittierende DC-Koronaentladung und haben eine Temperatur von $304 \pm 11K$. Um die biologische Effektivität des Hairline-Plasmas zu untersuchen, wurde das Kolibakterium *NTC 10538* auf einer *CASO* Agarplatte kolonialisiert. Daraufhin wurde das Hairline-Plasma 40-mal mit einer Geschwindigkeit von 1 cm/s über einen definierten Pfad von 4 cm Länge bewegt. Nach der Behandlung konnte man erkennen, dass ein Großteil der Agarplatte überwuchert war, während der mit Plasma behandelte Pfad frei von Mikroorganismen war. Dies zeigt klar den biologischen Effekt des Hairline-Plasmas.

Von Gerling *et al.* wurde ein weitere Plasmajet nach *Geometrie 1* entwickelt, der im Rahmen der wissenschaftlichen Beschreibung in [20] auch als „*Self-Pulsed Nanosecond Transient Spark Discharge*“ bezeichnet wird. Betrieben wird der Jet von einer Hochohmigen ($100\text{ M}\Omega$) DC-Hochspannungsquelle und Argon mit einer Gasflussrate von $0,2 - 0,5\text{ slm}$ als Arbeitsgas. Um den Entladestrom zu limitieren, wurde ein 100Ω -Widerstand zwischen Elektrode 2 und Ground geschaltet. Es handelt es sich um eine Applikation, die im *Self-Pulsed Modus* betrieben wird. Dieser lässt sich folgendermaßen erklären: Im Aufladezustand steigt die Spannung über der Entladungslücke, bis die Breakdown-Spannung erreicht ist. Ist

die Breakdown-Spannung erreicht, sind beide Elektroden, vereinfacht ausgedrückt, über die Entladungslücke verbunden und die Kapazität des Systems entlädt sich. Da das System jedoch auf Grund seiner Bauweise eine sehr niedrige Kapazität von 3 pF besitzt, passiert dieser Vorgang innerhalb von 30 ns . In den nächsten $0,3\text{ ms}$ steigt die Spannung zwischen den Elektroden wieder an, bis die Breakdown-Spannung wieder erreicht wird und ein neues Plasmaevent auftritt. Die Frequenz, in der diese Plasmaevents auftreten, ist abhängig von Abstand der Elektroden und der angelegten Spannung. [20]

Deng et al. haben eine weitere *Point-to-Plane* Anordnung vorgestellt, die mit Stickstoff oder Luft bei einer Gasflussrate von 8 slm arbeitet [19]. Mit dem *Self-Pulse Modus* der Apparatur können niedrige Entladungsströme von unter 10 mA erreicht werden. Wird der Entladungsstrom erhöht, tritt eine stabile Glimmentladung auf. Dabei wurden in [19] zwei Entladungsregionen klassifiziert: Die *Plasma Region*, die sich im Inneren der Quarzröhre befindet und Temperaturen von $1300 - 2750\text{ K}$ aufweist, und die *Afterglow Region*, die mit dem Austrittspunkt des Plasmas aus dem Jet beginnt. Dort ist das Plasma bereits auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei Stickstoff als Arbeitsgas konnten hohe Konzentrationen an aktiven Spezies in der *Afterglow-Region* festgestellt werden, sodass sich die Anwendung auf Grund der niedrigen Temperatur sehr gut für die Anwendung in der Plasmamedizin eignet.

Geometrie 2

Die wohl am häufigsten verwendete Elektrodenkonfiguration, ist *Geometrie 2* [13]. In Quelle [19] wurde von *Deng et al.* ein nicht-thermischer Atmosphärendruckplasmajet vorgestellt, der mit Gleichspannung betrieben wird. Die innere Elektrode ist ein 2 mm langer Wolframdraht mit einem spitzen Ende, der von einer geerdeten Netzelektrode umgeben ist. Dabei ist die innere Elektrode mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbunden und zündet so eine Plasmaentladung im Arbeitsgas Stickstoff. Für kleine Entladeströme wird auch hier ein *Self-Pulsed Modus* eingeführt. Durch das Hinzufügen von Sauerstoff und Tetramethydisiloxan (TMDSO), können dünne anorganische Kohlenstofffilme auf Oberflächen aufgetragen werden.

Li et al. stellten einen weiteren DC-Atmosphärendruckplasmajet vor [21], der sich ideal für die Inaktivierung von Bakterienstämmen eignet. Als Arbeitsgas wurde hier purer Sauerstoff verwendet, wodurch mehrere aktive Spezies entstehen. (Sauerstoffspezies wurden in [21] detektiert). Nach der erfolgreichen experimentellen Bearbeitung von bakterienbefallenden

Oberflächen, kamen die Autoren zu dem Schluss, dass der oxidative Stress, den die aktiven Spezies verursachen, der Hauptgrund für die Inaktivierung darstellt.

Ein kalter DC-Plasmajet mit Luft als Arbeitsgas, wurde in [22] vorgestellt. Dabei fungiert ein Kupferdraht, der in eine Aluminiumröhre eingebettet ist als innere Elektrode, die mit dem positiven Potential verbunden ist. Das Aluminium stellt hierbei den Isolator zwischen der inneren Elektrode und der geerdeten Metallhülle dar. Bei einem Elektrodenabstand von $0,4\text{ mm}$ und einer Gasflussrate von 8 slm konnten *Kolb et al.* eine Plasmatemperatur von 43°C in einer Entfernung von 10 mm zur Austrittsdüse des Gases feststellen.

In Quelle [23] wurde von *Zhao et al.* ein thermischer LTE-Plasmajet vorgestellt, der mit Wasserdampf arbeitet. Das System besteht aus einer Zirkonium Kathode und einer düsenartigen Kupferanode, zwischen denen bei angelegter Gleichspannung ein Lichtbogen gezündet wird. Im Plasmajet befindet sich ein Reservoir mit Wasser, das, aufgrund der hohen Temperaturen der Elektroden, verdampft. Der entstehende Wasserdampf entweicht durch die Ausgangsdüse und transportiert so die Plasmaflamme in die Umgebungsluft. Die Autoren protokollierten dabei einen Wasserverbrauch von 3 ml/min . Am Austrittspunkt des Plasmas aus der Düse, wurde eine Temperatur von 5000 K gemessen, die sich jedoch in einer Entfernung von 75 mm bereits auf 700 K verringert hat. Diese hohen Temperaturen führen zu einer starken Dissoziation des Wasserdampfs, wodurch eine große Anzahl an reaktiven Spezies produziert werden, die ideal in der Abwasserbehandlung eingesetzt werden können.

Im Rahmen der Weiterentwicklung einer früheren Arbeit der Wissenschaftler, wurde von *Xian et al.* ein Self-Pulsed Plasmajet vorgestellt, der durch kleinere Widerstände zur Begrenzung des Entladestroms und eine zusätzliche Buffer-Kapazität ergänzt wurden und so signifikant höhere Wiederholungsraten der Plasmaevents erreichen konnten (bis zu 100 kHz) [24]. Das Plasma tritt dabei in Form von Bullets (engl. *Kugel*) aus, deren Geschwindigkeit im Rahmen der Abhandlung gemessen wurde. Dabei wurden direkt am Austrittspunkt der Plasmadüse Geschwindigkeiten von 230 m/s gemessen, die sich jedoch im Abstand von $1 - 2\text{ mm}$ auf 60 m/s verringert hat. Außerdem wurde die Temperatur des austretenden Plasmas gemessen und es konnte festgestellt werden, dass schon nach wenigen Millimetern hinter der Austrittsdüse biologisch Tolerante Temperaturen von 50°C einstellen.

Ein weiterer Self-Pulsed Plasmajet wurde von *Merbahi et al.* vorgestellt, der Umgebungsluft als Arbeitsgas verwendet, sodass keine weitere Gaszufuhr notwendig ist. Der Plasmajet

arbeitet mit Wechselspannungen im Frequenzbereich von 20 kHz und erzeugt Leistungen von 100 mW . Die Apparatur hat eine Länge von 10 mm und wird für die Inaktivierung von Bakterien auf Biofilmen verwendet. In mehreren Experimenten konnten die Forscher, bei Anwendung des Plasmajets auf eine mit *Weissella Confusa* befallene Oberfläche, eine Reduzierung der Bakterien um mehr als zwei Größenordnungen feststellen.

Um den Einfluss des Abstandes einer geerdeten Ringelektrode zu einer HV-Elektrode zu untersuchen, entwickelten *Sobota et al.* einen Helium-Plasmajet, mit einer beweglichen Ringelektrode [27]. An die HV-Elektrode wurden verschieden starke sinusförmige Wechselspannungen mit einer Frequenz von 30 kHz angelegt. Dabei wurden zwei Modi unterschieden: Der *Low-Power Modus*, bei dem Plasma Bullets entstehen, und der *High-Power Modus*, der ein zufälliges Auftreten von Mikroentladungen in Gang setzt. Die Wissenschaftler stellten fest, dass die abgegebene Leistung sowie die Effizienz der Energieübertragung, bei steigendem Abstand der Elektroden zueinander, ansteigt.

Eine weitere Anwendung der *Geometrie 2*, stellt der sogenannte „Kinpen-Plasmajet“ dar, der bereits als Medizingerät eingestuft wurde [28]. Hierbei handelt es sich um die neueste Version der Plasmajetreihe der Firma *KinpenMED*. Das Kernstück der Apparatur bildet eine spitzförmige HV-Elektrode im Zentrum, die von einem geerdetem Metallkörper umhüllt ist und an die ein sinusförmiges Hochspannungssignal von $2 - 6\text{ kV}$ bei einer Frequenz von 1 MHz angelegt wird. Die beiden Elektroden sind zusätzlich durch eine dielektrische Röhre getrennt, die das Auftreten von zu hohen Entladeströmen verhindert. In weiteren Experimenten fügten die Forscher dem Argon oder Helium, das Standardgemäß als Arbeitsgas verwendet wird, kleinere Mengen ($\sim 2\%$) von molekularen Gasen (N_2, O_2) hinzu, um die Produktion von reaktiven Spezies zu erhöhen. Bei der Hinzugabe von Sauerstoff konnte eine Erhöhte Produktion von Ozon festgestellt werden. In weiteren Experimenten mit dem Kinpen-Plasmajet wurde mit höheren Frequenzen ($13,56\text{ MHz}$) gearbeitet [29]. Dabei wurde das Signal mit einem Duty Cycle von 20% und einer Wiederholungsrate von 20 kHz angelegt, was bedeutet, dass ein $10\text{ }\mu\text{s}$ breites Signal alle $50\text{ }\mu\text{s}$ auftritt. Als Arbeitsgas wurde hier Argon mit einer Gasflussrate von $1,5\text{ slm}$ verwendet. Mit einer angelegten Leistung von $1,4\text{ W}$ wurde das so generierte Plasma zur Bakterien Inaktivierung eingesetzt und erzielte dabei eine sichtbare Wirkung. Die Forscher konnten jedoch feststellen, dass die Inaktivierung der Bakterien primär nicht von der direkten Plasmawirkung abhängt, sondern von den Auswirkungen der Plasmatemperatur auf die Flüssigphase des Bakterienfilms.

Geometrie 3

Bei *Elektrodengeometrie 3* handelt es sich ebenfalls um DBD-Plasmajets, die hier jedoch mit zwei Ringelektroden realisiert werden. Eine dieser Applikationen ist ein Atmosphärendruck Plasmajet, der von *Yonemori et al.* entwickelt wurde [30]. Dieser arbeitet mit Helium als Arbeitsgas und 8 kV-Spannungspulsen mit einer Pulsweite von 25 μs und einer Wiederholungsfrequenz von 10 kHz. Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit wurde der Anteil an OH-Radikalen auf verschiedenen Oberflächen gemessen. Dabei wurde die höchste Konzentration ($2 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$) auf einer nassen Oberfläche (Schwamm) festgestellt. Diese war doppelt so hoch, wie die Konzentration auf einer Rattenhaut, die als Oberfläche fungierte und dreimal so hoch, wie die Konzentration auf einer Glasoberfläche.

Eine weitere Applikation wurde von *Gerling et al.* in [31] vorgestellt. Hier entwickelten die Forscher einen Plasmajet, bestehend aus einer Quarzröhre mit einem Durchmesser von 0,5 mm, um die zwei Ringelektroden gewickelt wurde. An diese wurde ein sinusförmiges Hochspannungssignal mit einer Frequenz von 13 kHz angelegt, sodass eine Leistung von 70 – 100 mW erzeugt werden konnte. Als Arbeitsgas wurde Helium mit einer Gasflussrate von 3 slm verwendet. Um ein besseres Verständnis des Einflusses der zu behandelnden Oberfläche auf die Plasmaausbreitung zu gewinnen, maßen die Autoren die positive und negative Ladung auf der Oberfläche, in Abhängigkeit des Abstandes des Jets zu dieser. Dabei trat eine maximale negative Ladungsdichte von -4 nC/cm und eine maximale positive Ladungsdichte von $+24 \text{ nC/cm}$ im Mittelpunkt der Oberfläche und bei minimalem Abstand des Jets auf. Es konnte ebenfalls festgestellt werden, dass keine Ladung mehr übertragen wird, sobald das Plasma den Kontakt mit der Oberfläche verliert. Dies hebt die bedeutende Rolle der Oberfläche hervor, die also nicht nur das zu behandelnde Substrat darstellt, sondern auch aktiv die Eigenschaften des erzeugten Plasmas beeinflusst.

Geometrie 4

Die Applikationen nach Elektrodenkonfiguration 4 basieren auf einer Abwandlung des *Micro Hollow Cathode Discharge* [13]. Eine dieser Applikationen wurde von *Schmidt-Blecker et al.* entwickelt [32]. Dabei handelt es sich um einen nicht-thermischen Atmosphärendruckplasmajet, der mit Gleichstrom und Helium bzw. Sauerstoff als Arbeitsgas betrieben wird. Im Normalbetrieb erzeugt der Jet eine Glimmentladung, kann jedoch nach Anpassung auch im *Self-Pulsed Modus* für kleinere Entladeströme und niedrigere Sauerstoffkonzentrationen betrieben werden. Laut den Autoren lassen sich die Elektronen- und Ionenenergie und die Selektivität der reaktiven Spezies über die Zusammensetzung des Arbeitsgases und die Wahl des passenden Entladestroms und der passenden Gasflussrate regulieren. Abhängig von den gewählten Parametern produziert die Apparatur große Mengen an Ozon (bis zu 120 ppm). Einsatz findet die Applikation im Gesundheits- und Medizinsektor.

Geometrie 5

Anstatt einer oder mehrerer Elektroden, kann auch ein Draht um eine gasdurchströmte Röhre gewickelt werden, um eine elektrische Entladung zu zünden. Der elektrische Strom, der durch den Draht fließt, erzeugt ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das wiederum über elektromagnetische Induktion ein elektrisches Feld induziert. Da das anregende elektrische Feld von der äußeren Spule induziert wird, spricht man bei dieser Elektrodengeometrie auch von *Induktiv Gekoppeltem Plasma (ICP)*. Um die elektromagnetische Induktion so effektiv wie möglich zu gestalten, werden meist hohe Ströme bei mit hohen Frequenzen verwendet. Bei niedrigen Druckverhältnissen haben ICP-Anwendungen einige Vorteile zu anderen Anregungsformen, da hier eine hohe Plasmadichte gegeben ist. ICP bei Atmosphärendruck für medizinische Anwendungen ist noch wenig erforscht, da die Temperaturen bei hohem Druck oftmals höher sind als die der kapazitiv gekoppelten Elektrodenanordnungen. Es existieren dennoch erste Ansätze für induktiv gekoppelte Plasmajets, bei denen das Plasma durch einen Gasfluss aus der Spule transportiert wird. Durch den längeren Weg, den das Plasma zurücklegt, tritt ein wesentlich stärkerer Kühlungseffekt auf, sodass selbst mit Anregungsfrequenzen im Mikrowellenbereich, Temperaturen nahe der Raumtemperatur an der Spitze des Plasmajets festgestellt werden können. Auf diese Weise lassen sich ICP-Plasmajets herstellen, die mit einem Querschnitt von einigen Millimetern Einsatz in der Medizintechnik finden könnten. [3]

Eines dieser Systeme wurde von *Stefanovic et al.* vorgestellt [36]. Das System stellt eine miniaturisierte ICP-Plasmaquelle dar, die über zwei Modi verfügt, den *H-Modus* und den *E/H-Modus*. In dem in Quelle [36] vorgestellten *H-Modus* wurden Wechselstrom mit einer Frequenz von $2,45\text{ GHz}$ induktiv eingekoppelt, um so donutförmiges Plasma zu erzeugen. Außerdem wurde der Absorptionsgrad der Quelle bestimmt, der angibt, welcher Teil der Leistung einer auftretenden Welle absorbiert, d.h. aufgenommen wird. Aus diesem Wert konnte man die eingekoppelte Leistung und die dazugehörigen Temperaturen bestimmen. Für ein Gasgemisch aus molekularem Stickstoff (N_2) als Arbeitsgas, ergab sich bei einer absorbierten Leistung $P_{abs} = 12\text{ W}$ eine Temperatur von $650 \pm 20\text{ K}$ und für eine absorbierte Leistung von $P_{abs} = 78\text{ W}$ eine Temperatur von $1600 \pm 100\text{ K}$.

Geometrie 6

Eine weitere Möglichkeit dem Arbeitsgas Energie zuzuführen ist das Einkoppeln von Mikrowellen entlang eines Systems, um entsprechende Stoßprozesse in Gang zu setzten. Typischerweise werden die Mikrowellen mit einer Frequenz von $2,45\text{ GHz}$ von einem Magnetron erzeugt und über einen Hohlleiter und/oder ein Koaxialkabel zur Prozesskammer weitergeleitet. Dort befindet sich ein spezieller Entladungskopf oder eine Resonatorstruktur, die das Phänomen der Resonanz zur Amplitudenverstärkung der Welle ausnutzt. Die eintretende Welle wird mit der Resonanzfrequenz hin und her reflektiert, sodass eine stehende Welle entsteht. Durch das Eintreten der nachfolgenden Welle wird die Energie immer größer, bis schließlich eine Gasentladung gezündet wird. Je nach Leistungseintrag kann sich die Plasmatemperatur stark unterscheiden, wobei Temperaturen von Raumtemperatur bis hin zu einigen Tausend Kelvin üblich sind. Außerdem lässt sich Mikrowellenplasma mit moderaten Temperaturen gut in der Umgebungsluft zünden.

Die Firma Cyrannus® entwickelte eine industriell verwendbare Plasmaquelle, die auf Mikrowellenanregung basiert [33]. Dieser zylinderförmige Plasmajet erzeugt Volumenplasma mittels $2,45\text{ GHz}$ Mikrowellenstrahlung, wobei verschiedene Arbeitsgase zur Verfügung stehen (Ar, O_2, N_2, H_2, NH_3). Die eingespeisten Gase werden angeregt und durch Gasströmung aus der Quelle hinausgetragen. Dabei entsteht eine Plasmaflamme mit einer Breite von bis zu 160 mm bei einer Leistung von 10 kW .

Ein miniaturisierter Plasmajet wurde von *Baeva et al.* in [34] vorgestellt. Hier wird Mikrowellenenergie über ein Koaxialkabel an eine Plasmaquelle übertragen, wo

Entladungen in einer Keramikröhre mit einem inneren Durchmesser von $1,5\text{ mm}$ erzeugt wurden. Als Arbeitsgas wurde Argon mit einer Gasflussrate von $0,2 - 0,4\text{ slm}$ in einem Leistungsbereich von $20 - 100\text{ W}$ verwendet. Anwendung findet die Applikation in der selektiven Detektion von umweltschädlichen Schadstoffen.

Der *IMAPlaS* ist eine weitere integrierte, mikrowellenbasierte Plasmaquelle, die von *Bussiahn et al.* entwickelt wurde [35]. Hier findet die Mikrowellengeneration nicht mit einem Magnetron, sondern mit einem Solid-State-Oszillator statt. Dieser liefert Mikrowellen mit einer Frequenz von $2,45\text{ GHz}$ bei einer Leistung von 10 W . Bei Argon als Arbeitsgas konnte Plasma in einem axialen Abstand von 5 mm mit einer Temperatur von 35°C detektiert werden. Wurde dahingegen Luft als Arbeitsgas verwendet, liefert der *IMAPlaS* Plasma mit wesentlich höheren Temperaturen, die abhängig von der Gasflussrate sind. Im axialen Abstand von 5 mm wurden bei einer Gasflussrate von $1,0\text{ slm}$ Temperaturen von 250°C und bei einer Gasflussrate von $0,3\text{ slm}$ Temperaturen von 123°C gemessen. Angewendet wird das System in der Inaktivierung von Bakterien.

Geometrie 7

Elektrodenkonfiguration 7 stellt einen stark miniaturisierten Plasmajet mit zwei Metallelektroden dar. Die so erzeugten Mikroplasmen sind aus wissenschaftlichem Gesichtspunkt von großem Interesse. Beträgt der Abstand zwischen den Elektroden nur einige hundert Mikrometer, ist die Größe des Elektrodenzwischenraums mit der Größe der *Sheath-Region* bei kapazitiven Entladungen in Standardgröße vergleichbar. Somit wird die *Bulk-Region* sehr klein. Wird der Elektrodenabstand weiter verringert ($< 100\text{ }\mu\text{m}$), verschwindet der *Bulk* komplett und das resultierende Plasma wird von den relativ immobilen Ionen dominiert. Auf Grund der Abwesenheit des Bulks entstehen alle Elektronen in der *Sheath-Region*, in der sie stark zur Anode hin beschleunigt werden. Diese können sie ohne weiteres erreichen, sodass eine sehr verlustarme Elektronenroute entsteht, die das Wachstum des Entladestroms indirekt begrenzt, da so weniger freie Elektronen zur Verfügung stehen. Somit ist Mikroplasma robust gegen Plasmainstabilitäten. Wird der Elektrodenabstand auf einige $10\text{ }\mu\text{m}$ verringert, können Populationen von hochenergetischen Elektronen ($> 5\text{ eV}$) von über 50% erreicht werden. Weitere Entwicklungen in diesem Bereich der Plasmaphysik könnten neue Dimensionen für Applikationen von nicht-thermischen Plasmen in der Medizintechnik schaffen.

Bei dem in *Geometrie 7* dargestellten Plasmajet, handelt es sich um einen *Micro Atmospheric Pressure Plasmajet* ($\mu APPJ$), der sich aus zwei planaren Edelstahlelektroden zusammensetzt. Diese haben eine Länge von 30 mm , eine Dicke von 1 mm und sind mit $500\text{ }\mu\text{m}$ Abstand in eine Hülle aus Quarzglas eingesetzt. Dabei wird eine dieser Elektroden als aktive Elektrode mit Wechselstrom mit einer Frequenz von $13,56\text{ MHz}$ betrieben, wohingegen die andere geerdet ist. Als Arbeitsgas wird Helium mit einer Beimischung von 1% Sauerstoff verwendet, wodurch eine hohe Dichte an reaktiven Spezies bei niedriger Gastemperatur erzeugt wird. Durch die mikroskalierte Größe der Applikation ($30 \cdot 1 \cdot 0,5\text{ mm}^3$) ist die Gasflussrate signifikant verringert (1 slm). Das System biete vielversprechende technische Anwendungen, wobei besonderes Interesse in der Behandlung von sensiblen Oberflächen in der Biomedizin besteht.

Tabelle 2: Sammlung seit 2012 entwickelter Plasmajet-Applikationen

Elektrodenkonfiguration	Frequenz	Arbeitsgas	Gasflussrate [slm]	Leistung	Spez.En.Dichte	Temperatur [K]	Applikation	Quelle
Geometrie 1	0 & 40 Hz (SP)	N ₂ , Luft	8	18 – 30 W	$\sim 1,8 \cdot 10^2$	1300 – 3000 ^a 40 – 50 ^g	Plasmamedizin	[19]
	0,3 – 3 kHz (SP)	Ar	0,2 – 0,5	0,1 – 0,5 W	$\sim 1,6 \cdot 10^2$	Keine Angabe	Keine Angabe	[20]
Geometrie 2	DC	N ₂ + O ₂ ^{ad} + TMDSO ^{ad}	7	18 – 30 W	$\sim 2,1 \cdot 10^2$	Keine Angabe	TMDSO-Oberflächenbehandlung	[19]
	DC	O ₂	2	24 W	$7,2 \cdot 10^2$	309 ^s	Bakterieninaktivierung	[21]
	DC	Luft	8	11 – 14 W	$\sim 9,4 \cdot 10^1$	300 – 321	Oberflächenbehandlung, Bakterieninaktivierung	[22]
	DC	Wasserdampf	-	1 kW	$1,2 \cdot 10^4$	700 – 5000	Abwasserbehandlung	[23]
	100 kHz (SP)	Luft	2	10 – 14 W	$\sim 5,7 \cdot 10^2$	348 – 623	Biomedizinische Anwendung	[24]
	20 kHz (SP)	-	-	0,1 W	∞	300	Inaktivierung von Biofilmen	[25]
	30 kHz	He	0,7	0,1 – 1,8 W	$\sim 8,1 \cdot 10^1 W$	Keine Angabe	Plasmamedizin	[27]
	1 MHz	Ar, He + O ₂ ^{ad} , N ₂ ^{ad} , H ₂ O ^{ad}	0,5 – 3	0,9 – 2,2 W	$\sim 1,4 \cdot 10^2$	300-521	Biomedizinische Anwendung	[28]
	13,56 MHz	Ar	1,5	1,4 W	$5,6 \cdot 10^1$	313	Bakterieninaktivierung	[29]
Geometrie 3	10 kHz	He	1,5 – 6	1,7 W	$\sim 4,3 \cdot 10^1$	Keine Angabe	Biomedizinische Anwendung	[30]
	13 kHz	He	3	70 – 100 mW	$\sim 1,7$	Keine Angabe	Biomedizinische Anwendung	[31]
Geometrie 4	DC	He + O ₂ ^{ad}	0,5 – 5	4 – 20 W	$\sim 3,6 \cdot 10^2$	311-333	Einsatz im Gesundheitssektor	[32]

Geometrie 6	2,45 GHz	Ar	0,2 – 0,4	20 W	$\sim 4,5 \cdot 10^3$	500-2000	Sensitive Detektion von Schadstoffen	[34]
	2,45 GHz	Ar, O ₂ , N ₂ , H ₂ , NH ₃	Keine Angabe	10 kW	Keine Angabe	Bis zu 10.000	Cryanus®	[33]
	2,45 GHz	Ar, He, Luft	0,3-1	10W	$\sim 1,3 \cdot 10^3$	303-523	Inaktivierung von Bakterien	[35]
Geometrie 7	13,56 MHz	He + O ₂ ^{ad}	1	0,3 – 58W	Keine Angabe	345	Oberflächenbehandlung in der Biomedizin	[37]

SP: self – pulsed mode

a: In der aktiven Plasmaregion gemessen

g: In der Afterglow Region gemessen

ad: Beigabe Verhältnis < 2,5%

s: auf behandelte Oberfläche geme

5 Optimierung von Elektrodenkonfigurationen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die grundlegenden chemischen und physikalischen Vorgänge und die am häufigsten genutzten Verfahren zur Erzeugung von Plasma beschrieben, um anschließend einen Überblick über bereits existierende Applikationen zu geben. Auf Basis dieser Informationen soll im Rahmen einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit ein Plasmajet entwickelt und getestet werden. Um diesen Prozess zu unterstützen, werden im folgenden Kapitel einige Optimierungsstrategien vorgestellt, mit denen die kritischen Parameter der entwickelten Applikation bestimmt und verbessert werden können.

5.1 Auswirkung der Elektrodenanordnung

Der erste zu behandelnde Parameter ist die allgemeine Elektrodenanordnung, die in Abschnitt 4 bereits detailliert analysiert wurde. Welche Auswirkung eine Veränderung der Elektrodenanordnung auf die Plasmaerzeugung eines APPJ hat, wurde von *Nan Jiang et al.* in einer Arbeit über das Entladeverhalten von DBD-Konfigurationen untersucht [44]. Dazu verwendeten sie ein System bestehend aus einem Kapillarröhrchen aus Quarz mit einem inneren Durchmesser von 2 mm und einem äußeren Durchmesser von 3,5 mm. Als Arbeitsgas wurde reines Helium verwendet. Der Gasfluss wurde über ein Volumenstrommeter kontrolliert, da bei einem Gasfluss von über 4,1 slm keine laminare Strömung mehr garantiert werden kann. An das System wird eine sinusförmige Spannung mit einer Frequenz von 17 kHz angelegt. In der Arbeit wurden die in Abb. 8 dargestellten Elektrodenanordnungen aufgebaut und verglichen.

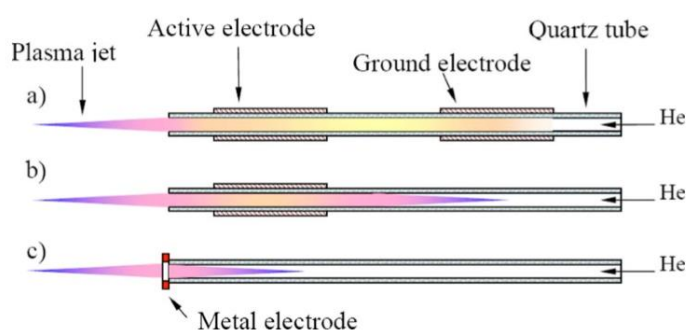


Abbildung 8: Elektrodenanordnungen in Vergleich; (a) DBD-Konfiguration mit zwei Elektroden, (b) DBD-Konfiguration mit einer Elektrode, (c) einzelne Metallelektrode [44]

Bei Anordnung a) handelt es sich um eine konventionelle DBD-Konfiguration mit zwei Elektroden, gemäß Geometrie 3. Bei den Elektroden handelt es sich um Aluminiumfolie mit einer Breite von 2 cm, die im Abstand von 3 cm zueinander um eine Kapillarröhre gewickelt ist. In Anordnung b) wird die geerdete Elektrode entfernt, sodass eine *Single-Electrode DBD*-

Konfiguration entsteht. Da im System nur eine Elektrode vorhanden ist, wird eine virtuelle Masse verwendet, um den Stromkreis zu schließen. Anordnung c) stellt eine typische Konfiguration für die Erzeugung von Koronaentladungen dar. Hierbei besteht die Elektrode aus 0,5 mm dicker Metallfolie, die mit einem Durchmesser von 2,5 mm direkt an die Öffnung der Quarzröhre angebracht ist. Eine digitale Kamera und zwei Photoelektronen Multiplier wurde verwendet, um die optischen Emissionen der Plasmajets zu studieren. Die Plasmajets wurden bei Spannungen zwischen 6,7 – 10,5 kV und Gassflussraten von 0,8 – 3,3 slm untersucht.

Die dabei erzielten Ergebnisse wurden grafisch in *Abb. 8* dargestellt. Betrachtet man Anordnung a), lässt sich die Entladung in drei Teile aufteilen: Der Downstream-Jet, der an der aktiven Elektrode startet und in die Umgebungsluft projiziert wird, die Entladung der DBD-Entladungslücke zwischen den Elektroden und der Upstream-Jet, am Ende der geerdeten Elektrode. Auch wenn im Bereich des Upstream-Jets große Unterschiede zwischen den verschiedenen Anordnungen zu erkennen sind, ist der Teil des Plasmajets, der für die Anwendung relevant ist, also der Teil, der in die Umgebungsluft projiziert wird, bei allen Konfigurationen sehr ähnlich. Es kann also festgehalten werden, dass eine Plasmajet mit vergleichbaren Charakteristiken mit allen drei Elektrodenkonfigurationen erzeugt werden kann. Im Falle der Anordnung c), hat die Metallelektrode direkten Kontakt mit dem Arbeitsgas, sodass mit wesentlich kleineren Spannungen das nötige elektrische Feld zur Verfügung gestellt werden konnte, das für die Ionisierung des Gases benötigt wird. Somit stellen *Single-Electrode* Anordnungen also eine brauchbare Option für das Design von APPJ dar, die flexibel und kostengünstig integriert werden können. Es sollten also zu Beginn des Designprozesses Tests und Simulationen durchgeführt werden, um die Applikation hinsichtlich des geforderten Einsatzgebietes und des Energiebedarfs zu optimieren.

5.2 Optimierung von Elektrodenanordnungen

Die Optimierung von Elektrodenanordnungen wird am Beispiel des Elektrodensystems von *Efrem et al.* vorgestellt [46]. Hierbei handelt es sich um ein System, das pulsierende Koronaentladungen im Nanosekundenbereich erzeugt (*Abb. 9*). Das Kernstück bildet eine Nadelelektrode, die in einer PTFE-Schicht befestigt ist und im Zusammenspiel mit einer zylinderförmigen, geerdeten Elektrode aus Metall eine Plasmaentladung erzeugt.

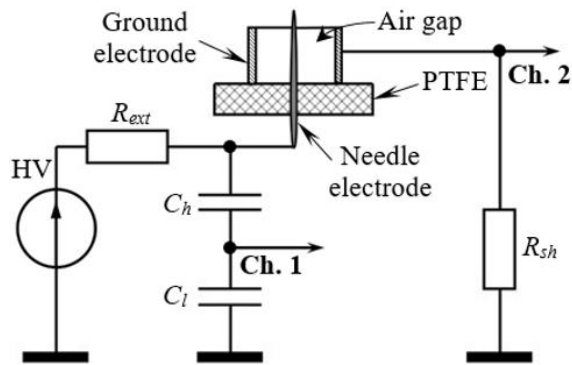


Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Optimierung von Elektrodenanordnungen [46]

Im ersten Schritt optimierten die Forscher den Radius der zylindrischen, geerdeten Elektrode und konnten feststellen, dass der optimale Wert zwischen 6 und 20 mm liegt. Wird der Radius kleiner als 6 mm, ist der Entladekanal sehr schmal und es kommt schnell zur Entwicklung eines Lichtbogens. Wird der Radius größer als 20 mm, dehnt sich der erzeugte Plasmajet räumlich stark aus und die benötigte Zündspannung steigt deutlich an.

Anschließend wurden drei weitere Parameter optimiert: Der Innere Durchmesser des Metallzylinders, die Höhe des Metallzylinders und das Herausragen der Nadelelektrode in Relation zur PTFE-Platte. Als Optimierungskriterium wurde die Zündspannung gewählt, die einen maximalen Wert von 20 kV nicht überschreiten soll. Um ein optimales System zu finden, wurde einer der drei Parameter variiert, während die anderen unverändert blieben. Der Entladestrom wurde über einen integrierten Schaltkreis erfasst, der parallel zum Shunt Widerstand R_{sh} geschaltet wird. Da die statische Kapazität des Elektrodensystems weniger als 1 pF groß ist und typische HV-Sonden eine Kapazität von mehreren pF besitzen, gestaltet sich die Messung der Spannungscharakteristik als schwieriger. Die Gasentladung wird durch einen pulsierenden Entladestrom mit Anstiegszeiten von 10 – 20 ns und Pulsdauern von wenigen hundert Nanosekunden charakterisiert. Wird nun eine herkömmliche HV-Sonde zu Messung verwendet, ändert sich die Gesamtkapazität des Systems und somit auch der Entladestrom und die Pulswiederholungsrate. Um Dieses Problem zu umgehen, wird ein kapazitiver Spannungsteiler verwendet, der die Entladecharakteristik nicht stört. Für den Spannungsteiler wurden die Werte $C_h = 0,3 \text{ pF}$ und $c_l = 300 \text{ pF}$ berechnet. Um nun ein optimales System zu finden, wurde einer gesuchten Parameter variiert, während die anderen unverändert blieben. Es ergaben sich zwei optimale Systeme:

1. Optimales System

- Innerer Durchmesser der zylindrischen Elektrode: 6 – 9 mm
- Höhe der zylindrischen Elektrode: 5 – 7 mm
- Herausragen der Nadel in Relation zur dielektrischen Platte: 2 – 4 mm
- Herausragen des Plasmajets über die Kante der geerdeten Elektrode: 4 – 7 mm

2. Optimales System

- Innerer Durchmesser der zylindrischen Elektrode: 14 – 18 mm
- Höhe der zylindrischen Elektrode: 5 – 7 mm
- Herausragen der Nadel in Relation zur dielektrischen Platte: 5 – 9 mm
- Herausragen des Plasmajets über die Kante der geerdeten Elektrode: 12 – 15 mm

5.3 Auswirkung der Elektrodendimension

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die räumliche Geometrie der einzelnen Elektroden. Die Auswirkung von Eigenschaften wie dem Interelektrodenabstand, der Dicke und Art des dielektrischen Barrierenmaterials und die Form der aktiven Elektrode auf die Entladecharakteristik für *koplanare DBD-Anordnungen* wurde von *Shuqun et al.* untersucht [45]. Das Forscherteam verwendete folgenden Elektrodensystem:

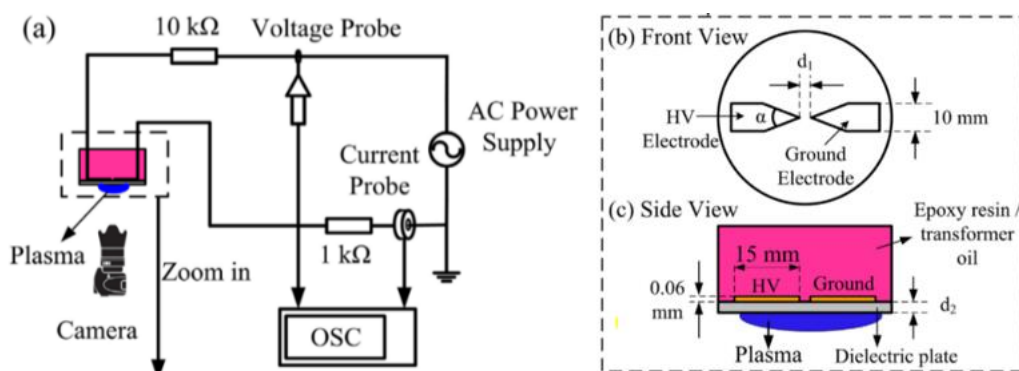


Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Entladecharakteristik einer koplanaren DBD-Anordnung; (a) Schematischer Versuchsaufbau, (b) Frontalansicht der Elektrodenanordnung, (c) Seitenansicht der Elektrodenanordnung [45]

Bei dem System handelt es sich um zwei Elektroden, die in koplanarer DBD-Anordnung aufgebaut wurden (*Abb. 10*). Um die elektrische Feldstärke zu erhöhen, laufen die Elektroden mit dem Öffnungswinkel α spitz zu. Die Elektroden sind dabei 15 mm lang, 10 mm breit und $0,06\text{ mm}$ dick. Eine Quarzplatte mit einem Durchmesser von $0,25 - 1\text{ mm}$ wird als Dielektrikum verwendet. Damit sich die Elektroden nicht in der Interelektrodenlücke entladen, sondern sich das Plasma auf der anderen Seite des dielektrischen Materials bildet, sind sie in Epoxidharz eingebettet. Das System ist über einen $10\text{ k}\Omega$ Widerstand mit einer AC-Spannungsquelle verbunden, die ein 2 kHz Signal mit einer Amplitude von 30 kV ausgibt. Wird diese angeschaltet, bildet sich auf der Quarzoberfläche um die Elektroden herum eine Art Plasmabogen mit einigen Millimetern Dicke aus. Um diesen Bogen herum entstehen diffuse Plasmastrukturen, die von den Autoren als „Wolken“ (engl. *clouds*) bezeichnet wird. Im Versuchsaufbau sind Strom- und Spannungsmessgeräte integriert, über die die Strom-Spannungs-Charakteristik bestimmt wird. Folgende Parameter wurden untersucht und variiert:

1. Öffnungswinkel α : $30^\circ - 180^\circ$

Bei einem Öffnungswinkel von $\alpha = 30^\circ$ ist die Anzahl der Entladungspulse und der Entladestrom nicht konstant, sodass keine stabile Plasmaerzeugung möglich ist. Wird der Öffnungswinkel auf $\alpha = 60^\circ$ erhöht, stellen sich zwei stabile Entladungspulse pro Halbwelle mit einem Entladestrom von 35 mA ein. Dies bleibt bei weiterer Erhöhung des Öffnungswinkels bis $\alpha = 150^\circ$ unverändert. Wird der Öffnungswinkel auf $\alpha = 180^\circ$ erhöht, entsteht eine parallele Elektrodenkonfiguration, die jedoch einen stochastischen Entladestrom erzeugt, der für die meisten Anwendungen nicht zu gebrauchen ist. Interessanter Weise verringert sich die benötigte Zündspannung von $36,3\text{ kV}$ auf $25,8\text{ kV}$, wenn sich α von 30° auf 150° erhöht. Der Durchmesser des erzeugten Plasmabogens verringert sich von $12,5\text{ mm}$ auf 6 mm , bei einer Vergrößerung des Öffnungswinkels von 60° auf 150° .

2. Interelektrodenabstand d_1 : $1 - 2,5\text{ mm}$

Wird der Interelektrodenabstand d_1 von 1 mm auf $2,5\text{ mm}$ erhöht, erhöht sich die Dicke des Plasmabogens. Um diese Abhängigkeit darzustellen, werden in *Abb. 11 (a)* die äußere Spannung V_i , Entladestrom (Peak) I_p , und Durchmesser des Plasmabogens L_p in Abhängigkeit zum Interelektrodenabstand d_1 aufgetragen. Man kann erkennen, dass die benötigte Zündspannung bei größerem Abstand ansteigt. Außerdem steigt der Entladestrom von 45 mA auf 120 mA und der Plasmadurchmesser von $8,5\text{ mm}$ auf 15 mm . Auf Basis dieser Daten, wurde von den Forschern ein optimaler Abstand von $1,5\text{ mm}$ festgelegt.

3. Dicke des dielektrischen Barrierenmaterials d_2 : $0,25 - 1\text{ mm}$

Wird die Dicke des dielektrischen Barrierenmaterials d_2 erhöht, wird eine größere Spannung benötigt, um die Plasmaentladung zu zünden (Abb. 11 (b)). Bei einer Erhöhung von d_2 von $0,25\text{ mm}$ auf 1 mm steigt die notwendige Zündspannung V_i von $29,1\text{ kV}$ auf $39,8\text{ kV}$, der Entladestrom I_p von 18 mA auf 55 mA und der Plasmadurchmesser von 9 mm auf $16,5\text{ mm}$. Jedoch tritt nur bei $d_2 = 0,5\text{ mm}$ ein konstanter Entladestrom auf, sodass dies der einzige Wert ist, der Stabilität garantiert.

4. Art des dielektrischen Barrierenmaterials

Die Forscher untersuchten drei verschiedene dielektrische Materialien: Mica, Quarzglas und Aluminium. Für jedes dieser Materialien wurde der Entladestrom bei konstanter Zündspannung gemessen. Bei Mica trat ein Entladestrom von 15 mA auf, bei Quarzglas ein Entladestrom von 25 mA und bei Aluminium ein Entladestrom von 39 mA . Aluminium scheint somit also die beste Wahl zu sein, da hier mit kleinerer Zündspannung ein höherer Entladestrom erzeugt werden konnte.

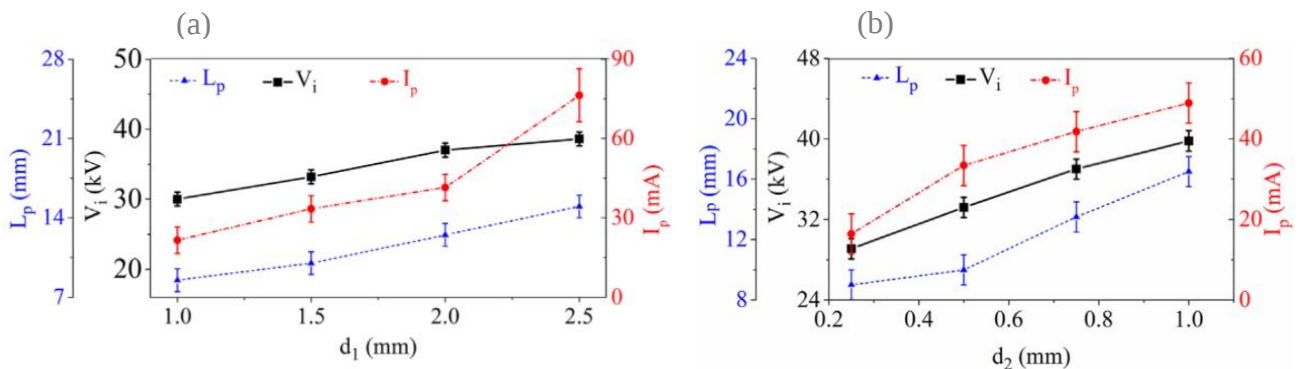


Abbildung 11: (a) Auswirkung des Interelektrodenabstandes d_1 auf die Entladecharakteristik, (b) Auswirkung der Dicke des Barrierenmaterials d_2 auf die Entladecharakteristik [45]

6 Entwicklung eines Plasmajets

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln auf die theoretischen Grundlagen der Plasmaerzeugung eingegangen und in *Abschnitt 4* eine Übersicht über bestehende Systeme gegeben wurde, wird nun ein eigenes Konzept zur Entwicklung eines Elektrodensystems für einen Plasmajet entwickelt. Aus dem Ausmaß der in *Tabelle 2* zusammengestellten Sammlung an bereits bestehenden Applikationen, lässt sich herleiten wie viele verschiedene Möglichkeiten existieren, einen Atmosphärendruckplasmajet zu realisieren. Will man also ein eigenes Design etablieren, sind dem ganzen kaum Grenzen gesetzt; die einzige Einschränkung bildet das geforderte Anwendungsgebiet.

Besonders interessant ist hierbei das Gebiet der Plasmamedizin. Plasma wird schon seit vielen Jahren im Bereich der Medizin zur Herstellung von medizinisch relevanten Beschichtungen, zum effektiven Abtöten von Mikroorganismen und zur Sterilisierung von Medizinprodukten verwendet. Außerdem wird thermisches Plasma in der Chirurgie, beim Koagulieren und Abtragen von Gewebe, direkt am Menschen angewendet [4]. Um eine Plasmaapplikation erfolgreich in der Medizin zu etablieren, gelten die folgenden Voraussetzungen [47]:

1. Der Effekt, der durch die Plasmabehandlung erzielt werden soll, muss dem Effekt, der durch herkömmliche Methoden erzielt werden kann, überlegen oder mindestens gleichwertig sein.
2. Der Effekt sollte in der kürzest möglichen Zeit erzielt werden.
3. Die Plasmaapplikation sollte möglichst flexibel einsetzbar sein.
4. Die Plasmaapplikation sollte günstig in der Herstellung, Wartung und Anwendung sein.

Ist eine dieser vier Voraussetzungen nicht erfüllt, ist ein sinnvoller Einsatz kaum möglich. Daher sollten diese Anforderungen im Entwicklungsprozess stets im Hinterkopf behalten werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein erster Prototyp vorgestellt, der den grundlegenden Aufbau des Elektrodensystems zeigt. Mit den in *Abschnitt 5* aufgeführten Optimierungsstrategien, können die genauen Abmessungen und andere kritische Parameter simuliert und optimiert werden. Außerdem kann der Prototyp im Rahmen einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit aufgebaut, in Experimenten getestet und verbessert werden. Dabei ist die Idee, den Plasmajet mit Hilfe eines 3D-Druckers zu drucken und anschließend die Elektroden einzuführen.

In der Recherche hat sich gezeigt, dass *Geometrie 2* (Abb. 7) der Atmosphärendruckplasmajets die meisten Vorteile bereitstellt und sich in den letzten Jahren in etlichen Applikationen bewährt hat. Für eine praktikable Anwendung in der Plasmamedizin werden niedrige Zündspannungen gefordert. Um dies zu erreichen, wurden folgende Überlegungen angestellt: Eine möglichst niedrige Zündspannung wird erreicht, wenn der Abstand zwischen den Elektroden möglichst gering ist. Ideal wären hier Abmessungen im Millimeter- oder sogar Mikrometerbereich. Es bleibt jedoch zu klären, inwiefern dies mit dem zur Verfügung stehenden 3D-Drucker umsetzbar ist. Um die Zündspannung trotzdem zu verringern, wird versucht die Vorteile der *Elektrodengeometrie 2* und der *Hollow-Cathode-Entladung*, die in Abschnitt 3.4 vorgestellt wurde, zu kombinieren. Durch den *Hollow Electrode Effect* können bei konstanter äußerer Spannung der Entladestrom und die Konzentration an hochenergetischen Elektronen um einige Größenordnungen höher sein als bei planaren Elektroden. Auf diese Weise könnten also mit niedrigeren Spannungen, höhere Entladeströme erzeugt werden.

6.1 Eigener Prototyp

Das hier entwickelte Design basiert auf der Idee von *Kolb et al.*, die in [47] vorgestellt wurde. Das Kernstück ist eine hohle Röhre mit dem Durchmesser d_1 , die die aktive Elektrode des Aufbaus darstellt (Abb. 12 (a)). Durch den Hohlraum dieser Röhre wird das Arbeitsgas geleitet, das ionisiert wird und durch den Gasfluss am Ende der Röhre in die Umgebungsluft projiziert wird. Der Idee von *Geometrie 2* folgend, befindet sich um die aktive Elektrode herum eine ringförmige geerdete Elektrode, deren Öffnung ebenfalls den Durchmesser d_1 besitzt (Abb. 12 (c)). Beide Elektroden sind durch eine dielektrische Barriere voneinander isoliert (Abb. 12 (b)). Dabei überragt das dielektrische Material (und damit auch die geerdete Elektrode) die aktive Elektrode um den Abstand d_2 . Somit stellt d_2 den Interelektrodenabstand dar. Es ergeben sich folgende zu optimierende Parameter:

1. Durchmesser der Öffnung d_1
2. Interelektrodenabstand d_2
3. Elektrodenmaterial
4. Material der dielektrischen Barriere
5. Wahl des Arbeitsgases

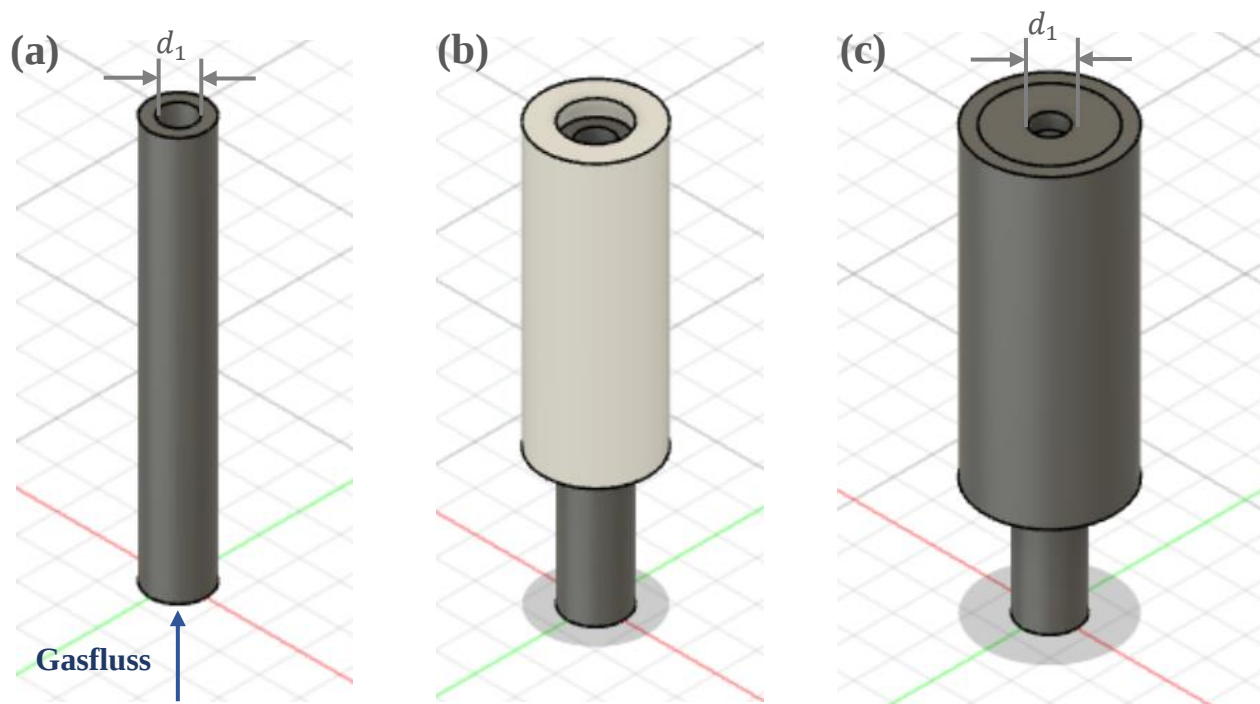


Abbildung 12: Darstellung des Prototyps eines Elektrodensystems für einen Plasmajet; (a) Innere, aktive Elektrode, (b) Innere Elektrode mit dielektrischem Material isoliert, (c) komplettes Elektrodensystem, mit äußerer, geerdeter Elektrode

7 Fazit

Diese Arbeit dient als Vorbereitung auf die Entwicklung eines Plasmajets für medizintechnische Anwendungen. Um die teilweise hoch komplexen Vorgänge bei der technischen Plasmaerzeugung zu verstehen, wurden dem Leser eine Einführung in die chemischen und physikalischen Grundlagen gegeben. Es wurde aufgezeigt, dass die Wahl der richtigen Elektrodenkonfiguration dabei unabdingbar für den Erfolg des entwickelten Plasmajets ist, da sie die Art, die Form und die Temperatur des erzeugten Plasmas signifikant beeinflusst. Um die erfolgreiche Entwicklung eines Plasmajets zu unterstützen, wurden verschiedene, bereits etablierte Plasmajets analysiert und in tabellarischer Form zusammengefasst. So wurden dem Leser ein Überblick über die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten eines Elektrodensystems verschafft und gleichzeitig der aktuelle Stand der Technik aufgezeigt, der eine Orientierungshilfe in der Entwicklungsphase bietet. Im Laufe der Recherche stellte sich heraus, dass sich die Elektrodengeometrien von Plasmajets, auf sieben Basisgeometrien herunterbrechen lassen. Nach der Evaluation der Vor- und Nachteile, wurde ein selbst entwickelter Prototyp vorgestellt, der der grundlegenden Idee von *Elektrodengeometrie 2* (Abb. 6) folgt und eine hohle, aktive Elektrode besitzt. Auf diese Weise können die Vorteile von *Geometrie 2* mit den Vorteilen der *Hollow-Cathode-Entladung* verbunden werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Mit Hilfe der in *Abschnitt 5* vorgestellten Optimierungsstrategien, kann der Prototyp in einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit aufgebaut, in Experimenten getestet und verbessert werden.

Plasma wird seit über 50 Jahren in etlichen technischen Anwendungen künstlich erzeugt und genutzt, doch erst der Fortschritt der Technik machte es möglich, Plasma mit moderaten Temperaturen bei Atmosphärendruck zu erzeugen. Diesem Umstand ist es zu verdanken, dass sich neue Anwendungsgebiete, wie die Plasmamedizin etablieren konnten. Betrachtet man die rasante Entwicklung, die Plasmaapplikationen in den letzten 10 Jahren erfahren haben, kann man gespannt in die Zukunft schauen. Das Potential von Plasmabehandlungen, besonders in der Medizin, ist noch lange nicht ausgeschöpft und ich hoffe, dass diese Arbeit und die darauf basierenden Entwicklungen, ihren Teil zum Fortschritt in diesem Gebiet beitragen können.

Literaturverzeichnis

- [1]: Fußmann, G. (2011), *Einführung in die Plasmaphysik*, Humboldt Universität zu Berlin
- [2]: Fridman, A. & Friedman, G. (2013), *Plasma Medicine*, Drexel University, Philadelphia, USA
- [3]: Laroussi, M., Kong, M., Morfill, G. & Stolu, W. (2012), *Plasma Medicine – Applications of Low-temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology*, Cambridge University Press
- [4]: Bucher, W., Wagner, A., Härtel & C., Maier, D. (2014), Atmosphärendruckplasma in der Medizintechnik – Teil 1 | WOTech Technical Media | WOMag | WOClean (wotech-technical-media.de), abgerufen 20.11.2020
- [5] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, & P. Leprince (2006), Atmospheric pressure plasmas: A review; *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, no. 1, pp. 2–30
- [6] Grosse, P. (2013), *Freie Elektronen in Festkörpern*, Springer-Verlag, ISBN 3-642-95344-1, S. 40
- [7] *Quasi-neutrality* | Plasma-Universe.com (plasma-universe.com), abgerufen 15.11.2020
- [8] Was sind Freie Radikale? | www.gesundheits-lexikon.com, abgerufen 01.12.2020
- [9] M. Kushner & M. Kong (2012), *Fundamentals of non-equilibrium plasmas; in: Plasma medicine: Applications of low-temperature gas plasmas in medicine and biology*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, , pp. 7–27
- [10] Prof. Dr. K.-H. Gericke (2009), *Erzeugung von atmosphärischem Plasma mit neuartiger Elektrodenanordnung*, (Abschlussbericht) Technische Universität Braunschweig
- [11] Bussiahn, R., Brandenburg, R., Gerling, T., ..., Kocher, T. (2010), *The hairline plasma: An intermittent negative dc-corona discharge at atmospheric pressure for plasma medical applications*, American Institut of Physics
- [12] Pei, x., Liu, J., Xian, Y. & Lu, X. (2014), *A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications*, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan
- [13] Winter, J., Brandenburg, R. & Weltmann, K. (2015), *Atmospheric pressure Plasma jets: an overview of devices and new directions*, IOP Publishing Ltd
- [14] Laroussi M. & Akan T (2007), *Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets : a review Plasma Process. Polym.* 4 777-88
- [15] Fridman A. (2008), *Plasma Chemistry*, New York: Cambridge University Press
- [16] Sousa J. S., Bauville G. & Puech V. (2013), *Arrays of microplasmas for the controlled production of tunable high fluxes of reactive oxygen species at atmospheric pressure*, Plasma Sources Sci. Technol. 22 035012
- [17] Lu X., Laroussi M. & Puech V. (2012), *On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bulltes*, Plasma Sources Sci. Technol. 21 034005
- [18] Law V. J. & Anghel S. D. (2012), *Compact atmospheric pressure plasma self resonant drive circuits*, J.Phys. D: Appl. Phys. 45 075202
- [19] Deng, X.L., Nikiforov A. Y., Vanraes P. & Leys C. (2013), *Direct current plasma jet at atmospheric pressure operating in nitrogen and air*, J. Appl. Phys. 113 023305
- [20] Gerling T., Hoder T., ..., Weltmann K. D. (2013), *On the spatio-temporal dynamics of a self-pulsed nanosecond transient spark discharge: a spectroscopic and electrical analysis*, Plasma Sources Sci. Technol. 22 065012
- [21] Li J., Sakai N., Watanabe M., Hotta E. & Wachi M. (2013), *Study on plasma agent effect of a direct-current atmospheric pressure oxygen-plasma jet on Inactivation of E.coli. using bacterial mutants*, IEEE Trans. Plasma Sci. 41 935-41
- [22] Kolb J.F., Mattson A.M., ..., & Heller L.C. (2012), *Cold DC-operated air plasma jet for the inactivation of infectious microorganisms*, IEEE Trans. Plasma Sci. 40 3007-26

-
- [23] Ni G.H., Zhao O., Cheng C. & Meng Y.D. (2012), *Characterization of a steam plasma jet at atmospheric pressure*, Plasma Sources Sci. Technol. 21 015009
- [24] Xian Y.B., Wu S. Q., Wang Z., Huang Q. J., Lu X. P. & Kolb J.F. (2013), *Discharge dynamics and modes of an atmospheric pressure non-equilibrium air plasma jet*, Plasma Process. Polym. 10 372-8
- [25] Merbahi N., Yousfi M. & Eichwald O. (2010), *Device for emitting a plasma jet from the atmospheric air at ambient temperature and pressure and use of said device*, US8778273 B2
- [26] Jakubke H.D., Karcher R. (2003), *Lexikon der Chemie*. 3. Bände, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003
- [27] Sobota A., Guaitella O. & Rousseau A. (2014), *The influence of the geometry and electrical characteristics on the formation of the atmospheric pressure plasma jet*, Plasma Sources Sci. Technol. 23 025016
- [28] von Woedtke T., Reuter S., Masur K. & Weltmann K.D. (2013), *Plasmas for medicine*, Phys. Rep. 530 291-320
- [29] van Gils C. A., Hofmann S., Boekema B. K., & Bruggeman P. J. (2013), *Mechanisms of bacterial inactivation in the liquid phase induced by a remote RF cold atmospheric pressure plasma jet*, J Phys. D: Appl. Phys. 46 175203
- [30] Yonemori S. & Ono R. (2014), *Flux of OH and O radicals onto a surface by an atmospheric-pressure helium plasma jet measured by laser-induced fluorescence*, J. Phys. D. Appl. Phys. 47 125401
- [31] Wild R., Gerling T., Bussiahn R., Weltmann K. D. & Sollenwerk L. (2014), *Phase-resolved measurement of electric charge deposited by an atmospheric pressure plasma jet on a dielectric surface*, J. Phys. D: Appl. Phys. 47 042001
- [32] Zhu W.D. & Lopez J.L. (2012), *A dc non-thermal atmospheric-pressure plasma microjet*, Plasma Sources Sci. Technol. 21 034018
- [33] Plasmaquellen - Fraunhofer IWS, abgerufen 11.12.2020, von https://www.iws.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/chemische_oberflaechentechnik/plasmatechnik_nanomaterialien/ausstattung/plasmaquellen.html#3
- [34] Baeva M., Bösel A., Ehlbeck J. & Loffhagen D. (2012), *Modeling of microwave-induced plasma in argon at atmospheric pressure*, Phys. Rev. E 85 056404
- [35] Bussiahn R., Gesche R., Kuhn S. & Weltmann K. D. (2012), *Integrated microwave atmospheric plasma source (IMAPlaS): thermal and spectroscopy properties and antimicrobial effect on B. atrophaeus spores*, Plasma Sources Sci. Technol. 21 065011
- [36] Stefanovic I., Nikitia B., ... Awakowicz P. (2018), *Optical characterization of a novel miniature microwave inductively coupled plasma source in nitrogen flow*, Plasma Sources Sci. Technol. 27 12LT01
- [37] *Diagnostic-based modeling on a micro-scale atmospheric-pressure plasma jet in: Pure and Applied Chemistry*, Band 82, Heft 6 (2010) (degruyter.com)
- [38] Pessoa R., Sismanoglu B. N., ... Petracconi G. (2007), *Hollow cathode discharges: low and high-pressure operation*, In book: *Gas Discharges - Fundamentals & applications*
- [39] Kumar Das R. & Satifullah A. (2015), *An experimental Study of generating larger volume micro discharges and prediction of its probable engineering application*, International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2015 (ICMERE2015) 26
- [40] G. Schaefer & K. H. Schoenbach (1990), *Basic Mechanisms Contributing to the Hollow Cathode Effect*, Weber Research Institute, University Farmindale, N.Y., USA
- [41] Stockhausen G. & Kock M. (2001), *Proof and analysis of the pendulum motion of beam electrons in a hollow cathode discharge*, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 1683

-
- [42] Kolobov V. I. & Tsendin L. D. (2005), *Analytic model of the hollow cathode effect*, Plasma Sources Sci. Technol. 4 551
- [43] Trelles J., Chazelas C., Vardelle A.M. & Heberlein J. V. R. (2009), *Arc Plasma Torch Modeling*, Journal of Thermal Spray Technology 18(5):728-752
- [44] Jiang N., Ailing J. & Cao Z. (2009), *Athmospheric pressure plasma jet: Effect of electrode configuration, discharge behavior, and its formation mechanism*, Journal of Applied Physics 106, 013308
- [45] Wu S., Huang G., ... Zhang C. (2017), *Influence of the electrode dimension and the dielectric material on the breakdown characteristics of coplanar dielectric barrier discharge in ambient air*, published on <https://doi.org/10.1002/ppap.201700112>.
- [46] Efrem G. & Emelyanov O.A. (2019), *Optimization of Cold Atmospheric Plasma Generator Electrode System*, Conference: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)
- [47] Kolb J., Edelblute C.M., ... Heller L. (2012), *Cold DC operated air plasma jet for the inactivation of infectious microorganisms-Kolb*, IEEE Transactions on Plasma Science 40(11):3007
- [48] Online-Wörterbuch auf de.pons.com
- [49] Hau F.R. (2005), *Kauterisation*, In: Werner E. Gerabek, Bernhard D. Haage, Gundolf Keil, Wolfgang Wegner (Hrsg.): Enzyklopädie Medizingeschichte. De Gruyter, Berlin/ New York , ISBN 3-11-015714-4, S. 730.
- [50] *Difference Between Transferred Arc and Non-Transferred Arc Plasma Torch*, abgerufen 19.12.20, von difference.minaprem.com
- [51] *Endodontologie* | Universitätsklinikum Freiburg, abgerufen 19.11.20, von uniklinik-freiburg.de
- [52] Jean d' Ans, E. Lax, R. Blachnik (1998), *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*. Springer DE, 1998, ISBN 3-642-58842-5, S. 734
- [53] Collins, M.D.; Samelis, J.; Metaxopoulos, J.; Wallbanks, S. (1993). "Taxonomic studies on some leuconostoc-like organisms from fermented sausages: description of a new genus Weissella for the Leuconostoc paramesenteroides group of species". Journal of Applied Microbiology. 75 (6): 595–603
- [54] The Engineering Handbook, Second Edition. In: Electrical Engineering Handbook. 29. Juni 2004, ISSN 1097-9409, S. 1046

Index

AC	Wechselstrom
APPJ	Atmospheric Pressure Plasmajet
DBD	Dielektrische Barrierenentladung
DC	Gleichspannung
E	Elektrische Feldstärke
Ground.....	Englische Bezeichnung für das Erdpotential
HCE	Hollow-Cathode-Entladung
MCSD	Micro-Hollow-Cathode-Entladung
p	Druck
ppm	Parts Per Million ("Ein Millionenstel")
PTFE.....	Polytetrafluorethylen (ugs. Teflon)
RF	Hochfrequenz (radio frequency)
slm.....	Standard-Liter pro Minute
μAPPJ	Micro Atmospheric Pressure Plasmajet

Glossar

Kauterisation	<i>Operatives Verfahren, bei dem Gewebe zerstört wird</i>	[49]
Quasineutralität	<i>Eigenschaft von Plasma; besagt, dass die Dichte von positiven und negativen Ladungen ungefähr gleich groß ist</i>	[7]
Endodontologie	<i>Teilbereich der Zahnheilkunde, der sich schwerpunktmäßig mit Erkrankungen des Zahninneren beschäftigt</i>	[51]
Tetramethydisiloxan	<i>Farbloses, geruchloses, an Luft nicht selbstentzündliches Gas, das sich mit Wasser nur sehr langsam zersetzt</i>	[52]
Weissella Confusa	<i>Gattung von grampositiven Bakterien; treten natürlicherweise in Milchsäure auf</i>	[53]
Magnetron	<i>Vakuumröhre zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen im Mikrowellenbereich</i>	[54]
Epoxidharz	<i>Kunstharze, die Epoxidgruppen tragen; besitzen gute mechanische Eigenschaften sowie eine gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit</i>	[26]

Erklärung des Kandidaten

- ☒ Die Arbeit habe ich selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen- und Hilfsmittel verwendet.

15.01.2021
Datum



Unterschrift der Kandidatin / des Kandidaten