



Silvio Kühn (Autor)  
**Mikrowellenoszillatoren für die Erzeugung von  
atmosphärischen Mikroplasmen**



Leibniz  
Ferdinand-Braun-Institut

**25**

Forschungsberichte aus dem  
Ferdinand-Braun-Institut  
Leibniz-Institut  
für Höchstfrequenztechnik

Innovationen mit Mikrowellen & Licht

Mikrowellenoszillatoren für die Erzeugung  
von atmosphärischen Mikroplasmen



Silvio Kühn

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6349>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# 1 Einleitung

Das Plasma wird in der Literatur oft als vierter Aggregatzustand der Materie bezeichnet und schließt sich dabei der Folge “fest”, “flüssig” und “gasförmig” an. Es wird seit über einhundert Jahren untersucht, wodurch das Wissen über diese Leuchterscheinung stetig wächst. Auf Grund der großen Komplexität der dahinter stehenden Physik nehmen die Forschungsaktivitäten allerdings nicht ab. Obwohl das Plasma ein wichtiger Bestandteil unserer Gesellschaft ist<sup>1</sup> und Forschungsbedarf für viele weitere Jahrzehnte besteht, besitzen weder die breite Öffentlichkeit noch viele Ingenieure einen Zugang zum Plasma. Zukünftig wird sich der Bekanntheitsgrad aber weiter erhöhen, da es trotz der bekannten und genutzten Eigenschaften auch weiterhin ein großes Potential für technische und auch medizinische Anwendungen besitzt.

Die technischen Plasmen ermöglichen zum Teil Fertigungsverfahren, die nur auf diesem Wege möglich sind. Zum Beispiel werden viele chemische Reaktionen nur durch den Einsatz eines Plasmas möglich. So können temperaturempfindliche Materialien wie Kunststoffe oder gehärtete Stähle mit Hartstoffschichten beschichtet werden, ohne diese zu schädigen. Siliziumdioxid auf Kunststoffen um die Kratzfestigkeit u.a. von Brillengläsern zu erhöhen [1], oder Titanitrid auf Schnellarbeitsstahl [2], um die Standzeit von spanabhebenden Werkzeugen zu verlängern, sind nur wenige Beispiele für die sehr wichtige Gruppe der Beschichtungsverfahren.

Weiterhin erfährt das Plasma auch in anderen Anwendungsgebieten einen regelrechten Boom. Zum Beispiel als Beleuchtungsmittel. Dort ist das Potential zur Energieeinsparung, verglichen mit der klassischen Glühbirne, erheblich. Die Energiesparlampe beherbergt ein Niederdruckplasma und spendet mit deutlich höherem Wirkungsgrad Licht. Auf Grund des höheren Wirkungsgrads werden die bisher verwendeten klassischen Glühlampen ab dem Jahr 2009 per Verordnung der Europäischen Union [3] schrittweise verboten. Leider empfindet ein großer Teil der Bevölkerung das Spektrum dieser Lampe als kalt und zum Teil auch als unangenehm [4], was den freiwilligen Wechsel von der Glühlampe zur Energiesparlampe behindert. Ein weiterer Nachteil der gängigen Sparlampe ist die Verwendung geringer Mengen des starken Umweltgiftes Quecksilber [5, 6] in dessen Leuchtkörper. Die wenigen Milligramm Quecksilber pro Sparlampe summieren sich durch deren riesige Anzahl leicht in den Tonnenbereich. Durch ungeeignete Entsorgungsmethoden oder Bruchschäden der Lampen gelangen schließlich riesige Mengen in die Umwelt. In Hinblick auf die spektralen Eigenschaften der Energiesparlampen und auf den Umweltschutz besteht offensichtlich zusätzlicher Entwicklungsbedarf.

---

<sup>1</sup>Ohne die industriellen Plasmaprozesse wäre praktisch jedes elektronische Gerät nicht denkbar, besonders Mikroprozessor- und Display-basierende Komponenten wären betroffen.



Ein weiteres großes Anwendungsfeld von Plasmen, welches auch einen Teil der Motivation für diese Arbeit darstellt, ist das Behandeln von Oberflächen. Unter Behandlung versteht sich das Aktivieren, Reinigen und den Sterilisationsprozess von Oberflächen. Diese Aufgaben werden hervorragend mit Plasmen gelöst. Solche Behandlungen können im Unterdruck oder unter atmosphärischen Bedingungen geschehen. Der Vorteil der Behandlung bei Atmosphärendruck ist, dass die Notwendigkeit einer Unterdruckkammer entfällt. So sind Plasmaquellen die bei atmosphärischem Druck arbeiten können, prinzipiell sehr attraktiv. Sind sie zusätzlich klein, leicht und portabel als kleines Handgerät implementiert und für den Betrieb mit niedriger Leistung ausgelegt, ergeben sich eine Fülle interessanter Anwendungsgebiete. Die vorliegende Arbeit ist u.a. dadurch motiviert und folgt dem aktuellen Trend zu Atmosphärendruckprozessen.

Nicht nur die genannten technischen Anwendungen verlangen nach Geräten, die Plasmen erzeugen können, auch im medizinischen Sektor ergeben sich vielfältige Möglichkeiten. So werden zusätzlich zu den Standardsterilisationsmethoden für medizinisches Besteck auch das Plasma und dessen Reaktionsprodukte untersucht [7].

Das Plasma gerät zunehmend auch mit lebendem Gewebe in Kontakt. Vorrangig wird die fördernde Wirkung auf den Heilungsprozess von Wunden untersucht. Es ist bekannt, dass Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in geringen Mengen als wichtige Botenstoffe bei der Zellteilung und Wundheilung agieren. Die unbeständigen und nützlichen Stickoxide werden durch ein Plasma erzeugt und für diesen Zweck verwendet. In [8] ist eine Untersuchung dargestellt, in der der Einfluss von im Plasma erzeugten Stickoxiden auf die Wundheilung der tierischen Haut untersucht wird. Eine Beschleunigung um ein Drittel der Gesamtdauer konnte beim Wundheilungsprozess beobachtet werden. Die Forschungsaktivitäten beschränken sich nicht nur auf das Tier, sondern umfassen ebenfalls erste Behandlungen am menschlichen Patienten. Eine Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und dem Klinikum Schwabingen macht eine Behandlung von Patienten mit chronischen Wundheilungsproblemen mit einem Argon-Plasma möglich [9]. Dieses Plasma tötet medikamentenresistente Bakterien in problematischen Wunden ab und unterstützt somit den Heilungsprozess. Diese Forschergruppe erhielt daraufhin den URGO Forschungspreis 2010 [10]. Die Anwendung von Plasmen nimmt in der Medizin zu und verspricht mittelfristig eine Verbesserung bei der medizinischen Versorgung.

Das Plasma ist als vierter Aggregatzustand kurzlebig und damit nicht lagerfähig. Es muss bei Bedarf immer vor Ort durch ein entsprechendes Gerät erzeugt werden. Die Plasmaquelle als technisches Gerät gibt es in einer Vielzahl von Ausführungen und richtet sich nach dem angestrebten Plasma. Trotz der Vielfalt lassen sich die Plasmaquellen nach Anregungstyp und -frequenz klassifizieren. Die Bogenentladung bei Gleichstrom wie zum Beispiel bei Schweißanwendungen stellt die niedrigste Frequenz dar. Im kHz-Bereich befinden sich Anwendungen basierend auf Dielectric Barrier Discharge (kurz DBD) Anregung. Generell etablieren sich Plasmaanregungen besonders in ISM-Bändern,

in denen die Emissionsgrenze von ungewollter Abstrahlung angehoben ist. Für großflächige Niederdruckbehandlung findet häufig das 13,56-MHz-Band Anwendung und zielt auf Parallelplatten- oder ICP<sup>2</sup>-Plasmen ab. Es ist allerdings ein Trend zu 40, 60 oder 80 MHz zu verzeichnen. Die aufgezählten Plasmaquellen nutzen in diesem Frequenzbereich durchweg konzentrierte Elemente zur Leistungsanpassung. Die Anregungsfrequenz ist i.a. konstant und steht nicht als Freiheitsgrad zur Verfügung. Das wirkt sich häufig nachteilig aus. Der nächst höhere und häufig genutzte Frequenzbereich liegt bei 2,45 GHz. Bei dieser Frequenz wird oft mit Hohlleitern gearbeitet und im Allgemeinen das Magnetron als Generator verwendet. Die Mikrowellenleistung liegt in solchen Systemen im kW-Bereich. Das Magnetron ist aufgrund seines instabilen Charakters in niedrigeren Leistungsbereichen ungeeignet, sodass es unter 100 Watt keine Verwendung finden kann.

In dieser Arbeit wird der Entwicklungsprozess einer Plasmaquelle dargelegt, die unter atmosphärischen Bedingungen ein Plasma mit geringem Leistungseintrag erzeugen soll. Die Vorteile des hohen Frequenzbereichs werden ausgenutzt, indem Transformationseffekte durch Leitungen Anwendung finden und dadurch die physikalische Größe der Plasmaquelle gering bleibt. Ein Solid-State-Oszillator, der speziell für diese Plasmabelastung entwickelt wird, bildet den Schwerpunkt dieser Arbeit. Durch den Oszillator benötigt die Plasmaquelle, im Gegensatz zu Magnetron-basierenden Systemen, keine großen und kostenintensiven Hochspannungsversorgungen. Standardisierte 24V-Netzteile genügen für die Spannungsversorgung. Die Entwicklung einer Plasmaquelle mit den beschriebenen Eigenschaften ist hauptsächlich motiviert durch den medizinischen Sektor, sowie durch übliche Reinigungs-, Sterilisations- und Aktivierungsprozesse. Die Stickstoffoxid-erzeugende Eigenschaft der Plasmaquelle steht im Vordergrund, sodass ein Gemisch aus Stickstoff und Sauerstoff als Prozessgas in Frage kommen muss. Mit Druckluft als günstigem favorisierten Versorgungsgas gewinnt die angestrebte Plasmaquelle erheblich an Attraktivität.

Der Fokus dieser Arbeit richtet sich auf die mikrowellentechnischen Aspekte dieser Plasmaquelle. Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. Im Kapitel 2 wird auf eine der wichtigsten Komponenten einer Plasmaquelle eingegangen, den Resonator. Er legt nicht nur die Arbeitsfrequenz fest, sondern ermöglicht durch die spannungstransformierenden Eigenschaften erst die Plasmazündung. Weiterhin sind die Elektroden in den Resonator integriert, sodass das Plasma einen mikrowellentechnischen Einfluss darstellt. Das Kapitel 3 umfasst die Charakterisierung des Plasmas, die für den Zweck der Plasmaquellenentwicklung notwendig ist. Die Physik hinter der Plasmaanregung wird kurz angeschnitten, gefolgt von Messungen und Experimenten, die die Eigenschaften dieser Leuchterscheinung ermitteln. Der Schwerpunkt liegt auf der leistungsabhängigen und nichtlinearen Brennimpedanz des Plasmas. Aus diesen Ergebnissen wird ein Plasmamodell entwickelt, welches speziell die nichtlineare Eigenschaft wiedergibt und im Simulationsprozess sicher konvergiert. In Kapitel 4 wird der Plasmaquellen-Oszillator unter der Verwendung des erwähnten Modells entwickelt. Ausgehend von Kleinsignalsimulationen, um die Schwingneigung zu

---

<sup>2</sup>Inductively Coupled Plasma



untersuchen, folgen Zeitbereichs- und Harmonic-Balance-Rechnungen. Es werden zwei neue Wege im Entwicklungsprozess eingeführt (4.1.1 und 4.1.2) und angewendet. Das Kapitel 5 stellt den Prototypen dieser neuartigen Plasmaquelle vor und beschreibt dessen technischen Realisierungsprozess. Ebenfalls wird das erzeugte Plasma beschrieben, sodass ein Vergleich mit bekannten Plasmen erfolgen kann. Im letzten Kapitel (6) wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben. Dabei werden die technischen Aspekte berücksichtigt, die während der Entwicklungsphase ein Weiterentwicklungspotential aufzeigten. Mit dem Vorschlag einer verbesserten Topologie des Resonators, die sich vorteilhaft in einem Oszillator auswirkt, wird die Arbeit abgeschlossen.