

Bildung, Verhalten und Lebensdauer von Plasmabullets in einem kalten Plasmastrahl bei Atmosphärendruck

Formation, behavior and life span of plasma bullets created in a cold atmospheric pressure plasma jets

Viktor Kempe^{1,2}, **Vojislav Jovicic**^{*1,2}, **Antonio Delgado**^{1,2}

¹ Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM), Universität Erlangen-Nürnberg,

² Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), Germany

* Kontakt: vojislav.jovicic@fau.de

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der optischen Untersuchung eines nicht-thermischen Atmosphärendruckplasmajets mit dem Ziel, die Strömungen, Dichteunterschiede und Geschwindigkeiten im inneren eines solchen Plasmajets zu visualisieren und zu charakterisieren. In einem ersten Schritt wurden Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (pco-1200 hs, Fa. PCO) gemacht, welche deutliche Schwankungen in der Plasmadichte und damit der Lichtemission zeigten. Des Weiteren wurde das Verhalten des Plasmajets bei Auftreffen auf ein Hindernis definierter Geometrie untersucht.

Einleitung

Nicht-thermische Atmosphärendruckplasmajets eignen sich aufgrund der hohen Reaktivität des erzeugten Plasmas und der verhältnismäßig niedrigen Temperatur für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen. Neben den in der Industrie weit verbreiteten Anwendungen Ätzen, Reinigen und Beschichten, kann Plasma auch im medizinischen Bereich, der Gassynthese oder in der Vergasung/Pyrolyse von organischem Material eingesetzt werden [1, 2].

Ziel dieser Arbeit war es, einen Beitrag zur Optimierung der Strömungen nicht-thermischer Atmosphärendruckplasmajets (cold atmospheric pressure plasma jet, CAPPJ) zu leisten. Diese Form von Plasma, bei dem das ionisierte Gas nicht in einem begrenzten Bereich sondern in der offenen Umgebung erzeugt wird ist derzeit von großem Interesse. Diese Plasmajets bestehen in der Regel aus Ionisationswellen, sogenannten „Plasma bullets“. Die Ausbreitung dieser Ionisationswellen hängt der Literatur zufolge unter anderem von der angelegten Spannung und Frequenz ab [3].

In den hier vorgestellten Ergebnissen konnte die Diskontinuität eines nicht-thermischen Plasmajets bei Atmosphärendruck nachgewiesen werden und damit ein indirekter Nachweis für die Existenz von Plasma-Bullets geleistet werden.

Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuchsanlage mit den wichtigsten Komponenten ist in Abbildung 1 dargestellt. Zur Erzeugung des Plasmajets wurde ein kommerziell erhältlicher Plasmagenerator (PlasmaBeam, Fa. Diener electronic) benutzt. Dieser wird über zwei separate Gasanschlüsse mit Kühlgas (trockene Druckluft) und mit Gas zur Plasmaerzeugung versorgt. Der Volumenstrom an Plasmagas kann dabei im Bereich 7 – 10 Liter pro Minute liegen und wurde über einen Massendurchflussregler (Fa. Bronkhorst) eingestellt. Das Plasmagerät beinhaltet einen Hochspannungsgenerator der 10 kV Gleichspannung bei einer Frequenz von 20 kHz erzeugt, und über Lichtbogenentladung im vorderen Bereich der Plasmadüse das anströmende Gas ionisiert. Um den Plasmajet optisch zu untersuchen wurden zum einen eine 3CCD Farbbildkamera (Hitachi HV-F31, minimale Belichtungszeit 0,1 ms) und eine Hochgeschwindigkeitskamera (pco. 1200hs) verwendet.

Die Hochgeschwindigkeitskamera ist in der Lage, Bilder mit Belichtungszeiten bis hinunter zu 100 ns aufzunehmen. Aufgrund der geringen Lichtstärke des erzeugten Plasmastrahles war es nötig, die Versuche in abgedunkelter Umgebung durchzuführen. Die Temperatur des Plasmastrahls liegt, in Abhängigkeit vom Abstand der Düse, zwischen 300°C und 400°C [4].

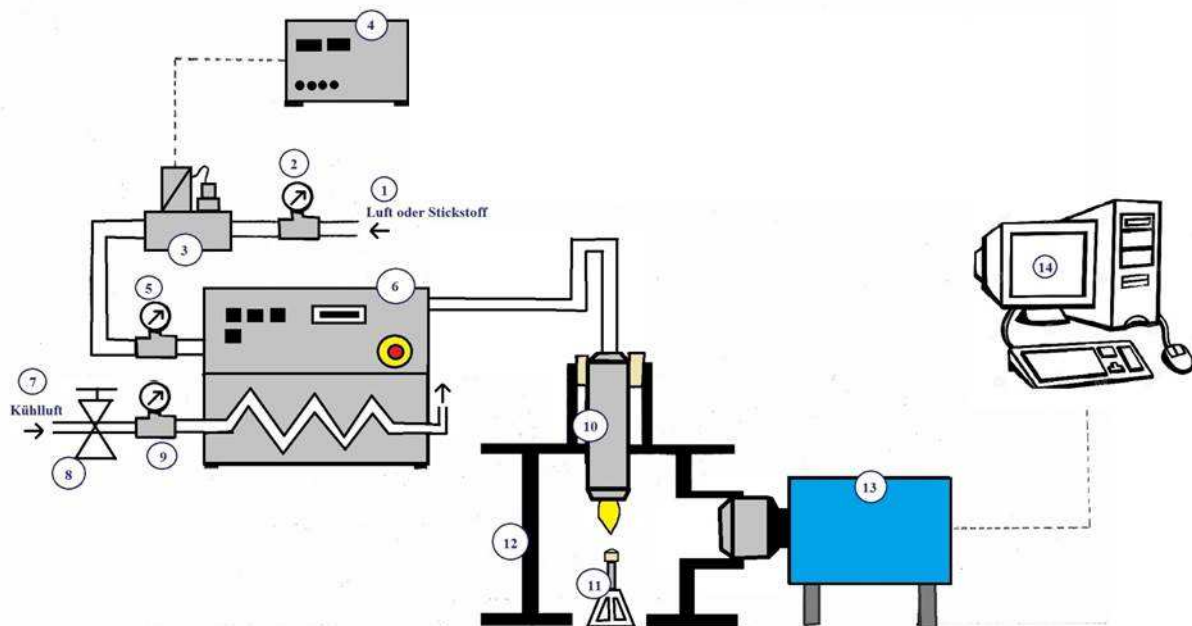


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit allen wichtigen Komponenten:

(1) Zuleitung für Prozessgas, (2) Prozessgas Druckregler, (3) Massendurchflussregler, (4) Kontrollbox für Massendurchflussregler, (5) Prozessgas Druckregler, (6) Hochspannungsgenerator, (7) Zuleitung Kühlluft, (8) Ventil für Kühlluft, (9) Druckregler Kühlluft, (10) Plasmadüse, (11) Probenhalter für Hindernis, (12) abgedunkeltes Gehäuse, (13) Hochgeschwindigkeitskamera, (14) PC zur Datenerfassung

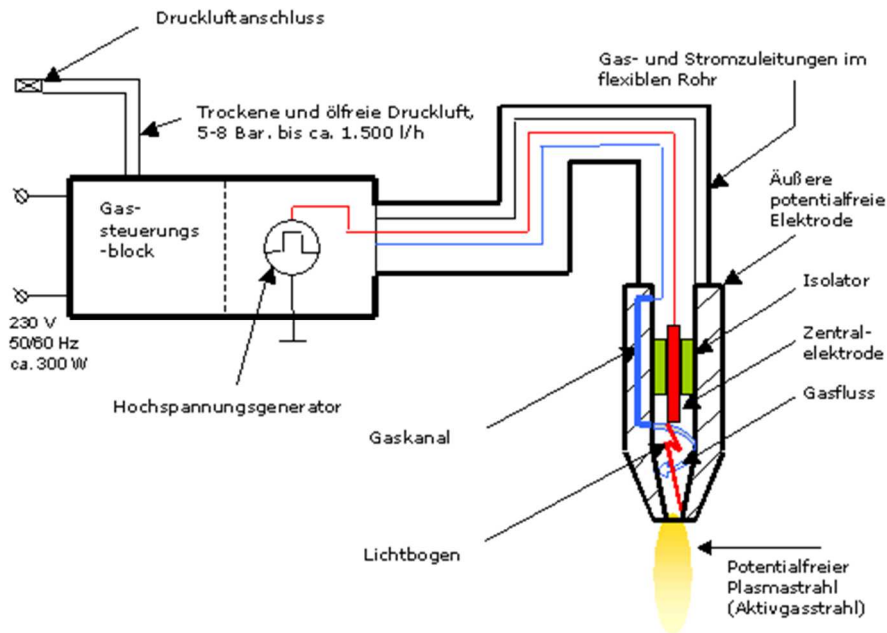


Abbildung 2: Prinzip des benutzten Plasmageräts [5]

Da es sich bei dem verwendeten Plasmagenerator um ein kommerzielles Gerät zur industriellen Oberflächenbehandlung handelt, war es nicht möglich Änderungen der Spannung oder Frequenz vorzunehmen. Lediglich der Massenstrom an Prozessgas konnte variiert werden, es zeigte sich aber, dass bei maximalem Volumenstrom die Lichtstärke am größten war und daher die Ergebnisse am eindeutigsten.

Für die Farbaufnahmen wurde ein Makroobjektiv (Nikon) eingesetzt, für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ein Objektiv fixer Brennweite und großer Lichtstärke ($f/0,75$) der Firma Rodenstock verwendet.

Ergebnisse

Die ersten Aufnahmen, angefertigt mit der 3CCD Kamera zeigten zum einen verschiedene Bereiche innerhalb des Plasmajets. Im Inneren einen gut abgegrenzten helleren Bereich, ein schwächeres Leuchten im äußeren Bereich (Abb. 3). Zum anderen konnten leichte Schwankungen in der Helligkeit des erzeugten Plasmajets festgestellt werden (Abb. 4).



Abbildung 3: Plasmastrahl mit innerem und äußerem Bereich



Abbildung 4: Intensitätsschwankungen im Plasmastrahl

Aufgrund der nötigen langen Belichtungszeiten von einigen Millisekunden war nicht zu erwarten, einzelne abgegrenzte Bullets zu beobachten wie sie in der Literatur beschrieben werden. Die Schwankungen in der Intensität/Helligkeit deuten jedoch darauf hin, dass die Plasmadichte im inneren des Jets Schwankungen unterworfen ist die auf die gepulste, hochfrequente Anregung zurückzuführen sind.

Zur näheren Untersuchung der Intensitätsschwankungen und damit der vermuteten Plasmabullets wurde die Hochgeschwindigkeitskamera pco.1200 hs in den Versuchsstand eingebaut. Damit konnten Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 1 ms realisiert werden. In Abbildung 5 ist eine typische Aufnahmereihe dargestellt.



Abbildung 5: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Plasmasstrahls

Die schon angesprochene Lichtschwäche des erzeugten Plasmastrahls macht eine Signalverstärkung nötig, das Rauschen nimmt dadurch zu. Dennoch kann man den Plasmastrahl und seine sich ändernde Leuchtkraft gut erkennen, manche Aufnahmen erscheinen sogar komplett schwarz.

Neben den Aufnahmen an einem Freistrahls wurde auch untersucht wie sich das Plasma bei Auftreffen auf ein Hindernis verhält. Dazu wurde eine Keramik-Kugel unterhalb des Plasmastrahls positioniert, die Abmessungen dieser Kugel können Abbildung 6 entnommen werden, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Vorgangs zeigt Abbildung 7.

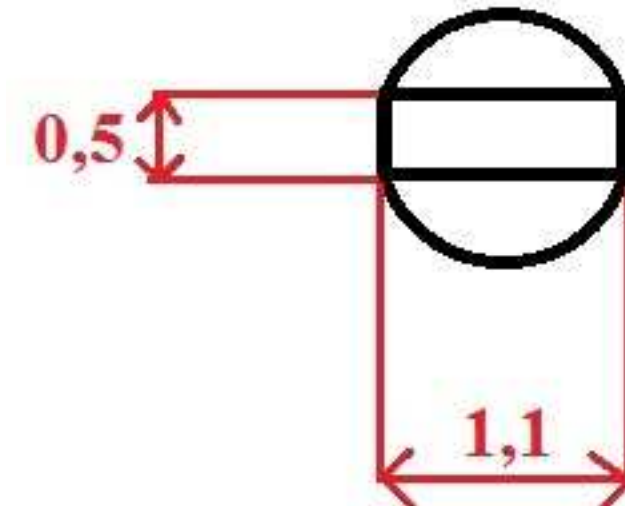


Abbildung 6: Abmessungen des Hindernisses (in cm)

Auf den Bildern in Abbildung 7 ist, neben den schon am Freistrahls beobachteten Schwankungen der Helligkeit zu erkennen, dass sich das Plasma auf dem Hindernis ausbreitet, dabei aber nur eine relativ kleine Fläche bedeckt.

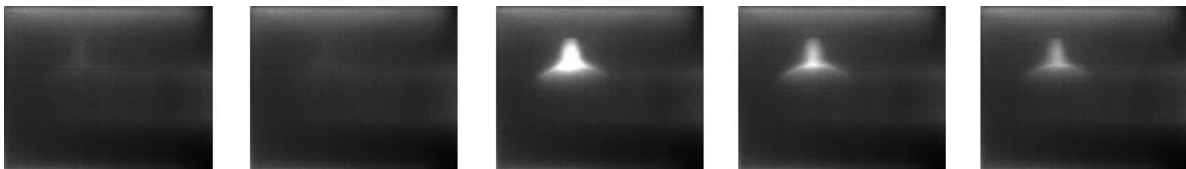


Abbildung 7: Plasmastrahl bei Auftreffen auf ein Hindernis

Dies liegt vermutlich an der erzwungenen Aufweitung des Strahls und der damit einhergehenden Abnahme der Plasmadichte.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei einem Plasmajet nicht um einen kontinuierlichen Strahl geladener Teilchen handelt. Vielmehr wechseln sich hohe und niedrige Plasmadichte im Strahl mit hoher Geschwindigkeit ab. Durch die geringe Lichtstärke des erzeugten Plasmas konnten mit den zur Verfügung stehenden Mitteln keine hochauflösenden Bilder mit ausreichend niedriger Belichtungszeit aufgenommen werden um die in der Literatur beschriebenen sogenannten Plasmabullets sichtbar zu machen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen soll überprüft werden, ob mit einer lichtstärkeren Kameras, speziellen, nichtlinearen Filtern bei der Aufnahme oder in der Nachbearbeitung, oder anderen Techniken eine höhere Auflösung bei geringeren Belichtungszeiten realisiert werden können.

Dankesworte

The authors gratefully acknowledge funding of the Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT) by the German Research Foundation (DFG) in the framework of the German excellence initiative.

Literatur

- [1] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince: "Atmospheric pressure plasmas: A review", *Spectrochimica Acta Part B* 61, 2006
- [2] V. Kempe, V. Jovicic, M. A. Ribeiro, A. Delgado: "Experimentelle Untersuchungen zur Vergasung von Biomasse mit nicht-thermischem Stickstoff Plasma", 21. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 2013
- [3] J. Jarigge, M. Laroussi, E. Karakas: „Formation and dynamics of plasma bullets in a non-thermal plasma jet: influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics“, *Plasma Sources Science and Technology* 19, 2010
- [4] M. Al-Amayreh (2013), "Numerical and Experimental Investigations of the Flow Field of Ionised Gases with Applications to High-Performance Electronics and Oil Shale Gasification", Dissertation, Universität Erlangen
- [5] Diener electronic GmbH & Co. KG: „Operation Manual Atmospheric Plasma System PlasmaBeam“