

Machbarkeitsstudie zu einem neuartigen halbleiterbasierten Mikrowellenplasmatriebwerk (MiPlaT)

**Alexander Spethmann, Thomas Trottenberg
und Holger Kersten**

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, D-24118 Kiel

Kiel
Februar 2023

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50 RS 2001 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens MiPlaT (Mikrowellenplasmatriebwerk) wurde eine Machbarkeitsstudie zu einem halbleiterbasierten Mikrowellenplasmatriebwerk für die Raumfahrt durchgeführt. Es wurde eine plasmaerzeugende Komponente für den Einsatz im Vakuum entwickelt. Diese erzeugt das Plasma mittels Mikrowellen und greift auf GHz-Halbleitertechnologie zurück.

Zunächst wurden zwei unterschiedliche Plasmaquellen für den terrestrischen Einsatz, die Mikrowellen verwenden, untersucht. Die eine Plasmaquelle arbeitet nach dem Prinzip der Elektronenzyklotronresonanz (EZR) bei Niederdruck und die andere, ein Plasmajet, erzeugt unter Atmosphärendruckbedingungen ein Plasma.

In dem Vorhaben konnte der Plasmajet erst durch wesentliche Modifizierungen auch bei Niederdruck und sehr geringen Gasflüssen betrieben werden. Dazu war es erforderlich, unter Zuhilfenahme eines Magnetfeldes, auch hier das EZR-Prinzip zu nutzen. Letztendlich gelang die Realisierung einer EZR-Mikrowellenplasmaquelle in einer weltraumähnlichen Vakuumumgebung, die das Plasma in einer koaxialen Elektrodenanordnung und einem Stapel aus Ringmagneten erzeugt. Die Erzeugung der Mikrowellen erfolgt dabei mit Hilfe eines mit Halbleitertechnik aufgebauten Generators.

Um den experimentellen Aufbau in der Vakuumkammer leicht verändern zu können, wurde ein modularer Ansatz gewählt. Die Komponenten dieses Modulare Experimentellen Testaufbaus sollen in dem Folgeprojekt MiPlaT 2 optimiert werden und letztendlich zu einem TRL-4-Demonstrationsmodell eines halbleiterbasierten Mikrowellenplasmatriebwerks führen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Vorteile eines halbleiterbasierten Mikrowellenplasmatriebwerks	3
3	Erste Versuche mit zwei halbleiterbasierten Mikrowellenplasmaquellen im Vakuum	7
3.1	EZR-Plasmaquelle	8
3.2	Plasmajet	8
4	Komponente zur Erzeugung eines Mikrowellenplasmas für ein Triebwerk	13
4.1	Beschreibung	13
4.2	Modularer Experimenteller Testaufbau	15
5	Versuche zur Ionenextraktion und Ionenbeschleunigung	17
6	Skizzierung eines zukünftigen Mikrowellenplasmatriebwerks	25
	Anhang	27

Kapitel 1

Einleitung

Heutzutage ist in der Telekommunikation der Einsatz von kleinen Sendern und Empfängern im Mikrowellenfrequenzbereich massentauglich. Mit Mikrowellenquellen ist eine robuste Erzeugung von Plasmen möglich. Solche mikrowellenerzeugten Plasmen werden vielfältig in der Plasmaprozesstechnik eingesetzt. Typische Anwendungsbereiche sind beispielsweise Ätzen [1] und Beschichten [2] von Festkörperoberflächen, Abgasreinigung [3] oder auch der Einsatz im medizinischen Bereich [4]. In den letzten Jahren sind verstärkt miniaturisierte Mikrowellenplasmaquellen unter Atmosphärendruck auf den Markt gekommen, die eine relativ einfache Handhabung gestatten.

Insbesondere hat die Mikrowellentechnik in den letzten Jahrzehnten eine rasant Entwicklung erfahren. Während früher zur Mikrowellenerzeugung ausschließlich Laufzeitröhren wie Klystrons, Magnetrons und Wanderfeldröhren verwendet wurden (wenn von Gunn-Dioden für Anwendungen im Milliwattbereich abgesehen wird), zeichnet sich ab, dass diese in Zukunft auch im höheren Leistungsbereich durch Halbleitertechnik ersetzt werden.

So werden Plasmajets für Atmosphärendruckbedingungen unlängst auch mit halbleiterbasierter GHz-Elektronik, welche die Mikrowellen erzeugt, vertrieben [5]. Auch sind kleine EZR-Plasmaquellen mit GHz-Elektronik erhältlich [6]. Plasmaquellen, die mit Mikrowellenfrequenzen Plasmen erzeugen, werden derzeit im terrestrischen Bereich kommerziell vorwiegend für Zwecke der Materialbearbeitung eingesetzt.

Allgemein sind Mikrowellenplasmen auf Halbleiterbasis leicht und effizient zu erzeugen, wobei wenig Energie benötigt wird. Zudem lassen sich Mikrowellenplasmen besonders gut starten und regeln. Insbesondere wird bei einer coaxialen Mikrowellenentladung die eingespeiste Leistung auf ein kleines Volumen konzentriert. Deshalb können sehr hohe Ionisierungsgrade und Leistungsdichten erzielt werden. Bei Anwendung in einem elektrischen Triebwerk würde das zu einer hohen Masseneffizienz führen.

Kapitel 2

Stand der Technik und Vorteile eines halbleiterbasierten Mikrowellenplasmatriebwerks

Aus dem Stand der Technik ist die japanische Hayabusa-Mission [7, 8] bekannt, in der Wanderfeldröhren zur Erzeugung von Mikrowellen für Gitterionentriebwerke (GIT) verwendet wurden. Die Mikrowellen wurden hier sowohl für das Hauptplasma als auch für das kleinere Plasma des Neutralisators verwendet. Der Vorteil der doppelten Verwendung soll auch in diesem Vorhaben genutzt werden, was vorteilhaft gegenüber bestehenden GIT-Konzepten (mit Hochfrequenz- oder Gleichstromplasmaerzeugung) wäre, die eigene Stromversorgungen für die Neutralisatoren benötigen. Die in diesem Projekt angewandte Halbleitertechnologie weist einige Vorteile gegenüber den Wanderfeldröhren auf, darunter eine geringere Masse, eine robuste und kompakte Bauweise und eine unkomplizierte Impedanzanpassung mit Hilfe der veränderbaren Frequenz. Stapel von ringförmigen Permanentmagneten zur Erzeugung von statischen Magnetfeldern sind von anderen Triebwerkskonzepten gut bekannt. Im Folgenden soll darauf kurz eingegangen werden, um die Unterschiede zu bekannten Konfigurationen herauszustellen.

HEMP-Triebwerke nutzen mehrere Ringmagnete, um ein sogenanntes Cusp-Feld zu erzeugen [9, 10]. Dadurch wird der magnetische Spiegeleffekt genutzt, der die Elektronen im Inneren des Entladungsgefäßes einschließt und von dessen Wand fernhält. Zudem wird die Bewegung der Elektronen durch das Magnetfeld stark eingeschränkt; die Elektronen werden effizient davon abgehalten auf direktem Weg von der äußeren Kathode zur Anode am Ende des Entladungsrohrs zu gelangen, sodass eine hohe Ionisierungsrate durch Stöße der Elektronen mit Gasatomen erzielt wird. Die Ringmagnete sind in axialer Richtung magnetisiert. Zur Erzeugung des Cusp-Magnetfeldes wird ein Stapel aus typischerweise drei Ringmagneten gebildet, die durch Distanzringe voneinander getrennt sind, wobei aufeinanderfolgende Magnete immer in entgegengesetzter Richtung magnetisiert sind. Diese Magnetfeld-

konfiguration unterscheidet sich also von der im MiPlaT-Vorhaben verwendeten in der Ausrichtung der einzelnen Ringmagnete und den verwendeten Distanzringen, die beim MiPlaT-Konzept nicht erforderlich sind.

Das Gittertriebwerk der spektakulären Hayabusa-Mission (2003 bis 2010) zum Asteroiden Itokawa, mit der eine Probe von dort zur Erde zurückgebracht wurde, verwendete Ringmagnete zur Erzeugung eines EZR-Mikrowellenplasmas [11]. In diesem Fall befanden sich drei große Magnetringe an den Innenwänden des Entladungsgefäßes. Die Magnetisierung dieser Ringe war radial und bei benachbarten Ringen entgegengesetzt, sodass das Magnetfeld weit bis ins Innere der Kammer reichte und die Resonanzbedingung im Kammervolumen ermöglichte. Vor den nach innen zeigenden Magnetflächen bildet sich ähnlich wie beim HEMPT-Magnetfeld eine Verdichtung der Feldlinien, eine Cusp. Diese Konfiguration unterscheidet sich von der des MiPlaT-Konzeptes durch die Magnetisierungsrichtung der Magnete und ihre Anordnung. So ergibt sich beim Hayabusa-Triebwerk in den Ringebenen eine starke radiale Komponente des Magnetfeldes und dazwischen ein stark axiales Feld, insgesamt also ein sehr inhomogenes Magnetfeld. Dagegen weist das MiPlaT-Magnetfeld im Plasmaerzeugungsvolumen ein eher homogenes, vorwiegend axiales Feld auf, das erst am Ende des Erzeugungsvolumens stark radial wird.

Derzeit sind uns keine Mikrowellenplasmatriebwerke bekannt, die mit Halbleitergeneratoren betrieben werden. Im Fall der oben erwähnten vier Triebwerke der Hayabusa-Mission wurden Wanderfeldröhren mit einer Leistung von 110 W je Triebwerk und einer Frequenz von 4,2 GHz genutzt [7]. In dem MiPlaT-Projekt wurden industrielle Halbleitermikrowellengeneratoren verwendet, die sich in ihrer Frequenz im Bereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz abstimmen lassen. Obwohl erst im Nachfolgeprojekt ein vakuumtauglicher Generator als Demonstrationsmodell entwickelt werden soll, konnte so bereits die Möglichkeit der Frequenzvariation zur Impedanzanpassung genutzt werden, die ein wesentlicher Vorzug dieser Technik ist. Die Vakuumtauglichkeit ist wegen der Verlustleistung, die in Wärme umgewandelt wird, keine triviale Aufgabe. Das Zündverhalten von EZR-Plasmen ist im Allgemeinen sehr gut. Ebenso lässt sich die Entladung über einen weiten Bereich durch die Mikrowellenleistung und den Gasdruck bzw. Gasfluss variieren, was einem Triebwerk Flexibilität hinsichtlich Schub und spezifischem Impuls verleiht. Weiterhin soll das MiPlaT ohne ein traditionelles System aus zwei oder drei Gittern auskommen. Die neuartige, oben beschriebene Magnetfeldgeometrie ist nämlich geeignet, die Funktion des Schirmgitters zu ersetzen, also Elektronen zurückzuhalten. Das Beschleunigungsgitter wird in dem MiPlaT-Konzept durch eine Elektrode mit sehr viel höherer Transparenz ersetzt. Eine erfolgreiche Realisierung wäre nicht nur mechanisch einfacher und leichter, sondern auch weniger von Erosion durch die energiereichen Ionen betroffen. Schließlich unterscheidet sich ein MiPlaT von einem GIT dadurch, dass das Plasmaerzeugungsvolumen erheblich kleiner ist. Dadurch können Permanentmagneten im gesamten Erzeugungsvolumen die für Elektronenzyklotronresonanz erforderliche magnetische Flussdichte erzeugen. In den größeren Entladungskammern von GITs

ist dieses nur in einem kleinen Teil des Gesamtvolumens möglich, da das Magnetfeld stark inhomogen ist. Dieser Vorzug verspricht eine effizientere Nutzung der Mikrowellenleistung zur Plasmaerzeugung und einen höheren Ionisierungsgrad zur besseren Nutzung des Gases.

Kapitel 3

Erste Versuche mit zwei halbleiterbasierten Mikrowellenplasmaquellen im Vakuum

Mit dem Vorhaben MiPlaT wurden zwei industrielle Plasmaquellen, die mittels Mikrowellen ein Plasma erzeugen, auf ihre Eignung als Komponente für das halbleiterbasierte Mikrowellenplasmatriebwerk untersucht.

Zuerst wurde eine EZR-Plasmaquelle als möglicher alternativer Ansatz zum Plasmajet verfolgt. Hierbei handelt es sich um das Produkt Aura-Wave der Firma Sairem, das von außen mittels eines Kleinflansches (DN 40 ISO-KF) an einer Vakuumkammer angebracht werden kann. Der Antennenkopf besteht aus der koaxial angeordneten, eine viertel Wellenlänge langen Antenne und eingekapselten, umliegenden Permanentmagneten. Die Plasmaquelle ist für Kammerdrücke von 0,1 Pa bis 10 Pa ausgelegt. In einer weltraumähnlichen Umgebung kann die erforderliche Gasdichte also nur lokal in dem Volumen, wo die EZR-Bedingung erfüllt ist, durch den Gaseinlass erzeugt werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in diesem Vorhaben bei einem Plasmajet. Der Plasmajet ist für den Einsatz unter Atmosphärendruckbedingungen vorgesehen. Für den in diesem Vorhaben beabsichtigte Einsatz im Vakuum waren wesentliche Modifizierungen erforderlich, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

Beide Plasmaquellen wurden jeweils mit einem industriellen Mikrowellengenerator mit Halbleiterelektronik betrieben.

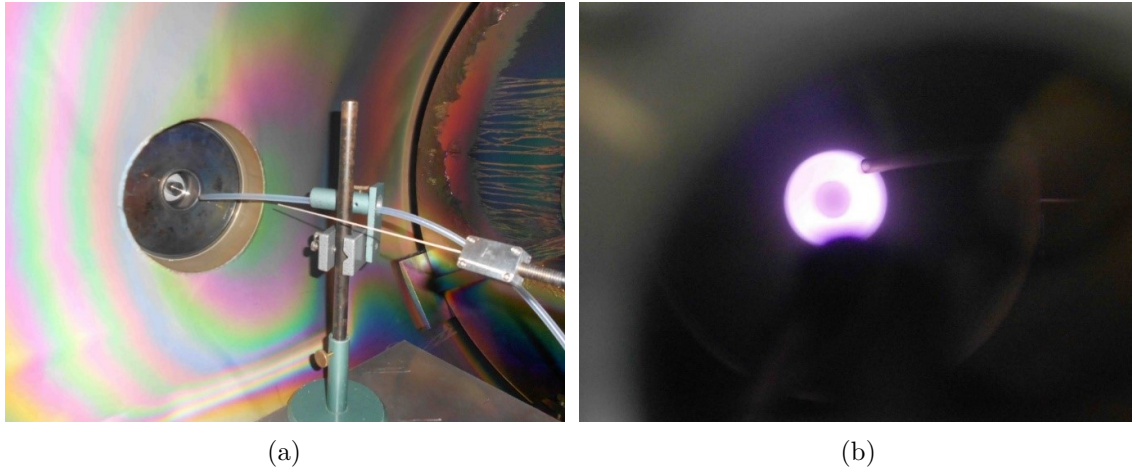


Abbildung 3.1: (a) EZR-Plasmaquelle im Rohrstück, Gaszuführung, Langmuir-Sonde. (b) Plasma im Rohrstück.

3.1 EZR-Plasmaquelle

Die EZR-Plasmaquelle [6] wurde an einem Rohrstück an der Wand der Vakuumkammer angeflanscht, sodass sich die Antenne vollständig in dem Rohrstück befand. Die Gaszuführung erfolgte mit Hilfe eines Schlauchs durch das Innere des Vakuumgefäßes, der kurz vor der Antennenspitze endete (s. Abb. 3.1(a)).

Die Absicht hinter diesem Vorgehen bestand darin, mit einem möglichst geringen Gasfluss eine hinreichend hohe Gasdichte in Antennennähe zu erzielen. Auf diese Weise war es möglich, mit einem Gasfluss von 5 sccm und einer Leistung von 15 W dauerhaft ein Plasma zu erzeugen (s. Abb. 3.1(b)).

3.2 Plasmajet

Für den Aufbau des Plasmajets [5] in der Vakuumkammer HIBEX wurde zuerst eine Plattform mit Halterung für die Untersuchungen konstruiert. Die Halterung wurde später auch für das Laborfunktionsmodell genutzt. Der Plasmajet konnte mit dieser Halterung komplett im Vakuum, d.h. in der Vakuumkammer HIBEX, positioniert werden.

Mit diesem ersten Aufbau gestaltete sich das Zünden (mit 70 W) des Plasmajets und das Aufrechterhalten (mind. 10 W) des Plasmazustandes jedoch schwierig und nicht reproduzierbar. Der Druck in der Vakuumkammer musste durch Drosseln der Pumpleistung auf 1 Pa angehoben werden. Erst mit Hilfe einer Glühkathode als Elektronenquelle konnte der Plasmajet mit 100 W bei 0,4 Pa gestartet und betrieben

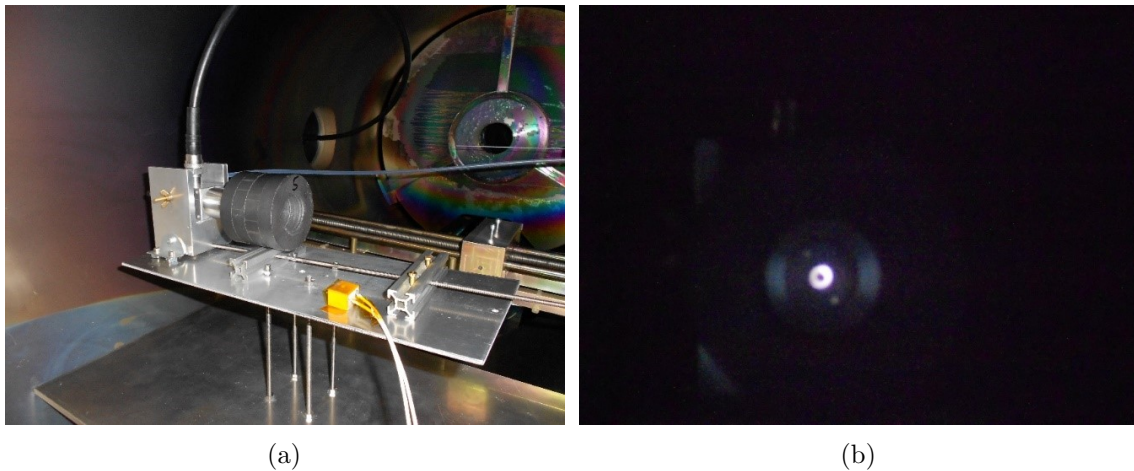


Abbildung 3.2: (a) Aufbau mit ringförmigen Permanentmagneten und Glühkathode. (b) Plasma im Plasmajet. Sicht entlang der Achse auf das Plättchen mit der Auslassöffnung.

werden.

Wegen des noch viel zu hohen Drucks und der großen Leistung wurden verschiedene experimentelle Aufbauten erstellt und getestet. Es wurden, um das Zünden des Plasmas und das Aufrechterhalten der Entladung zu ermöglichen, die Gasdichte verändert und zusätzlich Elektronen mit verschiedenen Anordnungen von Magnetfeldern eingefangen. Diese Anordnungen wurden mit verschiedenen Permanentmagneten und Spulenaufbauten realisiert.

Eine Plasmaexpansionskammer, in die der Plasmajet mündet, wurde aus Glas konstruiert. Mit dieser wurde zunächst versucht, das Ar-Gas aufzustauen, um das Zünden und den Betrieb des Plasmajets zu ermöglichen. Auch wurde eine Glühkathode in die Expansionskammer gesetzt, um damit genügend Elektronen zur Erzeugung des Plasmas bereitstellen zu können.

Des Weiteren wurden verschiedene Aufbauten mit Permanentmagneten und Spulen angefertigt und erprobt. Deren Magnetfelder dienen dem Einschluss der Elektronen zur Erzeugung des Mikrowellenplasmas und möglicherweise auch, um das Plasma in der Expansionskammer so zu formen, dass es zu möglichst wenig Rekombination der Ionen an den Innenflächen des Plasmajets kommt.

Weitere Aufbauten mit sich gegenüberliegenden und dabei den Plasmajet einschließenden Permanentmagneten konnten bei den Parametern Leistung, Gasfluss und Kammerdruck von 100 W, 20 sccm und 0,1 Pa tendenziell zeigen, dass mit Hilfe von Magnetfeldern ein Plasma erzeugt werden kann.

Es wurden auch ringförmige Permanentmagnete verwendet (s. Abb. 3.2(a)), die den Plasmajet umhüllen und ein Feld parallel zu diesem und einen magnetischen

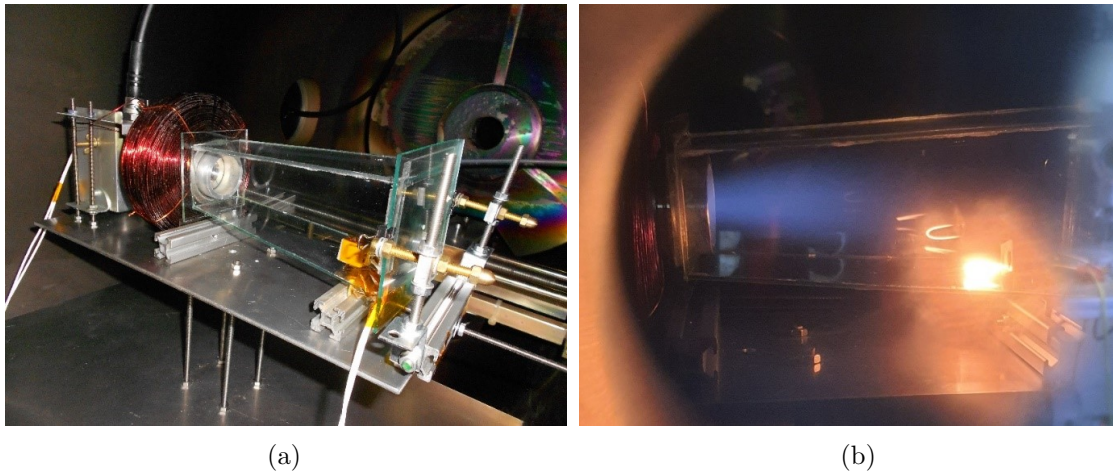


Abbildung 3.3: (a) Plasmajet mit Spule, Expansionskammer und Glasplatte. (b) Expandierendes Plasma aus dem Plasmajet in der Expansionskammer (violett), Glühkathodendraht (gelb-rötlich).

Spiegel zum Einfangen von Elektronen erzeugen. Hiermit konnte bei den Parametern Leistung und Gasfluss von 5 bis 50 Watt und 5 bis 40 sccm ein Plasma im Inneren des Plasmajets erzeugt werden (s. Abb. 3.2(b)).

Auch wurden verschiedene Aufbauten mit jeweils einer von mehreren Spulen, die sich in den Anzahlen der Windungen unterschieden, angefertigt und um das Ende des Plasmajets angebracht. Es konnte bei verschiedenen Leistungen (bis 100 W), Gassflüssen (bis 20 sccm), Glühkathodenheizströmen (0,7 bis 0,9 A) und Kammerdrücken (bis 0,1 Pa) ein Plasma erzeugt werden.

Der Plasmajet verwendet ein Plättchen mit Bohrung an seinem offenen Ende, an dem das Plasma austreten soll. Das Foto in Abb. 3.2(b) lässt dieses Plättchen erkennen: Der helle Fleck ist das Plasma im Inneren des Plasmajets, der durch die Bohrung in dem Plättchen berandet wird. (Die beiden kleinen Bohrungen seitlich der Öffnung, durch die ebenfalls das leuchtende Plasma zu erkennen ist, dienen lediglich dazu, mit einem Spezialwerkzeug das Plättchen greifen und herausschrauben zu können.) Das Plättchen ist für den Betrieb bei Atmosphärendruck, für den der Plasmajet konstruiert wurde, erforderlich. Dieses verringert den Abstand zwischen den beiden Mikrowellenelektroden, nämlich dem geerdeten Außenleiter und dem Innenleiter, der als dunkler Punkt in dem hellen Fleck erkennbar ist. Nur so werden die erforderlichen elektrischen Feldstärken erreicht, um eine Entladung zu zünden (Paschen-Gesetz).

Für den Betrieb im Hochvakuum ist das Plättchen jedoch nicht erforderlich und außerdem hinderlich, weil das erzeugte Plasma durch dieses am Austreten aus dem Plasmajet gehindert wird. Aus diesem Grund wurde bei den folgenden Experimenten auf das Plättchen verzichtet. Diese stellt die zweite Modifizierung des Plasmajets dar

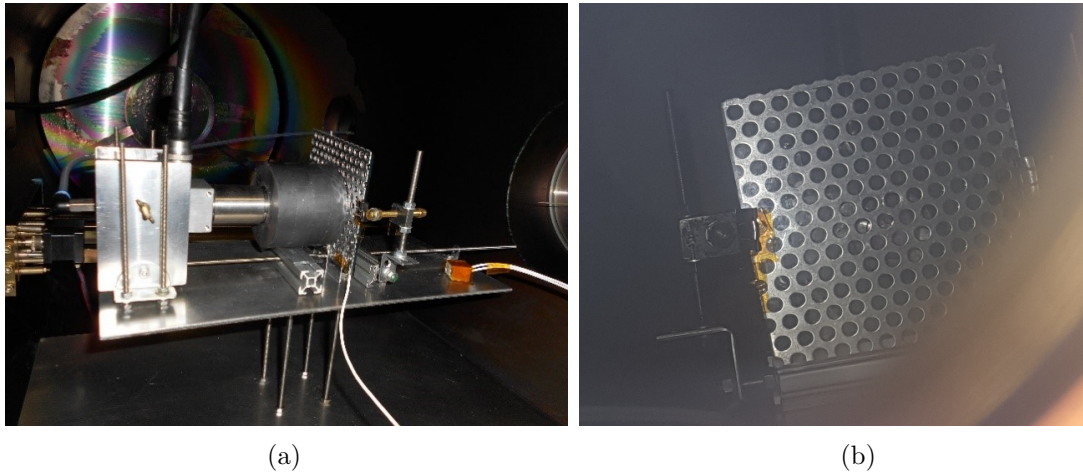


Abbildung 3.4: (a) Plasmajet mit ringförmigen Permanentmagneten, Gitter mit Glasplatte und Glühkathode. (b) Sicht durch das Beobachtungsfenster der Vakuumanlage HIBEX auf die Glasscheibe und das Gitter dahinter.

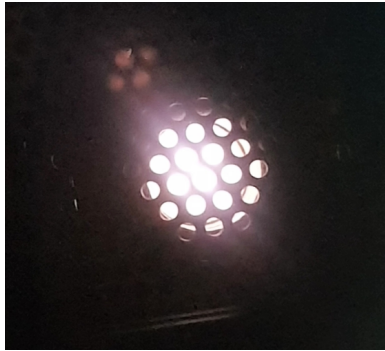
(die erste Modifizierung war die Verwendung eines Magnetfeldes durch Permanent- oder Elektromagnete).

Abbildung 3.3(a) zeigt den so modifizierten Plasmajet mit einer Magnetfeldspule und der bereits erwähnten Expansionskammer. Eine Glasplatte wurde an das offene Ende der Expansionskammer gestellt, um die Gasdichte in ihrem Inneren zu erhöhen. So war es möglich, ein Plasma zu zünden und in die Expansionskammer ausströmen zu lassen (s. Abb. 3.3(b)). Es konnte bei einer Leistung von 100 W, einem Gassfluss von 20 sccm, Glühkathodenheizströmen von 1,4 bis 3 A und einem Kammerdruck von 0,1 Pa ein Plasma erzeugt werden.

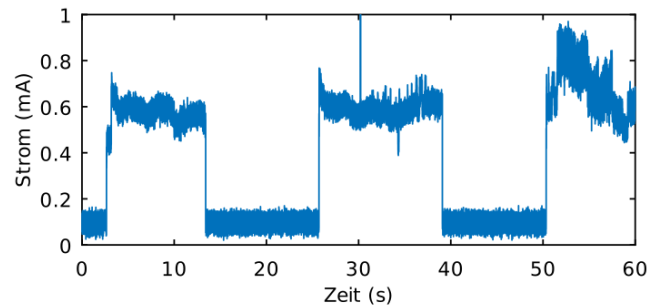
Bei einer weiteren Modifikation wurde die Magnetfeldspule durch einen Stapel aus vier Permanentmagneten ersetzt (siehe Abb. 3.4(a)). Die Expansionskammer wurde in diesem Fall nicht verwendet. Stattdessen wurde eine Aluminiumlochplatte direkt an die Permanentmagneten gestellt und direkt dahinter wiederum die Glasplatte (s. Draufsicht in Abb. 3.4(b)). So konnte bei einer Leistung von 100 bis 5 W, einem Gasfluss von 30 bis 10 sccm und einem Kammerdruck von 0,1 bis 0,04 Pa ein Plasma beliebig ein- und ausgeschaltet werden.

Das Foto in Abb. 3.5(a) zeigt eine Sicht in Längsrichtung auf das offene Ende des modifizierten Plasmajets. Im Gegensatz zu Abb. 3.2(b) ist deutlich zu erkennen, dass das Plättchen mit der Auslassöffnung hier fehlt und das gesamte Plasma im Inneren des Jets sichtbar ist.

Die Experimente haben gezeigt, dass sowohl mit der EZR-Plasmaquelle als auch mit dem Plasmajet die Erzeugung eines Plasmas im Vakuum bei moderaten Gassflüssen möglich ist. Beim Plasmajet hat sich bisher der Aufbau mit ringförmigen



(a)



(b)

Abbildung 3.5: (a) Sicht durch Glasscheibe und das Gitter auf das Plasma. (b) Die Zeitreihe zeigt den Ionenstrom, der über das Gitter bei 20 W und 20 sccm abfließt. Der Mikrowellengenerator wurde hier mehrmals ein- und ausgeschaltet.

Permanentmagneten hinsichtlich Fluss, Leistung und Reproduzierbarkeit als am aussichtsreichsten herausgestellt.

Abbildung 3.5(b) zeigt eine Zeitreihe des Ionenstroms, der über das mit -120 V negativ vorgespannte Gitter abgeflossen ist, hier bei einer Mikrowellenleistung von 20 W und einem Fluss von 20 sccm. Die Zeitreihe demonstriert, dass das Mikrowellenplasma zuverlässig binär zu schalten ist.

Kapitel 4

Komponente zur Erzeugung eines Mikrowellenplasmas für ein Triebwerk

In diesem Kapitel wird zunächst die Funktionsweise der im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten Komponente zur Plasmaerzeugung mit Mikrowellen beschrieben. Danach wird der zur Untersuchung dieser Plasmaerzeugungskomponente verwendete experimentelle Aufbau vorgestellt.

4.1 Beschreibung

Bei der entwickelten Komponente handelt es sich um eine Kombination aus einer koaxialen Elektrodenanordnung und einem Permanentmagnetstapel. Bezüglich der koaxialen Elektrodenanordnung für dieses Vorhaben wurde zunächst auf einen industriell erhältlichen Plasmajet zurückgegriffen. Der Ringmagnetstapel umgibt die

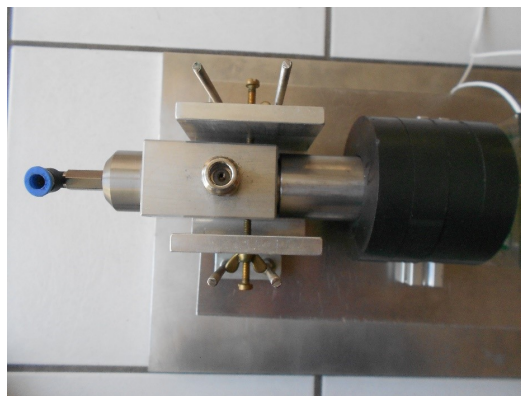


Abbildung 4.1: Komponente zur Erzeugung eines Mikrowellenplasmas.

Elektrodenanordnung coaxial, wobei die Elektroden im Inneren des Stapels enden. Zur Erzeugung des Plasmas wird das Mikrowellenfeld zwischen den Elektroden im Inneren des Ringmagnetstapels genutzt. Dort verläuft das statische Magnetfeld annähernd parallel zur Achse der Elektroden und damit nahezu senkrecht zum elektrischen Feld der Mikrowellen. Die Elektronenzyklotronfrequenz, mit der freie Elektronen Spiralbewegungen um die Feldlinien vollziehen, ist eine Funktion des magnetischen Flusses B und beträgt

$$\omega_{ce} = \frac{e}{m_e} B \quad , \quad (4.1)$$

wobei e die Elementarladung und m_e die Masse eines Elektrons bedeuten. Wenn die Elektronenzyklotronfrequenz gleich der Frequenz der Mikrowellen ist, dann kommt es zur Elektronenzyklotronresonanz (EZR) und einer besonders effektiven Übertragung von Energie aus dem Mikrowellenfeld in die Gyrationbewegung der Elektronen. Die verwendeten Mikrowellengeneratoren erlauben eine Anpassung der Frequenz im Bereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz, sodass die Resonanzbedingung für Feldstärken von 85,7 mT bis 89,3 mT erreicht werden kann. Zwar kann ein Mikrowellenplasma auch ohne EZR erzeugt werden, wie es zum Beispiel bei dem Atmosphärendruckplasmajet der Fall ist, der am Anfang der hier beschriebenen Entwicklung stand [12]. Jedoch ist der EZR-Mechanismus für das Entwicklungsziel eines Weltraumantriebs entscheidend, da sowohl die zur Plasmaerzeugung nutzbare elektrische Leistung, als auch die mitzuführende Stützmasse (Xenon, Krypton oder Argon) auf einem Raumfahrzeug begrenzt sind. Neben der Ermöglichung der Elektronenzyklotronresonanz werden durch das Magnetfeld zwei weitere wesentliche Funktionen beabsichtigt. Abbildung 4.2 lässt erkennen, dass die Feldlinien aus dem Inneren des

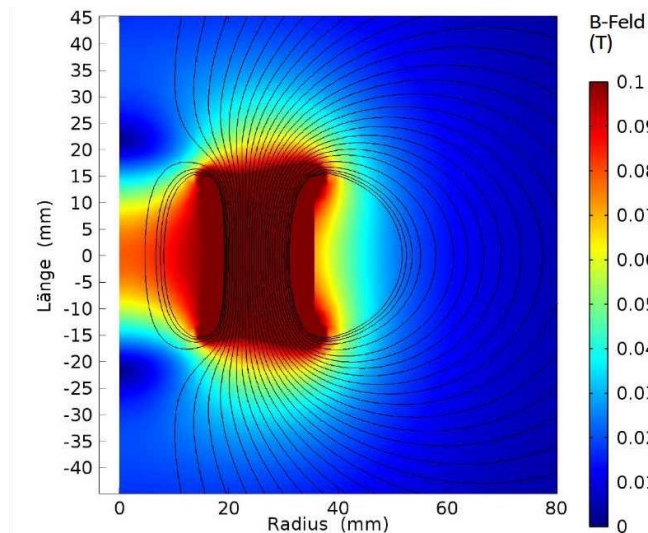
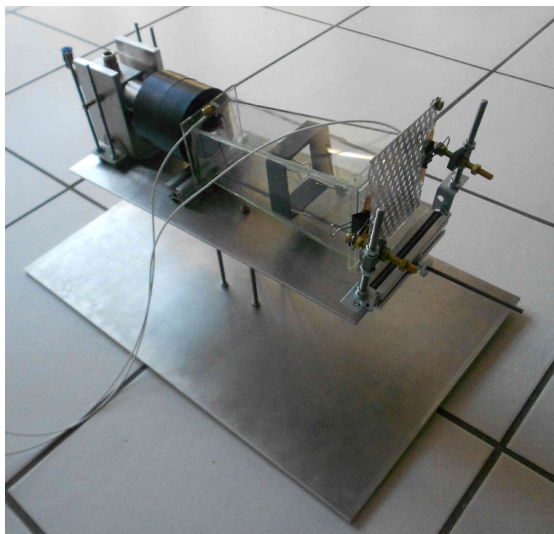


Abbildung 4.2: Finite-Elemente-Simulation des Magnetfeldes in einem Längsschnitt durch den Permanentmagnetstapel.

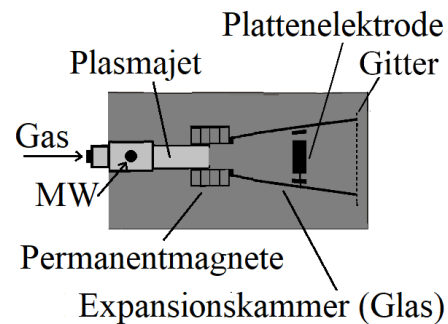
Ringmagnetstapels auf einer kleinen Teilfläche auf der Stirnfläche des Stapels enden. Die Feldlinien beschreiben daher außerhalb des Stapels einen Bogen und haben eine starke radiale Komponente, welche die Bewegung der Elektronen in axialer Richtung effizient behindert. Zudem steigt die Flussdichte vor der Stirnfläche der Magneten stark an (konvergierende Feldlinien), sodass sich dort eine *magnetic cusp* ausbildet und durch den magnetischen Spiegeleffekt eine Rekombination des Plasmas an dieser Oberfläche abschwächt [13].

4.2 Modularer Experimenteller Testaufbau

Zum Test der zuvor beschriebenen Komponente zur Erzeugung des Plasmas, aus dem die Ionen extrahiert und beschleunigt werden sollen, wurde ein experimenteller Aufbau angefertigt und verwendet, der in diesem Abschnitt beschrieben wird. Die Tests dienen dem Nachweis, dass mit der gewählten Elektrodenanordnung ein Plasma bei niedrigem Gasfluss gezündet und Ionen durch ein elektrisches Feld extrahiert werden können. Abbildung 4.3(a) und (b) zeigen ein Foto und eine Skizze des Test-



(a)



(b)

Abbildung 4.3: (a) Modularer Experimenteller Testaufbau. (b) Skizze.

aufbaus, der für die Tests in eine geeignete Vakuumkammer gestellt wurde. Das Volumen vor den Elektroden und den Permanentmagneten, in welches das Plasma expandieren sollte, wurde mit Glaswänden seitlich begrenzt. Am Ende der Expansionskammer befand sich eine Aluminiumplatte mit 5 mm weiten Öffnungen (das Verhältnis der Fläche der Löcher zur Gesamtfläche ergibt eine Transparenz von ca. 40 %). Der Zweck einer solchen Expansionskammer bestand darin, durch Einschluss des entweichenden Gases in der Plasmaerzeugungsregion eine erhöhte Gasdichte erreichen zu können. Die Aluminiumplatte diente als Elektrode, mit der das

Ionen extrahierende und beschleunigende elektrische Feld erzeugt wurde. Außerdem ermöglichte die nicht verschwindende Transparenz der Elektrode die Messung eines Teils des extrahierten Ionenstroms. In der Expansionskammer, etwa auf halber Entfernung zwischen den Permanentmagneten und der Extraktionsplatte, befand sich eine weitere Elektrode aus vier Graphitplatten, die von Innen an den Glaswänden angebracht waren. Diese dienten ebenfalls der Erzeugung des Extraktionsfeldes und der Messung des Stromes extrahierter Ionen.

Kapitel 5

Versuche zur Ionenextraktion und Ionenbeschleunigung

In diesem Kapitel soll die zuvor beschriebene Komponente zur Plasmaerzeugung um eine Komponente zur Ionenextraktion ergänzt werden. Dazu wurde der bereits in Kapitel 4 eingeführte Modulare Experimentelle Testaufbau (siehe Abb. 4.3) verwendet, wobei jetzt die darin enthaltenen Elektroden vorgespannt und Ionenströme gemessen werden. Abbildung 5.1 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus in der be-

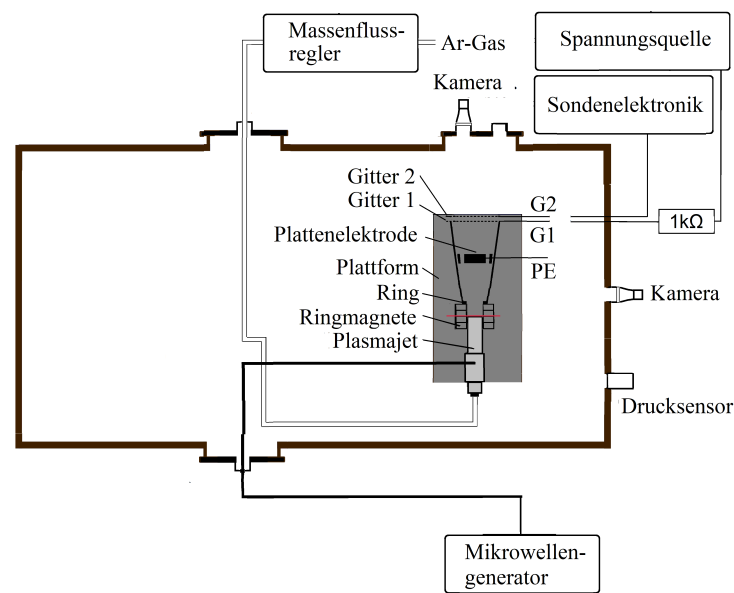


Abbildung 5.1: Skizze des Versuchsaufbaus mit Schaltplan – Vakuumkammer mit Testaufbau.

reits in den Vorexperimenten (Kapitel 3) genutzten Vakuumkammer HIBEX. Die Gaszufuhr erfolgt ausschließlich durch den Massenflussregler für die Plasmaerzeugungskomponente. Der Gasdruck wird mit Hilfe eines Kaltkathodendruckensors

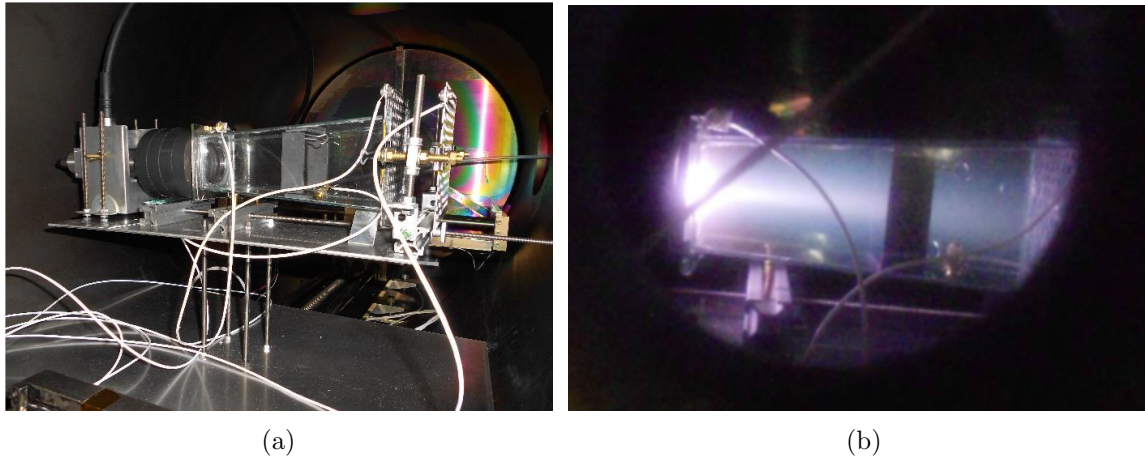


Abbildung 5.2: (a) Testaufbau in der Vakuumkammer. (b) In die Expansionskammer expandierendes Plasma aus dem Plasmajet.

gemessen, der sich an einem Flansch an einem der beiden Enddeckel der Kammer befindet. Bei den gemessenen Drücken handelt es sich also nicht um den Druck im Inneren des Testaufbaus, sondern um den Umgebungsdruck. Der Umgebungsdruck soll während der Versuche möglichst gering, d.h. „weltraumähnlich“, gehalten werden, damit die Gasdichte im Versuchsaufbau praktisch unabhängig von dem viel geringeren Umgebungsdruck bleibt. Die Expansionskammer enthält drei experimentelle Elektroden (s. Abb. 5.2(a)). Das sind zunächst zwei parallele Gitter aus Aluminiumblechen am Ende der Expansionskammer. Die Gitter haben einen Abstand von 40 mm und weisen Löcher mit einem Durchmesser von 5 mm auf. Die Löcher nehmen ca. 40 % der Gitterfläche ein (Transparenz). Die dritte Elektrode besteht aus den vier miteinander verbundenen Graphitplatten, die sich an den Innenseiten der Glasplatten etwa auf halber Länge zwischen den Gittern und den Ringmagneten befinden. Die Elektroden können mit einer konstant regelbaren Spannungsquelle bis zu -300 V vorgespannt werden. Ein Vorwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ erlaubt zudem eine Bestimmung des Stroms aus dem gemessenen Spannungsabfall über dem Widerstand. Außerdem wurde eine Sondenelektronik genutzt, mit der variable Spannungen bis zu -140 V angelegt und gleichzeitig Ströme gemessen werden können. Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass die äußere Koaxialelektrode der Plasmaerzeugungskomponente konstruktionsbedingt auf Massepotential liegt. Deshalb befindet sich das erzeugte Plasma auf niedrigen Potentialen und die Extraktion muss durch negative Spannungen erfolgen. In einem späteren Entwicklungsschritt sollen dagegen die Extraktionselektroden auf dem Referenzpotential (Masse der Testkammer bzw. des Raumfahrzeugs) liegen und die Plasmaerzeugungskomponente mit dem Plasma mit der positiven Beschleunigungsspannung versorgt werden.

Zur optischen Beobachtung werden Kameras an zwei Fensterflanschen der Vakuumkammer verwendet, die Blicke in axialer Richtung auf die Plasmaerzeugungs-

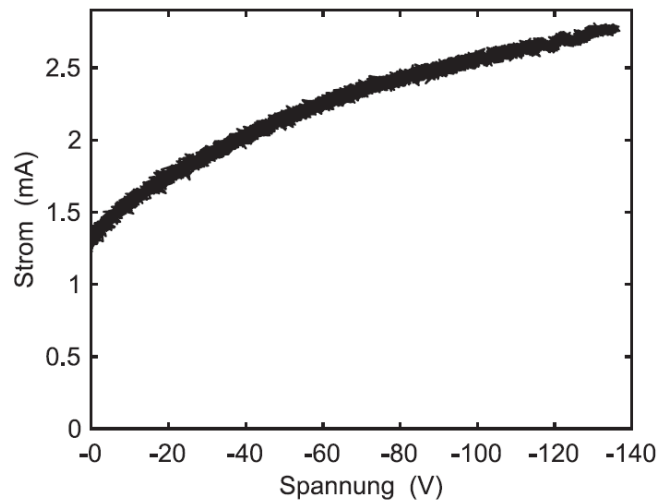


Abbildung 5.3: Extrahierter Strom in Abhängigkeit von der beschleunigenden Spannung an den Plattenelektroden und Gittern (Mikrowellenleistung 20 W, Gasfluss 20 sccm).

komponente und von der Seite auf das Plasma in der Expansionskammer erlauben. Abbildung 5.2(b) zeigt eine Sicht von der Seite auf das Plasma.

Verschiedene Beschaltungen der Elektroden können mit dem Versuchsaufbau untersucht werden. In einem Fall werden alle drei Elektroden miteinander verbunden und mit derselben negativen Spannung versorgt. Eine Strommessung mit Hilfe der Sondenelektronik, bei der Spannungen im Bereich von -0 V bis -140 V angelegt wurden, wird in Abb. 5.3 gezeigt. Dabei wurde die Plasmaerzeugungskomponente mit einer Mikrowellenleistung von 20 W und einem Argongasfluss von 20 sccm betrieben. Erwartungsgemäß führen höhere Extraktionsspannungen zu einem höheren Strom. Die Messung zeigt, dass eine Sättigung bei der maximalen Spannung noch nicht erreicht ist. Außerdem bleibt unbestimmt wie viele Ionen die Gitterelektroden durch deren Löcher verlassen und wie viel Strom durch Verluste an den Innenwänden der Expansionskammer verloren geht. Das Design einer Extraktionselektrode soll zum Ziel haben, den extrahierbaren Strom zu optimieren.

Abbildung 5.4 zeigt drei Kombinationsmöglichkeiten im Vergleich: die bereits dargestellte Zusammenschaltung aller drei Elektroden, die Plattenelektroden allein und die zusammengeschalteten Gitterelektroden allein. Es zeigt sich nicht nur, dass die Zusammenschaltung aller Elektroden den höchsten Strom ergibt, sondern auch, dass die Plattenelektroden allein bereits einen großen Teil des Stroms aufnehmen. Diese Beobachtung führt zu zwei Vermutungen: Zum einen könnte ein großer Teil der Ionen auf dem langen Weg durch die Expansionskammer an den Wänden rekombinieren, und zum anderen könnte der geringere Strom auf die Gitter auf deren große Distanz zurückzuführen sein, die das effektive elektrische Feld schwächt. Mögli-

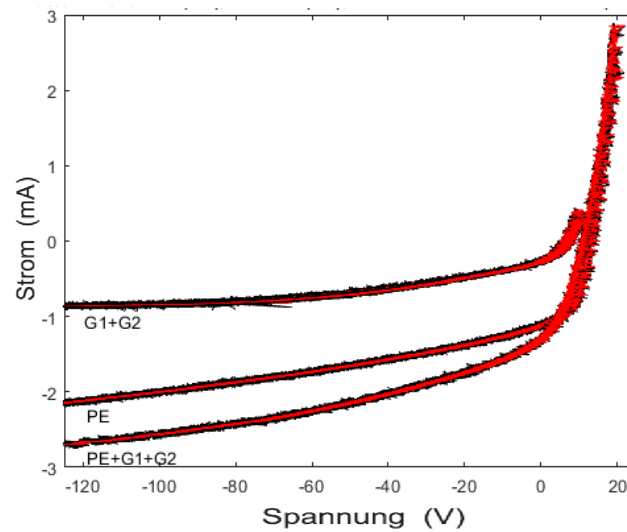


Abbildung 5.4: Strom-Spannungs-Kennlinie an den jeweils vorgespannten Komponenten Plattenelektrode (PE), Gitter 1 (G1) und Gitter 2 (G2) (Mikrowellenleistung 20 W, Gasfluss 20 sccm).

cherweise würde sich eine optimierte Extraktionselektrode deutlich dichter an der Plasmaerzeugungskomponente befinden.

Eine weitere Messung sollte einen Hinweis auf den Ionenstrom geben, der durch ein Gitter hindurchtritt, ohne von diesem aufgenommen zu werden. Dazu wurde das innere Gitter G1 mit einer konstanten Spannung von -200 V vorgespannt. Das äußere Gitter G2 wurde mit Aluminiumfolie bespannt, sodass es den gesamten Strom, der das erste Gitter durchströmt, aufnehmen kann. Das so zu einem Kollektor umgebaut Gitter G2 wurde mit Hilfe der Sondenelektronik mit variablen Spannungen bis zu -140 V betrieben und der Strom gemessen. Abbildung 5.5 zeigt die Kennlinie. Der Strom erreicht bei der maximalen Spannung, die immer noch etwa 60 V positiver als das beschleunigende Gitter G1 ist, etwa $0,3\text{ mA}$. Dieses ist also ein erster Nachweis, dass Ionen mit einer verwendeten Kombination aus Plasmaerzeugungskomponente und transparenter Extraktionselektrode ausgestoßen werden können. In zukünftiger Entwicklungsarbeit soll die Geometrie der Extraktionselektrode, insbesondere ihre Position und Transparenz, optimiert werden.

Die nächsten Schritte bestanden aus systematischen Erkundungen des Parameterraums aus Extraktionsspannung, Gasfluss und Mikrowellenleistung. Im Folgenden sollen einige der Daten beispielhaft gezeigt werden, die mit der Elektrodenbeschaltung gemäß Abb. 5.6 gewonnen wurden. Die beiden Gitter G1 und G2 wurden miteinander verbunden und über einen gemeinsamen Vorwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ und ein Amperemeter an eine variable Spannungsquelle angeschlossen. Parallel dazu wurden auch die Plattenelektroden über einen Vorwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ und ein Amperemeter an dieselbe Spannungsquelle angeschlossen. Jede der Abbildungen 5.7, 5.8 und

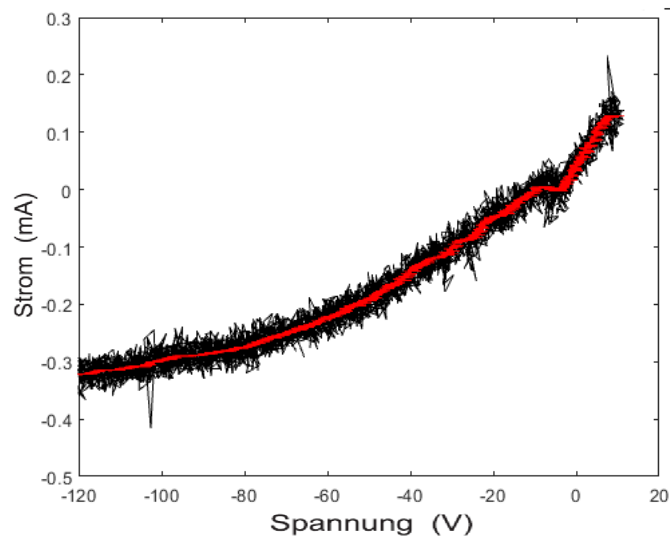


Abbildung 5.5: Strom-Spannungs-Kennlinie gemessen mit Gitter G2. Das Gitter G1 wurde mit konstanter Spannung -200 V vorgespannt, die Mikrowellenleistung war 20 W und der Argonfluss betrug 20 sccm .

5.9 enthält daher drei Messkurven, welche die beiden gemessenen Ströme und deren Summe darstellen. Je eine Abbildung stellt die Ströme zu einem der drei Variationsparameter dar, d.h. Extraktionsspannung, Gasfluss oder Mikrowellenleistung.

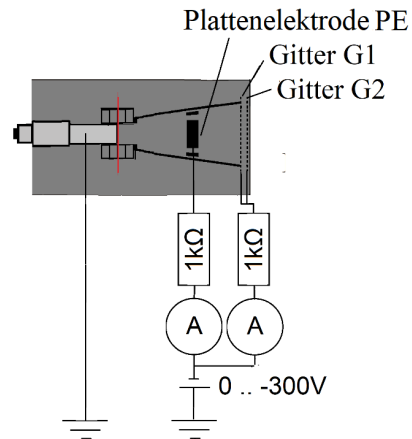


Abbildung 5.6: Schaltplan zur Parameterstudie mit zusammengeschalteten Plattenelektroden (PE) und zusammengeschalteten Gittern (G1 und G2).

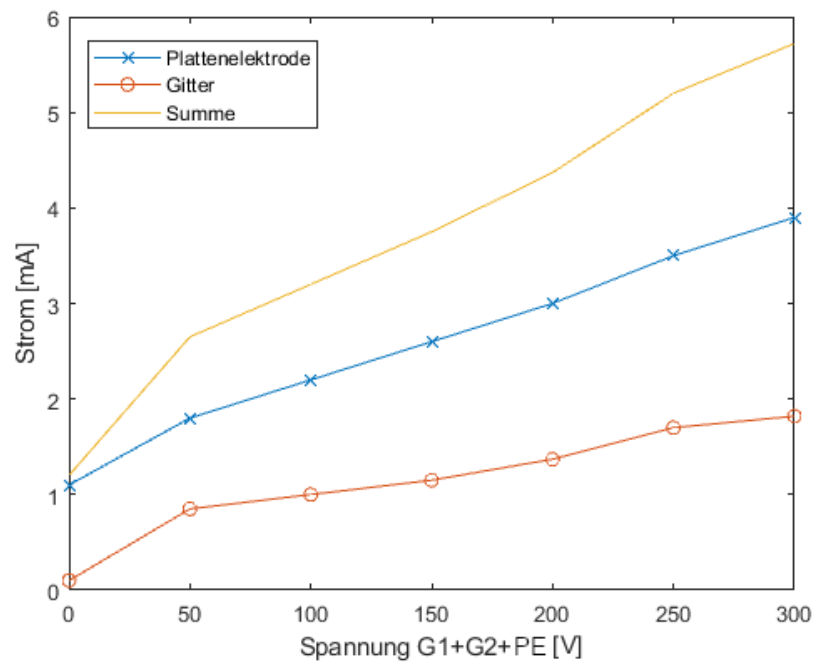


Abbildung 5.7: Variation der gemeinsamen Spannung an allen Elektroden (G1+G2+PE). Die Mikrowellenleistung betrug 20 W und der Gasfluss 20 sccm.

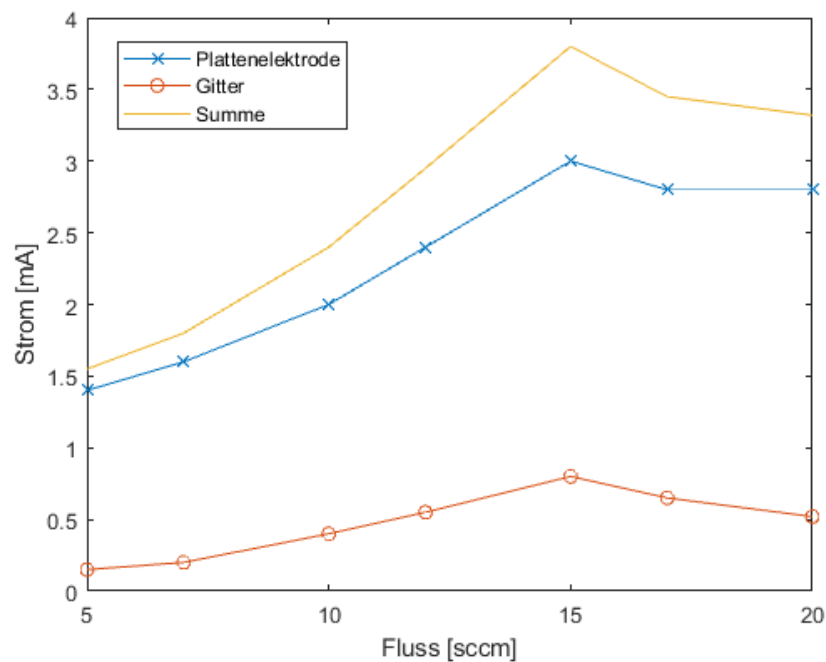


Abbildung 5.8: Variation des Flusses. Alle Elektroden (G1+G2+PE) wurden mit -300 V vorgespannt und die Mikrowellenleistung betrug 20 W.

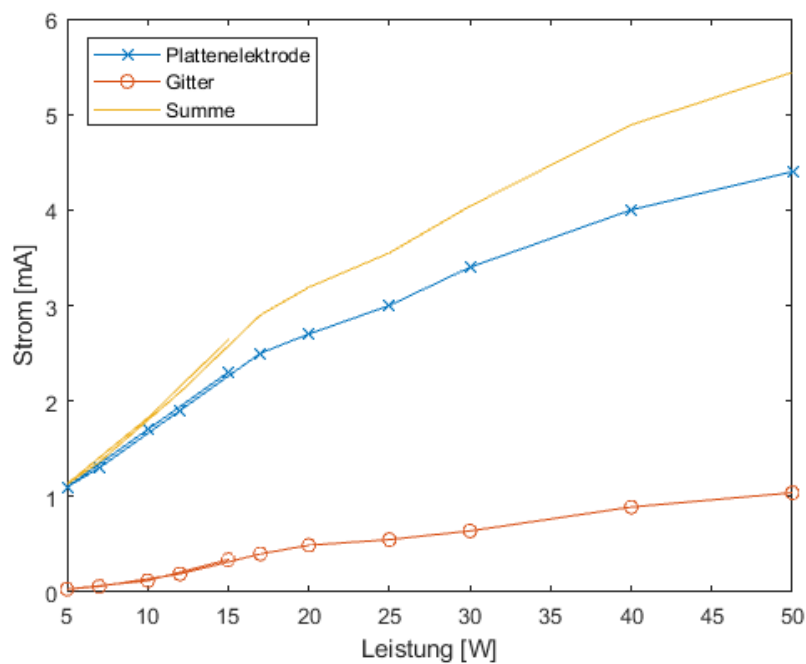


Abbildung 5.9: Variation der Leistung. Alle Elektroden (G1+G2+PE) wurden mit -300 V vorgespannt und der Gasfluss betrug 20 sccm.

Kapitel 6

Skizzierung eines zukünftigen Mikrowellenplasmatriebwerks

Aufbauend auf den in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnissen soll nun ein zukünftiges neuartiges Triebwerk skizziert werden. Die Nutzung der Elektronenzyklotronresonanz hat sich als wesentliches Merkmal herausgestellt, weshalb jetzt klar ist, dass es sich um ein Mikrowellen-Zyklotronresonanz-Plasmatriebwerk handeln wird (engl. *Microwave Cyclotron Resonance Plasma Thruster (MCPT)*). Die beiden anfänglich parallel durchgeführten Versuche mit zwei verschiedenen Plasmaquellen (Kapitel 3) führten letztendlich zu einer Synthese der beiden Konzepte. Ersterer Ansatz verwendete Elektronenzyklotronresonanz, wies aber nicht die ausgeprägt koaxiale Geometrie auf, die den zweiten Ansatz (Atmosphärenplasmajet) auszeichnete. Der Plasmajet dagegen nutzte naturgemäß keine Elektronenzyklotronresonanz, da er für viel höhere Gasdrücke entwickelt worden war. Deshalb konnte er zunächst gar nicht in einer Vakuumkammer mit akzeptablen Gasflüssen betrieben werden. Erst die Hinzunahme eines Magnetfeldes ermöglichte den Betrieb bei niedrigem Umgebungsdruck und niedrigen Gasflüssen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben hatte hauptsächlich das Ziel, eine geeignete Plasmaquelle für ein Mikrowellenplasma zu identifizieren, die für ein Triebwerk geeignet sein könnte. Es wurden insbesondere Leistungsbereiche angestrebt, die effizient mit moderner Halbleiterelektronik realisiert werden können. Die meisten Versuche wurden mit Mikrowellenleistungen weit unter 100 W durchgeführt, typischerweise mit 20 W oder sogar nur 5 W. Es erwies sich, dass die Plasmen sehr zuverlässig gezündet, geschaltet und geregelt werden konnten.

Dieses Projekt kann und soll daher mit dem Ziel fortgesetzt werden, geeignete Elektrodenkonfigurationen zur Extraktion und Beschleunigung von Ionen zu identifizieren. Erste Schritte in diese Richtung wurden bereits in diesem Vorhaben durchgeführt (Kapitel 5), jedoch ist hier noch viel Optimierungsarbeit zu leisten. Es kann aber schon skizziert werden, wie nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnis ein zukünftiges Mikrowellen-Zyklotronresonanz-Plasmatriebwerk aussehen könnte.

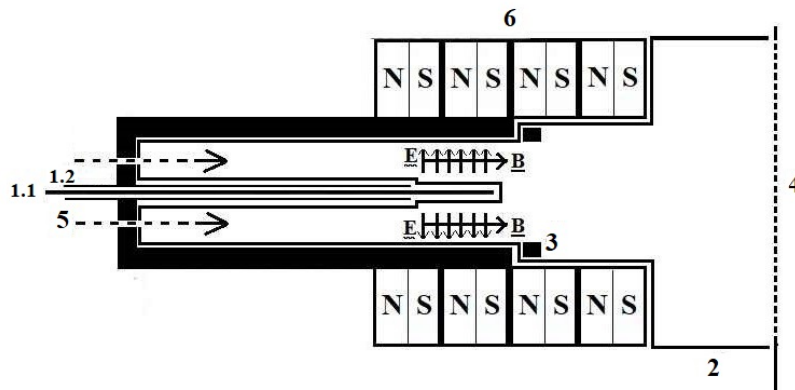


Abbildung 6.1: Sisse eines MCP-Triebwerks basierend auf der plasmaerzeugenden Komponente.

Abbildung 6.1 zeigt die wichtigen Komponenten des MCP-Triebwerks. Die koaxialen Mikrowellenelektroden, innerer Koaxialleiter (1.1) und äußerer Koaxialleiter (1.2) der Plasmaerzeugungskomponente werden plasmaseitig elektrisch isoliert (2), sodass das Potential des Plasmas mit Hilfe einer Anode (3) angehoben werden kann. Eine Spannungsquelle versorgt diese Anode mit der Beschleunigungsspannung. Dagegen liegt die Gegenelektrode (4) mit hoher Transparenz auf Massepotential. Die Ionen verlassen beschleunigt das Triebwerk durch die Ebene oder Region dieser Gegenelektrode hindurch, die ein Gitter sein kann; jedoch sollten auch andere Geometrien, etwa eine ringförmige Elektrode, in Betracht gezogen werden. Das Gas wird über eine Gaszuführung (5) derart zugeführt, dass es den Erzeugungsbereich, in dem das radiale elektrische Mikrowellenfeld oszilliert, durchströmt. Dieses kann durch elektrisch isolierende Röhrchen am rückseitigen inneren Ende der Plasmaerzeugungskomponente geschehen. Das konstante Magnetfeld wird mit ringförmigen Permanentmagneten (6) erzeugt. Die Magnete sorgen an der Stelle des oszillierenden elektrischen Feldes für das dazu senkrechte Magnetfeld in der Stärke, die für Elektronenzyklotronresonanz erforderlich ist.

Abschließend soll bemerkt werden, dass zur Zeit der Abfassung dieses Berichtes die Fortführung des Vorhabens unter dem Förderkennzeichen 50 RS 2204 bereits begonnen hat.

Anhang

Patentanmeldung

Am 17.05.2022 wurde eine Patentanmeldung beim DPMA zu einem Mikrowellen-Zyklotron-Resonanz-Plasma-Triebwerk und zugehörigem Betriebsverfahren sowie seiner Verwendung eingereicht. Der Anmelder ist die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Erfinder sind die Autoren dieses Berichtes.

Literaturverzeichnis

- [1] V.M. Donnelly and A. Kornblit. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow. *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 31:050825, 2013.
- [2] A. Anders. Plasma and ion sources in large area coating: A review. *Surf. Coat. Technol.*, 200:1893–1906, 2005.
- [3] N.Manivannan, W. Balachandran, R. Beleca, and M. Abbod. Microwave Plasma System Design and Modelling for Marine Diesel Exhaust Gas Abatement of NOx and SOx. *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, 6(2):151–154, 2015.
- [4] M.G.Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Nosenko, T. Shimizu, J. van Dijk, and J.L. Zimmermann. Plasma medicine: an introductory review. *New J. Phys*, 11:115012, 2009.
- [5] Produktbeschreibung Plasmajet PC-SF-Jet der Firma Heuermann HF-Technik GmbH, URL: <https://hhft.de/jets-pc-serie>.
- [6] Produktbeschreibung EZR-Plasmaquelle AURA-WAVE der Firma SAIREM SAS, Ref. CPSKFDN40ECR2DP.
- [7] H. Kuninaka, K. Nishiyama, Y. Shimizu, I. Funaki, H. Koizumi, S. Hosoda, and D. Nakata. Hayabusa Asteroid Explorer Powered by Ion Engines on the way to Earth. In *31st International Electric Propulsion Conference, Ann-Arbor, Michigan, USA, IEPC-2009-267*, 2009.
- [8] K.Nishiyama, S. Hosoda, K. Ueno, R. Tsukizaki, and H. Kuninaka. Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System. In *34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, Hyogo-Kobe, Japan, IEPC-2015-333*, 2015.
- [9] N.Koch, G. Kornfeld, and H.-P. Harmann. Development and Test Status of the Thales High Efficiency Multistage Plasma (HEMP) thruster family. In *29th International Electric Propulsion Conference, Princeton, New Jersey, USA, IEPC-2005-297*, 2005.

- [10] D. Kahnfeld, J. Duras, P. Matthias, S. Kemnitz, P. Arlinghaus, G. Bandelow, K. Matyash, N. Koch, and R. Schneider. Numerical modeling of high efficiency multistage plasma thrusters for space applications. *Rev. Mod. Plasma Phys.*, 3:11, 2019.
- [11] H. Kuninaka, K. Nishiyama, I. Funaki, T. Yamada, Y. Shimizu, and J. Kawaguchi. Powered Flight of Electron Cyclotron Resonance Ion Engines on Hayabusa Explorer. *J. Prop. Power*, 23(3):544–551, 2007.
- [12] S. Holtrup and H. Heuermann. Fundamentals and Ignition of a Microplasma at 2.45 GHz. In *Proceedings of the 39th European Microwave Conference, Rome, Italy*, pages 1607–1609, 2009.
- [13] M. G. Haines. Plasma containment in cusp-shaped magnetic fields. *Nucl. Fusion*, 17:811–858, 1977.