

## **Verbundvorhaben**

„Untersuchung eines Mikrowellenkonzentrators als linear  
ausgedehnte Plasmaquelle (MIWELKO)“

## **Teilvorhaben**

„Untersuchung eines Mikrowellenkonzentrators für die  
Erzeugung eines freistehenden, linear ausgedehnten  
Niederdruck-Plasmas zur Sterilisation von Hohlkörpern“

FKZ: 13N8624

**Abschlussbericht 1.10.2004 – 30.09.2007**

# Inhalt

## I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung	S. 3
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	S. 3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	S. 3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	S. 4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	S. 5

## II. Ergebnisse (Ausführliche Darstellung)

II.1 Modellierung und Simulation	S. 6
II.1.1 Simulation der elektromagnetischen Feldverteilung im Miwelko	S. 6
II.1.2 Simulation des Plasmas	S. 9
II.2 Konstruktion und Aufbau	S. 13
II.2.1 Bosch-Testaufbau	S. 13
II.2.2 Mikrowellenkonzentratorstapel	S. 15
II.3 Charakterisierung der Plasmen und Applikation	S. 18
II.3.1 Messungen mit der Langmuir-Sonde	S. 18
II.3.2 Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera	S. 20
II.3.3 Optische Emissions-Spektroskopie	S. 22
II.3.4 Sterilisationsuntersuchungen	S. 23

## III. Verwertungsplan

III.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	S. 24
III.2 Integrationsstudie	S. 24
III.3 Zeithorizont für die wirtschaftliche Verwertung	S. 24
III.4 Wirkung auf Arbeitsplätze	S. 24

## IV. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen

S. 24

## V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

S. 24

## I. Kurze Darstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Im Teilprojekt der Robert Bosch GmbH soll ein Mikrowellenkonzentrator zur Erzeugung eines freistehenden, linear ausgedehnten Niederdruck-Plasmas aufgebaut werden. Dieser neue Typ von Plasmaquelle wird in dem technologisch wichtigen Druckbereich zwischen 0,1 und 50 mbar eingesetzt werden.

Die innovative Plasmaquelle soll für die Sterilisation von Hohlkörpern geeignet sein, z.B. von Ampullen oder Vials für die Verpackung von flüssigen Arzneimitteln. Plasmaentkeimung von Packstoffen und Verpackungen könnte wegen der Umweltneutralität des Verfahrens, dem geringen Bauvolumen der dafür notwendigen Vorrichtungen und der geringen Temperaturbelastung der Substrate eine sehr attraktive Alternative zu konventionellen Entkeimungsmethoden (Hitze, bzw. nasschemische Reagenzien) werden.

Vor diesem Hintergrund hat die Robert Bosch GmbH als Ziel ihres Teilvorhabens die Qualifizierung des Mikrowellenkonzentrators als Niederdruck-Plasmaquelle für die Entkeimung von Kunststoff-Hohlkörpern geplant.

- Erstes Teilziel ist die Entwicklung eines Mikrowellenkonzentrators zur Erzeugung eines freistehenden, linear ausgedehnten Niederdruck-Plasmas.
- Zweites Teilziel ist die Entwicklung eines Prozesses, der den Nachweis der prinzipiellen Eignung der Plasmaquelle für die Entkeimung von Kunststoff-Hohlkörpern erbringt.
- Drittes Teilziel dieses Vorhabens ist die Untersuchung des Einflusses von dielektrischen Substraten auf die elektrische Feldverteilung im Mikrowellenkonzentrator und damit auf die Zündfähigkeit der Plasmaquelle. Durch Finite-Elemente-Simulation soll dieser Einfluss simuliert werden, so dass der störende Einfluss der Substrate durch eine Änderung der Form des Konzentrators kompensiert werden kann.

### I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In einem früheren BMBF-Projekt (FKZ: 13N7604/4) konnte gezeigt werden, dass Niederdruck-Plasmen in der Lage sind, flächige Kunststoff-Verpackungsmaterialien sehr effektiv zu entkeimen. Es zeigte sich jedoch, dass die am Markt verfügbaren Plasmaquellen für die Sterilisation von Hohlkörpern, d.h. dem Zünden des Plasmas z.B. im Inneren einer Ampulle nur sehr eingeschränkt geeignet sind. Diese Lücke soll durch die geplante Quellenentwicklung geschlossen werden.

Für die Durchsetzung am Markt sind Voraussetzungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und für die Validierung/Zulassung zu schaffen:

**Wirtschaftlichkeit:** Die plasmagestützte Entkeimung muss im Vergleich zu etablierten Verfahren gleiche oder bessere Entkeimungsraten erreichen, eine hohe Prozess-Sicherheit gewährleisten und hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten mit bekannten Techniken konkurrenzfähig sein.

**Validierung/Zulassung:** Die Entkeimung von Verpackungen für Arzneimitteln unterliegt sehr strengen gesetzlichen Vorschriften. Zum Nachweis der Prozess-Sicherheit muss ein Prüfverfahren qualifiziert werden.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In der ersten Phase des Projektes konzentrierten sich die Arbeiten im Teilprojekt der Robert Bosch GmbH auf die Simulation elektromagnetischer Felder mit dem Ziel der Optimierung der Miwelko-Geometrie für die Zündung eines freistehenden Plasmas im Applikationsbereich. Ähnliche Simulationen wurden auch bei den Projektpartnern IPF (Universität Stuttgart) und ICT (Fraunhofer Pfinztal) durchgeführt. Der Ansatz von Bosch zeichnete sich dadurch aus, dass die Simulation dreidimensional in realistischen Geometriegrößen durchführbar ist.

Für die Erreichung des Meilensteins zur Projektmitte wurde ein erster Miwelko Prototyp bei Bosch aufgebaut. Er wird im Folgenden als „Bosch-Testaufbau“ bezeichnet. Für die Erreichung des Meilensteins konnte mit diesem Aufbau ein freistehendes Plasma in verschiedenen Arbeitsgasen und

in verschiedenen Druckbereichen erzeugt werden. Leider war die lineare Ausdehnung des Plasmas im Bosch-Testaufbau nur eingeschränkt demonstrierbar. Bei fast allen Parametervariationen war das Plasma im Applikationsbereich auf der zweiten Brennlinie in mehrere Plasmazonen unterteilt.

Um dieses Problem zu lösen wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, v.A. dem IPF Stuttgart eine modifizierte Mikrowelleneinkopplung entwickelt. Es zeigte sich auch, dass es nicht ausreicht mit Hilfe der Simulation der elektrischen Felder die Zündbedingung im Miwelko zu optimieren. Das entstehende Plasma hat als dielektrisches Medium sofort eine Wirkung auf die Feldverteilung. Deshalb wurde in der zweiten Projekthälfte verstärkt an der Simulation des Plasmazustandes und dessen Wechselwirkung bzw. Kopplung mit der Feldsimulation gearbeitet. Basierend auf den vielversprechenden Simulationsergebnissen der neuen Antennengeometrie wurde dann ein zweiter Miwelko bei Bosch aufgebaut. Er wird im Folgenden als „Mikrowellenkonzentratorstapel“ bezeichnet. Mit diesem Aufbau war eine reproduzierbare Zündung eines freistehenden Plasmas möglich und es wurden dann an diesem Aufbau verschiedene Plasma-Charakterisierungsmethoden angewandt und ein Sterilisationsprozess für Pharmaverpackungen entwickelt.

#### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Die zum Zeitpunkt des Projektstarts bei der Robert Bosch GmbH eingesetzten Verfahren zur Entkeimung von Packstoffen für die Abfüllung flüssiger Arzneimittel beruhen auf der thermischen Keimabtötung (mittels trockener Hitze). Der eingesetzte Hitzetunnel erfordert viel Bauraum, um eine ausreichend lange Einwirkzeit zu ermöglichen.

Vor allem die notwendigen hohen Temperaturen der konventionellen Sterilisation im Hitzetunnel, die nicht kompatibel mit Kunststoffen sind, führen zur Suche nach alternativen Entkeimungsverfahren. Alternative Methoden, z.B. eine plasmagestützte Entkeimung, müssen für den Einsatz in der Produktion validiert werden, was in einigen Ländern mit aufwendigen Zulassungsverfahren verbunden sein kann.

Plasmaquellen für die Zündung eines Plasmas im Inneren eines Hohlkörpers beruhen seither zumeist auf dem ECR-Prinzip (Elektron-Cyclotron-Resonanz), bei dem ein Permanent-Magnet in das Innere des Behälters eingeführt werden muss. Ein solches Bauteil, das sich während des Sterilisationsprozesses im Inneren des Pharma-Behältnisses befindet, wird vom Pharmakunden nicht akzeptiert. Aus diesem Grund wäre die geplante Erzeugung eines freistehenden, linear ausgedehnten Niederdruck-Plasmas von großem Vorteil.

Eine Patentrecherche in einschlägigen Abstract-Datenbanken hat zahlreiche Treffer mit folgenden Schutzrechtsschwerpunkten ergeben:

- Sterilisation medizinischer Geräte
- Einsatz bestimmter Gase/Gasmischungen/Reagenzien
- Vorrichtungen mit mehreren Kammern
- Indikatoren zur Messung der Entkeimung

Im Bereich der Radiofrequenzentladungen gibt es zahlreiche Schutzrechte der amerikanischen Firma Abtox Inc., die aber auf medizinische Geräte und eine Vorrichtung fokussieren, die für die Entkeimung von Verpackungen nicht verwendbar ist (US 5650693 A, US 6545796 A, US 5593649 A, WO 9639199 A1, WO 9529709 A1, WO 9526121 A1, WO 9524933 A1, US 5413758 A, US 5413759 A, WO 9506134 A1, US 5376332 A, US 5325020 A, US 5288460 A, EP 570898 A1, US 5184046 A, US 5178829 A, US 5115166 A, WO 9204057 A, EP 474137 A, US 5084239 A, EP 456135 A, EP 456134 A, EP 387022 A, WO 8102809 A). Darüber hinaus hat Johnson&Johnson Medical die Kombination von HF-Plasmen mit bestimmten Gasen, bzw. Gasmischungen, vor allem Wasserstoffperoxid und Wasserdampf geschützt (US 5785934 A, DE 19756809 A1, DE 19756808 A1, EP 834324 A2, EP 815876 A2, EP 815875 A2, EP 815874 A2, EP 799621 A1, WO 9715333 A1, EP 710739 A1, EP 707186 A1, EP 679407 A2, EP 638650 A1, EP 421760 A, US 4756882 A, EP 207417 A), wobei sich Johnson&Johnson auf die Sterilisation medizinischer Geräte konzentriert und für diesen Einsatzzweck die Plasmasterilisation bereits einsetzt.

Wie die Recherche ergab, werden Plasmaverfahren außerhalb der Robert Bosch GmbH bereits für Sterilisationszwecke eingesetzt, nicht aber für die Entkeimung von Packstoffen für Lebensmittel.

In der Medizintechnik sind zwei Fälle bekannt, bei denen plasmagestützte Verfahren mit geringem Erfolg eingesetzt werden:

Im ersten Fall – dem Plazlyte-System (AbTox Inc., Mundelein; USA) für die Sterilisation medizinischer Geräte - musste das Verfahren samt Anlagentechnik vom Markt genommen werden, da die verwendeten Chemikalien auf medizinische Instrumente korrosiv wirken und dabei zu Verletzungen im Augenbereich geführt haben.

Im zweiten Fall – dem Steris- (Mentor, USA), bzw. Sterrad-Verfahren (Johnson&Johnson Medical, New Brunswick; USA) werden hochreaktive Sterilisationssubstanzen: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Fa. Steris), bzw. ClO<sub>2</sub> (Fa. J&J) verwendet, die auch ohne Plasma ausreichend entkeimend wirken und wg. ihrer Reaktivität/Ätzwirkung im Handling unattraktiv sind.

### **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

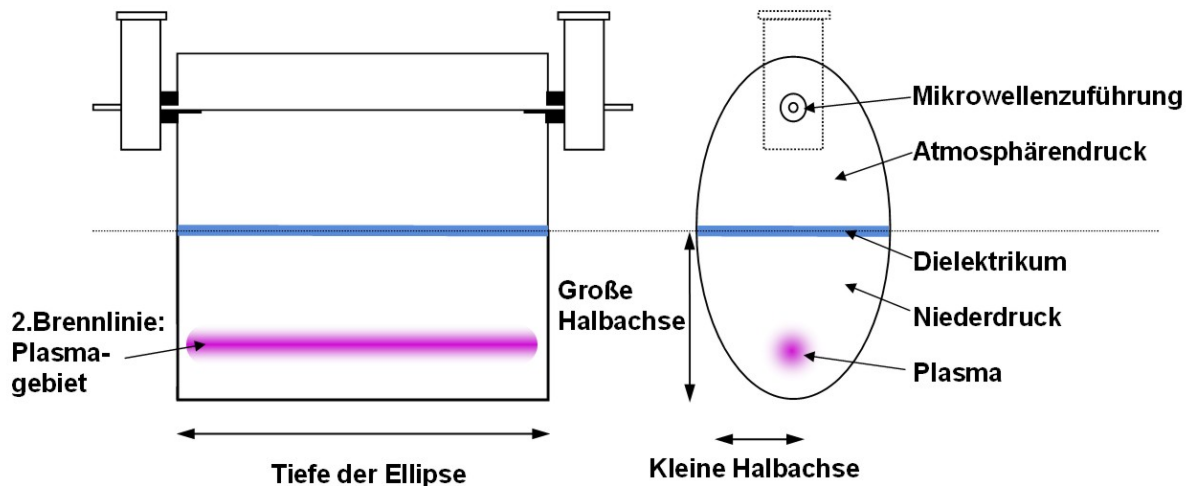
In den Arbeitspaketen zur Simulation erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart und dem Projektkoordinator Fraunhofer ICT Pfinztal.

Für den Aufbau und die Konstruktion der Prototypen bzw. Testaufbauten konnte die Kompetenz der Firma Muegge Electronic GmbH Reichelsheim genutzt werden.

## II. Ergebnisse (Ausführliche Darstellung)

### II.1 Modellierung und Simulation

Zur Definition der Begrifflichkeiten ist in Abbildung 01 der schematische Aufbau eines Mikrowellenkonzentrators gezeigt.



**Abbildung 01: Schematischer Aufbau eines Mikrowellenkonzentrators mit planarem Fenster als Abtrennung zwischen Antennenraum und Applikationsraum**

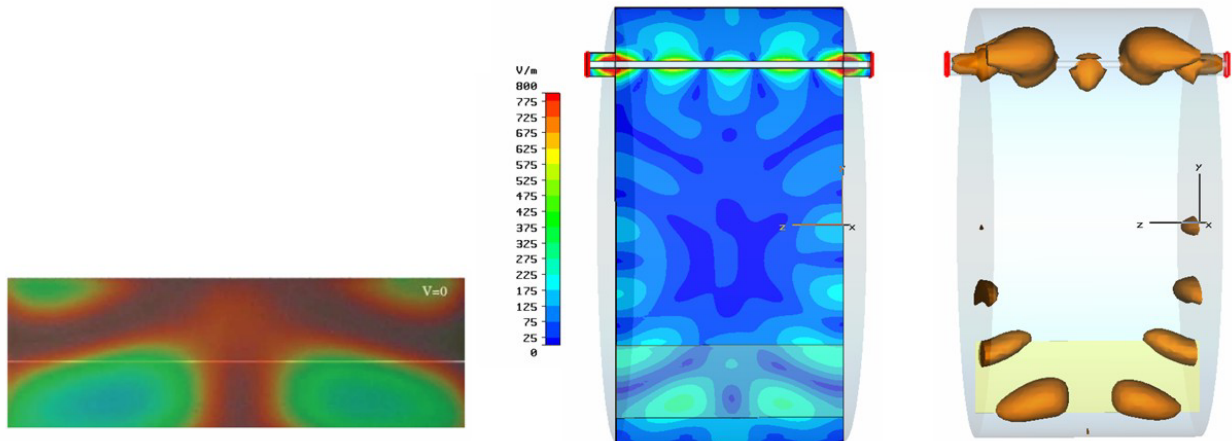
Für die Simulationsrechnungen wurden folgende Parameter variiert:

- Dimension der großen und kleinen Halbachse der Ellipse
- Tiefe der Ellipse und damit Länge des Applikationsbereichs
- Lage und Art der Mikrowellenantenne
- Lage und Geometrie des Dielektrikums (im Falle des Bosch-Testaufbaus ist das Dielektrikum ein Glaszylinder im Bereich der zweiten Brennlinie)

#### II.1.1 Simulation der elektromagnetischen Feldverteilung im Miwelko

Bei Bosch werden die Simulations-Berechnungen für die elektromagnetische Feldverteilung innerhalb der Plasmaquelle mit dem kommerziellen Programm CST Microwave Studio der Firma CST durchgeführt. Dieses Finite-Integrale-Simulationsprogramm bietet die Möglichkeiten, große Geometrien, d.h. die realen Abmessungen des geplanten Mikrowellenkonzentrators mit ausreichender Auflösung zu simulieren. Ziel der Berechnung der elektrischen Feldverteilung war es eine möglichst hohe Zündfeldstärke im Bereich der zweiten Fokuslinie über die gesamte Tiefe der Ellipse zu erreichen und gleichzeitig eine geringe Feldstärke am Dielektrikum.

In einem ersten Schritt wurde zusammen mit den Projektpartnern Muegge und IPF Stuttgart gezeigt, dass die Simulationsergebnisse mit Messungen korrelieren, die über die Erwärmung eines Liquid Crystal Sheets in einem Muegge-Testaufbau gemacht wurden.



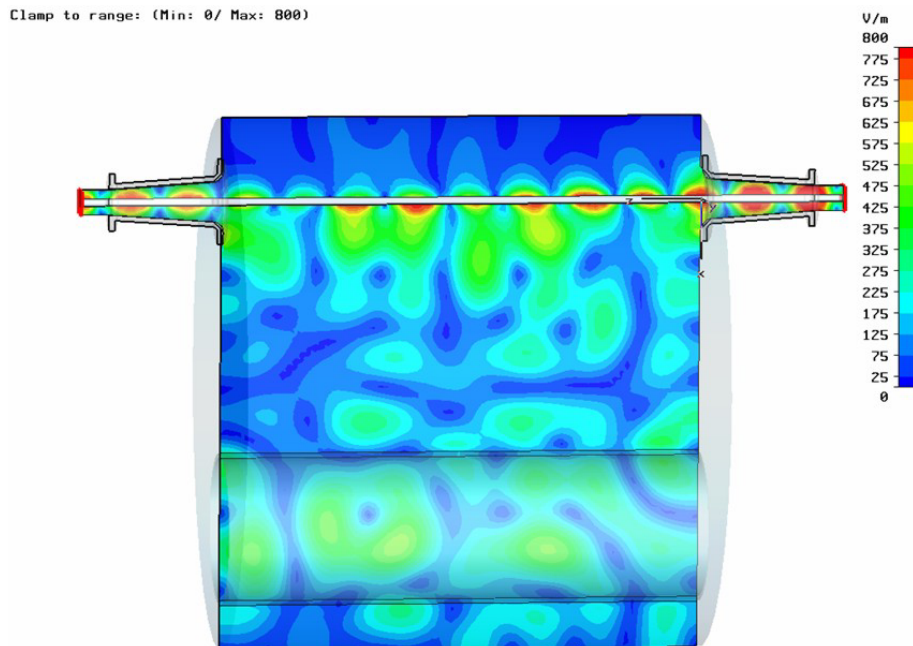
**Abbildung 02: Vergleich Experiment mit Simulation**

**Links: Messung der Temperaturverteilung mit Liquid crystal sheet**

**Mitte und Rechts: Simulationsergebnis der elektrischen Feldverteilung im Muegge-Testaufbau. Das markierte Viereck stellt die Position der Temperaturmessung dar.**

**(In der Mitte ist die elektrische Feldverteilung im Schnitt der Geometrie dargestellt. Das rechte Bild zeigt eine 3D Darstellung der Feldverteilung. Innerhalb der orangefarbenen Gebiete ist die Feldstärke >350V/m, außerhalb <350V/m.)**

Basierend auf den Ergebnissen mit dem Muegge-Testaufbau wurde mit Hilfe der Simulation die Geometrie für den Bosch-Testaufbau optimiert. In der Simulation wurde der Glaszylinder, der im Testaufbau als Applikationsraum genutzt wird, berücksichtigt. Der Einfluss einzelner Geometrieparameter auf die elektrische Feldverteilung in der Bosch-Geometrie wurde mit Hilfe von einer Parametervariation untersucht.

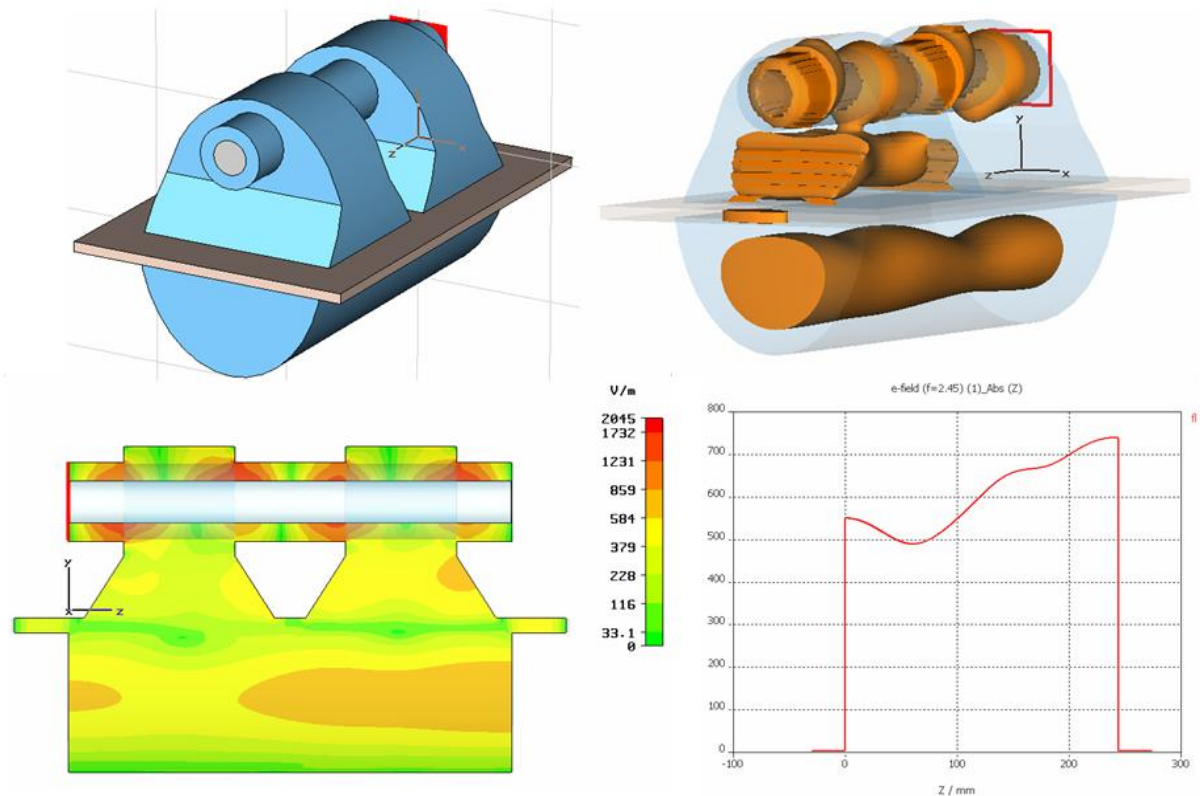


**Abbildung 03: Elektrische Feldverteilung im Schnitt des Konzentrators des Bosch-Testaufbaus**

Variiert wurden die große Halbachse, die kleine Halbachse, die Tiefe der Ellipse, die Position des dielektrischen Fensters und die Position des Innenleiters. Diese Berechnungen haben gezeigt, dass alle untersuchten Parameter einen großen Einfluss auf die elektrische Feldverteilung im Konzentrator

haben. Wie man aus Abbildung 03 erkennen kann zeigt die Feldverteilung im Applikationsvolumen des Bosch-Testaufbaus mehrere Einschnürungen über die Tiefe der Ellipse, was sich dann im Betrieb auch als nachteilig für die Länge des freistehenden Plasmas gezeigt hat (siehe experimenteller Teil des Berichts).

Deshalb wurde im weiteren Projektverlauf noch der Mikrowellenkonzentratorstapel entwickelt. Abbildung 04 zeigt ein exemplarisches Ergebnis der Feldsimulation dieser Geometrie.



**Abbildung 04: Elektrische Feldverteilung im Mikrowellenkonzentratorstapel**

**Links oben: Konstruktionszeichnung**

**Links unten: Zweidimensionale Darstellung der Feldverteilung (Schnitt in Symmetrieebene)**

**Rechts oben: Dreidimensionale Darstellung der Gebiete hoher Feldstärke**

**Rechts unten: Eindimensionale Feldverteilung entlang der zweiten Fokuslinie**

Verglichen mit den Ergebnissen der Feldverteilung des Bosch-Testaufbaus in Abbildung 03 ist die Homogenität der Feldverteilung deutlich verbessert und zeigt nur geringe Einschnürungen über die Länge des Applikationsbereichs.



### II.1.2 Simulation des Plasmas

Zur Optimierung der Plasmaquelle über die Zündbedingung hinaus ist es notwendig, auch das Plasma und somit seine elektrischen Eigenschaften, die das Mikrowellenfeld beeinflussen, bei der Simulation zu berücksichtigen. Bei Bosch wird dies durch die Kopplung von zwei kommerziellen Simulationsprogrammen realisiert. CST Microwave Studio wird zur Simulation der Mikrowellenfelder verwendet. Zur Simulation des Plasmas wird in das Strömungssimulationsprogramm Fluent ein Plasmamodell eingearbeitet. Fluent basiert auf der Finiten Volumen Methode. Mit Hilfe von sogenannten User-Defined-Functions wird das Plasma in Form von Makros implementiert. Die Kopplung der beiden Programme wird, wie in Abbildung 05 skizziert, durch eine Co-Simulation realisiert.

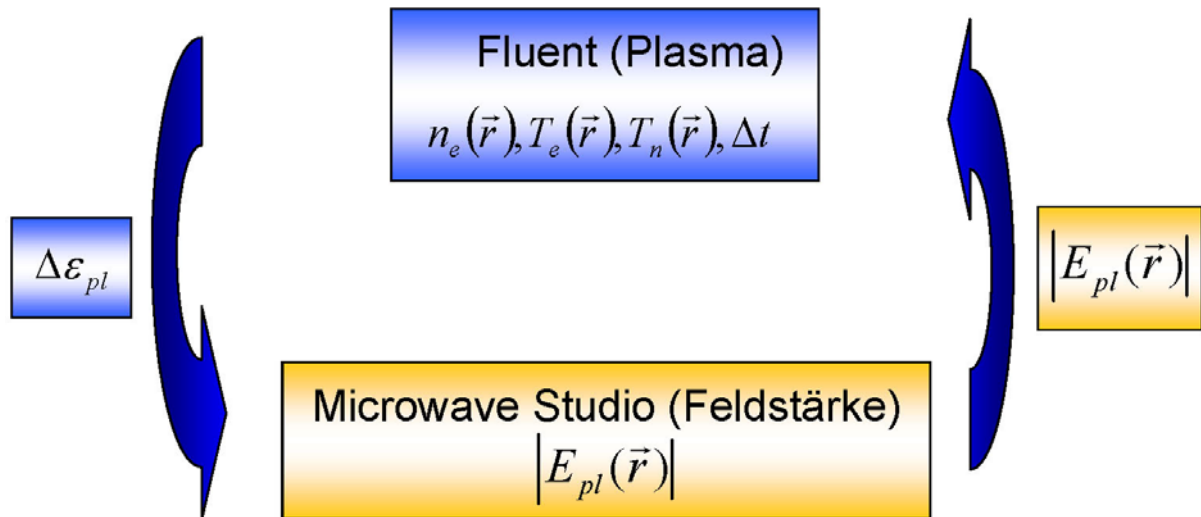


Abbildung 05: Co-Simulation zur Berechnung des Plasmazustandes

Auf Grund der Geometrie der Plasmaquelle musste eine dreidimensionale Berechnung durchgeführt werden. Die Kopplung zwischen E-Feld und Plasma ist sehr stark, was einen sehr kleinen Kopplungszeitschritt zur Folge hat. Die elektrische Feldverteilung wird in der gesamten Plasmaquellengeometrie berechnet. Der Applikationsbereich wird durch einen Glaszylinder begrenzt. Aus diesem Grund kommt es zu keinem Gasaustausch und der Plasmazustand wird nur innerhalb des Quarzzylinders berechnet. Die transiente Entwicklung des Plasmazustandes startet ausgehend von einer Startplasmaverteilung (siehe Abbildung 06).

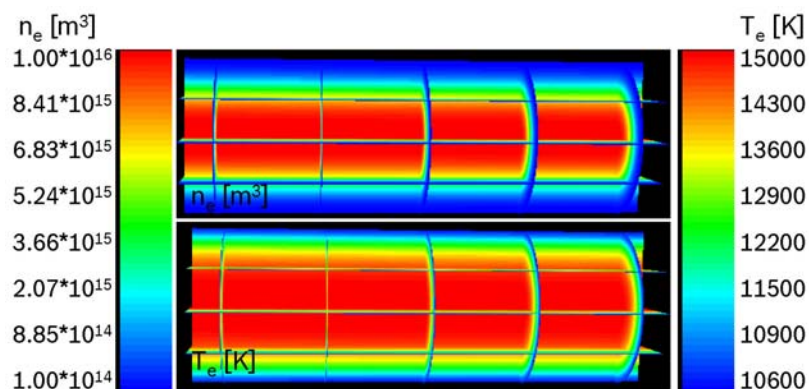


Abbildung 06: Gauss-förmige Startplasmaverteilungen

Bei der Berechnung des Plasmazustandes wird Argon als Gas berücksichtigt bestehend aus Argon-Neutralteilchen, einfach geladene Ionen und freien Elektronen. Die Wechselwirkung der drei Spezies ist durch drei Volumenreaktionen festgelegt. Berücksichtigt werden die Ionisation aus dem Grundzustand, die 3-Körper-Rekombination und die Strahlungsrekombination. Zur Berücksichtigung

des thermischen Nichtgleichgewichts in dem Niederdruck-Plasma wird die Elektronentemperatur getrennt von der Schwerteilchentemperatur, Gastemperatur, berechnet. Geheizt wird das Plasma bzw. die Elektronen ausschließlich durch den ohmschen Quellterm, der durch die eingekoppelte Mikrowellenleistung und die elektrische Leitfähigkeit des Plasmas bestimmt wird. Darüber hinaus wird der Wärmetransport, Konvektion und ambipolare Diffusion berücksichtigt. Des Weiteren werden Verluste durch Strahlung und die Verluste durch elastische Stöße zwischen Elektronen und Schwerteilchen in der Energieerhaltungsgleichung berechnet.

In der Berechnung wird Argon als Strömungsmedium verwendet. Der Gaseinlass, siehe Abbildung 08, (erste Randbedingung) wird durch einen sogenannten "Mass flow Inlet" mit einem Massenfluss in den Quarzzylinder von  $6,0 \cdot 10^{-6}$  kg/s definiert. Dieser entspricht bei den gewählten 300 K und 70 Pa einem Gasfluss von etwa 200 sccm Argon. Am Gasauslass (zweite Randbedingung), dem sogenannten "Pressure Outlet", wird ein Druck von 70 Pa und eine Rückflusstemperatur von 300 K vorgegeben, so dass es zu keinen größeren Druckdifferenzen kommt. Außerdem ist das Strömungsmedium noch begrenzt durch das Quarzrohr (dritte Randbedingung). Das Gas strömt homogen über die gesamte Fläche des Inlets ins Volumen und bildet nach einigen mm ein parabolisches Strömungsprofil mit einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrmitte von  $v = 0,957$  m/s aus. Zur Wand hin ergibt sich ein starker Gradient in der Strömungsgeschwindigkeit. Auf Grund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten und der relativ einfachen Geometrie werden Turbulenzeffekte vernachlässigt.

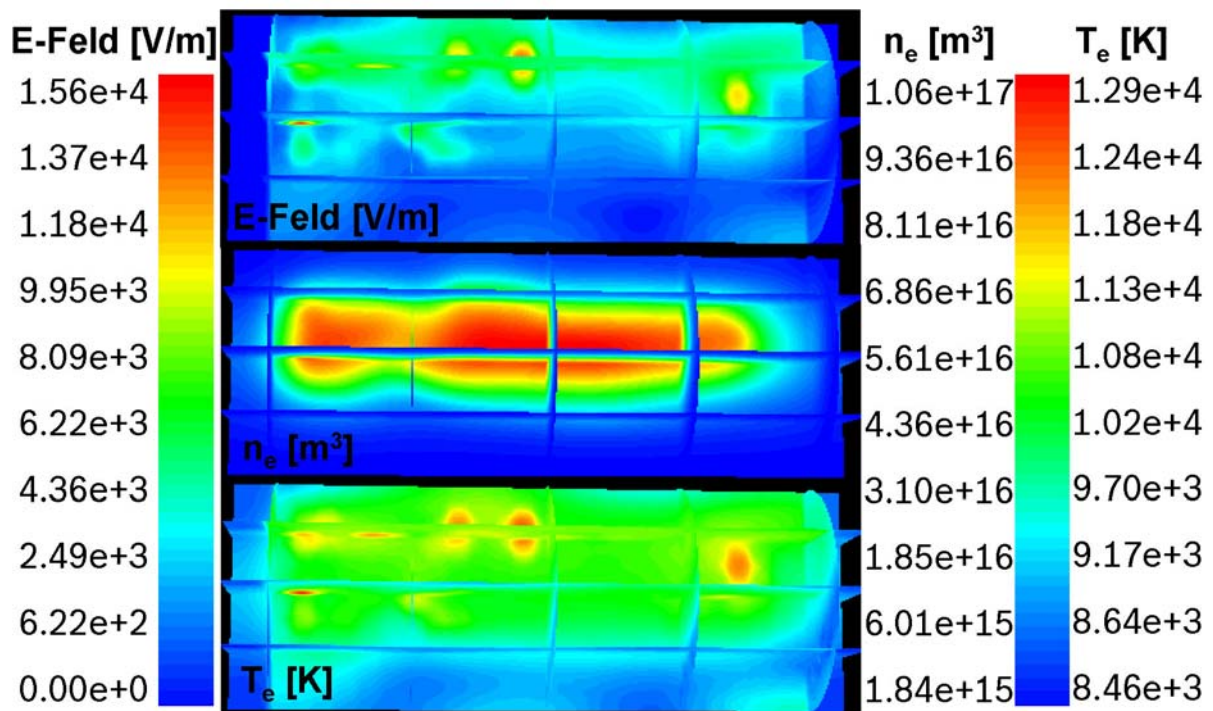


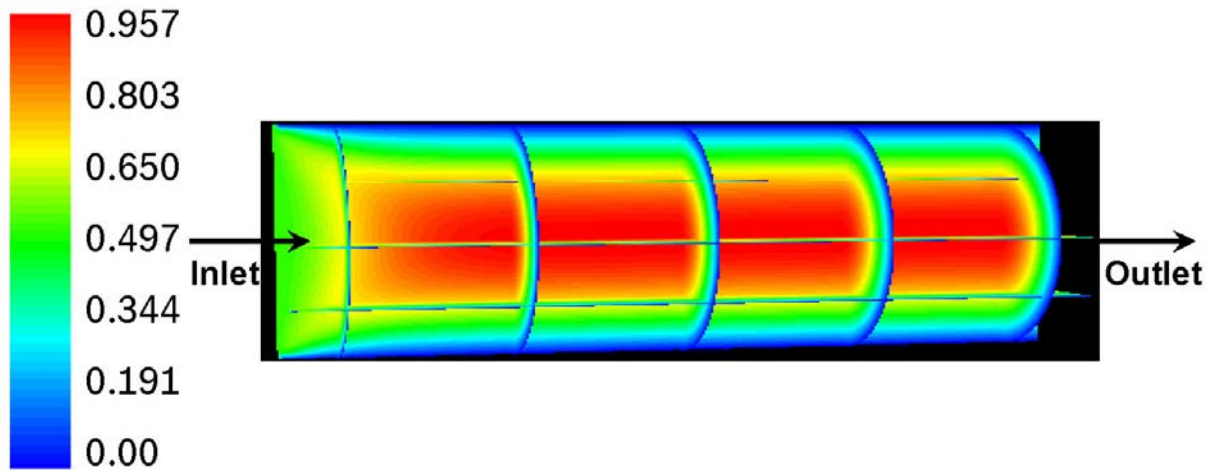
Abbildung 07: Simulierte Plasmazustand und elektrische Feldverteilung nach 4,3 µs

Oben: Feldstärkeverteilung

Mitte: Verteilung der Elektronen-Plasmadichte

Unten: Verteilung der Elektronen-Plasmatemperatur

Ziel der Simulation des Plasmas ist die Bestimmung des Plasmazustandes in Abhängigkeit von einer elektrischen Feldverteilung, dem Druck, dem Gasfluss und der Gasart. Aus diesem Grund sind vor allem die Elektronendichte- und Elektronentemperaturprofile im Verhältnis zum eingekoppelten elektrischen Feld von Interesse (Siehe Abbildung 07).



**Abbildung 08: Kaltgasströmung (in m/s) im Quarzzyylinder des Miwelkos**

Zur Modellierung des Plasmazustandes in der Mikrowellenkonzentratorgeometrie wurde mit Hilfe von so genannten "User Defined Functions" ein Plasmamodell entwickelt, das in Fluent implementiert werden kann. Um den Umfang des Plasmamodells zu begrenzen, wurden bestimmte Annahmen getroffen. Dies sind im Einzelnen:

- Bei dem Strömungsmedium handelt es sich um Argon.
- Es wird eine laminare Strömung angenommen.
- Die Quasineutralität der Strömung wird im gesamten Zylindervolumen vorausgesetzt, wobei allein einfach ionisierte Spezies berücksichtigt werden.
- Das chemische Nichtgleichgewicht wird durch eine vereinfachte Reaktionskinetik modelliert.
- Das thermische Nichtgleichgewicht wird durch die separate Berechnung der Elektronenenergie gegenüber der Translationsenergie der Schwerteilchen ( $T_{\text{gas}} = T_{\text{ion}}$ ) realisiert.
- Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gilt sowohl für die Schwerteilchen als auch für die Elektronen.
- Die Gesamtdichte ist immer so hoch, dass die Annahme eines Kontinuums gültig ist.
- Das Medium verhält sich wie ein Gemisch chemisch reagierender idealer kompressibler Gase.
- Es wird nur ohmsche Heizung als Absorption der Mikrowellenleistung im Plasma betrachtet.

Ausgehend von einer Startplasmaverteilung wird das elektrische Feld berechnet und dann wird jeweils in Fluent der Zeitschritt gerechnet und die entsprechenden Plasmamaparameter exportiert, um nach dem entsprechenden Kopplungszeitschritt erneut die elektrische Feldverteilung zu berechnen, deren Ausbildung als instantan angenommen wird, um dann mit diesem, auf Grund der Plasmaverteilung korrigierten elektrischen Feld erneut den Plasmazustand zu berechnen.

Diese Annahme ist nur so lange gültig, wie die Änderung des komplexen Epsilonwertes nicht zu groß ist und somit die Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld vernachlässigt werden kann.

Zusätzlich wird die vereinfachte Annahme getroffen, dass sich die elektrische Feldverteilung instantan den durch das Plasma veränderten dielektrischen Eigenschaften der Plasmaquelle anpasst. Somit wird ausschließlich in der Plasmarechnung mit Fluent in der Zeit gerechnet und nach der Zeit, die dem Kopplungszeitschritt entspricht, werden die Plasmaeigenschaften aus Fluent exportiert, auf das Gitter des CST Microwave Studio Simulationsmodells interpoliert und dann unter Berücksichtigung dieser veränderten dielektrischen Eigenschaften des Plasmagebietes die elektrische Feldverteilung erneut berechnet. Der Kopplungszeitschritt wird durch den Gradient der elektrischen Feldverteilung von einem zum nächsten Zeitschritt begrenzt und damit auch durch die Änderung der komplexen Dielektrizitätszahl in dieser Zeitspanne.

Sind die Änderungen zu groß, entwickelt sich der Plasmazustand weg von der Realität, da die Wechselwirkung nicht ausreichend abgebildet wird. Vor allem besteht die Schwierigkeit, dass die Rechnung instabil wird und sich keine konvergente Lösung ergibt.

Während des Zeitschrittes, der nur in der Fluenzrechnung stattfindet, wird die elektrische Feldverteilung als konstant angenommen. Diese Annahme ist nicht korrekt, da die Feldverteilung direkt auf den sich ändernden Plasmazustand reagiert.

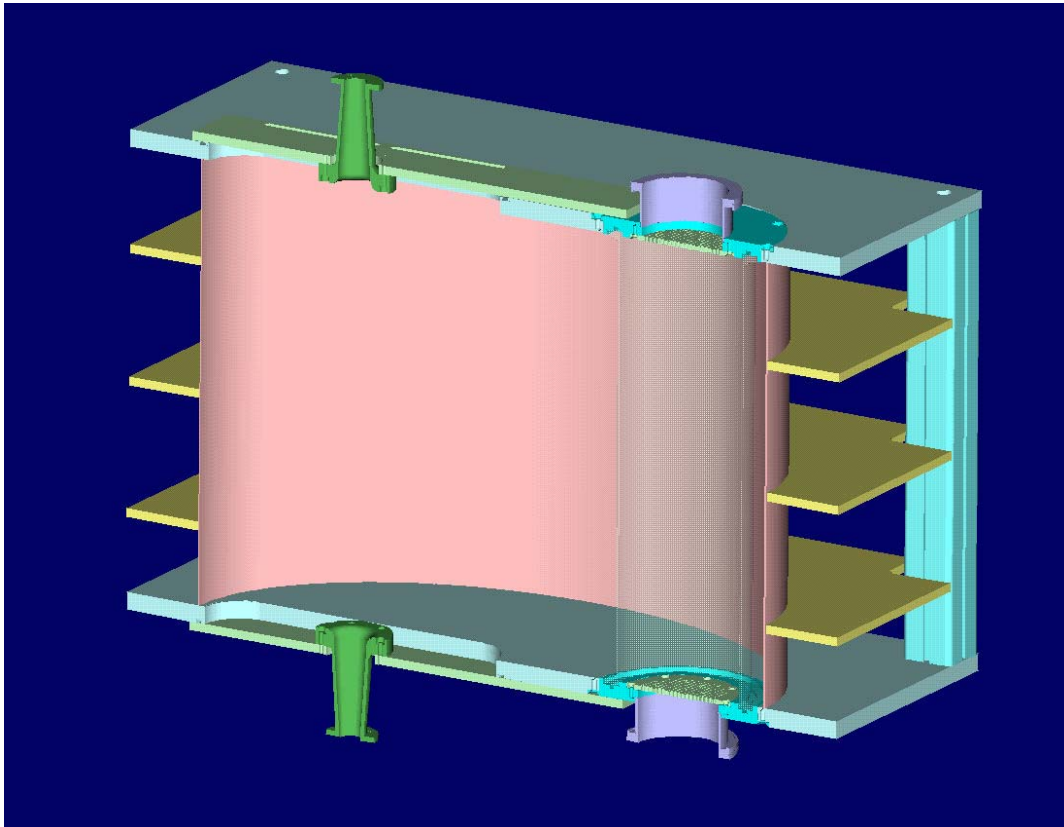
Aus diesem Grund darf der Zeitschritt nicht zu groß sein, damit der Fehler, der zwangsläufig gemacht wird, nicht zu stark ins Gewicht fällt.

Ziel, der hier vorgestellten Plasmaquelle, ist es ein freistehendes linear ausgedehntes Niederdruckplasma zu zünden. Die Homogenität des Plasmas über die Tiefe der Ellipse ist nicht ganz optimal, wie sich in den Rechnungen gezeigt hat, aber bei genügend kleinen Kopplungszeitschritten ist es trotzdem möglich, wie auch die Experimente zeigen ein freistehendes, linear ausgedehntes Niederdruckplasma zu zünden und zu betreiben.

## II.2 Konstruktion und Aufbau

### II.2.1 Bosch-Testaufbau

Die Konstruktion für den Bosch-Testaufbau wurde basierend auf einer Vielzahl von Parametervariationsrechnungen ausgewählt (siehe Abbildung 03). Hierzu wurde die große Halbachse, die kleine Halbachse, die Tiefe der Ellipse, der Durchmesser des Glaszylinders, die Position des Glaszylinders, die Position des Innenleiters und die Art der Antenne variiert. Bei der Wahl der Geometrie basierend auf den Ergebnissen der Feldsimulation muss man immer berücksichtigen, dass man auf die Zündbedingung optimiert. Des Weiteren wird nur der leere Konzentrator, ohne Hohlkörper und entsprechende Halterung, simuliert. Eventuell wird es nötig sein, die Geometrie für die Applikation mit Halter und Substraten neu zu optimieren.

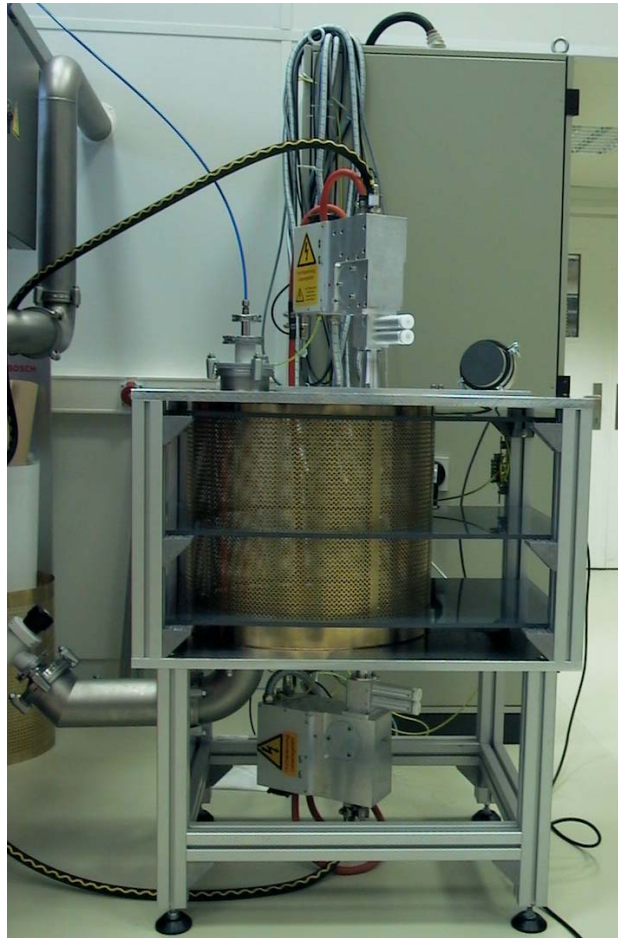


**Abbildung 09: Konstruktionszeichnung des Bosch-Testaufbaus**

Wesentliche Elemente der Konstruktion:

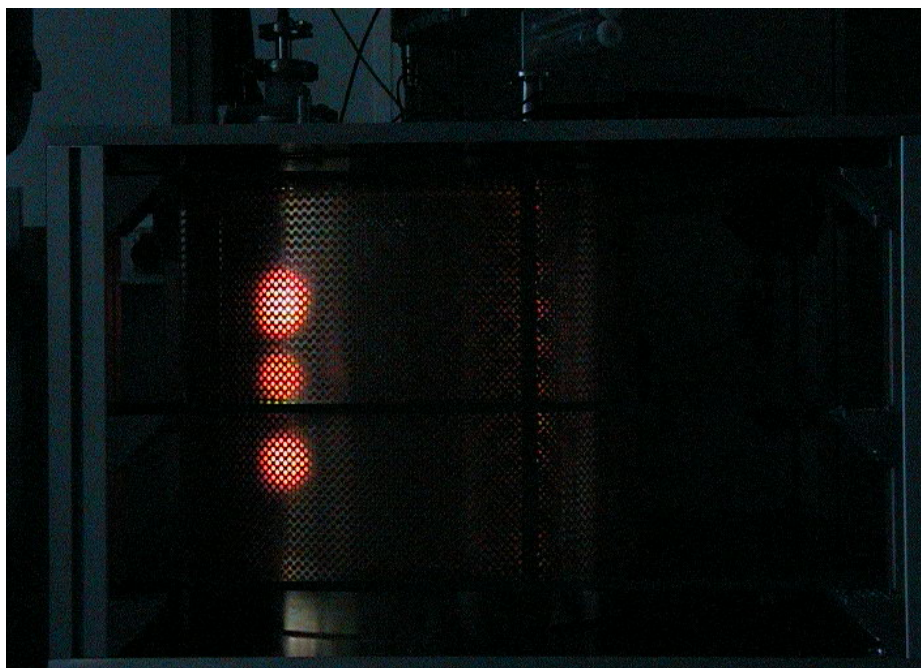
- Biegsames Lochblech für die Form der Ellipse (in Rosa dargestellt)
- Leicht wechselbare Schablonen, die die Form der Ellipse definieren (in Gelb dargestellt)
- Glaszylinder, der vakuumdicht zwischen Boden- und Abdeck-Platte eingebaut werden kann
- Mikrowelleneinkopplungen, deren Lage verstellt werden kann (in Grün dargestellt)

Der Bosch-Testaufbau, ähnlich dem Muegge-Testaufbau, bietet die Möglichkeit, die Geometrie zu variieren und ermöglicht durch Flansche einen Zugang von Messgeräten (wie z.B. der Langmuir-Sonde). Die Konstruktion dieses Bosch-Testaufbaus ist in Abbildung 09 dargestellt. Ein entscheidender Unterschied zum Muegge-Testaufbau ist die Tatsache, dass die Form der Ellipse durch Schablonen festgelegt wird. Dadurch ist die Geometrie eindeutiger und der Vergleich mit der Simulation wesentlich vereinfacht. Des Weiteren wird die Mikrowelle von beiden Seiten eingespeist. Im Gegensatz zur ursprünglichen Miwelko-Idee (siehe Abbildung 01) wird die Trennung der unterschiedlichen Druckbereiche im Bosch-Testaufbau durch einen Glaszylinder im Bereich der zweiten Brennlinie gewährleistet. Dieser hat einen Durchmesser von 160mm, um den Einfluss der Wände auf das Plasma möglichst gering zu halten.



**Abbildung 10: Fotografie des Bosch-Testaufbaus**

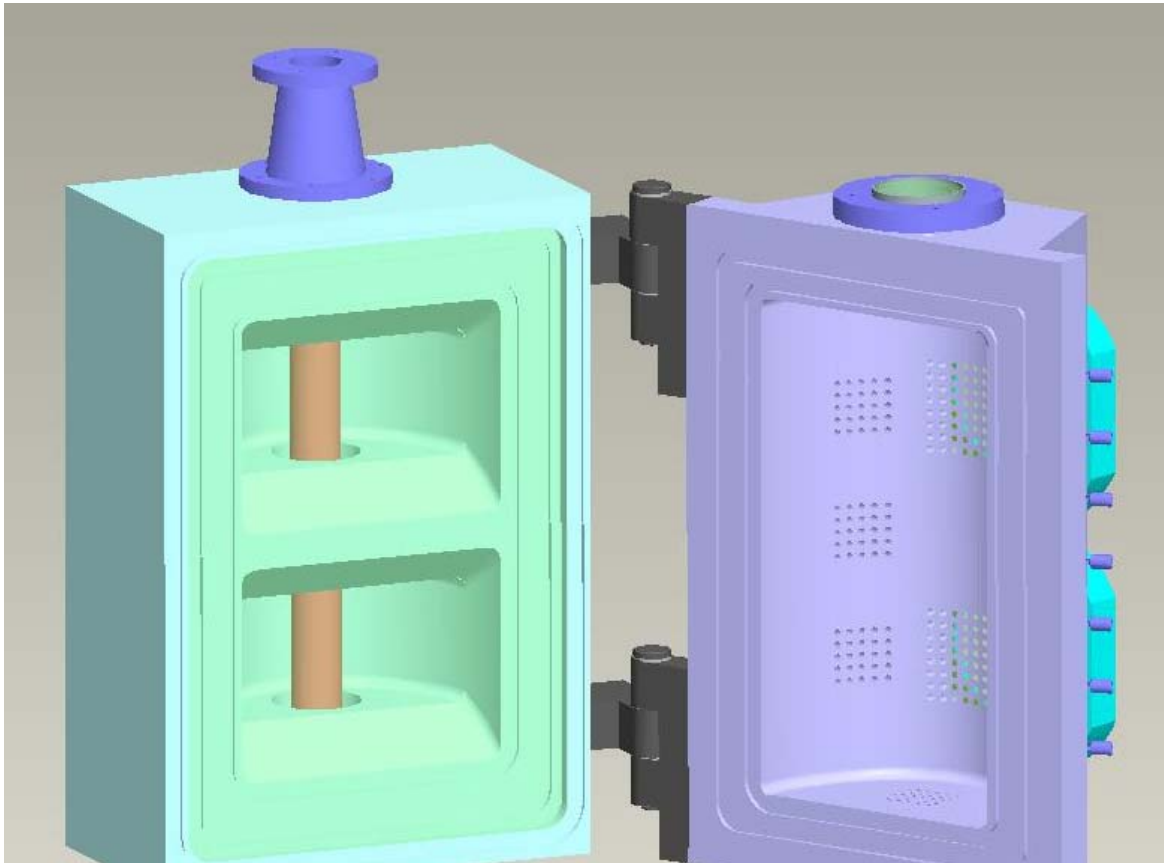
Der realisierte Bosch-Testaufbau in Abbildung 10 besteht darüber hinaus aus einer Vakuumvorrichtung, zwei Magnetrons, drei Schablonen, die die Geometrie festlegen, einer Gaszufuhr und einer Mikrowellenraumüberwachung. Nach der Inbetriebnahme des Bosch-Testaufbaus im Dezember 2005 konnte ein freistehendes Plasma im Glaszylinder in der zweiten Brennlinie gezündet werden, siehe Abbildung 11.



**Abbildung 11: Fotografie eines freistehenden Plasmas im Bosch-Testaufbau**

## II.2.2 Mikrowellenkonzentratorstapel

Mit dem Bosch-Testaufbau war es zwar möglich, ein freistehendes Plasma zu zünden (siehe Abbildung 3), das Plasma war jedoch nicht linear ausgedehnt. Am IPF wurde eine neue Plasmaquellengeometrie entwickelt, mit deren Hilfe dies sogar bei cw-Betrieb möglich ist. Aus diesem Grund hat Bosch sich entschieden eine Anlage basierend auf dem Mikrowellenkonzentratorstapel des IPF'S aufzubauen. In Abbildung 12 ist die entsprechende Konstruktionszeichnung zu sehen.



**Abbildung 12: Konstruktionszeichnung des Bosch Mikrowellenkonzentratorstapels**

Die koaxiale Zufuhr der Mikrowelle erfolgt einseitig, wie in Abbildung 13 zu sehen. Am gegenüberliegenden Ende der Mikrowellenkonzentratorgeometrie wird die Welle kurzgeschlossen. Dadurch bildet sich eine stehende Welle auf der Antenne aus. Diese ist als rote Linie skizziert. Die Mikrowelle wird abschnittsweise in den Applikationsbereich abgestrahlt. Ein entsprechender Abschnitt ist eine halbe Vakuumwellenlänge breit. Dies entspricht bei einer Anregungsfrequenz von 2.45 GHz etwa 61 mm. Dadurch wird jeweils nur eine Halbwelle verwendet. Diejenige mit dem entgegengesetzten Vorzeichen wird nicht eingekoppelt, sondern wird von einem Außenleiter abgeschirmt. Die nächste Halbwelle wird wieder ins Plasmavolumen abgestrahlt. Mit der Messeinheit Homer der Firma Muegge Electronic GmbH werden die vorwärtige und die reflektierte Leistung bestimmt, sowie die tatsächlich eingekoppelte Frequenz des Magnetrons. Daraus ergibt sich der absorbierte Anteil der Leistung.

Die elektrischen Felder haben in der Umgebung der zweiten Fokuslinie über die gesamte Tiefe des Mikrowellenkonzentratorstapels die gleiche Phase. Dies ist entscheidend, um eine homogene, linear ausgedehnte Feldstärke im Applikationsbereich zu erhalten (siehe Abbildung 04). Es kommt zu keinen Wellenknoten. Ein weiterer Unterschied zu dem Bosch-Testaufbau ist die Tatsache, dass ein planares Quarzfenster zur Trennung des Antennen- und Applikationsbereiches verwendet wird. Durch diese Trennung ist es einfacher, möglich Substrate im Bereich der zweiten Fokuslinie zu platzieren und wieder zu entnehmen.

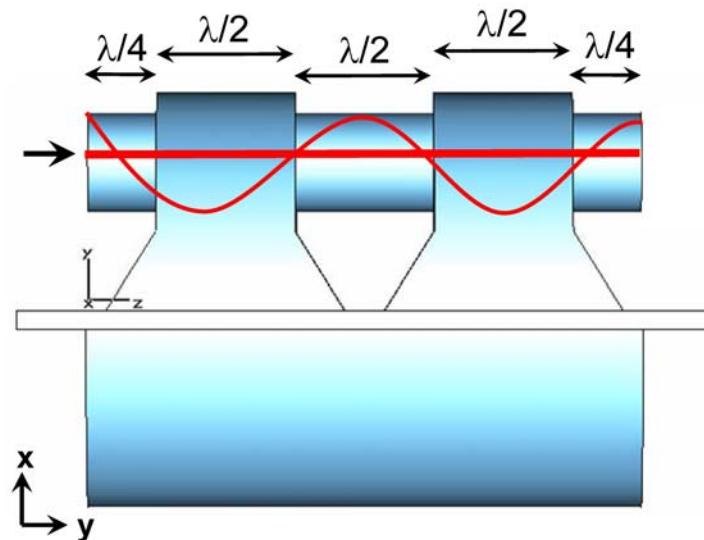


Abbildung 13: Funktionsprinzip des Mikrowellenkonzentratorstapels

Der Applikationsbereich in der zweiten Brennlinie wird mit einer Drehschieberpumpe auf einen Druck im Bereich von 0.1 bis 1 mbar evakuiert. Die Gase werden von oben zugeführt. Mit Hilfe eines Handventils kann das Saugvermögen der Pumpe reduziert werden. Dadurch kann der Druck im Plasmabereich unabhängig vom Gasfluss variiert werden.

Der realisierte Aufbau ist in Abbildung 14 zu sehen. Die Flansche an der Seite des Applikationsraums sind variabel nutzbar entweder als Sichtfenster, Diagnoseport oder Gaszuführung.

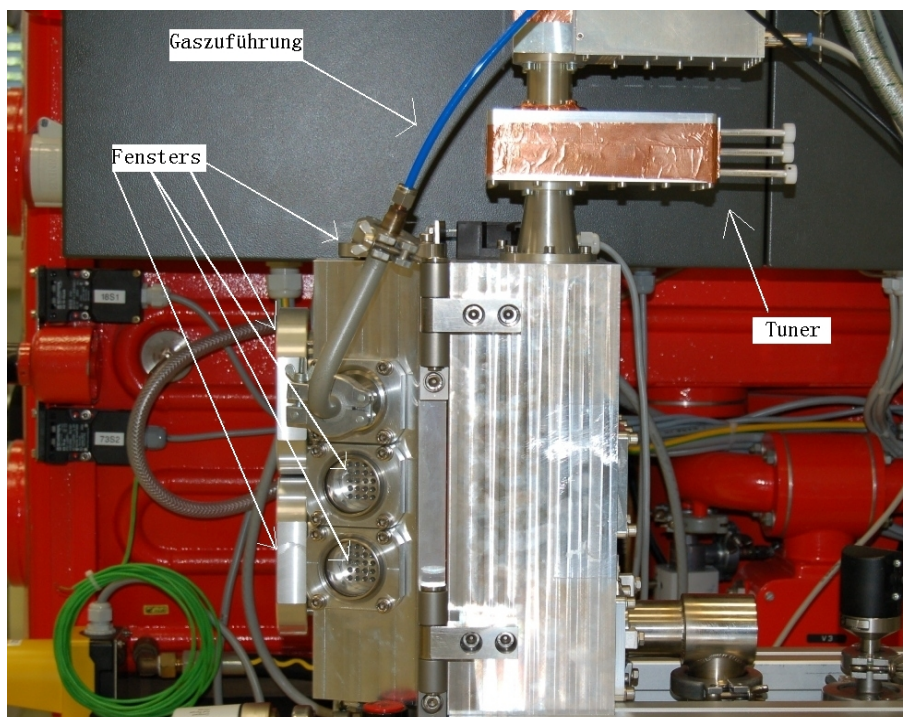
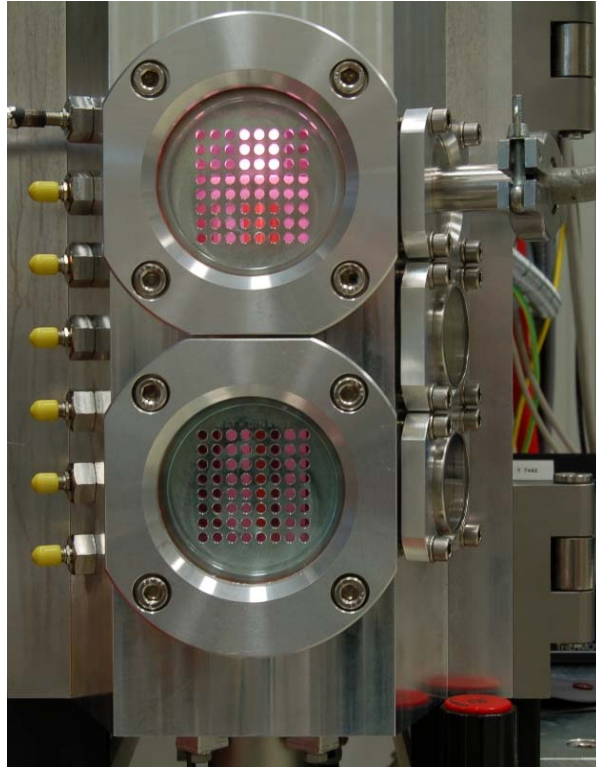


Abbildung 14: Bosch Mikrowellenkonzentratorstapel

Allerdings muss man bei der Auslegung dieses vergleichsweise großen Applikationsbereiches sehr darauf achten, dass die elektrische Feldstärke im Bereich des Fensters ein Minimum hat. Ansonsten würde dort das Plasma zünden. Außerdem darf die Störung der Oberflächenwandströme durch die Unterbrechung der metallischen Geometrie durch das Quarzfenster nicht zu Feldüberhöhungen an dieser Stelle führen. Die Abmessungen der Geometrie, direkte Verbindung zwischen erster und



zweiter Fokuslinie und indirekte, mit einem Phasensprung an der Wand, wird mit einer bzw. eineinhalb Vakuumwellenlängen sehr klein gewählt, so dass sich nur ein Feldstärkemaximum im Applikationsbereich befindet. Damit wird das Zünden des Plasmas am Fenster verhindert.



**Abbildung 15: Plasma zündet in einem Hohlkörper im oberen Bereich des Mikrowellenkonzentradorstapels**

In Abbildung 15 ist eine Aufnahme des Aufbaus von Vorne gezeigt. Durch das obere Fenster sieht man einen hell leuchtenden Zylinder. Es handelt sich dabei um ein Vial (Pharmaverpackung) in dessen Innerem ein intensives Plasma gezündet hat, das zur Sterilisation genutzt werden kann.

## II. 3 Charakterisierung der Plasmen und Applikation

### II.3.1 Messungen mit der Langmuir-Sonde (Bosch-Testaufbau)

Neben der rein optischen Analyse des Plasmazustandes wurde das gezündete Plasma im Bosch-Testaufbau mit Hilfe des Langmuirsondensystems der Firma Haaga vermessen. Ziel war die Messung der Plasmaparameter für ein freistehendes Plasma, sowohl im cw- als auch gepulsten Plasmabetrieb.

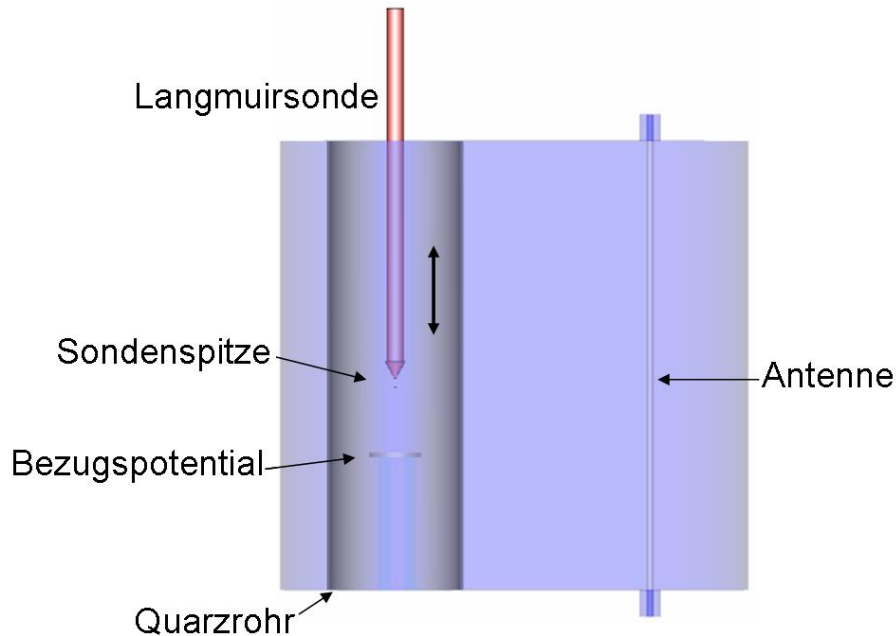


Abbildung 16: Skizze des Aufbaus der Langmuir-Sonde am Bosch-Testaufbau

Ein freistehendes Plasma konnte mit der vorhandenen Sonde nicht vermessen werden, da ein Bezugspotential für die Sonde fehlt. Aus diesem Grund wurde eine Referenzelektrode mit definiertem Bezugspotential ins Plasmagebiet eingebracht. Leider ist es auch mit Bezugspotential nicht möglich, ein gepulstes Mikrowellenplasma zu vermessen, da dieses zu stark durch den Mikrowellenpuls verfälscht wird. Der Mikrowellenpuls des Magnetrons wurde mit einem Oszilloskop aufgenommen und ist in Abbildung 17 dargestellt. Das gepulste Plasma kann nur mit Hilfe von speziellen Magnetrons vermessen werden, da diese einen „glatteren“ Mikrowellenpuls abgeben. Mit den vorhandenen Magnetrons kann nur das kontinuierlich betriebene Plasma vermessen werden.

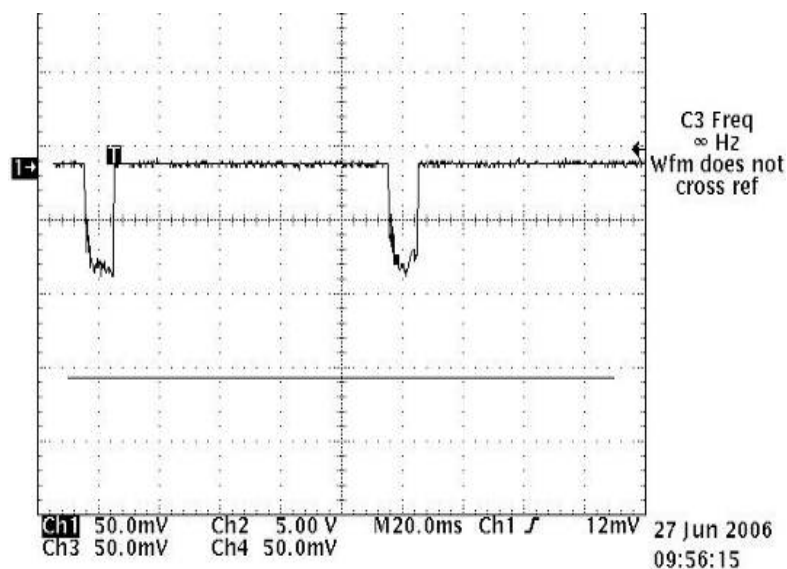


Abbildung 17: Aufnahme des Ansteuerungssignals der Magnetrons mit einem Oszilloskop

In Abbildung 18 ist eine ungefilterte Strom-Spannungskennlinie dargestellt, die mit Hilfe der Langmuir-Sonde am Bosch-Testaufbau aufgenommen wurde. Abbildung 19 zeigt die geglättete Strom-Spannungskennlinie und beinhaltet zusätzlich die berechnete erste und zweite Ableitung der Strom-Spannungskennlinie. Für das vermessene Plasma ergibt sich in diesem Fall eine Elektronentemperatur von 4,4 eV, eine Elektronendichte von  $3,79 \cdot 10^{16} \text{ 1/m}^3$  und ein Floatingpotential von -19 V. Bei der Vermessung des cw-Plasmas ergab sich das Problem, dass das Plasmavolumen für eine ungestörte Messung der Plasmaparameter zu klein ist und die Sonde sich somit zu nah am Bezugspotential befindet.

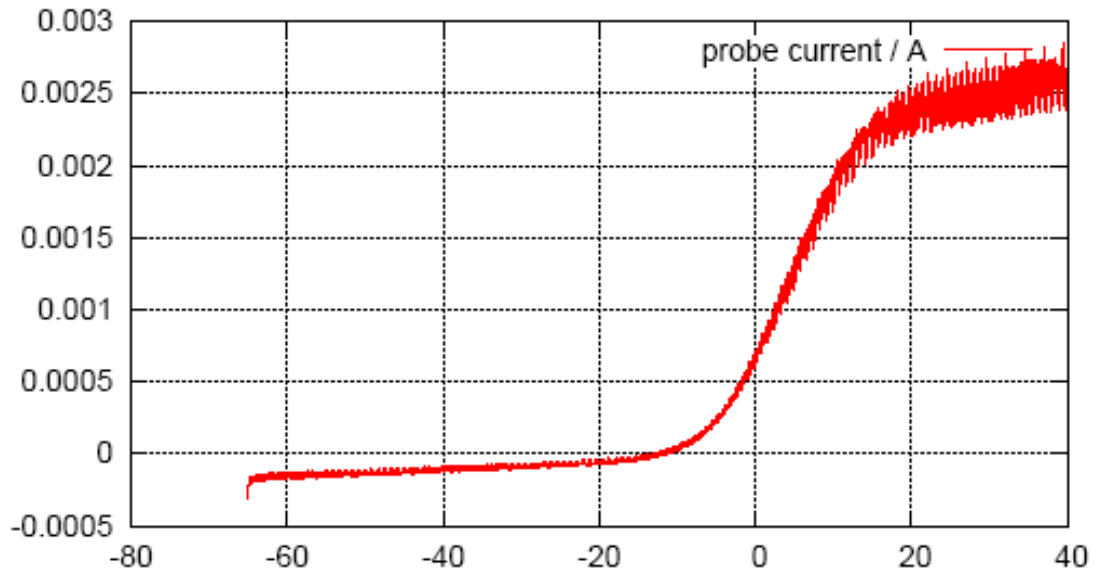


Abbildung 18: Ungefilterte Strom-Spannungskennlinie

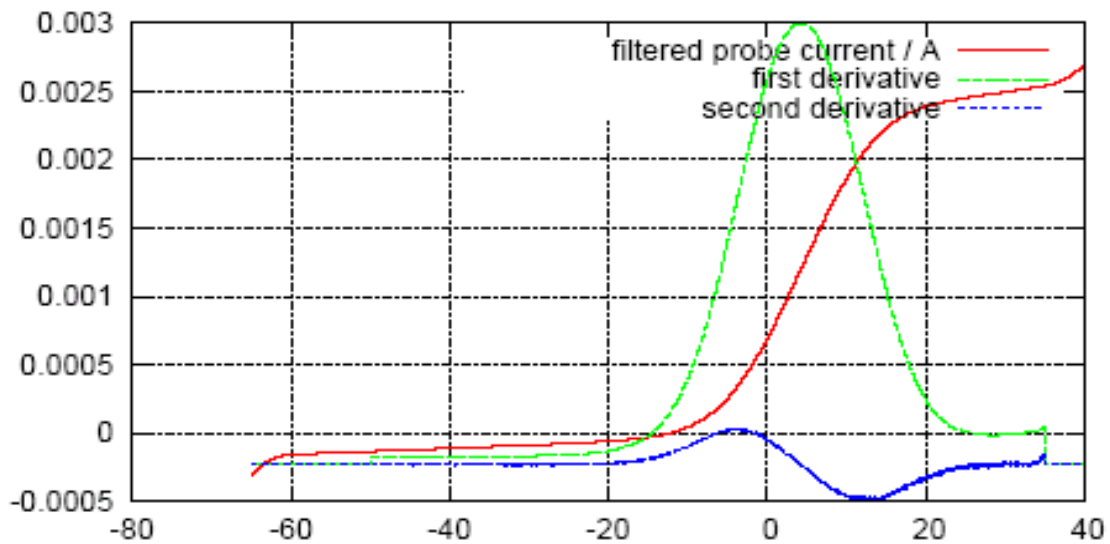
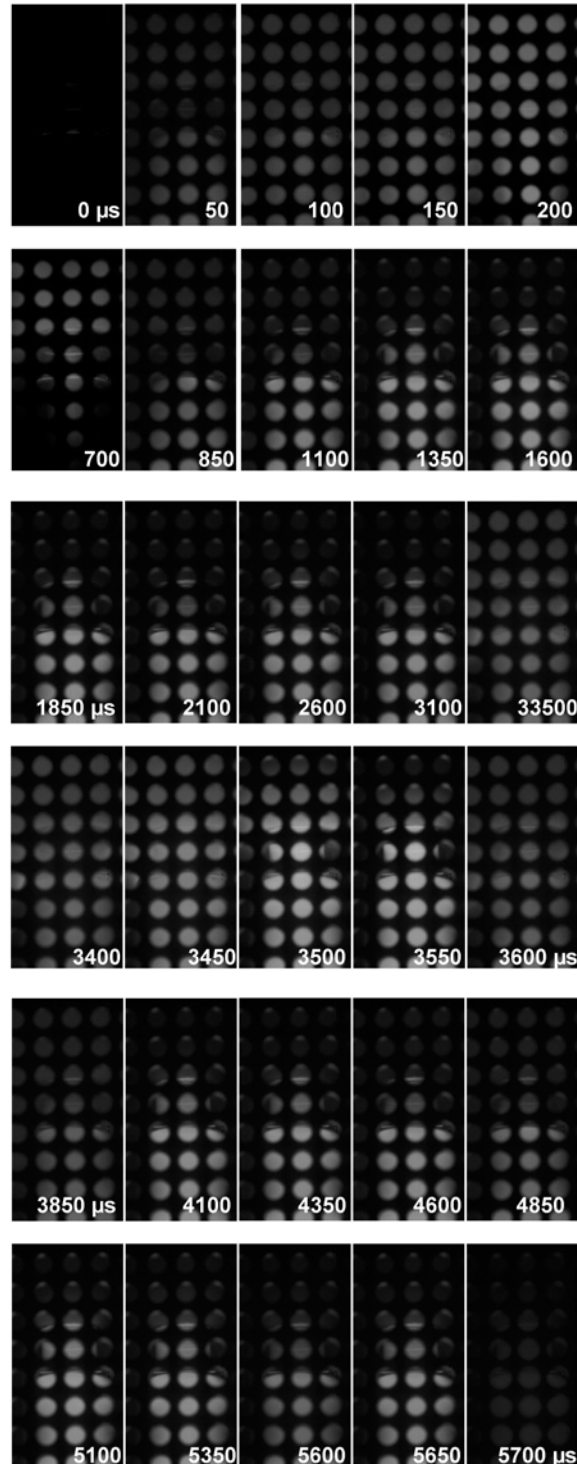


Abbildung 19: Gefilterte Strom-Spannungskennlinie und die berechnete erste und zweite Ableitung von Langmuirsonden-Messungen am Bosch-Testaufbau

### II.3.2 Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera (Mikrowellenkonzentratorstapel)

Der Zündvorgang des Plasmas in einem Hohlkörper (Pharma-Vial) wurde mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera genauer untersucht. Aufnahmen durch das untere Fenster des Mikrowellenkonzentratorstapels mit Quarzplatte sind in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20: Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen am Mikrowellenkonzentratorstapel**

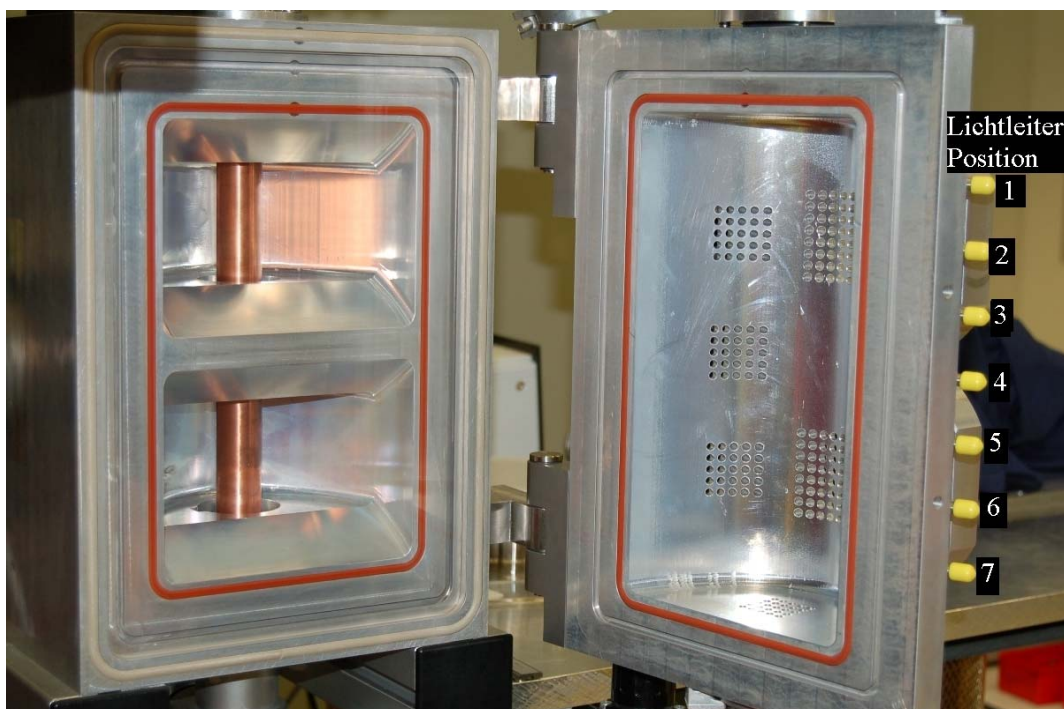
Die Aufnahmen zeigen ein Argonplasma bei einem Druck von 70 Pa und einer Pulsleistung von 0.5 kW. Das Magnetron wird in einem Pulsverhältnis von 10 zu 50 ms gepulst. Die Hochgeschwindigkeitskamera nimmt 20000 Bilder pro Sekunde mit einer Auflösung von 128 × 256 Pixeln auf.

Die Aufnahmen machen deutlich, dass das Plasma zunächst außerhalb des Hohlkörpers zündet. Erst nach 70  $\mu\text{s}$  zündet das Plasma am oberen Rand des Hohlkörpers und innerhalb. Die Intensität des Plasmas im Inneren steigt erst an (850 bis 2600  $\mu\text{s}$ ), bis sie nach etwa 3100  $\mu\text{s}$  im Inneren des Hohlkörpers erlischt. Erst nach 3450  $\mu\text{s}$  zündet das Plasma erneut im Inneren des Hohlkörpers. Im letzten Bild nach 5700  $\mu\text{s}$  brennt kein Plasma mehr, obwohl die Pulszeit 10000  $\mu\text{s}$  beträgt. Diese Diskrepanz von 4300  $\mu\text{s}$  ergibt sich zum einen aus der Zeit, die das Plasma nach dem Einschalten der Mikrowellen benötigt, um zu zünden. Des Weiteren lässt sich auf Grund der ausschließlichen Aufnahme des oberen oder des unteren Fensters nicht sagen, ob das Plasma erst im oberen Bereich zündet und erst später im unteren Teil. Außerdem ist es möglich, dass das Plasma im oberen Bereich länger brennt, während es im unteren Bereich bereits erloschen ist. Bei dem Versuch, die Aufnahme mit der Hochgeschwindigkeitskamera mit dem Magnetronpulssignal zu synchronisieren, hat sich gezeigt, dass das Pulssignal der Mikrowelle um bis zu  $\pm 200 \mu\text{s}$  schwankt. Dies ist somit die wahrscheinlichste Ursache für die Diskrepanz zwischen Pulszeit und beobachtetem Plasmaleuchten.

### II.3.3 Optische Emissions-Spektroskopie (Mikrowellenkonzentratorstapel)

Darüber hinaus wurde das Plasma im Mikrowellenkonzentratorstapel mit Hilfe von Optischen Emissions-Spektroskopiemessungen charakterisiert. Diese Untersuchungen wurden zum einen an der „leeren“ Plasmaquelle durchgeführt, aber vor allem unter Berücksichtigung von eingebrachten Substraten.

Abbildung 21 zeigt einen Blick in das Innere der Mikrowellenkonzentratorgeometrie mit Quarzfenster. Auf der linken Seite ist die Stabantenne hinter dem Quarzglasfenster, der Drucktrennung, zu erkennen. Auf der rechten Seite ist der Applikationsbereich zu sehen. Im mittleren Teil des Bodens befinden sich Löcher zur Absaugung.



**Abbildung 21: Positionierung der Lichtleiter-Durchführungen am Mikrowellenkonzentratorstapel**

In Abbildungen 22 und 23 sind Messungen mit der Optischen Emissionsspektroskopie abgebildet, die eine Aussage über die Homogenität des Plasmas in der Kammer machen. Untersucht wurde diese bei „leerem“ Aufbau, mit Teflonblock als Substrathalter und mit Hohlkörper auf dem Teflonblock. Auf der x-Achse ist die Lichtleiterposition von 1 bis 7 aufgetragen, deren Lage in Abbildung 21 eingezeichnet ist. Auf der y-Achse ist der Integralwert der Intensität der Strahlung über einem festen Wellenlängenbereich aufgetragen.

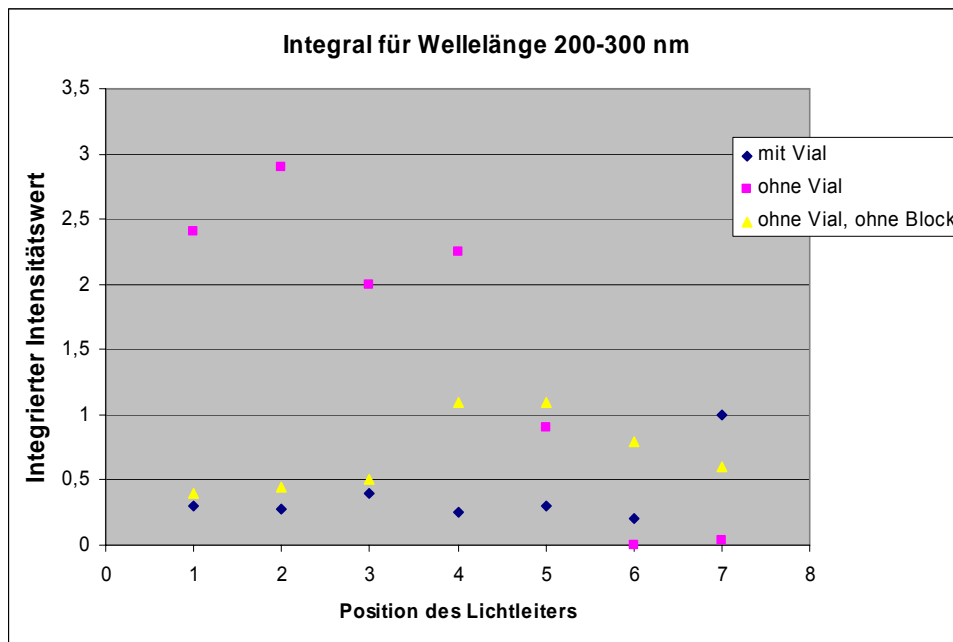


Abbildung 22: OES-Messungen im Wellenlängenbereich 200-300nm

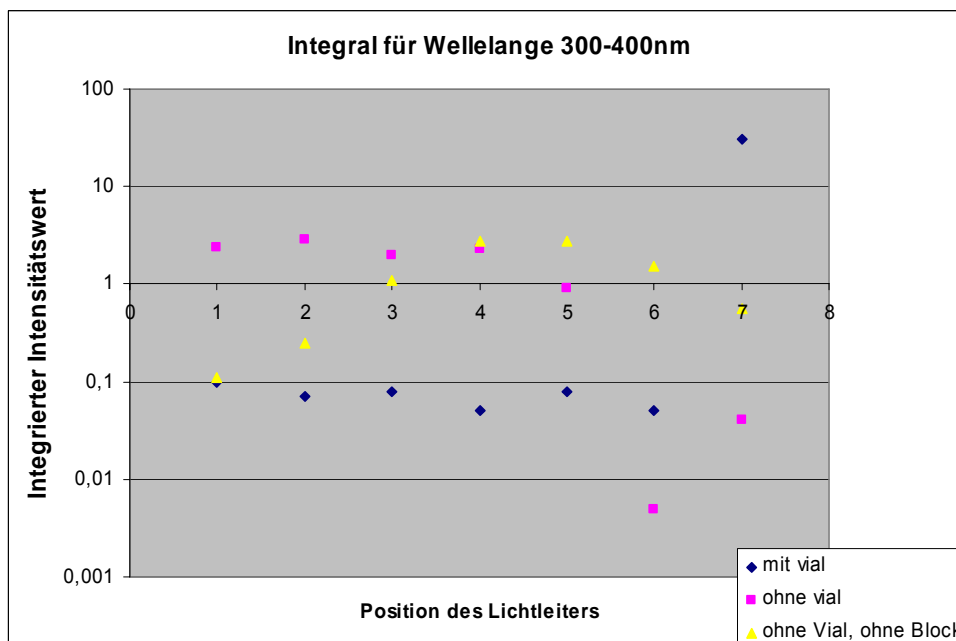
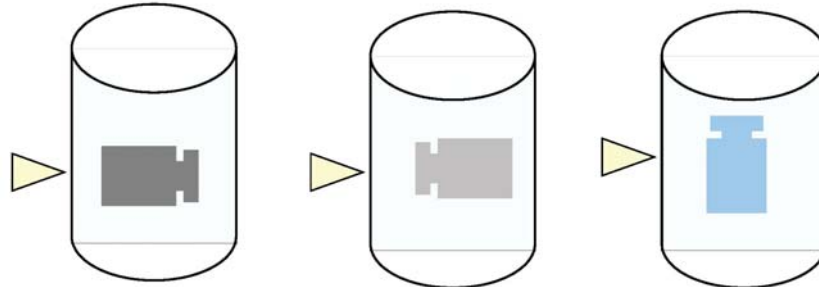


Abbildung 23: OES-Messungen im Wellenlängenbereich 300-400nm

Die Graphen machen deutlich, dass das Plasma eine bessere Homogenität hat, wenn die Kammer leer ist (gelbe Dreiecke). Die Messungen wurden für ein Plasma bei 0,27 mbar, einem Gasgemisch von 50 sccm Stickstoff, 200 sccm Sauerstoff und einer Mikrowellenleistung von 0,3 kW durchgeführt.

Die Messungen mit einem Vial im oberen Bereich der Plasmaquelle positioniert auf einem Teflonblock als Substrathalter, wurden durchgeführt entsprechend Abbildung 15. Das Plasma zündet innerhalb des Vials im oberen Bereich der Plasmaquelle und ist dort deutlich leucht stärker, als im unteren Bereich der Plasmaquelle. Die Messergebnisse in Abbildung 22 und 23 über die Höhe der Plasmaquelle zeigen allerdings eine höhere Intensität im unteren Bereich. Diese Ergebnisse lassen sich mit der Tatsache erklären, dass die Vials im betrachteten Wellenlängenbereich nicht transparent sind. Aus diesem Grund kann man nur die Intensität des Plasmas messen, das außerhalb um den Hohlkörper herum zündet.

In einem nächsten Versuch wurde gezielt die Position der Öffnung des Hohlkörpers im Bezug zur Position des Lichtleiters variiert. Wie in Abbildung 24 schematisch dargestellt, sieht der Lichtleiter einmal den Boden des Hohlkörpers (Links), einmal die Öffnung des Hohlkörpers (Mitte) und einmal die seitliche Wandung des Hohlkörpers (Rechts). Auf diese Weise kann ein Hinweis auf die Intensität des Plasmas im Hohlkörper ermittelt werden. Der Lichtleiter befand sich während der Messungen immer an der gleichen Position. Das Plasma zündet auch bei unterschiedlicher Orientierung immer auf die gleiche Weise im Hohlkörper.



**Abbildung 24: OES-Messungen mit unterschiedlichen Vial-Orientierungen im Bezug auf die Lichtleiterposition (gekennzeichnet durch Dreieck)**

Im „normalen“ Versuch sieht der Lichtleiter die Seite des Vials (Rechts in Abb. 23). In dieser Position ergaben sich für die Intensität über den Wellenlängenbereich von 200-300nm  $I_1=0,03$  und für den Wellenlängenbereich von 300-400nm  $I_2=0,2$ . Im nächsten Versuch befand sich die Öffnung des Hohlkörpers rechts, so dass der Lichtleiter den Boden des Vials sieht (Links in Abb. 23). Die Intensitätswerte ergaben  $I_1=0,02$  und  $I_2=0,11$ . Es ergeben sich also für die ersten beiden Messungen ähnlich niedrige Intensitätswerte. Orientiert man jedoch in einem weiteren Versuch das Vial so, dass der Lichtleiter genau in die Öffnung des Vials zeigt (Abb. 23 Mitte), ergeben sich sehr viel höhere Intensitätswerte. In diesem Fall erhält man Intensitätswerte, die vier Größenordnungen über den beiden vorangegangenen Werten liegen mit  $I_1=374,5$  und  $I_2=227,5$ . Diese Versuche machen deutlich, dass der Hohlkörper nicht transparent ist in dem untersuchten Wellenlängenbereich. Aber vor allem wird deutlich, dass das Plasma innerhalb des Hohlkörpers eine wesentlich höhere Intensität hat als außerhalb und somit ein freistehendes Plasma in einem Hohlkörper gezündet werden konnte.

### II.3.4 Sterilisationsuntersuchungen (Mikrowellenkonzentratorstapel)

Für die Sterilisation Untersuchungen wurden Luftplasmen bei unterschiedlichen Drücken, Leistungen und Plusfrequenzen verwendet. In der Plasmakammer wurde jeweils nur ein beimpfter Hohlkörper untersucht.

Der Sterilisationsprozess wird für die verschiedenen Arbeitsgasmischungen des vorigen Arbeitspaketes untersucht mit dem Ziel einer möglichst kurzen Behandlungsdauer zur Erreichung einer Sterilisation von 6 Größenordnungen (d.h. von ursprünglich  $10^6$  Sporen *Bacillus subtilis* keine Überlebenden nach der Plasmabehandlung) bei gleichzeitigem Erhalt aller relevanten Substrateigenschaften.

Der Projektmeilenstein stand zum Ende des Projektes im September 2007 an: „Sterilisation von Hohlkörpern“. Dieser Meilenstein konnte sowohl für Glas- als auch für Kunststoff-Hohlkörper mit dem Niederdruck-Plasma des Mikrowellenkonzentratorstapels erreicht werden.

Die Sterilisation eines Glas-Hohlkörpers konnte beispielsweise für ein Luft-Plasma bei einem Druck von 0.35mbar, einer cw Mikrowellenleistung von 0.4kW nach 50 Sekunden Behandlungsdauer nachgewiesen werden. Die Sterilisation von Kunststoff-Hohlkörpern ist auf Grund ihrer Thermolabilität deutlich schwieriger. Für ein Luft-Plasma bei einem Druck von 0.35mbar, einer gepulsten Mikrowellenleistung von 6kW im Puls und einer Puls-Anzeit von 8 Millisekunden und einer Puls-Auszeit von 60 Millisekunden waren die Kunststoff-Hohlkörper nach 144 Sekunden sterilisiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mit dem Mikrowellenplasma der Mikrowellenkonzentratorgeometrie möglich ist Kunststoff und Glas-Hohlkörper zu sterilisieren. Allerdings wird auch deutlich, dass für thermisch labilere Kunststoff-Hohlkörper nur gepulste Plasmaprozesse mit deutlich längeren Prozesszeiten zum Ziel führen.

### **III. Verwertungsplan**

#### **III.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Die Ergebnisse des Verbundvorhabens haben gezeigt, dass es möglich ist, mit Hilfe des Miwelko-Prinzips linear ausgedehnte, freistehende Plasmen zu erzeugen. Es zeigte sich jedoch, dass kleine Veränderungen an der Geometrie der Anordnung, an der Mikrowelleneinkopplung oder durch Einbringen von Substraten in den Applikationsraum das Plasma sehr stark beeinflussen. Die Erfolgsaussichten für eine wirtschaftliche Umsetzung dieses Quellenprinzips sind deshalb eher gering.

#### **III.2 Integrationsstudie**

Im Rahmen einer Integrationsstudie wurde untersucht, ob eine industrielle Applikation für die Sterilisation von Pharma-Verpackungen (Vials) möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass im Miwelko sowohl Glas- als auch Kunststoff-Vials um die geforderten 6log sterilisiert werden können. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist jedoch nur möglich, wenn alle Versuchsbedingungen exakt wiederholt werden. Kleinste Abweichungen in der Positionierung oder Größe der Pharmaverpackungen können dazu führen, dass in dem Hohlkörper gar kein Plasma zündet und somit auch keine Sterilisation stattfindet. Solch schmale Prozessfenster sind für die hohen Sicherheitsanforderungen in der Pharma-Verpackungstechnik nicht integrierbar.

#### **III.3 Zeithorizont für die wirtschaftliche Verwertung**

Die oben geschilderten technischen Schwierigkeiten, sowie die Notwendigkeit der Zulassung durch Behörden erlauben weder eine Aussage zur Realisierbarkeit des Verfahrens im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit oder Marktakzeptanz, noch eine Nennung eines Zeitraumes zur anlagentechnischen Realisation/Markteinführung – welchen Anwendungsfalles auch immer.

#### **III.4 Wirkung auf Arbeitsplätze**

Wegen der Unsicherheit bezüglich der wirtschaftlichen Verwertung der Ergebnisse ist momentan keine positive Wirkung auf Arbeitsplätze abzusehen.

### **IV. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderen Stellen**

Auch andere Forschergruppen haben versucht mit Mikrowellen-Anregung freistehende Plasmen zu erzeugen, z.B. die Gruppe von Prof. Engemann an der Universität Wuppertal. Die in diesem Verbundprojekt entwickelten Plasmaquellen sind jedoch die ersten und einzigen mit denen es möglich ist über einen längeren Zeitraum ein kontinuierlich angeregtes freistehendes Mikrowellenplasma mit linearer Ausdehnung zu erzeugen.

### **V. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Neben der Veröffentlichung der Projektergebnisse in Form des Abschlussberichtes hat Frau Stefanie Freudenstein bei der 13. Deutschen Fachtagung Plasmatechnologie in Bochum am 6. März 2007 einen Vortrag mit folgendem Titel gehalten:

*„Modellierung einer Mikrowellen-Plasmaquelle zum Betrieb eines freistehenden Niederdruckplasmas“*  
Des Weiteren wird eine Doktorarbeit mit dem Titel *„Modellierung eines Mikrowellenkonzentrators zur Zündung eines freistehenden Niederdruckplasmas“* von Frau Stefanie Freudenstein veröffentlicht.