Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

BMBF-Verbundprojekt: Campus PlasmaMed 2

Teilvorhaben: Campus PlasmaMed 9
Projekt "Mikrowellen-Plasmageneratoren"

Zuwendungsempfänger: Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
im Forschungsverbund Berlin e.V.
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin

Förderkennzeichen: 13 N 11187

Vorhabenbezeichnung: Mikrowellen-Plasmageneratoren

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2011 – 30.09.2013

Schlussbericht

Institutsleiter: Prof. Dr. G. Tränkle

Projektleiter: Prof. Dr. W. Heinrich

Autoren: Dr. R. Gesche
C. Bansleben
H.-E. Porteanu

I. Zielsetzung, Ausgangssituation und Ablauf des Vorhabens

I.1 Projektziele

Hauptziel des Campus PlasmaMed war eine Bündelung der Kompetenzen auf den Gebieten Plasmaphysik und Plasmatechnologie sowie der Lebenswissenschaften, insbesondere der Medizin. In der zweiten Förderphase sollten die bisher aufgezeigten und experimentell erforschten Möglichkeiten weiter fokussiert und in anwendungsnahe Demonstratoren überführt werden. Das Vorhaben umfasste 6 Leitthemen, u.a. das der Plasmaquellen.

Das Projekt "Mikrowellen-Plasmageneratoren" ist diesem Leitthema zuzuordnen. Es umfasst die Entwicklung und Bereitstellung neuartiger Quellen für die Medizintechnik, die sich durch den Betrieb mit Mikrowellen und die kompakte Bauweise auszeichnen.

I.2 Planung und Ablauf

Das Vorhaben war auf eine Laufzeit von 21 Monaten ausgelegt. Sämtliche Projektziele konnten während dieses Zeitraums erfolgreich und ohne Zeitverzug abgeschlossen werden.

I.3 Ausgangssituation bei Vorhabenbeginn

Plasmen bei Atmosphärendruck sind an sich keine ungewöhnlichen Phänomene und können beispielsweise als Leuchterscheinung einer Flamme oder eines Gewitterblitzes wahrgenommen werden. Diese Plasmen werden als heiße Plasmen bezeichnet, da sowohl die Ionen als auch die Elektronen im Gas eine hohe kinetische Energie und damit Temperatur aufweisen. Faktisch wird dies in Plasmanähe als große Hitze wahrgenommen.

Lange Zeit galt es als unmöglich, ein Atmosphärenplasma zu erzeugen, dass eine hohe Elektronentemperatur und zugleich eine niedrige Ionentemperatur aufweist. Erst um das Jahr 1994 wurden die theoretischen Grundlagen für die Existenz dieses sogenannten kalten Plasmas bei Atmosphärendruck gelegt [1]. Im Gegensatz zum heißen Plasma kommt es beim kalten Plasma nicht zu großer Wärmeentwicklung, da die wesentlich massereicheren Ionen kalt, also ohne nennenswerte kinetische Energie bleiben. Dies ist der Grund, weshalb kaltes Plasma grundsätzlich auch auf temperaturempfindlichen Oberflächen, wie z.B. Hautgewebe, eingesetzt werden kann.

Quellen für Atmosphärenplasmen sind seit etwa Mitte der 90er Jahre Gegenstand der Forschung. Bislang wurden sie jedoch noch nicht systematisch für medizinische Anwendungen untersucht, dies war das Ziel des Vorhabens Campus PlasmaMed.

Man unterscheidet zwei Arten von Atmosphärenplasmaquellen, die DBD- (dielectric barrier discharge) und die Mikrowellenplasmaquellen. Beide Varianten erzeugen mittels einer Resonatorstruktur ein hohes elektrisches Feld, welches an dieser Stelle zu einer Entladung führt. DBD-Quellen nutzen dazu elektrische Wechselfelder im kHz- bis MHz-Bereich, während Mikrowellenplasmaquellen im GHz-Bereich arbeiten. Im Gegensatz zu DBD-Quellen ist die Entladung bei Mikrowellenplasmaquellen wesentlich homogener, was zu gleichförmigeren Behandlungsergebnissen führt.

Am FBH wurden bereits im Vorfeld des Vorhabens PlasmaMed Mikrowellenatmosphärenquellen entwickelt. Im Rahmen des BMBF-Projekts „Biolip“ war eine solche Quelle auf Basis eines Halbleiter-Leistungsoszillators entstanden. Deren Effizienz und Stabilität sollte nun weiter verbessert und eine systematische Untersuchung zur medizinischen Brauchbarkeit durchgeführt werden, verbunden mit der Analyse von neuen Resonatorstrukturen

zur räumlichen Plasma-Erzeugung.

[1] M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, Thermal Plasmas: Fundamental And Applications. Volume I, Plenum Press, New York, ISBN: 0-306-44607-3, 1994, S. 452 ff.

I.4 Zusammenarbeiten mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in direkter Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern durchgeführt:

- Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP) in Greifswald
- Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK) in Greifswald

II. Ergebnisse

II.1 Aufgabenstellung

Das Projekt „Mikrowellenplasmageneratoren“ des FBH ist dem Teilvorhaben Campus PlasmaMed 9 zugeordnet. Ziel was die Entwicklung neuartiger, integrierter Mikrowellenplasmaquellen. Die Quellen setzen sich aus einem Resonator und einem Leistungsoszillator zusammen. Der Resonator ist mit dem Oszillator gekoppelt und bestimmt aufgrund seiner elektrischen Eigenschaften maßgeblich die Schwingfrequenz des Oszillators sowie die ins Plasma eingekoppelte Mikrowellenleistung. Vor und nach der Plasmazündung unterscheiden sich diese Eigenschaften sehr stark. Die Aufgabe besteht deshalb darin, eine Kombination aus Resonator und Oszillatorschaltung zu realisieren, die beide Zustände gut abdeckt. Das bedeutet, dass sowohl eine selbstständige Plasmazündung wie auch ein effizienter Plasmabetrieb erreicht wird.

Um die Aufgabenstellung zu lösen, war eine Unterteilung in zwei Arbeitspakete vorgesehen:

<u>AP 3.1:</u> Resonatorentwicklung

- Elektromagnetische Simulationen zur Ermittlung geeigneter Anregungs- und Resonatorgeometrien mit räumlich ausgedehnter Plasmaerzeugung
- Verifikation mit Hilfe von Teststrukturen, Charakterisierung (Bestimmung der benötigten Mikrowellenleistung für Zündung und Betrieb)
- Optimierung dieser Strukturen, auch im Hinblick auf Fertigungstoleranzen
- Entwicklung einer Ersatzschaltbildbeschreibung des Resonators für den Oszillator-Schaltungsentwurf

<u>AP 3.2:</u> Oszillatorentwicklung

- Schaltungsentwurf mit Hilfe des in AP 3.1 erarbeiteten Ersatzschaltbildmodells für den Resonator
- Simulationen und Design (Sicherstellung des Oszillatorbetriebs im Zustand ohne und mit Plasma, Bereitstellung von genügend Leistung in beiden Fällen)
- Design und Realisierung des Hybridaufbaus des Oszillators mit Resonator
- Charakterisierung des Mikrowellenverhaltens
- Verfügbarmachung von Quellen zur externen Charakterisierung und für Partner aus der Medizin

II.2 Wichtige wissenschaftlich-technische Ergebnisse

- Zusätzlich zu den rein elektrodynamischen Simulationen während des Resonatorentwurfs wurden Versuche zur Simulation des Plasmaverhaltens durchgeführt. Eine exakte Vorhersage des Plasmaverhaltens hätte große Vorteile hinsichtlich Beschleunigung und Genauigkeit des Resonatorentwurfs. Die Ergebnisse der Rechnungen, die mit der kommerziell erhältlichen Software COMSOL Multiphysics in Verbindung mit deren neuem Plasmamodul durchgeführt wurden, waren in vielen Fällen aber nicht plausibel und erforderten zudem einen hohen Rechenaufwand. Insgesamt gesehen hat sich dieses Werkzeug auf dem derzeitigen Entwicklungsstand für die beabsichtigten Anwendungen als nur wenig nützlich erwiesen.

- Um eine Vergrößerung der Wirkungsfläche zu erzielen, war in einem vorangegangenen Projekt für Niederdruckquellen (ProFIT-Vorhaben EPILOGOS II) ein Doppel-ICP-Resonator entwickelt worden. Die Eignung dieses Resonators bei Atmosphärendruck war bislang unbekannt und wurde nun untersucht. Tests mit dem Prozessgas Argon verliefen positiv.

- Auf Basis einer am FBH verfügbaren Quellenversion mit einer Ausgangsleistung im 10 W-Bereich wurde dem Projektpartner INP eine Testquelle für die physikalisch-chemische Charakterisierung sowie Anwendungstests zur Verfügung gestellt. Hierbei zeigte sich, dass eine effiziente Generation von Stickstoffmonoxid (NO) und Ozon erzielt wurde. Im Rahmen der Untersuchungen zur biologischen Wirksamkeit konnte eine nennenswerte Dezimierung einer Bakterienkultur nachgewiesen werden (Meilenstein M3.2).

- Um die verfügbare Mikrowellenleistung zu erhöhen, wurde ein neuer Leistungsoszillator entwickelt. Die Anordnung arbeitet nach dem Gegentaktprinzip und ist in der Lage, 50 W Mikrowellenleistung zu erzeugen, was etwa einer Verdreifachung gegenüber dem bisherigen Stand entspricht. Dabei ist es gelungen, den Oszillator auf sehr kleinem Raum zu realisieren, was die Integration von Resonator und Oszillator ermöglicht.

II.3 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Es sind keine Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Teilvorhabens relevant gewesen wären.

II.4 Verwertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden hauptsächlich in zweierlei Hinsicht verwertet (Details siehe Erfolgskontrollbericht):

- Durch Veröffentlichungen der Resultate auf den einschlägigen wissenschaftlichen Konferenzen, Tagungen und in Fachmagazinen, mit dem Ziel, das Potential der GaN-Technologie für die Realisierung effizienter Plasmaquellen zu zeigen.
- Durch die Weiterführung der Entwicklung integrierter Plasmaquellen am FBH. Daran besteht auch ein deutliches Interesse seitens der Industrie, was bereits zur Beantragung eines weiteren Förderprojekts auf diesem Gebiet geführt hat.

II.5 Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse wurden in folgenden Konferenzbeiträgen und Zeitschriften publiziert und damit der Fachwelt zugänglich gemacht:

[2] R. Bussiahn, R. Gesche, S. Kühn, and K.-D. Weltmann, "Integrated Microwave Atmospheric Plasma Source (IMAPlaS): thermal and spectroscopic properties and antimicrobial effect on B. atrophaeus spores," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 21, No. 065011, 2012.

[3] R. Bussiahn, N. Lembke, R. Gesche, T. v. Woedke, K.-D. Weltmann, "Plasmaquellen für biomedizinische Anwendungen," *Hygiene & Medizin 38 (2013)*, S. 212-216.

[4] C. Bansleben and W. Heinrich, "Compact High-Power Oscillator with 2.45 GHz Differential Output," *43rd European Microwave Conference (EuMC 2013) Digest*, Nuremberg, Germany, Oct. 8 – 10, 2013, S. 818-821.

II.6 Technischer Bericht

AP 3.1 Untersuchung und Weiterentwicklung der Plasmaresonatoren

Ziel der Aktivitäten in diesem Arbeitspaket war die Weiterentwicklung der Resonatorstrukturen, insbesondere im Hinblick auf räumlich ausgedehntere Wirkflächen. Einen wichtigen Teilaspekt stellte dabei die Untersuchung der Simulationswerkzeuge und ihrer Eignung für die betrachteten Strukturen dar.

Nachdem die Untersuchungen zu Schlitzquellen zu keinen erfolgversprechenden Ergebnissen führten (siehe Meilenstein M3.1), konzentrierten sich die Arbeiten zur Vergrößerung der Wirkfläche auf die Entwicklung induktiv gekoppelter Resonatoren (ICP). Ausgangspunkt war ein klassischer ICP-Resonator, wie er in Abb. 1 dargestellt ist. Dieses Resonatorprinzip ist bei Niederdruckplasmaquellen weitgehend etabliert. Im Rahmen des Vorhabens wurde nun ein ICP-Resonator erstmals bei Atmosphärendruck untersucht. Dabei konnte der Nachweis erbracht werden, dass dies möglich und der ICP-Resonator zur Erzeugung eines Atmosphärenplasmas geeignet ist.

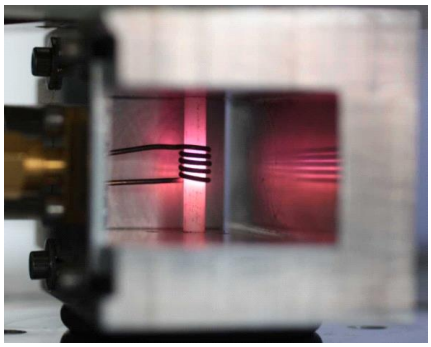


Abb. 1: Typischer ICP-Resonator mit 5 Windungen

Der nächster Schritt zielte darauf, die Wirkfläche und somit die mögliche Behandlungsfläche der Plasmaquelle zu vergrößern. Übliche Mikrowellenplasmaquellen verfügen über punktförmige Behandlungsbereiche in der Größenordnung einiger mm². Eine Möglichkeit, die Wirkfläche zu vergrößern, besteht darin, mehrere Quellen aneinander zu reihen. Dazu konnte am FBH auf Ergebnisse im Niederdruckbereich mit einer Doppel-ICP-Quelle zurückgegriffen werden, die im Rahmen eines ProFIT-Projektes (Epilogos II) entwickelt worden war und nun für den Fall des Atmosphärenplasmas genutzt wurde. Der so entstandene Doppel-ICP-Resonator kann mit einer einzigen Hochfrequenzzuführung zwei Plasmazonen anregen. Abb. 2 zeigt den Aufbau.

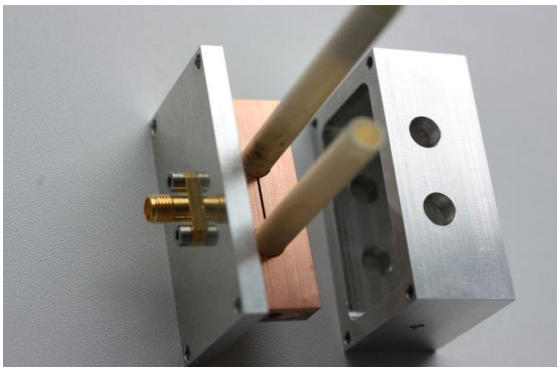


Abb. 2: Doppel-ICP-Resonator mit zwei Plasmazonen

Abb. 3 veranschaulicht die Wirkungsweise des Doppel-ICP-Resonators. Zwei Bohrungen in einem Kupferklotz bilden die Induktivitäten eines Schwingkreises, während ein schmaler Schlitz zwischen ihnen die zugehörige Kapazität schafft. Grün dargestellt ist der Verlauf der magnetischen Feldlinien, die beide Induktivitäten durchdringen und so eine optimale Verkopplung der Resonatorhälften schaffen. Der neue Doppel-ICP-Resonator wurde erfolgreich mit dem Prozessgas Argon getestet.

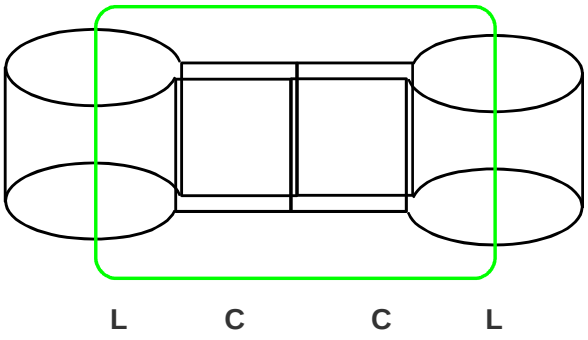


Abb. 3: Verlauf des Magnetfeldes im Doppel-ICP-Resonator

Belastbare Vorhersagen des Plasmaverhaltens in Bezug auf dessen elektrischen Einfluss auf den Resonator sowie die entstehenden chemischen Reaktionsprodukte sind bislang nur durch aufwändige HF- sowie plasmadiagnostische Messungen zu erhalten. Hätte man ein Werkzeug, um dieses Verhalten vorhersagen zu können, könnte die Entwicklung von Plasmaresonatoren enorm beschleunigt und verbessert werden. Bezüglich der Erzeugung aktiver chemischer Spezies böte es ferner eine Möglichkeit, diese gezielt zu maximieren, die Grenzen des technisch Machbaren zu erkennen und besser auszunutzen.

Seit Ende 2011 existiert eine kommerzielle Softwarelösung, die elektrische und plasmaphysikalische Prozesse mit ihren gegenseitigen Abhängigkeiten simulieren kann. Diese Option war vielversprechend und wurde im Rahmen des Projektes aufgegriffen. Begleitend zur Resonatorentwicklung und -optimierung wurden deshalb physikalische Plasmasimulationen mit der kommerziellen Software COMSOL Multiphysics durchgeführt.

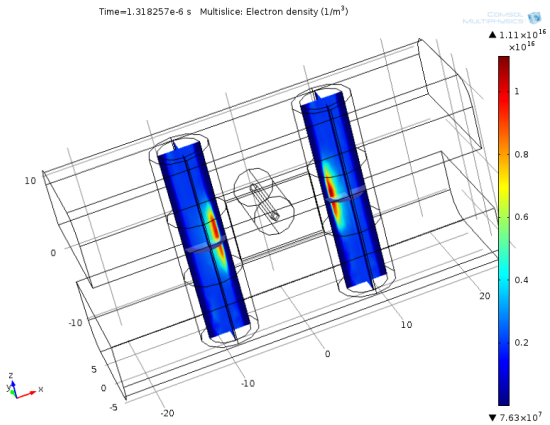


Abb. 4: Elektronendichte in Doppel-ICP-Quelle (rot: 10^{16} m^{-3})

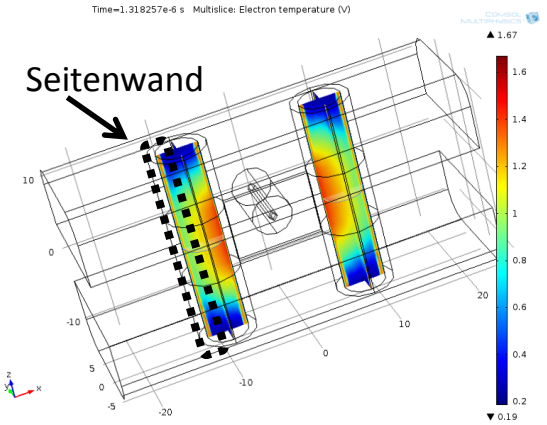


Abb. 5: Elektronentemperatur in Doppel-ICP-Quelle (rot: 1,5eV ≈ 15000° K)

Beispielhaft zeigt Abb. 4 die damit berechnete Elektronendichte einer Doppel-ICP-Quelle bei Atmosphärendruck nach etwa 1.3 µs Evolutionszeit. Die korrespondierende Elektronentemperatur ist in Abb. 5 dargestellt. Die aktiven Gebiete sind farblich deutlich erkennbar.

Im Verlauf zahlreicher Rechnungen wurde jedoch klar, dass das Plasmamodul noch nicht über die nötige Reife verfügt, um dreidimensionale Resonatorgeometrien mit Plasma zuverlässig berechnen zu können. Dies gilt insbesondere für den hier interessierenden Fall bei Atmosphärendruck. Die häufigsten Probleme verursachte die numerische Konvergenz. Oftmals mussten dem Algorithmus extreme Startbedingungen (z.B. Temperaturen, Elektronendichten, Gasflüsse) vorgegeben werden, um überhaupt Lösungen zu erhalten. Wenn Lösungen errechnet werden konnten, waren diese oftmals nicht plausibel bzw. stimmten nicht mit den experimentellen Beobachtungen überein. Ferner zeigte sich vielfach eine unrealistische Plasma-Evolution. Auch die in Abb. 5 sichtbare hohe Elektronentemperatur an den Seitenwänden der zylinderförmigen Röhrchen ist als unphysikalisch zu bewerten. Die Rechenzeit eines durchschnittlichen Problems mit einem festen Parametersatz konnte dabei mehrere Tage betragen, was unter dem Gesichtspunkt der oben genannten Unsicherheiten zu lang ist.

Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten wurden die Arbeiten mit dem Plasma-Modul nach intensiven Tests letztlich nicht fortgeführt und die Resonatorstrukturen auf Basis klassischer Elektrodynamik simuliert und konstruiert. Der elektrische Einfluss des Plasmas wurde dabei als komplexe Leitfähigkeit modelliert, deren Real- und Imaginärteil als Funktion der Elektronendichte variiert (Drude-Modell). Dieser Ansatz vernachlässigt zwar zahlreiche Effekte wie z.B. Temperatur, Druck, Gasfluss und Inhomogenität der Plasmazone, erschien aber angesichts der o.a. Probleme mit dem umfassenderen Simulationsverfahren als im Rahmen des Vorhabens einzig gangbarer Weg.

AP 3.2 Weiterentwicklung des Oszillators

Um ein Plasma im Resonator zu zünden und dieses dauerhaft zu erhalten, muss elektrische Leistung im Mikrowellenbereich eingespeist werden. Zur Mikrowellenleistungserzeugung existieren grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten:

1. Magnetron: Der Betrieb eines Magnetrons liefert ein extrem starkes Signal mit typisch mehr als 300 W Mikrowellenleistung. Diese Technik ist etabliert und kostengünstig, jedoch auch sehr platzaufwendig. Hinsichtlich der Ausgangsleistung ist diese Variante zudem für die hier interessierenden Anwendungen deutlich überdimensioniert. Die Signalfrequenz liegt i.a. im 2.45 GHz ISM-Frequenzband, ist aber nicht veränderbar. Außerdem ist eine Integration mit dem Resonator ist nicht möglich.

2. Oszillator mit Verstärkerkaskade: Die Erzeugung eines Signals im Bereich weniger mW wird durch einen Halbleiteroszillator (Local Oscillator – LO) realisiert. Nachfolgende Verstärkerstufen sorgen für eine Anhebung des Signalpegels auf Werte zwischen 10 W und 50 W, wie sie für den Plasmabetrieb erforderlich sind. Diese Methode setzt kostenintensive Verstärkertechnik voraus, kann aber platzsparender als die Magnetron-Variante realisiert werden. Die Signalfrequenz ist bei dieser Art der Leistungserzeugung einstellbar.

3. Leistungsoszillatoren: Diese Oszillatorversion ist in der Lage, hohe Ausgangsleistungen mittels Halbleitern zu erzeugen. Sie erfordern keinerlei zusätzliche Verstärkerstufen und können daher äußerst kompakt realisiert werden. Dieser Typ der Mikrowellenquellen eignet sich besonders gut für integrierte Resonator-Generator-Module. Die Signalfrequenz ist prinzipiell einstellbar. Die Kosten fallen wegen des geringen Materialeinsatzes moderat aus. Damit sind sie für die hier interessierenden Anwendungen besonders gut geeignet.

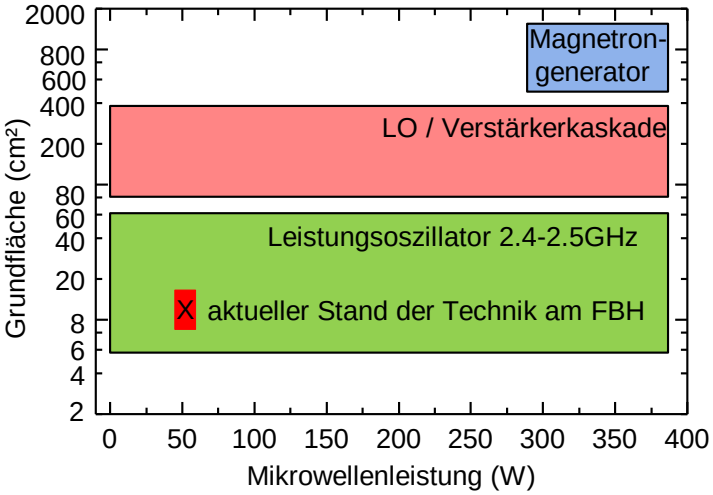


Abb. 6: Vergleich gängiger Methoden zur Mikrowellenleistungserzeugung in Bezug auf Grundfläche und erzeugte Leistung; etablierte Methoden (blau & rot) sowie neue platzsparende Variante (grün).

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung der Oszillatoren konzentrierten sich deshalb auf die Leistungsoszillatoren nach Prinzip 3. Bisherige Oszillatoren für den Plasmabetrieb lieferten lediglich maximal 15 W und zeigten eine starke Rückwirkung des Plasmas auf die Oszillationsfrequenz. Um im Rahmen des Gesamtverbunds rechtzeitig Quellen für die

Erprobung bereitstellen zu können, wurden bei den Arbeiten in AP 3.2 zwei separate Linien verfolgt:

- Die Entwicklung eines Oszillators mit höherer Leistung
- Die Optimierung einer vorhandenen Quellen-Version mit Ausgangsleistung im 10 W-Bereich, die dann dem Projektpartner INP zu Tests zur Verfügung gestellt werden konnte

Die Ergebnisse der beiden Ansätze sind im Folgenden beschrieben.

(i) Steigerung der Ausgangsleistung

Ziel war eine Erhöhung der Ausgangsleistung und des Miniaturisierungsgrads. Um in den Leistungsbereich um 50 W vorstoßen zu können, wurden moderne GaN-Leistungstransistoren eingesetzt, die am FBH verfügbar sind. Zusätzlich musste eine neue Schaltungstopologie angewandt werden, die die Leistungsbündelung mehrerer Transistoren platzsparend ermöglicht.

Grundlage für einen systematischen und realitätsnahen Schaltungsentwurf im Simulator ist ein exaktes elektrisches Großsignalmodell des eingesetzten Transistors. Abb. 7 zeigt das Ersatzschaltbild eines GaN-HEMT (High Electron Mobility Transistor).

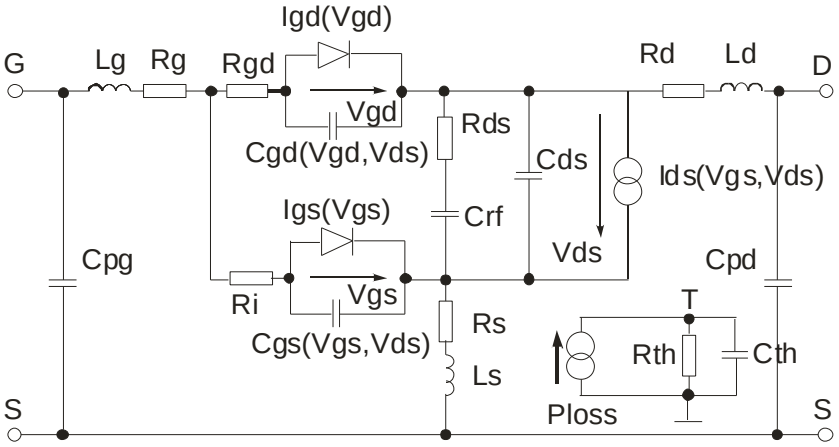


Abb. 7: Großsignalersatzschaltung (Angelov-Modell)

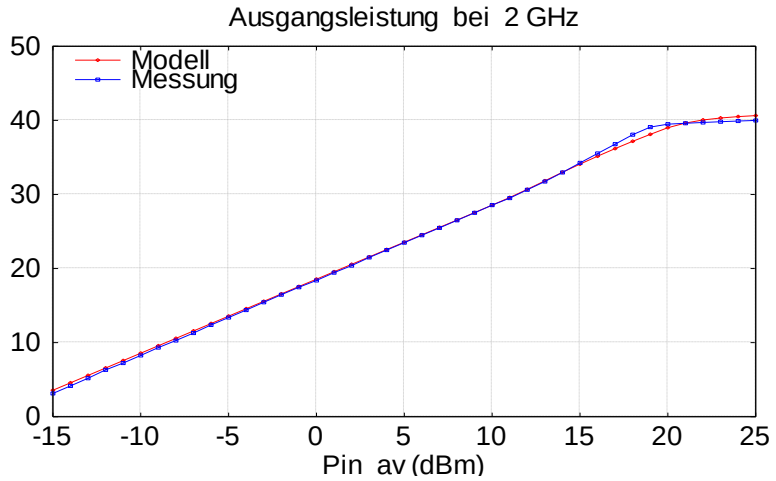


Abb. 8: GaN-HEMT: Ausgangsleistung als Funktion der Eingangsleistung - Vergleich von Modell und Messung.

Zur Bestimmung der Werte der Einzelelemente wurden Streuparametermessungen bei verschiedenen Transistorarbeitspunkten vorgenommen. Abb. 8 verdeutlicht die gute Übereinstimmung der Messungen mit den Werten aus der Modellsimulation. Im hier gezeigten Vergleich der Transferkennlinien im logarithmischen Maßstab erkennt man lediglich um den Kompressionspunkt herum eine gewisse Abweichung der Verläufe.

Ausgangspunkt für die Oszillatorentwicklung war die klassische kreuzgekoppelte Topologie (auch als „Push-Pull“ bezeichnet), wie in Abb. 9 dargestellt. Es zeigte sich, dass diese Schaltung, wenn man den geforderten Leistungsbereich berücksichtigt, oberhalb von 1.5 GHz nicht sinnvoll betrieben werden kann. Die Ursache dafür liegt hauptsächlich in der für Feldeffekttransistoren charakteristischen Gate-Source-Kapazität, die bei Transistoren für hohe Ausgangsleistungen wächst und deshalb für die hier interessierenden Verhältnisse relativ große Werte annimmt. Dies führt im Zusammenwirken mit der Leitung TL1, deren minimale Länge durch die Größe der Transistorchips begrenzt ist, zu einer starken Phasendrehung und damit zum Absinken der maximal erzielbaren Oszillationsfrequenz.

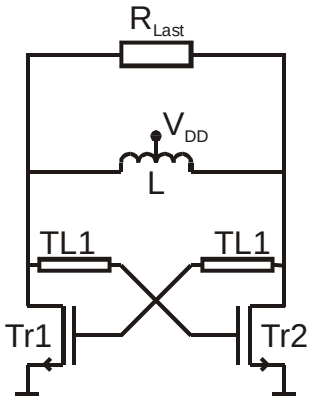


Abb. 9: Klassischer kreuz-gekoppelter Oszillator

Um dennoch hohe Leistungen auch oberhalb von 1.5 GHz erzeugen zu können, wurde die Schaltung wie in Abb. 10 dargestellt geändert.

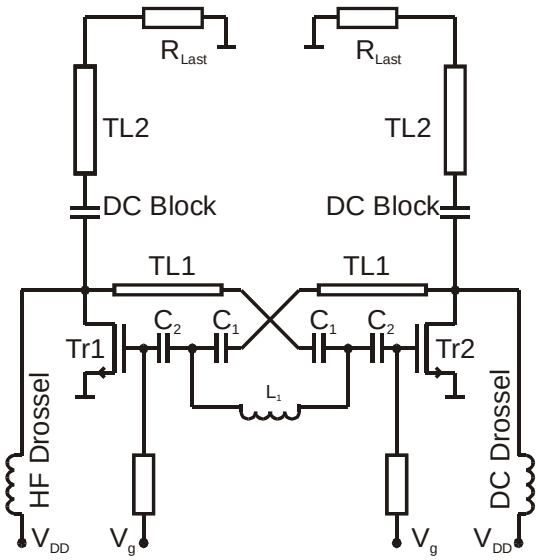


Abb. 10: Modifizierter kreuzgekoppelter Oszillator

Die wesentlichen Änderungen werden durch die zusätzlichen Elemente C1, C2 und L1 erreicht. Der modifizierte Oszillator verfügt wie die Originalversion über zwei Ausgänge, die zwei gegenphasige Signale bereitstellen. Bei Bedarf können diese zu einem einzigen Signal mit doppelter Leistung kombiniert werden. Somit können sowohl Resonatoren mit erdsymmetrischen als auch erdunsymmetrischen Elektrodenanordnungen versorgt werden. TL2 dient der Anpassung der Oszillatorausgänge an die gewünschte Lastimpedanz durch Impedanztransformation.

Ein Prototyp mit 50 Ohm-Ausgängen wurde aufgebaut und vermessen (siehe Abb. 11). Dabei konnte eine kombinierte Ausgangsleistung von ca. 40 W bei 39 % Effizienz nachgewiesen werden. Die Oszillationsfrequenz liegt bei 2.42 GHz. Mit 11 cm² zeichnet sich die Oszillatorschaltung außerdem durch ihren sehr geringen Platzbedarf aus. Die Ausgangsleistung des Oszillators ist direkt durch die Betriebsspannung V_{DD} einstellbar.

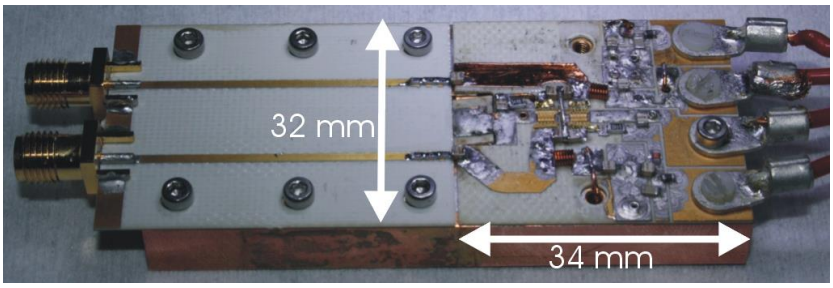


Abb. 11: Foto des Oszillatorprototyps

Einen Vergleich simulierter und gemessener Ausgangsleistungen in Abhängigkeit der Betriebsspannung zeigt Abb. 12. Dargestellt sind die gemessenen Ausgangsleistungen beider Ausgänge einzeln (grün, rot) sowie deren Summe (blau). Vergleicht man letztere mit den Daten der Simulation (schwarz), so erkennt man eine gute Übereinstimmung.

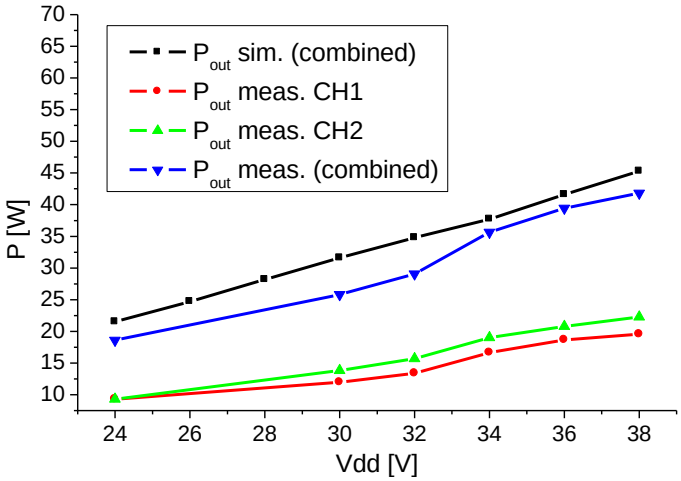
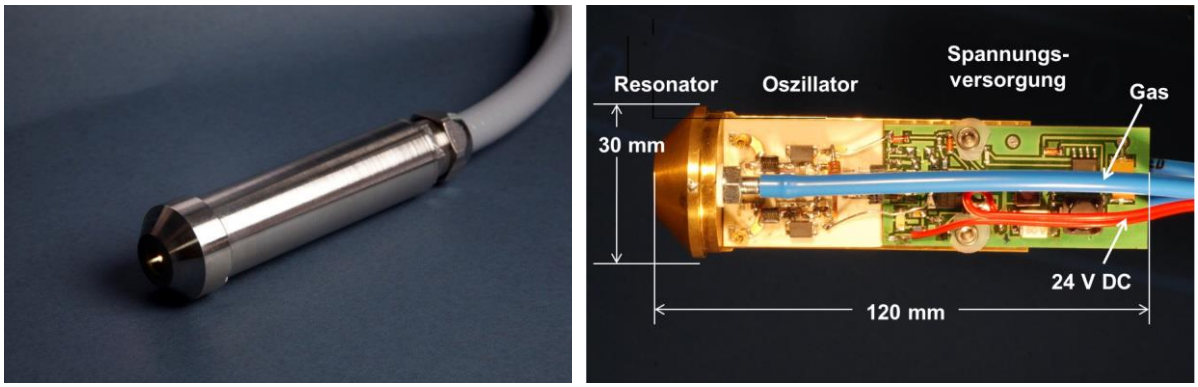


Abb. 12: Ausgangsleistung als Funktion der Betriebsspannung

(ii) Testquelle für Projektpartner – Erprobung und Charakterisierung

Den Ausgangspunkt für die Bereitstellung einer Testquelle für Anwendungsuntersuchungen bildete eine eigenentwickelte atmosphärische Punktplasmaquelle (IMAPLaS), die als gehäustes Gerät in Abb. 13 a dargestellt ist. Im vorderen Teil befindet sich der Resonator mit angekoppeltem Leistungsoszillator, während Spannungs- und Gasversorgung im hinteren Bereich untergebracht sind. Im Rahmen des Projekts wurden diese Plasmaquelle dem Projektpartner INP für Untersuchungen zur Verfügung gestellt und damit die Voraussetzungen für Meilenstein M3.2 erfüllt.

Im Projektverlauf wurden noch Schwächen dieser Quellenversion in Bezug auf eine reproduzierbare Herstellung mit vertretbarem Aufwand bei der Einstellung und Inbetriebnahme. Diese waren für die Testquelle selbst und die damit durchgeführten Untersuchungen ohne Belang, sie konnten aber im Projektverlauf durch ein systematisches Redesign kritischer Teile deutlich verbessert werden.



a) b)

Abb. 13: IMAPlaS Atmosphären-Plasmaquelle: a) Behandlungsstift, b) innerer Aufbau

Die Plasmaquelle wurde hinsichtlich ihrer spektroskopischen, thermischen und biologischen Eigenschaften beim Betrieb mit den Prozessgasen N_2, Ar und He untersucht [2]. Zunächst wurde festgestellt, dass ein breites UV-Spektrum im Bereich zwischen Vakuum-UV und UVA emittiert wird. Anschließend wurden entfernungsabhängige Verläufe der Plasmatemperatur ermittelt. Dies war wichtig, um bei der folgenden Untersuchung zur biologischen Wirksamkeit sinnvolle Behandlungsentfernungen wählen zu können, bei der thermische Effekte auf die Proben ausgeschlossen sind. Der biologische Effekt wurde anhand von Testreihen mit B. atrophaeus Bakterien erforscht. Nach drei Minuten Behandlungszeit konnte ein Reduktionsfaktor von 10.000 nachgewiesen werden.

Am Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK) in Greifswald wurde die IMAPlaS einer weiteren Arbeitsgruppe zugänglich gemacht. Diese nutzte die Plasmaquelle zur definierten Erzeugung von Stickstoffmonoxid (NO) in Wasser (H_2O). Mit der ECD-Methode (electrochemical detection) wurde die Stoffmengenkonzentration von NO bestimmt, die in einem H_2O-Volumen von 7.5 ml gelöst wurde. Etwa anderthalb Minuten nach Beginn der Plasmabehandlung konnte ein linearer Anstieg der NO-Stoffmengenkonzentration mit 0.1 µM / min nachgewiesen werden (Abb. 14). Dies bestätigte die Fähigkeit der Quelle, effizient NO zu erzeugen.

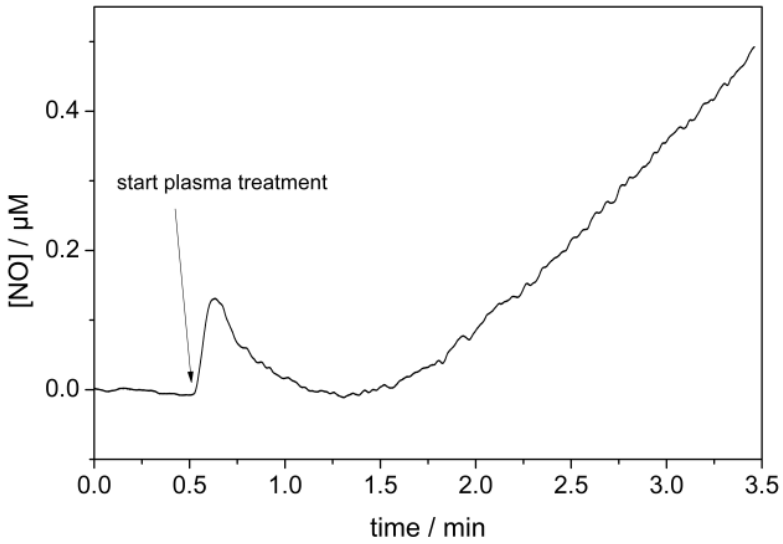


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Stoffmengenkonzentration von in Wasser gelöstem Stickstoffmonoxid (NO).

Weiterhin wurde die Abhängigkeit der Stickstoffmonoxid- sowie der Ozon-Erzeugung vom Gasfluss (Prozessgas Luft) untersucht (siehe Abb. 15). Hierbei zeigte sich ein gegenläufiger Trend, wobei ein niedriger Gasfluss die Bildung von Stickstoffmonoxid und ein höherer Gasfluss die Bildung von Ozon begünstigt [3]. Diese Erkenntnisse helfen dabei, den Arbeitspunkt der IMAPlaS zukünftig für eine chemische Spezies zu optimieren und so dem gewünschten biologischen Wirkmechanismus anzupassen.

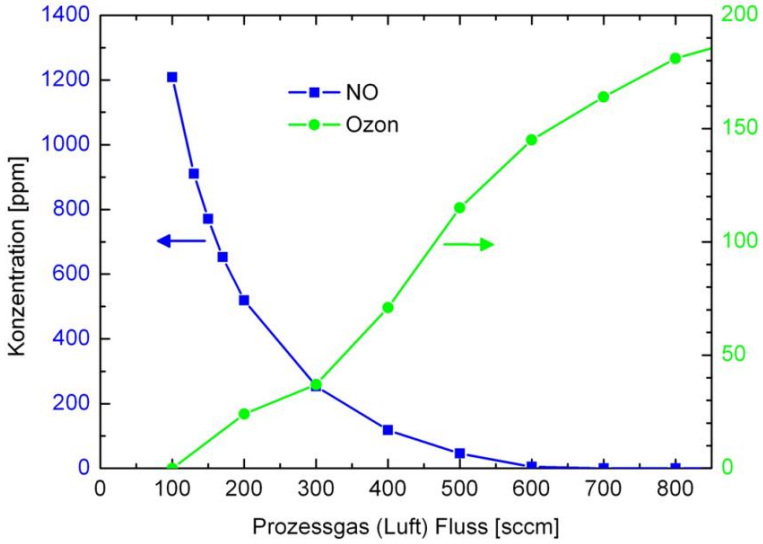


Abb. 15: Konzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO) und Ozon in Abhängigkeit des Gasflusses von Luft.

Mit Abschluss dieser Untersuchungen wurde Meilenstein M3.2 erfüllt.