

MWI Micro Wave Ignition AG

Vorprojekt zur Abschätzung des Potentials
der mwi – Mikrowellenzündung

Förderung des Vorhabens durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

AZ. 26486 – 21/0

Abschlussbericht

April 2011

Armin Gallatz, Klaus Wiese

MWI Micro Wave Ignition AG

Mühlheimer Straße 11, 72186 Empfingen

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

1. Zusammenfassung	S. 4
2. Einleitung	S. 5
3. Vorprojekt Mikrowellenzündung	S. 8
3.1 Grundlagen der mwi-Mikrowellenzündung	S. 8
3.2 Versuchsanordnung	S.10
3.3 Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Funktionsweise	S.11
3.4 Fotos des Versuchsaufbaus	S.12
3.5 Simulationen	S.16
3.5.1 Untersuchung des Einkoppelfensters	S.16
3.5.2 Feldverteilung und Reflexionsfaktor	S.18
3.5.3 Zusammenfassung und Beurteilung der Simulation	S.22
3.6 Versuchsdurchführung	S.22
4. Fazit	S.24

Literaturverzeichnis

Anhänge

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

- [Bild 1] Entflammungsverlauf
- [Bild 2] Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus
- [Bild 3] Versuchstisch mit Linearmotor, Federpaket, Brennkammer
- [Bild 4] Versuchsaufbau mit Luftversorgung, Kraftstoffversorgung, Mikrowellenbaugruppen und Hochspannungsnetzteil
- [Bild 5] Brennkammer mit elektrischer Heizung
- [Bild 6] Zylinderkopf mit zentralem Piezo-Injektor
- [Bild 7] Zentrale Steuerelektronik
- [Bild 8] Rechnerunterstütztes Oszilloskop
- [Bild 9] Impulsmagnetron 94 GHz
- [Bild 10] Mikrowellenzündkerze
- [Bild 11] Reflexionsamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz und der Fensterdicke
- [Bild 12] Feldstärkenverteilung im Brennraum und Eingangsreflexionsfaktor $\tan \delta = 10^{-4}$
- [Bild 13] Feldstärkenverteilung im Brennraum und Eingangsreflexionsfaktor $\tan \delta = 35 \times 10^{-4}$
- [Bild 14] Kolbenboden

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.
MWI	Micro Wave Ignition
TU	Technische Universität
λ	Lambda, Verbrennungsluftverhältnis
GDI	Gasoline Direct Injection, Benzindirekteinspritzung
H _{1,0}	Schwingungsmode in einem Rechteckhohlwellenleiter
GHz	Gigahertz, 10 ⁹ / sec
Ka-Band	Frequenzbereich 26,5 – 40 GHz
W-Band	Frequenzbereich 75 – 110 GHz
kV	1000 Volt
CAD	Computer Aided Design. Rechnergestützter Entwurf
ϵ_r	Permittivität
tan δ	Verlustfaktor
κ	Leitwert [S]

1. Zusammenfassung

Die Basisinnovation zielt auf eine Mikrowellenzündung für Verbrennungsmotoren anstelle der heutigen Hochspannungszündung, die eine Kraftstoffeinsparung bis zu 30 % und eine Abgasreduzierung bis zu 80 % ermöglicht. Grundlage der Innovation ist die Raumzündung eines Kraftstoff-Luftgemisches mit Hilfe von Mikrowellen, deren Grundlagen am Institut für Physikalische Chemie in Ekaterinburg (RU) von Prof. Nikita Hirsch erforscht wurden.

Zum Zweck der Weiterentwicklung und kommerziellen Nutzung der Technologie ist die MWI Micro Wave Ignition AG (frühere MWI GmbH) gegründet worden. Ein entsprechendes Basispatent DE10356916.2 ist mittlerweile in Deutschland, den USA US 7,70,551, Mexiko MEX 265403 und China CN1898468 erteilt worden. Die PTC-Anmeldung befindet sich unter PCT/EP204/013421 im laufenden Verfahren.

Stand der Technik ist heute eine punktuelle Zündung eines Kraftstoff-Luftgemisches von Ottomotoren mit Hilfe einer Hochspannungs-Zündkerze. Diese wird praktisch für alle modernen Ottomotoren eingesetzt. Zur Verbesserung der Entflammung, mit dem Ziel der Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Abgasemission, befinden sich Zündverfahren wie Coronazündung oder Laserzündung in der Entwicklung, die eine Zündung an möglichst vielen Zündpunkten erreichen sollen und somit eine Raumzündung annähern. Die bei der MWI-AG entwickelte Mikrowellenzündung geht einen Schritt weiter und zielt auf eine vollständige Raumzündung. Durch die Raumzündung wird die laminare Verbrennungsphase des Verbrennungsprozesses übersprungen, die nicht zur Erzeugung der Nutzleistung eines Verbrennungsmotors beiträgt. Die Kraftstoffmenge für die laminare Phase wird weitgehend eingespart und eine Zündung von sehr mageren Kraftstoff-Luftgemischen wird erstmals sicher ermöglicht. Die Verbrennungsprozesse laufen vollständiger und sauberer ab.

Zur Entwicklung der Mikrowellenzündung sind erhebliche finanzielle Ressourcen erforderlich. Zielsetzung dieses Vorprojektes ist die Darstellung einer Mikrowellenzündung und die statische Zündung sehr magerer Gemische. Um den finanziellen Aufwand zu begrenzen, ist der Versuchsaufbau im Eigenbau erstellt sowie gemietete Messgeräte eingesetzt worden. Es sind möglichst umfangreich Simulationen durchgeführt worden.

Die Zielsetzung einer reproduzierbaren Zündung wurde nicht erreicht, jedoch wurden durch die Mikrowellenstrahlung chemische Reaktionen als Vorstufe einer vollständigen Zündung ausgelöst. Die notwendigen weiterführenden Untersuchungen sollen mit den entsprechenden Messgeräten und unter Einbindung von externen Instituten in einem weiterführenden Projekt durchgeführt werden.

Das „Vorprojekt zu Abschätzung des Potentials der MWI-Mikrowellenzündung“ der MWI Micro Wave Ignition AG, Empingen, ist durch private Investoren unter Förderung der DBU, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, finanziert worden.

2. Einleitung

Die Verbrauchsreduzierung von Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren steht seit vielen Jahren sowohl in der Automobilindustrie als auch bei den Herstellern von stationären Motoren und von Großmotoren im Fokus der Entwicklung. In den letzten 20 Jahren wurden in diesem Gebiet Verbrauchsminderungen von mindestens 50 % unter vergleichbaren Bedingungen erzielt. Im Wesentlichen wurden Verbesserungen durch den Einsatz von neuen Brennverfahren erzielt, die sowohl für Verbrennungsmotoren für Ottokraftstoffe, für Dieselmotoren und für Gasmotoren zum Einsatz kommen.

In diesem Feld hat eine evolutionäre Entwicklung von Technologien stattgefunden, insbesondere sind auf dem Feld der Einspritzverfahren erhebliche Innovationen wie z.B. Hochdruckeinspritzverfahren und Mehrfacheinspritzung durch den Einsatz von neuen Verfahren und Werkstoffen ermöglicht worden. Direkteinspritzverfahren und immer höhere Einspritzdrücke in Verbindung mit Abgasturboaufladung erlauben eine effizientere Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Die Verbesserungen auf diesem Gebiet sind erheblich und betragen je nach Angabe der Hersteller zwischen 5 und 20 % für jede neue Motorengeneration.

Im Zuge der nationalen und internationalen Gesetzgebung sind parallel immer strengere Gesetze für die Schadstoffemission der Motoren verabschiedet worden, deren Einhaltung nur mit sehr fein abgestimmten Algorithmen der elektronischen Steuerung der Motoren und des gesamten Antriebs- und Abgasstranges möglich war. Dabei steht einer Begrenzung des Aufwandes der Hardware eine aufwendige Entwicklung der Software gegenüber, in der immer mehr Parameter, deren Toleranzen, sowie Alterungsvorgänge der Komponenten berücksichtigt werden müssen.

Im Bereich der Abgassysteme dieser Verbrennungsmotoren kommen mittlerweile mehrere und verschiedenartige Typen von Katalysatoren in einem System zum Einsatz. Insbesondere die Verwendung von Edelmetallen wie Platin und Palladium in diesen Katalysatoren führt zu einem hohen Ressourceneinsatz. Ein Recycling dieser Stoffe ist mit erheblichem technologischem Aufwand möglich.

Einen weiteren Versuch zur kontinuierlichen Verbesserung der Umweltbilanz stellt die Entwicklung von neuen Kraftstoffen, insbesondere von Designerkraftstoffen unter Beimischung von landwirtschaftlich erzeugten Bio-Ölen und Bio-Alkoholen dar. Es wird deutlich, dass eine weltweite Erzeugung dieser Bio-Kraftstoffe nicht ohne Einfluss auf die weltweite Klimabilanz sein wird.

Erdgas wird in stationäre Gasmotoren in Kraftwerken und Blockheizkraftwerken verwendet. Hier sind vergleichsweise umweltschonende Verbrennungsverfahren entwickelt worden. Insbesondere die Verbrennung von sehr mageren Gemischen steht im Fokus der Entwicklung.

Die aufgezeigten Themenfelder geben lediglich einen Teilbereich der Anstrengungen wieder und zeigen deutlich, dass sich das Thema der Verbrauchsreduzierung und Schadstoffreduzierung von Verbrennungsmotoren noch lange nicht am Ende der Entwicklung befindet. Auf absehbare Zeit werden deshalb Aufwendungen für Forschung und Entwicklung von verbesserten Verbrennungskonzepten in erheblichem Umfang getätigt werden.

Um sich dem Thema der elektrischen Zündanlage für Verbrennungsmotoren zu nähern, die einen erheblichen Einfluss auf Brennverfahren, Kraftstoffverbrauch und Abgasverhalten hat, kann hier nur ein kurzer Einblick in die bisherige Entwicklung gegeben werden.

Seit über 100 Jahren ist die Hochspannungszündung mit der Entflammung eines Kraftstoff-Luftgemisches durch einen Funkenüberschlag mit Hilfe einer Zündkerze bekannt. Diese Entwicklung hat dem schnell laufenden Ottomotor überhaupt erst zum Durchbruch verholfen. Schon in den 1930-er Jahren wurden Versuche unternommen, mit mehreren Zündkerzen an einem Zylinder die Funktionssicherheit zu erhöhen und eine verbesserte Entflammung zu erreichen. Diese wurden jedoch nur in kleiner Stückzahl in Flugmotoren eingesetzt und erreichten keine große Marktdurchdringung.

Heutige Motorenkonzepte arbeiten vergleichsweise dicht am sog. stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Verhältnis von 1:14,7 (Gewichts-Verhältnis, Lambda $\lambda = 1$), d.h. eine Entflammung ist vergleichsweise einfach mit Hilfe eines Funkenüberschlages möglich. Je nach Brennprozess sind Lambda-Werte von 1,2 möglich, die Grenze liegt bei 1,35. Abhängig vom Betriebszustand des Motors ist es sinnvoll, zur weiteren Verbrauchs- und Emissionsreduzierung eine weitere Abmagerung des Gemisches oder einen Schichtladungsbetrieb einzustellen. Durch Multifunkenzündung wird die Zündgrenze immer weiter herausgeschoben, parallel wird der Brennverlauf modelliert. Die Zündung von Kraftstoff-Luftgemischen bei höherer Verdichtung ermöglicht weitere Verbesserungen, jedoch ist eine sichere Entflammung mit Zündkerzen kaum noch erreichbar.

Es ist erkennbar, dass mit alternativen Zündtechnologien die erkennbaren Potentiale genutzt und weitere Verbesserungen möglich werden. Neue Technologien wie Plasma-, Corona- oder Laserzündung sind seit einigen Jahren in der Entwicklung.

Für stationäre Gasmotoren mit Laserzündung ist z.B. an Argonne National Laboratory gezeigt worden, dass sich die Flammausbreitungsgeschwindigkeiten in allen Verbrennungsphasen erhöhen lassen [1]. Die erhöhte Brenngeschwindigkeit führt zu einem rascheren und intensiveren Kraftstoffumsatz und zieht in Verbindung mit einer Abmagerung des Gemisches eine signifikante Verringerung des Verbrauches und der Emissionen nach sich. Für Anwendung in Ottomotoren gibt es mittlerweile zahlreiche Untersuchungen sowohl im Homogen- als auch im Schichtbetrieb eines strahlgeführten Brennverfahrens [2] [3]. Im Rahmen der Arbeitsgruppe „neue Zündverfahren“ des FVV werden aktuell Untersuchungen durch

Prof. Dr. Geringer, Technische Universität Wien, und deren Kooperationspartner durchgeführt.

Das Verfahren der Mikrowellenzündung nach dem MWI – Verfahren geht hier noch einen Schritt weiter in der Überlegung, eine möglichst gleichmäßige Raumzündung und die Zündung von mageren Gemischen zu erreichen.

Die Idee der Mikrowellenzündung basiert auf der Grundlagenforschung von Prof. Hirsch am Institut für Physikalische Chemie in Ekaterinburg (Ru) aus den 1990-er Jahren. Diese Idee wurde aus Untersuchungen zum Absorptionsvermögen von langkettigen Kohlenwasserstoffen für gepulste Mikrowellenstrahlung abgeleitet. Dabei wurde entdeckt, dass bei bestimmten Frequenzen und Pulsfolgen ein zunächst nicht erwartetes Aufbrechen dieser langkettigen Kohlenwasserstoffe zu beobachten war. Die entstehenden Radikale können genutzt werden um die Radikalkettenreaktion eines Verbrennungsvorganges auszulösen. Es wird hier also ein grundlegendes anderes Konzept verfolgt als bei der räumlichen Expansion eines Zündplasmas.

Zum Zeitpunkt der Entdeckung der physikalisch-chemischen Effekte waren die Möglichkeiten der Nutzung für Verbrennungskraftmaschinen nur rudimentär zu erahnen.

Das Gebiet von neuen Zündsystemen mit einem Raumzündeffekt bietet nach Einschätzungen von Fachleuten des FVV das größte Potential für eine signifikante Verbesserung. Eine Mikrowellenzündung nach dem mwi-Verfahren ist nach unserer Einschätzung kompatibel mit allen modernen Brennverfahren und könnte diese noch weiter optimieren. Das Projekt „ Vorprojekt zur Abschätzung des Potentials der mwi-Mikrowellenzündung“ geht hier einen weiteren Schritt zur Realisierung eines derartigen Konzeptes.

3. Abschätzung des Potentials der mwi-Mikrowellenzündung

3.1 Grundlagen der mwi-Mikrowellenzündung

Der Verbrennungsvorgang in Ottomotoren mit herkömmlicher Zündtechnologie beginnt direkt nach dem Hochspannungsüberschlag an der Zündkerze mit der laminaren Verbrennungsphase. Es wird eine Flammenfront gebildet, die sich relativ langsam, mit anfangs 20 cm/sec ausbreitet. In dieser ersten Flammentwicklungsphase entsteht ein Großteil der Schadstoffe und es wird keine nennenswerte Nutzleistung erzeugt. Danach entsteht die turbulente Verbrennung, bei der Flammgeschwindigkeiten von 200 m / sec bis 300 m / sec erreicht werden.

Aus diesen bekannten technischen Vorgängen entstand die Überlegung, die laminare Phase weitgehend zu eliminieren und durch eine Raumzündung im gesamten Brennraum nur die Vorgänge ablaufen zu lassen, die basierend auf den Arbeiten nach Borghi in der turbulenten Verbrennungsphase ablaufen und allgemein bekannt sind.

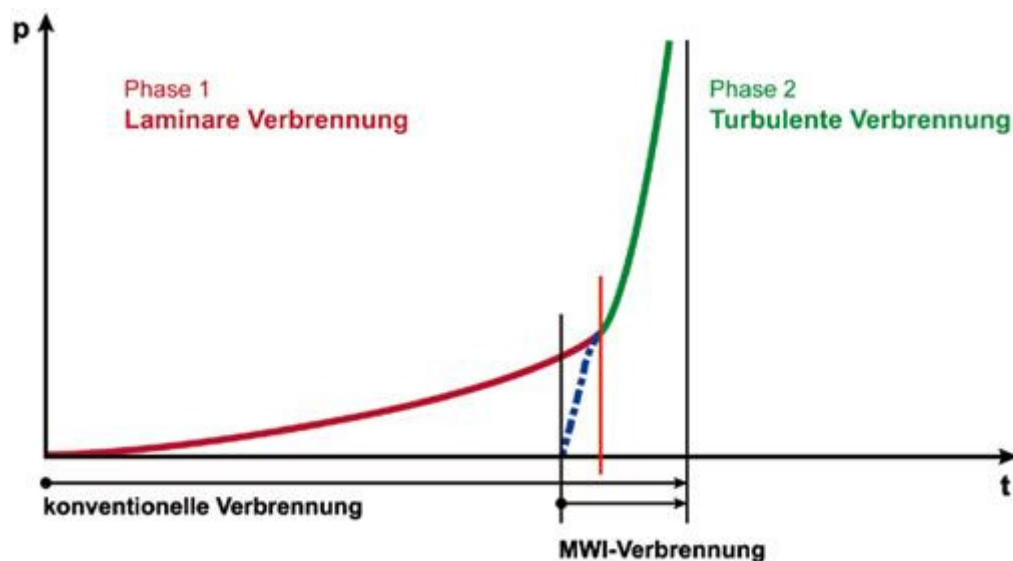


Bild 1.: Entflammungsverlauf konventionelle Verbrennung vs. MWI-Verbrennung

Die Raumzündung kann durch Mikrowellenstrahlung aus gelöst werden, soweit die notwendigen und hinreichenden Randbedingungen eingestellt werden können. Eine wichtige Voraussetzung ist die Erzeugung einer möglichst homogenen Feldverteilung mit der vermieden wird, dass nur ein Bereich hoher Feldstärke zur Initiierung eines lokalen Zündplasmas führt, das wiederum in eine laminare Verbrennungsphase übergeht. Darüber hinaus ist sinnvoll, einen gesteuerten Eintrag der

Mikrowellenenergie durch Pulsfolgen zu erreichen, um den Gesamtenergieaufwand zu begrenzen und den Brennverlauf modellieren zu können.

Die grundlegenden physikalisch / chemischen Vorgänge orientieren sich an der Überlegung des „homogeneous reactor“. Die Einflüsse eines von außen einwirkenden elektromagnetischen Feldes auf ein atomares oder molekulares System können dabei auf folgende Fälle reduziert werden:

1. Stimulierte Emission oder Absorption der elektromagnetischen Strahlung
2. Induzierung von elektrischen und magnetischen Momenten.

Isoliert betrachtet können einzelne Elektronen ein magnetisches Feld durch Spin und durch ihren Umlauf um den Kern erzeugen, zwei Elektronen der äußeren Schale mit entgegengesetzten Spins erzeugen ein resultierendes Feld von Null. Elektronen, die chemische Bindungen hervorrufen zeigen unter normalen Bedingungen kaum Wechselwirkungen mit elektromagnetischen Feldern, da das resultierende magnetische Moment null beträgt. Eine Besetzungsinversion kann genutzt werden, um stimulierte elektromagnetische Strahlung zu erzeugen. Während die elektromagnetische Anregung von ungepaarten Elektronen ein allgemein bekanntes Phänomen ist, kann die Anregung von chemischen Bindungen als Grundlage für die mwi-Technologie angesehen werden. Durch ein geeignetes Vektorpotential werden selbstunterstützende Schwingungen durch eine Überlagerung von Moden-Bedingungen angeregt, die auf die chemischen Bindungen von Kohlenwasserstoffen einwirken und ein Cracken bewirken.

Oberhalb eines gewissen Energieniveaus werden die chemischen Bindungen von Kraftstoffbestandteilen aufgebrochen und so die Radikalkettenreaktion initiiert. Eine umfassende Theorie der quantenmechanischen Prozesse, die den Zündmechanismus umfassend beschreibt, ist bisher noch nicht vollständig entwickelt. Die Anregung von Kohlenwasserstoffen mit bestimmten Frequenzen und Pulsfolgen ist deshalb vorteilhaft, weil so angeregte Moleküle polarähnliche Eigenschaften mit charakteristischen Eigenfrequenzen aufweisen. Mit diesen Frequenzen ist das Cracken der ausgewählten Kohlenwasserstoffe mit besonders geringer Anregungsleistung möglich.

Nach dem „kalten Zünden“ des Kraftstoff-Luft-Gemisches durch gepulste Mikrowellenstrahlung laufen im gesamten Brennraum Radikalkettenreaktionen ab, welche aus der Brennverfahrensentwicklung mit konventioneller Hochspannungszündung für die turbulente Phase bekannt sind. Diese Prozesse laufen in vergleichsweise homogenen Gemischen nahe dem stöchiometrischen Verhältnis von 14,7:1 ab ($\lambda = 1$) ab. Während bei einer klassischen Funkenzündung bei $\lambda = 1,35$ die absolute Obergrenze aufgrund der Randbedingungen für die Entflammung und die Flammausbreitung erreicht wird, gibt es bei der Mikrowellenzündung Prinzip bedingt keine Obergrenze. Damit sind Brennverfahren mit integral wie partiell abgemagerter Gemischen bis über $\lambda = 2$ denkbar.

Ein Einsatz für strahlgeführte Brennverfahren (Schichtladung) ist grundsätzlich ebenfalls vorteilhaft, jedoch sind dazu genauere Untersuchungen mit konkreten Einspritzsystemen erforderlich.

3.2 Versuchsanordnung

Versuchsaufbauten für die Zünd- und Brennverfahrensentwicklung sind in der Regel komplexe und sehr variabel konfigurierbare Einrichtungen. Die Investitionen bewegen sich in der Regel im mehrere Mio. Euro Bereich. Darüber hinaus ist eine freie Verfügbarkeit dieser Prüfstände nicht ohne weiteres gegeben, so dass der Bau eines eigenen Prüfaufbaus umgesetzt wurde, der ausschließlich auf die spezifische Aufgabenstellung zugeschnitten wurde.

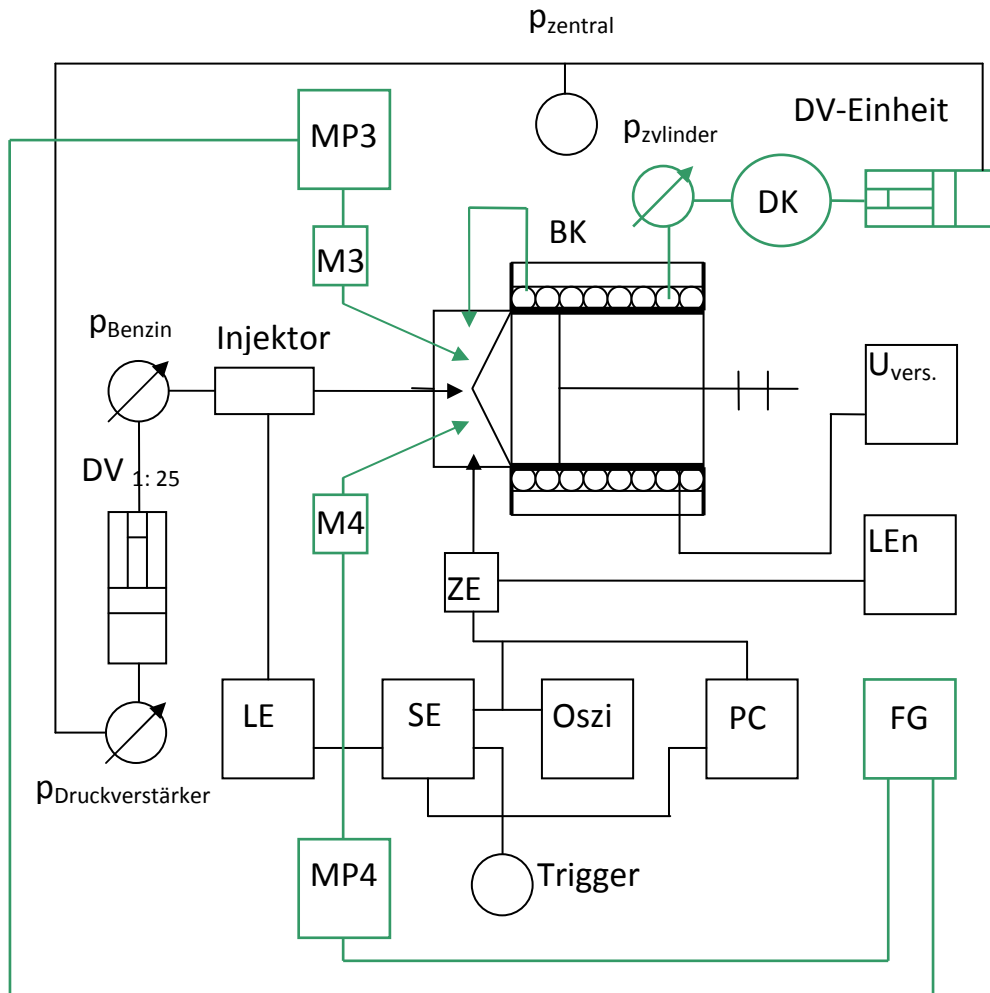


Bild 2.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.3 Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Funktionsweise

Als Versuchsanordnung wurde der Aufbau eines stationären Linearmotors gewählt. Zentrales Element ist die Brennkammer **BK**, die weitgehend an die Zylindergeometrie eines Mercedes CLS 350 GDI angelehnt ist. Der Kolben arbeitet auf einen Stößel, der linear geführt wird und ein Tellerfederpaket zusammendrückt. Aus der Kompression dieses Federpaketes lässt sich die erzeugte Nutzenergie ableiten. Um reproduzierbare Bedingungen einzustellen und um die Gemischerwärmung durch Kompression in einem realen Motor nachzubilden, kann die Brennkammer und die zugeführte Luft auf bis zu 260 °C durch eine elektrische Heizung erwärmt werden. Die Frischluftzufuhr erfolgt über einen Druckverstärker und ermöglicht einen Anfangsdruck von bis zu 12 bar.

Zur Gemischaufbereitung wurde der Piezo-Benzin-**Injektor** des 350 GDI-Motors verwendet, der von einer passenden Leistungselektronik **LE** angesteuert wird. Als Vordruck kann ein Bereich von 150 – 200 bar eingestellt werden, der durch einen Druckverstärker DV erreicht wird.

Insgesamt sind drei „Zündkerzenbohrungen“ im Zylinderkopf vorgesehen, um Zündvorrichtungen zu montieren.

Zielsetzung ist es grundsätzlich, die vorhandene Geometrie mit einem Gewinde von 12 x 1,25 mm zu verwenden, um das Mikrowellenfenster für die Einkopplung der Hochfrequenz mechanisch kompatibel zu der verwendeten Hochspannungszündkerze zu gestalten. Daraus ergibt sich als Konsequenz, dass die „Mikrowellenzündkerze“ als Wellenleiter ($H_{1,0}$ – Mode) nur eine Geometrie kleiner als die der geometrischen Vorgaben für das Ka-Band zulässt. Da die zu untersuchenden Frequenzen ohnehin im Ka-Band (26,5 - 40 GHz) und im W-Band (75 - 110 GHz) liegen, ergeben sich daraus in der Praxis keine Einschränkungen.

Zur Erzeugung von Referenzmessungen wurde eine Hochspannungszündanlage (40 kV) aus dem Motorsport eingebaut, bestehend aus Zündkerze **ZE** und Leistungseinheit **LEn**. Dieses System ist geeignet, durch Mehrfachzündungen auch vergleichsweise magere Gemische sicher zu zünden.

M3 und **M4** stellen die „Mikrowellenzündkerzen“ dar, die in der weiteren Ausarbeitung näher beschrieben werden. Die Hochfrequenz wird über Impulsmagnetrone erzeugt, die wiederum durch kundenspezifische Hochspannungsnetzteile (**MP3** und **MP4**) versorgt werden.

Alle Prüfstands-Komponenten werden über eine kundenspezifische Elektronik **SE** gesteuert, die durch interne Frequenzaufbereitung eine besonders hohe und stabil reproduzierbare Auflösung im Zeitbereich ermöglicht.

Der Übersichtlichkeit halber sind die Messgeräte wie Speicheroszilloskop und Spektrumanalysator zur Überwachung der Hochfrequenzbaugruppen nicht dargestellt.

3.4 Fotos des Versuchsaufbaus



Bild 3.: Versuchstisch mit Linearmotor und Federpaket, Brennkammer

In Bild 3 sind zur Verbesserung der Übersichtlichkeit nur die Grundelemente der Versuchsanordnung dargestellt. Der gesamte Versuchstisch ist so ausgelegt, dass er in einem Kleintransporter bewegt werden kann.

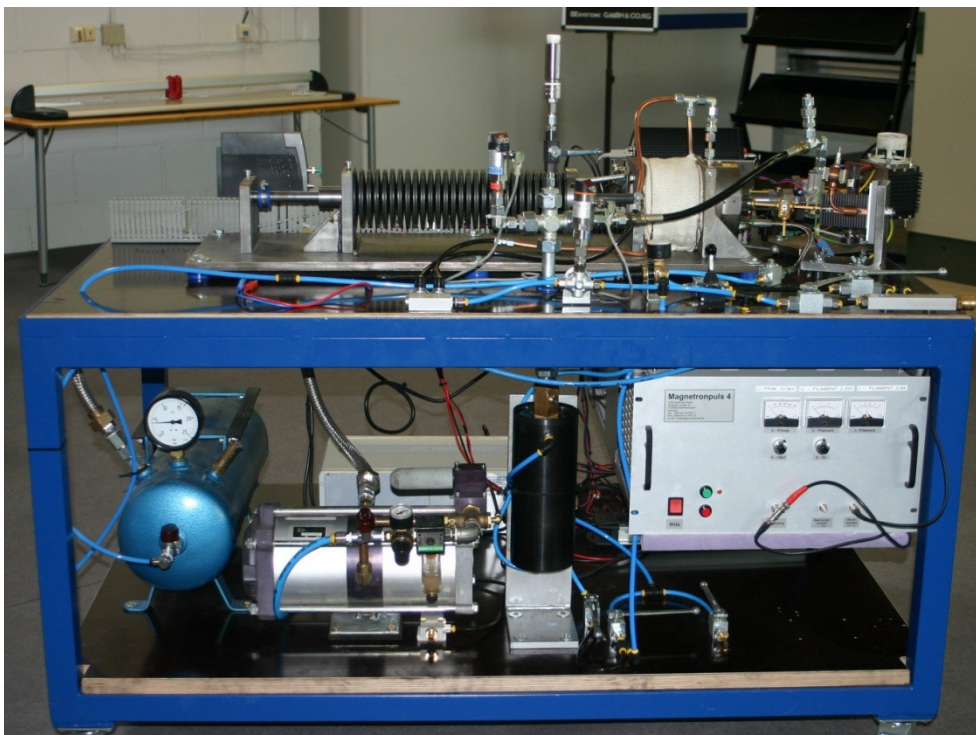


Bild 4.: Komplett aufgerüsteter Versuchsaufbau mit Luftversorgung, Kraftstoffversorgung, Mikrowellenbaugruppen und Hochspannungsnetzteil.

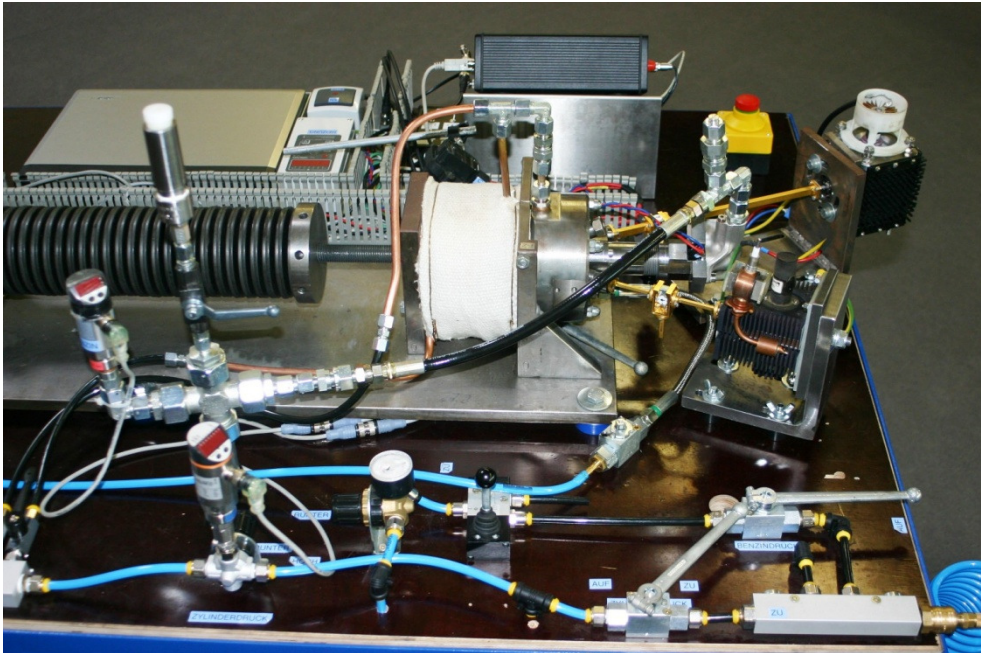


Bild 5.: Brennkammer (zentral) mit elektrischer Heizung und Versorgungsleitungen

Die Steuerung aller elektrischer Vorgänge erfolgt zentral über eine Steuerelektronik, die Be- und Entlüftung der Brennkammer erfolgt manuell über Ventile.

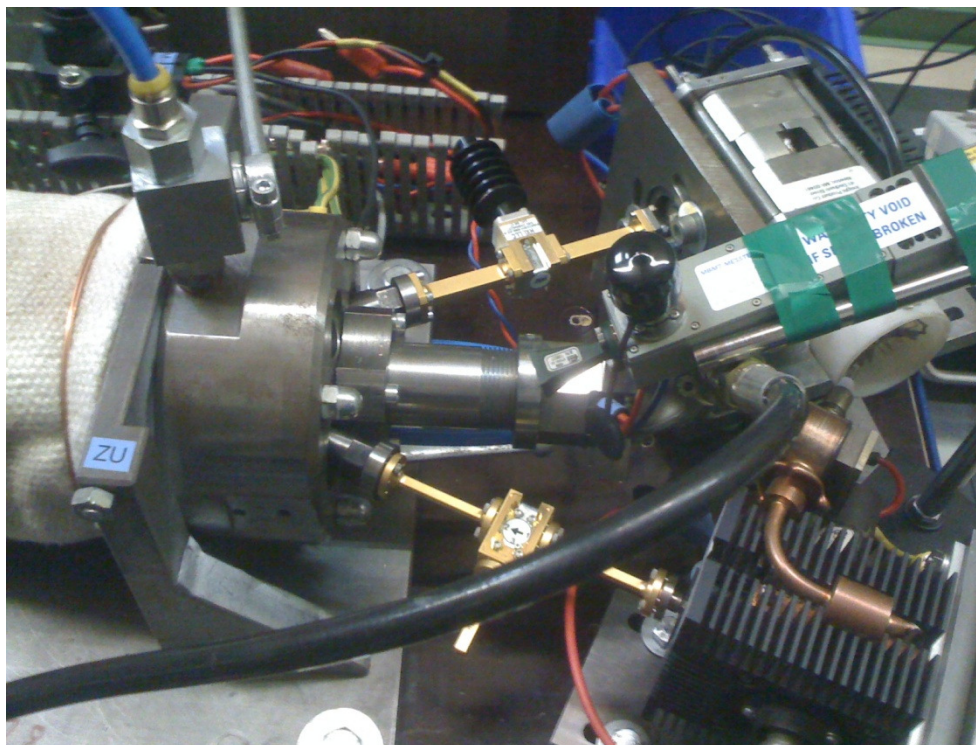


Bild 6.: Zylinderkopf mit zentralem Piezo-Injektor, Hochfrequenzbaugruppen für das Ka-Band und das W-Band, Leistungsmesskopf für das W-Band

Eine Hochfrequenzbaugruppe besteht aus Impulsmagnetron, Wellenleiter, Zirkulator, Wellenleiter und „Mikrowellenzündkerze“ (v. r. n. l.)



Bild 7.: Zentrale Steuerelektronik mit Präzisions-Clock-Generator

Die durch zwei unabhängige Mikroprozessoren gesteuerte Zentralelektronik erlaubt eine Auflösung von 1 µsec, Reproduzierbarkeit 0,1 µsec.

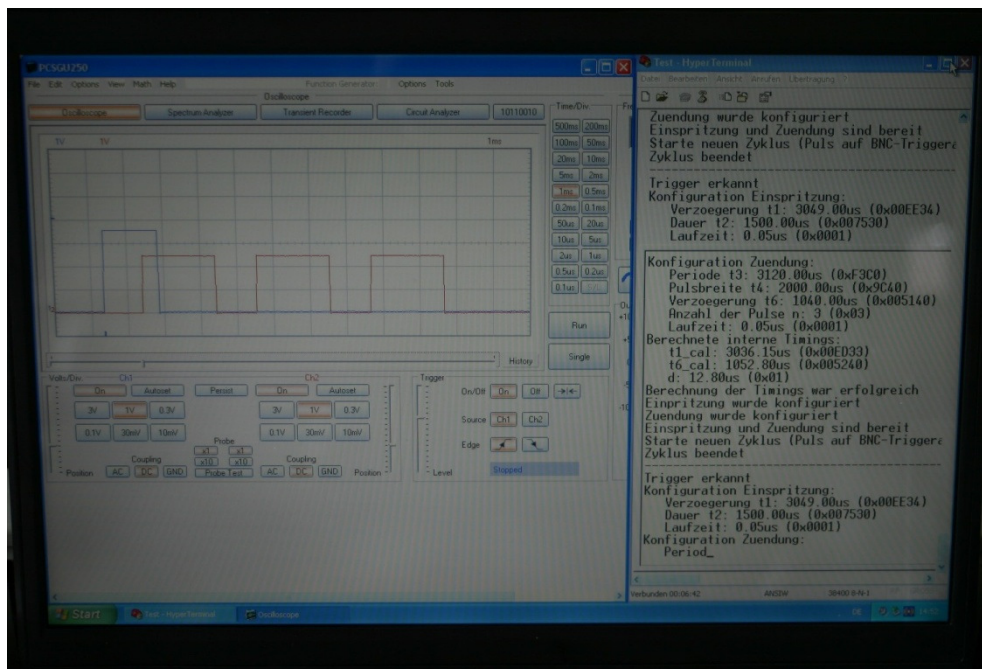


Bild 8.: Rechnerunterstütztes Oszilloskop

Die zeitliche Lage der Steuerimpulse wird mit Hilfe eines PC dokumentiert.

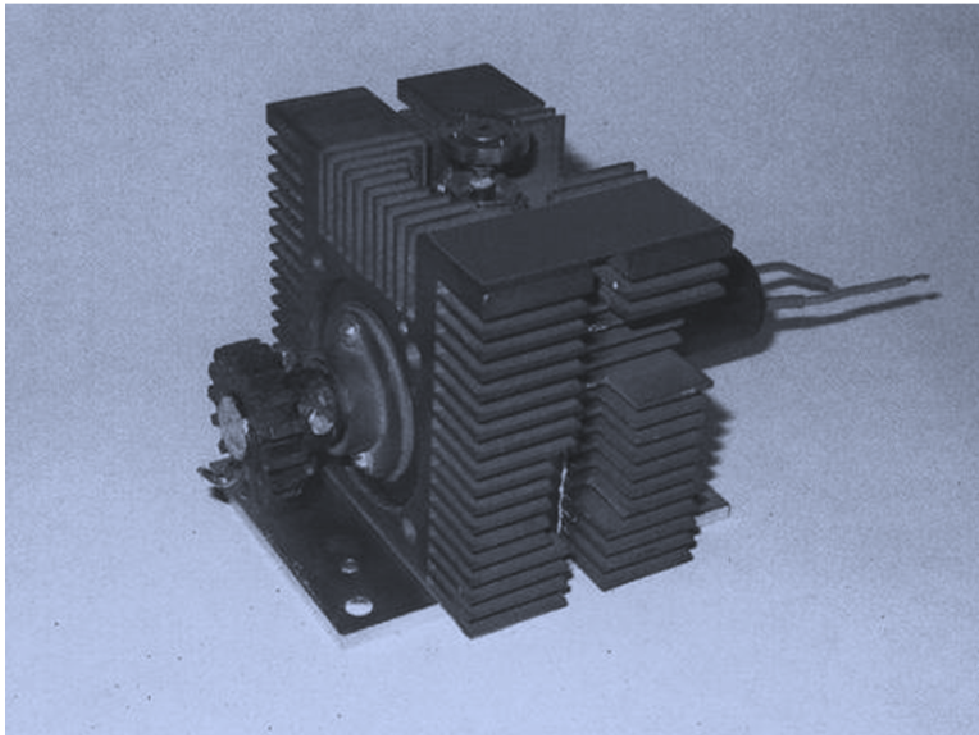


Bild 9.: Impulsmagnetron 94 GHz, Impulsleistung 2,5 kW

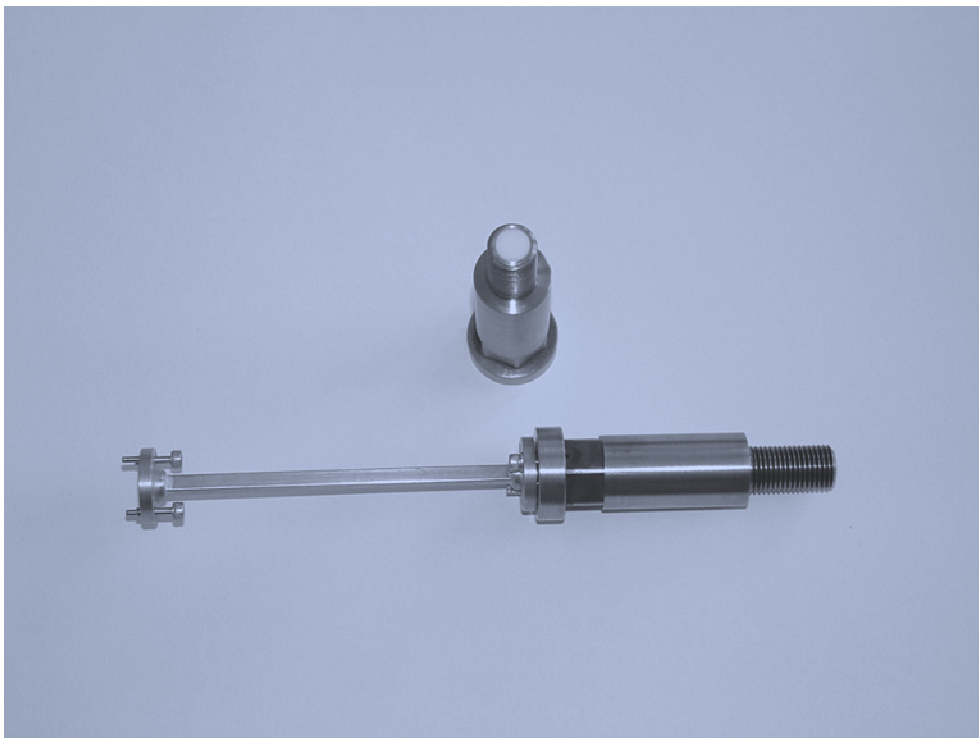


Bild 10.: Mikrowellenzündkerze, Ansicht auf das Koppelfenster, Seitenansicht mit Rechteck-Hohlwellenleiter WR 10

3.5 Simulationen der Einkopplung in den Brennraum

Um zu einer Einschätzung der Einkopplung und der Feldverteilung von Mikrowellen in den Brennraum eines Ottomotors zu gelangen wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt. Auf die messtechnische Untersuchung wurde im Rahmen des Projektes aus Kostengründen verzichtet. Eine „in situ“ Messung der Feldverteilung innerhalb der Brennkammer ist allein schon deshalb schwierig, weil die Einbringung von geeigneten „Antennen“ bei der gegebenen Geometrie eine erhebliche Beeinflussung des Messwerte bewirkt. Die Eigenschaften könnten nur durch ein iteratives Herantasten und aufwendigen Prototypenbau sowie eine unverhältnismäßig aufwendige Eigenentwicklung der Messtechnik untersucht werden.

Um die Simulation durchzuführen wurde im Wesentlichen auf die Simulationsmöglichkeiten des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik (HFT) der Technischen Universität München (TUM) zurückgegriffen. Zu diesem Zweck stehen numerische dreidimensionale Feldberechnungsverfahren zur Verfügung, welche die elektromagnetische Feldverteilung in einer Struktur bei gegebener Anregung berechnen können. Von den Berechnungsergebnissen lassen sich wichtige Berechnungsparameter wie etwa die Intensität der Reflexion zurück zur Mikrowellenquelle, das zeitlich-dynamische Verhalten der Anordnung oder die Höhe und die Verteilung der erreichbaren elektrischen und magnetischen Feldstärke im Brennraum ableiten. Da alle diese Eigenschaften in erheblichem Maße von der Geometrie der Struktur und den eingesetzten Materialien abhängig sind wurden diese durch CAD-basierte numerische Feldberechnungen (Vollwellenanalyse) studiert.

3.5.1 Untersuchung des Einkoppelfensters

Zur Abdichtung des zuführenden Hohlleiters gegen den im Brennraum herrschenden Verbrennungsdruck ist ein ausreichend dickes Fenster am Hohlleiterende erforderlich. Aufgrund seiner Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und seiner günstigen elektrischen Eigenschaften (geringe Verluste) wird als Material Aluminiumoxidkeramik verwendet (Al_2O_3) gewählt. Wegen der im Vergleich zur Signalwellenlänge signifikanten Dicke des Fensters von einigen Millimetern ist davon auszugehen, dass alleine durch das Fenster eine Reflexion auftritt, die in starkem Maße von der Permittivität ϵ_r und der Dicke d des Fensters abhängt. Aus diesem Grunde wurde zunächst die Amplitude dieser Reflexion unter Anwendung eines Leitungsmodells in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Fensterdicke d berechnet. Als beispielhafte Frequenz wurden hier 94,0 GHz angenommen, wobei sich die Verhältnisse auf die im Versuch benutzten Frequenzen leicht übertragen lassen. Das Ergebnis ist in Abb. 11 gezeigt.

Den Berechnungen liegt eine Kettenschaltung aus luftgefüllten Rechteckhohlleitern (WR10), einem dielektrisch gefüllten Hohlleiter der Länge d und dem Wellenwiderstand des freien Raumes $Z_{f,0} = 377 \Omega$ als Abschlussimpedanz zugrunde. Als relative Permittivität für Al_2O_3 bei 94,0 GHz wurde $\epsilon_r = 7,0$ angenommen. Dieser Wert konnte mit Messungen am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Dresden bestätigt werden.

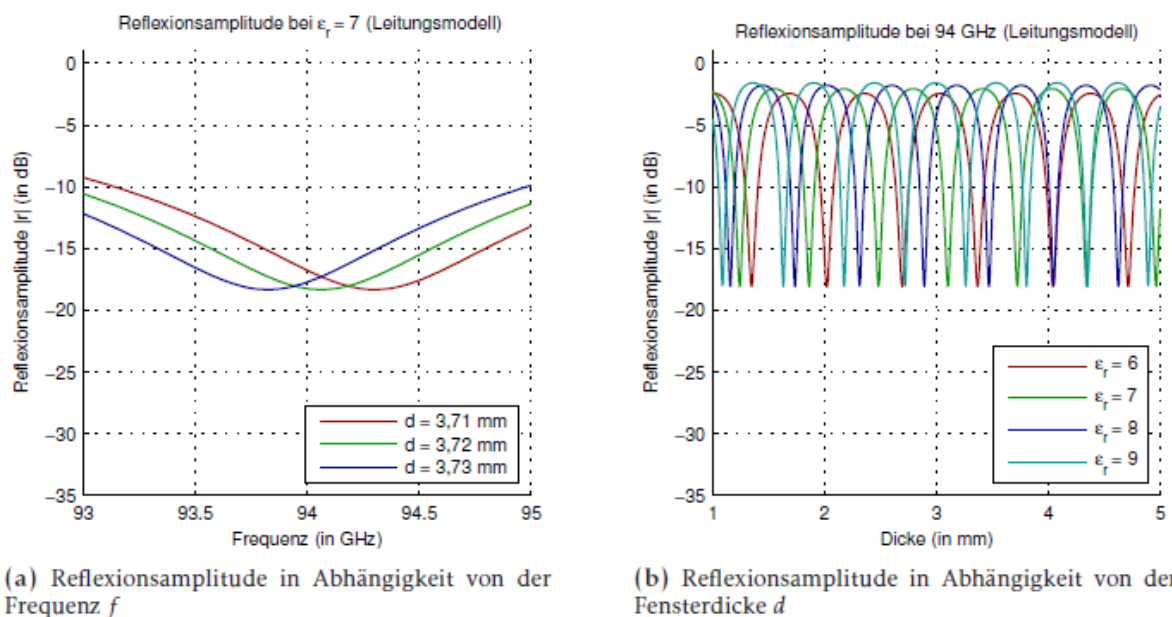


Bild 11.: Reflexionsamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz und der Fensterdicke

Die Abb. 11a zeigt die Variation der Reflexionsamplitude in der Umgebung von 94 GHz gegen eine Dickschwankung von $\pm 10 \mu\text{m}$. Der Sollwert $d = 3,72 \text{ mm}$ entspricht einer Dicke, die einerseits ausreicht um den auftretenden Drücken standzuhalten und andererseits ein Reflexionsminimum bei 94 GHz aufweist. Diese Abbildung zeigt, in welchem Umfang sowohl eine Frequenzänderung als auch eine Abweichung von der Solldicke die Fensterreflexion beeinflusst.

In Abb. 11b. ist die Amplitude der Fensterreflexion bei einer festen Frequenz von 94 GHz als Funktion der Fensterdicke gezeigt. Der Scharparameter ist die relative Permittivität ϵ_r des Materials. Der Frequenzgang ist näherungsweise periodisch in der Fensterdicke und weist ausgeprägte Maxima und Minima auf, deren Lage relativ stark von der Permittivität abhängt. Daraus folgt, dass die Kenntnis der relativen Permittivität der Fensterkeramik bei der Betriebsfrequenz entscheidend ist für die Optimaldimensionierung der Fensterdicke. Insbesondere ist anzumerken, dass die Reflexionsamplitude unabhängig von Dicke und Permittivität des Materials den Minimalwert von etwa -18 dB mit einem verlustfreien Fenster nicht unterschreiten kann. Dieser Wert ist bestimmt durch den (frequenzabhängigen) Wellenwiderstand

des luftgefüllten Hohlleiters auf der einen Seite und den Wellenwiderstand des freien Raumes auf der anderen Seite. Führt man eine numerische Feldberechnung eines offenen Hohlleiters mit Keramikfenster durch, so ergibt sich wegen der im Leitungsmodell nicht berücksichtigten Streukapazität eine leicht geänderte optimale Fensterdicke. Für die nachfolgenden numerischen Feldberechnungen wurde aufgrund dieser Ergebnisse ein Al_2O_3 Fenster mit $\epsilon_r = 7,0$ und $d = 3,64$ mm zu Grunde gelegt.

3.5.2 Feldverteilung und Reflexionsfaktor

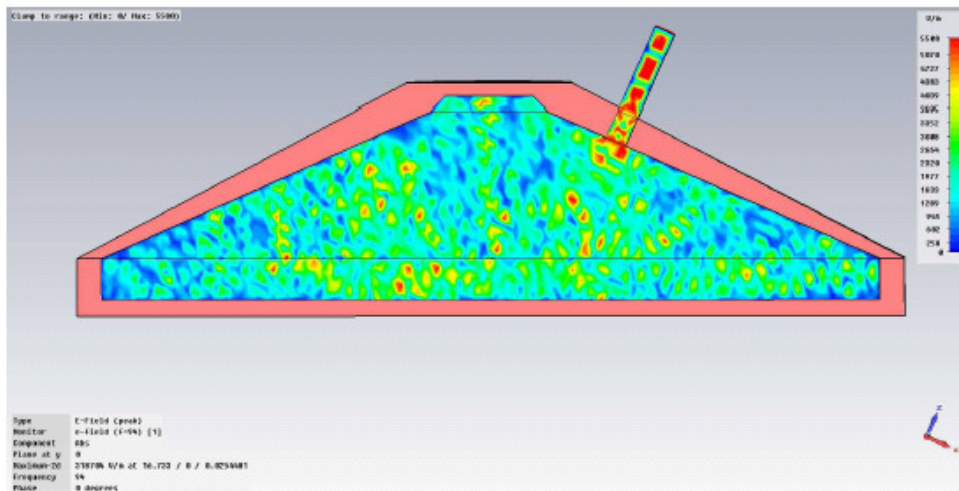
Für die Dimensionierung der Anordnung hinsichtlich des Kraftstoff-Luft-Gemisches und eines kontrollierten Ablaufes des Verbrennungsvorgangs nach der Einspeisung eines Mikrowellenimpulses ist die Kenntnis der elektromagnetischen Feldverteilung im Brennraum sowie der dazu benötigten Impulsleistung notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein CAD-Modell des Brennraumes erstellt, das sich weitgehend dem Brennraum des Versuchsaufbaus annähert. Bei der Modellerstellung wurden zunächst ideale Verhältnisse angenommen, das heißt es wurden verlustfreie ($\tan \delta = 0$) und ideal leitende ($1/\kappa = 0$) Materialien verwendet. Die Komplexität des zu erstellenden Modells ist dadurch zunächst geringer, so dass auf diese Weise die Simulationsparameter eingestellt und die Stabilität der numerischen Lösung getestet werden kann. Da es sich jedoch um eine abgeschlossene resonante Struktur handelt ist davon auszugehen, dass die Materialverluste eine wesentliche Rolle für die sich einstellenden Feldstärken und den Frequenzgang des Eingangsreflexionsfaktors spielen. Die Ergebnisse im verlustfreien Fall sind daher in Bezug auf den realen Aufbau nur eingeschränkt aussagekräftig. Sie sind ein wesentlicher Schritt zur Etablierung einer numerischen Lösung, werden an dieser Stelle jedoch nicht weiter dokumentiert, da sie für die Systemauslegung nur eine geringe Bedeutung haben.

Der Aufwand für eine numerische Feldberechnung nimmt mit der elektrischen Größe des zu berechnenden Volumens zu, das heißt mit der Größe der Anordnung im Vergleich zu Wellenlänge der Simulationsfrequenz. Die Freiraum-Wellenlänge bei der Frequenz 94,0 GHz ist $\lambda_0 = 3,2$ mm- Der Innendurchmesser des analysierten Zylinder ist 94 mm und beträgt damit etwa 30 Freiraum-Wellenlängen. Es handelt sich daher um ein mittelgroßes Problem, bei dem die numerische Berechnung der Feldverteilung im Zeitbereich je nach der Höhe der Verluste mit heutigen PCs mehrere Stunden in Anspruch nimmt. Die verwendete Software löst das Feldproblem im Zeitbereich, d.h. sie berechnet den Zeitverlauf der Feldverteilung, der sich nach einer Impulsanregung einstellt. Die benötigte Rechenzeit richtet sich nach der benötigten Anzahl an Gitterzellen und nach der Dauer der Impulsantworten. Aus den berechneten Impulsantworten lassen sich durch Anwendung von Fouriertransformation oder darauf basierender höherer Spektralschätzverfahren auch Frequenzbereichsdarstellungen von interessierenden Größen gewinnen.

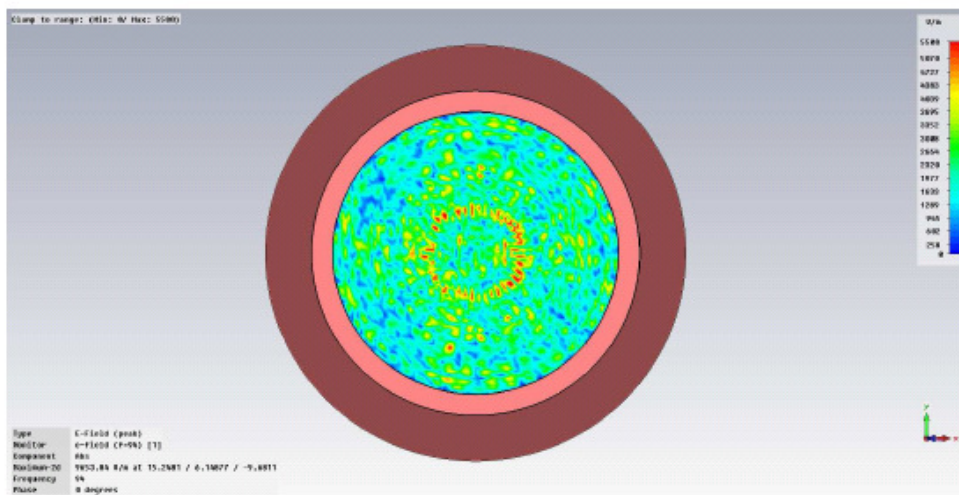
Bei den im Folgenden gezeigten Simulationsergebnissen wurde für die Zylinderwand Aluminium als Material mit einer Leitfähigkeit von $\kappa = 30 \times 10^6 \text{ S/m}$ angenommen. Für das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird erwartet, dass sich eine sehr niedrige effektive Permittivität einstellt, die sich nur unwesentlich von der von Luft unterscheidet. Im Modell wird daher die Gasfüllung mit $\epsilon_{r,\text{eff}} = 1,15$ und einem gewissen Verlustfaktor eingestellt. Da die realen Werte erst zu einem späteren Zeitpunkt genauer ermittelt werden können, wird in den gezeigten Simulationen von einem Wert von $\tan \delta = 10^{-2} \dots 10^{-4}$ ausgegangen.

Die Simulationen wurden für verschiedene Stellungen des Kolbens durchgeführt, da davon auszugehen ist, dass sich bei geänderter Hohlraumgeometrie auch eine andere Feldverteilung und ein anderer Reflexionsfaktor einstellt. Die Stellung des Kolbens ist spezifiziert durch die Koordinate S , welche vom oberen Totpunkt aus in Richtung des sich abwärts bewegenden Kolbens definiert ist.

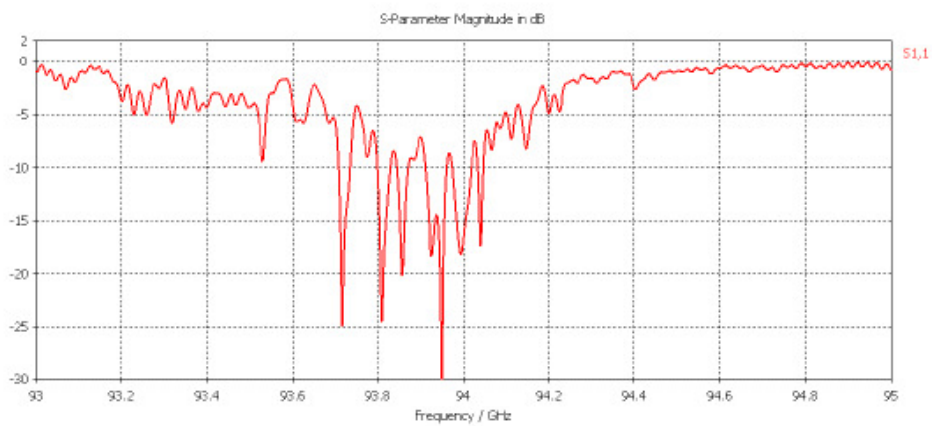
Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die berechnete Verteilung des maximalen Betrages der elektrischen Feldstärke, jeweils im Seitenriss und im Aufriss, für zwei verschiedene Werte des Verlustfaktors der Gasfüllung. In Abb. 12 wurde $\tan \delta = 10^{-4}$ angenommen, in Abb. 13 wurde zum Vergleich ein höherer Verlustfaktor von $\tan \delta = 35 \times 10^{-4}$ eingesetzt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Farbskalierungen erkennt man, dass die maximal auftretenden Feldstärken bei höheren Verlusten (Abb. 13) kleiner werden. Die dargestellten Feldverteilungen gelten für ein monofrequentes Eingangssignal mit einer Gesamtleistung von 0,5 W. Auch die Variabilität des Frequenzganges des Eingangsreflexionsfaktors (Teilbild c) nimmt in Folge höherer Verluste ab und es bildet sich ein Absorptionsmaximum mit höherer Bandbreite aus.



(a) Elektrische Feldstärke im Seitenriss

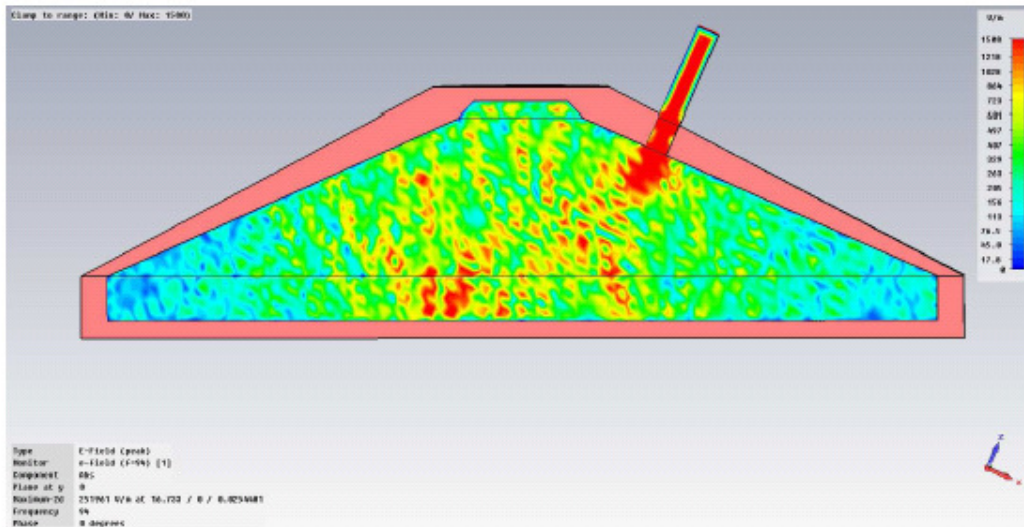


(b) Elektrische Feldstärke im Aufriss

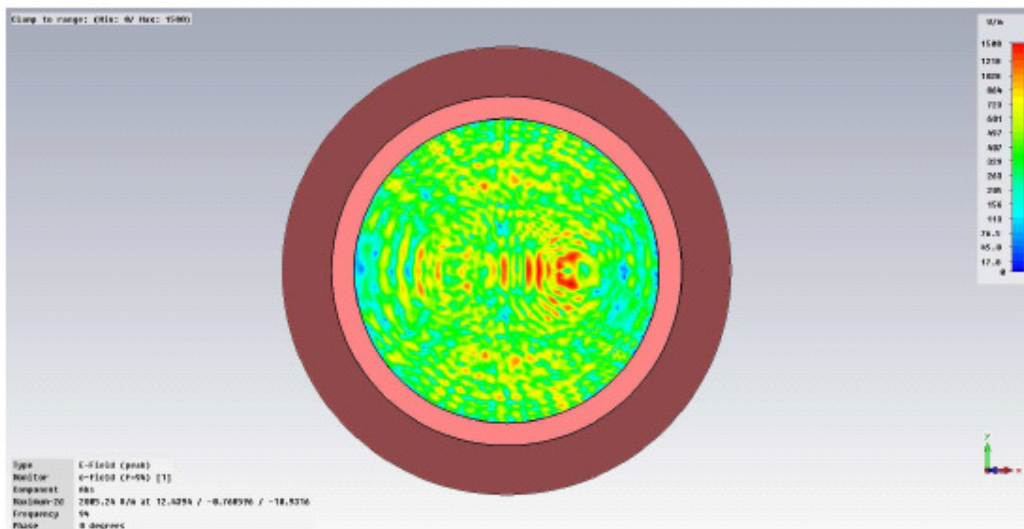


(c) Eingangsreflexionsfaktor

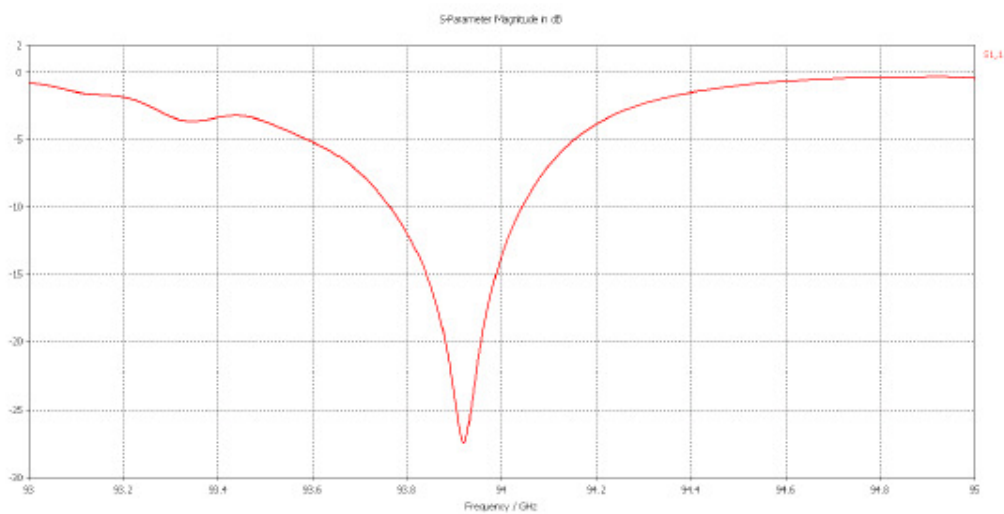
Abb. 12.: Feldstärkenverteilung im Brennraum und Eingangsreflexionsfaktor, $\tan \delta = 10^{-4}$



(a) Elektrische Feldstärke im Seitenriss



(b) Elektrische Feldstärke im Aufriss



(c) Eingangsreflexionsfaktor

Abb. 13.: Feldstärkenverteilung im Brennraum und Eingangsreflexionsfaktor, $\tan \delta = 35 \times 10^{-4}$

3.5.3. Zusammenfassung und Bewertung der Simulation

Die durchgeführten numerischen Feldberechnungen erlauben eine Abschätzung der sich bei gegebener Generatorleistung und Zylindergeometrie einstellenden elektromagnetischen Feldstärken. Die Ergebnisse lassen erwarten, dass sich keine ausgeprägten lokalen Feldüberhöhungen (hot spots) ausbilden, die für die angestrebte Raumzündung ungünstig sind und zu unerwünschten punktuellen Zündungen führen würden. Zwar treten lokale Maxima auf, die jedoch in großer Anzahl über einen ausgedehnten Volumenbereich verteilt sind und in dieser Form sehr wahrscheinlich zu der gewünschten Raumzündung führen können. Dieses Ergebnis ergibt sich auch deshalb, weil der Brennraum im Vergleich zur Freiraumwellenlänge sehr groß ist und die sich einstellende Feldverteilung aus der Überlagerung einer Vielzahl von Hohlraummoden besteht, so dass sich zusammen mit der nichtkanonischen Geometrie und der Kolbenbewegung eine größtenteils statistische Verteilung der Feldmaxima ergibt. Unter der zusätzlichen Annahme einer hohen Mikrowellenabsorption durch das Gasgemisch, die in zusätzlichen Simulationen im Zeitbereich bestätigt wurde, werden die für den Betriebspunkt interessanten Minima des Reflexionsfaktors so breit, dass eine Speisung mit Quellen mäßiger Frequenzstabilität denkbar ist (Abb. 13c).

3.6 Versuchsdurchführung

Die einzelnen Komponenten wurden zunächst separat und danach als Komplettsystem geprüft und in Betrieb genommen.

Der Betrieb des Versuchsaufbaus mit konventioneller Hochspannungszündung als Referenz konnte nach der Optimierung von Luft- und Kraftstoffzufuhr stabil erreicht werden. Zündungen konnten bis zu einem Kraftstoff-Luft-Gemisch von $\lambda=1,3$ (integral) sicher erreicht werden. Weitergehende Untersuchungen mit „normaler“ Zündkerze wurden nicht durchgeführt, da dies nicht die Zielsetzung unserer Versuchsreihen war.

Die verwendeten Impulsmagnetrone wurden nach der Vorgabe des Herstellers in Betrieb genommen. Die spezifizierten Ausgangsleistungen konnten durch Messungen am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Dresden bestätigt werden.

Die Zielsetzung einer stabilen Mikrowellenzündung konnte im Zusammenspiel mit unserem Messaufbau nicht erreicht werden.

Es konnten sporadisch Zündereignisse durch Mikrowellenimpulse hervorgerufen werden, die akustisch wahrnehmbar waren. Diese erreichten jedoch nicht die bei einer Hochspannungszündung mit vergleichbarem Gemisch ablaufenden Verbrennungsvorgänge mit der Freisetzung von mechanischer Nutzleistung.

Auf der Oberfläche des Kolbenbodens konnten im dünnen Rußbelag Muster einer Oberflächenreaktion erkannt werden, die wir auf den Eintrag von Mikrowellenenergie zurückführen.



Abb. 14: Kolbenboden

Die Ursache für die nicht reproduzierbaren Versuche konnte mit unseren Messgeräten nicht ermittelt werden. Wir planen bei einer Weiterführung der Versuche, Messungen der Mikrowellenimpulse im Zeitbereich mit hoher Auflösung durchzuführen. Die dazu notwendige Messkonfiguration ist jedoch nicht als Ganzes käuflich zu erwerben, sondern muss kundenspezifisch zusammengestellt werden.

Aus den Simulationen haben wir jedoch neue Erkenntnisse gewonnen die es erlauben, Vorgaben für die Dimensionierung einer Mikrowellenzündung nach dem mwi-Verfahren zu machen.

4. Fazit

Begründet durch das viel versprechende Potenzial zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung das die mwi-Mikrowellenzündung bietet, gibt es nach wie vor ein ungebrochenes Interesse ihrer weiteren Entwicklung.

Während der Arbeiten ist jedoch deutlich geworden, dass eine Reihe von Komponenten und Systemen erstellt werden müssen, die nicht als fertige Kaufteile beschafft werden können. Diese sind kundenspezifisch und mussten z.T. aus den USA, Russland und der Ukraine geliefert werden. Insbesondere auf dem Gebiet der Hoch- und Höchsthfrequenztechnik sind die Möglichkeiten eingeschränkt. Dies hat während der Versuchsphase zu erheblichen Verzögerungen geführt.

Der Nachweis der Potentiale der mwi-Mikrowellenzündung konnte letztendlich auch deshalb nicht wie erwartet durch Versuche geführt werden, da für die Umsetzung neuer Erkenntnisse letztlich nicht das notwendige Budget zur Verfügung stand.

Jedoch konnten die zuvor nicht vorhandenen Simulationen zur Dimensionierung einer Mikrowellen-Einkopplung (der „Mikrowellenzündkerze“) durchgeführt werden, die Simulation zur Energieabsorption wurde durchgeführt, sporadisch ausgelöste chemische Reaktionen nebst der Vorstufe einer vollständigen Zündung konnten beobachtet werden. Die messtechnische Beobachtung dieser Phänomene konnte auf Grund des erschöpften Budgets nicht durchgeführt werden.

Wir beabsichtigen, zusammen mit unseren bisherigen und neuen, bereits identifizierten Kooperationspartnern das Projekt weiter voranzutreiben. Dazu wird sich die MWI Micro Wave Ignition AG wiederum um Fördermittel der DBU, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, bewerben.

Danksagung

Die MWI AG bedankt sich an dieser Stelle bei der DBU, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, insbesondere bei Herrn Dr. Lefèvre für die stets sehr kooperative Zusammenarbeit.

Wir bedanken uns für die tatkräftige und oftmals unentgeltliche Unterstützung aus dem befreundeten Unternehmerkreis.

Besonders bedanken wir uns bei Herrn Prof. Dr. Ing. Eibert und Herrn Dr. Siart vom Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität München sowie bei Herrn Prof. Dr. Ing. Plette-meier vom Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Dresden für die durchgeführten Arbeiten.

Ein großer Dank gilt unseren Familien, die unser größtenteils unentgeltliches Engagement mit getragen und ertragen haben.

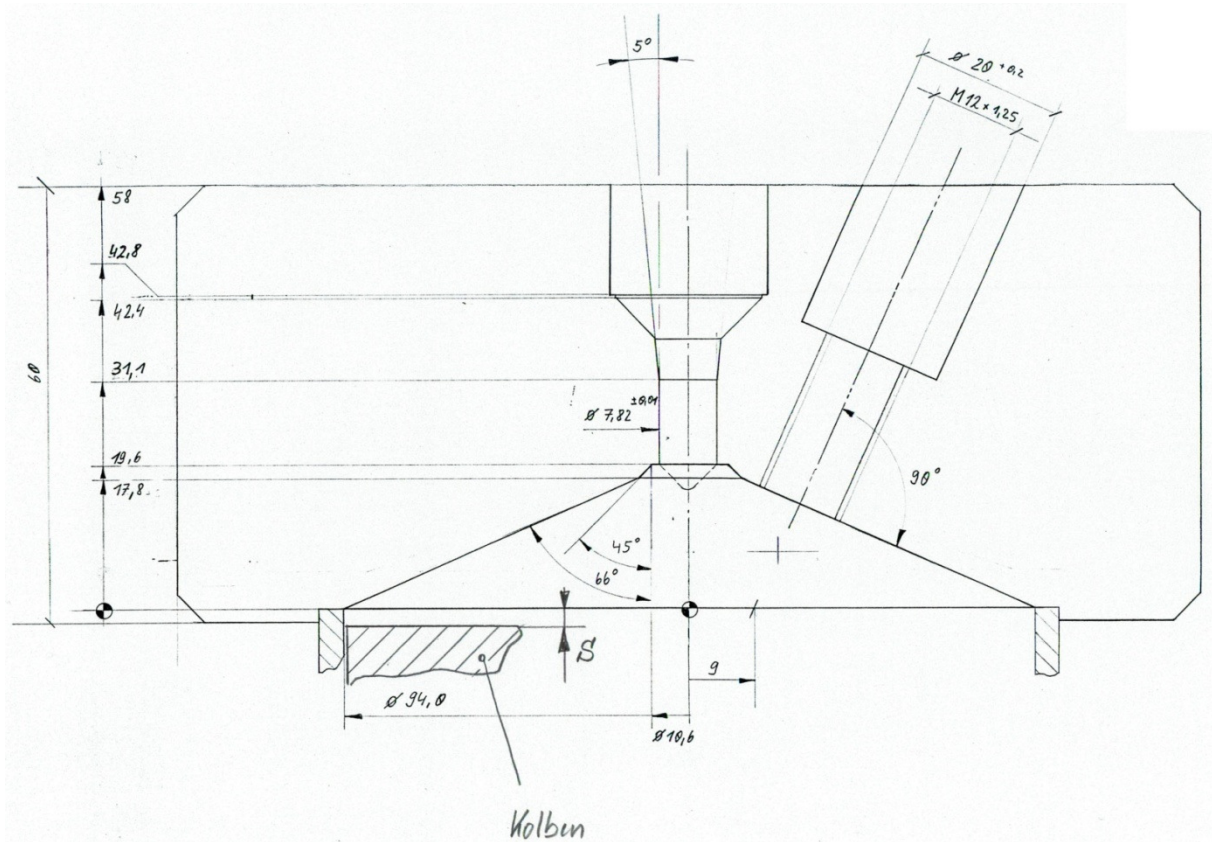
Empfingen, im April 2011

Armin Gallatz, Volker Gallatz, Nikita Hirsch, Klaus Wiese

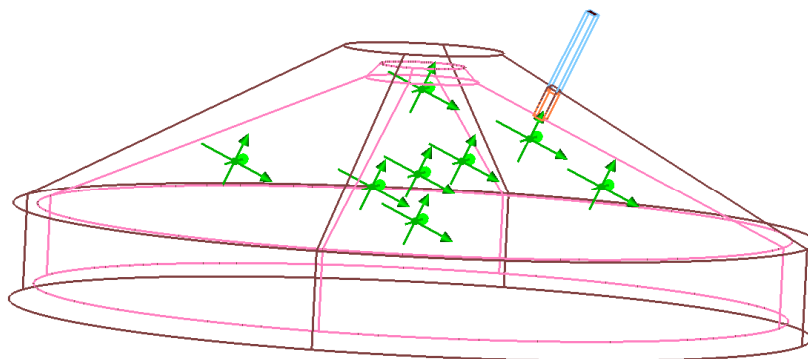
Literaturverzeichnis

- [1] Bihari, B. et al: *Development for Advanced Laser Ignition System for Stationary Natural Gas reciprocating engines*. In: ICEF2005-1325, ASME-ICE 2005 Fall Technical Conference, Ottawa, Canada
- [2] Brüggemann, D. et al: *Stand der Entwicklung bei Laserzündsystemen*, MTZ 03/2009I
- [3] Feßler, M. et al.: *Ermittlung von thermodynamischen Potenzialen alternativer Zündsysteme an einem Strahlgeführten Brennverfahren*. In AVL (Hrsg.): Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik – Beiträge ISBN 978-3-00-022057-9 (2008), S. 515-530
- [4] Balanis, C.A.: *Advanced Engineering Electromagnetics*. Chichester: John Wiley & Sons, 1989
- [5] Collin, R. E.: *Antennas and Radiowave Propagation*. New York: McGraw-Hill, 1985
- [6] Collin, R.E.: *Foundation for Microwave Engineering. 2*. Hoboken : Wiley & Sons, 2001 (IEEE Press Series on Electromagnetic Theory)
- [7] Afsar, M. N.: *Millimeter-Wave Dielectric Measurement of Materials*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-32(12):1598-1609, July 1984
- [8] Falkvik, I.: *Method of Measuring the Dielectric Constant at Microwave Frequencies by Means of Perturbation Method*. Proceedings of IEEE, 52:203, February 1964
- [9] Rajagopal, A., B. Achkir, M. Koledintseva, A. Koul, J. Drewniak: *Material Parameter Extraction Using Time-Domain TRL (t-TRL) Measurements*. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatability, Pages 280-285, Austin, Texas, 17-21 August 2009

Anhänge



Zylinderkopf



S

simulierte Antennen im Brennraum