

Regeneration von Dieselpartikelfiltern durch Mikrowellen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.–Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Jens Martin Strack

geboren am 17.06.1973 in Neuenbürg

Freiberg, den 18. April 2008

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Gerd Walter. Ihm gilt an erster Stelle mein besonderer Dank, da er mich während der Bearbeitung des Themas und bei der Anfertigung dieser Arbeit stets begleitet, unterstützt und gefördert hat.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kollegen am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik für das gute kollegiale Verhältnis und ihre Hilfsbereitschaft bedanken. Insbesondere danke ich an dieser Stelle Herrn Dr. Thomas Meyer, der das in dieser Arbeit verwendete Wärmebilanzmodell aufgestellt hat. Weiter danke ich Herrn Dr. Ivan Imenochojew für die ersten FEMLAB-Modellierungen und Herrn Dr. Ingo Riehl für die Fluent-Modellierungen.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Projektpartnern vom Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik an der TU Bergakademie Freiberg und vom Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden bedanken. Besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. C. G. Aneziris und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. E. Bach für ihre motivierende Projektleitung und die Begutachtung dieser Arbeit. Bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Schärfl und Herrn Dipl.-Ing. Rainer Sandig bedanke ich mich ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen sowie für Keramik- und Filterproben und die Durchführung von Messungen und Versuchen am Motorenprüfstand.

Für die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit danke ich meinen „Lektoren“ Herrn Dr. Jochen Schilm und meiner Mutter Silke Strack.

Für die Finanzierung des ZUTECH-Projekts „Mikrowellenregeneration DPF“, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, danke ich der AiF und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen. Weiterhin danke ich Herrn Dipl.-Ing. G. Wenninger als Obmann stellvertretend für alle projektbegleitenden-Arbeitskreis-Mitglieder für ihr Interesse und die zahlreichen Anregungen.

Weiter möchte ich mich bei meinen Eltern für ihre jahrelange Unterstützung in allen Lebenslagen danken.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Petra und meiner Tochter Ronja für ihre Unterstützung und Rücksichtnahme während der Anfertigung dieser Arbeit, sowie dafür, dass sie mir immer wieder Kraft und Freude schenken.

Gliederung

1	Motivation	5
2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1	Grundlegendes zu Dieselpartikelfiltern	7
2.1.1	Die EURO-5-Norm als Triebkraft zum Einsatz von Partikelfiltern	7
2.1.2	Dieseluß	8
2.1.3	Partikelfilter	9
2.1.4	Regenerationssysteme	10
2.2	Grundlagen der Mikrowellenthermoprosesstechnik	14
2.2.1	Einleitung	14
2.2.2	Wechselwirkung von Mikrowellen mit Materialien	14
2.2.3	Feldverteilung in Applikatoren	18
2.3	DPF mit Mikrowellenregeneration / Bisherige Arbeiten	21
3	Neuer Lösungsansatz zur Mikrowellenregeneration	23
4	Lösungsweg	24
5	Ermittlung der Stoffeigenschaften	25
5.1	Absorptionsmessungen	25
5.1.1	Voruntersuchung bekannter Filterwerkstoffe	25
5.1.2	Modifizierung der Versuchsanordnung	28
5.1.3	Rußbeladung der Wabenkörper	34
5.1.4	Untersuchung eines rußbeladenen Monolithen	35
5.1.5	Wabenkörper aus der mikrowellentransparenten Keramik AZT	37
5.1.6	Wellenausbreitung in der rußbeladenen Keramik	38
5.2	Ermittlung der dielektrischen Stoffeigenschaften	40
5.2.1	Resonanzverfahren	40
5.2.2	Verfahren durch Temperaturmessung und Parameter-Modellierung	43
6	Modellierung	50
6.1	Modellierung des Mikrowellenfeldes und der Wärmequellenverteilung	50
6.1.1	Modellbeschreibung	50
6.1.2	Modellierungen zur Dielektrizitätszahlermittlung	53
6.1.3	Validierung	54
6.1.4	Bewertungskriterium Rußtemperatur	55

6.2	Modellierung des Strömungseinflusses.....	56
6.2.1	Modellierung der Strömungsverteilung in einem Kanal	56
6.2.2	Wärmebilanzmodell	57
6.2.3	Validierung des Wärmebilanzmodells	60
6.2.4	Leistungsbedarf / Strömungsreduzierung	62
6.3	Modellrechnungen zur Applikatoroptimierung	65
6.3.1	Optimierung der zylinderförmigen Geometrie	65
6.3.2	Feldkonzentrierende Maßnahmen	68
6.3.3	Einfluss des Applikatorvolumens	71
6.3.4	Abbrandverhalten	72
6.3.5	Einfluss der dielektr. Eigenschaften des Filtermaterials	73
6.4	Endmodell	74
6.4.1	Filterabmessungen	74
6.4.2	Neumodellierung des Applikators	76
6.5	Optimierung der Abgasmenge	80
6.5.1	Berechnung der maximalen Abgasmenge	80
6.5.2	Berechnung des Sauerstoffbedarfs.....	82
6.5.3	Optimum aus Abgasmenge und Sauerstoffbedarf	83
6.6	Kanaldurchströmung bei teilweiser Rußregeneration.....	84
6.6.1	Einfluss der Rußbeladung auf Druckverlust und Durchströmung	84
6.6.2	Überprüfung des Regenerationsverlaufes.....	88
7	Erstellung des Regenerationskonzeptes	90
8	Erprobung des Konzeptes am Motorenversuchsstand	93
9	Zusammenfassung	97
10	Ausblick	100
11	Literatur	103
Anhang	112
	Abkürzungsverzeichnis	112
	Abbildungsverzeichnis.....	114
	Tabellenverzeichnis	117
	Formelverzeichnis	118
	Anhang A1	119
	Anhang A2	120

1 Motivation

Nach der erfolgreichen Reduzierung der SO₂-Emissionen in den 80'er und 90'er Jahren steht heute die Reduzierung des Ausstoßes von NO_x und Feinstpartikeln im Mittelpunkt der Maßnahmen zur Luftreinhaltung im Automobilsektor. Feinstpartikel gelten als Krebs erregend, NO_x ist giftig und begünstigt die bodennahe Ozonbildung. Beide Schadstoffe werden unter anderem durch das Abgas von Dieselmotor betriebenen Fahrzeugen emittiert, welche starke Zuwachsraten am Anteil der verkauften Fahrzeuge verzeichnen. Zusätzlich ist das Gesamtverkehrsaufkommen in Deutschland und Europa stark gewachsen. Auf die zunehmende Luftbelastung hat die Europäische Union mit einer verschärften Abgasgesetzgebung reagiert, indem sie die Grenzwerte für den Partikelaustritt stufenweise reduziert hat. Konnte die Schadstoffreduzierung gemäß den EURO-Normen I bis III bisher durch motorische Maßnahmen und verbesserte Einspritzsysteme erzielt werden, sind nun weitere Maßnahmen notwendig, wie z.B. der Einsatz von Dieselpartikelfiltern. Diese sind heute in der Lage, 99 % des Feinstaubanteils aus dem Abgas herauszufiltern.

Das hat zur Folge, dass immer mehr Automobilhersteller ihre Fahrzeuge mit Partikelfiltern ausstatten. Auch die weltweiten Produktionskapazitäten für Partikelfilter werden derzeit beträchtlich erhöht.

Nachteilig bei dem Einsatz von Partikelfiltern ist, dass der Filter nach einer Betriebszeit von einigen Stunden gefüllt ist und dann regeneriert werden muss. Damit kann ein Partikelfilter nur als System mit einem geeigneten Regenerationsmanagement betrieben werden. Hinsichtlich der Filterregeneration werden bei den Automobilherstellern unterschiedlichste technologische Ansätze verfolgt. Auch wenn heute schon verschiedene Systeme auf dem Markt sind, so ist die Entwicklung von Dieselpartikelfiltersystemen noch ein relativ junger und nicht abgeschlossener Prozess. Stark besetzte Entwicklungsabteilungen, ein breites Spektrum an Tagungen, Forschungsprojekten, Workshops etc. zeigen dies. Hierbei ist es für die Automobilindustrie wichtig, sich in der Vielzahl technologischer Ansätze, Ideen und Systeme auf Entwicklungsschwerpunkte festzulegen.

Den fahrzeuginternen Regenerationssystemen ist gemeinsam, dass der Ruß oxidiert werden soll. Eine Zündtemperatur des Rußes von ca. 600 °C und durchschnittliche Abgastemperaturen von 100 bis 400 °C machen den Einsatz von Katalysatoren oder Aufheizvorrichtungen notwendig, welche so energiesparend wie möglich sein sollen.

Die Mikrowellenerwärmung stellt in vielen technischen Bereichen eine energiesparende und vorteilhafte Heiztechnologie dar. Zudem haben Untersuchungen gezeigt, dass sich Dieselfuß sehr gut durch Mikrowellen erwärmen lässt [Ma 97].

Somit stellt sich für die Automobilindustrie die Frage, ob die Mikrowellentechnologie auch als Regenerationsmethode in einem Dieselpartikelfiltersystem geeignet ist, und ob weitere Forschungspotentiale in diese Richtung eingesetzt werden sollten.

Hauptmotivation dieser Arbeit ist es daher zu untersuchen, inwiefern Mikrowellen als Heizmechanismus für die Partikelfilterregeneration geeignet sind.

Hierbei wird ein Lösungsansatz verfolgt, der die Verwendung einer mikrowellentransparenten Filterkeramik vorsieht. Entgegen der Verwendung von mikrowellenabsorbierenden SiC-Filtern sollen beim Einsatz der transparenten Keramik die Mikrowellen direkt am Ruß ankoppeln und diesen auf Regenerationstemperatur erwärmen.

Am Ende der Arbeit soll ein funktionierendes System für eine Motorversuchsstandsapplikation dargestellt werden.

2.1.2 Dieselruß

Der Dieselmotorruß entsteht während der Kraftstoffverbrennung im Motor. In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze für seine Entstehung [Bach 02], [Houb 90], [Sieg 99]. Neben vielen Faktoren begünstigt ein niedriger Luftüberschuss die Rußbildung. Wird der Luftüberschuss jedoch erhöht, ist mit einer verstärkten NO_x -Bildung zu rechnen.

Die Rußpartikel haben eine Korngröße von 10 nm bis 300 nm und können im Abgas als Einzelpartikel oder als Agglomerate auftreten, welche auch Bestandteile an unverbrannten Kohlenwasserstoffen enthalten können [Metz 04]. Weiterhin befinden sich geringe Anteile an Aschepartikeln aus Verbrennungsrückständen des Motorenöls sowie Partikel aus Abriebbestandteilen des Motors im Abgas. Diese können im Gegensatz zum Ruß und den Kohlenwasserstoffen nicht verbrannt werden [Omei 03]. Die Zündtemperatur des Dieselrußes liegt bei etwa 600 °C. Die Abgastemperatur nach dem Turbolader beträgt in der Regel 200 bis 400 °C, je nach Betriebszustand des Motors auch höher oder tiefer. Auch der Partikelaußstoß ist betriebspunktabhängig. Der für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendete Dieselmotor PSA DW12TE emittierte im mittleren Drehzahl- und Lastbereich etwa 2 g/h, im Volllastbereich 23 g/h (Abbildung 22, Seite 34).

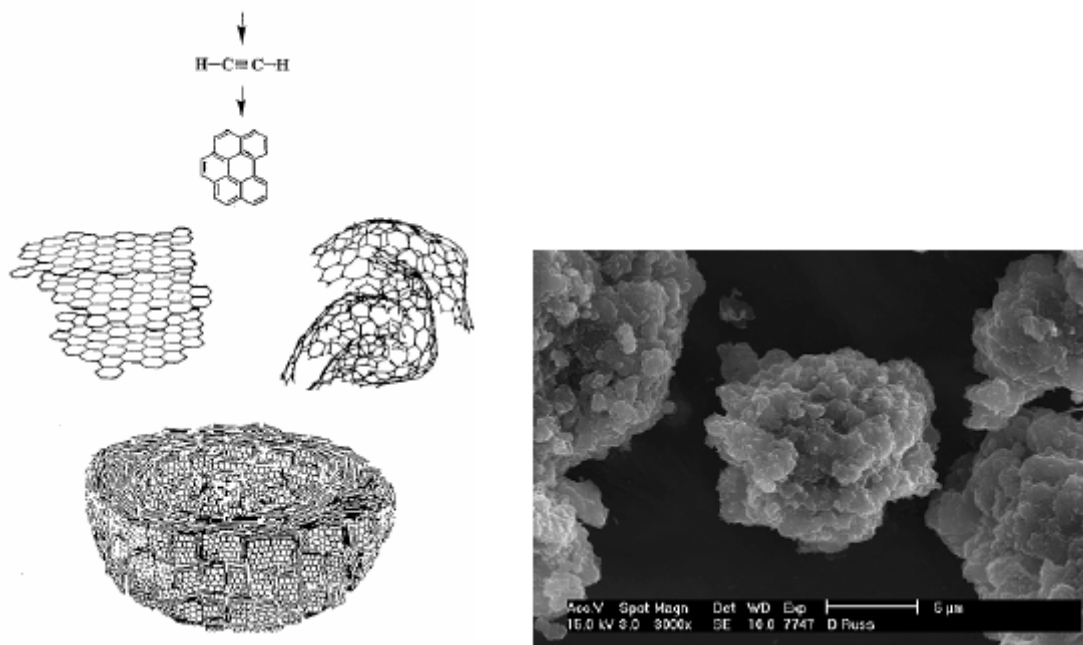


Abbildung 2: Entstehung von Primärpartikeln [Sieg 99],

REM-Aufnahme von Ruß (Agglomerat aus Primärpartikel) [Schä_05]

2.1.3 Partikelfilter

Der Einsatz von Partikelfiltern gilt heute als die wirkungsvollste Maßnahme zur Verminderung der Partikelemission von Dieselmotoren. Als Filter werden zur Zeit vorwiegend keramische Wabenfilter aus SiC oder Cordierit eingesetzt. Die nachgewiesene Filtrationsrate liegt bezüglich der Partikelmasse weit über 90% und bezüglich der Partikelanzahl bei 99,99 %. Die Wabenfilter bestehen aus wechselseitig verschlossenen Kanälen, so dass das Abgas in die Eintrittskanäle eintritt, die porösen Wände durchströmt und durch Abströmkanäle austritt. Die Dieselrußpartikel werden dabei an den porösen Wänden abgeschieden, so dass sich ein Filterkuchen entwickelt. Abbildung 3 erläutert das Prinzip. Die offene Porosität der Filterwände beträgt etwa 46 %, der mittlere Porendurchmesser etwa 10 µm. Abbildung 4 zeigt die REM-Aufnahme einer Filterwand.

Modellierungen haben gezeigt, dass eine Zelldichte von 200 bis 300 cpsi bei einer Filterlänge von 6“ am günstigsten ist [Kon 05] [Eben 03]. Der in den Untersuchungen dieser Arbeit verwendete Cordieritfilter hat eine Zelldichte von 200 cpsi und eine Wandstärke von 0,34 mm, die Rußschicht hat im voll beladenen Zustand eine Schichtdicke von etwa 0,15 mm. Heute werden im PKW-Bereich meist zylindrische Filter mit einem Volumen von 2,5 l, mit einem Durchmesser von 5,66“ und einer Länge von 6“ eingesetzt.

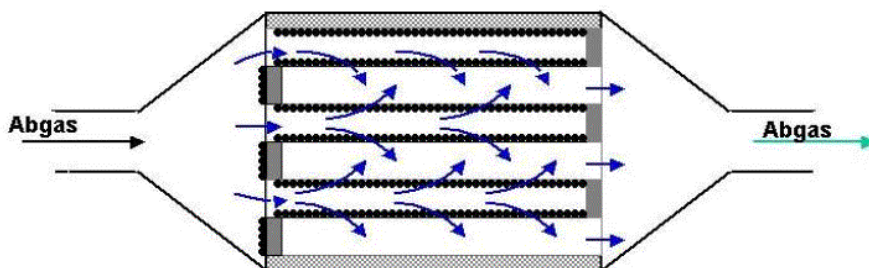
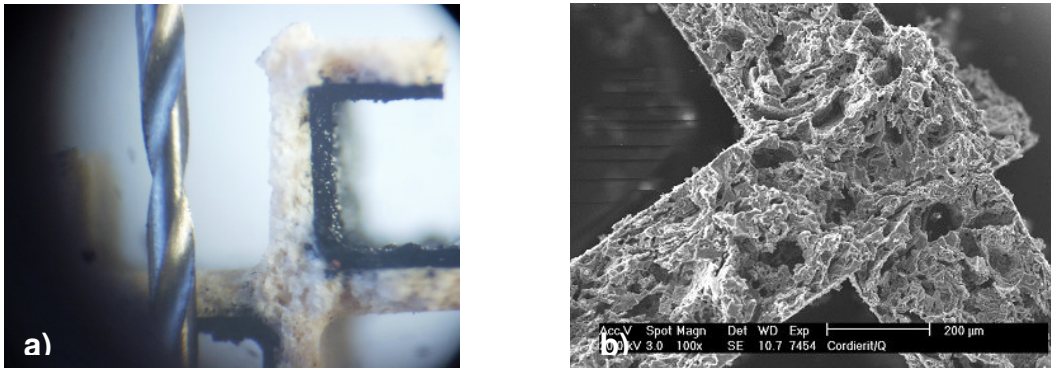


Abbildung 3: Prinzip des Wabenfilters [Ziko 03]

Mit zunehmender Beladung und Anwachsen der Filterkuchendicke erhöht sich der Gegendruck des Filters so, dass je nach Filtergröße und Betriebszustand des Motors der Filter nach einigen Stunden vom Ruß gereinigt werden muss. Aufgrund der relativ kurzen Beladungszeit ist damit ein Partikelfilter nur mit einem Regenerationssystem einsetzbar, welches kontinuierlich oder diskontinuierlich den Filter entlädt (regeneriert). Die Filterregeneration sollte dabei während des Fahrzeugbetriebs und in jedem Fahrzustand durchführbar sein [PAK 04].



**Abbildung 4: a) Wabenkörper mit Ruß (zum Vergleich ein 0,4 mm Bohrer),
b) REM-Aufnahme eines Cordieritfilters [Schä 04]**

2.1.4 Regenerationssysteme

Da der Ruß mit dem im Abgas enthaltenen Restsauerstoff oxidiert werden kann, ist die Rußoxidation die überwiegend angewandte Regenerationsmethode. Um auch bei Abgastemperaturen, welche unterhalb der Zündtemperatur des Rußes ($\approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$) liegen, die Oxidation einleiten zu können, sind Regenerationssysteme notwendig. Einige Varianten werden im Folgenden vorgestellt. Man unterscheidet zwischen aktiven Systemen, welche die Rußtemperatur bis zum Zündpunkt anheben, und kontinuierlichen Systemen, welche katalytisch die Rußoxidationstemperatur senken [Remb 03], [Ziko 03].

Die Asche, welche nur einen geringen Anteil an den Partikelemissionen hat, verbleibt im Filter, bis dieser nach einer Laufleistung von meist $> 250\,000 \text{ km}$ ausgetauscht oder gereinigt wird [Roch 05].

Kontinuierliche Systeme:

Regeneration mit Kraftstoffadditiven

Eine der ersten Regenerationsmethoden, die auf dem Markt erschienen ist, ist die Zugabe von Additiven zum Kraftstoff. Typische Additive sind katalytisch wirksame Metalle wie z.B. Cer, Kupfer, Blei, Eisen, Strontium, Platin oder Mangan, wovon momentan aufgrund der Vermeidung von Sekundäremissionen nur Cer, Eisen und Cer/Platin für den Einsatz in Kraftfahrzeugen zugelassen sind [Bach 94]. Diese Additive reduzieren die Rußoxidationstemperatur von $600 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $450 \text{ }^\circ\text{C}$ [Nas 03]. Neue Entwicklungen mit optimiertem Fe/Cer-Verhältnis erreichen schon Temperaturen von $400 \text{ }^\circ\text{C}$ [Roch 05]. Sofern sich diese Abgastemperatur in regelmäßigen Abständen einstellt, gilt dies als zuverlässiges Verfahren. Als ein Nachteil ist jedoch die durch die

Additive verstärkte Bildung von Aschen zu nennen, welche im Filter verbleiben und den Reinigungs- und Austauschzyklus des Filters verkürzen.

Ein weiteres Problem, welches auch die im Folgenden genannten kontinuierlichen Regenerationssysteme betrifft, ist der Umstand, dass diese abgesenkte und immer noch notwendige Regenerationstemperatur bei den Pkw-Dieselmotoren nicht in allen Betriebszuständen erreicht wird. Bei einem Fahrverhalten, welches nur aus Kurzstrecken im Stadtverkehr besteht (z.B. beim Einsatz im mobilen Pflegedienst), werden kaum Abgastemperaturen von 200 °C erreicht. Um einen sicheren Einsatz zu gewährleisten, muss das System daher zusätzlich mit einem aktiven Regenerationssystem ausgerüstet werden [Bach 98].

CRT-System (Continuously regenerating trap)

Das CRT-System ist ebenfalls ein kontinuierlich arbeitendes Regenerationssystem. Hierbei ist stromaufwärts vor dem Partikelfilter ein Oxidationskatalysator angebracht, der ab einer Betriebstemperatur von ≈ 270 °C das NO des Abgases zu NO₂ oxidiert [Görs 03]. Zusätzlich werden als Nebeneffekt die unverbrannten Kohlenwasserstoffe und CO zu CO₂ und Wasser oxidiert. Das NO₂ kann bei deutlich niedrigeren Temperaturen den Ruß oxidieren als der molekulare Sauerstoff der Luft bzw. des Abgases. Somit ist es das Ziel dieses Verfahrens, stets soviel NO₂ zur Verfügung zu stellen, wie für die Oxidation des neu gebildeten Rußes gebraucht wird [Herr 01].

Je nach Betriebszustand kann jedoch nicht immer die notwendige NO₂-Menge freigesetzt werden. Da das System aufgrund seiner langsamen Reaktionsgeschwindigkeit nicht für eine diskontinuierliche Regeneration geeignet ist, muss es wie das additivgestützte System zusätzlich mit einem aktiven Regenerationssystem ausgestattet werden.

Aktive Systeme:

Bei den aktiven Regenerationssystemen erfolgt die Regeneration des Filters diskontinuierlich nach Bedarf. Da für die Notwendigkeit einer Regeneration der Abgasgedruck vor dem Filter entscheidend ist, wird dieser gemessen und bei Überschreiten eines Grenzwertes die Regeneration eingeleitet. Diese erfolgt, indem das Abgas oder der Filter auf die Zündtemperatur des Rußes erwärmt wird. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten, welche im Folgenden dargestellt werden.

Vollstrombrenner:

Bei diesem System ist ein Diesel betriebener Brenner vor dem Filter angeordnet, der das Abgas auf Zündtemperatur des Rußes erwärmt [Gais 05]. Seine Regelung erfolgt durch Druck- und Temperaturmessungen vor und nach dem Filter, so dass eine Regeneration bei jedem Betriebszustand erreicht werden kann. Trotz der relativ kurzen Regenerationszeit von 10 min ist der Kraftstoffverbrauch relativ hoch. Als weiterer Nachteil ist die thermische Belastung des Filters zu nennen, welche zu einer vergleichbar kurzen Filterlebensdauer führt.

Teilstrombrenner:

Hierbei werden 2 Partikelfilter eingesetzt, die parallel angeordnet sind und wechselweise regeneriert werden. Folglich ist das System mit 2 Dieselmotoren ausgestattet. Bei der Regeneration wird in dem zu regenerierenden Filter der Abgasstrom reduziert, während der zweite Filter die Abgasreinigung übernimmt.

Das System konnte sich aufgrund der Summe seiner Nachteile wie einer aufwändigen Bauweise, eines hohen Platzbedarfs und Schwierigkeiten bei der Abgasmengenregelung (bei schnellem Betriebszustandswechsel, hohen Temperaturen, etc.) bisher nicht durchsetzen [Fors 03].

Nacheinspritzung:

Dieses Verfahren kann in Verbindung mit einem dem Partikelfilter vorgeschalteten Oxidationskatalysator genutzt werden. Dabei wird durch das Motorenmanagement oder eine externe Verdüsungseinrichtung [Heim 05] die Konzentration von unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas erhöht, welche im Katalysator verbrennen und die Temperatur des Abgases erhöhen [Bouc 01].

Elektrische Widerstandsbeheizung

Hier wird durch elektrische Heizelemente der Abgasstrom oder der Filter erwärmt. Den hohen elektrischen Leistungsbedarf kann das Bordnetz heutiger Fahrzeuge jedoch noch nicht bereitstellen, so dass diese Variante auf Systeme beschränkt bleibt, die durch katalytische Maßnahmen die Zündtemperatur des Rußes schon abgesenkt haben.

Eine alternative Strategie ist, mit dem Heizelement den Ruß nur an einer Stelle zu zünden, sodass dieser dann unter Nutzung der bei der Verbrennung freiwerdenden exothermen Energie selbstständig weiter abbrennt. Dieses scheitert in der Praxis jedoch an der häufigen Variation der Lastzustände des Motors und der damit verbundenen Änderung von Abgaszusammensetzung, Temperatur und Mengenstrom.

Zudem muss bei einer elektrischen Beheizung auf die Wirkungsgradverluste von Motor und Lichtmaschine hingewiesen werden [Wagn 05].

Vollstrom / Teilstrom-Regeneration

Bei den oben genannten aktiven Systemen erfolgt die Erwärmung indirekt über das Abgas, welches dann erst die geringe Masse Ruß (20 g) erwärmt und dann natürlich auch als heißer Gasstrom das System verlässt. Unter diesem Gesichtspunkt hat jedes dieser Systeme einen relativ hohen Energiemehrverbrauch.

Hier erscheinen Systeme sinnvoll, welche, wie schon beim Teilstrombrenner angeführt, parallel aufgebaut sind und für den Zeitraum der Regeneration die Strömung durch den Filter reduzieren. Diese werden jedoch von der Automobilindustrie bisher für den praktischen Einsatz abgelehnt. Grund hierfür sind neben dem höheren bautechnischen Aufwand und Platzbedarf vor allem Probleme mit der Abgasregelung durch eine Abgasklappe [Wenn 05]. Die durch das Fahrverhalten bedingten, unkalkulierbaren Lastwechsel des Motors führen zu unkalkulierbaren Änderungen von Temperatur, Sauerstoffgehalt und Volumenstrom des Abgases. Dazu kommen maximale Anwendungstemperaturen von $> 600\text{ °C}$, eine Rußverschmutzung des Abgases, sowie Einflüsse durch den Beladungsgrad des Filters. Die hohen Anforderungen an die technische Umsetzung führten bisher dazu, dass sich Systeme mit einer mengenstromregulierenden Abgasklappe im Bereich der heißen und auch schmutzbelasteten Abgasreinigung bis heute nicht durchsetzen konnten.

Regeneration mit Mikrowellen

Auf den Stand der Forschung zu diesem Thema wird in Kapitel 2.3 eingegangen, nachdem im folgenden Kapitel zunächst die Mikrowellenerwärmung als solche erklärt und behandelt wird.

2.2 Grundlagen der Mikrowellenthermoprosesstechnik

2.2.1 Einleitung

Als Mikrowellen werden elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz bezeichnet [Walt 02], was einer Wellenlänge von 1 m bis 1 mm entspricht (Abbildung 5). Für den industriellen und technischen Anwendungsbereich in der Thermoprosesstechnik sind nur begrenzte Frequenzbereiche, die sogenannten ISM-Bänder (industrial, scientific and medical radio-frequency equipment) freigegeben [Paul 04]. Neben zahlreichen Anwendungen in der Telekommunikation werden Mikrowellen auch in der Thermoprosesstechnik zur Erwärmung von Stoffen eingesetzt. Im Gegensatz zu konventionellen Heiztechniken, die die Wärme über die Oberfläche in das Gut einbringen, wird die Wärme bei der Mikrowellenerwärmung durch Polarisationsvorgänge direkt im Volumen des Wärmguts erzeugt [Mehr 99]. Am häufigsten angewendet wird der Frequenzbereich um 2,45 GHz, für den heute ein ausreichendes Spektrum an Mikrowellentechnik-Komponenten zur Verfügung steht. Weitere in der Thermoprosesstechnik genutzte Frequenzen sind 915 MHz und zukünftig auch 5,8 GHz [Rank 06].

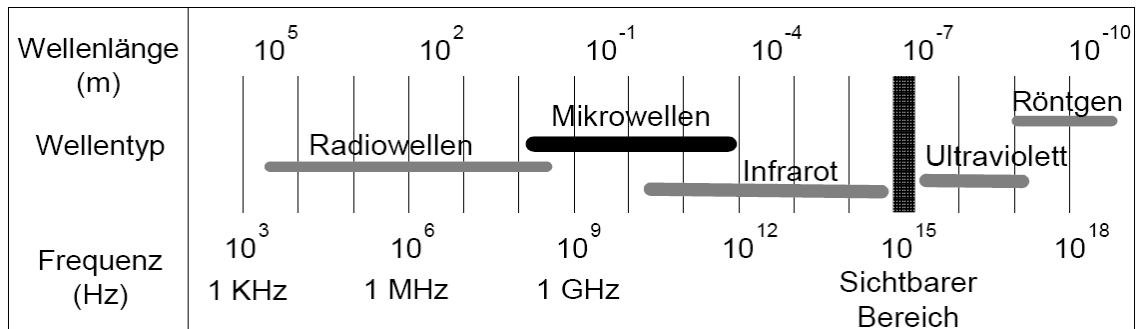


Abbildung 5: Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Wellen [Emme 06]

2.2.2 Wechselwirkung von Mikrowellen mit Materialien

Mikrowellen transportieren ihre Energie in Form ihres elektromagnetischen Wechselfeldes. Wenn sie in ein Gut eindringen, können durch das elektrische Wechselfeld je nach Stoff unterschiedliche Polarisierungsvorgänge angeregt werden, welche die elektrische Feldenergie in Wärme umwandeln. Abbildung 6 zeigt die verschiedenen Polarisationsmechanismen [Walt 04].

Das zeitlich veränderliche elektrische Feld führt dazu, dass sich die elektrischen Dipole im Stoffsystem auf das Mikrowellenfeld ausrichten. Wenn sich das Mikrowellenfeld dann ändert bzw. umkehrt, ist eine Neuorientierung der Dipole notwendig, was mit

einer Beschleunigung bzw. Rotationsbewegung und damit Erwärmung der entsprechenden Stoffbausteine verbunden ist [Mere 98].

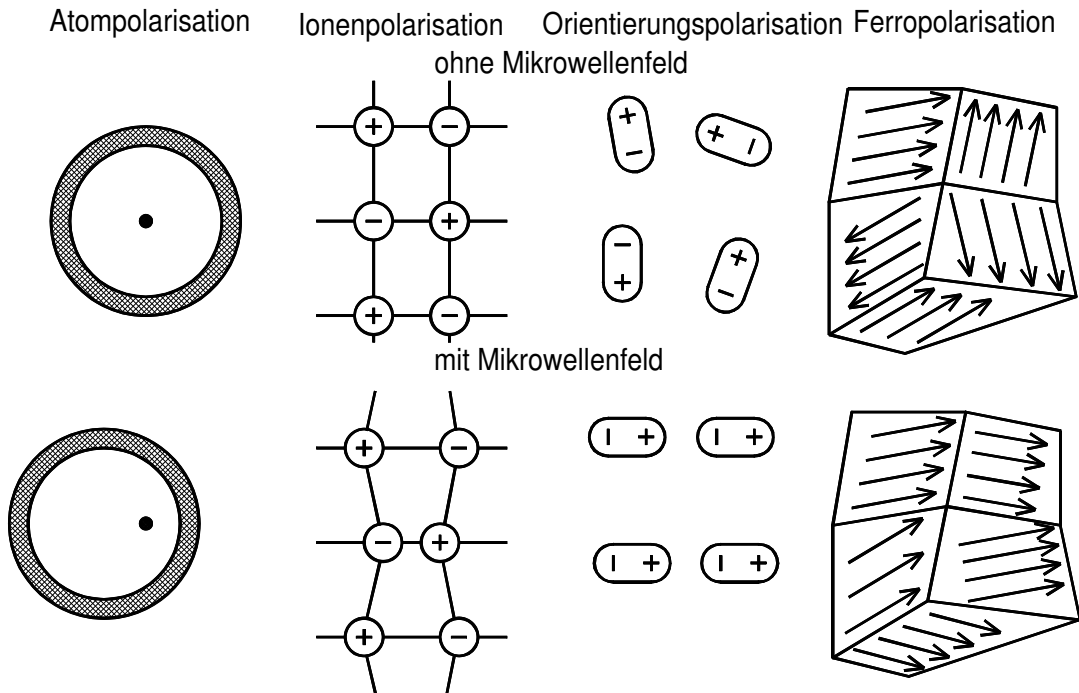


Abbildung 6: Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Stoffen [Walt 04]

Je nach Frequenzbereich der Mikrowellen ist hierbei die eine oder andere Polarisationsform dominierend (Abbildung 7). An gut elektrisch leitenden Oberflächen werden die Mikrowellen reflektiert [Nikl 92].

Dielektrische Konstante Dielektrischer Verlust

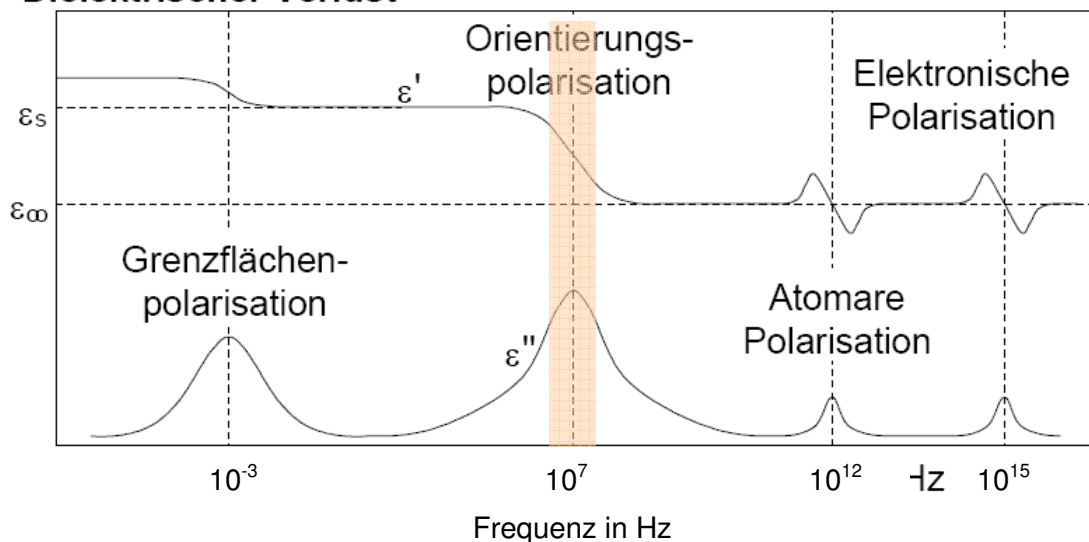


Abbildung 7: Dielektrische Verluste in Abhängigkeit der Frequenz [Emme 06]

Wie die Mikrowellen mit einem Stoff geringer elektrischer Leitfähigkeit in Wechselwirkung treten, wird mathematisch durch die Dielektrizitätskonstante ausgedrückt, wobei gilt:

$$\text{Gl.: 1} \quad \varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

Dabei wird ε_r als die relative Dielektrizitätskonstante bezeichnet, welche aufgrund der einfacheren Handhabung vorzugsweise verwendet wird. Diese kann in einen Realteil und einen Imaginärteil zerlegt werden [Dan 00], [Walt 04].

$$\text{Gl.: 2} \quad \varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \cdot \varepsilon_r''$$

Dabei beeinflusst der Realteil ε' im Wesentlichen die Ausbreitung der Mikrowellen, während der Imaginärteil ε'' die Fähigkeit ausdrückt, die Mikrowellen in Wärme umzuwandeln [Dan 00]. Häufig wird statt ε'' auch der Tangens des Verlustwinkels $\tan \delta$ angegeben, der als Quotient aus Imaginär- und Realteil definiert ist.

$$\text{Gl.: 3} \quad \tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

Mikrowellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus. In dielektrischen Materialien wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit v bestimmt durch [Pesc 79]:

$$\text{Gl.: 4} \quad v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r' \cdot \mu_r}}$$

c_0 : Lichtgeschwindigkeit μ_r : relative Permeabilität

Dies bedeutet, dass sich beim Eindringen der Mikrowellen in ein dielektrisches Material auch ihre Wellenlänge verändert [Will 98], [Mere 98].

$$\text{Gl.: 5} \quad \lambda_\varepsilon = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r'}}$$

λ_0 : Wellenlänge im Vakuum λ_ε : Wellenlänge in einem Medium

Ebenfalls in Abhängigkeit von ε_r verändert sich die elektrische Feldstärke E in einem Material, bzw. wird ein Teil der Mikrowelle an der Oberfläche reflektiert [Walt 04].

$$\text{Gl.: 6} \quad E_{n2} = \left(\frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \right) \cdot E_{n1}$$

E_1 : Feldstärke im Stoff 1 E_2 : Feldstärke im Stoff 2

Als Größe, wie weit Mikrowellen in einen Stoff eindringen können, wurde die Eindringtiefe ET definiert. Sie beschreibt die Weglänge im Stoff, nach der die Feldstärke der Mikrowellen nur noch 37 % ihres Eintrittswertes beträgt, bzw. sich die Feldenergie zu 63 % in Wärme umgewandelt hat. Dabei nimmt die Feldstärke exponentiell nach innen ab [Mühl 92].

$$\text{Gl.: 7} \quad ET = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r'} \cdot \tan \delta}$$

Die volumenbezogene Leistung, welche in einem Material durch Mikrowellen umgesetzt werden kann, lässt sich beschreiben durch [Mere 98]:

$$\text{Gl.: 8} \quad p = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' \cdot E^2$$

Im Gegensatz zur Eindringtiefe ist in dieser Gleichung für die absorbierte Leistung kein Einfluss des Realteils mehr erkennbar. Da jedoch die Feldstärke im Material und die Ausbreitung des Feldes durch eventuelle Feldüberlagerungen, Reflexionen, etc. von ϵ' abhängen, nimmt der Realteil der Dielektrizitätskonstante auch Einfluss auf die absorbierte Mikrowellenleistung.

Die Tabelle 1 führt die Dielektrizitätszahlen für einige in dieser Arbeit relevante Werkstoffe auf.

Tabelle 1: Dielektrizitätszahlen und Eindringtiefe ausgewählter Stoffe bei einer Frequenz von 2,45 GHz und einer Temperatur von 20 °C

	ϵ_r'	ϵ_r''	$\tan \delta$	ET in m	Quelle
Ruß 1	10,69	3,561	0,333	0,018	[Ma 97]
Ruß 2	9,58	2,854	0,298	0,021	[Ma 97]
Ruß synthetisch	10	3	0,300	0,021	[Zhan 04]
Ruß 4 ^(8,7 GHz)	8,6	7,4	0,860	0,008	[Sure 95]
SiC	30	11	0,300	0,008	[Mere 98]
Cordierit 1	2,87	0,138	0,048	0,293	[Ma 97]
Cordierit 2 ^(8,7 GHz)	2,9	0,14	0,048	0,237	[Sure 95]
Al ₂ O ₃	8,9	0,009	0,001	6,463	[Mere 98]
Teflon	2,05	0,0004	0,0002	70	[Mere 98]
Wasser (20 °C)	77	13	0,169	0,013	[Mere 98]
Wasser (80 °C)	56	3	0,054	0,049	[Mere 98]

Demnach gehören Wasser, SiC und Ruß mit einem hohen ϵ'' - bzw. $\tan \delta$ -Wert zu den stark mikrowellenabsorbierenden Stoffen, Teflon, Cordierit und Aluminiumoxid zu den schwachabsorbierenden Stoffen. Leider sind Literaturangaben zu den Dielektrizitätszahlen bei der Frequenz von 2,45 GHz äußerst selten und in den wenigsten Fällen

durch genauer spezifizierende Angaben zum Stoff unterlegt. So stellt sich hinsichtlich der Werte für Cordierit z.B. die Frage, ob es sich um Werte für dichten oder porösen Cordierit, für Wabenstruktur oder Vollkörper handelt.

Die Wechselwirkungen zwischen Mikrowellen und dielektrischen Stoffen sind überdies in den meisten Fällen von der Temperatur abhängig [Mere 98]. Abbildung 8 zeigt dies für Aluminiumoxid [Evan 96], Tabelle 1 für Wasser. Angaben über die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl sind in der Literatur noch seltener zu finden [Dane 00]. An einem Ausbau der Dielektrizitätsmesstechnik besteht somit dringender Bedarf.

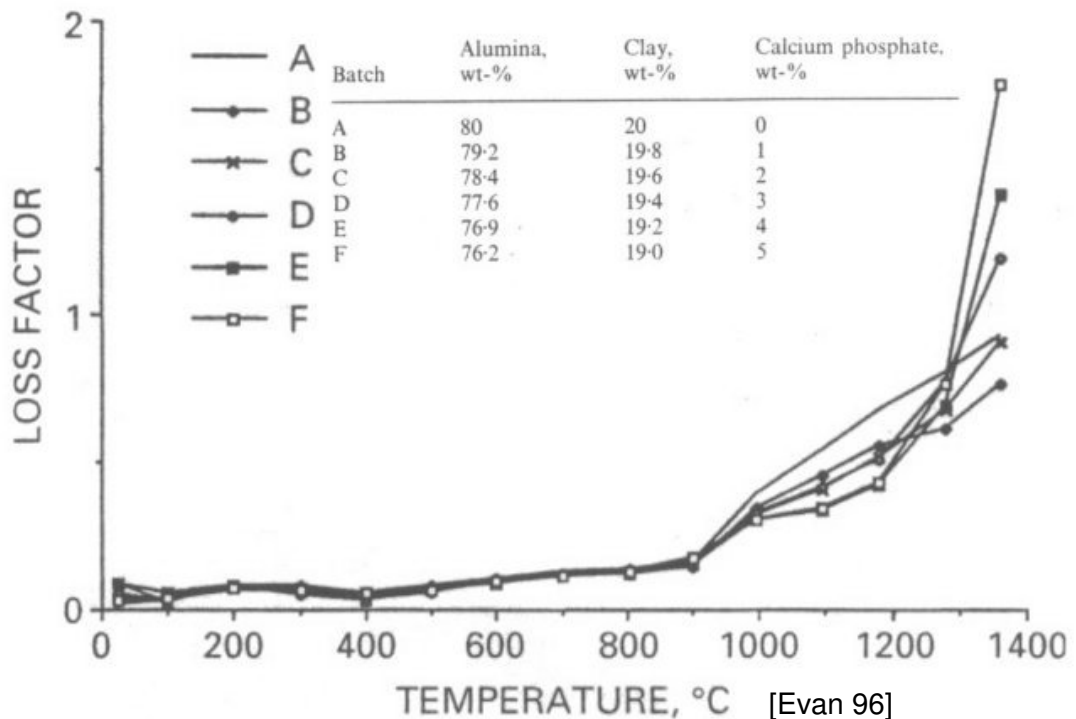


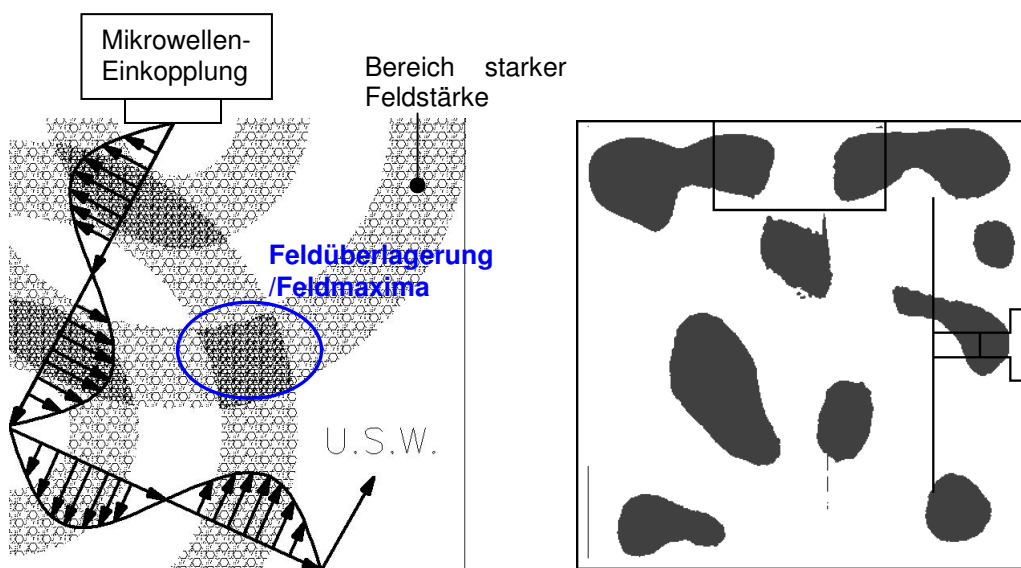
Abbildung 8: Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl von Aluminiumoxid

2.2.3 Feldverteilung in Applikatoren

Als Applikator bezeichnet man den Prozessraum einer Mikrowellenerwärmungsanlage. Seine Wände sind aus einem gut leitenden Material, so dass die Mikrowellen von den Wänden zurück in den Prozessraum reflektiert werden. Meist wird Aluminium oder, bei höherer thermischer Beanspruchung, Edelstahl als Wandmaterial ausgewählt. Magnetisierbarer Stahl eignet sich jedoch wegen des magnetischen Anteils der Mikrowellen nicht [Bury 04]. Da Mikrowellen mit höherer Leistung gesundheitsschädlich sind, muss der Applikator so ausgeführt sein, dass keine Mikrowellen austreten können [Krau 04]. Grenzwerte für die Leckstrahlung von Mikrowellenanlagen finden sich in der 26. BImSchV. Eine Übersicht über Maßnahmen zum Strahlenschutz im

Zusammenhang mit Mikrowellenapplikationen findet sich bei Pauli und Eggstein [Paul 04], [Egg 06].

Werden Mikrowellen in einen metallisch abgeschlossenen Applikator eingeleitet, durchdringen sie das Applikatorvolumen, je nach Absorptionseigenschaft die Applikatorbeladung, werden an den Wänden reflektiert und durchdringen den Applikator wieder, solange bis sie absorbiert sind. Die Folge ist, dass sich ein stehendes Mikrowellenfeld mit Bereichen starker und schwacher Feldstärke im Applikator aufbaut. Abbildung 9 (links) soll diesen Vorgang schematisch darstellen. Abbildung 9 (rechts) zeigt die Feldverteilung eines Applikators, welche mittels eines Thermopapiers aufgenommen wurde.



**Abbildung 9: links: Schematische Darstellung der Entstehung von MW-Feldern
rechts: Thermopapieraufnahme der Feldverteilung [Dane 01]**

Durch die Reflexionen der Mikrowellen an den Applikatorwänden hat die geometrische Gestaltung des Applikators einen entscheidenden Einfluss auf die Feldverteilung. Zur Applikatorgeometrie gehören die Abmaße des Applikators, seine Form sowie die Position der Mikrowelleneinleitung.

Die Literatur bietet einen weiten Überblick über die Mikrowellenfeldverteilung in quadratischen, sechseckigen und runden Applikatorformen [Chan 00] [Clar 21]. Meist werden nur leere Applikatoren betrachtet. Für die Dimensionierung von Mikrowellenapplikatoren mit hohen Anforderungen an die Homogenität des Feldes sind solche Betrachtungen jedoch von geringem praktischem Nutzen, da sowohl das Prozessgut als auch die evtl. vorhandene Wärmedämmung und Sinterhilfsmittel die Ausbreitung der Mikrowellen deutlich mitbeeinflussen. Abbildung 10 zeigt die Feldverteilung in einem Mikrowellenapplikator im leeren Zustand (links) und mit einer Beladung in Form eines 6 cm großen, stark absorbierenden Zylinders (rechts).

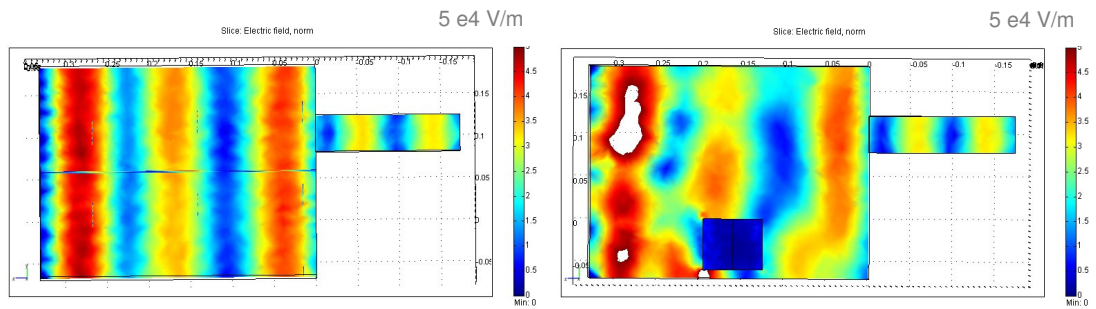


Abbildung 10: Feldverteilung in einem beladenen und unbeladenen Applikator

Wie oben beschrieben, ist die Wellenleitung auch von den dielektrischen Eigenschaften des Stoffes abhängig, ebenso die Reflexion an der Oberfläche und bei stark absorbierenden Materialien der Anteil des absorbierten und transmittierten Teiles des Wellenzuges. Eine Applikatorbeladung verändert daher aufgrund ihrer Wellenleitungseigenschaften die ursprüngliche Feldform des unbeladenen Applikators. Damit ist die Feldverteilung im Applikator auch wesentlich von den Stoffeigenschaften sowie der Größe und Geometrie der Beladung abhängig [Stra 06]. Zusätzlich kommen je nach Anwendungsgebiet Prozessparameter wie Temperatur (z.B. bei Sinterprozessen), Feuchtigkeit (beim Trocknen) und veränderliche chemische Zusammensetzung (beim Entbindern) hinzu.

Aufgrund der relativ großen Wellenlänge der Mikrowellen (12,24 cm bei 2,45 GHz) und Einflüssen der Beladung entstehen im Applikator Mikrowellenfelder, welche inhomogen und ungeordnet sind und häufig lokal stark unterschiedliche Feldstärke-Minima und -Maxima aufweisen. Aus einer inhomogenen Mikrowellenfeldverteilung resultiert eine inhomogene Wärmequellenverteilung im Prozessgut und damit eine inhomogene Temperaturverteilung, die bei den meisten Anwendungsfällen unerwünscht ist. Dabei kommt in meistens ungünstig hinzu, dass der Abstand zwischen den Inhomogenitäten ebenfalls groß ist, so dass ein schneller Temperatenausgleich durch Wärmeleitung oft nicht möglich ist [Roba 06].

In der Praxis versucht man diesem Phänomen mit Maßnahmen wie Feldrührern und Drehtellern zu begegnen, durch welche das Feld im Gut verschoben werden soll [Dane 00]. Ziel hierbei ist, dass alle Prozessbereiche im zeitlichen Durchschnitt die gleiche Mikrowellenleistung erhalten.

2.3 DPF mit Mikrowellenregeneration / Bisherige Arbeiten

Die Regeneration von Partikelfiltern mit Mikrowellen gehört zu den aktiven Regenerationssystemen, bei denen in Abhängigkeit der Filterbeladung der Ruß auf Regenerationstemperatur erwärmt wird. Die Mikrowellenregeneration unterscheidet sich von den bisher aufgeführten Systemen dadurch, dass die Wärme nicht über den Umweg einer Erwärmung des Abgases in den Filter eingebracht werden muss, sondern direkt in den Ruß eingekoppelt werden kann. Dieses birgt das Potential einer überaus energieeffizienten Regenerationsmethode, so dass auch schon einige Forschungsarbeiten zur Mikrowellenregeneration entstanden sind.

So hat Ning mit dem Ziel, eine theoretische Basis für die MW-Regeneration darzustellen, mittels eines theoretischen Rechenmodells die Einflussfaktoren auf die Mikrowellenerwärmung einer undurchströmten Schaumkeramik untersucht [Ning 95]. Ausgehend von einer gleichmäßigen Mikrowellenbestrahlung des Filters, welche von allen Seiten gleich in die Keramik eindringt, berechnet er die Umsetzung der Mikrowellenenergie in Wärme anhand einer Dämpfungskonstante. Bei diesem homogenen Mikrowellenfeld wäre nach Ning eine Keramik mit einer Dämpfung von 50 dB ideal, was der Dämpfung von SiC entspräche. Die Hauptherausforderung wäre es ein solches Mikrowellenfeld zu erzeugen. Auf die Wellenlänge bzw. die Frequenz der Mikrowellen wird nicht eingegangen. Um bei den üblichen Filtergrößen ein solches Feld erzeugen zu können, wären Frequenzen von ca. 100 GHz notwendig. Eine Mikrowellenquelle für diesen Frequenzbereich übertrifft nach heutigem Stand jedoch den Wert der meisten Fahrzeuge und ist daher unpraktikabel. Im Frequenzbereich von 2,45 GHz sind die Mikrowellenkomponenten hingegen hinreichend entwickelt und preisgünstig.

Darauf weist auch schon Walton im Rahmen seiner Ausführungen zur Mikrowellenregeneration hin [Walt 90]. Waltons Hauptansatzpunkt war, die thermische Belastung des Filters im Regenerationsprozess zu begrenzen und damit die Lebensdauer des Filters zu erhöhen. Hierfür entwickelte er magnetisierbare Keramiken, welche nur bis zum Erreichen der Curietemperatur bei $\approx 500^\circ\text{C}$ durch den magnetischen Teil der Mikrowellen erwärmt werden. Diese Eisen-Cordierit-Keramik wurde als Verschlussmaterial in die Enden des Wabenfilters eingebracht. Nach der Zündung des Rußes an den Stirnflächen sollte dieser dann selbstständig unter Nutzung der Verbrennungsenergie im Filter abbrennen. Hierzu sind jedoch fein einzustellende Randbedingungen hinsichtlich Filtertemperatur und Durchströmung notwendig, die in einem Regenerationsversuch mit Abschaltung des Motors dargestellt wurden.

Ebenfalls mit Cordierit und Metalloxiden führte auch Ma Untersuchungen zur Mikrowellenregeneration durch, jedoch mit dem Ziel, die Metalloxide als Katalysatoren zur Reduzierung der Zündtemperatur des Rußes einzusetzen und eine mikrowellengeeignete Trägerstruktur zu finden [Ma 97]. Hierfür wurden die dielektrischen Eigenschaften verschiedener Oxide ermittelt, anhand derer eine Bewertung der Stoffe durchgeführt werden sollte. Weiterhin wurden an kleinen 1 ml großen Proben Versuche zur Ermittlung der Zündtemperatur des Rußes durchgeführt, welche zeigten, dass die Rußzündung im Mikrowellenfeld schon bei deutlich geringeren Temperaturen stattfindet. Von ähnlichen Beobachtungen berichtet auch Suresh Babu [Sure 95], der ebenfalls die Verbrennung von Ruß im Mikrowellenfeld, jedoch bei einer unpraktikablen Frequenz von 8,7 GHz durchgeführt hat.

Von Versuchen an etwas größeren Proben berichtet Zhang-Steenwinkel. Er hat das Abbrandverhalten rußbeladener Cordieritwabenkörper mit 15 mm Durchmesser und 40 mm Länge mit und ohne einer katalytischen Perowskite-Beschichtung untersucht [Zhan 04]. Als Verbrennungsprodukt entsteht bei der Perowskiteprobe deutlich weniger CO. Der eingesetzte Perowskite besitzt eine noch höhere Mikrowellenabsorption als der eingesetzte Ruß, so dass weniger Mikrowellenenergie notwendig ist, um in dem gewählten Versuchsaufbau die Probe auf Zündtemperatur zu erwärmen.

Die umfassendsten Versuche zur Mikrowellenregeneration werden vor allem von Nixdorf beschrieben [Nixd 01], [Nixd 02]. Nixdorf stellte für seine Versuche einen Filter mit SiC-Fasern her, welche die Mikrowellen sehr gut absorbieren. Dies führt jedoch dazu, dass die Mikrowellen vor allem von dem Filtermaterial (oder bei den oben genannten Vorgehen von der Beschichtung) und weniger vom Ruß absorbiert werden. Die weitere Folge dieses Vorgehens ist, dass die Mikrowellenfeldverteilung im Applikator statt von der Rußbeladung im wesentlichen von dem Filtermaterial bestimmt wird. So weist auch Nixdorf selbst auf die Notwendigkeit hin, das Mikrowellenfeld zu optimieren und schlägt dafür Modellierungsrechnungen vor. Aussagen über die Durchführung dieser Rechnungen gibt es bis heute nicht.

Als Filterform wählte Nixdorf zunächst eine Wabenkörperform und wechselte dann zu einer gefalteten Filtermembran, welche er nach der Beladung in verschiedenen Fahrzeugen mit Mikrowellen regenerierte. Er berichtet von außerordentlich guten Regenerationsergebnissen [Nixd 02]. Für den Zeitraum der Regeneration wurde die Abgasmenge durch den Filter mittels eines Bypasses reduziert. Die eingesetzte Mikrowellenleistung wird mit 1,7 bis 2,7 kW angegeben, was bei einem Magnetronwirkungsgrad von ~ 65 % einer elektrischen Eingangsleistung bis 4,1 kW entspricht. Diese Leistung können die Bordsysteme heutiger PKW jedoch nicht bereitstellen.

3 Neuer Lösungsansatz zur Mikrowellenregeneration

Die bisherigen Ansätze zur Mikrowellenregeneration beruhten hauptsächlich auf der Anwendung von stark absorbierenden SiC-Filtern oder Cordieritfiltern mit zusätzlichen mikrowellenabsorbierenden Komponenten. Da SiC stark Mikrowellen absorbiert, wird nicht nur der Ruß (≈ 20 g) sondern auch der Filter erwärmt. Dieser besitzt einerseits bei einem Filtervolumen von 2,5 l eine relativ hohe Masse (einige Kilogramm), welche mit beheizt werden muss, andererseits beeinflusst, bzw. bestimmt er die Mikrowellenfeldverteilung gravierend.

Der neue, in dieser Arbeit verfolgte Ansatz beruht auf einer nicht Mikrowellen absorbierenden Keramik. Dadurch kann der rußfreie Filter vom elektromagnetischen Feld vollständig durchdrungen werden. Da Ruß hingegen stark mikrowellenabsorbierend ist, unterscheiden sich die rußbeladenen Bereiche der Keramik hinsichtlich ihrer Mikrowellenabsorption stark von den unbeladenen Bereichen.

Dies bedeutet, dass nur dort Wärme in den Filter eingetragen wird, wo tatsächlich Energiebedarf besteht, weil dort Ruß vorhanden ist. Wenn in einem Bereich des Filters der Ruß regeneriert ist, wird dort keine Mikrowellenenergie mehr absorbiert. Die Mikrowellen können dann den Filter weiter durchdringen und an einer anderen Stelle den Ruß erwärmen, so dass der Filter schrittweise regeneriert wird. Das Mikrowellenfeld ist von der Absorption des Filters entkoppelt.

Unter diesem Aspekt sollte es möglich sein, sich von dem üblicherweise gewünschten homogenen Mikrowellenfeld zu trennen und ein stark inhomogenes und konzentriertes Feld mit starken elektrischen Feldstärken zu erzeugen. Gelingt es, die Energie auf kleine Teilbereiche des Filters zu konzentrieren, die nach Abbrand des Rußes weiter durch den Filter wandern, sollte eine (im Vergleich zur gleichzeitigen Erwärmung des gesamten Filters) kleine Energiequelle zur Regenerierung eingesetzt werden können. Ziel des neuen Lösungsansatzes ist es daher, ein stark inhomogenes, der Rußbeladung nachwanderndes Mikrowellenfeld zu erzeugen. Hierfür ist eine geeignete Keramik auszuwählen, ein Applikator zu entwickeln und zu testen.

4 Lösungsweg

Die Feldverteilung im Applikator wird beeinflusst von den Mikrowellenabsorptionseigenschaften des rußbeladenen Filters, der folglich hinsichtlich seiner Rußverteilung bzw. seiner Mikrowellenabsorptionseigenschaften untersucht werden muss.

Weiterhin sind verschiedene bekannte und neu entwickelte Filtermaterialien auf ihre Mikrowellentransparenz im Temperaturbereich bis 600 °C zu untersuchen und geeignete auszuwählen.

Wie sich das Mikrowellenfeld in einem Partikelfilter ausbreitet und konzentriert, hängt neben den Stoffeigenschaften des Filters auch wesentlich von der Geometrie des Applikators (Form, Länge, Durchmesser) und Position der Mikrowelleneinkopplung ab. Mit dem FEM-Programm FEMLAB (Comsol Multiphysics) soll das Mikrowellenfeld im Filter berechnet und der Applikator für die Regeneration mit einem konzentrierten, nachwandernden Feld optimiert werden. Bedingung hierfür ist die Kenntnis der notwendigen Stoffdaten, vor allem der Dielektrizitätskonstanten, welche in einer selbst zu entwickelnden Anordnung messtechnisch ermittelt werden müssen.

Da die Regeneration bei jedem Fahrzeugbetriebszustand durchführbar sein soll, bzw. die Oxidation des Rußes eine Sauerstoffzufuhr bedingt, muss eine Durchströmung des Filters bei der Applikatorentwicklung berücksichtigt werden. Auf Wunsch der diese Arbeit begleitenden Automobilindustrie ist vorzugsweise eine Vollstromregeneration anzustreben. Hierfür sind die Berechnungen des Mikrowellenfeldes und der Wärmequellenverteilung mit einer Betrachtung der Wärmeverluste durch die Strömung zu koppeln. Anhand der Modellierungen und Vorbetrachtungen ist dann eine Regenerationsstrategie zu entwerfen. Ein Funktionsmuster ist darzustellen.

Das Funktionsmuster soll abschließend an einem Motorenprüfstand getestet werden.

5 Ermittlung der Stoffeigenschaften

5.1 Absorptionsmessungen

Mit Blick auf den Lösungsansatz – die Verwendung von mikrowellentransparenten Filterkeramiken - ist es notwendig, verschiedene Stoffe auf ihre Mikrowellenabsorption hin zu untersuchen.

Die einfachste Form, einen Stoff hinsichtlich seines Verhaltens im Mikrowellenfeld zu beurteilen, ist, eine Stoffprobe dem Mikrowellenfeld auszusetzen und die Erwärmung festzustellen.

5.1.1 Voruntersuchung bekannter Filterwerkstoffe

Zu Beginn der Arbeit wurden zunächst die auf dem Markt verfügbaren Filterwerkstoffe auf ihre Mikrowellenabsorption hin untersucht. Dies waren Cordierit und SiC-Wabenkörperfilter. Zur Verfügung stand ein 6 kW Mikrowellenapplikator mit einem Volumen von ~ 70 l und Applikatorabmaßen von 380 x 380 x 480 mm³ (Abbildung 11). Da sich für die Temperaturmessung im Mikrowellenfeld vorrangig Pyrometer eignen [Schi 99], welche jedoch nur die Oberflächentemperatur eines Körpers erfassen können, wurden aus Standardfiltern mit den Abmaßen 5,66“ x 6“ (144 mm x 153 mm) Scheiben mit einer Dicke von 20 mm herausgeschnitten. Durch eine schräge Anordnung der Proben im Applikator wurde einerseits verhindert, dass von dem Pyrometer durch den Filter hindurch die Temperatur des Bodens des Applikators gemessen wurde, andererseits wurde die Temperatur als Mittel über die gesamte Dicke erfasst (Abbildung 11).

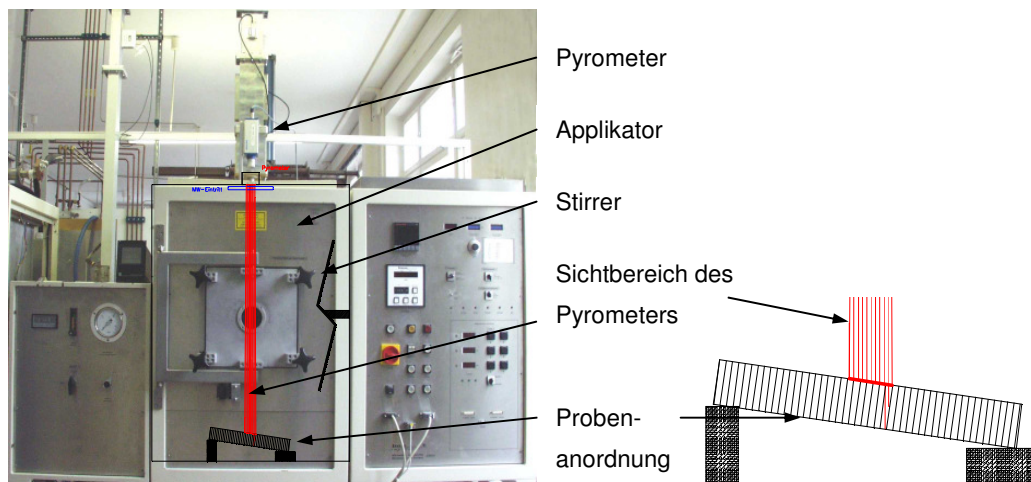


Abbildung 11: 6 kW Mikrowellenofen und Messanordnung

Abbildung 12 beschreibt das Auswertungsverfahren. Kurz nach Einschalten der Mikrowellen erwärmt sich die Probe, anhand deren Temperaturanstieg die Aufheizrate ermittelt wird. Es wurden nur die ersten Sekunden der Erwärmung betrachtet, da hier noch die Wärmeverluste an die Umgebung vernachlässigt werden können. Die absorbierte Mikrowellenleistung P_{abs} wurde anhand der Aufheizrate, Masse und Wärmekapazität der Probe nach Gleichung 9 ermittelt.

$$\text{Gl.: 9} \quad P_{abs} = m \cdot c_p \cdot \Delta T / \Delta t$$

$\Delta T / \Delta t$: Aufheizrate; m: Masse; c_p : Wärmekapazität

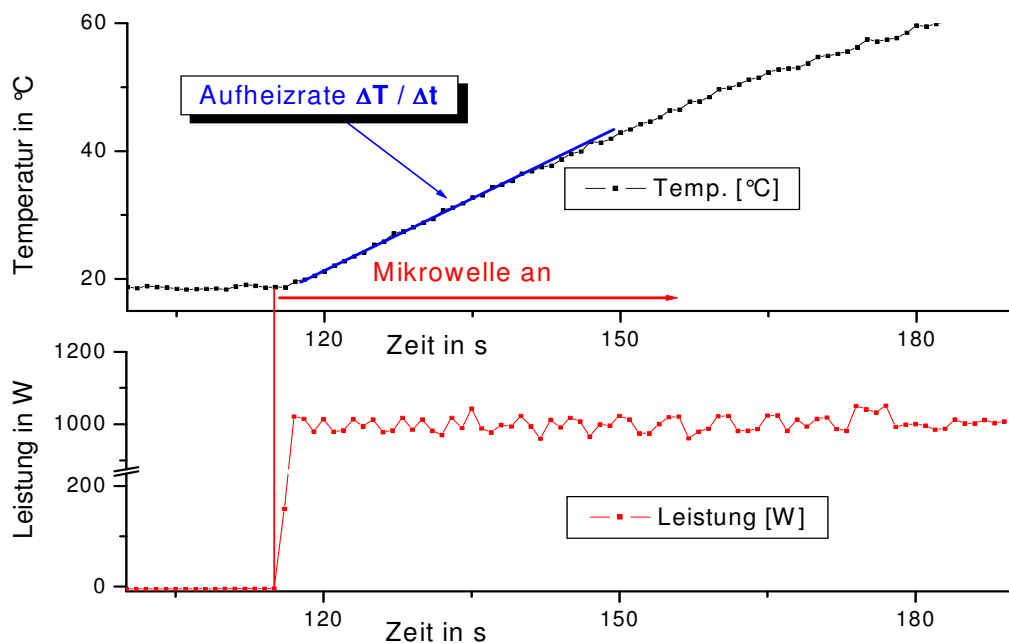


Abbildung 12: Auswertung des Absorptionsmessverfahrens

Da es sich bei dieser Messanordnung um einen Multimodenofen handelt (chaotische Feldverteilung, siehe Abbildung 9), müssen für diese Messung einige Einschränkungen getroffen werden.

- Die ermittelte Aufheizrate ist abhängig von dem Messort und von dem elektrischen Feld, welches im Messbereich auf die Probe wirkt. Dieses ist jedoch aufgrund der Multimodenanordnung unbekannt. Die Messung kann also nur vergleichend (Stoff A absorbiert mehr als Stoff B) angewendet werden.
- Damit ist das Ergebnis ein Relativwert, der nur für die beschriebene Messanordnung gilt.

Weitere Einschränkungen sind:

- Die Aufheizrate kann nur in einem kleinen Temperaturbereich kurz nach Anschalten der Mikrowelle ermittelt werden.
- Die Messanordnung muss exakt gleich für alle Proben sein.
- Die Mikrowellenleistung muss für alle Versuche gleich sein.
- Der Stirrer muss ausgeschaltet und stets in der gleichen Stellung sein.
- Feldverschiebungen können aufgrund großer Absorptionsunterschiede der Probe eintreten.

Um die zwei Filterwerkstoffe SiC und Cordierit zu vergleichen, sind diese Messungen durchaus geeignet. In Abbildung 13 sind die deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Mikrowellenabsorption ohne und mit einer Rußbeladung von $8 \text{ g}_{\text{Ruß}}/\text{l}$ dargestellt.

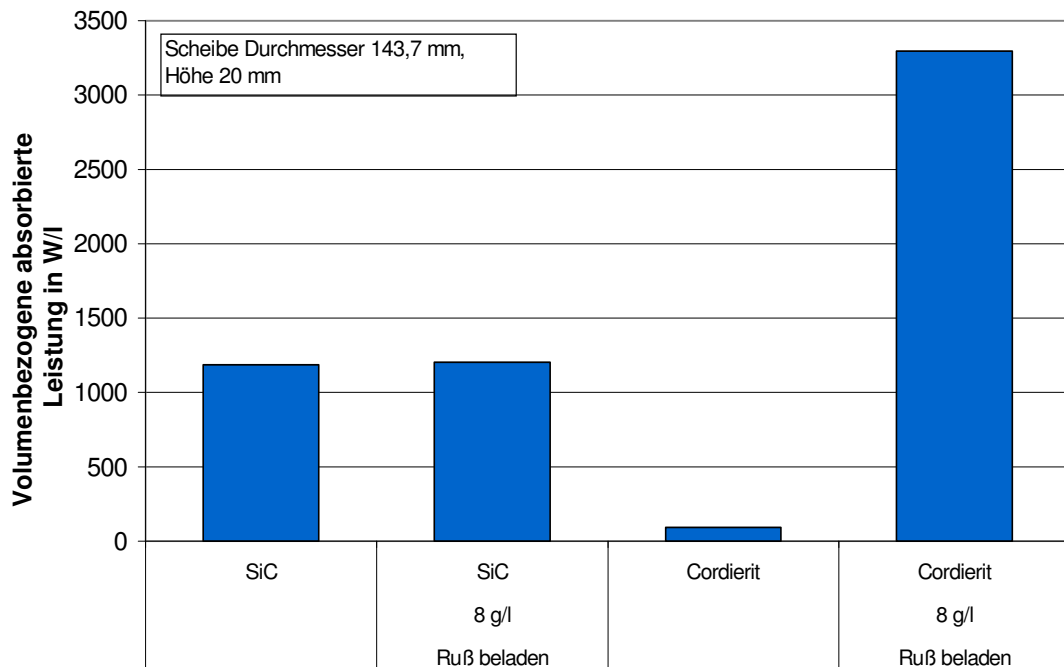


Abbildung 13: Absorbierte Mikrowellenleistung bekannter Filtermaterialien

Es zeigt sich, dass der SiC-Werkstoff schon ohne Rußbeladung die Mikrowellen sehr gut absorbiert. Die Rußbeladung hat auf die Absorption der Mikrowellen durch den Filters kaum einen Einfluss. Dies bedeutet, dass ein sich in dem Filter ausbildendes Mikrowellenfeld (unabhängig von der Rußbeladung) allein durch den SiC-Filter beeinflusst wird.

Im Gegensatz hierzu absorbiert der Cordieritfilter im rußfreien Zustand kaum Mikrowellen, d.h. der Cordierit ist nahezu mikrowellentransparent. Mit Rußbeladung werden die Mikrowellen jedoch sehr gut durch das Cordierit-Ruß-System absorbiert, sogar noch in stärkerem Maße als von dem SiC-Werkstoff. Damit ist also der Cordierit

dem SiC als Werkstoff nicht nur im Sinne der in Kapitel 3 beschriebenen und verfolgten Regenerationsstrategie vorzuziehen, sondern auch hinsichtlich der höheren Mikrowellenabsorption des Rußes. Von den marktüblichen Filterwerkstoffen wurde daher der Cordierit als bevorzugter Werkstoff für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

5.1.2 Modifizierung der Versuchsanordnung

Um den Schwächen der oben dargestellten Versuchsanlage zu entgegnen, wurde eine neue Versuchsanordnung konzipiert. Das Anlagenschema ist in Abbildung 14 dargestellt [Stra 05].

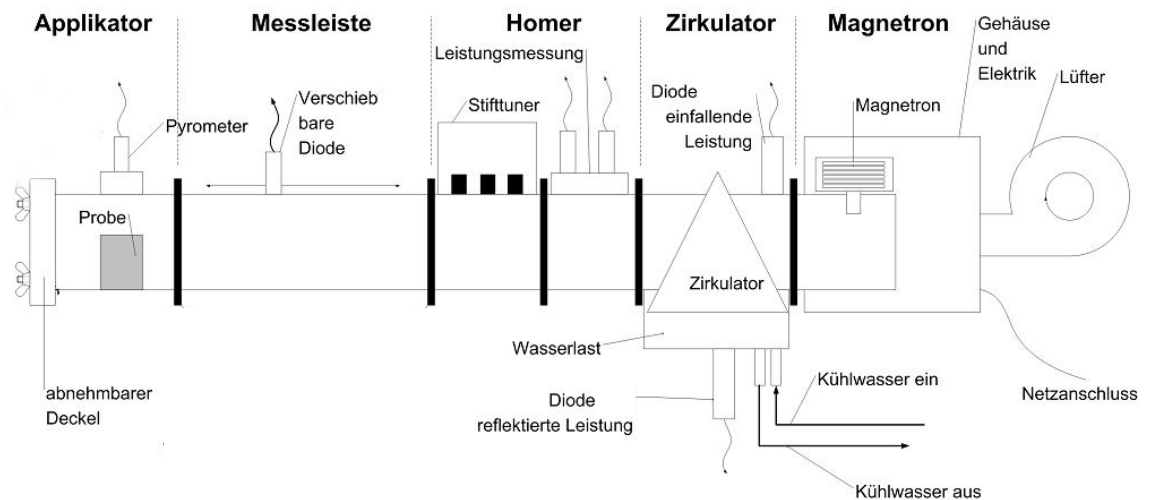


Abbildung 14: Schema der monomodalen Versuchsanlage

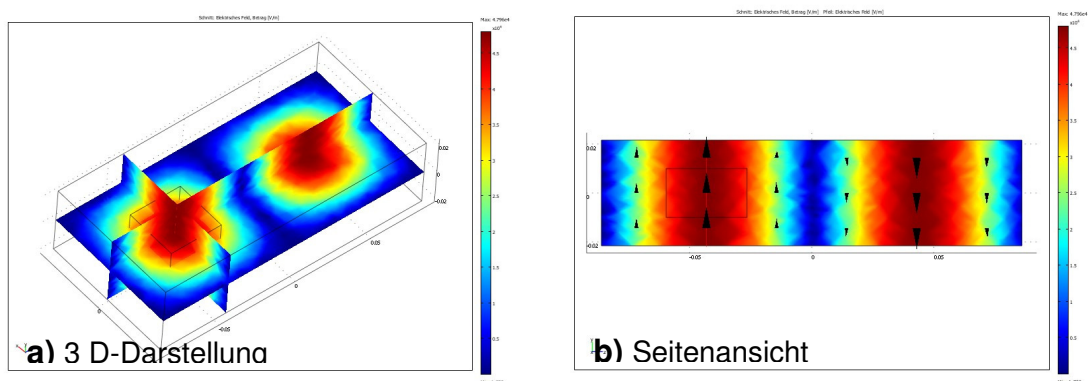


Abbildung 15: Mikrowellen-Feldverteilung im Hohlleiterapplikator

An Stelle der multimodalen Versuchskammer wird nun ein monomodaler Applikator in Form eines geschlossenen Hohlleiters vom Typ R 26 verwendet. Monomode bedeutet, dass die Applikatorgeometrie so ausgewählt wird, dass sich nur eine Wellenform

ausbilden kann [Kumm 89]. Das elektrische Mikrowellenfeld, welches sich in diesem Applikator ausbildet, hat dabei nur eine Richtung. Abbildung 15 zeigt aus zwei Perspektiven die Mikrowellenfeldverteilung im Applikator. Da die Feldverteilung bei dem ausgewählten Applikator bekannt ist, ist es möglich, die Probe direkt im Energie-maximum zu positionieren. Abbildung 16 zeigt das Mikrowellenfeld im Hohlleiter mit und ohne Probe. Es zeigt sich, dass das Einbringen einer kleinen Probe das Feld nur unwesentlich verschiebt. Der Temperaturmessbereich (Kreisinnenfläche) liegt trotz geringer Feldverschiebung noch im Feldmaximum.

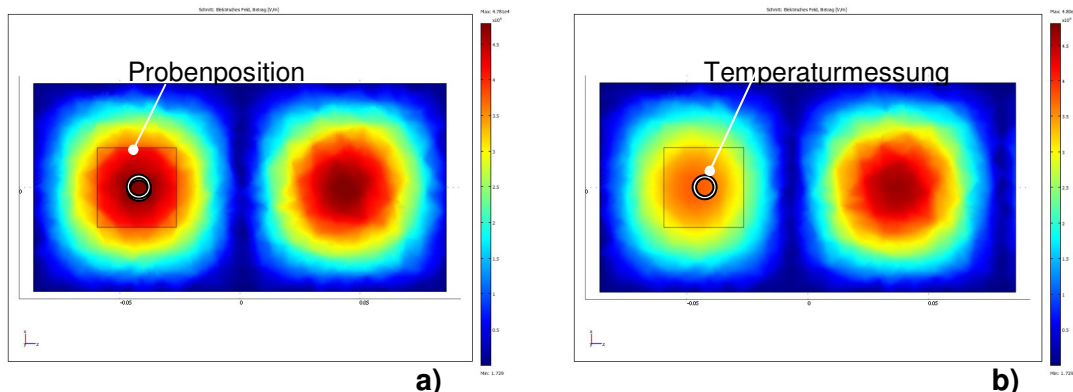


Abbildung 16: MW-Feldverteilung im Hohlleiter ohne a) und mit b) Beladung

5.1.3 Temperaturabhängige Untersuchung von Filterkeramiken

Eine Herausforderung beim Einsatz von Mikrowellen und der Auslegung von Applikatoren ist die Abhängigkeit der Mikrowellenabsorption dielektrischer Werkstoffe von der Temperatur. So ändern viele bei Raumtemperatur transparente Werkstoffe ihre Mikrowellenabsorption bei höheren Temperaturen deutlich (siehe auch Kap. 2.2.2, z.B. Aluminiumoxid).

Damit ist es notwendig, die Mikrowellenabsorption auch in Abhängigkeit der Temperatur zu messen. Aufgrund der geringen Mikrowellenabsorption war es nicht möglich, alle zu untersuchenden Werkstoffe durch Mikrowellen auf höhere Temperaturen zu erwärmen. Daher wurde der Versuchsablauf angepasst, indem die Stoffproben in einem externen Ofen auf 800 °C in einer Wärmedämmung erwärmt und bei Erreichen dieser Temperatur mitsamt der Dämmung in den Hohlleiterapplikator eingebracht wurden. Während des selbstständigen Abkühlvorganges wurden dann die Mikrowellen kurz (≈ 10 s) angeschaltet und die Abweichung von der Abkühlkurve als Aufheizkurve ermittelt (Abbildung 17). Die Absorption wurde entsprechend Abbildung 12 berechnet.

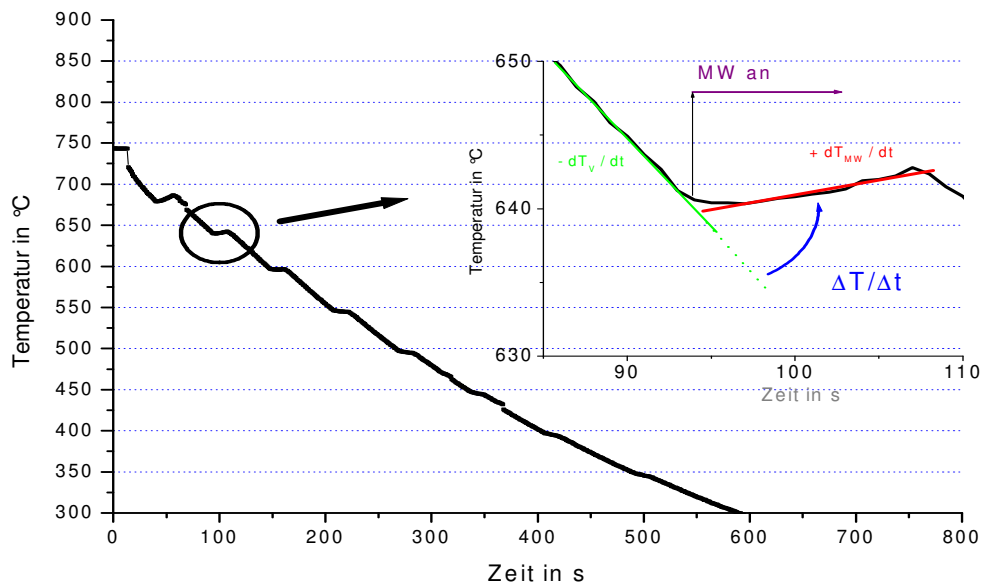


Abbildung 17: Vorgehen bei der temperaturabhängigen Absorptionsmessung mikrowellentransparenter Stoffe

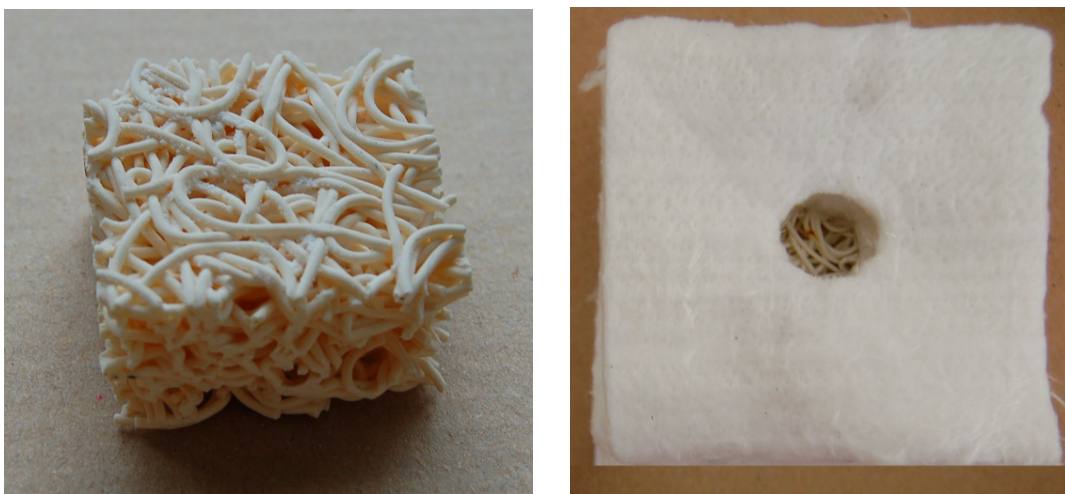


Abbildung 18: Keramikprobe und Wärmedämmung des Versuchsaufbaus

Neben dem bekannten Filterwerkstoff Cordierit, welcher als Wabenkörper vorlag, wurden auch neue Materialkompositionen untersucht, die im Rahmen des ZUTECH Projekts „Regeneration von Dieselpartikelfilter durch Mikrowellen“ bei der Werkstoffentwicklung als vielversprechende Werkstoffe für einen Dieselpartikelfilter betrachtet wurden [Absc 06]. Diese neuen Werkstoffe wurden am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt und lagen als „Spaghettistruktur“ vor (Abbildung 18). Die Werkstoffklassifizierung ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Die eingestrahlte Mikrowellenleistung betrug 600 W. Sofern nicht weiter vermerkt, wurden quaderförmige Proben mit den Abmaßen 33 x 33 x 20 mm³ untersucht. Die Wärmedämmung bestand aus mehreren Schichten eines Glasfaserwärmedämmvlieses [Asgl 04] (Abbildung 18 rechts). Die Ergebnisse dieser temperaturabhängigen Absorptionsmessungen sind in Abbildung 19 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammensetzung der neuen Werkstoffe (in Masse%)

	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	ZrO ₂
AZT	2,4	93,0	0,5	1,6	2,4
MZT	0	48,7	27,2	10,5	13,7
MZ	0	67,2	25,6	4,9	2,4
MTET	0	44,3	41,8	9,9	4,0
MZTT	16,0	48,5	10,9	16,0	8,6
MHZ (M4)	0	48,8	13,8	15,2	22,1

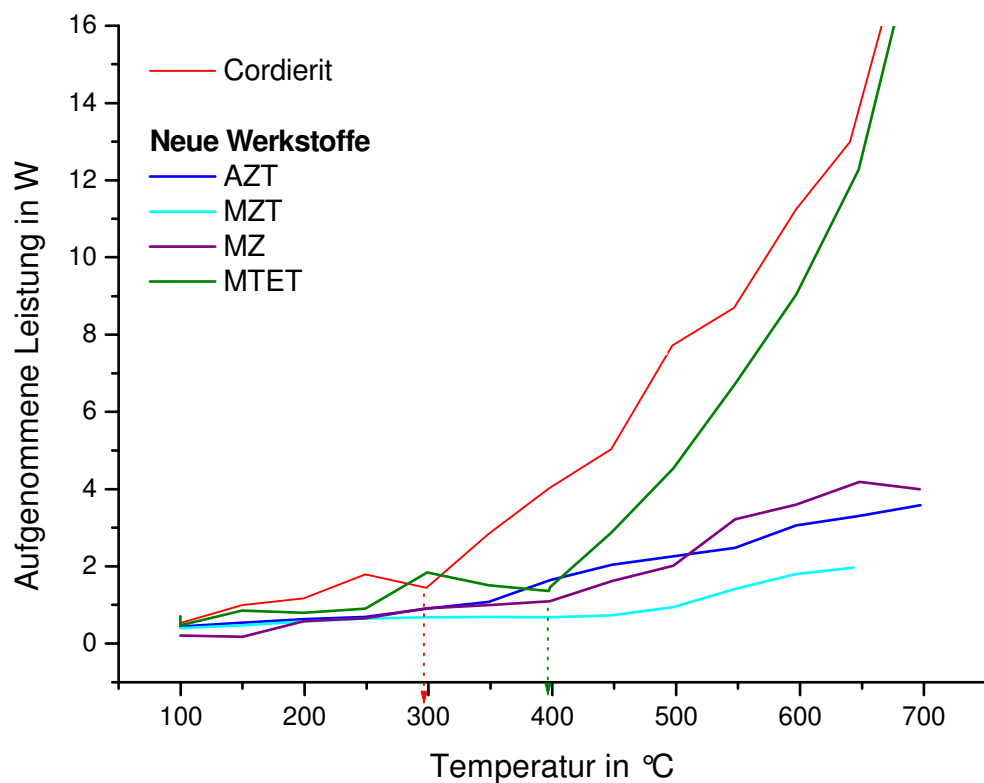


Abbildung 19: Temperaturabhängige MW-Absorption verschiedener Keramiken

Zuerst soll der in Kapitel 4.1 ausgewählte Cordierit betrachtet werden. Wie Abbildung 19 zeigt, ist die Mikrowellenabsorption des Cordierit bei Temperaturen unter 300 °C sehr gering, ähnlich den ausgewählten neuen Werkstoffen. Ab einer Temperatur von 300 °C jedoch steigt die Mikrowellenabsorption des Cordierits deutlich an. In Verbindung mit Ruß wird dieses Verhalten sogar deutlich verstärkt (Abbildung 20). Aufgrund dieser Eigenabsorption des Cordierits steht zu befürchten, dass der Cordierit auch nach der Regeneration des Rußes weiter Mikrowellen in starkem Maße absorbiert und die beabsichtigte Umorientierung des Mikrowellenfeldes nicht eintritt. Ein dem Ruß nachwanderndes Mikrowellenfeld kann dann nicht mehr realisiert werden, so dass von der weiteren Verwendung von Cordierit Abstand genommen werden muss.

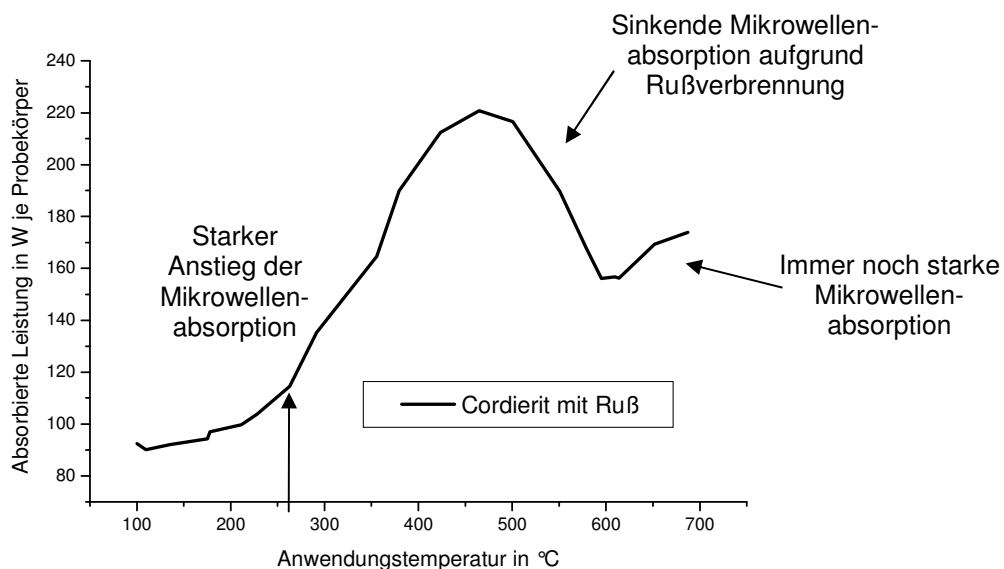


Abbildung 20: Temperaturabhängige MW-Absorption eines rußbeladenen Cordieritfilters

Im Gegensatz zu der starken Temperaturabhängigkeit des Cordierits zeigen die neuen Werkstoffe AZT, MZ und MZT ein deutlich temperaturstabileres Verhalten. Im betrachteten Temperaturbereich von 100 bis 650 °C ist kaum eine Abhängigkeit der Mikrowellenabsorption von der Temperatur festzustellen. Damit sind diese Werkstoffe aus Sicht der Mikrowellentransparenz dem Cordierit vorzuziehen und können als mögliche neue Filterwerkstoffe empfohlen werden.

Von den Keramiken MZ, AZT und MZT wurde im Rahmen des DPF-Projektes der AZT aufgrund seiner hervorragenden Temperaturwechselbeständigkeit [Anez 07] als neuer zu optimierender Filterwerkstoff ausgewählt. Die Wabenkörperentwicklung für diesen Werkstoff bis hin zu einer partikelfiltertypischen offenen Porosität erfolgte parallel zur

weiteren Mikrowellenentwicklung. Bis zur Fertigstellung des neuen AZT-Filters wurde daher für die Applikator- und Regenerationsverfahrensentwicklung der schon als Filter vorhandene Cordierit weiter verwendet werden.

Weitere Untersuchungen wurden an Wärmedämmstoffen durchgeführt, welche zwischen Filter und Applikator eingefügt werden sollten. Die Abbildung 21 zeigt die Mikrowellenabsorption der bisher für diesen Zweck verwendeten 3M-Matte mit einer als Alternative geeigneten Asglaasil-Matte. Dazu stehen zum Vergleich Cordierit und der in der Mikrowellenthermoprozesstechnik oft empfohlene und viel verwendete Faserdämmstoff KVS 164. Hinsichtlich der Mikrowellenabsorption zeigen diese beiden Dichtmaterialien untereinander keinen signifikanten Unterschied. Beide haben ein mit der Temperatur steigendes Absorptionsverhalten, welches noch über dem des Cordieritwabenkörpers liegt. Im Vergleich mit der auch als Ofenmaterial geeigneten Asglaasil-Matte absorbiert der KVS Dämmstoff bis zu einer Temperatur von 500 °C stärker Mikrowellen. Die Messwerte deuten bei ca. 550 °C an, dass dann die Glasfasern mehr Mikrowellen absorbieren. Für eine exakte Aussage sind weitere Messungen, die einen noch höheren Temperaturbereich abdecken, notwendig.

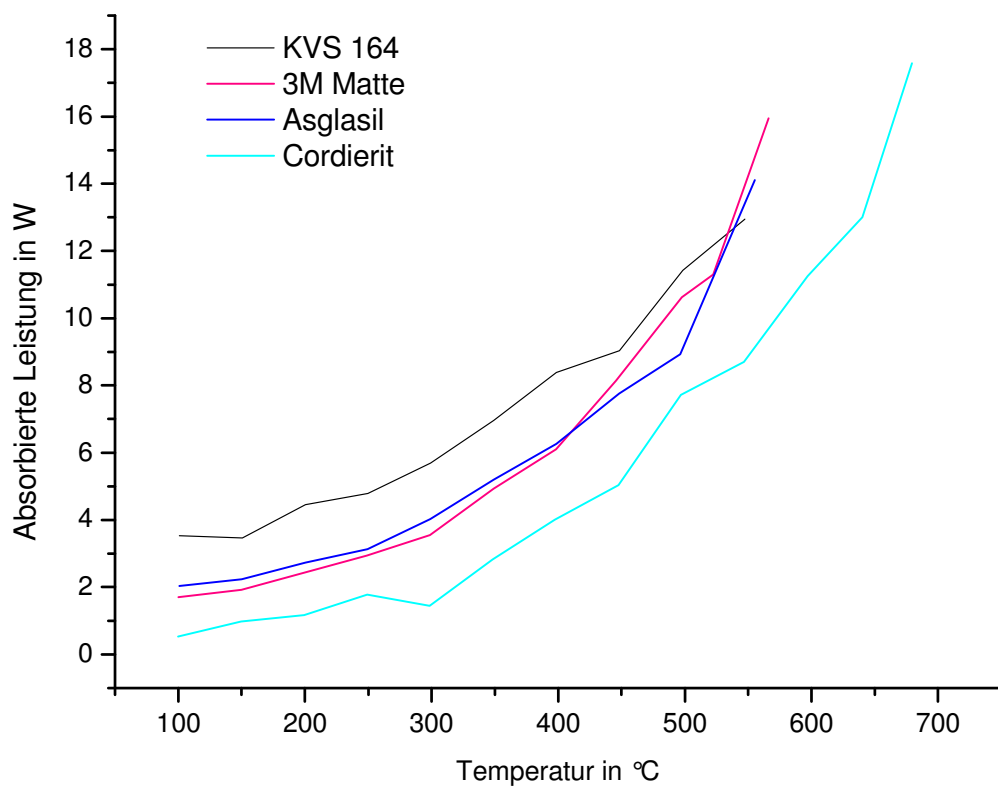


Abbildung 21: Mikrowellenabsorption von Wärmedämmstoffen

5.1.4 Rußbelastung der Wabenkörper

Bevor im Folgenden die Untersuchung rußbelasteter Wabenkörper beschrieben wird, soll auf den Beladungsprozess der Filter eingegangen werden. Dieser wurde an einem Motorenversuchsstand durch das Institut für Fahrzeugtechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Dresden vorgenommen. Als Motor diente ein PSA DW 12 TE D4/L4.

Emissionsmessungen bei verschiedenen Drehzahlen und Belastungen des Motors zeigten, dass die Partikelemission vom Betriebszustand abhängig ist (Abbildung 22) [Sand 04]. Je nach Betriebszustand werden mehr oder weniger Partikel mit unterschiedlichen Zusammensetzungen emittiert, welche auch unterschiedlich die Mikrowellen absorbieren [PAK 04b].

Daher wurde für die Beladung aller in dieser Arbeit untersuchten Filter ein einheitlicher Betriebspunkt (M_d : 30 Nm, n : 3000 1/min entspricht 1,52 g_{Ruß}/h) definiert. Bei der Beladung kleinerer Filterproben kam ein Bypasssystem zum Einsatz, um die Strömungsbedingungen im Filter weitgehend gleich zu halten.

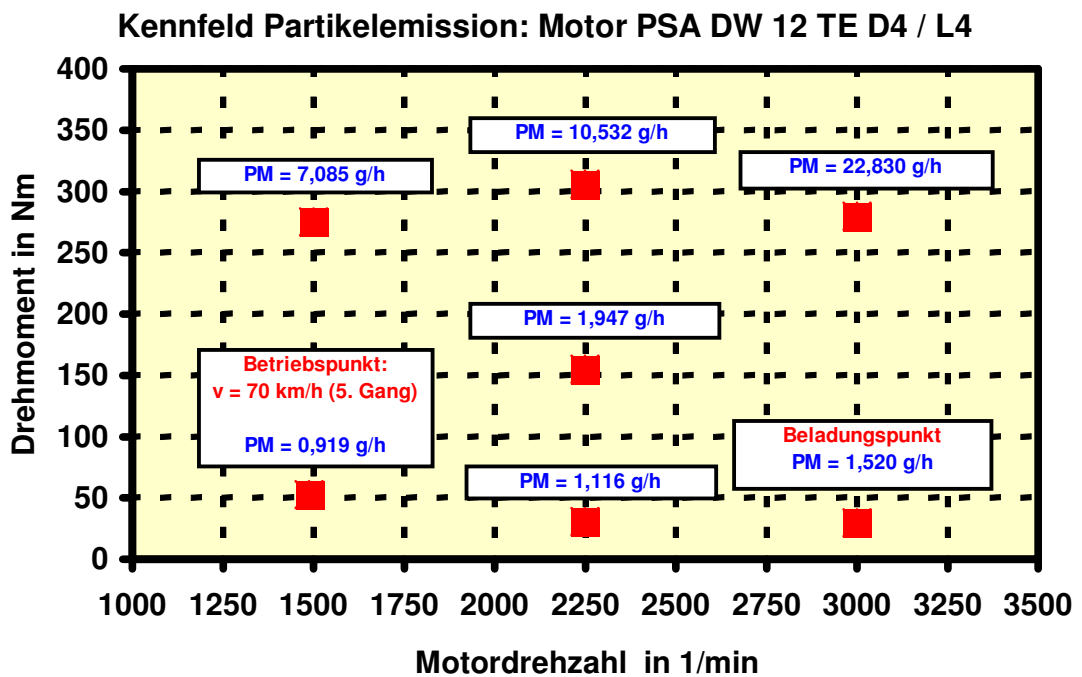


Abbildung 22: Rußemission in Abhängigkeit vom Betriebspunkt [Sand 04]

5.1.5 Untersuchung eines rußbeladenen Monolithen

In Abbildung 13 und Abbildung 20 wurde schon die stark angestiegene Mikrowellenabsorption eines Cordieritfilters aufgrund einer Rußbeladung gezeigt.

Noch offen ist jedoch die Frage, ob der Ruß im Filter gleichmäßig verteilt ist, bzw. die Mikrowellenabsorption über den gesamten Filter hinweg gleichmäßig ist.

Hierzu wurde ein Filter mit einer typischen Rußbeladung von $\approx 8 \text{ g/l}$ (bzw. $22,4 \text{ g} / 2,5 \text{ l}$) entsprechend Abbildung 23 in radialer und axialer Richtung zerteilt und die Teilstücke auf ihre Mikrowellenabsorption hin bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Für die Messungen wurde wieder der monomode Applikator ausgewählt.

Die Proben hatten eine Abmessung von $30 \times 25 \times 15 \text{ mm}^3$ und eine Masse von $\sim 5 \text{ g}$.

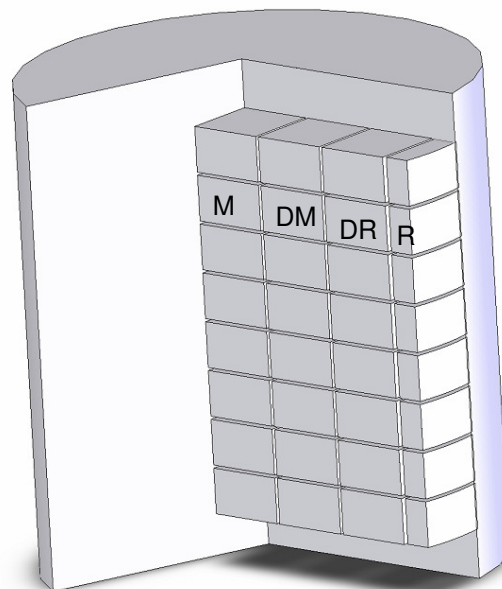


Abbildung 23: Probenahme aus einem Rußfilter

Da die rußbeladenen Filter sehr gut Mikrowellen absorbieren, wurde die Temperatur stufenweise beginnend bei Raumtemperatur mittels Mikrowellenerwärmung erhöht. Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse einer Messung.

Der Vergleich der Mikrowellenabsorption der einzelnen Schichten in radialer Richtung zeigt keine Unterschiede in der Absorption. In axialer Richtung hingegen konnte eine Zunahme der Absorption gegen das Kanalende hin beobachtet werden. Dieses Absorptionsverhalten war sowohl in der Mitte als auch am Rand des Filters feststellbar und muss daher bei den Modellierungsrechnungen mitbeachtet werden.

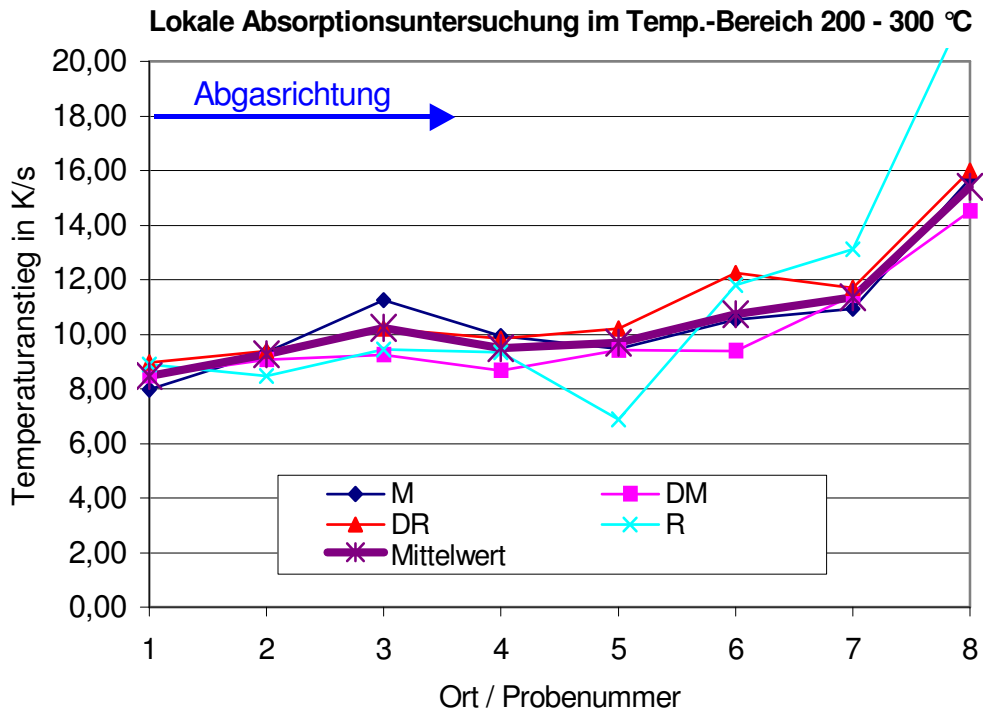


Abbildung 24: Messung der ortsbezogenen Rußabsorption

Normiert man die Veränderung der Absorption auf den Wert des ersten Teilelements, erhält man eine Darstellung wie Abbildung 25. Hieraus lässt sich eine Verteilungsfunktion über die Länge des Filters ermitteln, welche bei der Modellierung zu berücksichtigen ist.

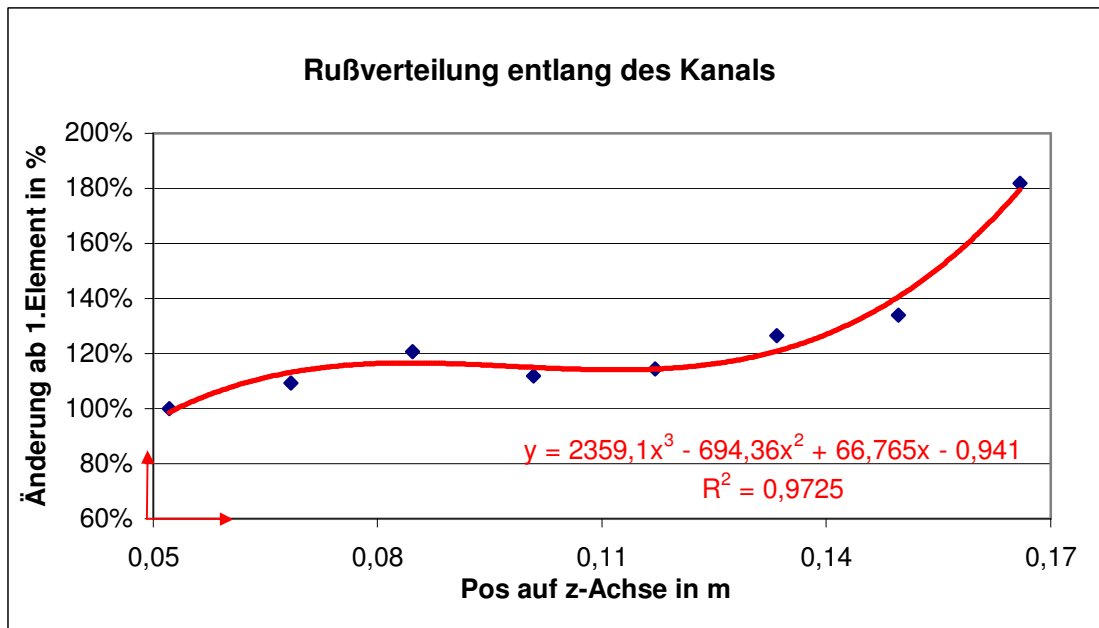


Abbildung 25: Ortsverteilung der Absorption in % bezogen auf den Anfang des Kanals

5.1.6 Wabenkörper aus der mikrowellentransparenten Keramik AZT

Entsprechend Kapitel 5.1.3 wurden aus dem neuen Werkstoff AZT am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik Wabenkörper mit einer partikelfiltertypischen Porosität entwickelt und hergestellt (Abbildung 26). Die Wabenkörper konnten als Quader mit der Abmessung 22 mm x 22 mm x Länge gefertigt werden. Filter mit einer größeren Querschnittsfläche wurden aus Einzelsegmenten zusammengefügt. Die Zelldichte lag bei 250 cpsi. Die Wandstärke der Keramikstege betrug im Mittel 330 µm [Schä 05b].

Beladungsversuche am Motorenversuchsstand haben sehr gute Filterergebnisse gezeigt [PAK 05], [Absc 06]. Die Standardbeladung wurde wie bei den Cordieritfiltern auf 8 g_{Ruß}/l festgelegt. Die Rußdicke lag bei etwa 150 -170 µm.



Abbildung 26: Wabenkörper aus dem neuen Werkstoff AZT [Schä 05]

In einer gesonderten Messreihe wurde die Mikrowellenabsorption der rußbeladenen AZT-Wabenkörper und Cordieritwabenkörper verglichen. Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass die Rußbeladung zwar gleich war, der AZT jedoch mit einer höheren Zelldichte vorlag. Untersucht wurde ein Filterelement mit den Abmaßen 22 x 22 x 153 mm³, welches in 4 Zonen unterteilt wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 dargestellt.

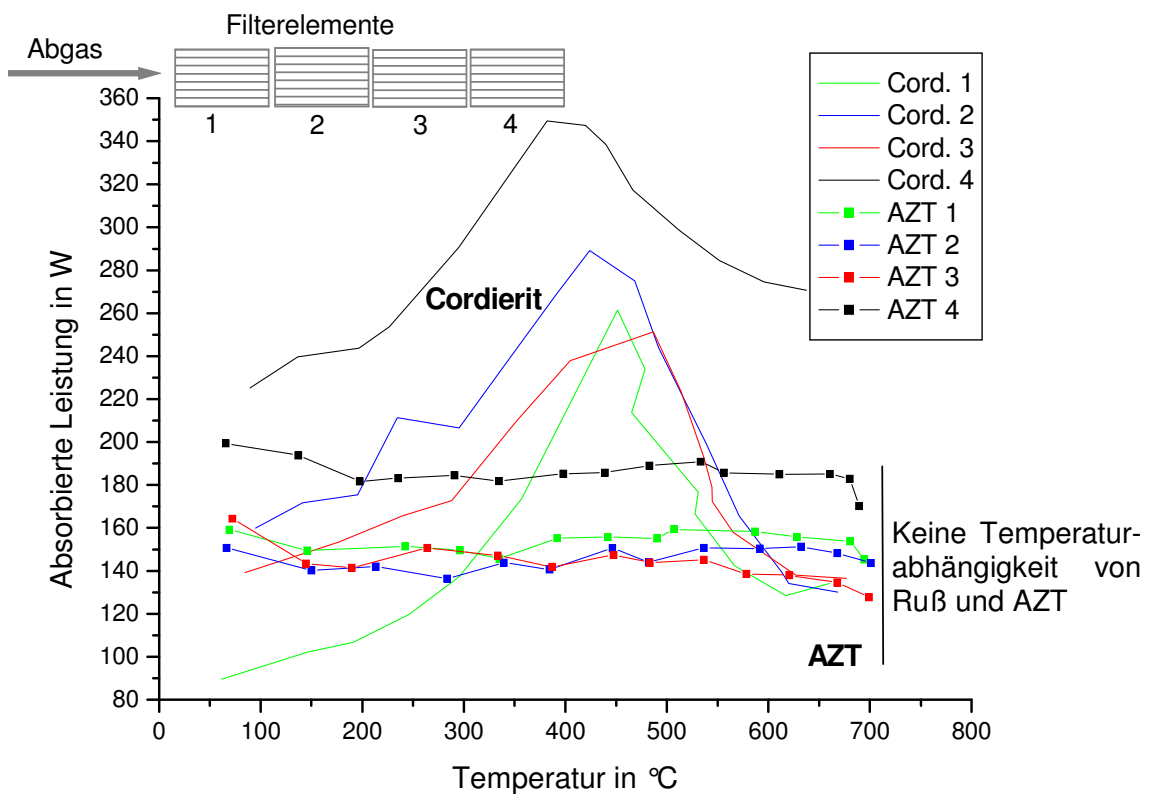


Abbildung 27: Temperaturabhängige Absorptionsmessungen rußbelasteter AZT- und Cordieritproben

Im Gegensatz zum rußbelasteten Cordierit ist beim rußbelasteten AZT-Filter keine Temperaturabhängigkeit der Absorption festzustellen. Da beide Proben von demselben Motor und bei dem gleichen Betriebspunkt beladen wurden, ist davon auszugehen, dass der Ruß in beiden Fällen gleich an die Mikrowellen ankoppelt. Die starke Temperaturabhängigkeit des rußbelasteten Cordierit ist damit ausschließlich auf den Cordierit selbst zurückzuführen.

Die beim Cordierit festgestellte höhere Mikrowellenabsorption am Kanallende findet sich auch beim rußbelasteten AZT-Filter.

5.1.7 Wellenausbreitung in der rußbelasteten Keramik

Vorrangiges Ziel des bisher dargestellten Messaufbaus war es, durch die Wahl einer im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Probe die Feldverschiebung im Applikator gering zu halten. Um die Auswirkung der unterschiedlichen Absorptionseigenschaften hinsichtlich der Feldausbreitung weiter zu untersuchen, wurde ein Filterblock mit den Abmaßen $41 \times 63 \times 152 \text{ mm}^3$ im Hohlleiter erwärmt und seine Erwärmung mit einer Thermokamera erfasst. Abbildung 28 zeigt den Messaufbau und Abbildung 29 die

Aufnahmen der Thermokamera nach der Mikrowellenerwärmung der Probe über 50 Sekunden hinweg mit einer eingestrahlten Mikrowellenleistung von 200 W.

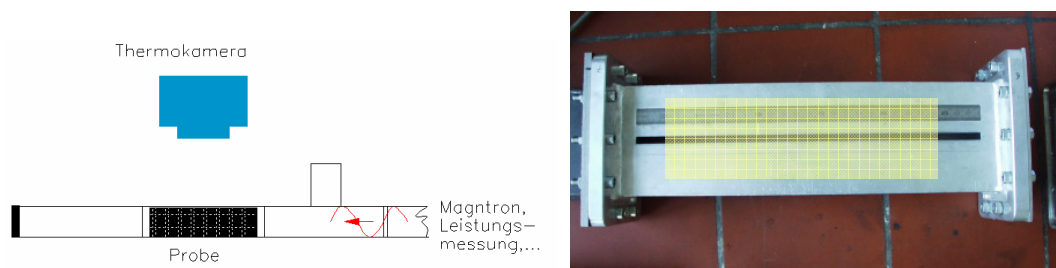


Abbildung 28: Messaufbau zum Vergleich Cordierit und AZT

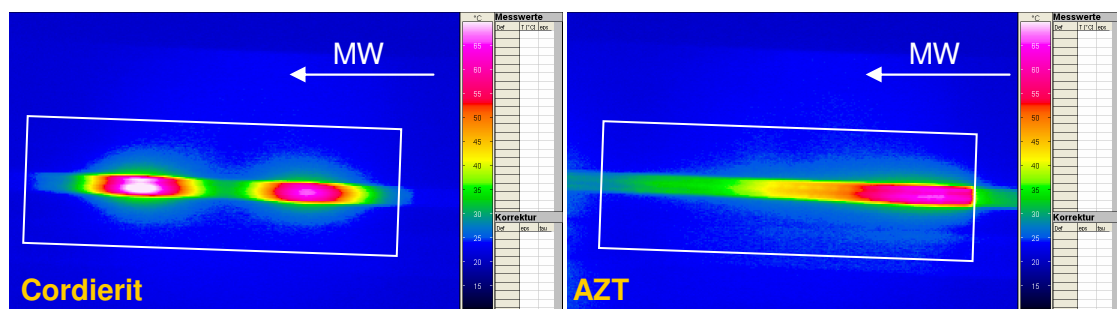


Abbildung 29: Wellenausbreitung im rußbeladenen Cordierit und AZT

Beim Cordierit bilden sich zwei Temperaturmaxima, wie sie für eine stehende Welle im Hohlleiter typisch sind. Die Welle durchquert den Wabenkörper, wird am geschlossenen Hohlleiter reflektiert und durchquert den Wabenkörper nochmals. Es kann von einer hohen Eindringtiefe und einer begrenzt starken Absorption ausgegangen werden.

Beim AZT wird am Filteranfang ein starkes Temperaturmaximum erzeugt, nach wenigen Zentimetern sinkt die Temperatur ab, am Filterende ist kaum mehr eine Erwärmung festzustellen. Die Welle wird sofort bei Eintritt in den Wabenkörper vollständig absorbiert, bzw. reflektiert. Hier besteht eine geringe Eindringtiefe und eine sehr starke Absorption.

Obwohl beide Filterwerkstoffe bei Raumtemperatur nur gering Mikrowellen absorbieren, sind im rußbeladenen Zustand gravierende Unterschiede in der Mikrowellenabsorption und Feldausbreitung feststellbar.

Grund hierfür könnten unterschiedliche Eigenschaften der Filterkeramik oder die geänderte Geometrie bzw. Verteilung in der rußbeladenen Keramikstruktur sein (Cordierit 200 cps, Wandstärke 340 μm ; AZT 250 cps, Wandstärke 330 μm).

5.2 Ermittlung der dielektrischen Stoffeigenschaften

Bisher wurde das Verhalten der im Mikrowellenfeld untersuchten Materialien anhand der absorbierten Leistung bewertet. Wie im Kapitel 2.2.2 schon dargestellt wurde, wird das Wechselspiel zwischen Material und Mikrowellen mathematisch durch die Dielektrizitätszahl bzw. ihren Real- und Imaginärteil beschrieben. Wenn die Ausbreitung von Mikrowellen in einem Stoff berechnet werden soll, ist die Kenntnis dieser Stoffwerte unbedingt erforderlich. In der Literatur sind kaum Stoffwerte zur Dielektrizitätszahl vorhanden, sodass eine eigene Messung dieser Werte notwendig ist. Es existieren nur wenige Messverfahren zur Dielektrizitätszahlmessung, die immer nur für ein begrenztes Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten gültig sind. Im Folgenden sollen die angewendeten Methoden aufgezeigt und die Ergebnisse diskutiert werden. Da sich die Modellierung des Applikators auf die Betrachtung von Cordierit- und AZT-Filter beschränkt, soll auf diese beiden Stoffe das Hauptaugenmerk gerichtet werden.

5.2.1 Resonanzverfahren

Eine der wenigen Messeinrichtungen zum Messen der Dielektrizitätszahlen bei 2,45 GHz befindet sich im Fraunhofer Institut für Chemische Technologie in Pfinztal (ICT). Diese Messeinrichtung misst nach der Resonanzmethode. Bei dieser Methode wird mit Hilfe eines Netzwerkanalysators für einen bestimmten Frequenzbereich die Eigenfrequenz und die Güte eines Applikators ohne und dann mit Probe ermittelt [Pohl 95], [Emme 06]. Aus der Eigenfrequenz- und Güteänderung lässt sich dann die Dielektrizitätszahl ermitteln. Diese Messanordnung eignet sich jedoch nur für kleine Resonanzverstimmungen, das heißt, die Probe muss sehr klein sein und wenig absorbieren. Abbildung 31 zeigt ein Bild und ein Modell der Messanordnung. Da in die Berechnungen das Volumen der Probe mit eingeht, müssen die Proben sehr gut präpariert sein, was z.B. bei einer Wabe, welche aus einem Wabenkörper herausgeschnitten werden soll, äußerst schwierig ist. Für die Messung der Dielektrizitätszahlen der neuen Werkstoffe wurden zylindrische 1 mm dicke Probekörper verwendet, zur Messung des Cordierits wurde eine Wabe präpariert (Abbildung 30).

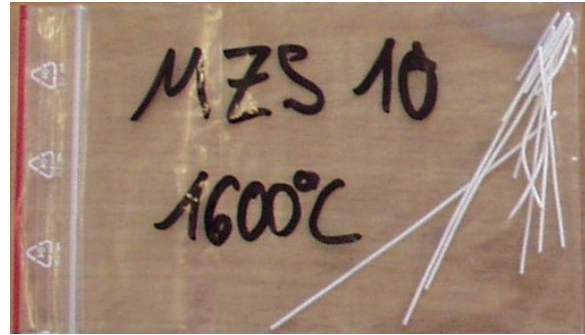
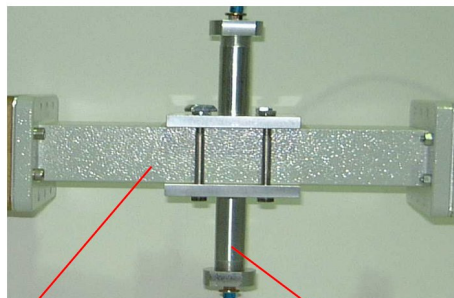


Abbildung 30: Proben für die Resonanzmessung



Hohlleiterresonator

Probenhalter

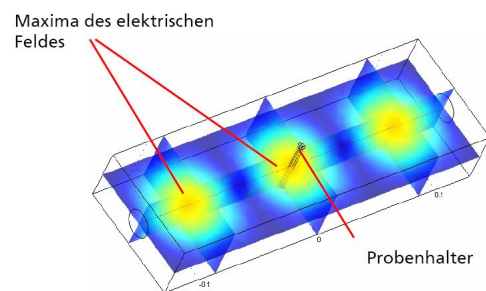


Abbildung 31: Messanordnung für die Resonanzmessung

Die Ergebnisse der am ICT durchgeführten Messungen sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Wie in Abbildung 30 erkennbar ist, ist es beim Cordierit nicht in befriedigender Weise gelungen, eine exakt quaderförmige Probe zu präparieren. Die Messwerte des Cordierit geben damit nur Auskunft über die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl. Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Messwerte der übrigen Stoffe auf die spätere Wabenkörperform gilt das gleiche, da sich die dichtgesinterten Stäbchen von der späteren porösen Wabenkörperstruktur unterscheiden. Wie im vorangegangenen Kapitel schon angesprochen, liefert die Messung vor allem beim relevanten Werkstoff AZT wertvolle Hinweise auf die Temperaturabhängigkeit. Aufgrund der Absorptionmessungen in Kap. 4.1.6 war schon zu erwarten, dass ϵ' nicht temperaturabhängig ist. Durch den Messaufbau - eine relativ kleine Probe, welche die Wellenausbreitung wenig stört, - wurde eine Einflussnahme von ϵ' auf das Messergebnis aber weitgehend verhindert. Die Dielektrizitätsmessungen zeigen nun nochmals deutlich, dass keiner der beiden Parameter ϵ' und ϵ'' temperaturabhängig ist. Für den weiteren Verlauf der Applikatorentwicklung ist dieses Messergebnis, dass weder ϵ' noch ϵ'' vom AZT temperaturabhängig ist, vor allem dahingehend wichtig, dass bei der Applikatorentwicklung für den AZT-Wabenkörper von einer Temperaturabhängigkeit abgesehen werden kann.

Weiterhin zeigt sich, dass der für die Wellenausbreitung wichtige Parameter ϵ' von allen untersuchten neuen Werkstoffen beim AZT dem Cordierit am nächsten kommt. Da bis zur Fertigstellung von AZT-Wabenkörpern die Applikatorentwicklung mit dem Cordierit als Filterwerkstoff begonnen wurde, ist dies als günstig zu bewerten, da hierdurch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in vielen Punkten erwartet werden kann.

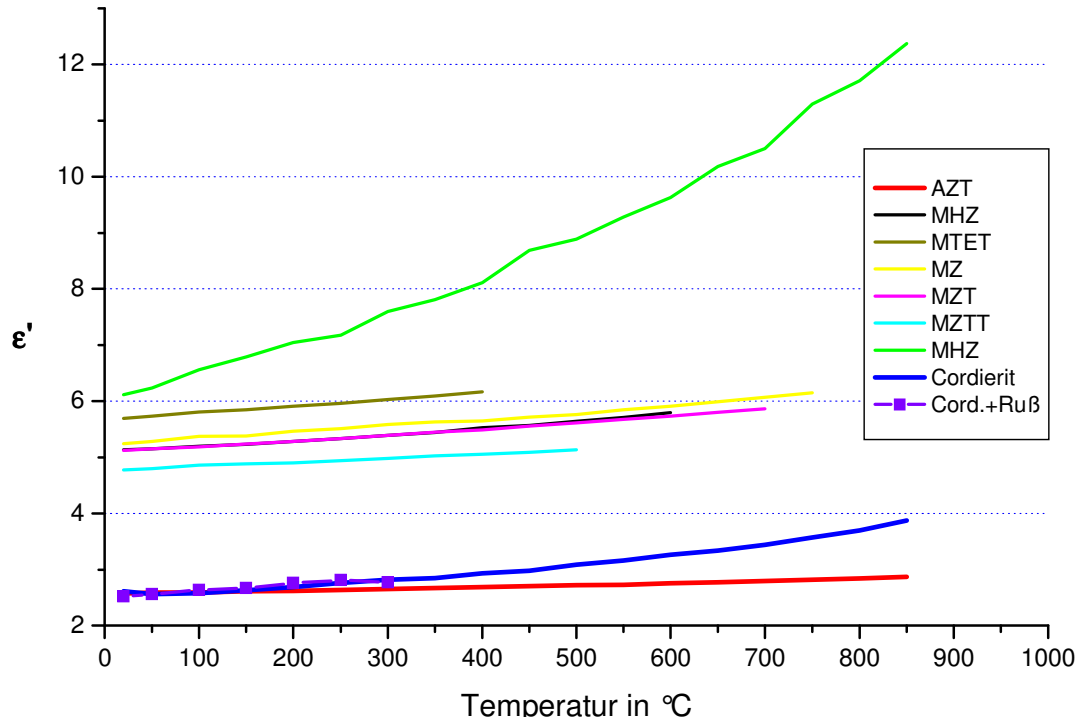


Abbildung 32: ϵ' ermittelt durch das Resonanzverfahren

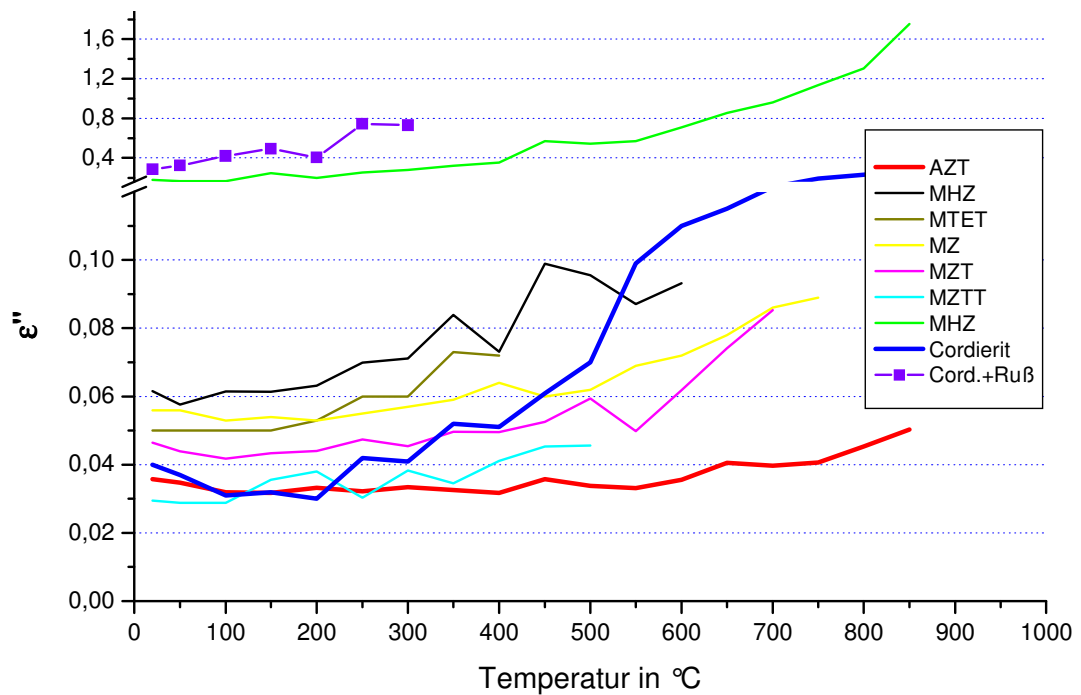


Abbildung 33: ϵ'' ermittelt durch das Resonanzverfahren

5.2.2 Verfahren durch Temperaturmessung und Parameter-Modellierung

Da in dem oben beschriebenen Messverfahren die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf einen Wabenkörper übertragen werden konnten, wurde eine Methodik zur Ermittlung dieser entwickelt. Die unbeladenen und beladenen Wabenkörper wurden mit der Mikrowelle erwärmt und ihre Temperaturverteilung mit einer Thermokamera gemessen. Parallel dazu wurden so lange Modellierungsrechnungen durchgeführt, welche den Versuch unter Variation von ϵ' und ϵ'' nachrechneten, bis die Temperaturverteilung zwischen Modell und Versuch gleich war.

Zur Verfügung standen rußbeladene AZT Wabenkörper mit den Abmaßen 22 x 22 x 153 mm³. Die untersuchten Proben waren unterschiedlich stark mit Ruß beladen (Tabelle 3) und wurden in einem Schlitzhohlleiter 1,6 mm unter dem Schlitz positioniert. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass es am günstigsten ist, wenn die Probentemperatur auf der wandzugewandten Seite gemessen wird. Eine Positionierung direkt an dem Hohlleiter wäre für die Ausbildung des Mikrowellenfeldes zwar noch günstiger, dann sind jedoch die Wärmeverluste an den Hohlleiter schwer zu bestimmen, sodass die zuvor beschriebene Kompromisslösung gewählt wurde.

Ein Schema des Messaufbaus zeigt Abbildung 34.

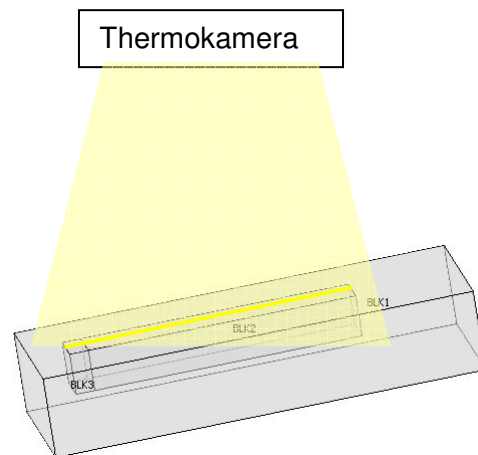


Abbildung 34: Messaufbau zur Dielektrizitätszahlmessung

Tabelle 3: Rußbeladung der Filterproben

		Gesamt- masse in g	Partikel- beladung in g	Länge in mm	Breite in mm	Höhe in mm	Filter- volumen in l	g Ruß /Liter
43-	1	75,5	0,5	153	22	22	0,074	6,8
43-	2	75,1	0,4	153	22	22	0,074	5,4
43-	3	78,1	0,1	153	22	22	0,074	1,4

Die Proben wurden 60 s lang mit einer Eingangsleistung von 300 W erwärmt, von der etwa 190 W absorbiert wurden. Die Thermokamera wurde so positioniert, dass sie durch den Schlitz des Hohlleiters die Probenoberfläche messen konnte. Eine beispielhafte Thermokameraaufnahme eines Versuchs ist in Abbildung 35 dargestellt. Die Temperaturverteilung in der Probe wurde orts aufgelöst mit der Kamera entlang der in der unteren Abbildung dünn dargestellten weißen Linie gemessen und ausgewertet. Für den Bau eines zukünftigen Versuchsstandes zur Dielektrizitätszahlmessung wird voraussichtlich auch ein Pyrometer mit Linescanner ausreichend sein.

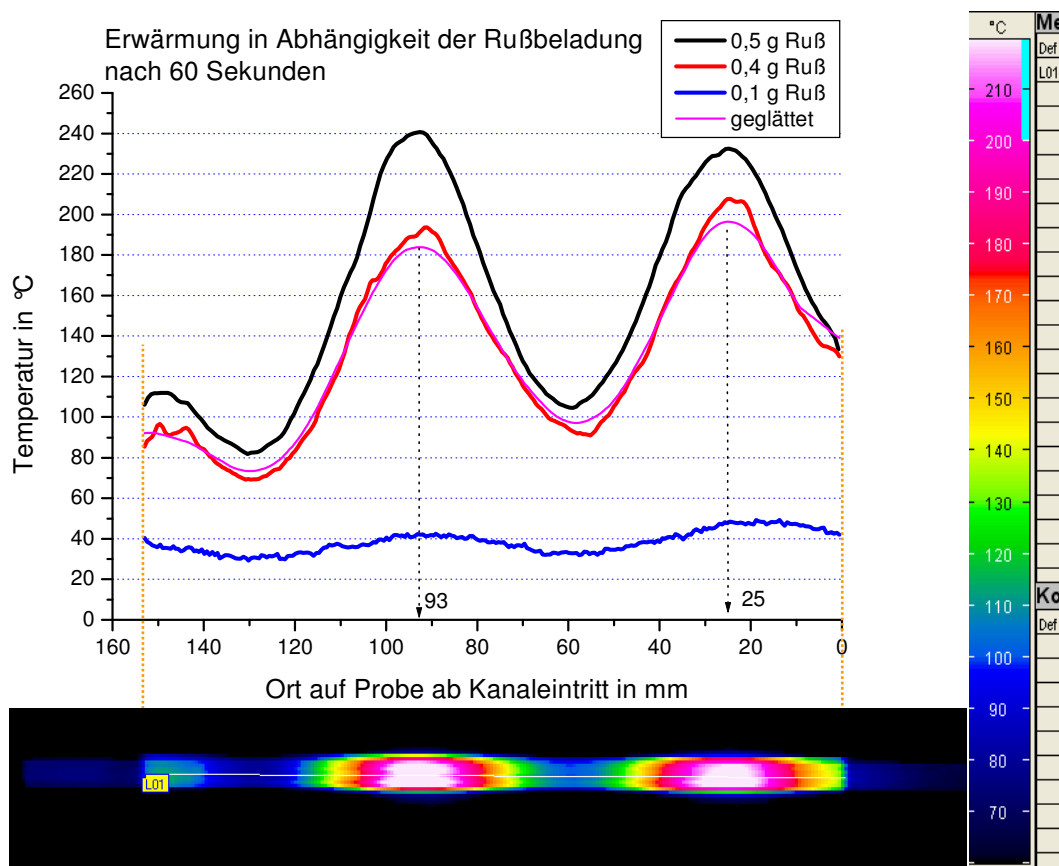


Abbildung 35: Thermokameraaufnahme zur Ermittlung von ϵ' und ϵ''

Die Erwärmung der verschieden beladenen Proben ist in Abbildung 35 über der Kameraaufnahme dargestellt (daher x-Achse von rechts nach links). Deutlich sind die Maxima und Minima der Erwärmung sowie die unterschiedliche beladungsabhängige Aufheizung der Probe zu sehen. Die Proben mit 0,4 g und 0,5 g Ruß unterscheiden sich in den Maxima. Liegt bei 0,4 g Ruß das erste Maximum höher als das zweite, ist es bei 0,5 g umgekehrt. Es macht den Anschein, dass sich der Ruß erst im vorderen Bereich und später mit steigender Beladung im hinteren Bereich der Probe ablagert. Um dies genauer zu spezifizieren müssten jedoch weitere Proben angefertigt und untersucht werden. Da sich beide Maxima unterscheiden, aber nur wenig im Betrag

unterscheiden, wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Dielektrizitätszahl entlang der gesamten Probenlänge konstant ist.

Die Umrechnung von Bildpunkten in "mm ab Kanalanschluss" erfolgte anhand der bekannten Gesamtlänge der Probe und der Anzahl an Bildpunkten. Alternativ kann eine definiert lange, heiße Schablone in das Kamerabild gehalten werden. Zur Positionsbestimmung der Maxima und Minima wurde die Temperaturkurve über 30 Punkte geglättet. Die Temperatur wurde an der Originalkurve abgelesen.

Die Auswertung der Erwärmung an den Maxima zeigt ein fast lineares Anwachsen der Erwärmung mit steigender Rußbelastung (Abbildung 36).

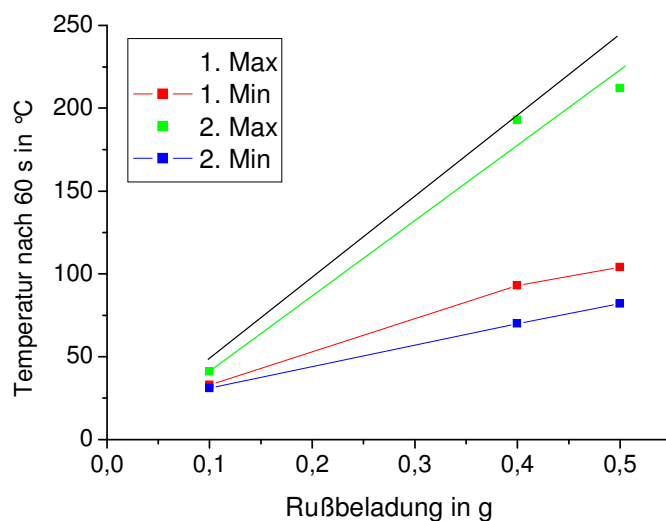


Abbildung 36: Erwärmung bei 300 W nach 60 s in Abhängigkeit der Rußbelastung

Um aus der Position der Maxima auf einen Wert für das ϵ' schließen zu können, wurde die Wärmequellenverteilung eines Probekörpers gleicher Abmessungen und an gleicher Position im Hohlleiter modelliert (Modell Abbildung 34). Auf die Einzelheiten zur Modellierung wird im Kap. 6.1.2 näher eingegangen. Abbildung 37 zeigt die modellierte Verteilung der Wärmequellen in der Probe. In der Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Probe hinweg ist die Position des Maximums der Wärmequellenverteilung und der Temperaturverteilung identisch.

Damit kann mit Blick auf die Einsparung von Rechnerkapazitäten und Rechenzeit auf die Berechnung der Temperatur vorerst verzichtet und ϵ' nur als Funktion der Wärmequellenverteilung berechnet werden.

Bei den Parametervariationen von ϵ' wurde für ϵ'' aufgrund der hohen Absorption des Rußes ein Wert von 0,4 geschätzt. Weitergehende Modellierungen haben gezeigt, dass eine Änderung von ϵ'' im Bereich von 0,01 bis $\sim 0,5$ zu keiner Verschiebung der Position der Maxima führt.

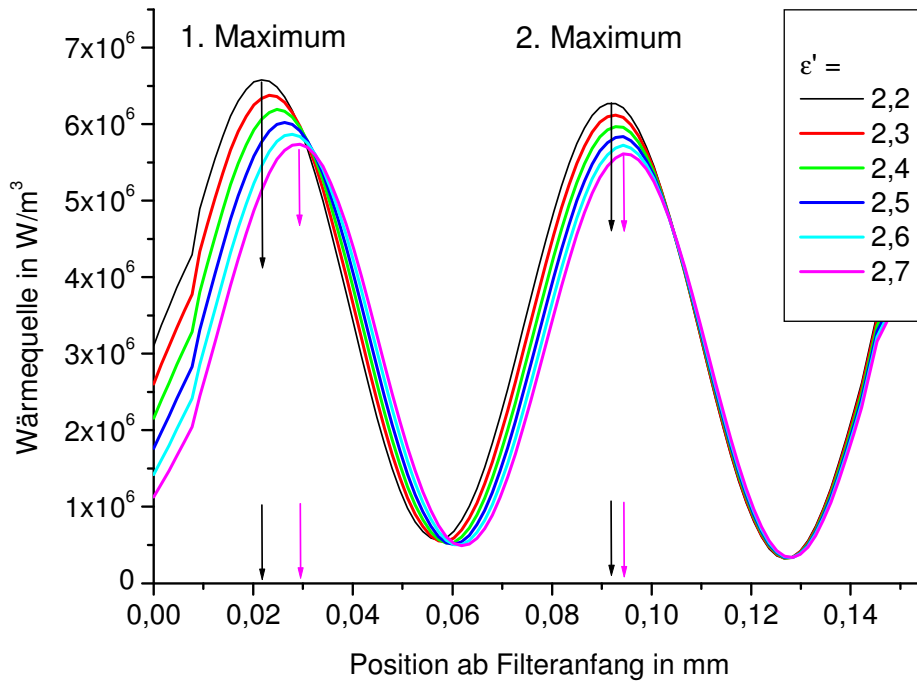


Abbildung 37: Wärmequellenverteilung ab Filteranfang

In Abhängigkeit des Parameters ϵ' verschiebt sich die Position des ersten Maximums am stärksten. Somit ist die Betrachtung des 1. Maximums für eine ϵ' -Bestimmung am geeignetsten. Trägt man die Position des 1. Maximums in einem Diagramm über dem ϵ' -Wert auf, kann anhand der Position des 1. Maximums der Temperaturmessung einfach der ϵ' -Wert der Probe bestimmt werden (Abbildung 38, Anhang A1).

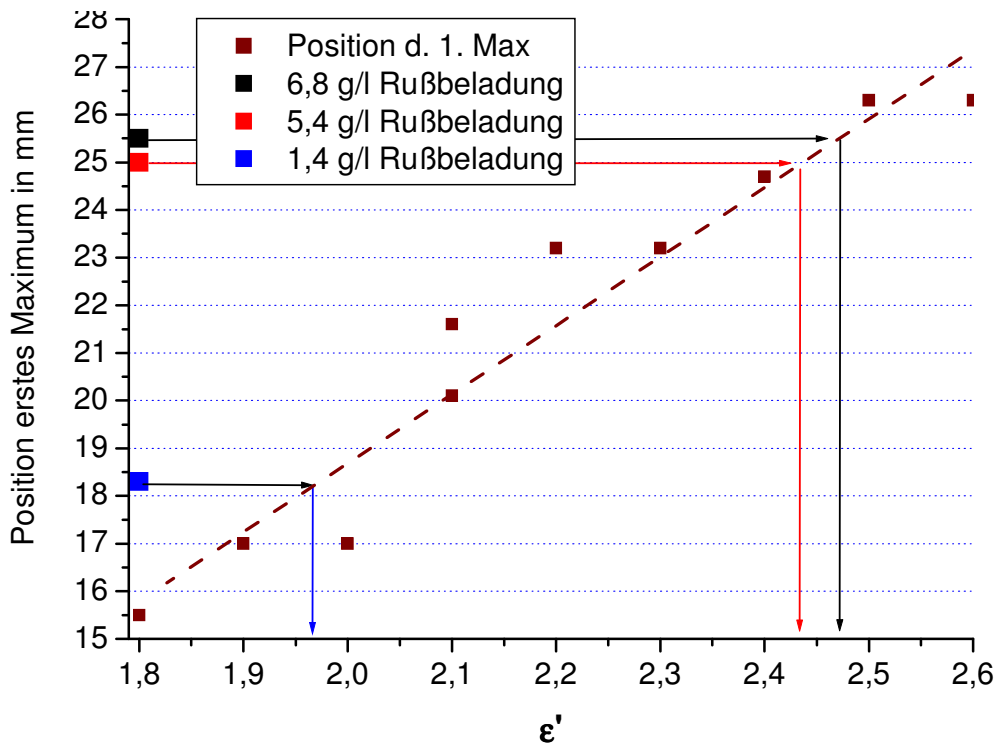


Abbildung 38: Position des 1. Maximums in Abhängigkeit von ϵ'

Für die Ermittlung des ϵ'' -Wertes konnte auf eine Berechnung der Temperatur nicht mehr verzichtet werden. Nach Bestimmung von ϵ' wird in der Modellrechnung das ϵ'' so lange verändert und die daraus resultierende Temperatur ermittelt, bis die Temperaturen von Messung und Modellrechnung übereinstimmen. Abbildung 39 zeigt dies für die mit 0,5 g Ruß (6,8 g/l) beladene Probe. Die geringen Abweichungen können durch weitere Variation der Dielektrizitätswerte (unter der Annahme eines über die Probe konstanten Wertes) nicht mehr verbessert werden. Der Grund für die leichten Abweichungen ist daher vorrangig in einer inhomogenen Rußverteilung zu suchen. Die Ergebnisse aus Kap. 5.1.5 (Abbildung 24) stützen diese Aussage. Grundsätzlich liegen die Temperaturverläufe von Modell und Messung weitgehend übereinander (Abbildung 39).

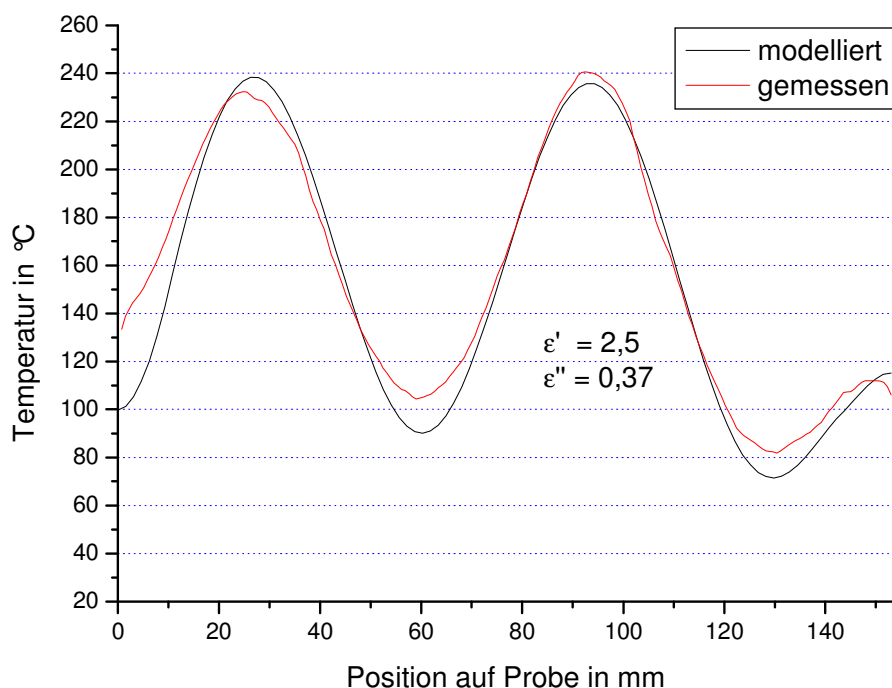


Abbildung 39: Vergleich von Messung und Modellierung

Die beschriebene Methodik ist also anwendbar und für die Ermittlung der Dielektrizitätszahl mit Real- und Imaginärteil geeignet.

Ein Ausbau dieser Messvariante wäre dahingehend denkbar, dass nach Festlegung weniger optimal geeigneter Probengeometrien Modellierungen mit einer Variation der ϵ' -Werte angelegt werden, z.B. von 1 bis 10 in 0,1 Schritten. Die Bilder der Wärmequellenverteilungen könnten als Nachschlagewerk abgelegt werden. Bei der einfachen Form des Hohlleiterapplikators könnte auch das Diagramm aus Abbildung 38 erweitert werden. Zur Ermittlung von ϵ'' müsste dann das schon vorbereitete Modell nur weitergerechnet werden.

Die Abbildung 40 und Abbildung 41 stellen die Ergebnisse der Dielektrizitätsermittlung in Abhängigkeit der Rußbeladung dar. Sowohl bei ϵ' als auch bei ϵ'' ist ein deutliches Anwachsen des Wertes mit zunehmender Rußbeladung festzustellen.

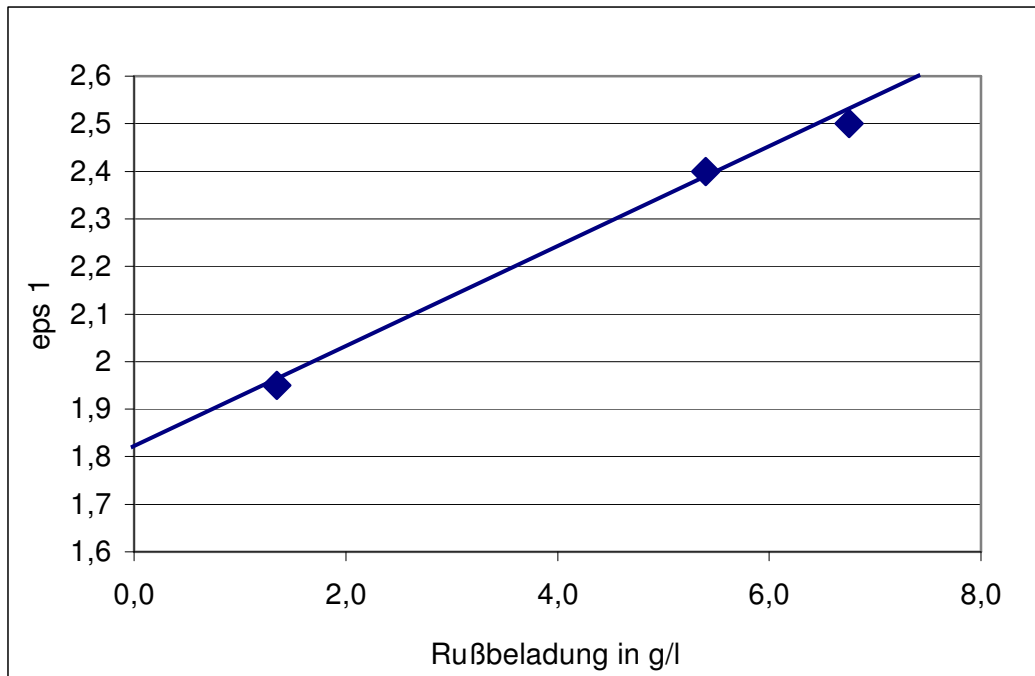


Abbildung 40: Einfluss der Rußbeladung auf ϵ'

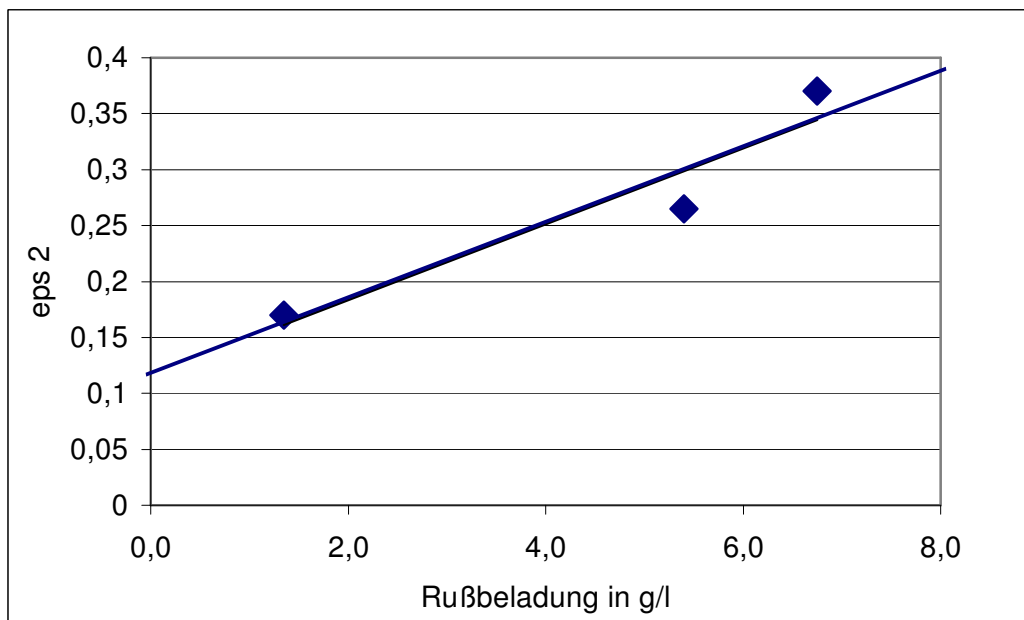


Abbildung 41: Einfluss der Rußbeladung auf ϵ''

Entsprechend der oben dargestellten Vorgehensweise wurde auch zur Ermittlung der Werte für den rußbeladenen Cordierit sowie für Cordierit und AZT ohne Ruß vorgegangen.

Tabelle 4 stellt die ermittelten Werte für ϵ' und ϵ'' dar.

Tabelle 4: Dielektrizitätszahlen von Cordierit und AZT

	ϵ_r'	ϵ_r''	$\tan \delta$	ET (in m)
Cordierit	1,4	0,03	0,021	0,77
Cordierit mit Ruß	1,6	0,10	0,063	0,25
AZT	1,7	0,01	0,006	2,54
AZT mit Ruß	2,5	0,37	0,148	0,08

6 Modellierung

6.1 Modellierung des Mikrowellenfeldes und der Wärmequellenverteilung

Die hohe Anzahl an Einflussfaktoren auf das Mikrowellenfeld wie Applikatorgeometrie, Mikrowelleneinleitung, Stoffeigenschaften, etc führen dazu, dass in der Regel keine Kenntnis über die Ausbreitung des Mikrowellenfeldes in einem Applikator besteht.

Noch vor wenigen Jahren konnte die Feldverteilung nur in einem fertig gebauten Applikator kontrolliert werden. Hierzu wurde Thermopapier zwischen Styroporscheiben gelegt, welches sich im Bereich starker Feldstärken erwärmt und geschwärzt hat. Abbildung 9 rechts zeigte eine nach dieser Methode ermittelte Feldverteilung. Seit kurzem hat die Rechner- und Softwaretechnik jedoch einen Stand erreicht, der es ausreichend komfortabel erlaubt, durch Modellrechnungen im Vorfeld der Applikatorauslegung die Feldverteilung optimal anzupassen.

Da die Zielstellung des Lösungsansatzes die Erzeugung eines Mikrowellenfeldes mit speziellen Anforderungen ist, soll die Applikatorentwicklung, um Zeit und Baukosten zu sparen, vorrangig durch Modellrechnungen erfolgen.

6.1.1 Modellbeschreibung

Als Software zur Modellierung der Mikrowellenfelder wurde das Programm FEMLAB gewählt. Das Programm arbeitet nach der Methode der Finiten Elemente. Die Mikrowellenfeldverteilung wird anhand der Max´wellschen Gleichungen gelöst.

Der Vorteil des Programms besteht in der Möglichkeit, verschiedene physikalische Probleme miteinander zu koppeln und gemeinsam oder aufeinander aufbauend in einem Modell berechnen zu können, so z.B. auch Mikrowellenfelder und Wärmeübergänge.

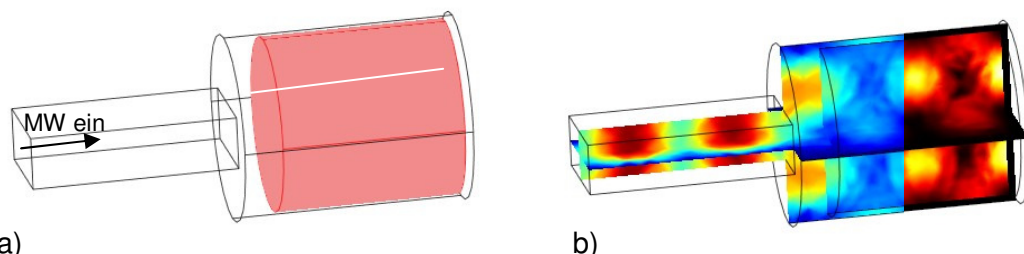


Abbildung 42: a) geometrische Modellbeschreibung b) Feldverteilung
(blau-rot: elektrisches Feld, schwarz-gelb: Wärmequellenverteilung)

Für die Mikrowellenmodellierungen wurde zunächst die Geometrie des Applikators und des Filters konstruiert. Für die Mikrowellenzuführung wurde der Applikator mit einem Hohlleiter verbunden. Zwischen Applikator und Filter wurde ein Spalt für niedrig absorbierendes Dämmmaterial freigelassen (Abbildung 42).

Als Randbedingungen wurden perfekt elektrisch leitende Wände angenommen. Zur Mikrowellenerzeugung wurde in die stirnseitige Fläche des Hohlleiters eine Mikrowellenfeldverteilung (Abbildung 43) mit Ausbreitungskonstante definiert, welche der Wellenleitung im Hohlleiter entspricht.

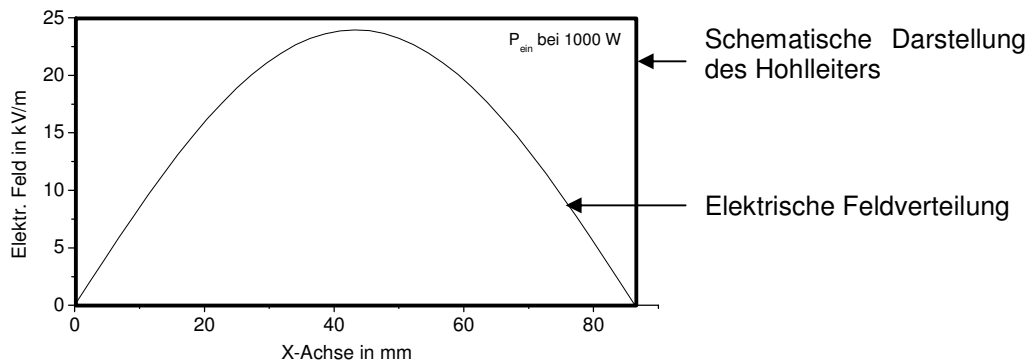


Abbildung 43: Elektrische Feldverteilung im Hohlleiter

Die Anfangsfeldstärke $E(x)$ wurde definiert durch:

$$\text{Gl.: 10} \quad E_x = E_0 \cdot \sin x$$

E_0 ist dabei die maximale Feldstärke im Hohlleiter in Abhängigkeit von der eingespeisten Leistung [STea 04]:

$$\text{Gl.: 11} \quad E_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot Z_g}{a \cdot b}} \cdot \sqrt{P} = 757,49 \cdot \sqrt{P}$$

Z_g : Impedanz des Hohlleiters, a: lange Seite (86,36 mm), b: kurze Seite (43,18 mm) des Hohlleiters [STea 04]

Die Ausbreitungskonstante β war definiert durch [STea 04]:

$$\text{Gl.: 12} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$$

wobei λ_g die Grenzwellenlänge des Hohlleiters ist.

Als Gebietseigenschaft für die Luft in Hohlleiter und Applikator wurde $\epsilon_r=1$ gewählt. Die Dielektrizitätszahlen für den beladenen Filter wurden durch Erwärmungsversuche entsprechend Kapitel 5.2.2 ermittelt.

Nach Festlegung der Randbedingungen wurde das Modell vernetzt. Für das Standardmodell (Applikator für 2,5 l Partikelfilter; siehe Abbildung 42) wurde meist eine Vernetzung von ≈ 55.000 Elementen gewählt. Eine feinere Vernetzung war aufgrund der zur Verfügung stehenden Rechnertechnik nicht möglich.

Für die überwiegende Anzahl an Modellierungen genügte es, mit dem "Elektromagnetic-Modul" die elektrische Feldverteilung und die daraus resultierende Wärmequellenverteilung zu berechnen. Hinsichtlich der Darstellung wurde in dieser Arbeit für das elektrische Feld eine blau – rote Farbskala und für die Wärmequellenverteilung eine schwarz – gelbe Farbskala gewählt (siehe Abbildung 42).

Wenn die Berechnung der Temperatur notwendig war, wurde zuerst im "Elektromagnetic-Modul" die elektrische Feldverteilung und die Wärmequellenverteilung berechnet. Die Wärmequellenverteilung wurde dann als Gebietseigenschaft in das Wärmeberechnungsmodul der Femlab-Software übertragen und in einem zweiten Rechenschritt die Temperaturverteilung berechnet. Diese gestaffelte Berechnung erwies sich als deutlich schneller und effektiver. Die Solver waren durch das Programm vorgegeben. Die Mikrowellenberechnungen wurden für den sich stationär einstellenden Zustand gerechnet, die Temperaturberechnungen wurden zeitabhängig gelöst.

Die Parameter für die wärmetechnischen Berechnungen sind in Tabelle 5 dargestellt, die für die elektromagnetischen Berechnungen in Tabelle 4, Seite 49.

Tabelle 5: Stoffwerte für die wärmetechnischen Berechnungen

		Einheit	Cordieritfilter	AZT-Filter
1	Rußbeladung	g/l	8	8
2	Zelldichte	cpsi	200	250
3	Wandstärke	mm	0,34	0,33
4	Wärmekapazität	J/kg K	900	1000
5	Wärmeleitung	W/m K	0.9	1,5 – 2,5
6	Dichte	kg/m ³	528	1020

6.1.2 Modellierungen zur Dielektrizitätszahlermittlung

Die in Kap. 5.2.2 ermittelten Werte für die Dielektrizitätszahl wurden mithilfe des im Folgenden dargestellten Modells ermittelt. Die Geometrie der Probe und der Anordnung ist in Kap. 5.2.2 beschrieben worden und ist in Abbildung 44 nochmals mit den Randbedingungen dargestellt.

Das Modell ist so angelegt, dass die Mikrowellenverteilung über das ganze Probenvolumen berechnet wird und die Temperatur, um Rechenzeit zu sparen, nur für das halbe Volumen. Vernetzt wurde das Modell in diesem Fall mit ≈ 29.000 Elementen. Für die Mikrowellenberechnungen wurde wieder von perfekt elektrisch leitenden Wänden ausgegangen, die Dielektrizitätszahlen wurden im Sinne des Vorgehens aus Kap. 5.2.2 variiert. Als Randbedingungen für die wärmetechnischen Berechnungen wurde der Wärmeübergang durch Konvektion entsprechend [Walt 95(IOW 620.1)] berechnet. Abbildung 39 zeigte beispielhaft die ermittelte Temperaturverteilung für die Werte $\epsilon' = 2,5$ und $\epsilon'' = 0,37$ bei einer eingehenden Leistung von 300 W und einer Erwärmungsdauer von 60 Sekunden. (Das Temperaturprofil wurde entlang der weißen Linie in Abbildung 35 ermittelt.)

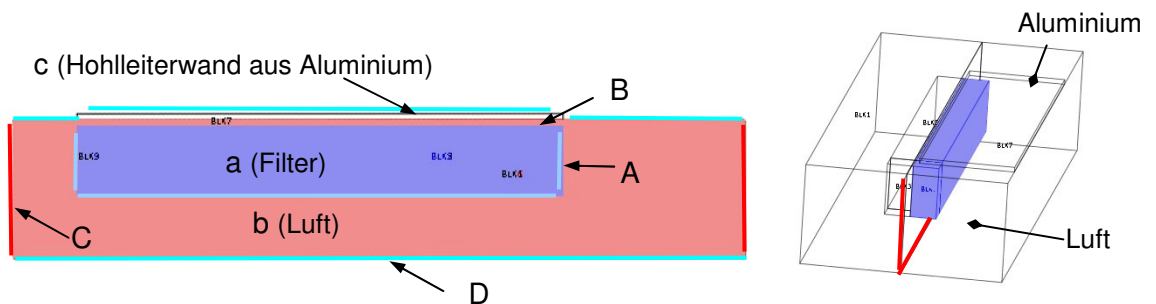


Abbildung 44: Randbedingungen und Gebietseigenschaften

Tabelle 6: Bezeichnung der Randbedingungen

Grenze	Darstellung	Rand- / Gebietsbedingung
A	blau	Konvektion u. Strahlung an Keramik (IOW 620.1)
B		Nur Wärmeleitung und Strahlung,
C	rot	Thermische Isolierung
D	cyan	Konvektion u. Strahlung an Alu (IOW 620.1)
Gebiet	Stoff	
a	Filter (blau)	siehe Tabelle 5
b	Luft (rot bzw. weiß)	$\lambda = 0,025 \text{ W/m K}$; $\rho = 1,182 \text{ kg/m}^3$; $c_p = 1099 \text{ J/kg K}$ (bei 20 °C)
c	Aluminium (weiß)	$\lambda = 160 \text{ W/m K}$; $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$; $c_p = 900 \text{ J/kg K}$

6.1.3 Validierung

Zur Kontrolle der Richtigkeit der Modellrechnungen wurde ein beladener Partikelfilter aus Cordierit in einem Applikator mit tangentialer Mikrowelleneinleitung erwärmt und seine Temperatur mit einer Thermokamera durch ein Lochblech gemessen. Parallel dazu wurde die Versuchsanordnung modelliert. Die Abbildung 45 stellt die Temperaturverteilung von Messung und Berechnung gegenüber. Zu sehen ist die der Mikrowelleneinleitung abgewandte Stirnseite nach einer Mikrowelleneinschaltzeit von 2 Minuten bei 600 Watt. (Die Farbskala von Thermokamera und Software sind leicht verschieden).

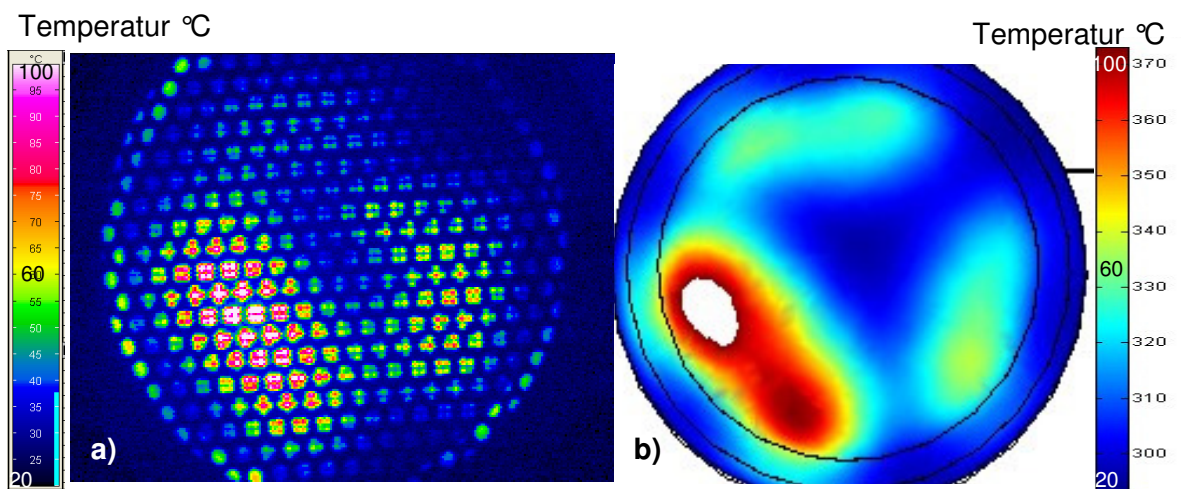


Abbildung 45: Validierung der Modellierungen:

a) Messung

b) Modellierung

[Imen 05]

Sowohl bei der Messung als auch bei der Berechnung bilden sich 3 Temperaturmaxima aus, welche örtlich gleich positioniert sind. Betrachtet man die absoluten Temperaturen dieser Maxima ist ebenfalls eine weitgehende Übereinstimmung festzustellen. Auch hinsichtlich der insgesamt absorbierten Leistung von 545 W bei der Messung und 525 W bei der Berechnung gleichen sich Berechnung und Versuch in hohem Maße. Damit konnten die Modellrechnungen validiert werden. Die Modellierung als Optimierungswerkzeug kann weiter verwendet werden.

6.1.4 Bewertungskriterium Rußtemperatur

Nach der Validierung der Modellrechnungen sollte die optimale Applikatorform durch Simulationsrechnungen ermittelt werden. Simulationen des Mikrowellenfeldes verschiedener Geometrien zeigen, dass auf der einen Seite die Gesamtabsorption des Applikators stark variiert und andererseits die Feldverteilung sich vollkommen unterschiedlich ausbildet (folgende Kapitel).

In Anbetracht zahlreicher zu erwartender Optimierungsschritte ist es daher notwendig, einen Ausgangspunkt, in diesem Fall eine Standard-Applikatorform, festzulegen. Mit dieser können dann Optimierungsschritte und Variationsrechnungen verglichen werden. Darüber hinaus ist es notwendig, ein Bewertungskriterium zu bestimmen, mit dem die Applikatorform beurteilt werden kann.

Als Standardapplikator wurde die in Kapitel 6.3.1 optimierte zylindrische Applikatorform mit axialer Mikrowelleneinleitung und Standard-Cordieritfilter definiert. Die Innenabmaße des Applikators haben eine Länge von 192 mm und einen Durchmesser von 154 mm. Der Filter hat einen stirnseitigen Abstand zum Hohlleiter von 33 mm. In Abbildung 42 wurde schon im Rahmen der Modellbeschreibung eine Darstellung gezeigt.

Da das Hauptziel die Rußverbrennung im Filter ist, und der Zündpunkt für den Abbrand des Rußes bei etwa 600 °C festzusetzen ist, wurde als Zielkriterium das Erreichen des Regenerationsstartes bei einer Rußtemperatur von 600 °C festgelegt. Dem Kap. 6.2.2 vorausgreifend wird diese Festlegung dahingehend erweitert, dass nach Überschreiten der 600 °C-Grenze am Kanalanfang die Zündposition als Kriterium gelten wird, welche möglichst nah am Kanalanfang liegt (Abbildung 46). Betrachtet wird jeweils der Kanal mit der günstigsten Wärmequellenanordnung.

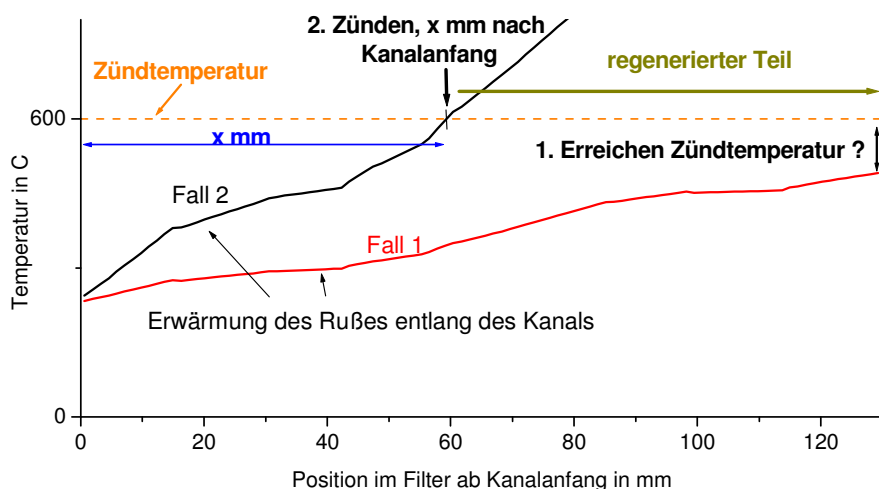


Abbildung 46: Bewertungsschema für die Optimierungsrechnungen

6.2 Modellierung des Strömungseinflusses

Für die Rußverbrennung muss dem System Sauerstoff zur Verfügung gestellt werden, welcher vorzugsweise durch das Abgas mit einem Restsauerstoffgehalt von 8 – 12 % zugeführt wird. Damit wird der Filter während der Mikrowellenerwärmung aber auch durch das Abgas, welches die Filterkanäle durchströmt, gekühlt. Um die maximal erreichbare Rußtemperatur zu ermitteln, muss also eine Wärmebilanz zwischen zugeführter Mikrowellenenergie und Wärmeverlusten durch das Abgas erstellt werden. Anhand dieser Temperatur können dann wie in Kap. 6.1.4 beschrieben die unterschiedlichen Applikatorgeometrien hinsichtlich ihrer Eignung als Regenerationsmodul bewertet und der Leistungsbedarf sowie die maximale Abgasströmung ermittelt werden.

6.2.1 Modellierung der Strömungsverteilung in einem Kanal

Bevor das Bilanzmodell aufgestellt werden konnte, war es notwendig, die Durchströmung des Filterkanals näher zu betrachten. Hierzu wurde ein Strömungsmodell mit dem CFD Programm Fluent erstellt [Rieh 05].



Abbildung 47: Druckverteilung entlang eines Kanals

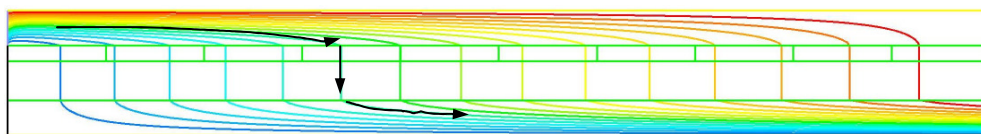


Abbildung 48: Strömungslinien entlang eines Kanals

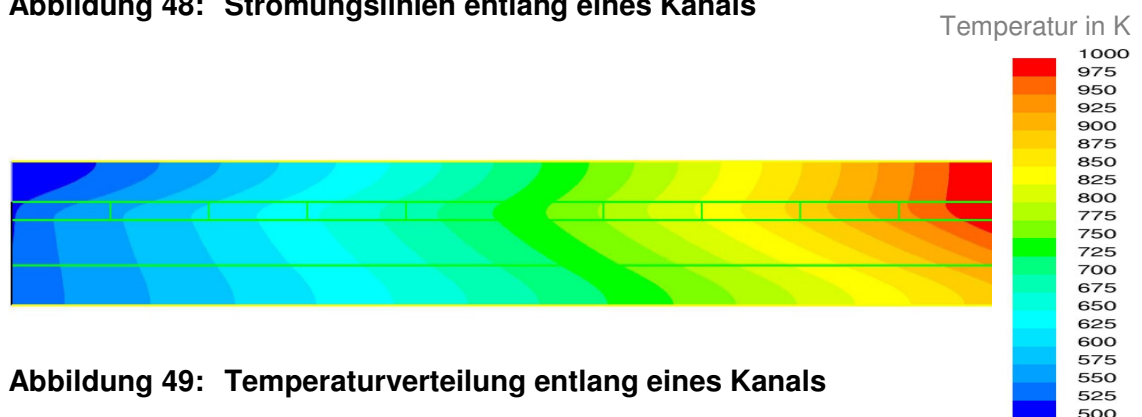


Abbildung 49: Temperaturverteilung entlang eines Kanals

Als Druckwiderstandswerte für den Ruß- und die Keramikschicht wurden die Messwerte aus den Untersuchungen an einem Strömungsversuchsstand eingesetzt [Sand 05]. Der Energieeintrag in die Rußschicht wurde über die gesamte Kanallänge als konstant angenommen (15 W/cm^3). Die Berechnungen erfolgten stationär im Gleichgewichtszustand. In Abbildung 47 bis Abbildung 49 wurden die Druckverteilung im Kanal, der Strömungsverlauf und die Erwärmung der Luft entlang des Kanals dargestellt.

Das Ergebnis der Strömungsbetrachtung lässt sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Der größte Druckabbau entsteht in der Rußschicht.
- Über die Kanallänge sind kaum Druckunterschiede vorhanden.
- Das Abgas strömt senkrecht durch die Ruß- und Keramikschicht.
- Der Wärmetransport vom Ruß zum Abgas kann in einen Teil längst des Kanals und in einen Teil quer durch die Rußschicht aufgeteilt werden.
- Das Abgas nimmt auf seinem Weg vor allem längs des Rußkanals Wärme auf und erwärmt sich.
- Anströmende Luft, Ruß, Keramik und abströmende Luft haben nahezu die gleiche Temperatur.

6.2.2 Wärmebilanzmodell

Mit dem Wärmebilanzmodell soll aus einer beliebigen Verteilung der Wärmequellen, die durch die Mikrowellen in einem Filterkanal induziert werden, die Temperaturverteilung entlang dieses Kanals berechnet werden. Die Wärmebilanz wird zwischen der eingebrachten Leistung der Mikrowelle und der abgeführten Wärme durch das den Filterkanal durchströmende Abgas aufgestellt. Vereinfachend wird dabei von den Stoffeigenschaften der Luft ausgegangen. Variable Parameter sind die Wärmequellenverteilung über die Kanallänge, die Luftmenge und die Abgasanfangstemperatur.

Bei dem Modell wird idealisierend angenommen, dass die Mikrowellen nur an den Ruß ankoppeln. Die durch die Mikrowellenmodellrechnung ermittelte Wärmequelle eines Volumens wird aus dem Gesamtvolumen eines Abström- und Anströmkanals auf das Rußvolumen dieser beiden Kanäle umgerechnet. Bei dem Modell wurde die Wand eines Filterkanals, ein anströmender und abströmender Kanalausschnitt sowie die Rußschicht betrachtet.

Für die Modellierungen wurden folgende Annahmen gemacht:

- Das Gas nimmt beim Durchströmen von Ruß und Keramik die Ruß- und Keramiktemperatur an (Wärmeübergangskoeffizient sehr hoch).
- Die Strömung hat bei Eintritt in den Ruß in dem Element x die Temperatur des Einströmkanals an der Stelle x.
- In jedem Segment strömt der gleiche Volumenstrom durch die Ruß- und Keramikschicht, d.h. der Volumenstrom nimmt linear über die Kanallänge ab.
- Die Temperatur von Rußvolumen und Keramikvolumen wird in Richtung des strömenden Gases (y-Richtung) als konstant vorausgesetzt.

Das Modell wurde von Herrn Dr. Thomas Meyer (IWTT) erstellt und in Visual Basic programmiert.

Ein auf jede Wärmequellenverteilung im Filter anwendbares Ergebnis dieser Bilanzierungsrechnungen ist, dass die Temperatur von Ruß, Keramik und einströmendem wie abströmendem Abgas aufgrund des großen Wärmeübergangs durch die große Oberfläche von Ruß und poröser Keramik fast gleich ist. Ein weiteres Ergebnis ist, dass die Temperatur in Strömungsrichtung stetig steigt (Abbildung 52).

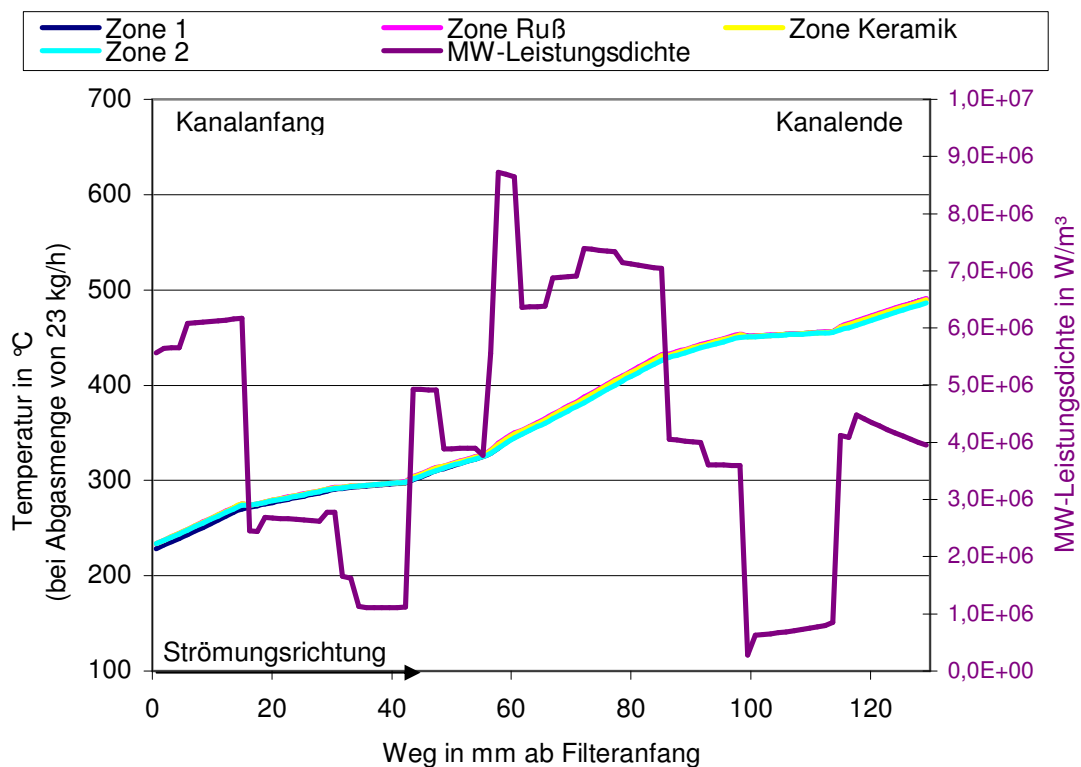


Abbildung 52: Wärmequellen- und Temperaturverteilung entlang eines Kanals

Aus der stetigen Temperaturerhöhung folgt, dass Wärme, die schon am Kanalbeginn erzeugt wird, durch die Strömung in die Bereiche des Kanals transportiert wird. Eine starke Temperaturerhöhung führt daher zu einem relativ frühen Erreichen der Zündtemperatur für den ganzen folgenden Kanal. Die Mikrowellen sind also vorzugsweise am Kanalbeginn des Filters zu konzentrieren. Eine Bewertung der Feldverteilung muss also danach erfolgen, welche maximale Rußtemperatur am Kanalende erreicht werden kann, bzw. nach wie viel Millimeter Kanalstrecke eine Rußzündung erfolgt.

Neben der Aussage, wo die Wärmequellen durch die Mikrowellen bestmöglich zu platzieren sind, wird durch das Wärmebilanzmodell aber auch deutlich, dass bei Vorhandensein einer kühlenden Strömung der Anfangsbereich des Kanals immer unterhalb der Zündtemperatur bleiben, bzw. nicht zünden wird.

6.2.3 Validierung des Wärmebilanzmodells

Zu Validierungsmessungen wurde der Standardapplikator gebaut und an einen Motorversuchsstand am Forschungsinstitut für Fahrzeugtechnik eingesetzt. Als Motor diente der schon zur Partikelbeladung verwendete PSA DW 12 TE D4/L4. Abbildung 53 zeigt den Applikator am Motorenversuchsstand.

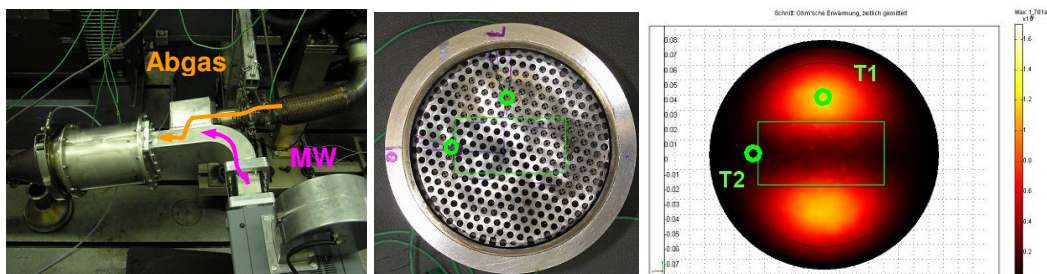


Abbildung 53: Versuchsaufbau zur Validierung, Temperaturmessstellen

Als Filter wurde ein rußbeladener Cordieritstandardmonolith eingesetzt. Zur Mikrowellenabschirmung wurde an der strömungsaustrittseitigen Stirnfläche ein Lochblech angebracht (Abbildung 53). Weiterhin ist in der Abbildung die Anordnung der Thermoelemente dargestellt, welche nach dem Lochblech zur Temperaturmessung des austretenden Abgases angebracht waren. Es sollte die Abgastemperatur an verschiedenen Stellen unterschiedlicher Mikrowellenfeldausbreitung gemessen werden. Während das Thermoelement T 1 an einer Stelle mit einer hohen erwarteten MW-Absorption positioniert wurde, wurde die Messstelle T2 in einen Bereich mit geringer Feldstärke positioniert (Abbildung 52). Die Abbildung 54 zeigt den Versuchsverlauf.

Nachdem Motor und Filter Betriebstemperatur erreicht hatten, wurde die Mikrowelle eingeschaltet (lila Kurve). Die rote Kurve (T_{AbgvF}) zeigt die Abgastemperatur vor dem Filter, die grüne (T_{AbgnF}) die Gesamtabgastemperatur nach dem Filter. Die blaue und magenta-farbene Kurve (T_{AbgimF1} , T_{AbgimF2}) zeigen den Temperaturverlauf an den Stellen T1 und T2. Deutlich ist zu sehen, wie nach Einschalten der Mikrowelle die Temperatur des austretenden Abgases unterschiedlich stark ansteigt.

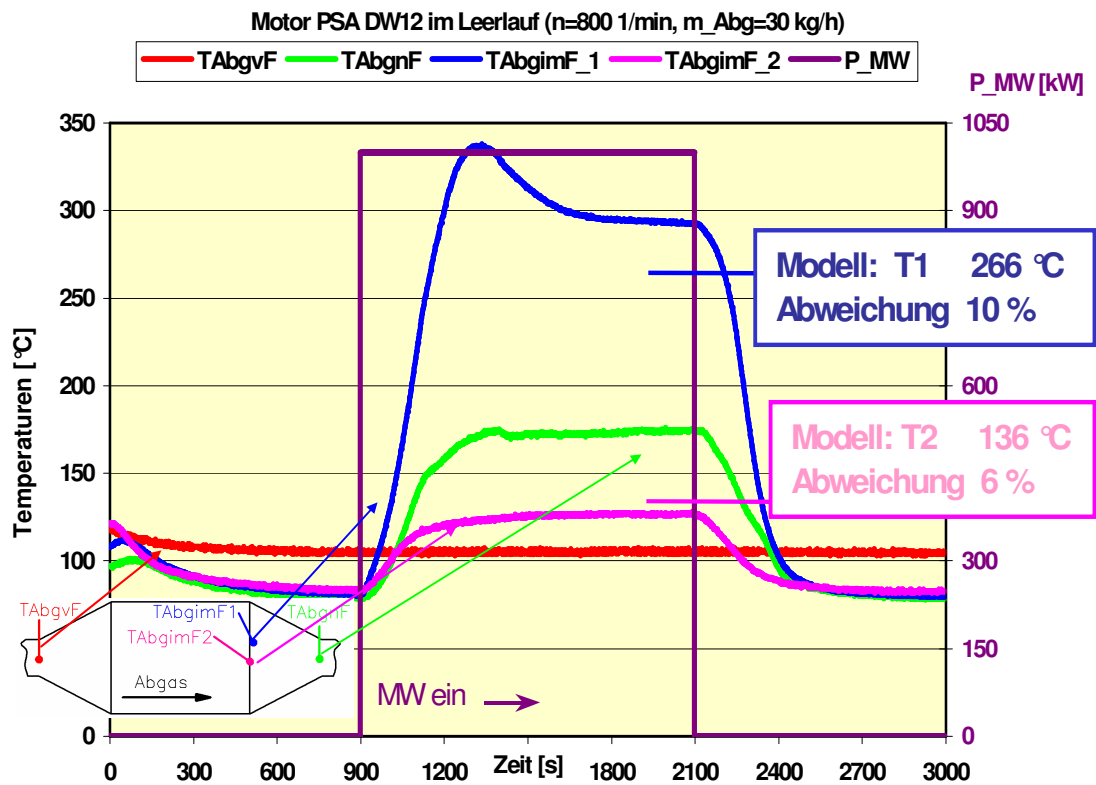


Abbildung 54: Validierungsversuch [Sand 05]

Nach der Messung wurde die Temperaturentwicklung an den Stellen T1 und T2 unter Versuchsbedingungen ($T_{\text{Abgas ein}}= 106$ °C und $m_{\text{Abgas ein}}= 30$ kg/h) modelliert und die Abgastemperatur im Wärmebilanzmodell berechnet. Neben der gemessenen Temperatur ist auch die berechnete Temperatur in Abbildung 54 dargestellt. Die Abweichung der Rechnung beträgt trotz Messunsicherheiten (Temperaturabhängigkeit des Absorptionsverhaltens, keine Leistungsmessung am Mikrowellenapplikator) nur 10 %. Die Übereinstimmung von Modell und Messung ist damit ausreichend gut, um mit der beschriebenen Methodik (FEM-Mikrowellen-Berechnungen mit anschließender Anwendung des Wärmebilanzmodells) weiterzuarbeiten.

6.2.4 Leistungsbedarf / Strömungsreduzierung

Ausgehend von dem Standardmodell (Cordieritwabenkörper 8 g Ruß/Liter; Applikator- $\varnothing=154$ mm; $L=192$ mm; axiale MW-Einleitung) wurde der Leistungsbedarf für die Mikrowellen-Regeneration berechnet. Durch den projektbegleitenden Arbeitskreis [PAK 04] wurde als anzustrebender Betriebspunkt für eine Vollstromregeneration der „70 km/h“-Punkt vorgeschlagen. „70 km/h-Punkt“ bedeutet Motorbedingungen, die einer Fahrweise von 70 km/h im 5. Gang entsprechen, was 52,7 Nm und 1488 U/min entspricht. Bei diesem Betriebspunkt werden 70 kg Abgas pro Stunde produziert. Die Abgastemperatur beträgt ≈ 225 °C. Eine Vollstromregeneration bei diesem Betriebspunkt wäre aus Sicht des Arbeitskreises des DPF-Projekts als wünschenswert zu betrachten. Als maximal zu verwendende Mikrowellenleistung wurde, wie schon erwähnt, 1 kW festgelegt.

In der Abbildung 55 ist der Temperaturverlauf des Rußes im Standardapplikator bei einer eingespeisten Mikrowellen-Leistung von 1 kW und dem genannten Betriebspunkt dargestellt (hellblaue Kurve). Die Berechnung erfolgte für den Filterkanal mit der stärksten Wärmquellenverteilung. Es zeigt sich, dass die erforderlichen 600 °C Rußtemperatur bei weitem nicht erreicht werden.

Abgesehen von Maßnahmen an Applikator oder Filter stehen 2 Möglichkeiten zur Verfügung, die Regenerationstemperatur zu erreichen:

- Verringerung der Abgasströmung
- Erhöhung der Mikrowellen-Leistung

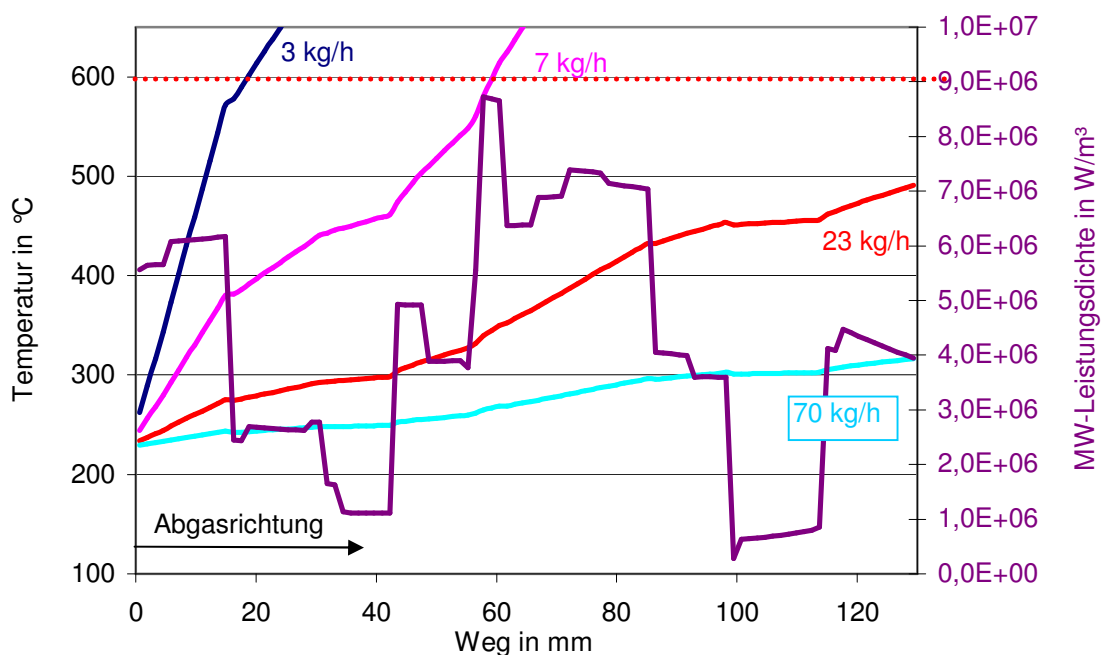


Abbildung 55: Rußtemperatur bei verschiedenem Abgasmassestrom
(Mikrowellen-Leistung 1 kW; Standardmodell mit Cordieritfilter)

Verringerung der Strömung

Eine Drittelung des Abgasstroms (23 kg/h) ist für ein Erreichen der Zündtemperatur noch nicht ausreichend (Abbildung 55). Erst bei einer Reduzierung auf 7 kg/h (10 % der Abgasmenge des 70 km/h-Punktes) können sichtbare Regenerationseffekte erreicht werden, indem nach 60 mm Kanallänge der Ruß zündet und 70 mm des Kanals regeneriert würden. Da jedoch möglichst weite Teile des Kanals regeneriert werden sollen, muss die Strömung noch weiter reduziert werden.

Eine Strömungsreduzierung wird jedoch von der Automobilindustrie kritisch beurteilt. Zum einen wird der bauliche Aufwand für das System größer. Zum anderen müsste ein zweites Filtersystem oder ein Bypass eingebaut werden, ebenso eine Volumenstrom regelnde Abgasklappe. (siehe auch Kap. 2.1.4)

Leistungserhöhung

In Abbildung 56 wurde die Temperaturverteilung für oben beschriebenes Modell bei einer Erhöhung der Mikrowellenleistung berechnet. Danach ist eine Leistungserhöhung auf 5 kW notwendig, um überhaupt in den Bereich der Regeneration zu kommen. Auf einen Stromabnehmer mit dieser Leistung sind die Fahrzeuge der heutigen Generation mit ihren 12 V-Bordnetzen nicht ausgelegt. (Die Zielvorgabe ist 1 kW).

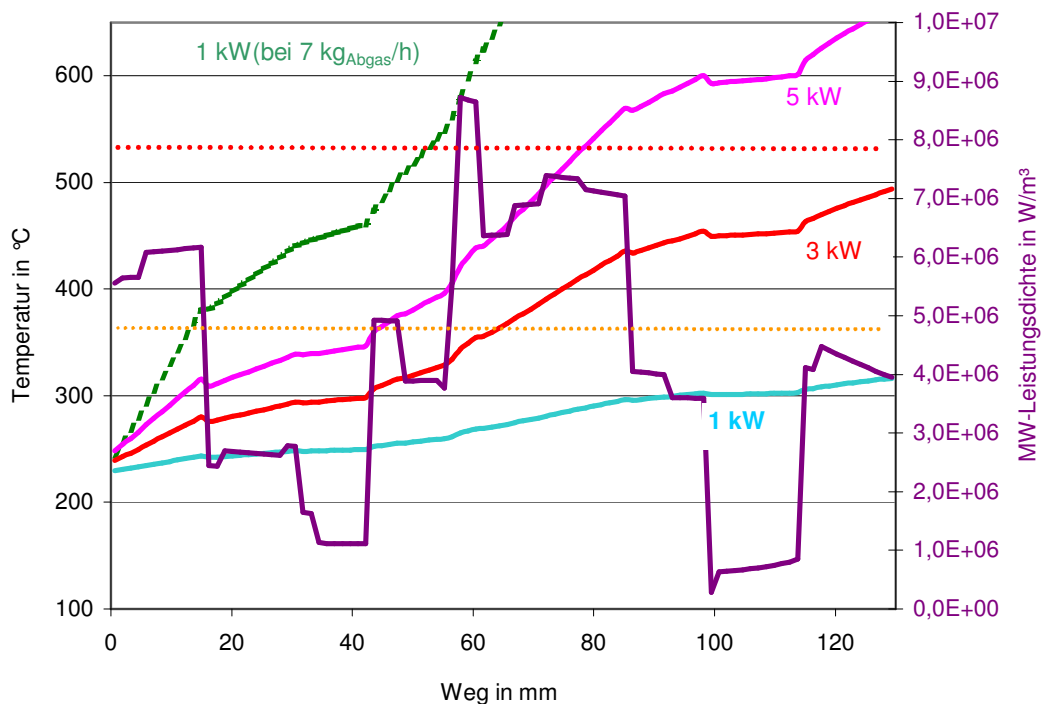


Abbildung 56: Kanaltemperatur in Abhängigkeit der Leistung (bei 70 kg_{Abgas}/h)

Zum einfachen Vergleich ist der Effekt der Strömungsreduzierung in Abbildung 56 mit angezeigt (grüne Linie), welcher wesentlich größer ist als die Leistungserhöhung.

Damit scheint die Reduzierung der Strömung für eine Mikrowellenregeneration zwangsläufig erforderlich zu sein.

Dennoch ist zu untersuchen, ob mit einer weitergehenden Optimierung des Systems eine deutliche Reduzierung des Leistungsbedarfs bewirkt werden kann.

Tabelle 7 zeigt verschiedene Möglichkeiten auf. Der Vollständigkeit halber sind die soeben diskutierten Punkte in der Tabelle mit aufgeführt.

Tabelle 7: Optimierungsmöglichkeiten

Erhöhen der Wärmequellichte	1	Leistungserhöhung
	2	Feldkonzentrierende Maßnahmen
	3	Volumenverkleinerung des Applikators
	4	Erhöhung der Rußschichtdicke
Senkung der Wärmeverluste	5	Reduzierung der Abgasmenge (Bypass)
	6	Erhöhung der Kanalanzahl (durch Filtergeometrie oder Filtervolumen)
	7	Verschluss der Kanäle zum Regenerationszeitpunkt
Sonstige Maßnahmen	8	Erwärmen des Abgases vor Filtereintritt
	9	Katalysator vor Filter oder Additive

Die Möglichkeit 1 der Leistungserhöhung ist, wie schon erwähnt, wegen des schwachen Bordnetzes nicht möglich. Die Maßnahmen 2 und 3 werden in den folgenden Kapiteln untersucht und diskutiert werden. Die Möglichkeit 4 würde bewirken, dass der Abgasgedruck ansteigt. Dies könnte konstruktiv durch eine Änderung der Filterstruktur verhindert werden. Allerdings würde das den Eingriff in ein über Jahre optimiertes Filtersystem bedeuten und ist im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar.

Maßnahme 6 würde bedeuten, die Anströmfläche des Filters und damit die Kanalanzahl wird vergrößert und damit das Strömungsvolumen pro Kanal verringert. Da jedoch nach [Kons 05] eine Zelldichte von ~ 250 cpsi und eine Kanallänge von 6“ ideal ist, und auch die Akzeptanz der Automobilindustrie für Neuerungen hinsichtlich der Filtergeometrie gering ist, wird diese Maßnahme nicht weiter verfolgt.

Maßnahme 7 erforderte, dass durch eine bewegliche Abdeckung, die vor dem Filter jeweils vor den zu regenerierenden Filterbereich gefahren wird, die Strömung in einem Teil der Kanäle reduziert wird. Dies setzt jedoch die genaue Kenntnis des lokalen Regenerationsverlaufes des Filters in jedem Beladungs- und Betriebszustand voraus, was schwierig zu messen bzw. vorausszusagen ist. Zudem sind bewegliche Teile seitens der Automobilindustrie im Abgassystem unerwünscht.

Möglichkeiten 8 und 9 würden einen zusätzlichen Erwärmungsmechanismus bzw. Regenerationsmechanismus bedeuten. Dann wäre das System mit 2 aktiven Verfahren ausgestattet, was nicht der Zielstellung dieser Arbeit entspricht.

Angesichts von Literatur, die von einer Senkung der Zündtemperatur und Erhöhung der Wirksamkeit von Katalysatoren im Mikrowellenfeld berichtet [Ma 97], [Zhan 04] ist die Mikrowelle als Zusatz zu bestehenden Systemen jedoch ein interessantes Thema, was aber gesondert aufzugreifen wäre.

6.3 Modellrechnungen zur Applikatoroptimierung

Entgegen der üblichen Mikrowellen-Applikatorauslegung im Ofenbau (homogenes Feld) war hier die Aufgabe, einen Mikrowellen-Applikator zu entwickeln, in dem sich das Mikrowellenfeld auf einen Teilbereich des Filters konzentriert. In diesem Bereich soll so viel Energie in den vorhandenen Ruß eingekoppelt werden, dass sich dieser trotz der Wärmeverluste durch das kalte vorbeiströmende Abgas auf Zündtemperatur erwärmt. Sofern der Ruß, der durch seine starke Mikrowellenabsorption die Mikrowellenenergie in Wärme umwandelt, abgebrannt ist, sollen die Mikrowellen die gereinigte transparente (fast verlustfreie) Keramik durchdringen und sich an den Stellen konzentrieren, an denen noch Ruß vorhanden ist (bis dieser dann wieder abgebrannt ist, usw).

6.3.1 Optimierung der zylinderförmigen Geometrie

Ausgangspunkt für die Modellierung der idealen Applikatorgeometrie war die Empfehlung von Vertretern der Automobilindustrie aus dem projektbegleitenden Arbeitskreis [PAK 05], diese für einen Standardwabenkörper mit zylindrischer Form mit den Abmaßen 5,66“ x 6“ zu gestalten. Da zu Beginn der Arbeit noch keine AZT-Filter zur Verfügung standen, wurde als Filtermaterial Cordierit gewählt.

Der Einfluss der Applikatorgeometrie ist schon in Kap. 6.1 beschrieben worden. Dementsprechend wurden bei den Optimierungsschritten die Position und Anordnung des Hohlleiters, Durchmesser und Länge des Applikators, sowie die Filterposition berücksichtigt.

Zunächst wurde die Mikrowelleneinleitung hinsichtlich einer axialen, tangentialen und normalen Einleitungsposition untersucht. Daraufhin wurde sich für die axiale Einleitung entschieden, welche zu einer höher konzentrierten Wärmequellendichte führte. Zudem haben die tangentiale und normale Einleitung den Nachteil, dass die Mikrowellen stets mit hoher Konzentration an der gleichen Stelle in das Dichtmaterial zwischen Filter und Gehäuse eingeleitet würden, so dass dieses einer besonders starken Belastung unterliegt.

Im nächsten Schritt wurden Applikatordurchmesser und Länge in 30-mm Schritten vergrößert. Im darauf folgenden Schritt wurde die Position des Filters im Applikator variiert (Abbildung 57).

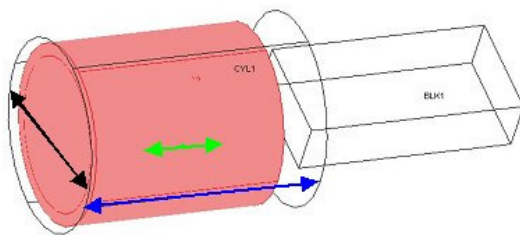


Abbildung 57: Variation der Applikatorgeometrie

Mit einer Veränderung der Applikatorabmaße ändert sich auch die absorbierte Leistung des Filters. Dies liegt daran, dass die Applikatorform mit den Mikrowellen in gewissem Maße in Resonanz steht. Da eine optimale Anpassung aber auch nachträglich mit Stellschrauben im Hohlleiter hergestellt werden kann, wurde dies nicht weiter berücksichtigt. Im Vordergrund dieser Untersuchungen steht die Feldverteilung bzw. die Rußzündung. Wie die Verteilung der Wärmequellen in Abhängigkeit der Applikatorgeometrie variiert, zeigt die linke Seite von Abbildung 58. Eine Beurteilung, welche Feldform die beste ist, kann bei alleiniger Betrachtung der Wärmequellen kaum erfolgen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist den Modellvarianten die Auswertung mit dem Wärmebilanzmodell gegenübergestellt. Um Unterschiede bei den Erwärmungseffekten möglichst deutlich darstellen zu können, wurden die folgenden Berechnungen mit dem Wärmebilanzmodell bei einer Luftmenge von 7 kg/h und einer Anfangstemperatur von 120 °C durchgeführt. Die eingespeiste Leistung betrug 1000 W. Betrachtet wurde der Kanal mit der höchsten Wärmequellendichte. Anhand der Rußtemperatur am Kanalende lassen sich die Modellvarianten gut vergleichen.

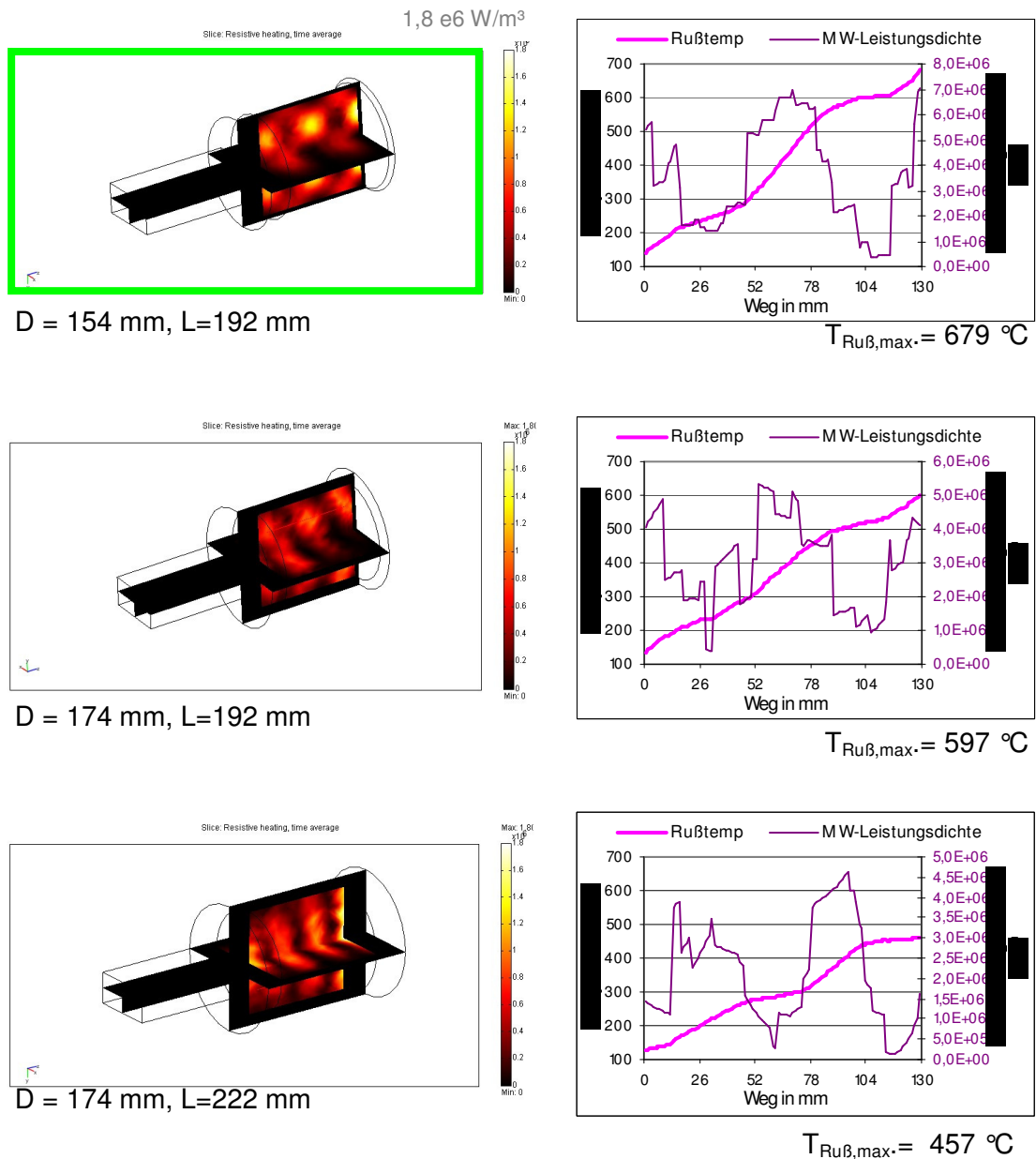


Abbildung 58: Feldverteilung bei Änderung der Applikatorabmaße

Als Optimum der Untersuchungen für einen handelsüblichen zylindrischen Cordieritfilter ist ein zylindrischer Applikator mit axial angeordneter Hohlleiter-mikrowelleneinleitung mit einem Durchmesser von 154 mm, einer Länge von 192 mm und einem Filterabstand zur Mikrowelleneinleitung von 33 mm. Bei einer Abgasmenge von 7 kg/h und einer Anfangstemperatur von 120 °C erreicht der Ruß am Kanalende eine Temperatur von 679 °C bzw., die Zündtemperatur von 600 °C wird bei den beschriebenen Bedingungen nach 78 mm überschritten. Dieser Applikator ist als Standardmodell definiert worden.

6.3.2 Feldkonzentrierende Maßnahmen

Wie die Leistungsbedarfsrechnungen gezeigt haben, kann mit dem Standardapplikator mit 1 kW-Mikrowellenleistung der Filter nur mit einer reduzierten Strömungsmenge gezündet werden. Entsprechend der Variante 3 in Tabelle 7 wurde untersucht, ob durch Einbauten in den Applikator das Mikrowellenfeld örtlich weiter konzentriert werden kann. Im folgenden werden verschiedene Einbauten anhand von Modellierungsrechnungen untersucht.

Antennen radial

Zunächst wurden verschiedene Antennenanordnungen betrachtet. Antennen, die radial kurz vor dem Filter positioniert wurden, konnten keine wirkliche Verbesserung hervorbringen. Zwar ist die Wärmequelle am Kanalanschluss geringfügig stärker als beim Standardmodell, dafür ist die danach folgende Wärmequellenkonzentration schwächer. Die Zündtemperatur wird ähnlich wie beim Standardapplikator nach 80 mm erreicht.

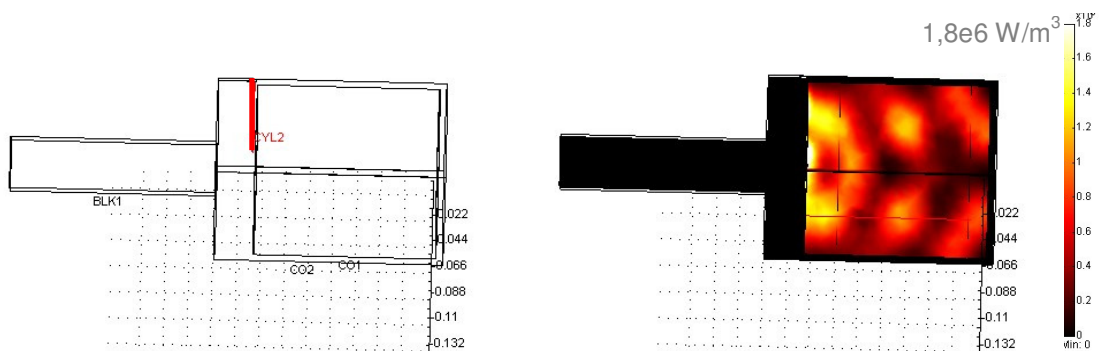


Abbildung 59: Antennen zur Feldkonzentration 1

Antennen axial:

Als nächstes wurde eine 1 mm dicke und 130 mm lange Antenne 40 mm von der Achse über der breiten Hohlleiterseite positioniert (Abbildung 60). Diese Antenne führt zu einer sehr starken Wärmequellenkonzentration im unmittelbaren Antennenbereich. Im Abstand von 2,5 mm der Antenne wird die Regenerationstemperatur schon nach 31 mm erreicht (bei 7kg/h). Dieses Ergebnis wäre grundsätzlich zufriedenstellend, wenn das konzentrierte Mikrowellenfeld in radialer Richtung nicht nur wenige mm stark wäre. Abbildung 60 zeigt die axiale und stirnflächige Wärmequellenverteilung. Danach beträgt der Bereich starker Konzentration nur 5 mm im Durchmesser, was etwa 0,1 % der Filterfläche entspricht.

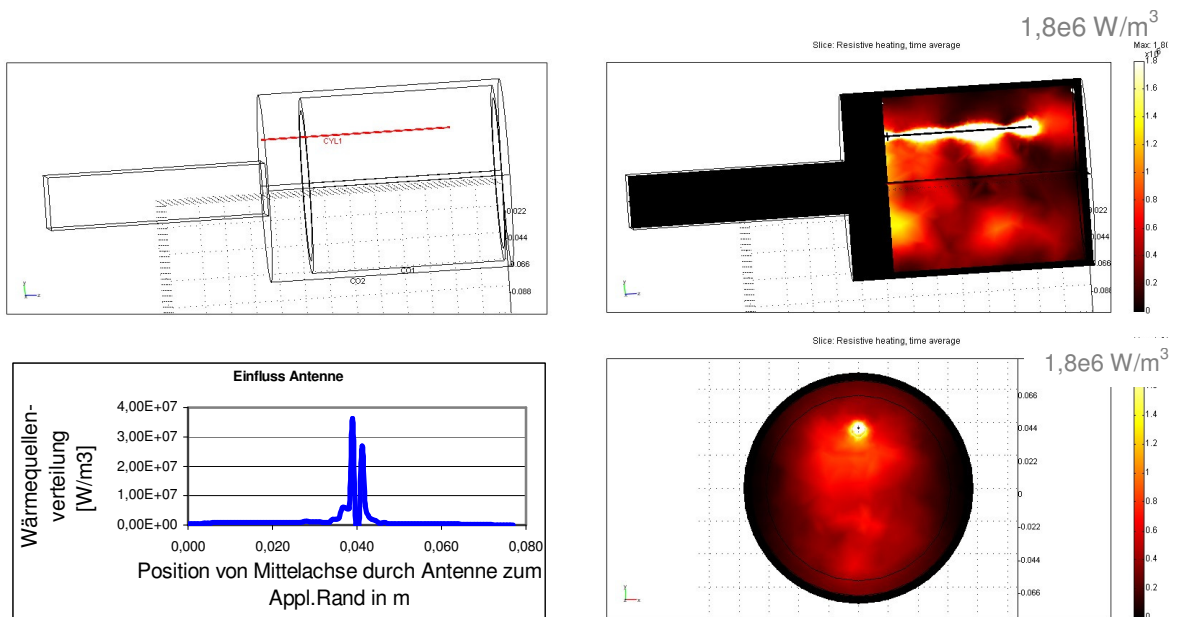


Abbildung 60: Antennen zur Feldkonzentration 2

Nachteilig an dieser an Lösung ist, dass die relativ lange Antenne für eine vollständige Regeneration in den Filter hinein und wieder heraus bewegt werden müsste, was technisch kaum einwandfrei zu realisieren wäre.

Die Anordnung selbiger Antenne wurde danach an einer weiteren Filterposition untersucht. Ausgesucht wurde eine Stelle welche beim Standardapplikator ursprünglich geringe Feldkonzentrationen aufweist (etwa Punkt 2 aus Kap. 6.2.3 Validierung).

Die Abbildung 61 (Draufsicht) zeigt, dass in diesem Fall das Mikrowellenfeld kaum durch die Antennen beeinflusst wird, und auch keine Konzentrierung der Wärmequellen um die Antennen erfolgt.

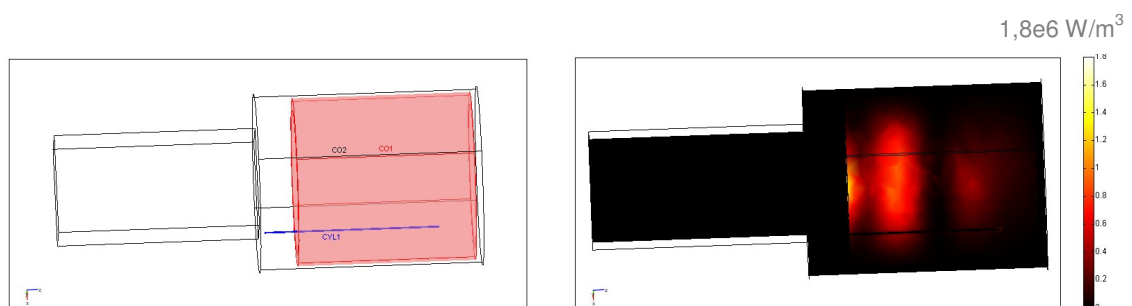


Abbildung 61: Antennen zur Feldkonzentration 3

Damit kann von der Anwendung von Antennen endgültig abgesehen werden, da sie nur dort Effekte bringen, wo schon vorher gute Bedingungen herrschten, und in kritischen Bereichen keinen Nutzen bringen.

Aus Sicht der Mikrowellenthermoprosesstechnik sind diese Ergebnisse für eine Nebenbetrachtung dennoch interessant. Einerseits ist die in der Literatur dargestellte

Fehlerhaftigkeit von Thermoelement-Temperaturmessungen im Mikrowellenfeld leicht nachzuvollziehen, andererseits muss die strikte Aussage: „In Mikrowellenöfen kann nicht mit Thermoelementen gemessen werden“ dahingehend relativiert werden, dass es theoretisch doch möglich ist, wenn es gelingt, das Thermoelement an einer Stelle geringster Feldstärke zu platzieren.

Hohlform

Ähnlich einer Fernsehsatellitenschüssel sollen die Mikrowellen durch eine eingebaute Hohlform auf einen Punkt am Filteranfang konzentriert werden (grüner Kreis in Abbildung 62).

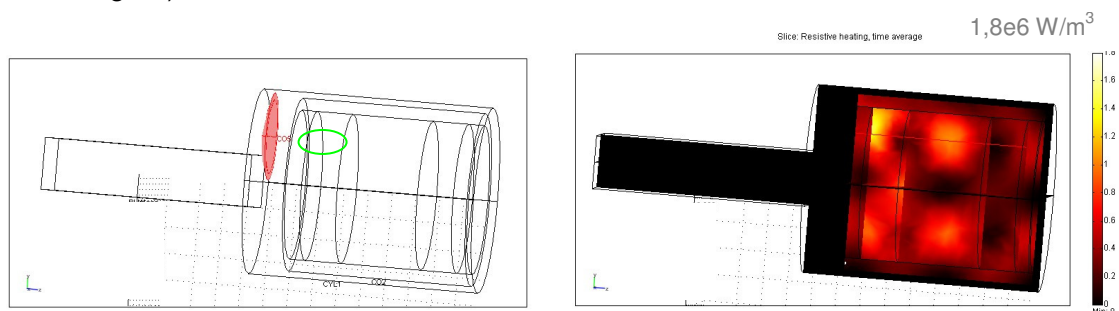


Abbildung 62: Feldkonzentration durch einen Konzentrador

Die Baugröße war durch den Platz im Applikator begrenzt. Diese Anordnung führt zwar zu einer leichten Feldkonzentration am oben genannten Punkt, das im Kanalverlauf folgende Maximum des Standardapplikator entsteht jedoch nicht mehr, sodass die Rußtemperatur am Kanalende nur 540 °C beträgt, also geringer ist als beim Standardapplikator. Von diesem Vorgehen ist damit abzusehen.

Keil

Durch das Einbringen eines Keiles in die Stirnwand des Applikators kann das Feld im Bereich der Keilkante stark konzentriert werden (Abbildung 63).

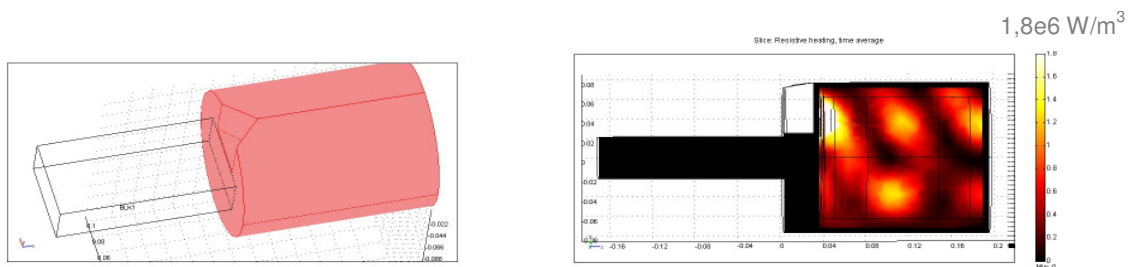


Abbildung 63: Feldkonzentration durch einen Keil

Der Wirkungsbereich der Kante ist zudem deutlich größer als der der Antenne. Der Zündpunkt im Bereich des Keils rückt von 78 mm beim Standardapplikator auf 62 mm zum Kanalanfang vor. Damit ist der Keil die effektivste Maßnahme hinsichtlich der hier untersuchten Einbauten. Dieser positive Effekt muss jedoch dahingehend relativiert werden, dass von einer Strömung von 7 kg/h ausgegangen wird und auch mit Keil auf eine Strömungsreduzierung nicht verzichtet werden kann.

Zusammenfassend kann für die Einbauten festgestellt werden, dass sie zu leichten Verbesserungen des Mikrowellenfeldes führen können, jedoch für die hier zu entwickelnde Anwendung keine entscheidenden Fortschritte bringen.

6.3.3 Einfluss des Applikatorvolumens

Bei einer gegebenen Mikrowellenleistung wird die durchschnittliche Leistungsdichte im Applikator von seinem Volumen beeinflusst. Je geringer die Applikatorgröße ist, um so ein kleineres Volumen verteilt sich die eingestrahlte Mikrowellenleistung, d.h. die Mikrowellenkonzentration nimmt zu. Vor diesem Hintergrund wurden Filter und Applikatorvolumen halbiert (Abbildung 64), um den Effekt hinsichtlich einer stärkeren Konzentration der Wärmequellen zu bewerten und Einflüsse auf die Feldform untersuchen.

In Abbildung 65 ist die Wärmequellenverteilung in dem halben Volumen derjenigen im ganzen Volumen des Standardapplikator gegenübergestellt. Die Mikrowelleneinleitung wurde dabei nicht verändert. Die qualitative Verteilung der Wärmequellen ist erhalten geblieben, ihre Intensität jedoch gestiegen. Im Vergleich mit dem Standardapplikator rückt der Zündpunkt des Rußes mehr in Richtung des Filteranfangs (66 mm). Hinsichtlich einer Erhöhung der durch Mikrowellen induzierten Wärmequellen ist damit für die weitere Applikatorauslegung eine Reduzierung des Applikatorvolumens zu empfehlen.

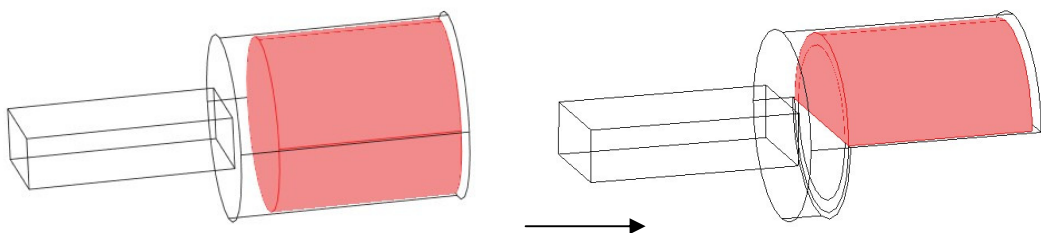


Abbildung 64: Halbierung des Filtervolumens

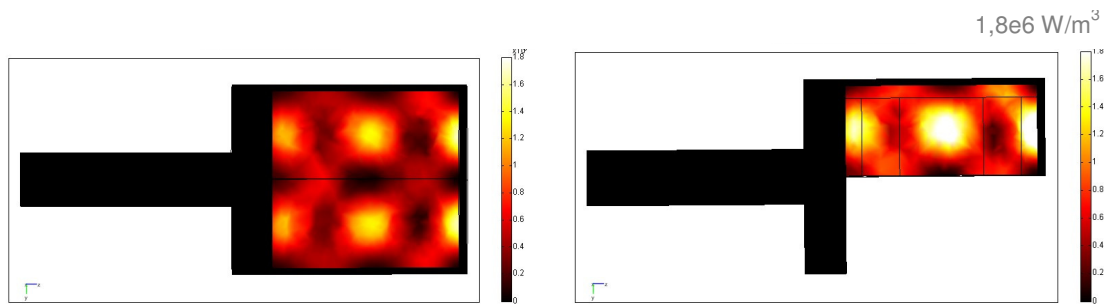


Abbildung 65: Feldkonzentration durch Volumenverkleinerung

6.3.4 Abbrandverhalten

Bei dem angestrebten Wirkprinzip soll sich das Mikrowellenfeld nach dem Verbrennen des Rußes verschieben und in den noch nicht regenerierten Bereichen starke Wärmequellen erzeugen.

Zur Überprüfung wurde am Standardapplikator mit Cordieritfilter ein Abbrandverhalten simuliert, in dem die dielektrischen Stoffwerte in den Bereichen der höchsten Feldkonzentration auf den Wert der rußfreien Keramik gesetzt wurden. Das Ergebnis zeigt, dass die erwartete Neuorientierung des Feldes nicht einsetzt (Abbildung 66). Als Grund kann die zylindrische Form des Applikators genannt werden, in welcher die Ausbildung des Mikrowellenfeldes sehr stark von der Applikatorgeometrie beeinflusst wird. Von einer zylindrischen Form ist daher beim Endmodell abzusehen.

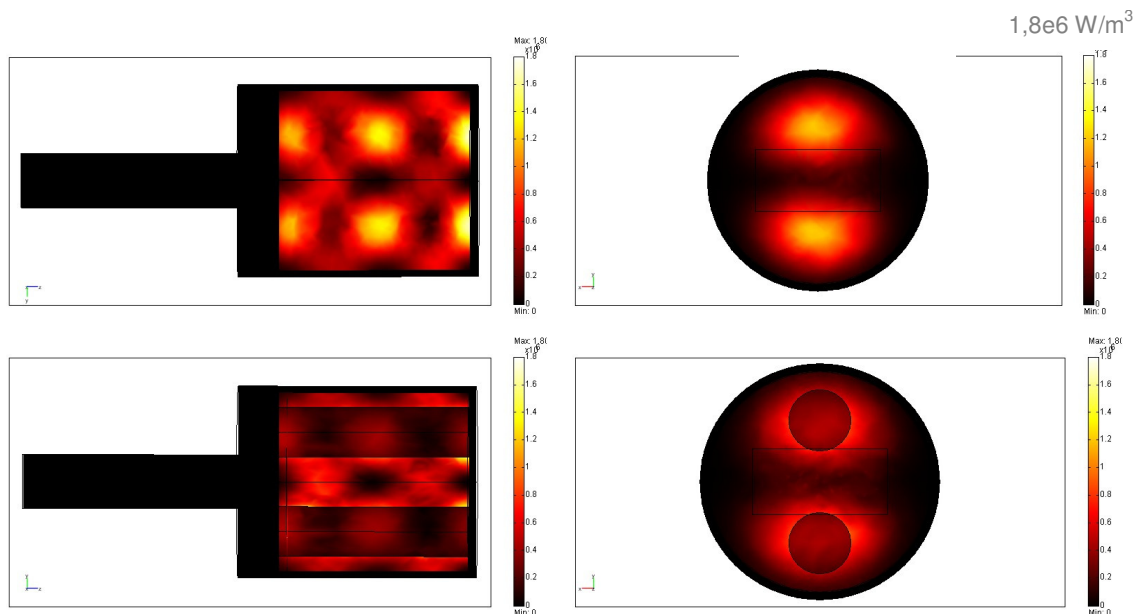


Abbildung 66: Schlechtes Abbrandverhalten des Standardapplikators

6.3.5 Einfluss der dielektrischen Eigenschaften des Filtermaterials

Nachdem die dielektrischen Eigenschaften des neuen Werkstoffes AZT bestimmt waren, konnte die Feldveränderung im Standardapplikator bei Einsatz eines AZT-Wabenkörpers modelliert werden. Abbildung 67 zeigt die veränderte Wärmequellenverteilungen für rußbeladene AZT- und Cordieritfilter. Im Gegensatz zum Cordierit konzentriert sich das Feld bei dem AZT-Filter stark im Anfangsbereich des Applikators, was für eine frühe Rußzündung im Kanal sehr günstig ist. Die maximal erreichbare Feldstärke ist beim AZT-Filter geringfügig höher als bei dem Cordieritfilter. Dies bedeutet, dass man auch beim Einsatz einer AZT-Keramik von der Notwendigkeit einer relativ geringen Abgasströmung durch den Filter ausgehen muss und eine Vollstromregeneration des Filters nicht möglich sein wird.

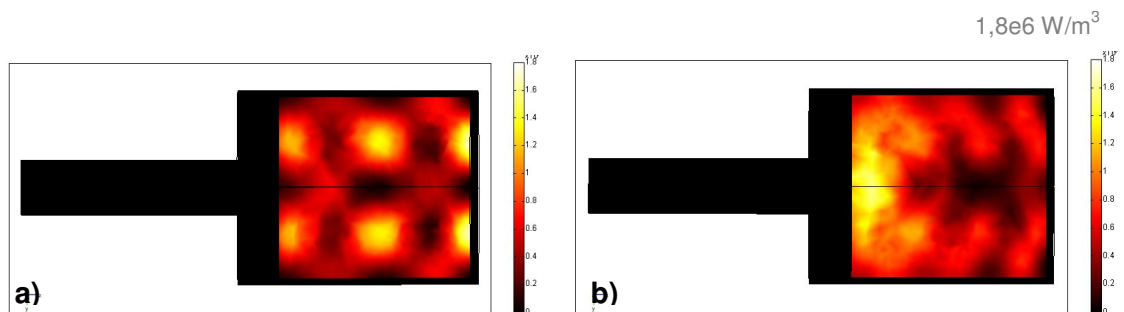


Abbildung 67: Einfluss der Filterkeramik auf die Feldausbreitung

a) rußbeladener Cordieritfilter, b) rußbeladener AZT-Filter

6.4 Endmodell

Die Ergebnisse der Modellierungen machen eine Überarbeitung des Applikators notwendig, in welche vor allem folgende Punkte miteinbezogen werden müssen:

1. Die Abgasmenge muss zur Regeneration verringert werden.
2. Es ist der neue Werkstoff AZT anzuwenden.
3. Eine nichtzylindrische Form muss gewählt werden.
4. Das Applikatorvolumen ist zu verkleinern.
5. Die Wärmequellenverteilung ist am Kanalanschluss zu konzentrieren.
6. Das nachwandernde Feld ist zu überprüfen.

6.4.1 Filterabmessungen

Die Applikatorform, welche der zylindrischen, strömungstechnisch bevorzugten Standardform am nächsten kommt, ist die der 2 Halbzylinder (Abbildung 68 a)).

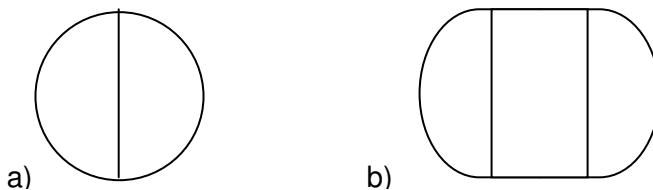


Abbildung 68: Neue Filter- bzw. Applikatorformen

Da das Filtervolumen auch während der Regeneration gleich bleiben soll, jedoch die Strömung während der Regeneration reduziert werden muss, ist ein Mehrwegesystem zu planen und das Gesamtfiltervolumen zu erhöhen. Hier bietet sich zum einen die Möglichkeit eines 2-Wegesystems mit 2 Filtern zu je einem Standardvolumen an. Dies widerspricht jedoch dem oben genannten Punkt 4, der Reduzierung des Applikatorvolumens. Zum anderen bietet sich die Möglichkeit einer 3-Wegelösung mit 3 Filtern zu je einem halben Standardvolumen an. Damit können 2 halbe Standardvolumen das Abgas mit der notwendigen Filterfläche reinigen. Das zu regenerierende Filtermodul hat nur das halbe Standardfiltervolumen, woraus eine Erhöhung der Wärmequellenintensität folgt. Weiter wäre eine Lösung mit 4 Filtern zu je einem Drittel Standardvolumen oder 5 zu je einem Viertel Standardvolumen denkbar. Jedoch verkompliziert sich durch eine zunehmende Anzahl an Filtern der apparative Aufwand über die Maßen, weshalb die Lösung mit den 3 Filtern ausgewählt wurde.

Mit einer Anordnung der Filter entsprechend Abbildung 68 b) wäre die Realisierung einer 3-Wege-Lösung möglich, welche nah an der Form eines Zylinders liegt. Hinsichtlich des hohen Aufwandes der Herstellung funktionaler AZT-Wabenkörper im Labormaßstab und des Umstandes, dass die Wabenkörper aus eckigen Elementen mit den Kantenlängen 22 mm x 22 mm x Länge hergestellt werden müssen und Rundungen nur schwer zu realisieren sind, konzentrierte sich die Entwicklung auf einen quaderförmigen Filter.

Der Filter sollte ein Gesamtvolumen von 1,25 l haben. Die Länge des Filters sollte idealerweise wieder 6" bzw. 154 mm betragen. Daraus resultiert eine Anströmfläche von 8100 mm², was 16,7 Filterelementen entspricht. Damit würden als mögliche sinnvolle Elementanordnungen 3 x 5 Elemente, 4 x 4 Elemente und 3 x 6 Elemente in Frage gekommen. Da aufgrund von Klebevorgängen zwischen den Elementen sowie des Einbaus und der Abdichtung in den Applikator mit einer (ungewollten) Bedeckung einzelner Kanäle gerechnet werden muss, wurde sich für die größere Variante mit 18 Filterelementen und der Anordnung 3 x 6 entschieden, zumal diese am besten mit der Anordnung aus Abbildung 68 übereinstimmt. Abbildung 69 zeigt den fertigen Filter mit den Abmaßen 68 x 137 x 154 mm³ (Klebe-naht zwischen den Elementen ~ 1 mm).



Abbildung 69: Verwendeter AZT-Filter (rußbeladen) [Schä 06]

6.4.2 Neumodellierung des Applikators

Die bislang erarbeiteten neuen Erkenntnissen und Anforderungen bestimmten die Gestaltung des neuen Applikators.

Entsprechend der neuen Geometrie des Filters muss ein quaderförmiger Applikator entwickelt werden. Von den Modellierungen des Standardapplikators war bekannt, dass bei dem AZT-Filter mit einer Mikrowelleneinleitung am Abgaseintrittsbereich sich das Feld am Kanalbeginn ausbildet. Weiterhin war festgestellt worden, dass sich ein freier Raum vor dem Filter als günstig auswirkt. (Abbildung 67).

Zwischen Filter und Applikator muss wieder eine Abdichtung eingebracht werden, welche entsprechend dem Standardmodell 5 mm betragen soll.

Daraus ergibt sich eine quaderförmige Applikatorform von 78 x 147 x 192 mm. Die Mikrowellenzuleitung soll vorne beim Lufteintritt in den Applikator erfolgen. Unklar ist noch, in welcher Anordnung dies am günstigsten sein wird.

Dementsprechend wurden neue Modellierungen durchgeführt, um die Mikrowelleneinleitung zu optimieren, sowie das Abbrandverhalten zu kontrollieren.

Da der neue Applikator für eine Mehrwegeanordnung vorgesehen ist, wurde von einer frontalen Einleitung abgesehen und der Hohlleiter senkrecht von oben an der schmalen Applikatorseite angebracht (Abbildung 70). Die Modellierung dieser Anordnung zeigt eine starke Wärmequellenkonzentration im Bereich der Mikrowelleneinleitung.

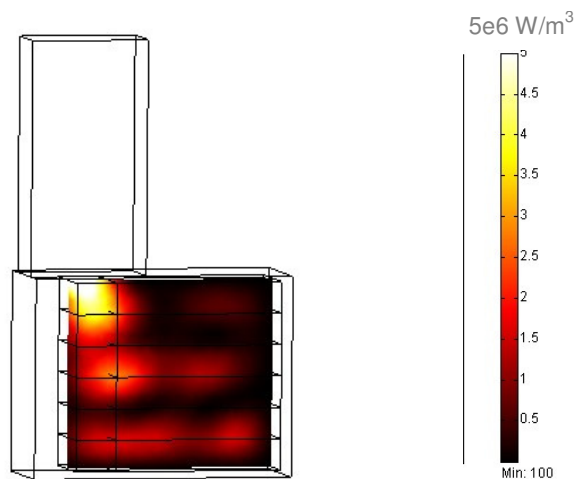


Abbildung 70: Neuer Applikator mit senkrechter Mikrowelleneinleitung und AZT-Filter

Um das Abbrandverhalten zu simulieren, wurde der Filter in 6 waagerechte Zonen eingeteilt. Die Ergebnisse des Wärmebilanzmodells hatten gezeigt, dass sich die höchste Temperatur am Kanalende einstellt und die Rußzündung daher vom

Kanalende her erfolgt (Abbildung 52, Seite 60). Gleichzeitig ist aber auch gezeigt worden, dass der Ruß erst ab einer gewissen Strecke ab Kanalstart zündet. Das heißt, ein geringes Stück Ruß wird immer am Kanalstart bestehen bleiben (Abbildung 71).

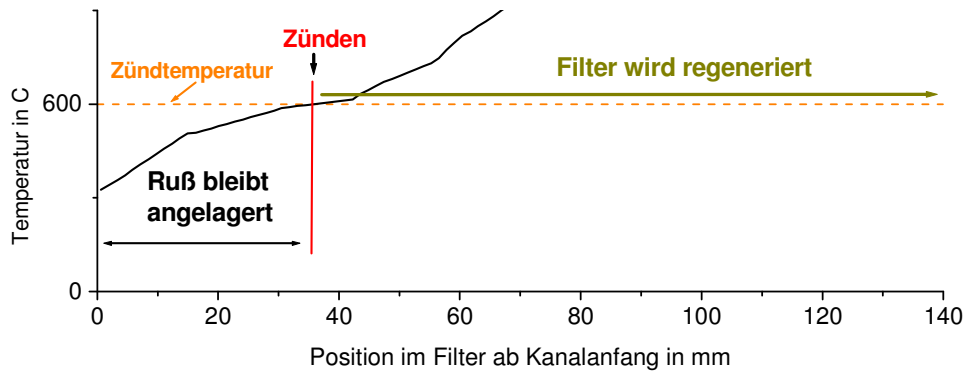


Abbildung 71: Rußzündung im Kanal

Daher wurden die 6 waagerechten Zonen nochmals entlang des Kanals vertikal in einzelne Bereiche aufgeteilt, um das Abbrennen des Rußes vom Kanalende her und die verbleibende Ablagerung des Rußes am Kanalstart mitbetrachten zu können. Die Abbildung 72 zeigt das Abbrennen des Rußes mit der Neuorientierung des Mikrowellenfeldes bzw. der Wärmequellenverteilung.

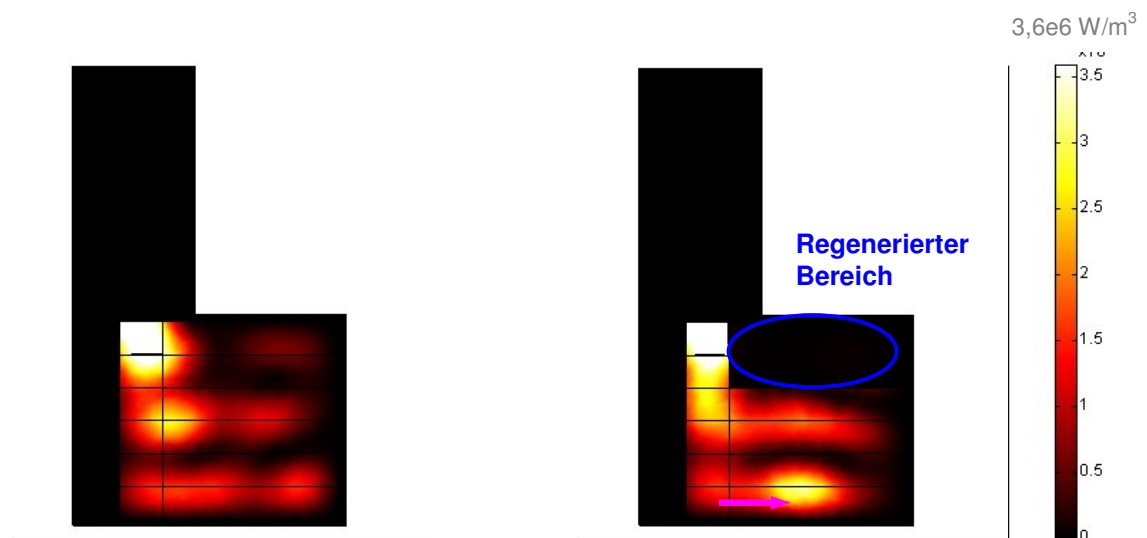


Abbildung 72: Änderung der Wärmequellenverteilung bei Rußabbrand
(links: zu Regenerationsstart, rechts: teilregeneriert)

Mit fortlaufender Regeneration verschieben sich die starken Wärmequellen im unteren Teil des Applikators mehr in die Mitte der Kanäle (rosa Pfeil in Abbildung 72). Dies würde bedeuten, dass die nicht regenerierte Zone am Kanalstart relativ groß sein würde.

Aus diesem Grund wurde die Mikrowelleneinleitung modifiziert, indem der Hohlleiter schräg an den Applikator angebracht wurde (Abbildung 73 links). Bei der Betrachtung der Wärmequellenverteilung ist neben der auf die Filteranfangsbereiche konzentrierten Feldverteilung (mitte) vor allem auch die relativ gleichmäßige Wärmequellenverteilung quer zur Strömungsrichtung hervorzuheben (rechts).

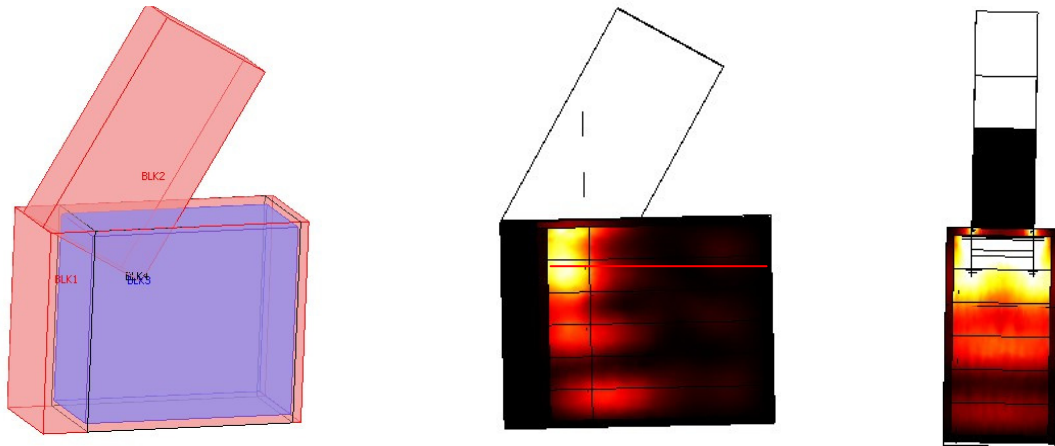


Abbildung 73: Endmodell für die MW-Regeneration von AZT-Filtern

Abbildung 75 zeigt schematisch die fortlaufende Regeneration des Filters. In dieser modellmäßigen Betrachtung wird Kanal für Kanal regeneriert, indem die Stoffwerte des rußfreien AZT für die regenerierten Bereiche werden. Wie sich zeigt, wird sich bei dieser schrägen Anordnung des Hohlleiters die Wärmequellenverteilung bei einem teilabgebrannten Filter auch im unteren Bereich auf den Kanal Anfang konzentrieren. Durch die Regeneration und die damit verbundene Verschiebung des elektrischen Feldes verschieben bzw. verstärken sich die anfangs noch schwachen Wärmequellen in den noch nicht regenerierten Filterbereichen (Abbildung 75 1 und 3). Damit schreitet die Regeneration entsprechend dem in dieser Arbeit verfolgten Lösungsansatz voran. Der Lösungsansatz funktioniert.

In Abbildung 74 wird dies nochmals anhand der Wärmequellenverteilung des in Abbildung 75 dargestellten Kanals verdeutlicht.

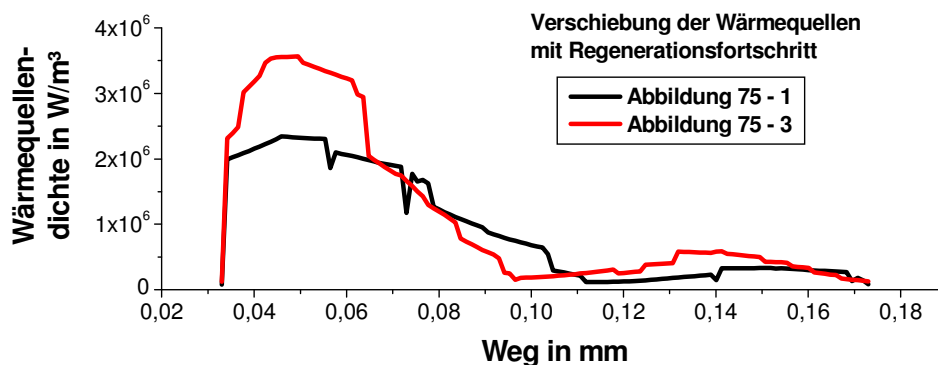


Abbildung 74: Verschiebung der Wärmequellen bei fortlaufender Regeneration

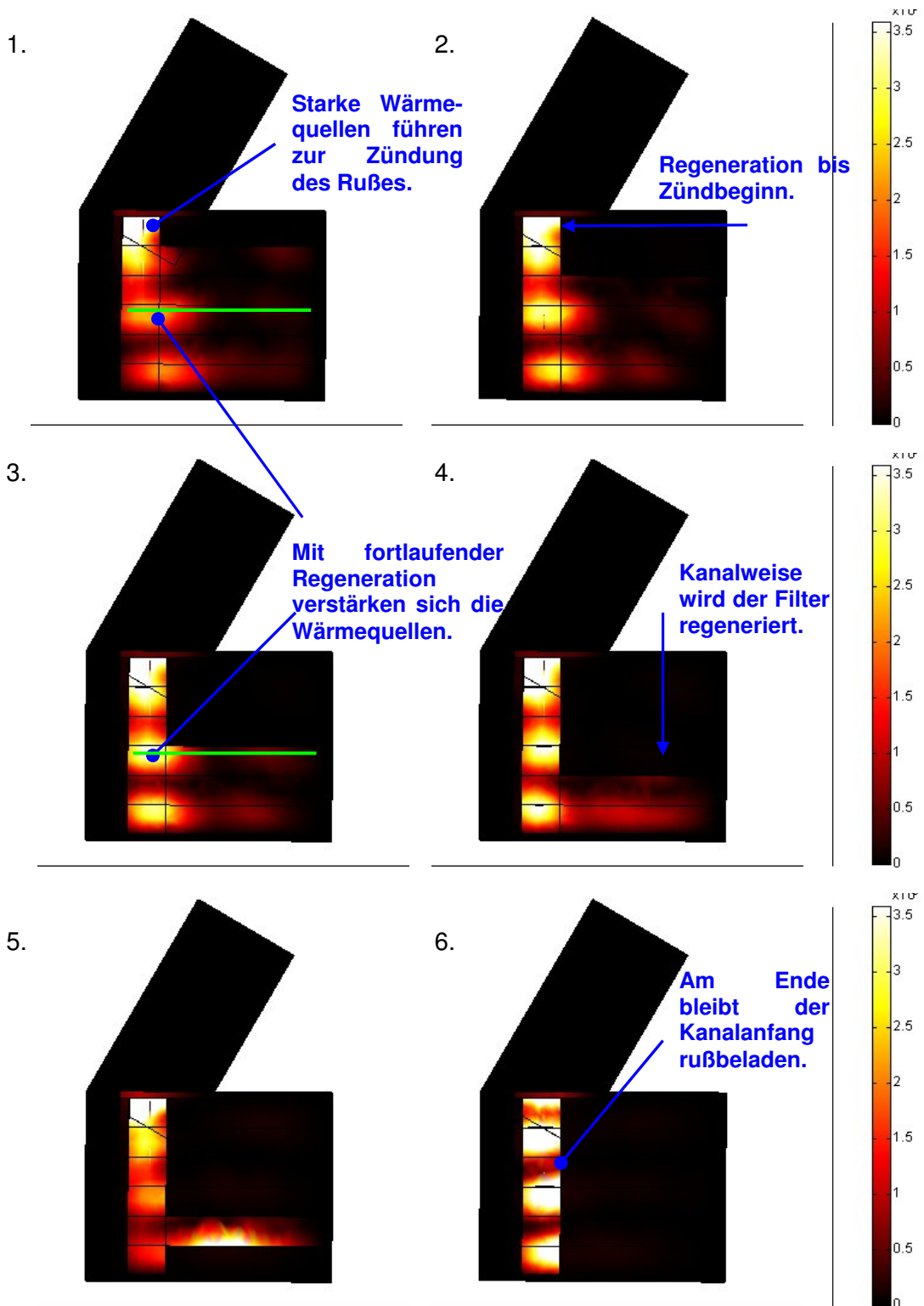


Abbildung 75: Abbrandverhalten des Filters

(ohne Betrachtung des Sauerstoffbedarfs)

6.5 Optimierung der Abgasmenge

6.5.1 Berechnung der maximalen Abgasmenge

Ausgehend von dem neu entwickelten Applikator war die größtmögliche Abgasmenge bei einer Mikrowellenleistung von 1 kW zu ermittelt. Entlang der roten Linie in Abbildung 73 ist die Wärmequellenverteilung im Mikrowelleneintrittsbereich des neuen Applikators Abbildung 76 dargestellt.

Die stärkste Wärmequellendichte ist mit einem Maximum von 25 W/cm^3 in den ersten 30 mm des Kanals konzentriert, wogegen zum Kanalende hin keine starken Wärmequellen mehr vorhanden sind. Der wesentliche Temperaturanstieg von Luft (oder Abgas), Keramik und Ruß erfolgt also am Kanalbeginn innerhalb der ersten 30 mm. In diesem Bereich muss daher die Regenerationstemperatur erreicht werden. Der Ruß im Anfangsbereich des Kanals, vor Erreichen der Zündtemperatur, wird im Filter nicht mehr regeneriert, ein schneller Temperaturanstieg im Anfangsbereich ist also anzustreben.

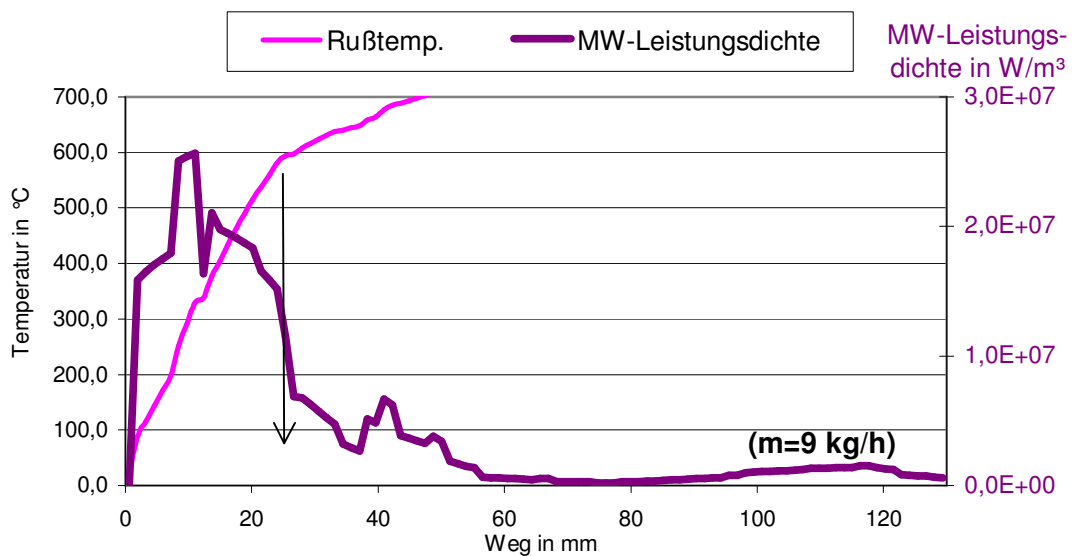


Abbildung 76: Wärmebilanz des neuen Applikators

Mit dem Wärmebilanzmodell wurde anhand dieser Wärmequellenverteilung die Rußtemperatur für verschiedene Abgasmengen berechnet (Abbildung 77). Dabei wird deutlich, dass auch mit dem neuen Applikator bei einem Massestrom von 70 kg/h keine Regeneration stattfinden kann.

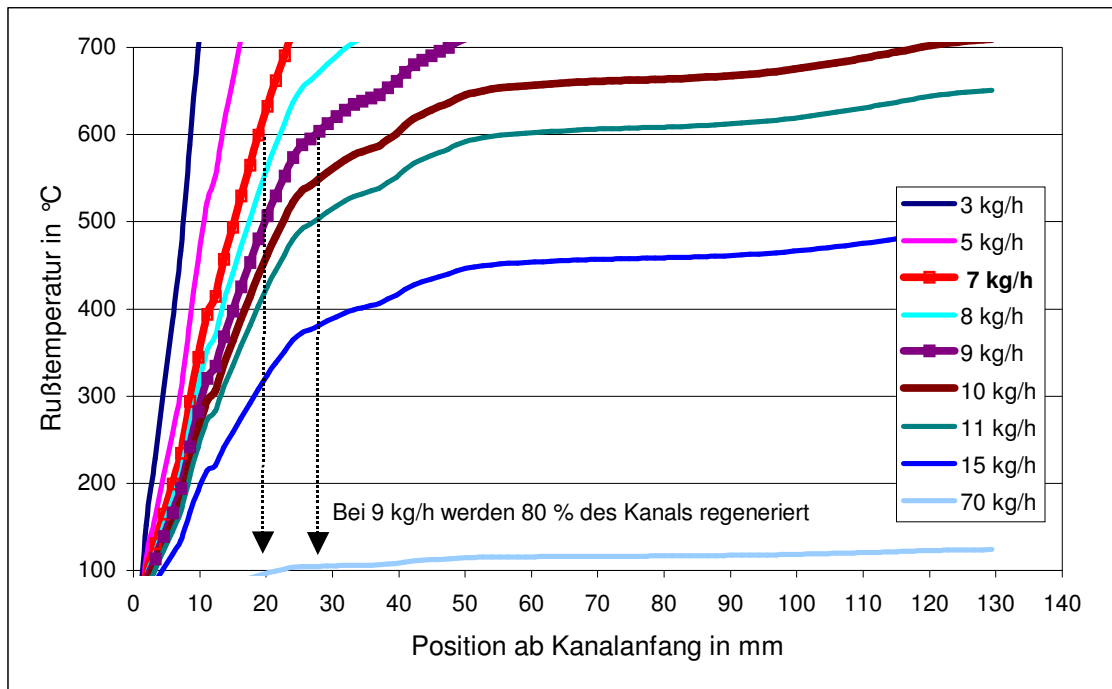


Abbildung 77: Temperaturentwicklung bei verschiedenen Abgasmasseströmen

Erste Regenerationserfolge stellen sich ab einer Reduzierung des Massestroms auf 11 kg/h ein. Sollen mindestens 80 % des Kanals regeneriert werden, ist der Massestrom auf 9 kg/h zu reduzieren. Wird der Massestrom weiter reduziert, verschiebt sich der Zündpunkt weiter zum Kanalstart. Die Zündposition in Abhängigkeit vom Massestrom ist in Abbildung 78 für den neuen Applikator mit AZT-Filter sowie zum Vergleich auch für das Standardmodell mit Cordieritfilter dargestellt.

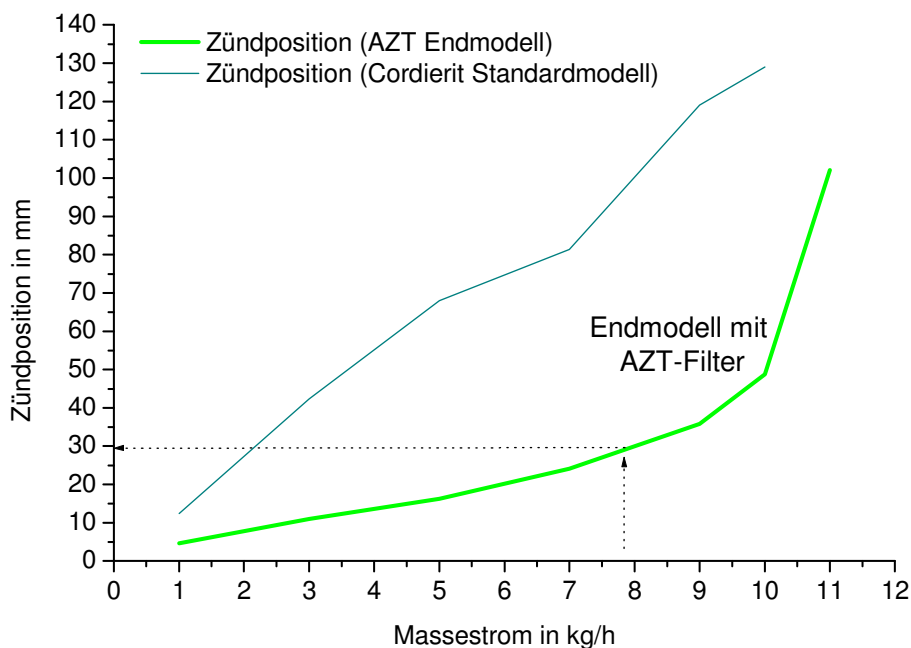


Abbildung 78: Zündpunkt in Abhängigkeit vom Abgasmassestrom

Auch wenn sich mit der Reduzierung des Abgas- oder Luftmassenstroms die Zündtemperatur für die Regeneration vorteilhaft immer weiter an den Kanalbeginn verschiebt, so ist eine Strömungsreduktion jedoch nicht unbeschränkt möglich, da durch die Luft oder das Abgas, welches den Filter durchströmt, der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff zugeführt wird.

6.5.2 Berechnung des Sauerstoffbedarfs

In Anbetracht dessen, dass die Filterregeneration so energiesparend wie möglich erfolgen soll, ist aus Sicht der Rußverbrennung dem Filter möglichst schnell die zur Verbrennung notwendige Sauerstoffmenge zuzuführen. Für die Ermittlung des notwendigen Sauerstoffbedarfs wird davon ausgegangen, dass der Filter mit 20 g Ruß beladen ist, und alle Kanäle gleichmäßig mit Abgas bzw. Luft durchströmt werden. Für die Verbrennung der 20 g Ruß zu CO_2 werden ca. 37 l Sauerstoff benötigt. Die Zeit, in der dem Ruß der zur vollständigen Verbrennung notwendige Sauerstoff zugeführt wird, wird im folgenden "O₂-Bedarfszeit" genannt. Sie ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration des Gases und der Gasmenge, die durch den Filter fließt.

In Abbildung 79 ist die "O₂-Bedarfszeit" als Funktion des Massenstroms dargestellt. Es zeigt sich, dass mit kleiner werdenden Abgasströmen der Zeitbedarf zur Verbrennung stark ansteigt. Der doppelte Sauerstoffgehalt führt zu Halbierung der "O₂-Bedarfszeit". Damit ist für eine möglichst kurze Regeneration neben einer hohen Filterdurchströmung ein hoher Sauerstoffgehalt im Abgas bzw. Luft als Regenerationsgas zu empfehlen.

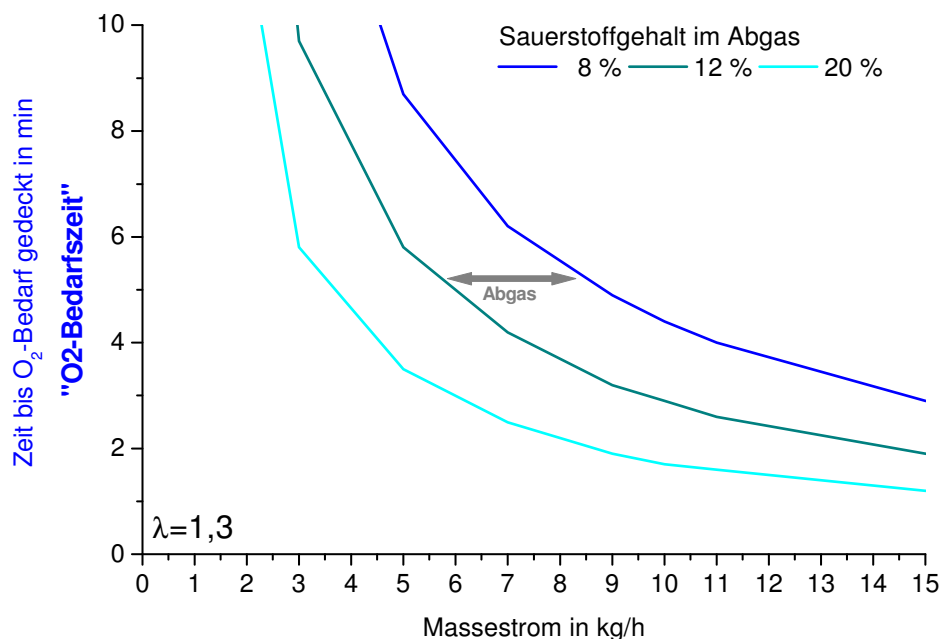


Abbildung 79: "O₂-Bedarfszeit" in Abhängigkeit des Massenstroms

6.5.3 Optimum aus Abgasmenge und Sauerstoffbedarf

Da aus Sicht der Erreichung einer Zündtemperatur ein möglichst geringer, aus Sicht der Sauerstoffversorgung ein hoher Abgasstrom günstiger ist, muss die Abgasmenge unter Beachtung beider Aspekte optimiert werden. In Abbildung 80 wurden Abbildung 78 und Abbildung 79 zusammengeführt. Auf der linken Seite ist die Zündposition im Kanal, auf der rechten Seite die "O₂-Bedarfszeit" in Abhängigkeit des Massestroms aufgetragen. Der Bereich, in dem eine Regeneration innerhalb der ersten 30 Kanal-Millimeter erfolgen kann, ist grün schraffiert. Ab einer Reduzierung auf weniger als 5 kg/h wächst die "O₂-Bedarfszeit" unverhältnismäßig stark an. Eine "O₂-Bedarfszeit" < 3 min ist nur mit Luft realisierbar.

Um mindestens 80% des Filterkanals zuverlässig mit einer optimalen Sauerstoffmenge regenerieren zu können, ist ein Luft-Massestrom von 7 kg/h zu empfehlen. Durch die Verwendung von Luft statt Abgas wird einerseits die "O₂-Bedarfszeit" gesenkt, andererseits ist Luft auch wesentlich leichter zu regeln als Abgas mit motorbetriebspunktabhängigem Druck- und Sauerstoffgehalt.

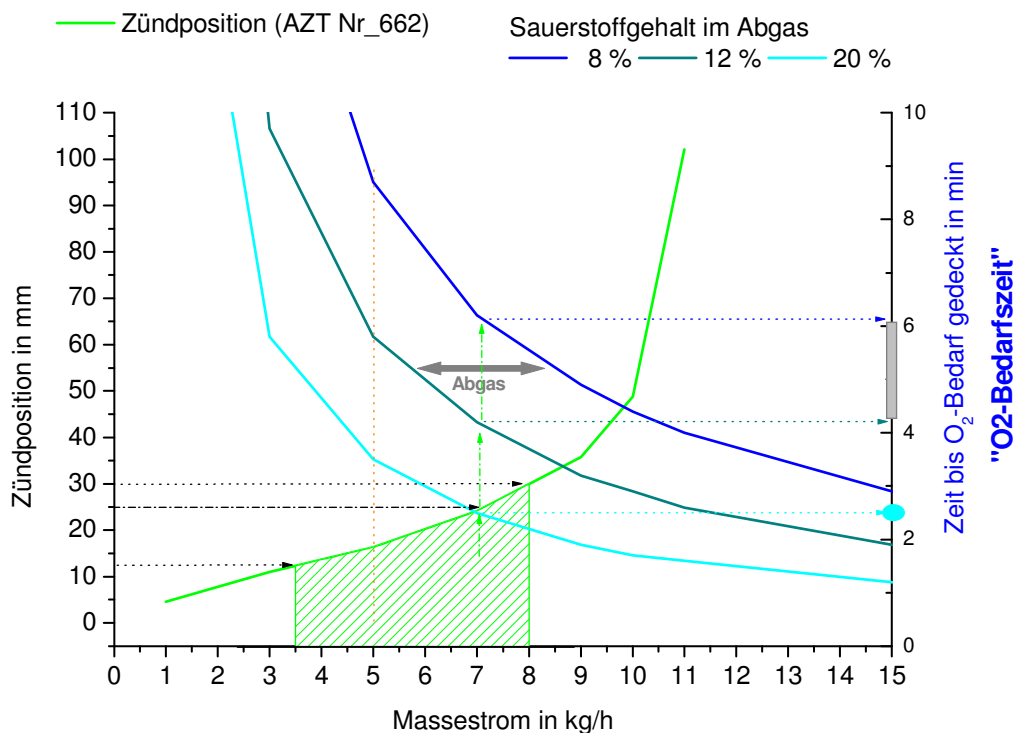


Abbildung 80: Zündpunktverschiebung und Regenerationszeit

6.6 Kanaldurchströmung bei teilweiser Rußregeneration.

6.6.1 Einfluss der Rußbeladung auf Druckverlust und Durchströmung

Bei der bisherigen Darstellung des Rußabbrandes wurde davon ausgegangen, dass nach Zündung des Rußes am heißesten Punkt im Kanal, sprich dem Kanalende, der Ruß bei gleichbleibender Strömung vom Ende des Kanals bis zur Position der Zündtemperaturunterschreitung in Richtung Kanalbeginn abrennt.

Das Wärmebilanzmodell ging bisher von einer gleichmäßigen Verteilung der Durchströmung der Ruß- und Keramikschicht entlang der gesamten Kanallänge aus. Wenn jedoch ein Teil des Rußkanals regeneriert wurde, trifft diese Annahme nicht mehr zu. Eine Untersuchung des Druckverlustes [Sand 05] hat gezeigt, dass die Keramikmembran einen deutlich geringeren Druckverlust hat als die Rußschicht (Abbildung 81). Daher wird nach einem Teilabbrand der Rußschicht durch den regenerierten Teil des Kanals wesentlich mehr Luft oder Abgas strömen. Das Wärmebilanzmodell wurde deshalb dahingehend erweitert, dass ein Teilabbrand des Rußes mitberücksichtigt werden kann und die Veränderung der Kanaldurchströmung in die Bilanz miteingeht.

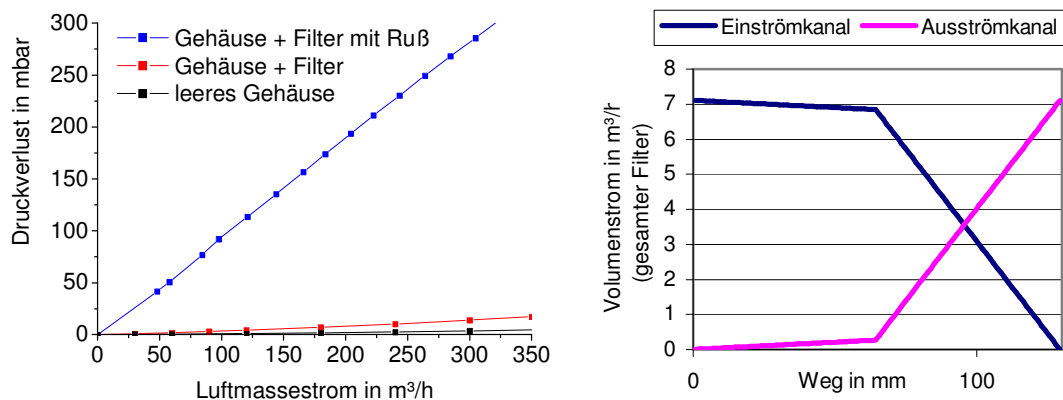


Abbildung 81: Druckverlust von Keramikmembran und Rußbeladung

Neben der veränderten Strömung in einem Kanal bedeutet dies aber auch, dass die insgesamt den Kanal durchströmende Luftmenge sich ändern wird. Zu Regenerationsbeginn, wenn nur in einigen Kanälen die Regeneration beginnt, bedeutet dies für diese Kanäle, dass mehr Gas durch den gesamten Kanal strömen wird und damit auch die Wärmeverluste steigen. Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde, führt jedoch ein Anstieg der Strömung durch den Kanal zu einer Verschiebung des Zündpunktes Richtung Kanalende bzw. zur Unterschreitung der Zündtemperatur und damit zum Stopp der Regeneration.

Ausgehend davon, dass die Masse der den Filter insgesamt durchströmenden Luft gleich bleibt, führt die Erhöhung der Durchströmung in einem Kanal x aber auch

zwangsläufig zur Reduzierung der Durchströmung in anderen Kanälen y bis z und dort zu einer Reduzierung der Wärmeverluste. Damit verbunden ist eine Erhöhung der Temperatur und Verschiebung des Zündpunktes Richtung Kanalanzug in diesen Kanälen.

Anhand des unterschiedlichen Druckverlustes der Keramikmembran ohne und mit Rußschicht lässt sich in Verbindung mit den entsprechenden Flächenanteilen der rußbeladenen und rußfreien Bereiche der Anteil an der Gesamtluftmasse errechnen, der durch die Rußschicht strömt bzw. durch die regenerierten Bereiche des Filters (Anhang A2). Diese Rechnung kann sowohl auf die Filtrationsfläche des gesamten Filters als auch auf einen einzelnen Kanal (oder auch alle Kanäle) angewendet werden. Wenn z.B. aufgrund der Regeneration von 5 % der Gesamtfiltersfläche durch diese regenerierte Fläche 65 % der gesamten Luft strömt (Tabelle 8), folgt, dass bei 5 % voll regenerierter Rußkanäle 65 % der Luft durch eben diese fließt (Variante 1), bzw. bei 10 % halb regenerierter Rußkanäle 65 % der Luft durch den regenerierten Teil der Membran strömt, bzw. 67 % der Gesamtluft durch diese halbgereinigten Kanäle (Variante 2). Durch den rußbeladenen Teil der Membran würde in diesem Fall dann etwa 65 % weniger Luft strömen als in dem noch nicht regenerierten Fall. Insgesamt erhöht sich in dem geschilderten Beispiel die Gesamtmenge an Luft, welche in den Kanal eintritt und die noch rußbeladenen Bereiche überströmt. Die Folge der Rußregeneration am Kanalende in einem Teilbereich des Filters ist demnach, dass die den Erwärmungsprozess dominierende Längstströmung ansteigt und mit ihr die Wärmeverluste.

Tabelle 8: Strömungsverteilung bei Rußregeneration

		Variante 1			Variante 2			
		Kanal zu	Kanal frei	Kanal teilregeneriert	Kanal zu	Kanal frei	Kanal teilregeneriert	Kanal zu
		in %	in %	in %	in %	in %	in %	...% frei
		95,00	5,00	0,00	90,00	0,00	10,00	50
Anzahl Kanäle		2986	157	0	2829	0	314	
Volumenstrom	in m ³ /s	2,4	4,6	0,0	2,3	0,0	4,7	
Volumenstrom	% v. ges	35%	65%	0%	33%	0%	67%	
entspricht Filterbez. Massestrom	kg/h	2,57	91,21		2,57		46,88	46,88
Filterkanal wird:		wärmer	kälter		wärmer		kälter	kälter

(Abgasmassestrom: 7 kg/h; Kanäle insgesamt 3140; Zelldichte: 250 cps)

Anhand der Betrachtung zweier Filterkanäle soll das Regenerationsverhalten in der Tabelle 9 verdeutlicht werden. Die beiden Kanäle werden unterschiedlich stark von den

Mikrowellen bestrahlt und es liegen demzufolge verschiedene Wärmequellenverteilungen vor. Abbildung 82 zeigt die Position der betrachteten Kanäle im Filtermodul.

Während in Kanal A zu Beginn der Betrachtung eine Rußzündung und Regeneration erfolgt, verhindern die strömungsbedingten Wärmeverluste bei Kanal B die Zündung. Nachdem Kanal A jedoch zum Teil regeneriert ist, ändert sich das Strömungs- und Abkühlverhalten und die Regeneration findet in Kanal B statt (Tabelle 9).

Nachdem der Regenerationsverlauf bisher auf der reinen Betrachtung des Mikrowellenfeldes und seiner Veränderung beim Rußabbrand basierte, und demnach Kanal für Kanal abbrennen würde, zeigt das Beispiel in Tabelle 9, dass diese Betrachtung um die Einflüsse der Strömungsverteilung und deren Veränderungen im Regenerationsfall ergänzt werden muss. In diesem Sinne ist also der Regenerationsverlauf in seiner Abfolge auch hinsichtlich der Änderung der Mikrowellenfeldverteilung neu zu untersuchen, indem die Regeneration nicht mehr kanal- sondern abschnittsweise modelliert wird.

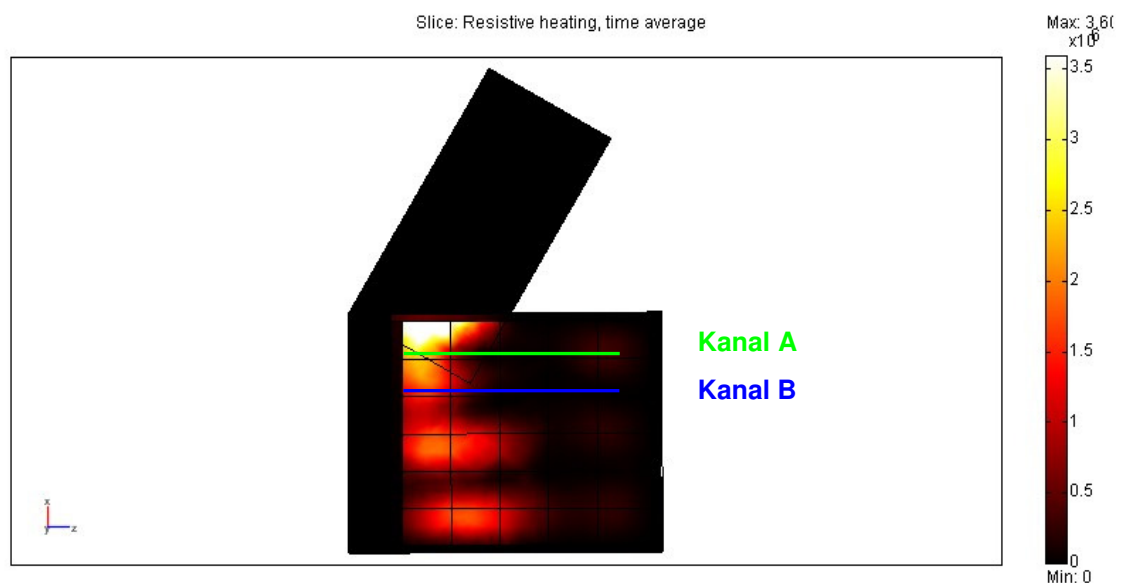
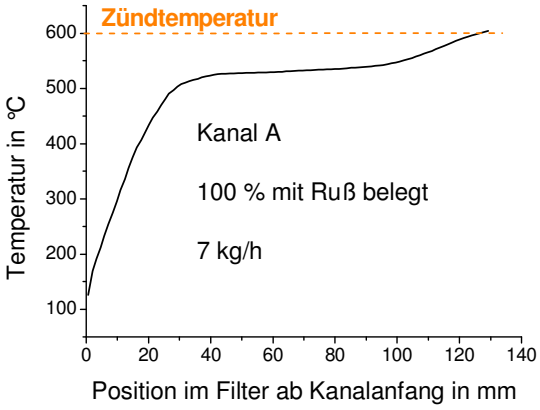
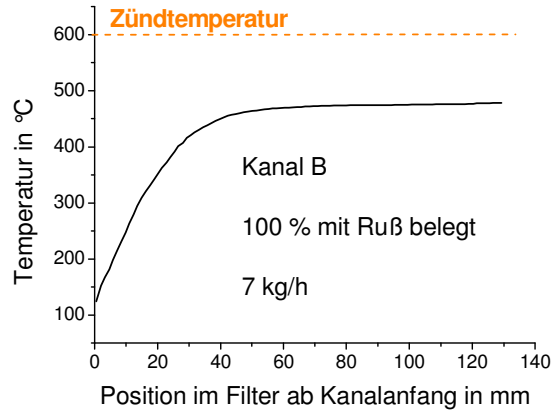
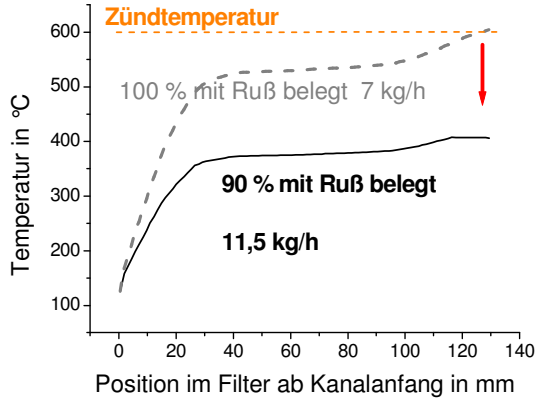
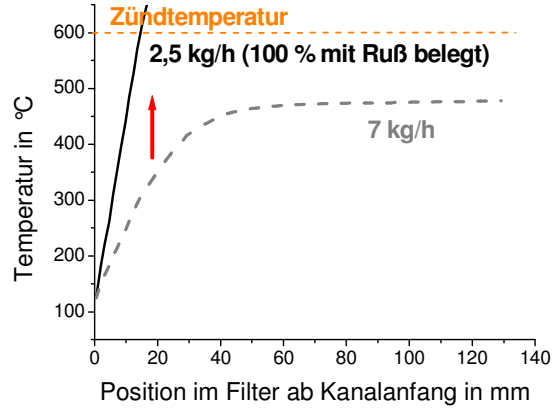


Abbildung 82: Filtermodell und Kanäle für die Regenerationsbetrachtung (Tabelle 9)

Tabelle 9: Schematische Darstellung des Regenerationsverlaufes

Kanal A	Kanal B
<p>Strömung durch Kanal A: 7 kg/h *) (geteilt durch Kanalanzahl 3140 = 2,23 g/h pro Kanal)</p>	<p>Strömung durch Kanal B: 7 kg/h *) (geteilt durch Kanalanzahl 3140 = 2,23 g/h pro Kanal)</p>
 <p>Kanal A 100 % mit Ruß belegt 7 kg/h</p> <p>Temperatur erreicht 600 °C</p> <p>Regeneration</p>	 <p>Kanal B 100 % mit Ruß belegt 7 kg/h</p> <p>Temperatur erreicht 550 °C</p> <p>Keine Regeneration</p>
<p>Annahme: Es werden 10 % des Kanales am Kanalende regeneriert.</p>	
<p>→ Strömung erhöht sich auf 11,5 kg/h *)</p>	
 <p>100 % mit Ruß belegt 7 kg/h</p> <p>90 % mit Ruß belegt 11,5 kg/h</p> <p>Angewachsene Strömung kühlt stärker, → Regeneration erlischt.</p>	 <p>2,5 kg/h (100 % mit Ruß belegt)</p> <p>7 kg/h</p> <p>Strömungsabnahme führt zur Temperaturerhöhung → Regeneration.</p>
<p>Andere Kanäle werden regeneriert, → Strömung reduziert sich, → Regeneration startet neu.</p>	<p>Strömung erhöht sich, → Regeneration erlischt.</p>

*) : Bezogen auf den equivalenten Massestrom durch einen Filter mit 2,5 l.

6.6.2 Überprüfung des Regenerationsverlaufes

Für die Betrachtung der Regeneration bedeutet dies, dass bei der Modellierung des Regenerationsverlaufes die Abbrandzonen des Filters nochmals in ihrer Länge unterteilt werden müssen. Nach der Regeneration des letzten Teilabschnittes eines Kanals (Kanalende) muss mit der Strömungsverteilungsrechnung die neue Durchströmung eines jeden Filterabschnittes ermittelt werden. Gleichzeitig ist die Mikrowellenfeld- und Wärmequellenverteilung für die einzelnen Kanalabschnitte neu zu ermitteln. Aus der jeweiligen neuen Wärmequellen- und Strömungsverteilung kann dann mit dem modifizierten Wärmebilanzmodell ermittelt werden, an welcher Stelle noch oder neu oder schon wieder eine Regeneration stattfindet. Danach ist der Vorgang zu wiederholen. In Abbildung 84 ist unter Miteinbeziehung der Mikrowellenfeldverteilung der modellierte Regenerationsfortschritt nach diesem Vorgehen dargestellt. Es zeigt sich, dass bei dieser Betrachtung die Regeneration des Filters nicht mehr von „oben nach unten“ sondern über die gesamte Kanalanzahl des Filters von hinten nach vorne fortschreitet bis die strömungsbedingten Wärmeverluste eine weitere Regeneration nicht mehr zulassen.

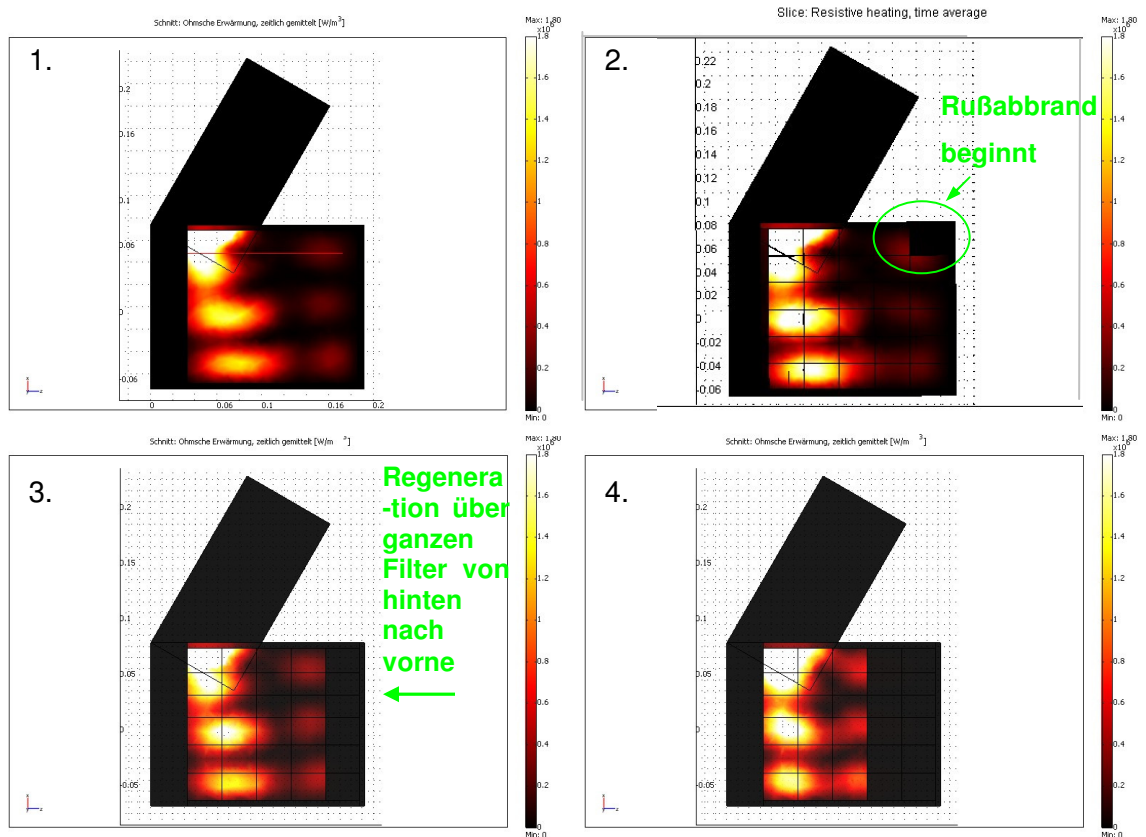


Abbildung 83: Neuberechneter Regenerationsverlauf unter Berücksichtigung einer sich ändernden Kanaldurchströmung

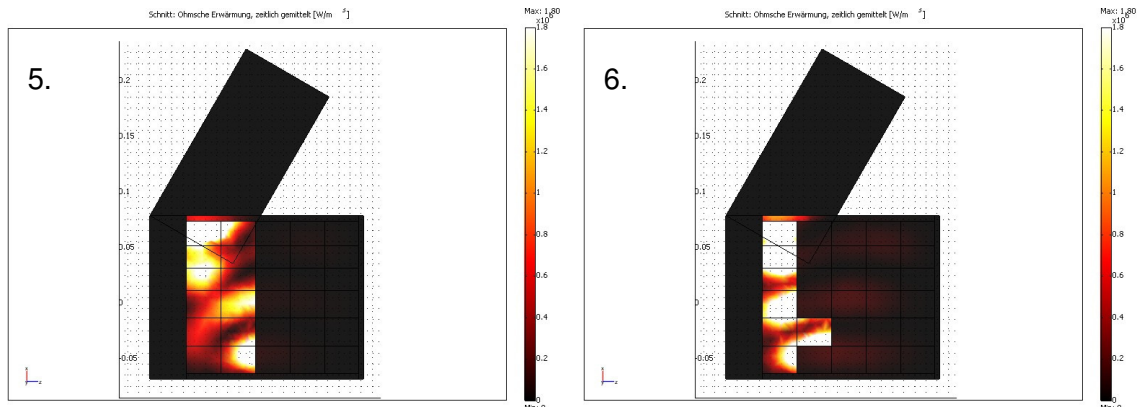


Abbildung 84: Neuberechneter Regenerationsverlauf unter Berücksichtigung einer sich ändernden Kanaldurchströmung

Damit konnte die Regeneration in ihren Grundprinzipien beschrieben und der Regenerationsverlauf in seinen Grundzügen dargestellt werden. Die Beschreibung wurde allerdings anhand einer relativ groben Unterteilung des Filters vorgenommen und stützt sich auf eine Wärmebilanzbetrachtung, in der die Zeitfaktoren naturgemäß keine Rolle spielen. Weiterhin sind die Verbrennungswärme der Rußregeneration sowie Wärmeleitungsvorgänge zwischen einzelnen Kanälen nicht berücksichtigt worden. Es ist anzunehmen, dass diese Faktoren den Einfluss der sich verstärkenden Strömung abschwächen, so dass am Ende vermutlich ein Mix der bisher beschriebenen Regenerationsverläufe auftreten wird. Für die exakte Darstellung der Regeneration müsste ein komplett neues Modell erstellt werden, welches den Regenerationsfortschritt zeitbasiert berechnet. Hierin müssten dann alle auf den Prozess wirkenden Einflüsse mitaufgenommen werden. Dazu gehören die rußabhängige Mikrowellenverteilung, Wärmetransport durch die filterdurchströmenden Abgase, die Strömungsveränderungen durch Temperatureinflüsse in der Erwärmungsphase sowie durch Druckverluständerungen bei beginnender Regeneration, die lokale Verzögerung der Erwärmung durch Wärmekapazität und Masse des Filters, Reaktionsenthalpie und temperaturabhängige Reaktionsgeschwindigkeit des Rußes. Dieses Modell wäre auch ein hilfreiches Werkzeug, um den Regenerationsverlauf zu optimieren. In dieser Arbeit steht jedoch die Entwicklung des Grundprinzips und der Nachweis der Anwendbarkeit im Vordergrund. Der Aufwand zur Erstellung dieses Modells und die Anforderungen an die Rechnertechnik sind immens und wesentlich höher als die Durchführung eines praktischen Versuches. Dessen Beweiskraft hinsichtlich der Durchführbarkeit der Mikrowellenregeneration ist überdies anerkannter.

Daher wurden die Modellrechnungen an dieser Stelle beendet und die weiteren Aktivitäten auf die Entwicklung und praktische Umsetzung des Regenerationsprinzips am Versuchsstand konzentriert.

7 Erstellung des Regenerationskonzeptes

Nach der theoretischen modellmäßigen Betrachtung der Mikrowellenregeneration war für die Erprobung und Überprüfung der Einsatztauglichkeit ein Regenerationskonzept für das Partikelfiltersystem zu erstellen.

Nachteilig an dem bisher diskutierten Abbrandverhalten während der Mikrowellenregeneration ist der Umstand, dass am Kanalbeginn stets ein nichtregenerierter Rußrest übrigbleibt. Dabei ist weniger ungünstig, dass nicht der komplette Ruß als solcher verbrannt wird. Vielmehr kritischer ist, dass der Ruß im Anfangsbereich des Kanals bestehen bleibt und damit die Gefahr besteht, dass sich die Rußkanäle zusetzen. Um dieses Risiko zu vermeiden, ist ein Umdenken des Regenerationsablaufes notwendig.

In Kap. 6 wurde diskutiert, dass aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Mikrowellenenergie ein Mehrwegemodul konzipiert werden muss und sich für ein 3-Wegemodul entschieden wurde. In diesem Sinne wurde auch die weitere Applikatorentwicklung betrieben.

Bei der Regeneration sollen zwei Module das Abgas reinigen, während in dem zu regenerierenden Filtermodul die Regeneration weitgehend unbeeinflusst vom Motorbetriebspunkt ablaufen kann. Um eine optimale Unabhängigkeit der Regeneration vom Motorbetriebspunkt zu realisieren, ist es am effektivsten, das entsprechende Modul komplett von der Abgasströmung abzukoppeln.

Die Berechnungen des Sauerstoffbedarfs haben gezeigt, dass Luft mit 20 % Sauerstoff am besten geeignet ist, die Verbrennung mit Sauerstoff zu versorgen.

Indem nur ein Abschlussmechanismus (auf / zu) sowie Luft als Regenerationsgas eingesetzt wird, wird die von der Automobilindustrie als schwierig zu realisierend betrachtete Aufgabe der Abgasmengenregelung umgangen.

Ein Ergebnis aus dem Wärmebilanzmodell war, dass die stärkste Wärmequellenkonzentration möglichst am Anfangsbereich des Rußkanals erzeugt werden soll. Im Kap. 5.1.5 wurde beschrieben, dass die Mikrowellen vor allem am Ende der rußbeladenen Kanäle besonders gut die Mikrowellen absorbieren und in Wärme umwandeln. Dieses und das oben beschriebene Risiko der Kanalverstopfung führte dazu, dass beschlossen wurde, die Regeneration entgegen der Beladungsrichtung durchzuführen. Das heißt, die Mikrowellen werden am Rußkanalende eingespeist und die zur Sauerstoffversorgung notwendige Luft entgegen der Abgasrichtung durch den Filter geführt. Da Ruß-, Keramik- und Lufttemperatur in dem Wärmebilanzmodell annähernd gleich sind, sind die bisherigen Betrachtungen weiterhin gültig, nur hat die

ursprüngliche Beladungsrichtung gewechselt. Abbildung 85 stellt den Regenerationsvorgang eines Filtermoduls schematisch dar.

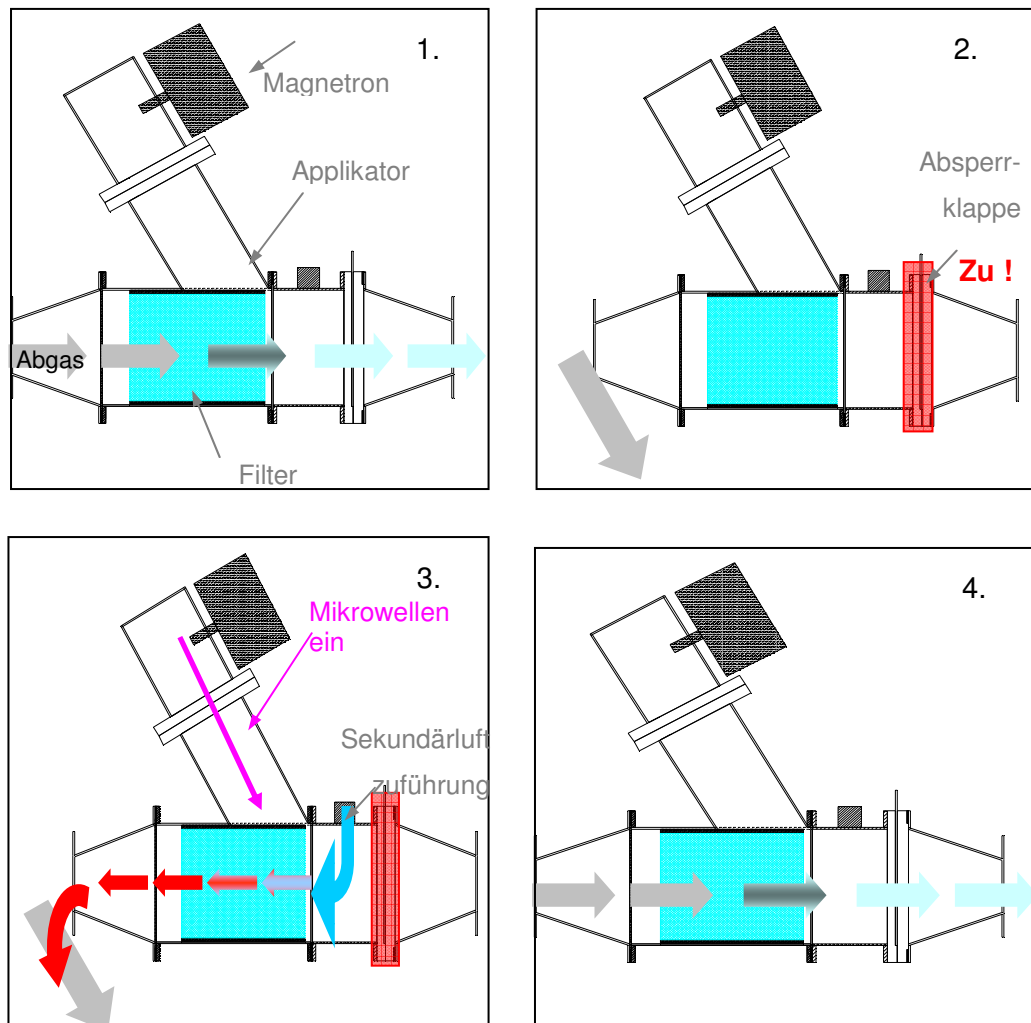


Abbildung 85: Regenerationsablauf

1. Das Abgas wird gefiltert.
2. Der Abgasstrom wird durch die Absperrklappe unterbrochen, das Abgas strömt durch die benachbarten Filtermodule.
3. Die Mikrowellen werden angeschaltet und Sekundärluft wird entgegen der ursprünglichen Abgasrichtung durch den Filter geleitet. Der Ruß zündet und der Filter wird regeneriert.
4. Nach der Regeneration wird die Absperrklappe wieder geöffnet, und der Filter übernimmt wieder die Filtration der Abgase.

Eine Darstellung des Gesamtmoduls und des Regenerationsablaufs ist in Abbildung 86 gezeigt. Die Regeneration des gesamten Filtersystems erfolgt dann Modul für Modul

nacheinander. Die warme Luft des Regenerationsvorganges wird mit dem Abgasstrom durch die verbleibenden, filternden Module geleitet. Ruß, welcher sich während der Gegenstrom-Regeneration ablöst, kann das System nicht verlassen, sondern wird wieder gefiltert. Es ist davon auszugehen, dass dieser sich bei der nächsten Regeneration in Form von Agglomerat aus Filterkuchenstücken besonders gut erwärmen und entzünden lässt. Durch einen Wärmetauscher nach der Abgasreinigung wäre es im Sinne der Energieeffizienz zudem vorstellbar, die Sekundärluft vor der Regeneration vorzuwärmen.

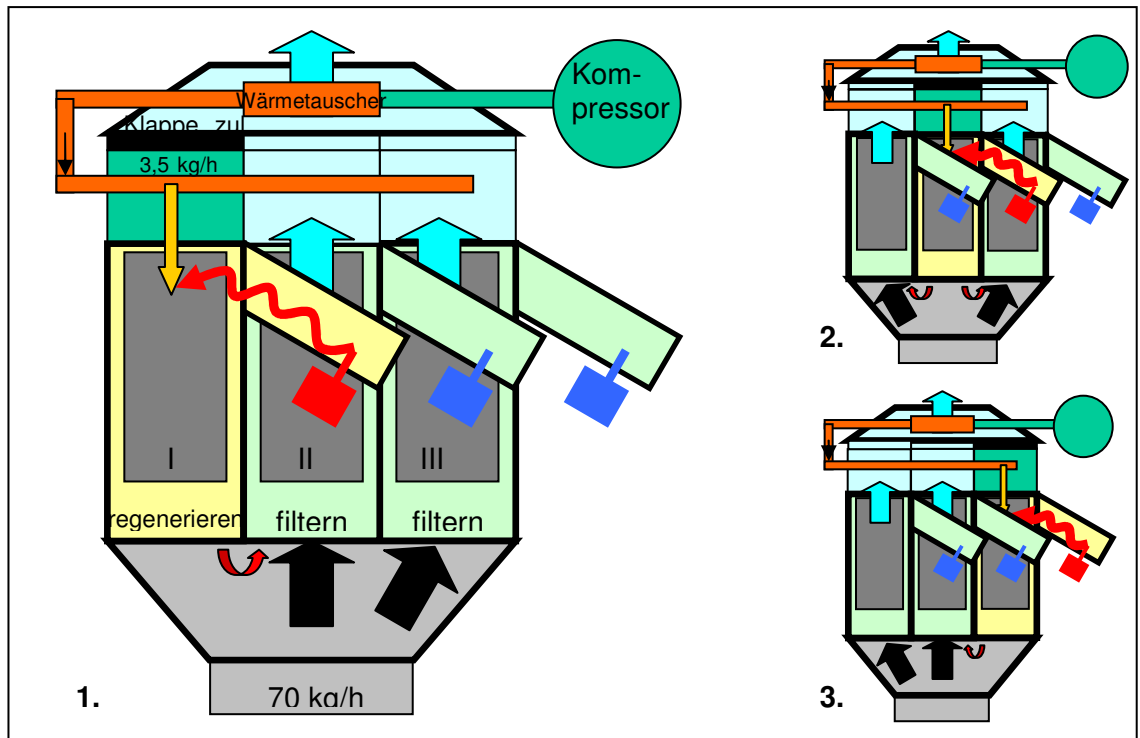


Abbildung 86: Regenerationsverlauf des Gesamtmoduls
(Einzelne Module werden nacheinander regeneriert.)

8 Erprobung des Konzeptes am Motorenversuchsstand

Das Regenerationskonzept und die neue Applikatorform sind an einem Motorenversuchsstand getestet worden. Hierzu wurde ein Applikator aus Edelstahl gefertigt (Abbildung 87). Um den Austritt von Mikrowellenstrahlung zu verhindern und das Abgas durch den Filter leiten zu können, war der Applikator an den Stirnseiten mit Lochblechen abgeschlossen. Der AZT-Filter, der vom IKGB gefertigt war, wurde mit einem Asglasil-Glasfaservlies eingebaut und abgedichtet. Die Mikrowellen wurden durch ein luftgekühltes 1 kW-Magnetron erzeugt. Da nur die volle Leistung eingesetzt werden sollte, wurde auf eine Leistungsregelung verzichtet. Als Absperrklappe wurde eine Lochblende entsprechend Abbildung 87 gebaut.

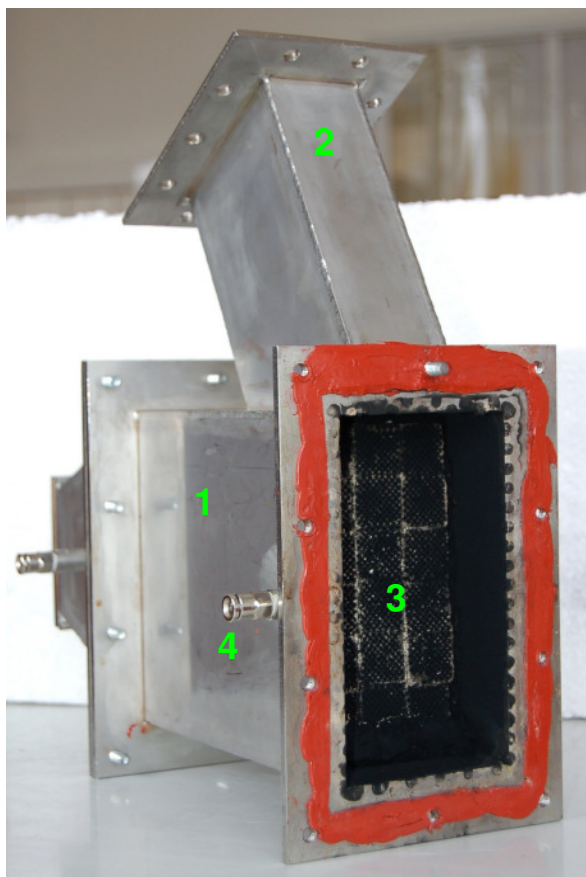


Abbildung 87: Mikrowellenapplikator

- | | | | |
|---|------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Applikatorgehäuse | 5 | Lochblech zur |
| 2 | Mikrowelleneinleitung | | Mikrowellenabschirmung |
| 3 | Filter (rußbeladen) | 6 | Absperrklappe |
| 4 | Anschluss Druckmessung | 7 | Regenerationsluftzuleitung |

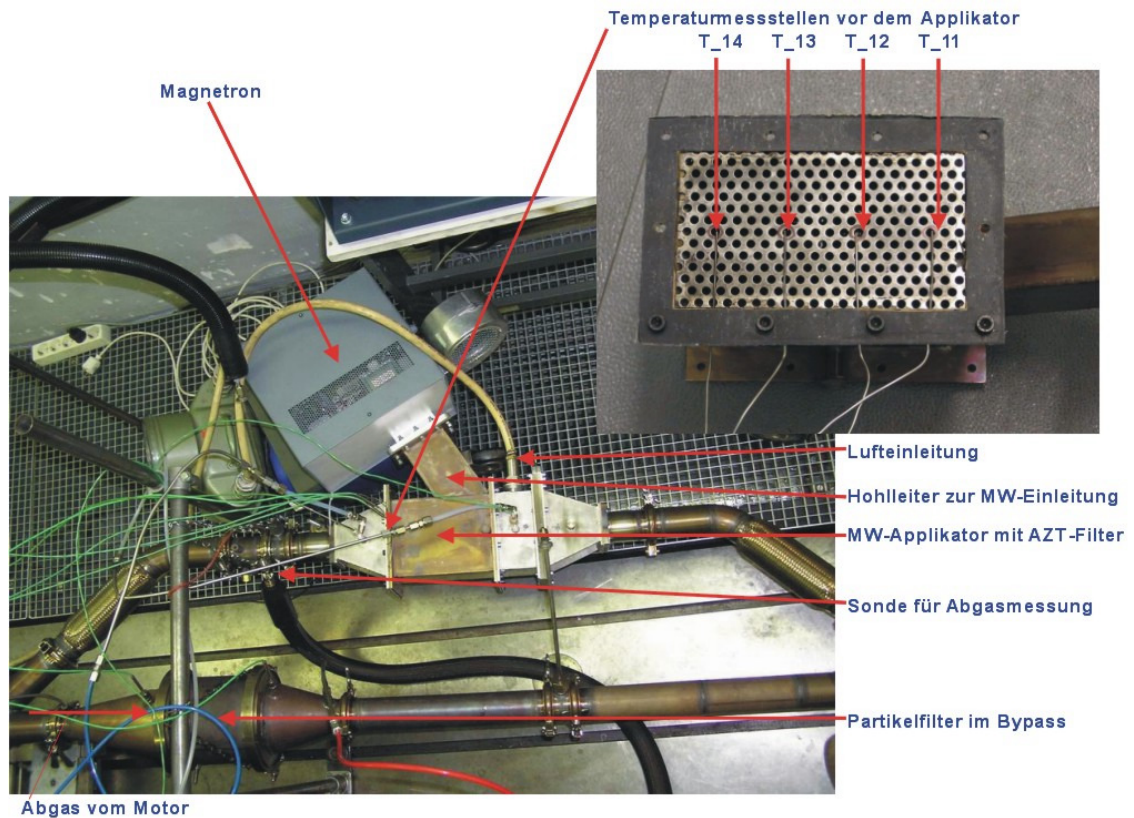


Abbildung 88: Versuchsanordnung zum Test des Regenerationsmoduls
[Sand 06]

Dieser Prototyp wurde in den Abgasstrang des Motorversuchsstandes am Forschungsinstitut für Fahrzeugbau eingebaut (Abbildung 88).

Vor dem Mikrowellenversuch wurde der Filter im Vollstrombetrieb beladen. Dann wurde, um die parallele Anordnung von 3 halben Filtervolumen darzustellen, parallel zu dem Mikrowellenfiltermodul ein Standardcordieritfilter an den Motorenversuchsstand montiert. Die Luftzuführung für die Regenerationsluft wurde mittels Druckluft realisiert und mit einem Druckminderer und Volumenstromzähler eingestellt.

Der Regenerationsversuch fand mit laufendem Motor statt, um möglichst realistische Versuchsbedingungen zu haben. Der Filter wurde vorher mit 11,8 g Ruß beladen, was einer Beladung von 8 g/l entspricht. Da der Filter nur das halbe Standardfiltervolumen besitzt, ist auch die im Bilanzmodell berechnete Luftmenge zu halbieren. Daher wurde der Luftmassenstrom auf 3,9 l/h eingestellt (3,5 l/h geplant). Es wurden die Temperaturen vor und nach dem Filter gemessen, ebenso der Druck. Die Temperaturmessstellen sind in ebenfalls in Abbildung 88 dargestellt. Weiterhin wurde die Abgaszusammensetzung in Regenerationsrichtung nach dem Filter gemessen. In Abbildung 89 ist der Versuchsverlauf dargestellt.

MW-Regenerationsversuch: neuer Applikator mit AZT-Monolith, verpackt mit Asglawo-Matte, Partikelbelastung 11,8 g (ca. 8 g/l), davon 7 g regeneriert, Luft (3,9 kg/h) von Abströmseite eingeleitet, Motor PSA DW12TE, Betriebspunkt $n = 1488$ 1/min, $M_d = 52,7$ Nm

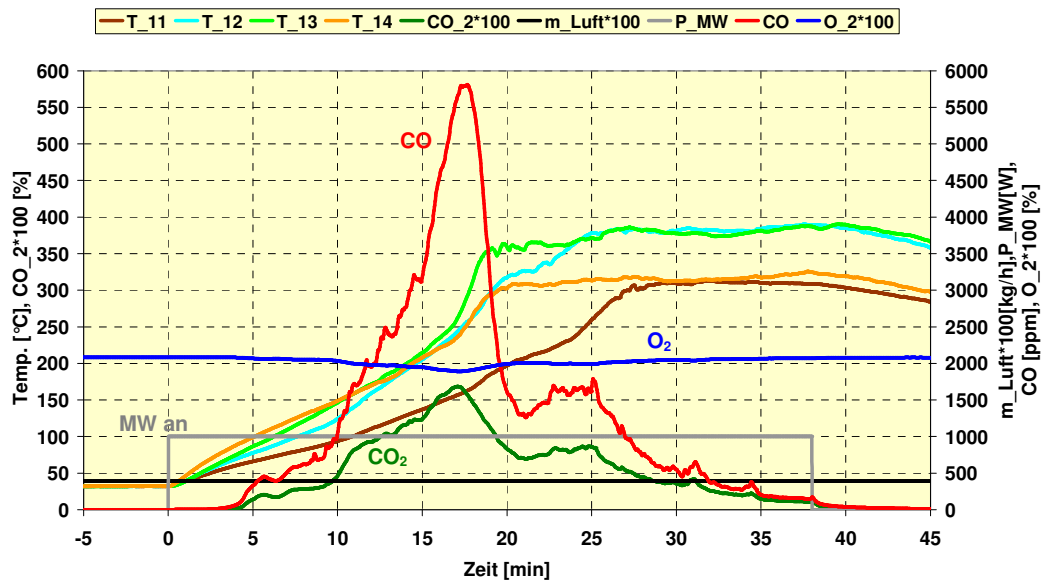


Abbildung 89: Temperatur und Emissionsmessungen bei der Regeneration

Sofort nach Einschalten der Mikrowelle steigt die Abgastemperatur in Regenerationsströmungsrichtung nach dem Filter an (T11 bis T14). Nach etwa 4 Minuten sind erste Oxidationsvorgänge anhand der steigenden CO- und CO₂-Konzentration im Abgas zu erkennen. Nach 10 Minuten steigt die CO- und CO₂-Konzentration dann stark an, die Regeneration setzt ein. Die gemessenen Abgastemperaturen haben zu diesem Zeitpunkt gerade 150 °C erreicht. Diese relativ niedrige Temperatur ist auf die langsame und schwache Strömung sowie die Trägheit des Systems aus Filter, Lochblech und Gehäuse zurückzuführen. Nach 18 Minuten erreicht die CO- und CO₂-Konzentration ihr Maximum und sinkt wieder. Es ist anzunehmen, dass wesentliche Teile des Filters regeneriert sind. Danach ist weiterhin eine Verbrennung wegen der immer noch hohen CO- und CO₂-Konzentration festzustellen, die dann nach ca. 25 Minuten langsam absinkt. Da der Volumenstrom nach einsetzender Regeneration konstant gehalten wurde, ist davon auszugehen, dass noch nicht vollständig regenerierte Kanäle zum Regenerationsende hin relativ schlecht mit Sauerstoff versorgt waren, sodass dort die Verbrennung nicht mehr ideal fortschreiten konnte. Diesbezüglich sind weitere Versuche und eine Optimierung des Regenerationsregimes noch notwendig. Die Temperaturmessung an den Stellen T11 bis T14 erreicht zum Regenerationsende hin eine Temperatur von 350 °C im inneren Bereich und 300 °C im äußeren Bereich des Filters. Die Unterschiede sind auf höhere

Wärmeverluste am Rand zurückzuführen. Trotzdem sind die niedrigen Temperaturen bemerkenswert, da eindeutig Ruß verbrannt, aber nicht die Zündtemperatur von 600 °C gemessen wurde. Die Temperatur bleibt nach Erreichen ihres Maximalwertes konstant, was auf das Übrigbleiben von Rußresten im Kanal Anfang zurückzuführen ist. Nach 30 Minuten war die Regeneration im Wesentlichen beendet und nach 38 Minuten wurden die Mikrowellen wieder ausgeschaltet.

Nach dem Versuch wurde der Filter ausgebaut und gewogen. Es war ein Masseverlust von 9 g festzustellen. Messungen des parallel geschalteten Filters ergaben eine Gewichtszunahme von 4 g, wovon 2 g den Motoremissionen zugeordnet werden können und 2 g Rußpartikeln aus dem Mikrowellenmodul. Damit sind von den 9 g Ruß 7 g thermisch regeneriert worden, und 2 g mechanisch bis zur nächsten Regeneration in die Nachbarmodule verlagert worden.

Insgesamt sind 75 % des Filters in etwa 30 Minuten regeneriert worden. Der Test des Filtermoduls kann damit positiv bewertet werden.

Hiermit sind die Versuche für diese Arbeit abgeschlossen. Der langsame Temperaturanstieg zu Regenerationsstart, der unerwartet träge Verlauf der Temperatur T1, die strömungstechnisch ungünstige Regenerationsluftzuleitung und das langsame Abklingen der Regeneration zum Ende lassen erwarten, dass noch weiteres Optimierungspotential vorhanden ist. Als konkrete Maßnahmen könnten eine Variationen der Luftzufuhr bei der Regeneration, Vorheizen des Filters mit hohen Abgastemperaturen, Erwärmen der Sekundärluft mit Wärmetauschern, Präparation des Filters mit unverbrannten Kohlenwasserstoffen durch einige Zyklen Nacheinspritzung oder gezieltes An- und Ausschalten der Mikrowelle genannt werden. Hierfür sind jedoch weitere Versuche am Motorenversuchsstand notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit ist jedoch das Ziel des Nachweises der Anwendbarkeit der Mikrowellenregeneration erreicht worden. Der gewählte Lösungsansatz, Verwendung einer mikrowellentransparenten Keramik, kann angewendet werden.

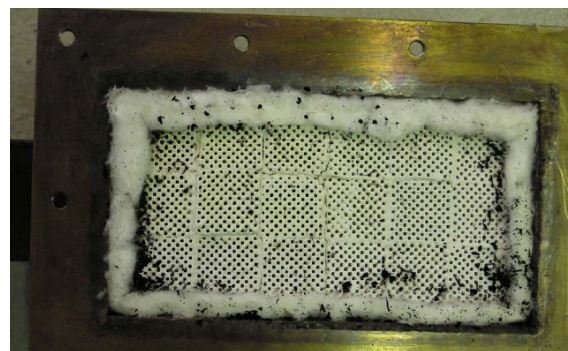
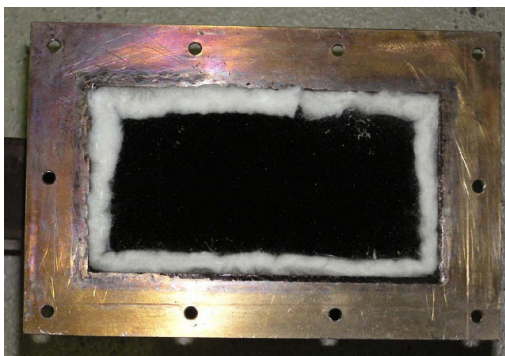


Abbildung 90: Filter vor und nach der Regeneration (Anströmseite)

9 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, die Anwendbarkeit von Mikrowellen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern im PKW-Bereich zu prüfen und im Rahmen dessen ein Mikrowellen-basiertes Regenerationsmodul zu entwickeln.

Hierbei wurde ein neuer Lösungsansatz verfolgt, der im Gegensatz zu früheren Ansätzen mit mikrowellenabsorbierenden Filterstrukturen auf der Anwendung einer mikrowellentransparenten Keramik basiert. Statt einer gleichmäßigen Erwärmung des Filters wurde eine selektive Erwärmung des Rußes mit einem Weiterwandern des Mikrowellenfeldes nach Rußabbrand angestrebt.

Durch eigene Vorversuche konnte gezeigt werden, dass bei mikrowellenabsorbierenden SiC-Filtern kein Unterschied hinsichtlich der Mikrowellenabsorption zwischen einem rußbeladenen und rußfreien Filter besteht. Damit wird die Mikrowellenfeldverteilung im Filter einzig durch das Filtermaterial bestimmt. Ganz gegenteilige Ergebnisse zeigte die Untersuchung von Cordierit, welcher im rußfreien Zustand (bei Raumtemperatur) keine Mikrowellen absorbierte, im rußbeladenen Zustand sich jedoch noch stärker erwärmte als der stark mikrowellenabsorbierende SiC-Filter.

Da der Mikrowellenenergieeintrag in das Filtersystem somit sowohl von der Mikrowellentransparenz der Keramik als auch von der Rußverteilung abhängt, wurden mit einem erweiterten Messaufbau die Mikrowellenabsorptionsmessungen in diese beiden Richtungen weiter vertieft. Hierzu wurde eine neue Versuchsanlage aufgebaut, mit der auch temperaturabhängige Mikrowellenabsorptionsmessungen durchgeführt werden konnten.

Die temperaturabhängige Messung des Cordierit zeigte, dass dieser nur bis zu einer Temperatur von 250 °C seine Mikrowellentransparenz beibehält und dann mit steigender Temperatur zunehmend die Mikrowellen absorbiert. Dies machte die Suche nach neuen möglichen Filterkeramiken notwendig, welche am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik an der TU Bergakademie Freiberg parallel zu dieser Arbeit entwickelt wurden. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene neue Keramikmischungen im Temperaturbereich von 20 bis 600 °C untersucht, wobei ein neuer Werkstoff mit außerordentlich guten Mikrowelleneigenschaften gefunden werden konnte. Der neue Werkstoff AZT, ein Aluminiumoxid-Werkstoff mit Anteilen von Titanoxid und Zirkonoxid, hat bis zu einem Temperaturbereich von 650 °C eine gleich bleibende geringe Dielektrizitätszahl und ist damit praktisch mikrowellentransparent.

Die Untersuchungen hinsichtlich der rußbedingten Mikrowellenabsorption im Filter zeigten, dass die rußbeladenen Filter am Ende eines Rußkanals eine erhöhte Mikrowellenabsorption aufweisen.

Der Mikrowellenapplikator, mit welchem der Lösungsansatz umgesetzt werden sollte, wurde unter Zuhilfenahme von FEM-Modellierungen entwickelt. Dabei war der Applikator so zu gestalten, dass sich die Mikrowellen auf kleine rußbeladene Bereiche konzentrieren und sich nach Rußabbrand auf neue Rußzonen umorientieren.

Voraussetzung für die Modellrechnungen war die Kenntnis der Dielektrizitätszahlen für die rußbeladenen Cordierit- und neu entwickelten AZT-Wabenkörper. Daher wurde eine Methodik entwickelt, mit der im Rahmen der Mikrowellenabsorptionsuntersuchungen und mit vergleichenden Modellrechnungen die notwendigen Stoffwerte ermittelt werden konnten.

Bei der Bewertung der Modellrechnungen wurde vor allem die Wärmequellenverteilung betrachtet. Berücksichtigend, dass durch den Filter während der Erwärmung kühlende Abgase strömen und eine Sauerstoffzufuhr erfolgen muss, wurde eine Wärmebilanz zwischen eingebrachter Mikrowellenleistung und abgeführter Abgasenthalpie für einen Filterkanal aufgestellt. Mit der Wärmebilanz kann die maximal erreichbare Rußtemperatur entlang des Kanals berechnet werden. Ein hervorzuhebendes Ergebnis dieser Bilanzierungsrechnungen war, dass sich in dem Kanalsystem des Filters die lokalen Temperaturen von hindurchströmendem Abgas, von Ruß und von Keramikmembran kaum unterscheiden. Die Kanaltemperatur steigt jedoch in Strömungsrichtung stetig an, was aber auch bedeutet, dass der Kanal Anfang besonders stark gekühlt wird und bis zum Erreichen der Zündtemperatur des Rußes ein Teilbereich des Kanals nicht regeneriert werden kann. Sowohl die FEM-Modellierungen als auch das Wärmebilanzmodell wurden durch Versuche validiert.

Mit Beginn der Optimierungsschritte für den optimalen Applikator wurde ein Standardmodell für einen zylindrischen Standardfilter definiert.

Leistungsbedarfsberechnungen zu dem genannten Applikator haben jedoch ergeben, dass bei einem maximalen Mikrowellenleistungseinsatz von 1 kW die Abgasströmung durch den Filter wesentlich kleiner sein muss, als sie im Betriebszustand des Motors ist. Eine Vollstromregeneration, wie von der Automobilindustrie bevorzugt, ist damit nicht möglich, so dass eine Mehrwegelösung umgesetzt werden muss. Um die lokale Mikrowellenkonzentration auf Teilbereiche des Filters noch zu verstärken wurden Modellrechnungen zur Mikrowellenfeldverteilung bei verschiedenen Einbauten in den Applikator durchgeführt. Untersucht wurden Einbauten wie Antenne, Konzentrator und Keil, wobei festgestellt wurde, dass das Mikrowellenfeld in seiner Form verändert, die Intensität der Wärmequellen jedoch nur geringfügig erhöht werden kann.

Modellrechnungen zum Abbrandverhalten des Standardapplikators zeigten, dass im Sinne einer fortlaufenden Regeneration die zylindrische Form ungeeignet ist, da das Mikrowellenfeld sich bei dieser Geometrie nicht wesentlich verändert.

Das Ziel der sich verschiebenden Mikrowellenverteilung konnte dagegen mit einem quaderförmigen Applikator mit AZT-Wabenkörpern umgesetzt werden. Dabei ist die Mikrowelleneinleitung schräg angeordnet, um ein optimales Abbrandverhalten zu erreichen. Durch die Halbierung des Standardfiltervolumens wurde die Mikrowellenkonzentration im Filter noch erhöht. Gesamtkonzeptionell wird ein Drei-Wege-Modul eingesetzt, bei dem jeweils zwei halbe Standardfiltervolumen filtern, während eines regeneriert wird.

Aus der Bilanz zwischen eingebrachter und abgeführter Energie ist unter Berücksichtigung des Sauerstoffbedarfs ein Luftmassenstrom von 4 kg/h ermittelt worden. Wegen des höheren Sauerstoffanteils wird Luft statt Abgas verwendet. Dadurch kann auch der Abgasstrom komplett von der Regeneration getrennt werden, wodurch das System vom Fahrzeugbetrieb unabhängig wird und auf den problematischen Einsatz einer mengenstromregulierenden Abgasklappe verzichtet werden kann.

Hervorzuheben ist die Regenerationsrichtung, die entgegen der Rußbeladungsrichtung ist. Hierdurch ist es einerseits möglich, die Mikrowellen in die besonders stark absorbierenden Rußbereiche des Filters einzukoppeln. Andererseits wird verhindert, dass sich die nicht regenerierbaren Kanalansfangsbereiche zusetzen.

Das modellierte Modul wurde gebaut und an einem Motorenprüfstand getestet. Bei dem Regenerationsversuch sind 75 % des Filters regeneriert worden (80 % maximal möglich). Etwa 80 % davon wurden thermisch regeneriert, während etwa 20 % mechanisch in das benachbarte Modul umverlagert wurden.

Grundsätzlich ist damit der praktische Einsatz im PKW möglich, jedoch stellt sich die Frage, ob dieses System sich gegen andere bestehende Systeme durchsetzen kann, da derzeit seitens der Automobilindustrie die Einwegesysteme den Mehrwegesystemen vorgezogen werden. Zwar sind die Probleme mit der Regelbarkeit der Abgasklappe gelöst, dafür sind aber mehr Komponenten wie eine Sekundärluftpumpe, ein größeres Gesamfiltervolumen, etc. notwendig, welche zu einem Ansteigen der Masse und des Platzbedarfs führen.

Denkbar jedoch wäre der Einsatz des untersuchten und entwickelten Regenerationssystems in stationären Anwendungen wie z.B. dieselbetriebenen Notstromaggregaten. Weiter denkbar wäre ein Einsatz des Systems als Nachrüstlösung für Baumaschinen und ältere Nutzfahrzeuge, da das System den Vorteil hat, dass für den Betrieb kein Motormanagement notwendig ist.

10 Ausblick

Nachdem entsprechend der Aufgabenstellung nachgewiesen werden konnte, dass die Regeneration von Partikelfiltern mit dem gewählten neuen Ansatz möglich ist, und eine Regenerationsstrategie entwickelt werden konnte, wäre nun als nächster Schritt das Regenerationsverfahren zu optimieren. Bisher konnten 75 % des Partikelfilters regeneriert und der Regenerationsverlauf in seinen Grundzügen dargestellt werden. Durch ein erweitertes rechnerisches Modell, welches den Filter global betrachtet und in dem alle die Verbrennung beeinflussenden Einflussgrößen erfasst werden, wird eine noch genauere Darstellung des Regenerationsverlaufes möglich sein, aus welcher dann weitere Optimierungsschritte abgeleitet werden können. Zu diesen Einflussgrößen würden neben den bisher schon betrachteten vor allem die Zeit, die Verbrennungsenthalpie des Rußes, die Abbrandgeschwindigkeit und die Wärmeleitung zwischen den einzelnen Kanälen gehören. Dieses Modell wäre mit einem „Multiphysics“-Programm zu erstellen und würde trotz des Entwicklungsstandes heutiger Rechner hohe Anforderungen an das System stellen. Der damit verbundene Aufwand erscheint aber lohnenswert, da zu erwarten ist, dass vor allem durch Maßnahmen am Regenerationsregime (z.B. Luftmengenregulierung während der Regeneration, Mikrowelleneinschaltdauer, etc) der Regenerationsgrad weiter verbessert werden kann. Parallel hierzu sind weitere Tests am Motorenversuchsstand unvermeidlich, wobei mit dem oben beschriebenen Modell diese an schon optimierten Einstellungen durchgeführt werden könnten, so dass sie in ihrer Anzahl gegenüber dem reinen experimentellen Vorgehen reduziert werden könnten. Angesichts einer Beladungszeit von ca. 8 h pro Filter würde dies sowohl Aufwand wie auch Kosten reduzieren.

Nachdem die bisherige Orientierung dieser Arbeit hauptsächlich auf den Einsatz im PKW-Bereich ausgerichtet war, dieser jedoch von der Automobilindustrie eher zurückhaltend in Erwägung gezogen wird, sind nun im Sinne einer Fortentwicklung und Anwendung der Mikrowellenregeneration neue und alternative Einsatzbereiche des Systems zu evaluieren und dann das Modul einsatzbezogen weiter zu entwickeln. Neben der Optimierung und Anpassung des Systems im Modell und Teststand sind frühzeitig erste Feldversuche im realen Betriebszustand bei dem jeweiligen Anwendungsfall durchzuführen. Als konkretes Ziel für einen Einsatz könnten stationäre Dieselmotoren oder die Entwicklung eines Nachrüst-dieselpartikelsystems für Nutzfahrzeuge ins Auge gefasst werden. Vor allem bei stationären Motoren erscheint die Anwendung der neuen Technologie interessant, da hier die Anforderungen

hinsichtlich einer Leistungsbegrenzung, des Einbauraums und der Variabilität des Motorbetriebspunktes nicht so hoch sind wie im mobilen Bereich.

Im Zuge dessen oder parallel hierzu könnte auch weiter auf die im Abschlussversuch beobachtete Rußverlagerung eingegangen werden. Hier bietet sich die Chance, ein weiteres neues Regenerationsprinzip zu entwickeln, welches eigenständig oder auf das bisherige aufbauend eingesetzt werden könnte. So wurde auch bei Laboruntersuchungen beiläufig festgestellt, dass aus Partikelfiltern, die mit Mikrowellen erwärmt und nicht vollständig regeneriert wurden, der Ruß als Stäbchen herausgeklopft werden konnte. In Aussicht steht die Möglichkeit, den Ruß mechanisch nur mit einmaliger Erwärmung des Filters ohne Wärmeverluste durch das Abgas zu regenerieren, woraus eine sehr energieeffiziente Regeneration resultieren würde.

Eine weitere Frage, die vorrangig die Mikrowellenthermoprozessestechnik betrifft und daher aufgrund der Schwerpunktsetzung auf die Regeneration nicht weiter verfolgt wurde, ist die, ob die stark veränderten Absorptionseigenschaften der rußbeladenen AZT-Filter im Vergleich zu den Cordieritfiltern mit der Keramik als solcher oder mit der unterschiedlichen Zelldichte zu beantworten ist. Der Einfluss der Struktur inhomogener Medien auf die Mikrowellenabsorptions- und Wellenleitungseigenschaften ist ein noch wenig untersuchter und noch zu klärender Bereich der Mikrowellentechnologie. Eine weitere Vertiefung in diese Richtung könnte neue Erkenntnisse und Anwendungsmöglichkeiten eröffnen, mindestens aber das allgemeine Verständnis für die Mikrowellenabsorption erweitern.

Im Sinne der Mikrowellenabsorptionsmessung wäre darüber hinaus zu diskutieren und festzustellen, ob nicht die Definition verbindlicher Mikrowellenabsorptionsklassen mit einem weltweit einheitlichen Bestimmungsverfahren möglich ist (z.B. Klasse 1 = sehr gut absorbierend, Klasse 2 = gut absorbierend, etc.). Schließlich ist für die Entwicklung neuer Mikrowellenapplikationen die grundsätzliche Kenntnis notwendig, inwiefern der zu verwendende Stoff Mikrowellen absorbiert. So stand auch in dieser Arbeit, wie in der einschlägigen Literatur, die Beschreibung der Mikrowellenabsorptionsmessungen an erster Stelle, wobei in der Literatur jeweils unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz kommen, welche sich nicht miteinander vergleichen lassen. Mit einer einheitlichen einfachen Messmethode für die Mikrowellenabsorption wäre es möglich, Ergebnisse auszutauschen, zu vergleichen und Anwendungen im Vorhinein schneller als geeignet oder ungeeignet abzuschätzen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Messverfahren würde sich dabei aufgrund seiner Einfachheit und des ausgereiften Standes der Technik der verwendeten Komponenten als Diskussionsgrundlage anbieten. Die aufwändige Messung der Dielektrizitätskonstanten könnten dann auf die

Anwendungsfälle beschränkt bleiben, in denen die Kenntnis der Konstanten für die Modellrechnung notwendig ist.

Hier steht die positive Entwicklung der Modellierungsprogramme in den letzten Jahren in krassem Gegensatz zum Fortschritt des Ausbaus an Messmöglichkeiten für die dafür benötigten Dielektrizitätszahlen. Deren Kenntnis im Verbund mit den heutigen Modellierungsmöglichkeiten könnte die Mikrowellenthermoprosesstechnik einen entscheidenden Schritt voranbringen. In diesem Sinne wäre es lohnenswert, auch das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren hinsichtlich einer schnelleren Anwendbarkeit fortzuentwickeln. Neben der Festlegung bestimmter Proben- und Applikatorgeometrien könnten Modellierungen der Feldverteilung bei variierenden Dielektrizitätszahlen durchgeführt werden. Thermographische Messungen müssten dann nur noch mit vorliegenden Graphiken aus der Modellierung verglichen werden. Damit wäre eine schnellere Bestimmung möglich. Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur dargestellten Methoden bietet das in dieser Arbeit dargestellte Vorgehen die Möglichkeit, auch Proben größeren Formats und ohne polierte Oberflächen zu bestimmen. So ist mit dieser Methode auch bei porösen oder strukturierten Werkstoffen, wie z. B. der in dieser Arbeit verwendete Partikelfilter, die Bestimmungsmöglichkeit der Dielektrizitätseigenschaften gegeben. Durch den Aufbau eines hybridbeheizten Applikators könnten darüber hinaus auch temperaturabhängige Dielektrizitätszahlmessungen durchgeführt werden.

11 Literatur

- [Absc 06] Schärfl, W., Strack, J., Sandig, R.:
Verwendung von Mikrowellen zur Dieselpartikelregeneration.
Bericht zum AiF- Vorhaben Nr.: 139 ZBR
- [Anez 06] Aneziris, C. G., Walter, G., Bach, E., Schärfl, W., Strack, J., Sandig, R.
Verwendung von Mikrowellen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern.
Vortrag, FVV-Informationstagung Motoren, Würzburg, 19. Sept. 2006
- [Anez 07] Aneziris, C.G.; .; Schärfl:
Thermal Shock Resistant Materials in the System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2$ for
Metallurgical Applications.
10th International Conference and Exhibition of the European Ceramic
Society, Berlin 2007
- [Asgl 04] Produktdatenblatt zum Werkstoff Asglasil,
Asglawo GmbH, Freiberg, 2004
- [Bach 02] Bach, E., Velji, A.:
Lehrbrief 3 – Gemischbildung, Zündung und Verbrennung im Dieselmotor.
HTW Dresden, Fachbereich: FIF, 2002
- [Bach 94] Bach, E., Zikoridse, G., Wieczorek, A.:
Partikelfilter mit additivgestützter Regeneration.
Kolloquium zum Umweltschutz, Berichte und Informationen aus Forschung,
Lehre und Praxis, HTW Dresden (FH), Heft 394, 2. Jahrgang 1994
- [Bach 98] Bach, E., Zikoridse, G.; Sandig, R.:
Combination of Different Regeneration Methods for Diesel Particulate
Traps.
SAE paper 980541, Detroit, Februar 1998
- [Binn 98] Binner, J. G. P., Fernie, J. A., Whitaker, P. A., Cross, T. E.:
The Effect of composition on the microwave bonding of alumina ceramics.
In: Journal of Materials Science. Vol 33, 199)
- [Bouc 01] Bouchez, M. et al.:
Strategies for the Control of Particulate Trap Regeneration.
SAE Technical Paper 2000-01-0472
- [Bury 04] Buryan, M.:
Entwicklung von Auslegeprinzipien für mikrowellen- und gasbeheizte
Hybrid-Sinteröfen.
Freiberg, TU Bergakademie, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und
Energietechnik, Dissertation 2004

- [Chan 00] Chan, T.V.C.T., Howard, C.:
 Understanding Mikrowave Heating Capaties.
 1. Auflage, Artech House, Norwood,
 ISBN 1-58053-094-X
- [Clar 21] Clark, D.E., Gac, F.D., Sutton, W.H., (Hrsg):
 Microwaves: Theory and Application in Materialprocessing.
 In: Ceramic Transactions Vol. 21
- [Davi 01] Davis, P. ; Epping, K.; Nixdorf, R. D.:
 Microwave-Regenerated Diesel Engine Exhaust Filter.
 OTT/DOE – Anzeige, 2001.
- [Dane 00] Daneke, N.:
 Zur Anlagentechnik von multimoden Mikrowellen Sinteranlagen – von der
 Wellenausbreitung im Hohlleiter bis zum erwärmten Gut–.
 Freiberg, TU Bergakademie, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und
 Energietechnik, Dissertation 2000
- [Dane 01] Daneke, N.; Krause, H.; Walter, G.; Zesch, U.; Wielage, B.:
 Estimation of Electrical Field Distribution in Microwave Applications.
 8th Int. Conf. On Microwave and High Frequency Heating, Bayreuth 2001
- [Dor 05] Dorenkamp, R.:
 Dieseltechnologien für zukünftige Emmissionserfüllung
 Vortrag zur 3. FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2005, Tagungsband S.15-29
- [Eben 03] Ebener, S., Kallenbach, J., Zink, U.:
 Keramische Dieselpartikelfilter Material – Design – Funktion,
 Vortrag zur FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2003, Tagungsband S. 43-53
- [Egg 06] Eggstein, O.:
 Sicherheitsaspekte zur Mikrowelle.
 Workshop: Angewandte Mikrowellen- und Plasmatechnologie,
 Pfinztal, Oktober 2006
- [Emme 06]Emmerich, R.:
 Physikalische Grundlagen der Mikrowellentechnik.
 Workshop: Angewandte Mikrowellen- und Plasmatechnologie,
 Pfinztal, Oktober 2006
- [Evan 96] Evans, N.G., Hamyln, M.G., Bowden, A.L.:
 Observation of microwave effects in sintering debased alumina.
 British Ceramic Transactions, Vol. 95, No 2., 1996

- [Fisc 06] Fischer, B.:
Technologies for the microwave sintering.
Tepelna tehnika v teoriji a praksi (Roznov p. Radhostem, Oktober 2006)
ISBN 80-86840-25-5 S.332-337
- [Fors 03] Forschungsantrag zum AiF Vorhaben ZRB 139
Freiberg/Dresden 2003
- [Gais 05] Gaiser, G., Rudelt, J., Damson, B., Huber, J.:
Eberspächer Active Exhaust Technology – funktionsintegrierte Motor
unabhängige Strategie für aktive Abgasnachbehandlung.
Vortrag zur 3. FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2005,
Tagungsband S.115-127
- [Görs 03] Görsmann, C. F., Walker, A. P.:
Katalytische Beschichtungen zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern.
Vortrag zur FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2003, Tagungsband S. 99-108
- [Heim 05] Heimlich, F., Maaß, J., Frambourg, M., Rölle, T., Behnk, K.:
Externe Nacheinspritzung zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern.
MTZ 5 / 2004
- [Herr-01] Herrmann, H.-O. et.al.:
Partikelfiltersysteme für Diesel-Pkw.
MTZ 9 (2001) Jg. 62, S.652 ff
- [Houb 90] Houben, M., Lepperhoff, G.:
Untersuchung zur Rußbildung während der dieselmotorischen
Verbrennung.
MTZ 51, 7/8, 1990
- [Imen 05] Imenochojev, I.:
persönliche Mitteilung im Februar 2005
- [Kons 05] Konstandopoulos, A. G., Kladopoulou, E.:
The Optimum Cell Density for Wall-Flow Monolithic Filters: Effects of Filter
Permeability, Soot Cake Structure and Ash Loading.
SAE Technical Paper Series 2004-01-1133
- [Krau 04] Buryan, M., Krause, H., Walter, G.:
Anlagentechnische Aspekte zur Überführung von Mikrowellen-Hybrid-
Sinteraggregaten aus dem Labor- in den Industriemaßstab.
Gaswärme International (53), Nr.7/2004
- [Kumm 89] Kummer, M.,:
Grundlagen der Mikrowellentechnik.
Verl. Technik, Berlin, 1989 ISBN 3-341-00687-7

- [Ma 97] Ma, J., Fang, M., Li, P., Zhu, B., Lu, X., Lau, N. T.:
Microwave-assisted catalytic combustion of diesel soot.
In Applied Catalysis A: General 159, 1997, S. 211 - 228
- [Mehr 99] Mehringer, P., Müller, G. A., Bartusch, W.:
Mikrowellensintern: vom Labor zum Industriellen Maßstab.
cfi/Ber DKG 76, No. 5, 1999
- [Mere 98] Meredith, R.:
Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating.
The Institution of Electrical Engineers. Exeter: Short Run Press Ltd., 1998,
ISBN 0-85296-916-3
- [Meta 83] Metaxas, A.C.; Meredith, R.J.:
Industrial Microwave Heating.
Peter Perigrinus, London, 1983
- [Metz 04] Metz, N.:
Dieselpartikelemission – ihr Beitrag zur Luftqualität und ihre Wirkung.
Vortrag zur 2. FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2004, Tagungsband S.5-32
- [Mühl 92] Mühlbauer, A. (Hrsg.):
Industrielle Elektrowärmetechnik.
Essen: Vulkan-Verlag, 1992 – ISBN 3-8027-2903-X
- [Nas 03] Naschke, W., Zikoridse, G., Blanchard, G., Seguelong, T., Hofmann, U.:
Verbesserte Kraftstoffadditive – von der F&E zu Serienreife.
Vortrag zur FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2003, Tagungsband S.30-41
- [Nikl 92] Niklas, F., Pohl, V.:
Mikrowellenerwärmung – Grundlagen und Anlagenauslegung.
In: Industrielle Elektrowärmetechnik. 1. Auflage Essen: Vulkan-Verlag,
1992, ISBN 3-8027-2903-X
- [Ning 95] Ning Zhi, et al.:
Analysis of Characteristic of Microwave Regeneration for Diesel Particulate
Filter.
SAE Technical Paper 952058, September 1995
- [Nixd 01] Nixdorf, Richard Dick ; Green, Johny B. Jr. ; Story, John M. ; Wagner,
Robert M.:
Microwave-Regenerated Diesel Exhaust Particulate Filter.
SAE Technical Paper Series 2001-01-0903

- [Nixd 02] Nixdorf, R. D. ; Garland, N.; Epping, K.; Stinton, D. P.:
Materials Improvements and Durability Testing of a Third-Generation
Microwave-Regenerated Diesel Particulate Filter.
In: FY 2002 Progress Report for Automotive Propulsion Materials Program.
Progress Report (Washington, DC 2002) : Verl. U.S. Department of Energy,
2002, Tagungsbericht, S. 79 – 83
- [Omei 03] Omeis, J., Harpenscheid, M., Schuylenburg, V.:
Motorenöle im Zielkonflikt zwischen motorischer Performance und geringer
Kontamination von Abgasnachbehandlungssystemen.
Vortrag zur FAD-Konferenz, Dresden, Nov. 2003, Tagungsband S.109-120
- [PAK 04] Empfehlung des „Projektbegleitender Arbeitskreis“
des ZUTECH-Projektes ZRB 139 Mikrowellenregeneration DPF,
Frankfurt, September 2004
- [PAK 04b] Präsentation zur Sitzung des „Projektbegleitender Arbeitskreis“
des ZUTECH-Projektes ZRB 139 Mikrowellenregeneration DPF,
Frankfurt, September 2004
- [PAK 05] Empfehlung des „Projektbegleitender Arbeitskreis“
des ZUTECH-Projektes ZRB 139 Mikrowellenregeneration DPF,
Frankfurt, 16. Februar 2006
- [Pat 05] Thermoschock- und korrosionsbeständiger Keramikwerkstoff auf der Basis
eines zirkondioxidfreien feuerfesten Oxides und Verfahren zu seiner
Herstellung.
Patentanmeldung: DE 10 2005 036 394 A1
- [Pat 06] Verfahren und Vorrichtung zum Regenerieren von durchströmten
Partikelfiltern.
Patentanmeldung DE 102006041284.2
- [Paul 04] Pauli, P.:
Elektromagnetische Grundlagen und EMVU-Aspekte.
Tagungsband Otti-Profiforum Mikrowellenthermoprozesstechnik,
Würzburg, Nov. 2004
- [Pesc 79] Peschl, H.:
HF-Leitung als Übertragungsglied und Bauteil.
München, Huethig und Pflaum, 1979
- [Pohl 95] Pohl, V.:
Messung von temperaturabhängigen komplexen Permittivitäten im
Mikrowellenbereich.
Universität Hannover, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation 1995

- [Rank 06] Rank, J., Reichmann, M.:
Microwave assisted Binder Burnout.
Poster zur Ceramitec, München, 2006
- [Remb 03] Rembor, H.-J.:
Grundwissen zu Heißgasfiltern für Feinstpartikel,
Seminar: "Minimierung der Partikelemissionen von Verbrennungsmotoren",
Haus der Technik, München, 2003
- [Rieh 05] Riehl, I.:
Persönliche Mitteilung
Februar 2005
- [Roba 06] Robak, L.:
Mikrowellenunterstützte Wärme- und Stoffübertragung beim Trocknen und
Entbindern Technischer Keramik.
Freiberg, TU Bergakademie, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und
Energietechnik, Dissertation 2006
- [Sand 04] Sandig, R.:
Persönliche Mitteilung,
September 2004
- [Sand 05] Sandig, R.:
Persönliche Mitteilung,
März 2005
- [Sand 06] Sandig, R.:
Persönliche Mitteilung,
Mai 2006
- [Schä 04] Schärfl, W.:
Persönliche Mitteilung,
Juli 2004
- [Schä 05] Schärfl, W.:
Persönliche Mitteilung,
Juli 2005
- [Schä 05b] Schärfl, W.:
Verifizierung und Charakterisierung von keramischen Werkstoffen für
Dieselrußpartikelfilter.
Freiberg, TU Bergakademie, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und
Energietechnik, Diplomarbeit 2005

- [Schä 05] Schärfl, W.; J. Aneziris, C.G.:
Design and Development of porous ceramics for diesel particulate filtration.
48. Internationales Feuerfest-Kolloquium, Aachen, 2005
- [Schä 06] Schärfl, W.:
Persönliche Mitteilung,
April 2006
- [Schi 99] Schilm, J.:
Untersuchung zur Temperaturmessung beim Mikrowellensintern von
Keramiken.
Freiberg, TU Bergakademie, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und
Energietechnik, Diplomarbeit 1999
- [Sieg 99] Siegmann, K., Siegmann, H.C.:
Die Entstehung von Kohlenstoffpartikeln bei der Verbrennung organischer
Treibstoffe.
Seminar: Feinstpartikelemissionen von Verbrennungsmotoren,
Haus der Technik, München, Okt. 1999
- [STea 04] Bilik, V.:
Homer, Hot Measurement & Autotuning System
S-Team lab, SK-84002 Bratislava 42, Nov. 2004
- [Stra 05a] Strack, J., Imenochojew, I.:
New attempt at the microwave regeneration of soot filter by use of
microwave transparent ceramics.
Energy Transformations in Industry, 9th International Scientific Conference,
Stara Lesná, 2005
- [Stra 05b] Strack, J., Fischer, B., Walter, G.:
Modellierung anwendungsspezifischer Mikrowellenapplikatoren
Poster zur Ceramitec, München, 2005
- [Stra 06] Strack, J., Walter, G.:
Modellierung der Wärmequellenverteilung im Mikrowellenfeld am Beispiel
eines Dieselrußfilters.
VDI/GVC-Fachausschuss-Sitzung Hochtemperaturtechnik, Würzburg, 2006
- [Sure 95] Suresh Babu, V., Faraninash, L., Seehra, M.,S.:
Carbon in diesel particulate matter: Structure, microwave absorption, and
oxidation.
J. Materials Research, Vol. 10, No. 5, May 1995

- [UBA 03] Umweltbundesamt:
Future Diesel, Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw -
Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen
Berlin, Juli 2003
- [VDA 03] Verband der Automobilindustrie:
Auto Jahresbericht 2003, S. 47,
Frankfurt, Juli 2003
- [VDA 05a] Verband der Automobilindustrie:
Auto Jahresbericht 2005, S. 137,
Frankfurt, Juli 2005
- [VDA 05b] Verband der Automobilindustrie:
Auto Jahresbericht 2005, S. 141,
Frankfurt, Juli 2005
- [Wagn 05] Wagner, U., Velji, A., Spicher, U.:
Entwicklung und Erprobung eines DPF-Systems zur elektrischen
Regenerationseinleitung.
Vortrag zur 3. FAD-Konferenz, Dresden, Nov. 2005,
Tagungsband S.101-113
- [Walt 95] Walter, G.:
Wärmetechnische Berechnungen,
Manuskript zur Lehrveranstaltung, IOW 620.1,
TU Bergakademie Freiberg
- [Walt 02] Walter, G.:
Grundlagen zur Mikrowellen-Thermoprozesstechnik.
Tagungsband Otti-Profiforum Mikrowellenthermoprozesstechnik,
Regensburg, Nov. 2002
- [Walt 04] Walter, G.:
Mikrowellen-Thermoprozesstechnik – Grundlagen –.
Tagungsband Otti-Profiforum Mikrowellenthermoprozesstechnik, S. 3-23,
Würzburg, Nov. 2004
- [Walt 90] Walton, F.B., Hayward, P.J., Wren, D.J.:
Controlled Energy Deposition in Diesel Partikulate Filters During
Regeneration by Means of Microwave Irradiation.
SAE 900327

- [Wenn 05] Wenninger, G.:
Persönliche Mitteilung im Rahmen der PAK-Sitzung,
Frankfurt, 13. September 2005
- [Will 98] Willert-Porada, M. (Hrsg.):
Mikrowelleneinsatz in den Materialwissenschaften der chemischen
Verfahrenstechnik und in der Festkörperchemie.
Aachen: Shaker, 1998 – ISBN 3-8265-3548-0
- [Zhan 05] Zhang-Steenwinkel, Y., et al.:
Microwave-assisted regeneration of a perovskite coated ceramic monolith
soot-trap.
Chemical Engineering Science 60, 2005, S. 797 – 804
- [Zhan 04] Zhang-Steenwinkel, Y., van der Zande, L.M., Castricum, H.L., Blik, A., van
den Brink, R.W., Elzinga, G.D.:
Microwave-assisted regeneration of a perovskite coated ceramic monolith
soot-trap.
Topics in Catalysis Vols. 30/31, Juli 2004
- [Ziko 03] Zikoridse, G., Bach, E., Sandig, R.:
Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren – Konzepte und Strategien.
Vortrag zur FAD-Konferenz, Dresden, Nov 2003, Tagungsband S. 86-97

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

MW	Mikrowellen
Temp.	Temperatur
ϵ	Dielektrizitätskonstante
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante
ϵ_0	elektrische Feldkonstante ($8,854188 \cdot 10^{-12} \text{ A s / (V m)}$)
ϵ_r'	Realteil der relativen Dielektrizitätskonstante
ϵ_r''	Imaginärteil der relativen Dielektrizitätskonstante
$\tan \delta$	Tangens des Verlustwinkels
f	Frequenz
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit
c_0	Lichtgeschwindigkeit
μ_r	relative Permeabilität
λ_ϵ	Wellenlänge im Material
λ_0	Wellenlänge im Vakuum
λ_g	Grenzwellenlänge
β	Ausbreitungskonstante
Z_g	Impedanz
E	elektrische Feldstärke
ET	Eindringtiefe
P_{abs}	absorbierte Leistung
P_{MW}	Mikrowellenleistung
P_{ein}	einfallende Mikrowellenleistung
M	Masse
c_p	spez. Wärmekapazität
dT/dt	Aufheizrate
PM	Partikelmasse
Md	Drehmoment
n	Drehzahl
T_{AbgvF}	Temperatur des Abgases vor dem Filter
T_{AbgnF}	Temperatur des Abgases nach dem Filter
T_{abgimF1}	Temperatur des Abgases an Messstelle 1
$T_{\text{Ruß,max}}$	maximale Rußtemperatur

AZT	neuer Werkstoff (Tabelle 2)
MHZ	neuer Werkstoff (Tabelle 2)
MZT	neuer Werkstoff (Tabelle 2)
MZ	neuer Werkstoff (Tabelle 2)
MTET	neuer Werkstoff (Tabelle 2)
MZTT	neuer Werkstoff (Tabelle 2)

Wärmebilanzmodell:

Index R:	Ruß
Index K:	Keramik
Index 1:	Zone 1
Index 2:	Zone 2
S:	Schichtdicke
B	Kanalbreite
V	Volumenstrom
h	Enthalpie
α	konv. Wärmeübergangskoeffizient
λ	Wärmeleitungskoeffizient
T	Temperatur

IWTT	Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, TU Bergakademie
IKGB	Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, TU Bergakademie
FIF	Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, HTW Dresden

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Motorische Maßnahmen zur Emissionsreduzierung	7
Abbildung 2:	Entstehung von Primärpartikeln, REM-Aufnahme von Ruß	8
Abbildung 3:	Prinzip des Wabenfilters	9
Abbildung 4:	a) Wabenkörper mit Ruß b) REM-Aufnahme eines Cordieritfilters	10
Abbildung 5:	Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Wellen	14
Abbildung 6:	Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Stoffen.....	15
Abbildung 7:	Dielektrische Verluste in Abhängigkeit der Frequenz	15
Abbildung 8:	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl von Aluminiumoxid ...	18
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Entstehung von MW-Feldern, Thermopapieraufnahme der Feldverteilung	19
Abbildung 10:	Feldverteilung in einem beladenen und unbeladenen Applikator	20
Abbildung 11:	6 kW Mikrowellenofen und Messanordnung	25
Abbildung 12:	Auswertung des Absorptionsmessverfahrens.....	26
Abbildung 13:	Absorbierte Mikrowellenleistung bekannter Filtermaterialien	27
Abbildung 14:	Schema der monomodalen Versuchsanlage	28
Abbildung 15:	Mikrowellen-Feldverteilung im Hohlleiterapplikator	28
Abbildung 16:	MW-Feldverteilung im Hohlleiter ohne und mit Beladung.....	29
Abbildung 17:	Vorgehen bei der temperaturabhängigen Absorptionsmessung mikrowellentransparenter Stoffe	30
Abbildung 18:	Keramikprobe und Wärmedämmung des Versuchsaufbaus	30
Abbildung 19:	Temperaturabhängige MW-Absorption verschiedener Keramiken	31
Abbildung 20:	Temperaturabhängige MW-Absorption eines rußbeladenen Cordieritfilters	32
Abbildung 21:	Mikrowellenabsorption von Wärmedämmstoffen	33
Abbildung 22:	Rußemission in Abhängigkeit vom Betriebspunkt	34
Abbildung 23:	Probenahme aus einem Rußfilter	35
Abbildung 24:	Messung der ortsbezogenen Rußabsorption	36
Abbildung 25:	Ortsverteilung der Absorption in % bezogen auf den Anfang des Kanals	36
Abbildung 26:	Wabenkörper aus dem neuen Werkstoff AZT	37
Abbildung 27:	Temperaturabhängige Absorptionsmessungen rußbeladener AZT- und Cordieritproben.....	38
Abbildung 28:	Messaufbau zum Vergleich Cordierit und AZT.....	39
Abbildung 29:	Wellenausbreitung im rußbeladenen Cordierit und AZT	39
Abbildung 30:	Proben für die Resonanzmessung.....	41
Abbildung 31:	Messanordnung für die Resonanzmessung.....	41
Abbildung 32:	ϵ' ermittelt durch das Resonanzverfahren.....	42
Abbildung 33:	ϵ'' ermittelt durch das Resonanzverfahren	42

Abbildung 34:	Messaufbau zur Dielektrizitätszahlmessung	43
Abbildung 35:	Thermokameraaufnahme zur Ermittlung von ϵ' und ϵ''	44
Abbildung 36:	Erwärmung bei 300 W nach 60 s in Abhängigkeit der Rußbeladung .	45
Abbildung 37:	Wärmequellenverteilung ab Filteranfang	46
Abbildung 38:	Position des 1. Maximums in Abhängigkeit von ϵ'	46
Abbildung 39:	Vergleich von Messung und Modellierung	47
Abbildung 40:	Einfluss der Rußbeladung auf ϵ'	48
Abbildung 41:	Einfluss der Rußbeladung auf ϵ''	48
Abbildung 42:	a) geometrische Modellbeschreibung b) Feldverteilung.....	50
Abbildung 43:	Elektrische Feldverteilung im Hohlleiter	51
Abbildung 44:	Randbedingungen und Gebietseigenschaften	53
Abbildung 45:	Validierung der Modellierungen:	54
Abbildung 46:	Bewertungsschema für die Optimierungsrechnungen.....	55
Abbildung 47:	Druckverteilung entlang eines Kanals.....	56
Abbildung 48:	Strömungslinien entlang eines Kanals.....	56
Abbildung 49:	Temperaturverteilung entlang eines Kanals.....	56
Abbildung 50:	Bilanzierungsbereich des Wärmebilanzmodells	58
Abbildung 51:	Stoff- und Energietransport in einem Segment	58
Abbildung 52:	Wärmequellen- und Temperaturverteilung entlang eines Kanals	59
Abbildung 53:	Versuchsaufbau zur Validierung, Temperaturmessstellen	60
Abbildung 54:	Validierungsversuch	61
Abbildung 55:	Rußtemperatur bei verschiedenem Abgasmassenstrom	62
Abbildung 56:	Kanaltemperatur in Abhängigkeit der Leistung	63
Abbildung 57:	Variation der Applikatorgeometrie.....	66
Abbildung 58:	Feldverteilung bei Änderung der Applikatorabmaße	67
Abbildung 59:	Antennen zur Feldkonzentration 1	68
Abbildung 60:	Antennen zur Feldkonzentration 2	69
Abbildung 61:	Antennen zur Feldkonzentration 3	69
Abbildung 62:	Feldkonzentration durch einen Konzentrador	70
Abbildung 63:	Feldkonzentration durch einen Keil.....	70
Abbildung 64:	Halbierung des Filtervolumens	71
Abbildung 65:	Feldkonzentration durch Volumenverkleinerung	72
Abbildung 66:	Schlechtes Abbrandverhalten des Standardapplikators.....	72
Abbildung 67:	Einfluss der Filterkeramik auf die Felddausbreitung a) rußbeladener Cordieritfilter, b) rußbeladener AZT-Filter	73
Abbildung 68:	Neue Filter- bzw. Applikatorformen.....	74
Abbildung 69:	Verwendeter AZT-Filter	75

Abbildung 70: Neuer Applikator mit senkrechter Mikrowelleneinleitung und AZT-Filter	76
Abbildung 71: Rußzündung im Kanal	77
Abbildung 72: Änderung der Wärmequellenverteilung bei Rußabbrand	77
Abbildung 73: Endmodell für die MW-Regeneration von AZT-Filtern.....	78
Abbildung 74: Verschiebung der Wärmequellen bei fortlaufender Regeneration	78
Abbildung 75: Abbrandverhalten des Filters (ohne Sauerstoffbedarfs).....	79
Abbildung 76: Wärmebilanz des neuen Applikators	80
Abbildung 77: Temperaturentwicklung bei verschiedenen Abgasmasseströmen.....	81
Abbildung 78: Zündpunkt in Abhängigkeit vom Abgasmassestrom	81
Abbildung 79: "O ₂ -Bedarfszeit" in Abhängigkeit des Massestroms	82
Abbildung 80: Zündpunktverschiebung und Regenerationszeit	83
Abbildung 81: Druckverlust von Keramikmembran und Rußbeladung.....	84
Abbildung 82: Filtermodell und Kanäle für die Regenerationsbetrachtung in Tabelle 9	86
Abbildung 83: Neuberechneter Regenerationsverlauf unter Berücksichtigung einer sich ändernden Kanaldurchströmung	88
Abbildung 84: Neuberechneter Regenerationsverlauf unter Berücksichtigung einer sich ändernden Kanaldurchströmung	89
Abbildung 85: Regenerationsablauf	91
Abbildung 86: Regenerationsverlauf des Gesamtmoduls	92
Abbildung 87: Mikrowellenapplikator	93
Abbildung 88: Versuchsanordnung zum Test des Regenerationsmoduls.....	94
Abbildung 89: Temperatur und Emissionsmessungen bei der Regeneration.....	95
Abbildung 90: Filter vor und nach der Regeneration (Anströmseite).....	96

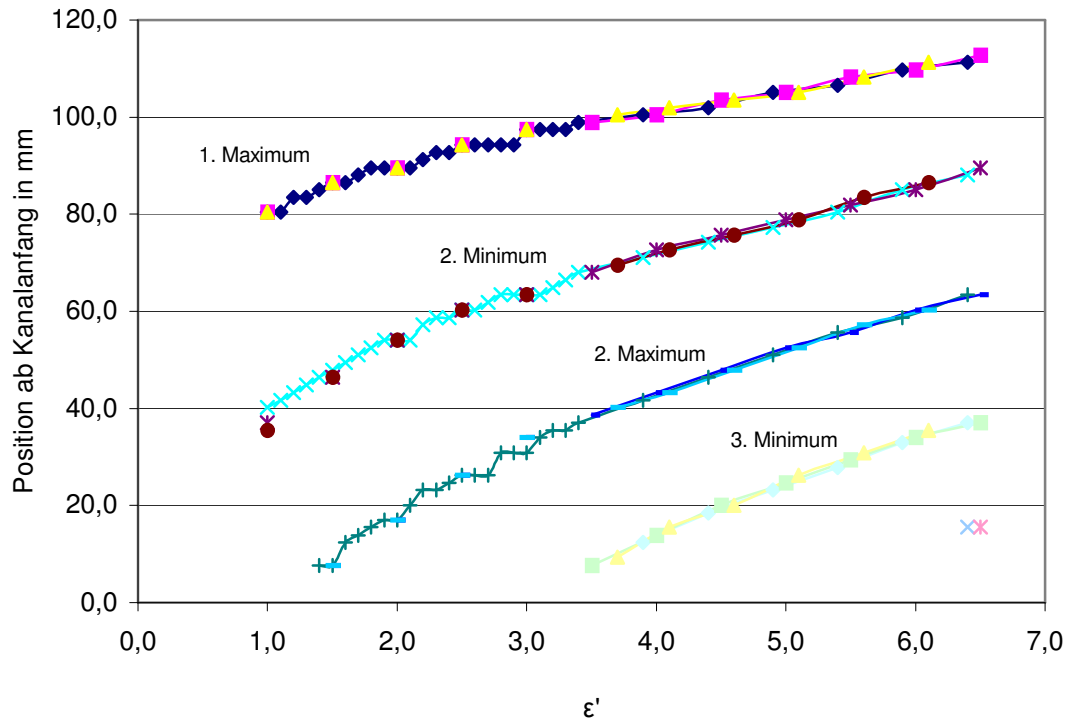
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Dielektrizitätszahlen und Eindringtiefe ausgewählter Stoffe bei einer Frequenz von 2,45 GHz und 20 °C	17
Tabelle 2:	Zusammensetzung der neuen Werkstoffe (in Masse%).....	31
Tabelle 3:	Rußbeladung der Filterproben	43
Tabelle 4:	Dielektrizitätszahlen von Cordierit und AZT	49
Tabelle 5:	Stoffwerte für die wärmetechnischen Berechnungen	52
Tabelle 6:	Bezeichnung der Randbedingungen.....	53
Tabelle 7:	Optimierungsmöglichkeiten	64
Tabelle 8:	Strömungsverteilung bei Rußregeneration.....	85
Tabelle 9:	Schematische Darstellung des Regenerationsverlaufes	87

Formelverzeichnis

Gl.: 1	$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$	16
Gl.: 2	$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \cdot \varepsilon_r''$	16
Gl.: 3	$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$	16
Gl.: 4	$v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r' \cdot \mu_r}}$	16
Gl.: 5	$\lambda_\varepsilon = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r'}}$	16
Gl.: 6	$E_{n2} = \left(\frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \right) \cdot E_{n1}$	16
Gl.: 7	$ET = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon_r'} \cdot \tan \delta}$	17
Gl.: 8	$p = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r'' \cdot E^2$	17
Gl.: 9	$P_{abs} = m \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$	26
Gl.: 10	$E_x = E_0 \cdot \sin x$	51
Gl.: 11	$E_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot Z_g}{a \cdot b}} \cdot \sqrt{P} = 757,49 \cdot \sqrt{P}$	51
Gl.: 12	$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$	51

Anhang A1



Position der Maxima und Minima entsprechend der Modellierungen in Kapitel 5.2.2. Darstellung in einem größeren ϵ' -Bereich.

Anhang A2

Berechnungsansatz für Druckverlust und Strömungsrechnung:

Bezeichnungen:

a: Koeffizient Keramik

b: Koeffizient Keramik+Ruß

u_K : Strömungsgeschwindigkeit durch Keramik

u_R : Strömungsgeschwindigkeit durch Keramik+Ruß

V_K : Volumenstrom durch Keramik,

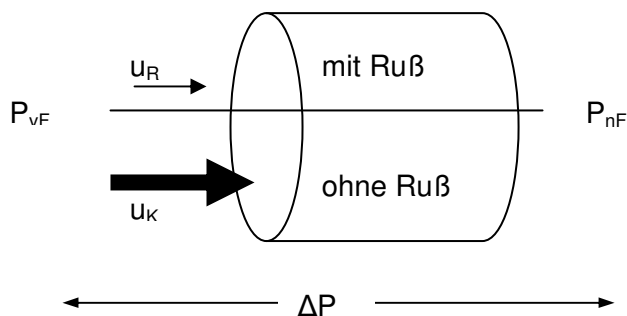
V_R : Volumenstrom durch Keramik+Ruß

V_{ges} : Gesamtvolumen ($V_K + V_R$)

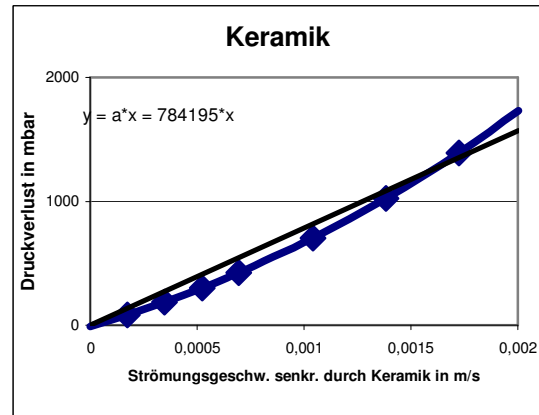
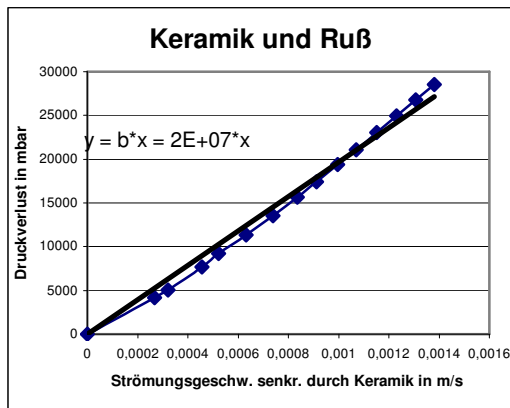
A_K : Fläche Keramik

A_R : Fläche Keramik+Ruß

Ausgangspunkt:



Es wird ein Filter mit teilweiser Rußbeladung betrachtet. Vor dem Filter ist ein Druck P_{vF} , nach dem Filter ein Druck P_{nF} . Die Druckdifferenz ist ΔP und für die Keramik wie auch den Ruß gleich. Die Geschwindigkeit der Luftströmung ist nach den Messergebnissen jedoch unterschiedlich. Entsprechend den Diagrammen 1 und 2 (nächste Seite) wird davon ausgegangen, dass Druckverlust und Strömungsgeschwindigkeit in einem linearen Zusammenhang stehen.



Also gilt:

$$\Delta p = a \cdot u_K = \Delta p = b \cdot u_R \quad (1) \quad \text{woraus folgt:} \quad u_K = b/a \cdot u_R \quad (2)$$

$$\text{mit} \quad u_K = V_K / A_K, \quad (3) \quad \text{und} \quad u_R = V_R / A_R \quad (4)$$

$$\text{sowie} \quad V_R = V_{\text{ges}} - V_K \quad (5)$$

Aus 2 bis 4 folgt:

$$V_K / A_K = b/a \cdot V_R / A_R \quad (6) \quad \text{mit (5) folgt:}$$

$$V_K / A_K = b/a \cdot (V_{\text{ges}} - V_K) / A_R \quad \text{bzw.} \quad V_K = [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \cdot (V_{\text{ges}} - V_K) \quad (7)$$

Umstellen:

$$V_K = [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \cdot V_{\text{ges}} - [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \cdot V_K \quad (8)$$

$$V_K \cdot (1 + [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)]) = [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \cdot V_{\text{ges}} \quad (9)$$

$$V_K = \{ [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \cdot V_{\text{ges}} \} / \{ 1 + [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)] \} \quad (10)$$

$$V_K = (b \cdot A_K \cdot V_{\text{ges}}) / \{ (a \cdot A_R) \cdot (1 + [(b \cdot A_K) / (a \cdot A_R)]) \} \quad (11)$$

$$V_K = (b \cdot A_K \cdot V_{\text{ges}}) / \{ (a \cdot A_R) \cdot 1 + (a \cdot A_R) \cdot (b \cdot A_K) / (a \cdot A_R) \} \quad (12)$$

$$V_K = (b \cdot A_K \cdot V_{\text{ges}}) / \{ (a \cdot A_R) + (b \cdot A_K) \} \quad (13)$$

Entsprechend für VR.

→ Fazit:

Aus der Kenntnis der Druckverlustkoeffizienten des Gesamtvolumenstroms und der Flächenanteile von Keramik und Rußbeladener Keramik kann der Strömungsanteil berechnet werden, der durch die jeweilige Membran fließt.