

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, TU Darmstadt, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16128 BG**

Schnelle und eigenspannungsfreie Aushärtung von Beschichtungsstoffen, duroplastischen Harzen und rieselfähigen Duroplaste für die Elektro-Isoliertechnik mittels Mikrowellen

(Bewilligungszeitraum: 01.07.2009 bis 31.12.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Elektrotechnik

Darmstadt, 21.05.2013

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, TU Darmstadt, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt

Nr. 2, Universität Rostock, IEF, Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16128 BG**

Schnelle und eigenspannungsfreie Aushärtung von Beschichtungsstoffen, duroplastischen Harzen und rieselfähigen Duroplaste für die Elektro-Isoliertechnik mittels Mikrowellen

(Bevolligungszeitraum: 01.07.2009 bis 31.12.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Elektrotechnik

Darmstadt, 27.06.2013

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Rostock, 27.06.2013

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowotnick

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses

Zusammenfassung

Im Projekt wurden flüssige duroplastische Harzsysteme sowie rieselfähige duroplastische Formmassen für Anwendungen in der elektrischen Isoliertechnik mittels Mikrowellenenergie vernetzt. Typische Anwendungen solcher Materialien sind u.a.:

- Verguss von Bauteilen (z.B. Kleintransformatoren, elektronische Bauelemente),
- Beschichtungen für Leiterplatten (z.B. Lötstopplacke, Dickschichtfüller),
- Formteile für die Elektroinstallation (z.B. Klemmen, Gehäuse).

Bei den flüssigen Harzen konnten gegenüber konventionellen Vernetzungsverfahren erhebliche Zeiteinsparungen bei gleichzeitiger hoher Qualität der hergestellten Formstoffe erreicht werden. Die Aushärtezeiten konnten hier teilweise von mehreren Stunden auf einige Minuten reduziert werden. Würde man eine derart schnelle Härtung mit konventionellen Verfahren erzwingen (z.B. durch Temperaturerhöhung oder Erhöhung der Reaktivität der Harzsysteme), führt dies zu erheblichen Gradienten im Aushärtungsgrad, ggf. auch zu thermischer Degradation und (insbesondere bei größeren Schichtdicken) zur Bildung schädlicher Eigenspannungen. Diese negativen Effekte einer schnellen Aushärtung konnten durch die Mikrowellentechnologie vermieden werden.

Im Falle der rieselfähigen duroplastischen Formmassen wurde die grundsätzliche Prozessierbarkeit durch Mikrowellen gezeigt. Als generell problematisch erwies sich hier die diskrete Verteilung des elektrischen Feldes.

Die Bewältigung von Inhomogenitäten des Mikrowellenfeldes stellte innerhalb des Projektes eine erhebliche Herausforderung dar. Diese konnte für die Aushärtung flüssiger Harzsysteme bewältigt werden. Zur Härtung von Formmassen ist weiterer Forschungsbedarf gegeben. Hierbei ist eine Optimierung der Mikrowellen-Anlagentechnik zwingend geboten.

Anwendungen für die neue Technologie ergeben sich vor allem dann, wenn das Problem der Feldverteilung für einen spezifischen Produktionsprozess gelöst werden kann. Bei der Härtung flüssiger Harze ist dies in vielen Fällen relativ einfach möglich, indem die Position des auszuhärtenden Produkts innerhalb der Mikrowellen-Resonanzkammer variiert wird. Gelingt dies, ist die Mikrowellenhärtung technisch und ökonomisch ausgesprochen vorteilhaft. Für rieselfähige duroplastische Formmassen ist eine ortsfeste Härtung in einem mikrowellentransparenten Werkzeug erforderlich, d.h., das diskrete Feld muss auf andere Weise homogenisiert werden. Hierzu wurden im Projekt bereits verschiedene Ansätze verfolgt. Die Umsetzung stellt jedoch noch eine Herausforderung für zukünftige Forschungsarbeiten dar.

Für die flüssigen Harzsysteme ist mit Abschluss des Vorhabens die Voraussetzung gegeben, die Mikrowellenhärtung im industriellen Prozess erfolgreich umzusetzen. Dies bietet insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen das Potential, innovativ tätig zu werden und neue Märkte – sowohl im Bereich der Harzchemie als auch auf dem Gebiet des Anlagenbaus und der Harzverarbeitung – zu erschließen.

Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

1. Forschungsthema
2. Motivation des Forschungsprojektes
 - 2.1 Vorteile des Aushärtens mit Mikrowellen
 - 2.2 Angestrebte Forschungsergebnisse (Rostock)
3. Lösungskonzept
 - 3.1 TU Darmstadt
 - 3.2 Uni Rostock
4. Verwendete Materialien
 - 4.1 Vergussmassen (TU Darmstadt)
 - 4.2 Rieselfähige Formmassen (TU Darmstadt)
 - 4.3 Materialien (Uni Rostock)
5. Ergebnisse TU Darmstadt
 - 5.1 Mikrowellenkonzept
 - 5.1.1 Aufnahme der Feldverteilung
 - 5.1.2 Einkopplungsvariante: Ring – Schlitz – Hohlleiter
Feldverteilung der Einkopplungsvariante Ring-Schlitz-Hohlleiter
 - 5.1.3 Antenneneinkopplung
Feldverteilung der Einkopplungsvariante Antenneneinkopplung
Modifikation der Antennenspitzen
Drehen der Antennenspitze
Verbindung der Antennenspitzen
 - 5.1.4 $\lambda/2$ -Direktoren und zirkularpolarisierte Direktoren
 - 5.1.5 Rotierende Maske
 - 5.1.6 Auswirkungen inhomogener Feldverteilung auf den Vernetzungsprozess
 - 5.1.7 Drehteller
 - 5.1.8 Zusammenfassende Bewertung des Anlagenkonzeptes

5.2 Analytische Untersuchungen Vergussmassen – Materialanalyse

5.2.1 TGA Untersuchungen

5.2.2 Messungen der dielektrischen Eigenschaften mittels Resonatormethode

5.2.3 IR-Spektroskopie

5.2.4 DSC-Analyse

5.3 Aushärteversuche Vergussmassen

5.3.1 Einzelkomponenten

5.3.2 Gemische – Aushärteversuche

5.4 Mechanische Kennwerte

5.4.1 Härteversuche

5.4.2 Biegeversuche

5.5 Verarbeitung rieselfähige Formmassen

5.5.1 Keramikwerkzeug

5.5.2 Anwendung des Mikrowellenverfahrens auf das Pressverfahren

5.5.3 Rieselfähige Formmassen - Vorversuche

6 Ergebnisse Uni Rostock

6.1 Voruntersuchungen

6.1.1 Voruntersuchungen zur Materialauswahl

6.1.2 Voruntersuchungen zur Prozessanpassung

6.2 Optimierung der Materialeigenschaften

6.2.1 Anpassung der Mikrowellen-Prozesstechnik

6.2.2 Nachweis der Isolationseigenschaften

6.3 Versuche an Demonstratoren / Testbaugruppen

6.3.1 Anpassung der Prozessparameter

6.3.2 Funktionsnachweis an Demonstratoren/Testbaugruppen

7 Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

1. Forschungsthema

Schnelle und eigenspannungsfreie Aushärtung von Beschichtungsstoffen, duroplastischen Harzen und rieselfähigen Duroplasten für die Elektro-Isoliertechnik mittels Mikrowellen

2. Motivation des Forschungsprojektes

Elektroisolierstoffe sind Festkörpermaterialien mit einer sehr kleinen elektrischen Leitfähigkeit, sog. Nichtleiter, sie werden zur Separation leitfähiger Komponenten untereinander eingesetzt [IEV08]. Sie zeichnen sich u.a. durch eine hohe elektrische Durchschlagfestigkeit, gute thermische Beständigkeit und eine niedrige Wasseraufnahme aus.

Für die Beschichtung von Leiterplatten, den Verguss elektrischer Komponenten sowie für vielfältige Anwendungen in der Elektro-Isoliertechnik werden oftmals feste Isolierstoffe auf Basis duroplastischer Harze eingesetzt. Typische Beispiele sind Beschichtungsstoffe für Leiterplatten wie Dickschichtfüller, Lötstopplacke und Conformal Coatings, Reaktionsharze wie Gießharze, Tränk- und Träufelharze, Rieselfähige, duroplastische Formmassen und faserverstärkte Werkstoffe mit duroplastischer Harzmatrix (siehe Abbildung 2.1).

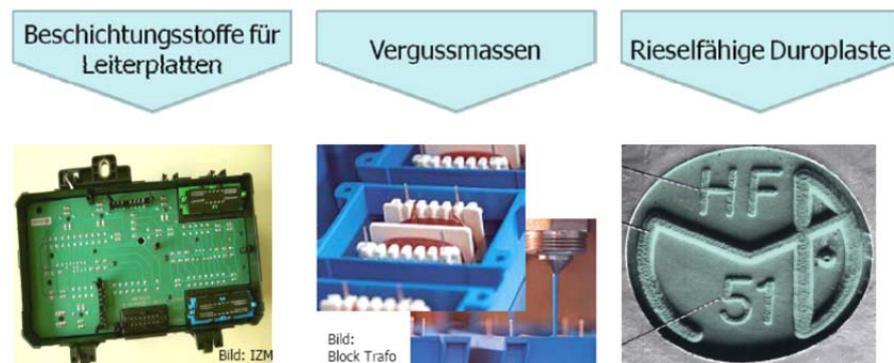


Abbildung 2.1: Beispiele für den Einsatz von duroplastischen Materialien in der Elektroisoliertechnik

Formuliert werden diese Stoffe unter anderem auf der Grundlage von Epoxidharzen, Phenolharzen, Harnstoff- und Melaminharzen ungesättigten Polyesterharzen und Silikonharzen [Dom05].

Duroplastische Materialien verbinden eine ausgezeichnete thermische Beständigkeit mit guten bis sehr guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Die positiven Eigenschaften sind unter anderem auf die für duroplastische Materialien typische Vernetzung der Monomere während der Formgebung zu einem nicht schmelzbaren makromolekularen

Verbund zurückführen. Im Vergleich zu teilweise vorhandenen thermoplastischen Alternativen zeigen Duroplaste oft wesentlich günstigere Rohstoffpreise bei einem insgesamt besseren Eigenschaftsprofil [Dom05].

Allerdings kommt es zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten prozessbedingten Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung des ausgehärteten Formstoffs. Die Schwindung kann insbesondere mit einem Gradienten im Vernetzungsgrad oder bei Materialanhäufung zu inneren mechanischen Spannungen führen, die sich negativ auf die Lebensdauer und Belastungsfähigkeit von Bauteilen auswirken können.

Damit eine ausreichende Vernetzung sichergestellt werden kann, sind häufig lange Zykluszeiten erforderlich, die den Produktionsprozess verzögern und die Wettbewerbsfähigkeit rieselfähiger duroplastischer Formmassen einschränken.

In vielen Fällen werden warmhärtende Systeme verwendet. Die thermische Energie initiiert die Vernetzung und erhält diese erforderlichenfalls so lange aufrecht, bis der gewünschte Vernetzungsgrad erreicht ist. Oftmals wird mit einem erhöhten Druck gearbeitet. Der Druck dient unter anderem dazu, die Schwindung bei Formteilen auszugleichen. Mit einer richtigen Prozessführung kann der Druck zur Optimierung des mechanischen Spannungshaushaltes von Bauteilen genutzt werden.

Bei eingebetteten elektrischen Komponenten in Harz ergeben sich indessen auch innere Spannungen, sog. Abkühlspannungen, bedingt durch verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten der unterschiedlichen Materialien.

Je nach Anwendung kommen verschiedene Verarbeitungsverfahren zum Einsatz. Diese reichen vom herkömmlichen Press- oder Spritzgießverfahren für duroplastische Formmassen bis hin zum Automatischen Druck-Gelie-Verfahren (ADG) für den Verguss von Reaktionsharzen. Im Nasslaminierverfahren hergestellte faserverstärkte Produkte sowie viele Gießharzanwendungen werden ohne Druck oder auch unter Vakuum ausgehärtet.

Beschichtungsstoffe für Leiterplatten werden ebenfalls ohne Druck, jedoch häufig mittels UV-Lichts statt durch Wärme ausgehärtet. Das UV-Licht dringt in die Beschichtung ein und ermöglicht aufgrund seiner hohen Energiedichte in Verbindung mit Photoinitiatoren die Vernetzung.

Nach umfangreichen Entwicklungsarbeiten in der Vergangenheit hat die Prozesstechnik zur thermischen oder zur UV-Aushärtung von duroplastischen Harzsystemen in Bezug auf die oben angeführten Probleme die technologischen Grenzen erreicht. Zur weiteren Optimierung der Verarbeitung duroplastischer Harze müssen daher neue Verarbeitungsverfahren angewandt werden. Ziel ist hierbei, ein möglichst eigenspannungsfreies und gleichmäßiges Aushärten zu realisieren, um Schwindungen des Materials zu unterbinden.

Dies ist mit der Mikrowellentechnik realisierbar, aufgrund der vergleichsweise großen Wellenlänge dringt ihre Energie tief in das zu erwärmende Gut ein und erhitzt dieses volumetrisch. Das Auftreten innerer mechanischer Spannungen aufgrund von Verarbeitungsschwindungen und Materialansammlungen wird verhindert. Es sind über das gesamte Volumen einheitliche mechanische, elektrische und physikalische Eigenschaften zu erreichen. Mit der Möglichkeit einzelne Materialien selektiv zu erwärmen, kann die Wärme gezielt initiiert werden, Schädigungen der Materialoberfläche durch zu hohe Temperatureinwirkungen werden ebenso unterbunden.

Die Mikrowellenerwärmung zählt zu den dielektrischen Erwärmungsverfahren. Darunter versteht man die Wärmeerzeugung in elektrisch nicht oder nur schwach leitender Stoffe durch Einwirken eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes [Sch08]. Eine schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle ist in Abb. 2.2 gegeben. Das magnetische und elektrische Feld stehen senkrecht sowohl zueinander als auch zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Grundlegende Voraussetzung für die Dissipation der Mikrowellenenergie ist eine polare Molekülstruktur, wie sie bei unvernetzten duroplastischen Materialien vorliegt [Emm08]. Aus diesem Grund ist das Verfahren von besonderem Interesse für die Verarbeitung duroplastischer Materialien der Elektro-Isoliertechnik. Der spezielle Frequenzbereich von Mikrowellen erstreckt sich zwischen 300 MHz und 300 GHz [Mö104, Hin07]. Für die technisch einsetzbaren Frequenzen 2,45 GHz und 5,8 GHz beträgt die Wellenlänge im Vakuum oder Luft $\lambda = 12,24 \text{ cm}$ bzw. $\lambda = 5,17 \text{ cm}$

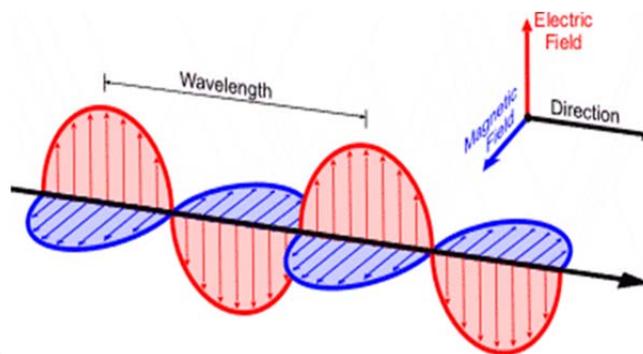


Abbildung 2.2: Elektromagnetische Welle

Im Gegensatz zu den derzeit angewendeten Aushärteverfahren, bei welchen die Erwärmung eines Objektes über Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung und UV-Licht vonstattengeht und die Wärme außerhalb des Objekts erzeugt wird, dringen Mikrowellen aufgrund der vergleichsweise großen Wellenlängen deutlich tiefer in das zu erwärmende Objekt ein [Grü93, Feh09, ICT07]. Die elektromagnetische Energie der Mikrowelle wird direkt im Innern des Erwärmungsgutes in Wärme umgesetzt, was positiv für das Aushärten großer Schichtdicken und komplexen, dreidimensionalen Bauteilen ist. Die Wärme verteilt sich gleichzeitig über das gesamte Materialvolumen, deshalb handelt es sich hierbei auch um ein volumetrisches Erwärmungsverfahren.

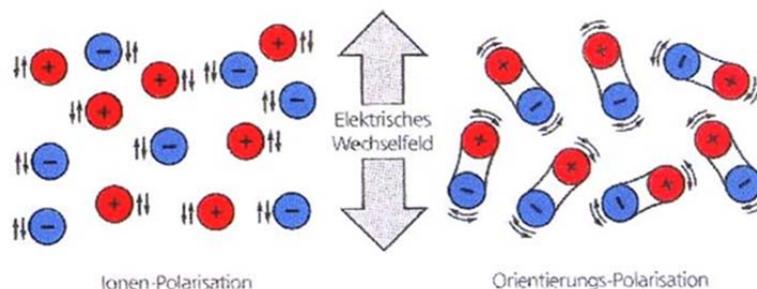


Abbildung 2.3: Ionen - Polarisation und Orientierungs- Polarisation (Quelle: Sch99)

Der Aufheizvorgang findet bei diesem Prozess auf molekularer Ebene statt, wobei maßgeblich die elektrische Feldkomponente der Mikrowelle bei der Wärmeerzeugung beteiligt ist [Emm08]. Befindet sich ein dielektrischer Stoff in einem elektromagnetischen

Wechselfeld, werden Kräfte auf dessen Moleküle ausgeübt. Die Folge ist eine Polarisierung des Materials. Insbesondere vorhandene Dipole, wie z.B. OH-Gruppen, richten sich in dem Feld aus (vgl. Abb. 2.3). Ferner tragen Ionen konduktiv zur Erwärmung bei, insbesondere bei noch flüssigen Harzen mit hoher Ionenbeweglichkeit.

In dem ständig wechselnden Feld werden Kräfte auf die Dipole bzw. Ionen ausgeübt. Die Rotation und Vibration der Dipole und polaren Moleküle erzeugen intermolekulare Reibungseffekte im Innern des Guts, die dabei entstehende kinetische Energie wird in Wärme überführt [Hab06], Abb. 2.4.

Ein Maß für die durch Mikrowellen in ein Material eingekoppelte Energie ist der Imaginärteil der komplexen Permittivität, der so genannte Verlustindex ε'' .

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' + j \varepsilon''$$

Liegt bei einem Material ein hoher dielektrischer Verlustindex ε'' vor, wird die eingedrungene Mikrowellenenergie schneller in thermische Energie gewandelt als in Materialien mit einem niedrigen Verlustindex [Buc05].

Je geringer der Verlustindex ε'' ist, desto geringer fällt dementsprechend der Anteil der absorbierten Mikrowellenenergie aus. Viele keramische Werkstoffe beispielsweise besitzen einen sehr kleinen Verlustfaktor und sind für Mikrowellen nahezu transparent. Wasser dagegen nimmt aufgrund seiner Dipolstruktur leicht Energie auf und erhitzt demzufolge schneller, in diesem Falle findet eine Absorption der Mikrowellenenergie statt.

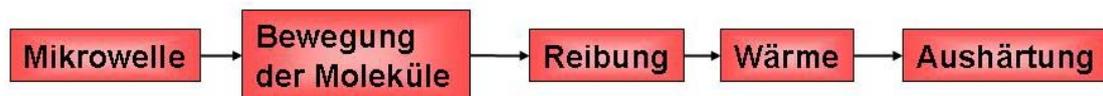


Abbildung 2.4: Prozessverlauf der Mikrowellenerwärmung

Beim Eindringen der Mikrowelle in ein verlustbehaftetes dielektrisches Material wird, wie bereits aufgeführt, ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt und die Mikrowelle absorbiert. Der Absorptionsanteil ist zum einen frequenz- und temperaturabhängig [Emm08]. Zum anderen trägt bei der Verarbeitung von duroplastischen aushärtenden Werkstoffen zunehmend der Vernetzungsgrad des Materials zur Absorptionsfähigkeit bei [Mij90]. Dies muss bei einer Aushärtung von Duroplasten berücksichtigt und kann darüber hinaus auch gezielt für eine Beeinflussung der Aushärtungsbedingungen genutzt werden.

Eine gleichmäßigere und schnellere Materialerwärmung im Vergleich zum Konvektionsverfahren wird durch die Mikrowellentechnik sichergestellt. Innere Spannungen hervorgerufen durch Vernetzungs- und Temperaturgradienten werden vermieden, und eine ungewollte Anhäufung von Material ist zusätzlich auszuschließen [Has02, Hil02, Boe00].

2.1 Vorteile der Aushärtung mittels Mikrowellen

Eine Übersicht über die Vorteile der Mikrowellentechnik und deren Potential bei der Produktion von Bauteilen gibt Abb. 2.5.

Vorteile der Mikrowelle gegenüber anderen Aushärteverfahren wie UV-, IR-Strahlung oder mit Konvektion und Wärmestrahlung sind zum einen die vergleichsweise große Eindringtiefe bedingt durch die größere Wellenlänge der Strahlung [Boe00, Che93]. Die realisierbare

Eindringtiefe ist maßgeblich von den dielektrischen Eigenschaften des auszuhärtenden Materials abhängig. Anders als bei der UV- oder IR-Aushärtung können mit Mikrowellen auch Materialien mit lichtabsorbierenden Füllstoffen und Pigmenten ausgehärtet werden [Boe00]. Anders als die punktuellen Erwärmungsverfahren, ist das Mikrowellenaushärten ein großflächiges und volumetrisches Erwärmungsverfahren, was gleichmäßigere und homogenere Erwärmungen ermöglicht. Damit ist ein von der Geometrie und Dicke des Körpers unabhängiges, schrumpfungsfreies Aushärteverfahren von komplexen und profilierten Bauteilen und Kanten ermöglicht [The07, Win04].

Der Aushärteprozess duroplastischer Materialien ist mit einer Veränderung der dielektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur und des Vernetzungsgrades verbunden. Die Anzahl der Dipole nimmt während des Aushärteprozesses mit ansteigender Temperatur zunächst zu, fällt jedoch aufgrund des ansteigenden Vernetzungsgrades mit der Zeit wieder ab [She86, Zon05]. Dieses Verhalten beruht auf der Tatsache, dass es während des Aushärteprozesses zu einer Erhöhung des Vernetzungsgrades bei gleichzeitiger Abnahme der beweglichen Polymermoleküle kommt. Diese Verminderung führt zu einer Verringerung der dielektrischen Verluste im Material, was ein degressives Erwärmungsverhalten der duroplastischen Materialien zur Folge hat. Der dabei auftretende Selbstregeleffekt reduziert die Gefahr einer thermischen Schädigung der Materialoberfläche, da die Energie von bereits vernetztem Material nicht mehr absorbiert wird [Hab06, Zon05].



Abbildung 2.5: Vorteile der Mikrowellentechnik (grün) und die Auswirkungen auf die Produktion von Bauteilen (orange)

Ein zusätzlicher Vorteil der Mikrowellenerwärmung ist die Möglichkeit der selektiven und individuellen Erwärmung von Komponenten [Buc05, Emm08, Sch83, Win04]. Wie bereits erwähnt, ist die Energieaufnahme von den dielektrischen Eigenschaften des Materials abhängig (siehe [Emm08, Hab06, Has02, Zon05]). In konventionellen Erwärmungsanlagen herrschen die höchsten Temperaturen an der Wärmgutoberfläche (vgl. Abb. 2.6). In der Mikrowelle wird das Material volumetrisch erhitzt, wobei das Material selbst als Wärmequelle und Verbraucher dient [ICT07, Sch08, Pap05, Dau06] und der Vernetzungsprozess direkt im Innern startet [Che93]. Temperaturerhöhungen an der Materialoberfläche werden durch volumetrische Erwärmung vermieden [Che93, Hab06, Has02]. Infolge äußerer Wärmeverluste treten die höchsten Temperaturen im Innern des Materials auf (vgl. Abb. 2.6). Außerdem wird die Aufheizdauer gegenüber einem Ofen deutlich verkürzt [Has02, Sch99].

Das Verfahren ist zudem äußerst energieeffizient und sorgt für eine Verkürzung der Prozesszeiten [Pap08, Sch83, Sch99].

Mit Mikrowellen vollzieht sich der Aushärteprozess materialschonend. Die Ausbildung innerer mechanischer Spannungen aufgrund von Temperatur- und Vernetzungsgradgradienten wird durch die gleichmäßige und selbstregulierende Erwärmungsweise unterbunden [Has02, Hil02]. Mit der Mikrowellentechnik ist es praktikabel Materialien herzustellen, die einheitliche über das gesamte Volumen homogene Materialeigenschaften in mechanischer und physikalischer Sicht besitzen [Hil02]. Eine nachhaltige Steigerung von Qualität und Lebensdauer der ausgehärteten Bauteile ist aufgrund der Spannungsfreiheit und Homogenität im Eigenschaftsprofil zu erwarten.

Die Schwankungen innerhalb einer Charge von Bauteilen werden aufgrund der einheitlichen Bedingungen während des Aushärtens reduziert und sind lediglich von Schwankungen der Materialzusammensetzung selbst abhängig.

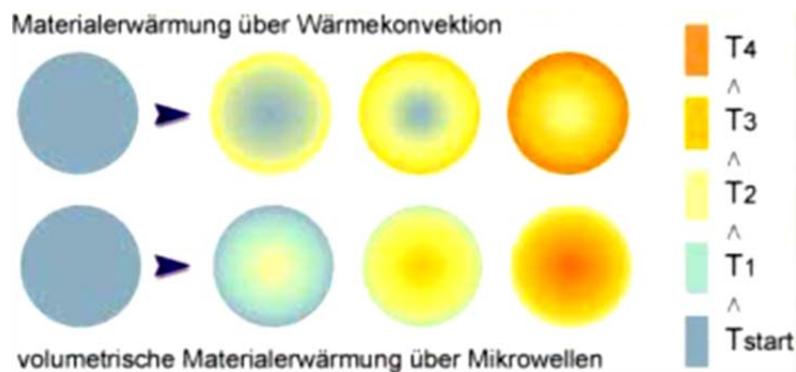


Abbildung 2.6: Vergleich zwischen Konvektionserwärmung und Mikrowellenerwärmung (Quelle: Sch99)

Ein weiterer positiver Aspekt der Mikrowellenhärtung duroplastischer Materialien ist die hohe Energieeffizienz [Che93, Sch99, The07]. Das Verfahren besitzt im Vergleich zur konventionellen Erwärmung durch den unmittelbaren Energieeintrag und die geringe Erwärmung der Anlage einen wesentlich höheren Wirkungsgrad [Möl04, Sch99]. Die stufenlose Regulierbarkeit der abgegebenen Leistung sprechen ebenso für die Effizienz dieses Aushärteverfahrens [Sch99].

Im Bereich der Duroplastverarbeitung sind Einsparungen zu erwarten. Aufgrund der kurzen Anlaufzeit der Mikrowelle entfällt der Vorheizprozess von Öfen oder Formen [Emm08, Win04, Che93], woraus nicht nur ein Energie- sondern auch ein Zeitvorteil entsteht, der für den Einsatz von Mikrowellen in der Duroplastverarbeitung spricht [Emm08, Boe00]. Im Zeitalter wachsender Energiekosten ist die Mikrowellentechnik als ein energieeffizientes und umweltschonendes Verfahren anzusehen. Die Herstellungsbedingungen der produzierten Bauteile sind über den gesamten Aushärteprozess identisch, Schwankungen hinsichtlich der Temperatur entfallen. Das Problem der langen Zykluszeiten, vor allem beim Aushärten rieselfähiger Formmassen, ist mit Hilfe der Mikrowellentechnik zu lösen und macht diese Produkte gegenüber thermoplastischen Produkten damit konkurrenzfähiger.

2.2 Angestrebte Forschungsergebnisse

Eine Übersicht über die (zumindest perspektivisch avisierten) Forschungsziele gibt Abb. 2.7.

Ziel des Vorhabens ist hierbei insbesondere die Evaluation der Potentials der Mikrowellentechnik als ein konkurrenzfähiges Verfahren zur Aushärtung duroplastischer Materialien auf den Gebieten

- Beschichtungsstoffe,
- Reaktionsharze,
- und rieselfähige Duroplastformmassen.

Aus technischer Sicht ist die größte Herausforderung, ein homogenes Mikrowellenfeld innerhalb des Materials zu erzeugen, damit eine gleichmäßige und volumetrisch homogene Erwärmung sichergestellt ist. Mit einer homogenen Feldverteilung wird das Auftreten von verstärkt erwärmten und kälteren Stellen unterbunden.

Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Forschungsziele	
<ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse über Feldverteilung bei unterschiedlichen Frequenzen• Analyse des Vernetzungsprozesses• Homogene Vernetzung, weniger Fehler• Analyse der Parametereinflüsse• geringe inneren mechanischen Spannungen• Aushärtung größerer Schichtdicken für Beschichtungsstoffe und Bauteile• Aushärtung dreidimensionaler Bauteile• schnellere Aushärtung• Aushärtung gefüllter Materialien• keine aufwendige Nacharbeitung• Optimierung des Aushärteprozesses• Erkenntnisse des Pressverfahren – Vorlage für Spritzgießen• Einsatz der Mikrowellentechnik in der Produktion	<ul style="list-style-type: none">• Kürzere Produktionszykluszeiten• Energieeffizient• Zeiteffizient• Gesteigerte Produktivität• Geringere Produktionskosten• Weniger Ausschuss• Gesteigerte Qualität• Längere Lebensdauer der Bauteile• Neue Absatzmärkte – Konkurrenz zu thermoplastischen Materialien• Erweiterte Produktpalette• Weniger Emissionen• Gesteigerte Wirtschaftlichkeit• Innovation

Abbildung 2.7: Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Forschungsziele

Zusätzlich sollte geklärt werden, ob es mit der Mikrowellentechnik technisch praktikabel ist, größere Schichtdicken für Lacke und Beschichtungsstoffe und Wandstärken für Reaktionsharze auszuhärten.

Wissenschaftlich sollen die Einflüsse und Auswirkungen von Mikrowellen auf das Aushärteverhalten duroplastischer Werkstoffe analysiert werden. Da sowohl rieselfähige Duroplastformmassen, Beschichtungsstoffe für Leiterplatten als auch Reaktionsharze untersucht werden, betreffen die Untersuchungen ein weites Spektrum im Bereich dieser Werkstoffgruppe.

Zusätzlich zu den Untersuchungen soll eine Optimierung des Verfahrens in Bezug auf die Prozessparameter erfolgen. Hierzu werden die Einflüsse der variablen Prozessparameter, wie Frequenz, Einwirkdauer und Art der Mikrowelle auf die Vernetzung und die späteren mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Materials untersucht. Ziel ist es die Parameter dahingehend zu variieren und zu optimieren, dass das vernetzte Material die möglichst besten mechanischen, elektrischen und physikalischen Eigenschaften erlangt und dabei das Verfahren möglichst energiesparsam und materialschonend eingesetzt wird.

Ein spezielles Anwendungsgebiet für die Mikrowellenhärtung duroplastischer Werkstoffe sind die isolierenden Schutzschichten und Vergussmassen für elektronische Baugruppen und Komponenten. Einerseits sind die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Homogenität der Aushärtung in diesem Bereich besonders hoch. So werden heute Schutzlacke in der Größenordnung von wenigen hundert Mikrometern oft in mehreren Schichten aufgetragen und gehärtet, um so die gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Die Mikrowellenhärtung im Volumen hat hier ein erhebliches Rationalisierungspotential. Andererseits sind gerade die elektrischen Strukturen dieser Baugruppen besonders empfindlich gegen hochfrequente elektromagnetische Felder, was die Anforderungen an die Homogenität und Regelung der Mikrowellenenergie besonders anspruchsvoll erscheinen lässt. Dementsprechend muss ein geeignetes Prozessfenster gefunden werden, in dem die elektronischen Baugruppen und Komponenten sicher verarbeitet werden können. Innerhalb dieser Grenzen müssen Vergussmaterialien und Beschichtungsstoffe ermittelt und optimiert werden, die eine ausreichende Einkopplung und Aushärtung gewährleisten.

3. Lösungskonzept

Im Folgenden werden die angewendeten Lösungswege vorgestellt. Diese basieren auf den im Antrag beschriebenen Lösungsweg.

3.1 TU Darmstadt

Im Rahmen des Forschungsprojekts sollte eine Mikrowellenanlage geschaffen werden, die es ermöglicht, ein derart homogenes E-Feld sicherzustellen, dass damit rieselfähige Formmassen und vernetzende Vergussmassen verarbeitet werden können. Wichtig ist bei allen Anwendungen, wie bereits gesagt, ein homogenes Mikrowellenfeld ohne Hot- und Cold-Spotbildung im auszuhärtenden Materialvolumen.

Besonders die Verarbeitung der rieselfähigen Formmassen stellt dabei die größte Herausforderung dar. Da bei dieser Materialgruppe unter erhöhtem Druck gearbeitet wird, muss zusätzlich ein mikrowellentransparentes Werkzeug im Applikationsraum integriert werden. Da der Einbau der Mikrowellenanlage in die vorhandene Duroplastpresse als Randbedingung steht, ist dies bei der Anlagenkonzeption zu beachten.

Die Anlage wird von der Firma Fricke und Mallah GmbH, Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses, erarbeitet, konstruiert und aufgebaut. Angedacht ist der Test von zwei bereits im Vorfeld bewährten Einkopplungsvarianten.

Bevor die Anlage für die Aushärtungsversuche verwendet werden kann, sind umfangreiche Untersuchungen in Bezug auf die Feldverteilung notwendig. Dabei ist das Ziel ein Verfahren zu entwickeln, mit welchem möglichst einfach die Visualisierung der Feldverteilung durchgeführt werden kann. Parallel ist zu entscheiden, in welchem Bereich der Kammer die Materialproben für die späteren Aushärteversuche positioniert werden können. Dabei werden sowohl die zwei Einkopplungsvarianten, als auch Modifikationen dieser untersucht.

Nach Inbetriebnahme der Anlage kann mit den Materialversuchen begonnen werden. Als erster Teil wird die Verarbeitung der Vergussmassen für die Elektroisoliertechnik angesetzt. Dazu zählen zunächst das materialspezifische Verhalten der Vergussmassen in der Mikrowelle und deren Auswirkung auf den Vernetzungsprozess zu charakterisieren. Das Verhalten der Einzelkomponente und das Vernetzungsverhalten der Gemische spielen dabei eine entscheidende Rolle. Die Prozessoptimierung erfolgt anhand der Parameter Mikrowellenfrequenz und eingekoppelter Leistung.

Neben den Vernetzungsuntersuchungen zur Prozessoptimierung werden die Materialien charakterisiert, dazu zählen sowohl das Verhalten unter Temperatur, sowie die Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur und Vernetzungsgrad.

Für den Einbau der Anlage ist es notwendig, ein Werkzeug aus mikrowellentransparentem Material zu konstruieren und zu integrieren. Die dabei notwendige Konzeption wird parallel zu der Verarbeitung der Vergussmassen durchgeführt. Eine zeitnahe Integration der Anlage in die Duroplastpresse soll daher nach Abschluss der Untersuchungen an den Vergussmassen realisierbar sein.

Eine Prozessoptimierung für den Verarbeitungsprozess rieselfähiger Formmassen wird durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf der Verarbeitung möglichst dickwandiger Bauteile, zunächst in Plattenform. Auch bei dieser Materialgruppe werden die Parameter Leistung und Mikrowellenfrequenz variiert, um eine möglichst effektive Vernetzung zu realisieren.

3.2 Uni Rostock

Im Rahmen des Forschungsprojekts soll, wie in Kapitel 2.2 erläutert, ein Arbeitsbereich ermittelt werden, in dem elektronische Baugruppen und Komponenten sicher in der Mikrowelle verarbeitet werden können und die zulässige Energie ausreichend Wärme in einem Beschichtungsstoff generiert. Zur Realisierung dieses Zieles sind zwei Strategien erforderlich, die im Rahmen des Projektes verfolgt wurden. Einerseits wurde eine breite Materialpalette von Beschichtungs- und Vergussmaterialien aus der Elektronik-Baugruppenfertigung dahingehend untersucht, die Varianten zu ermitteln, die bereits mit einer geringen Mikrowellenanregung ausgehärtet werden können und gleichzeitig die gewünschten elektrischen Isolationseigenschaften gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden sowohl Materialien der Lackwerke Peters als auch der Fa. Tyco Electronic untersucht und ausgewählt.

Die zweite Strategie des Lösungsweges besteht in der Anpassung und Optimierung des Mikrowellenprozesses. Mit Unterstützung der Fa. Fricke & Mallah wurde eine Mikrowellen-Laboranlage schrittweise erweitert bzw. an die Erfordernisse der Baugruppenbehandlung angepasst. Parallel zu dieser Anpassung der Mikrowellentechnik wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IZM mit einer speziellen Laboranlage, die die Modulation der Mikrowellenfrequenz und Leistung in einem weiten Bereich erlaubt, eine Erprobung der favorisierten Varianten durchgeführt. Diese spezielle Labortechnik ist aufgrund des hohen Aufwandes nicht für die industriennahe Anwendung geeignet, ermöglicht aber ein schnelleres Auffinden der geeigneten Grenzwerte.

Die Kombination aus Materialien und Prozessparametern wird schließlich mit eigenen elektronischen Testschaltungen sowie Musteranwendungen aus der Industrie erprobt. Für diesen Zweck wurden Kfz-Sensormodule der Fa. Tyco Electronic als Demonstrator verwendet, die dann vom Projektpartner unter praxisnahen Bedingungen getestet wurden.

4 Verwendete Materialien

Die von verschiedenen Materialherstellern zur Verfügung gestellten Materialien werden im Folgenden vorgestellt. Die Auswahl erfolgte in Abstimmung mit den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Materialherstellern und -anwendern.

4.1 Vergussmassen TU Darmstadt

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden sechs Vergussmassen auf Epoxid- und Polyurethanbasis untersucht. Bei diesen Materialien handelt es sich um bereits technisch und wirtschaftlich eingesetzte Vergussmassen mit einem sehr guten Eigenschaftsprofil. Durch die Untersuchungen an diesen Materialien wird die Nähe zum Einsatz in der Industrie gewährleistet, da es sich um bereits etablierte Harzsysteme handelt.

RAPID FY15 Polyurethan - Vergussmasse

Zweikomponenten-Kaltvergussmasse, eignet sich insbesondere zum Vergießen von Elektronik als Schutz gegen Feuchte, Umwelteinflüsse, Schock und Vibration.

GURONIC

Eignet sich zum Verguss von Elektronischen Bauteilen zum Schutz gegen Schock und Vibration, sowie auch Kälte. Es tritt eine extrem geringe Beanspruchung von Bauelementen und Lötverbindungen auf.

RAPID P1T Polyurethan Vergussmasse

Zweikomponenten-Kaltvergussmasse, eignet sich insbesondere zum Vergießen von Elektronik als Schutz gegen Feuchte, Umwelteinflüsse, Schock und Vibration.

Epoxidharz RSE7379 mit Härter HAE 8454

Epoxidharzsystem zum Schutz und Imprägnierung von Transformatoren, Spulen, elektrischen und elektronischen Bauteilen.

Wepox VU 4085 Epoxidharz

Als undurchsichtige Beschichtungsmasse für unempfindliche elektronische Bauteile mit hoher mechanischer Festigkeit. Sie kann auch zum Verguss von Magnetspulen, Stabwicklungen und Spulen verwendet werden. Im Bereich der Elektrotechnik wird es auch zum Abdichten von Gießformen, Fugen, Anschlußdrähten und zum Verguss von Trafos, Zündspulen und Kabelanschlüssen verwendet.

Wepuran VU 4452 Polyurethan-Vergussmasse

kommt zur Anwendung für Verguss für Sensortechnik, temperaturbeständige Abdichtmassen, Schutz von hochwertigen, stoßempfindlichen Elektronikbauteilen vor Temperaturschocks und Schrumpf-Druckbelastung. Weiterhin wird sie eingesetzt als Abdicht- und Einbettungsmasse von Temperaturfühlern, Heizelementen, Becherkondensatoren und Trafos.

4.2 Rieselfähige Formmassen TU Darmstadt

Bei den rieselfähigen Formmassen handelt es sich ebenfalls um gängige Materialien aus dem Bereich Elektro-Isoliertechnik. Diese werden aktuell im Pressverfahren unter Wärmezufuhr verarbeitet. Es handelt sich dabei um handelsübliche Phenol-Formmassen, Harnstoff-Formmassen und Melamin-Formmassen.

Bakelite PF 31-9005-S 1 Phenol-Formmasse

Anwendungsbereich: Formteile aller Art von Schraubkappen bis zu großen Gehäusen, Elektroinstallationsmaterial, Topfgriffe, Bedienelemente, Toaster Teile, Kolben für Bremskraftverstärker, Kohlebürstenhalter, Leuchtingehäuse.

Bakelite PF 6510 Phenol-Formmasse

Anwendungsbereiche: Thermisch und mechanisch hochbelastete Teile im Kfz-Bereich, Isolierflansche.

Bakelite PF 1110 Phenol-Formmasse

Anwendungsbereiche: Kfz-Motoranbauteile, Isolierflansche, Bremskolben, Sensoren, Schleifscheibensockel, Führungselemente, Flügelräder, Riemenscheiben und Pumpenteile.

Bakelite PF 6501 Phenol-Formmasse

Anwendungsbereiche: Thermisch und mechanisch hochbelastete Teile im Kfz-Bereich, Isolierflansche.

Chemiplastica/Perstorp Harnstoff-Formaldehydharz-Formmasse UF 131.5

nach DIN EN ISO 14527

Chemiplastica/Perstorp Melamin-Formaldehydharz-Formmasse MF 152.7

nach DIN EN ISO 14528

4.3 Materialien Uni Rostock

Peters SL 1301, Polyurethan

Geeignet für das "Conformal Coating" elektronischer Baugruppen. Farblose Schicht die zum Schutz vor Feuchtigkeit und Klima auf die Komponenten aufgesprüht, aufgespritzt oder durch Tauchen aufgebracht wird.

Peters DSF 2707, Polyurethan

Dieser Dickschichtfüller ist ein UV-härtendes 1-Komponenten-System, das speziell für das Verfüllen von Leiterplatten mit hohen Kupferleitern entwickelt worden ist. Er dient dem Verfüllen der Zwischenräume, so dass die Applikation des Lötstopplackes auf einer ebenen Oberfläche erfolgen kann und durch die vollständige Einbettung eine optimale elektrische Isolierung der Kupferleiter erzielt wird.

Peters SD2496 TSW, Bisphenol-Epoxidharz

Ein thermisch härtender 2-Komponenten-Lötstopplack, der im Siebdruckverfahren aufgetragen wird. Für die Haftung auf Leiterplatten und flexiblen Schaltungsträgern optimiert. Dieser weiß-deckende Lötstopplack ist speziell für die Optoelektronik geeignet, da er sich durch hohe Remissionswerte auszeichnet und die Lichtfarbe der LEDs nicht beeinflusst.

Peters DSL 1705, Silikon

Dieser Dickschichtlack wird als dauerhafte elektrische Isolation und Schutz gegen starke Feuchtigkeitsbelastung und andere aggressive Umgebungsbedingungen eingesetzt. Er ist geeignet zur Beschichtung starrer und flexibler Leiterplatten mit Schichtdicken bis 3 mm, die besonders hohe Anforderungen an Qualität und Lebensdauer bei Temperaturen bis 180°C erfüllen müssen.

Peters VF2467 A/B, Novolak-Epoxy

Der fotostrukturierbare Durchsteigerfüller wird im Siebdruckverfahren aufgebracht, um Durchsteigerbohrungen (Via Holes) zu verschließen. Er wird eingesetzt, um Durchkontaktierungen zu verschließen und so das Durchsteigen von Lötzinn zu verhindern bzw. Bohrungen für die Vakuumadaption abzudichten. Es wird eine gute Kompatibilität mit den nachfolgend applizierten Lötstopplacken gewährleistet.

Peters SD2962P, Epoxy

Dieser Abziehlack ist zum temporären Schutz von Leiterplattenoberfläche vor Lot beim Wellenlöten oder HAL-Prozess bestimmt. Anschließend wird der Lack rückstandsfrei entfernt um auf der geschützten Oberfläche z.B. lokale Vergoldung von Pads oder Bondprozesse durchzuführen.

Guronic DoFR0, Polyurethan

Vergussmasse – Farbe braun. Eignet sich zum Verguss von Elektronischen Bauteilen zum Schutz gegen Schock und Vibration, sowie auch Kälte. Es tritt eine extrem geringe Beanspruchung von Bauelementen und Lötverbindungen auf. (siehe TU Darmstadt)

Guronic C500, Polyurethan

Vergussmasse – transparent. Eignet sich zum Verguss von Elektronischen Bauteilen zum Schutz gegen Schock und Vibration, sowie auch Kälte. Es tritt eine extrem geringe Beanspruchung von Bauelementen und Lötverbindungen auf. (siehe TU Darmstadt)

5 Ergebnisse TU Darmstadt

5.1 Mikrowellenanlage Konzept

Die verwendete Mikrowellenanlage wurde von der Firma Fricke und Mallah GmbH aus Peine konzipiert und aufgebaut. Ziel der Anlage ist es, ein homogenes Mikrowellenfeld im Bereich der Materialprobe zu erzeugen. Wichtig ist, dass die Temperaturunterschiede während der Verarbeitung kleiner als $\pm 1^\circ\text{C}$ sind, um Unterschiede während der Vernetzung zu unterbinden. Etwaige Temperaturgradienten bedingen einen Gradienten im Vernetzungsgrad, sowie spätere Spannungen und Verzug im Materialvolumen selbst.

Die Aufgabe dicke Schichten von Vergussmasse auszuhärten und gleichzeitig die Mikrowelle mit dem Pressenverfahren zu kombinieren waren Ziele des vorliegenden Forschungsprojektes. Die Kombination mit der Presse beinhaltet zusätzlich die Integration eines mikrowellentransparenten Werkzeugs in die Mikrowellenkammer. Als Werkzeugmaterial erweist sich eine Keramik auf Aluminiumoxidbasis als vielversprechend. Der Werkstoff ist zum einen aufgrund seiner niedrigen Verlustzahlen mikrowellentransparent und zum anderen besitzt es die gewünschten mechanischen Eigenschaften, um den entstehenden Druck während des Pressverfahrens stand zu halten. Auf die Konzeption des Werkzeugs, wird im Abschnitt Keramikwerkzeug noch genauer eingegangen.

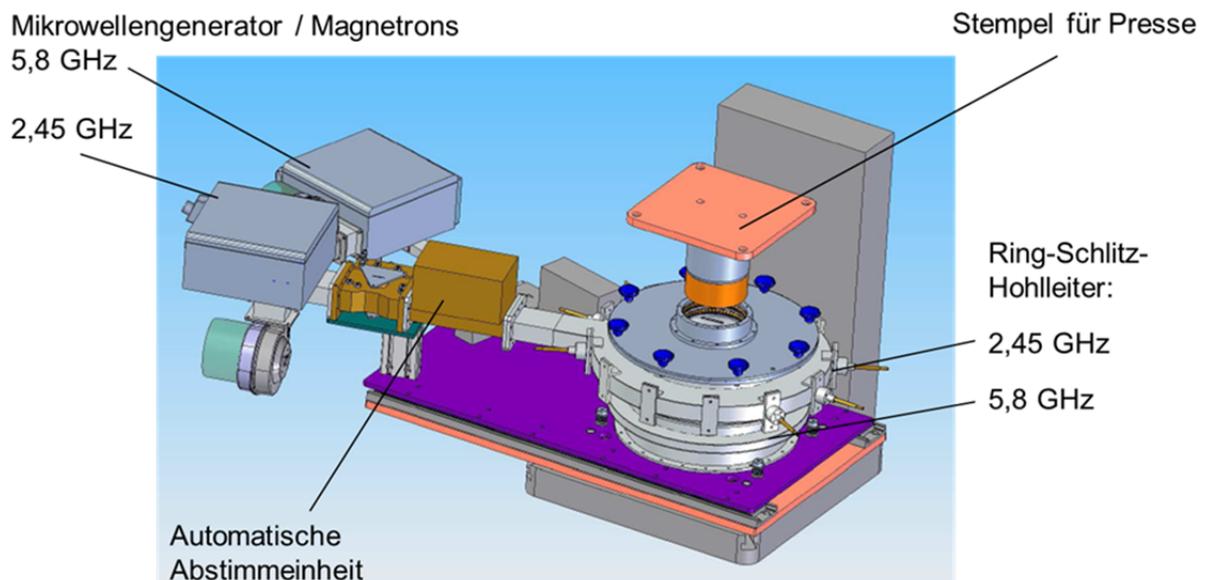


Abbildung 5.1: Aufbau Schlitz Einkopplung mit Integration in Duroplastpresse

(Quelle: Fricke und Mallah)

Die Anlage verfügt über zwei Magnetrons, siehe Abbildung 5.1. Das eine arbeitet bei einer Frequenz von 2,45 GHz, das andere bei 5,8 GHz. Über angepasste Hohlleiter wird die Energie an die Mikrowellenkammer herangeführt. Dort wird die Energie über ein

Einkopplungsverfahren in die Kammer eingekoppelt. Im Rahmen des Projektes wurden die Einkopplungsvarianten „Ring–Schlitz–Hohlleiter“ und die Einkopplung über Antennen untersucht.

In der Kammer wird die eingebrachte Energie im auszuhärtenden Gut dissipiert. Ein Teil der eingekoppelten Leistung wird jedoch auch reflektiert und über das Hohlleitersystem wieder in Richtung des jeweiligen Magnetrons geleitet. Diese reflektierte Leistung wird mittels eines Zirkulators in einen Ohmschen Widerstand mit Wasserkühlung abgeführt, wodurch das jeweilige Magnetron vor Überlastung geschützt wird.

Eine integrierte Automatische Abstimmeinheit misst die eingekoppelte und die reflektierte Leistung. Über drei Abstimmstifte kann die in der Kammer vorhandene Leistung konstant gehalten werden.

5.1.1 Aufnahme der Feldverteilung

Für das homogene Aushärten von vernetzenden Vergussmassen ist es essentiell, im Bereich der Materialprobe eine homogene Feldverteilung zu haben. Die Ausbildung von Hot- und Cold-Spots kann das Aushärteverhalten deutlich beeinträchtigen, und es kann zu einer ungleichmäßigen Vernetzung des Materials kommen.

Zur Visualisierung werden verschiedene Möglichkeiten herangezogen. Zunächst wird versucht über die Erwärmung von Wasser Rückschlüsse auf die Feldverteilung zu schließen. Dabei werden Keramikziegel, gefüllt mit einer definierten Menge an Wasser, in unterschiedlichen Positionen erwärmt. Da sich Wasser aufgrund seiner Dipolcharakteristik sehr schnell in der Mikrowelle erwärmt und damit sehr hohe Temperaturdifferenzen entstehen, sind die Rückschlüsse schwierig und ungenau. Das Verfahren wurde als zu ungenau eingestuft und nicht weiter berücksichtigt.

Eine weitere Methode ist die Verwendung von Modellen aus Papier, die mit einer mikrowellensensitiven Farbe bemalt sind. Die Farbe reagiert auf die vorhandene Feldverteilung mit einem Farbumschlag, der je nach Farbe permanent oder zeitlich begrenzt sein kann.

Dieses Verfahren gibt eine gute Möglichkeit, die Feldverteilung volumetrisch in der Kammer zu ermitteln. Der Aufwand der Modellerstellung ist für eine Optimierung zu aufwendig, so dass eine dritte Möglichkeit der Feldverteilungsaufnahme in Erwägung gezogen wurde.

Folien auf Basis von Flüssigkristallen zeigen unter Mikrowelleneinfluss einen Temperaturumschlag in einem Temperaturintervall von 5°C. Die Eigenschaften der Folien eignen sich gut, um die Feldverteilung für die Verarbeitung der Vergussmassen abzubilden, da hierbei ein Temperaturbereich von +/- 1°C notwendig ist. Die Folie kühlt, aufgrund ihrer großen Oberfläche sehr schnell nach der Mikrowelleneinwirkung ab. Die genaue Aufzeichnung und Verifizierung der Feldverteilung ist daher sehr schwierig. Damit die Feldverteilung photographisch festgehalten werden kann, wird die Folie auf MDF Holzplatten geklebt, diese speichern die durch die Mikrowelle entstehende Wärme und gibt diese langsam an die Folie ab. Eine Aufzeichnung der Feldverteilung ist damit möglich.

Die Im Folgenden dargestellten Feldverteilungen wurden alle mit Hilfe der Flüssigkristallfolien und MDF Platten aufgezeichnet.

Ferner kam im weiteren Verlauf des Projektes eine Thermografie-Kamera zum Einsatz, die zu diesem Zweck zusätzlich aus Eigenmitteln beschafft wurde.

5.1.2 Einkopplungsvariante: Ring- Schlitz-Hohlleiter

Bei dieser Einkopplungsvariante wird die 2,45 GHz Frequenz über einen Hohlleiter mit 12 gleichmäßig angeordneten Schlitzen eingekoppelt. Die maximale Leistung des 2,45 GHz-Magnetrons beträgt 1,5 kW. Die Einkopplung findet dabei über die E-Feld-Komponente statt. Die Mikrowellenfrequenz 5,8 GHz besitzt eine kleinere Wellenlänge und wird ebenfalls über einen Ring-Schlitz-Hohlleiter in die Mikrowellenkammer eingekoppelt. Die Einkopplung erfolgt hierbei über 32 gleichmäßig angeordnete Schlitze. Die maximal einkoppelbare Leistung beträgt bei dieser Frequenz 0,6 kW. Der Aufbau der Einkopplungsvariante ist in Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 zu sehen.

In Abbildung 5.2 sind die untersuchten Ebenen in der Mikrowellenkammer markiert. Ziel ist hierbei zu analysieren, in welcher Ebene die Feldverteilung für die spätere Materialverarbeitung am homogensten ist. Es wurden für eine Untersuchung drei Ebenen gewählt. Im Folgenden mit untere, mittlere und obere Ebene bezeichnet.

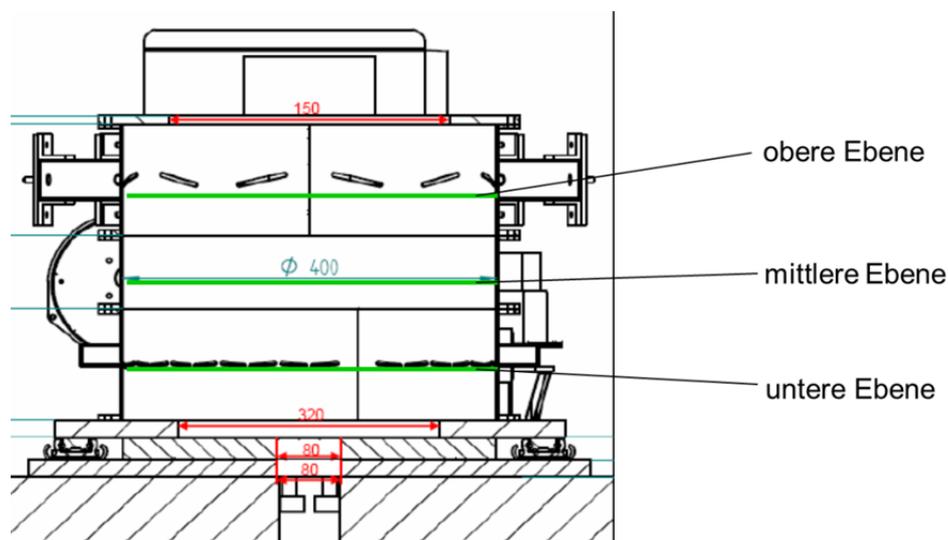


Abbildung 5.2: Querschnitt durch Mikrowellenanlage (Ring-Schlitz-Hohlleiter)

(Quelle: Fricke und Mallah)

Feldverteilung der Einkopplungsvariante Ring-Schlitz-Hohlleiter

Abbildung 5.3 zeigt mit dem Programm Comsol Multiphysics erstellte Simulationen der zu erwartenden Feldverteilungen bei 2,45 GHz und 5,8 GHz. Es ist von einer symmetrischen Feldverteilung im Kammerinnern auszugehen. Die Abweichungen zur tatsächlichen Feldverteilung werden anhand von Praxisversuchen erarbeitet.

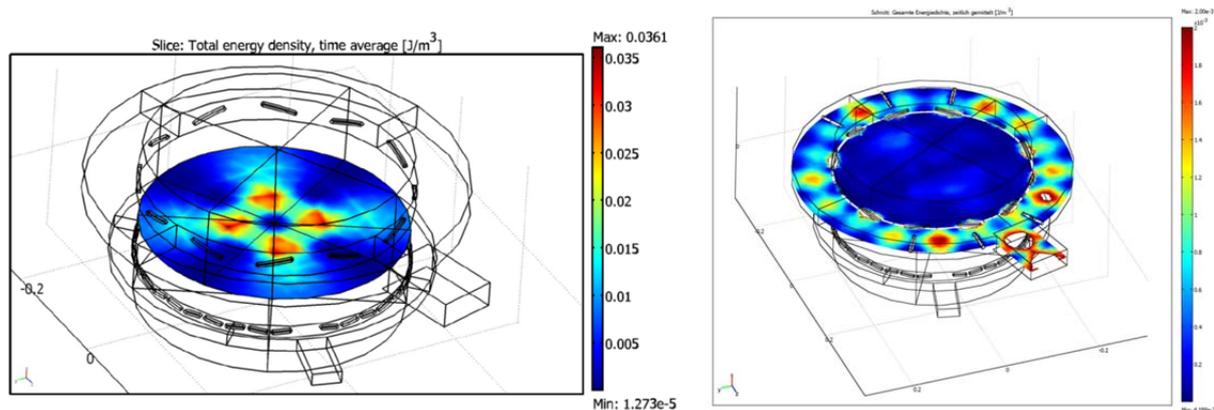


Abbildung 5.3: Simulation der Feldverteilung mit Comsol

Die Feldverteilung der realen Kammer wird hierzu zunächst mit Hilfe der mikrowellensensitiven Farbe ermittelt. Die Bilder werden mit Hilfe einer Videokamera aufgezeichnet, die im Deckel der Mikrowellenanlage integriert ist. Abgeschirmt wird die Mikrowellenleistung durch eine kombinierte Schraubverbindung mit einem leitfähigen, engmaschigen Gitter. Die Bilder zeigen demzufolge lediglich einen Ausschnitt in der Mitte der Mikrowellenanlage. Für die spätere Integration der Mikrowellenanlage in die Duroplastpresse ist dieser Bereich für die Verarbeitung interessant und damit repräsentativ.

Die Darstellung der gesamten Fläche ist mit diesem Verfahren nicht möglich, da das Öffnen der Anlage zu zeitaufwendig ist und der Farbumschlag der mikrowellensensitiven Farbe sich bereits revidiert hat.

Die Ergebnisse zeigen folgende, in Abbildung 5.4 dargestellten, Ergebnisse für die untere Ebene. Untersucht wird die Feldverteilung bei 2,45 GHz und unterschiedlichen Leistungseinstellungen. In Abbildung 5.5 sind die Ergebnisse der 5,8 GHz Frequenz dargestellt. Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigen die gleichen Zusammenhänge für die mittlere Ebene.

Die Feldverteilung zeigt eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit. Die Feldverteilung ist für jede der untersuchten Frequenzen statisch und ändert sich nicht wesentlich durch eine Veränderung der eingekoppelten Leistung. Zu sehen ist, dass die Feldmaxima durch eine höhere Leistung aufgeprägter durch die angewendete Visualisierung dargestellt werden können.

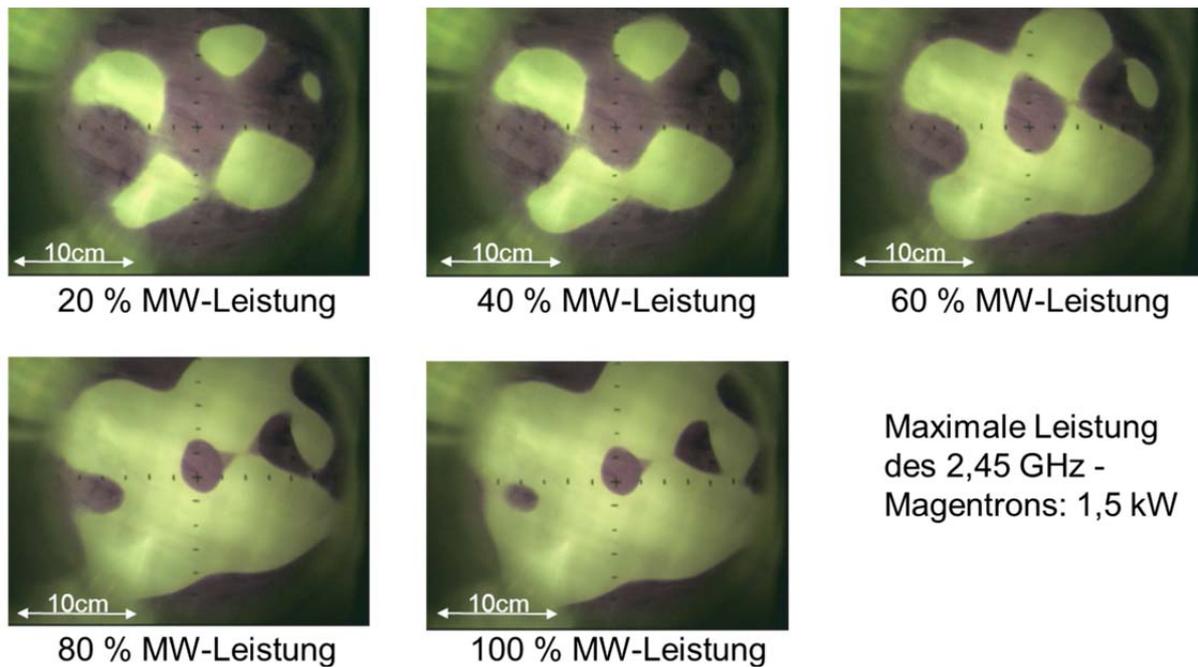


Abbildung 5.4: Feldverteilung in der Mikrowellenkammer (Ring-Schlitz-Hohlleiter), unterste Ebene bei unterschiedlichen Leistungsstufen der Mikrowellenfrequenz 2,45 GHz

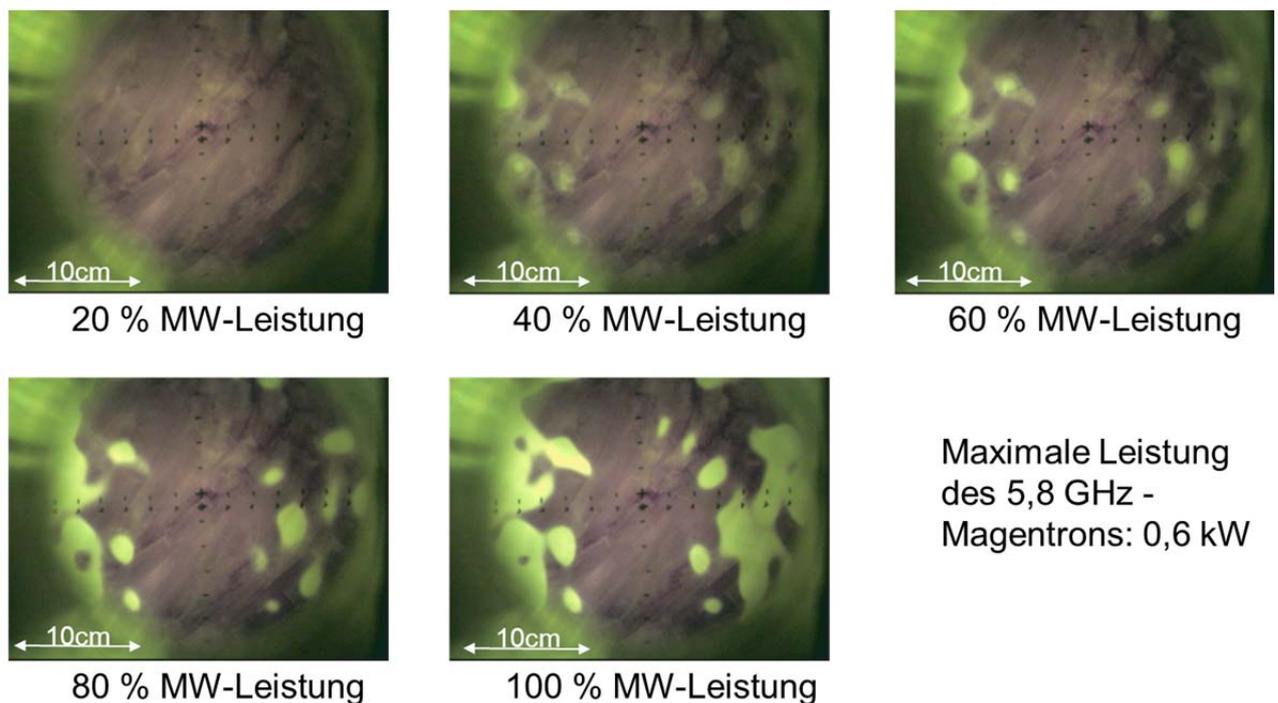


Abbildung 5.5: Feldverteilung in der Mikrowellenkammer (Ring-Schlitz-Hohlleiter), unterste Ebene bei unterschiedlichen Leistungsstufen der Mikrowellenfrequenz 5,8 GHz

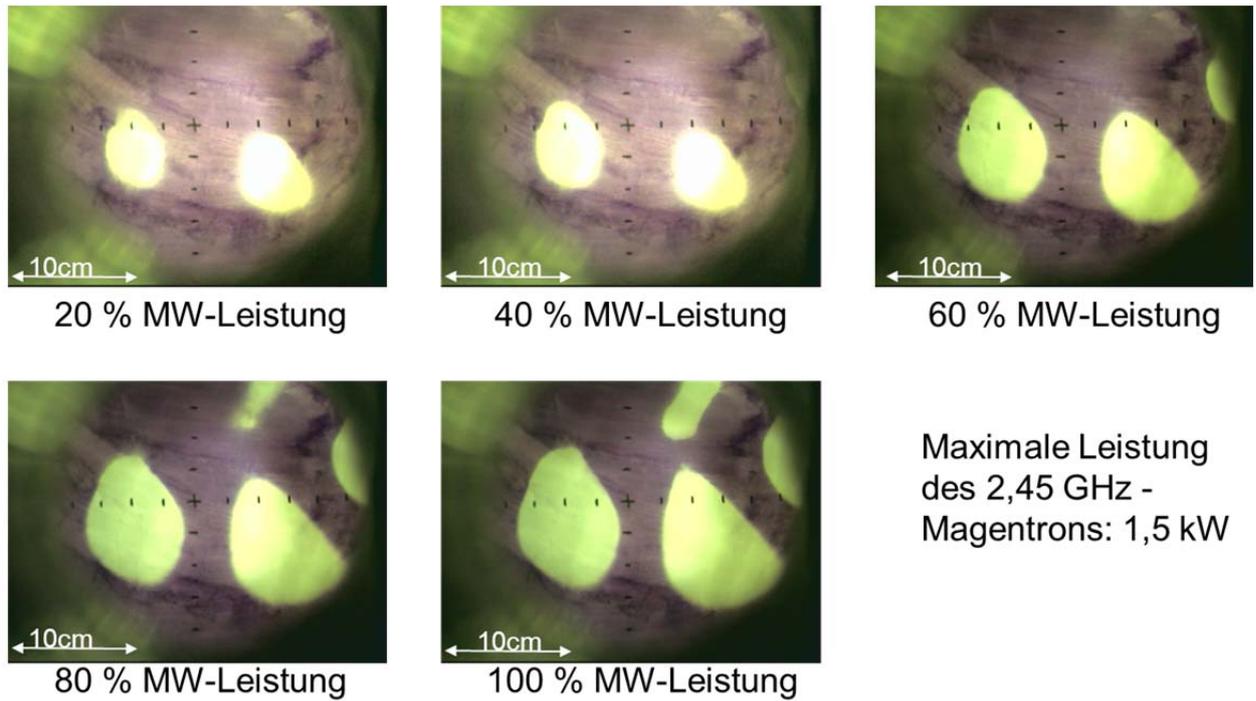


Abbildung 5.6: Feldverteilung in der Mikrowellenkammer (Ring-Schlitz-Hohlleiter), mittlere Ebene bei unterschiedlichen Leistungsstufen der Mikrowellenfrequenz 2,45 GHz

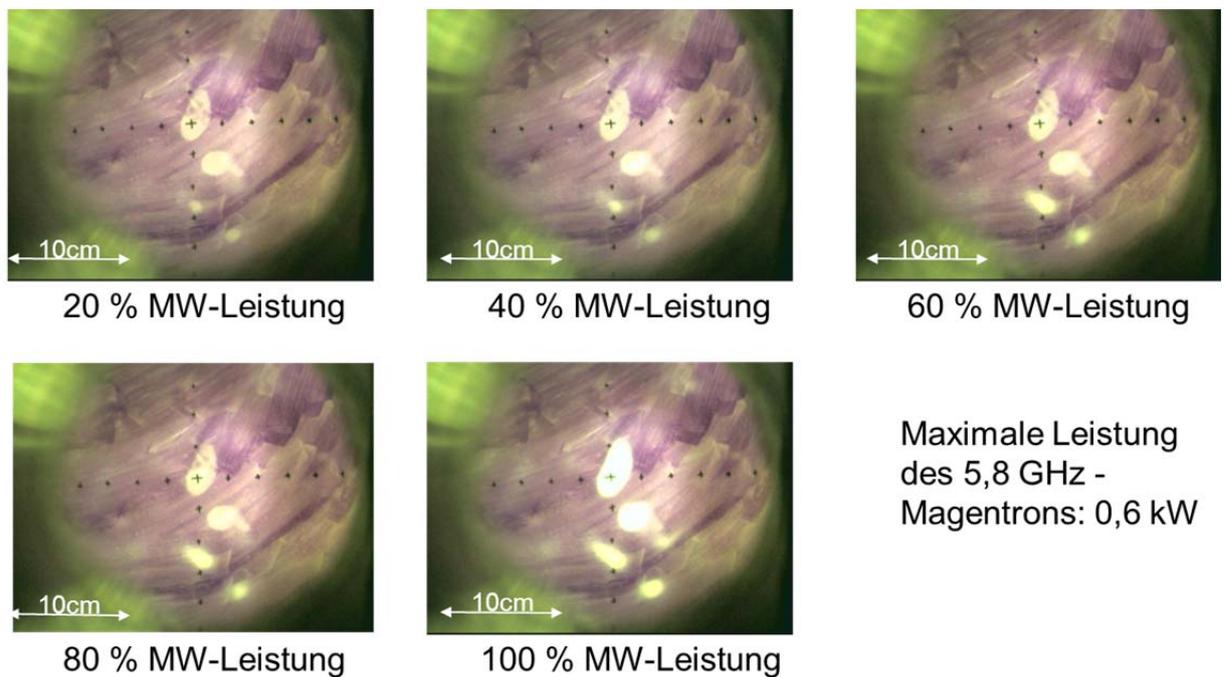


Abbildung 5.7: Feldverteilung in der Mikrowellenkammer (Ring-Schlitz-Hohlleiter), mittlere Ebene bei unterschiedlichen Leistungsstufen der Mikrowellenfrequenz 5,8 GHz

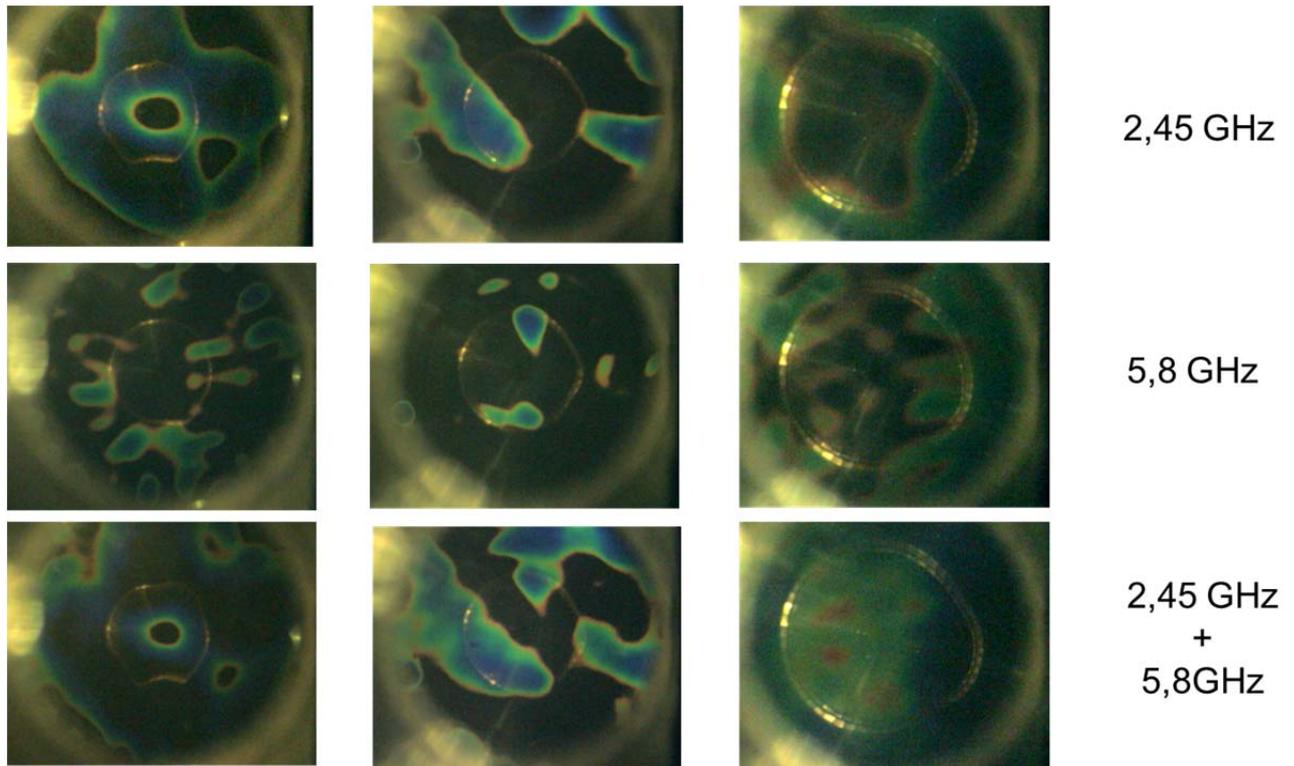


Abbildung 5.8: Feldverteilung in der Mikrowellenkammer (Ring-Schlitz-Hohlleiter), unterste, mittlere und oberste Ebene bei 2,45 GHz, 5,8 GHz und in Kombination der beiden Mikrowellenfrequenzen

Gleichartige Untersuchungen wurden des Weiteren mit einer Flüssigkristallfolie durchgeführt. Der Vorteil dieser Folie ist die quantitative Visualisierung der Feldverteilung. In einem Temperaturbereich von 35 °C bis 40 °C zeigt die Flüssigkristallfolie einen Farbumschlag und eine Differenzierung der Temperaturverteilung in dieser Ebene. In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst. Es sind auch bei dieser Visualisierungsmethode Unterschiede in der Feldverteilung erkennbar. Bei keiner der gewählten Einstellungen ist eine homogene Feldverteilung ersichtlich. Sowohl die einzelnen Frequenzen als auch die Kombination aus beiden zeigen kein brauchbares Feldverteilungsbild.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde analysiert, welche Feldverteilung durch die einzelnen Schlitze des Ring-Schlitz-Hohlleiters bei der Frequenz 2,45 GHz eingekoppelt wird. Dazu werden die Schlitze zunächst nummeriert. Die Nummerierung ist Abbildung 5.9 zu entnehmen.

Für die Untersuchungen eines einzelnen Schlitzes werden die anderen elf Schlitze mit einer klebenden Aluminiumfolie abgedeckt, so dass der Hohlleiter in diesem Bereich abgeschlossen ist und durch sie keine Leistung in die Mikrowellenkammer eingekoppelt wird. Der zu untersuchende Schlitz wird offen gelassen und über ihn die Mikrowellenleistung in die Kammer gespeist.

Für die Visualisierung werden MDF-Platten mit 10 mm x 10 mm großen Flüssigkristallplättchen bestückt. Da diese Platten die Mikrowellenenergie absorbieren und speichern, kann der Farbumschlag der Folie für einen längeren Zeitraum sichtbar gemacht werden. Es sind Aufnahmen der Feldverteilung auch außerhalb der Mikrowellenkammer

möglich. Die durchgeführten Untersuchungen erfolgen bei 50 % Leistung, was etwa 750 W entspricht. Diese Leistung wird für 30 Sekunden in die Kammer eingespeist.

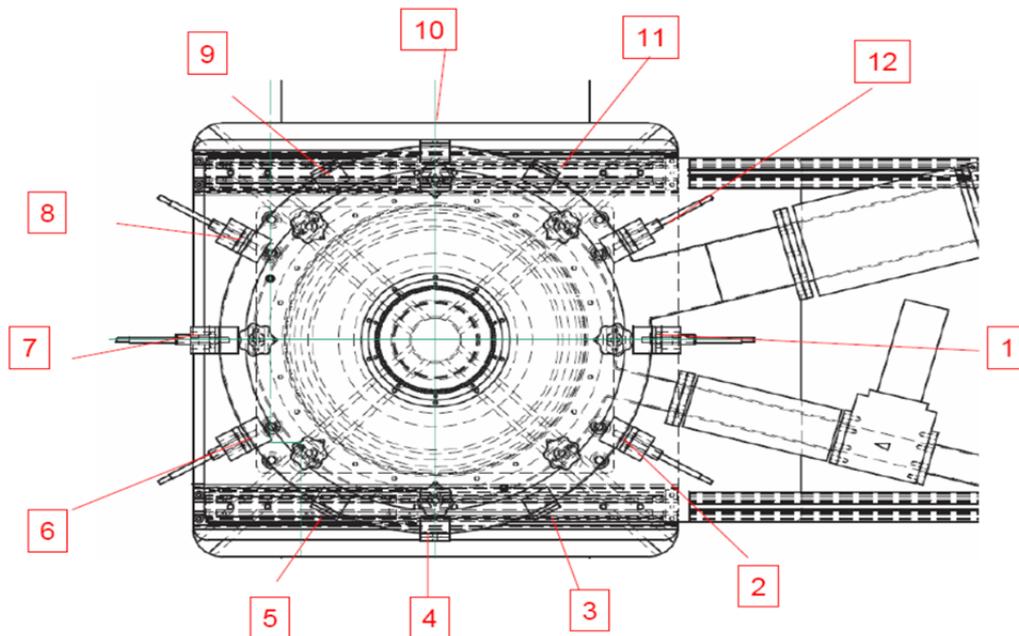


Abbildung 5.9: Schlitznummerierung des 2,45 GHz Ring-Schlitz Hohlleiters für die Untersuchungen der einzeln durch die Schlitze eingekoppelte Feldverteilung

(Quelle: Fricke und Mallah)

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Einzelschlitze sind in Abbildung 5.10 für die Schlitze eins bis zwölf zusammengefasst.

Bei allen Schlitzen zeigt sich ein individuelles Feldverteilungsbild. Aufgrund der Rasterung der Flüssigkristallfolie, können die Feldverteilungen miteinander verglichen werden. Die Einkopplung über die einzelnen Schlitze ist sehr unterschiedlich. Manche Schlitze, beispielsweise Schlitz eins, Schlitz neun und Schlitz elf zeigen einen sehr hohen eingekoppelten Anteil. Über Schlitz drei, Schlitz zehn und Schlitz zwölf scheint kaum Leistung in die Mikrowellenkammer eingekoppelt zu werden. Die Abstimmung des Ring-Schlitz-Hohlleiters sollte eigentlich so erfolgen, dass durch jeden Schlitz in etwa der gleiche Anteil an Mikrowellenleistung in die Kammer appliziert wird. Dies kann für die vorliegende Kammer nicht bestätigt werden. Es zeigen sich deutliche Unterschiede. Für weitere Untersuchungen werden die festgestellten Feldverteilungen auf Folien gedruckt und durch Superposition geeignete Schlitzkombinationen gewählt, die zusammengesetzt eine homogene Feldverteilung in der Mitte der untersuchten Ebene gewährleisten.

Die vielversprechendsten Schlitzkombinationen werden in Realität durch Öffnen der Schlitze und Abkleben der Schlitze, die nicht relevant sind, nachgestellt. Allerdings war es auch für verschiedenste Schlitzkombinationen nicht möglich, eine Feldverteilung zu erreichen, die für die Verarbeitung der Materialien verwendet werden kann. Das Feld ist weiterhin zu inhomogen.

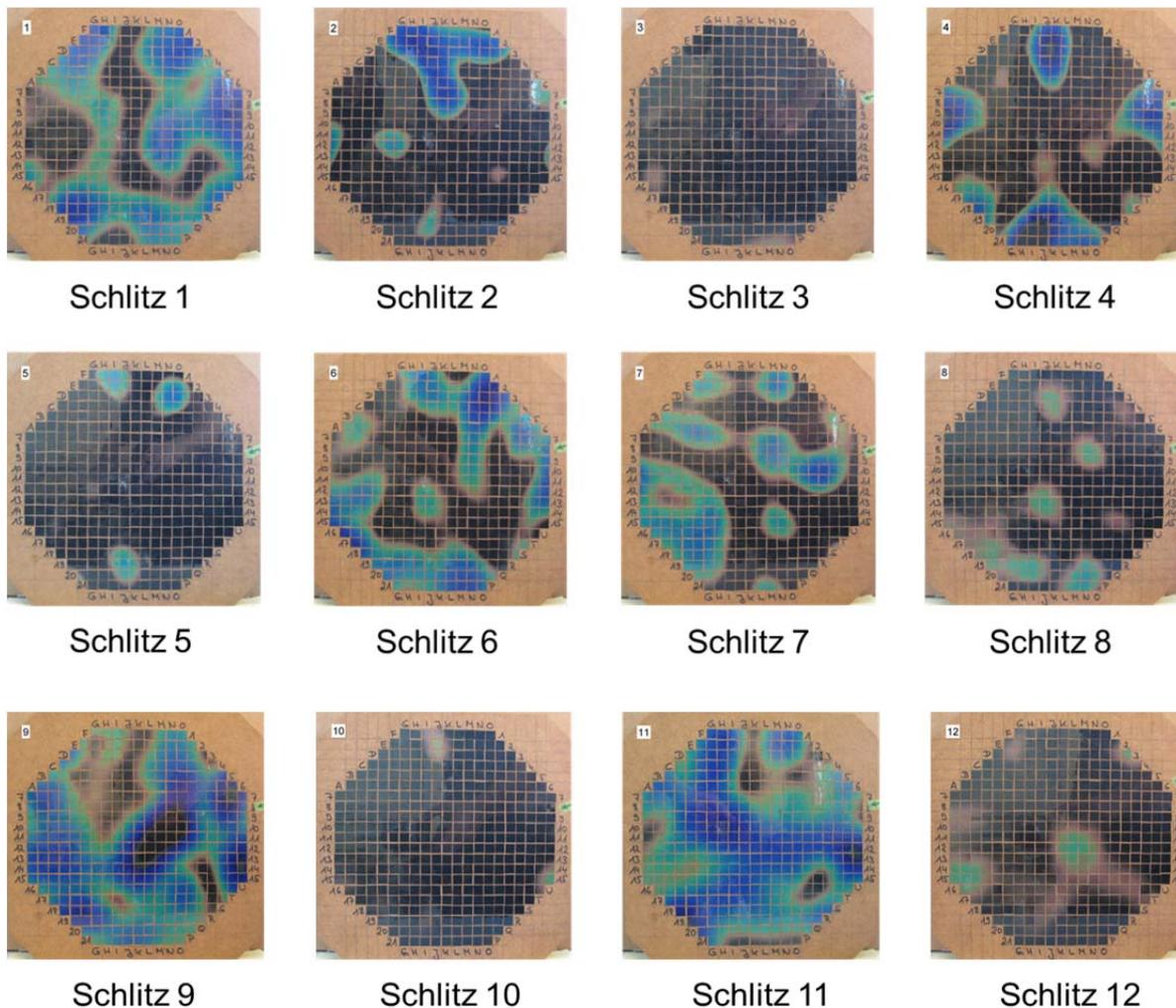


Abbildung 5.10: Feldverteilung der Einzelschlitze bei 2,45 GHz

5.1.3 Antenneneinkopplung

Aufgrund der geschilderten Probleme mit dem Ring-Schlitz-Hohlleiter, wurde eine zweite Variante die Mikrowellenenergie in die Kammer einzukoppeln evaluiert. Diese arbeitet mittels Antennen und wurde durch den Mikrowellenhersteller zusätzlich konstruiert und beige stellt. Für jede Frequenz stehen vier Antennen zur Verfügung.

Die Antennen der 2,45 GHz – Frequenz stehen waagrecht in die Kammer und sind über einen Drehmechanismus in ihrer Länge variabel. Die Antennen können um 28 mm in ihrer Länge variiert werden. Laut Angaben der Firma Fricke und Mallah soll durch eine Verlängerung der Antennen eine Verschiebung der Feldverteilung in das Zentrum der Kammer erfolgen.

Die Antennen der 5,8 GHz – Frequenz ragen senkrecht in die Kammer. Die Länge der Antennen ist fest und nicht veränderbar. In Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 ist der Aufbau der Antenneneinkopplung schematisch dargestellt.

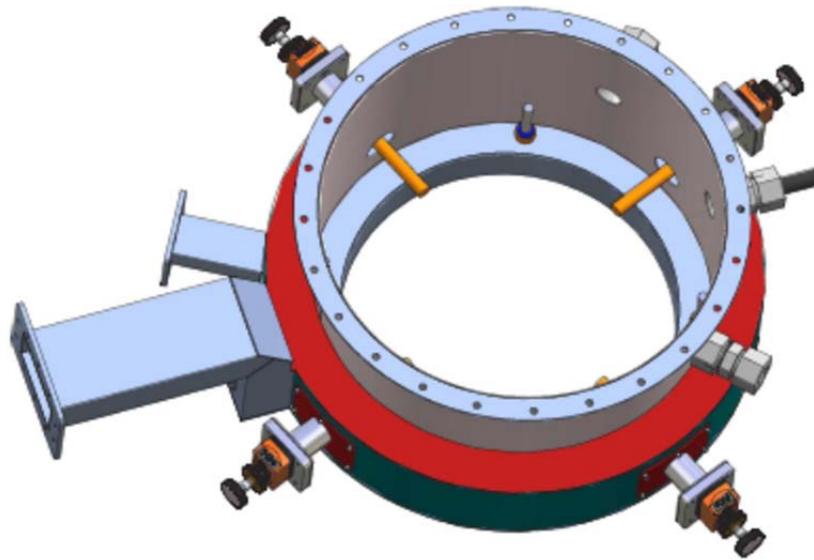


Abbildung 5.11: Einkopplungsvariante Antenneneinkopplung (Quelle: Fricke und Mallah)

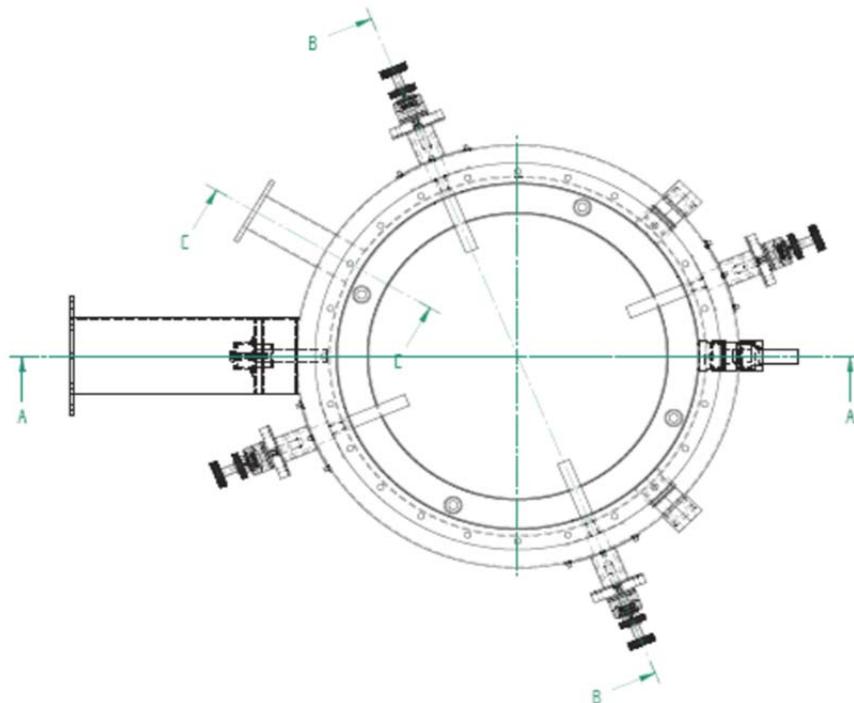


Abbildung 5.12: Technische Zeichnung Antenneneinkopplung (Quelle: Fricke und Mallah)

Feldverteilung der Einkopplungsvariante Antenneneinkopplung

Die Feldverteilung der Antenneneinkopplungsvariante wird mit den MDF-Platten, bestückt mit Flüssigkristallfolie, aufgenommen. Das Verfahren hat sich bei der Untersuchung des Ring-Schlitz-Hohlleiters als das praktikabelste erwiesen.

Untersucht wurde zunächst die Feldverteilung bei einer Einkopplung von beiden Frequenzen gleichzeitig. Es wurden auch bei dieser Variante verschiedene Ebenen in der Mikrowellenkammer untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

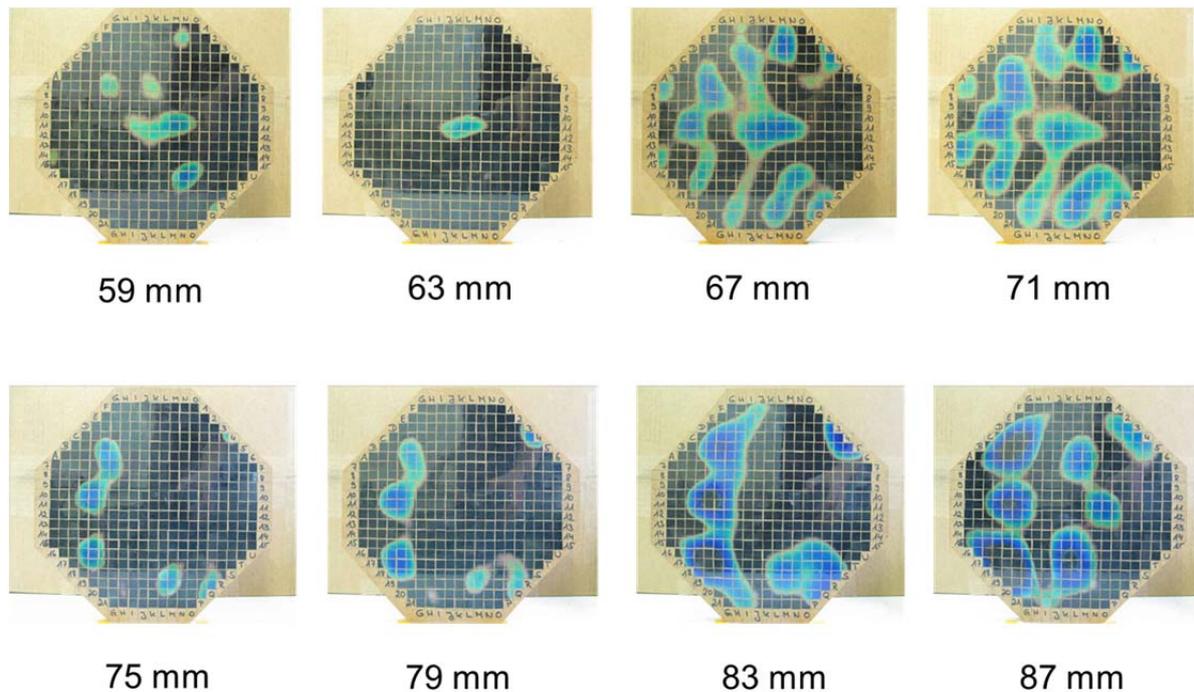


Abbildung 5.13: Feldverteilung Antenneneinkopplung verschiedene Ebenen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Feldverteilung innerhalb der untersuchten Ebenen stark variiert. In der Kammer gibt es bei konstanten Parametern, wie Leistung und Frequenz, Bereiche, die kaum einen Feldanteil zeigen. Andere Bereiche erwärmen sich stark. Eine deutliche Ausprägung von Hot- und Cold-Spots lässt sich auch für diese Einkopplungsvariante feststellen. Die Ergebnisse lassen sich sehr gut reproduzieren, sodass von einer konstanten, statischen, jedoch nach wie vor sehr inhomogenen Feldverteilung auszugehen ist.

Auch bei dieser Variante zeigen sich keine Verbesserungen, um großflächige Proben homogen in der Mikrowelle zu verarbeiten. In Anbetracht dieser Tatsache wird vom Mikrowellenhersteller die Modifikation der Antennenspitzen angedacht. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche werden im nächsten Abschnitt präsentiert.

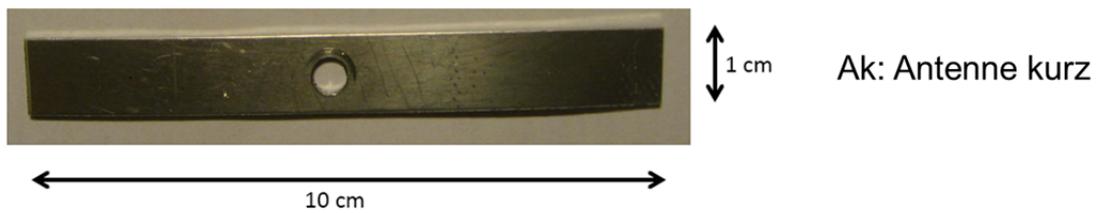
Modifikation der Antennenspitzen

Die Möglichkeit die Antennenspitze der 2,45 GHz Frequenz zu modifizieren, um damit die Feldverteilung in der Kammer zu beeinflussen, wird als nächster Schritt angewendet. Hierzu wird ein Blechstück mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 1 mm auf eine Antennenspitze geschraubt, im Folgenden als „Antenne kurz Ak“ bezeichnet. Die modifizierte Antenne wird anschließend in Abständen durch Drehen verlängert und in die Kammer geführt. Die Versuche werden zusätzlich mit einer längeren Antenne „Antenne lang Al“ mit den Abmessungen 120 mm x 10 mm x 1 mm durchgeführt. Abbildung 5.14 zeigt den Aufbau der verwendeten Antennen.

Die Nummerierung der Antennen erfolgt in Anlehnung an Abbildung 5.15. Die Ergebnisse der Feldverteilungsaufnahmen werden im Folgenden vorgestellt. Die Beschriftung der Bilder setzt sich aus den vier Antennen und deren zusätzlicher Länge in der Kammer zusammen.

Zusätzlich steht hinter der Antennenangabe noch die Modifizierungsart „Al“ Antenne lang oder „Ak“ Antenne kurz.

Variante 1: Blechdicke 1 mm



Variante 2: Blechdicke 1 mm

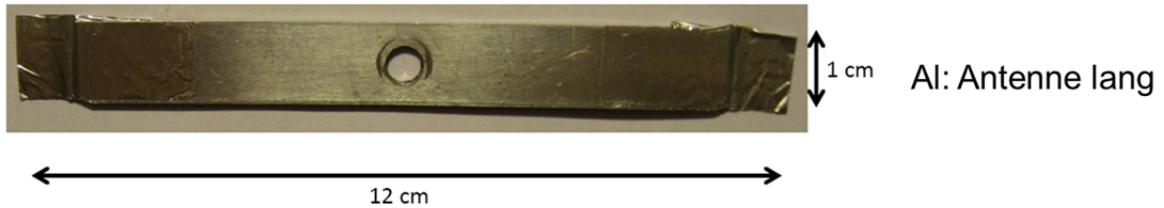


Abbildung 5.14: Antennenspitzen Antenne lang und Antenne kurz

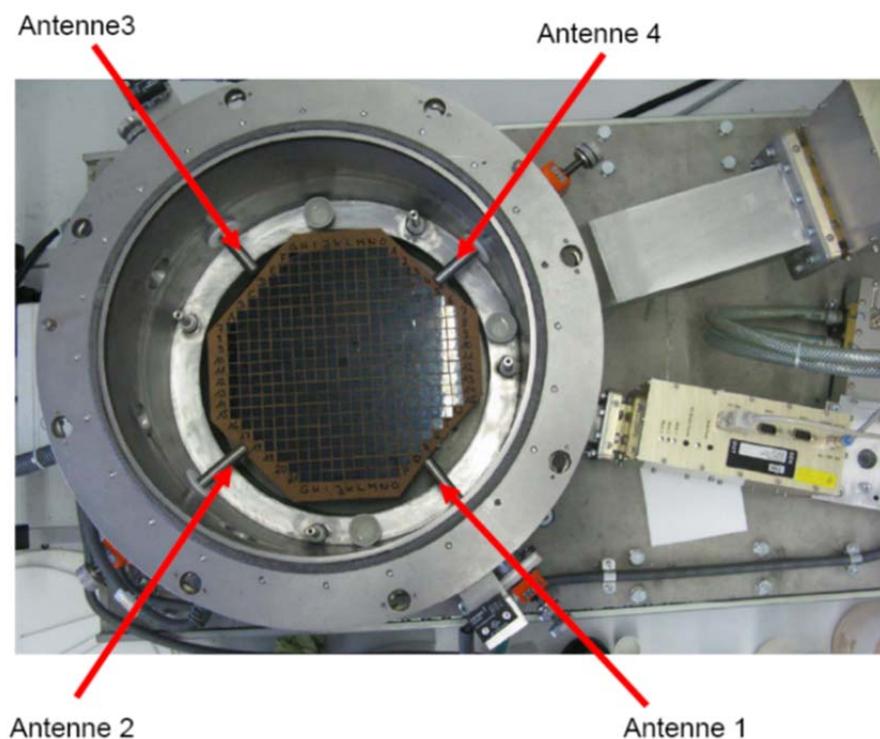


Abbildung 5.15: Nummerierung der 2,45 GHz – Antennen

Die Ergebnisse der Feldverteilungen sind für die Antenne vier stellvertretend für alle Versuche in Abbildung 5.16 dargestellt.

Eine Modifikation der Antennenspitze zeigt eine Veränderung der Feldverteilung. Es ist allerdings durch die modifizierte Spitze keine Homogenisierung der Feldverteilung erreichbar. Die Ausbildung von Hot- und Cold-Spots findet auch unter diesen Randbedingungen statt. Es zeigt sich jedoch, dass durch die Ausführung der modifizierten Antennenspitze keine Veränderung der Feldverteilung erreichbar ist. Ein Vergleich der Feldverteilung mit der längeren Antennenspitze zeigt im Vergleich zur kürzeren keine markanten Unterschiede. Die qualitative Feldverteilung bleibt unverändert. Die Verlängerung der Antenne in den Mikrowellenraum zeigt, entgegen der vorherigen Annahme ebenfalls keinen Einfluss. Die Ergebnisse zeigen, dass die Feldverteilung lediglich geringfügig intensiviert wird.

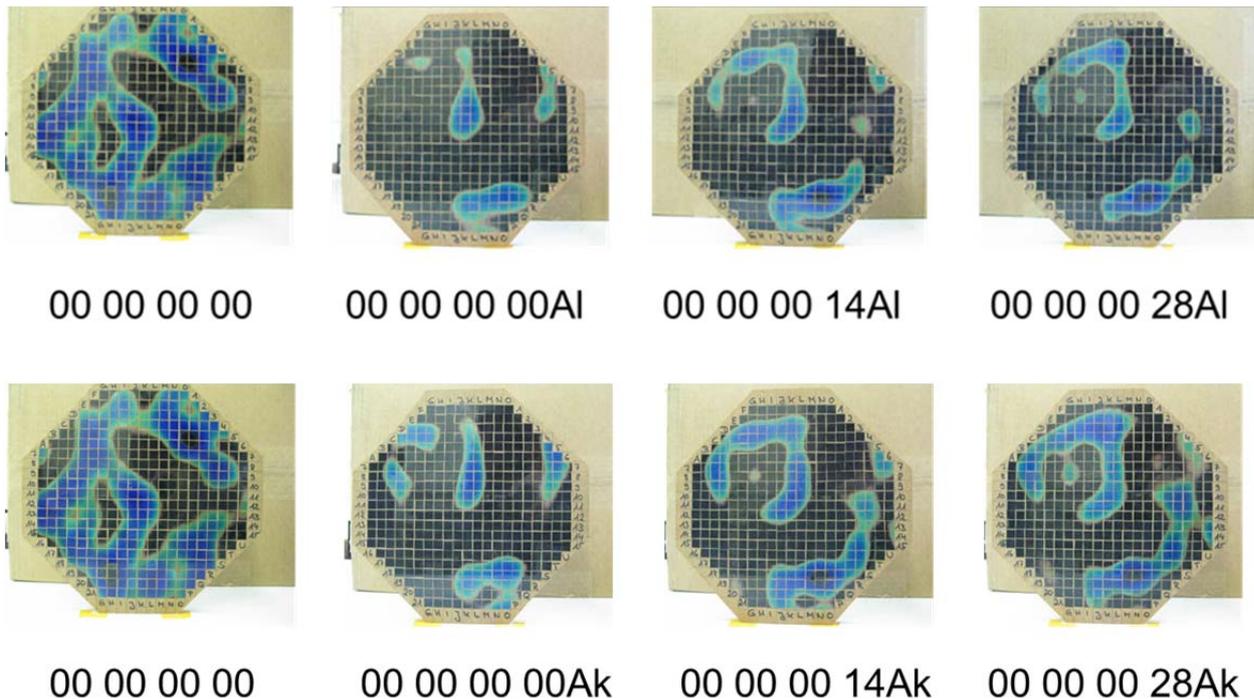


Abbildung 5.16: Feldverteilung Antenneneinkopplung mit einer modifizierten Antenne

Die Ergebnisse zeigen, dass auch eine Modifizierung der Antennen keine Verbesserung der Feldverteilung bewirkt. Ebenso zeigt sich für keine der Ebenen eine Verschiebung der Feldverteilung durch Verlängerungen einzelner Antennen in das Zentrum der Mikrowellenkammer.

Drehen der Antennenspitze

Auf Anraten des Mikrowellenherstellers sollten die aufgeschraubten Flachantennen um jeweils 45° gedreht werden. Die Ansicht ist schematisch in Abbildung 5.17 aufgezeigt. Es soll versucht werden, dadurch eine Veränderung der Feldverteilung zu erreichen, über die eine Homogenisierung des Feldes ermöglicht werden soll.

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die Bezeichnung rot, grün und blau richtet sich an der vorhandenen Skizze in Abbildung 5.18. Die Mikrowelleneinstellung beträgt 750 W bei 2,45 GHz und 600W bei 5,8 GHz für 30 Sekunden.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.18 sind exemplarisch für die Antenne vier dargestellt. Die Versuche bei den anderen drei Antennen zeigen ähnliche Effekte und werden daher hier nicht weiter aufgeführt. Mit der Drehung der Antennenspitze kann die Intensität der Feldverteilung geringfügig variiert werden. Eine Verschiebung der sich ausbildenden Hot- und Cold-Spots ist nicht zu erkennen.

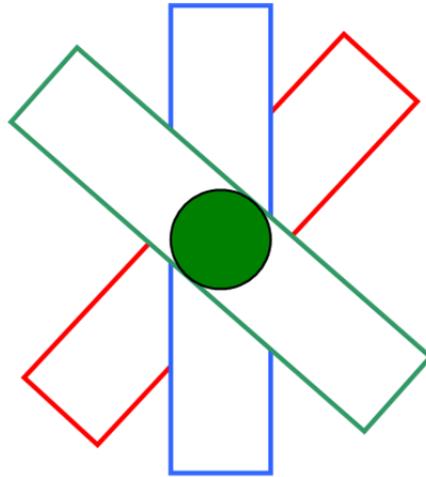


Abbildung 5.17: Drehen des Antennenspitzen zur Homogenisierung der Feldverteilung, dargestellt ist die Draufsicht auf die Antenne

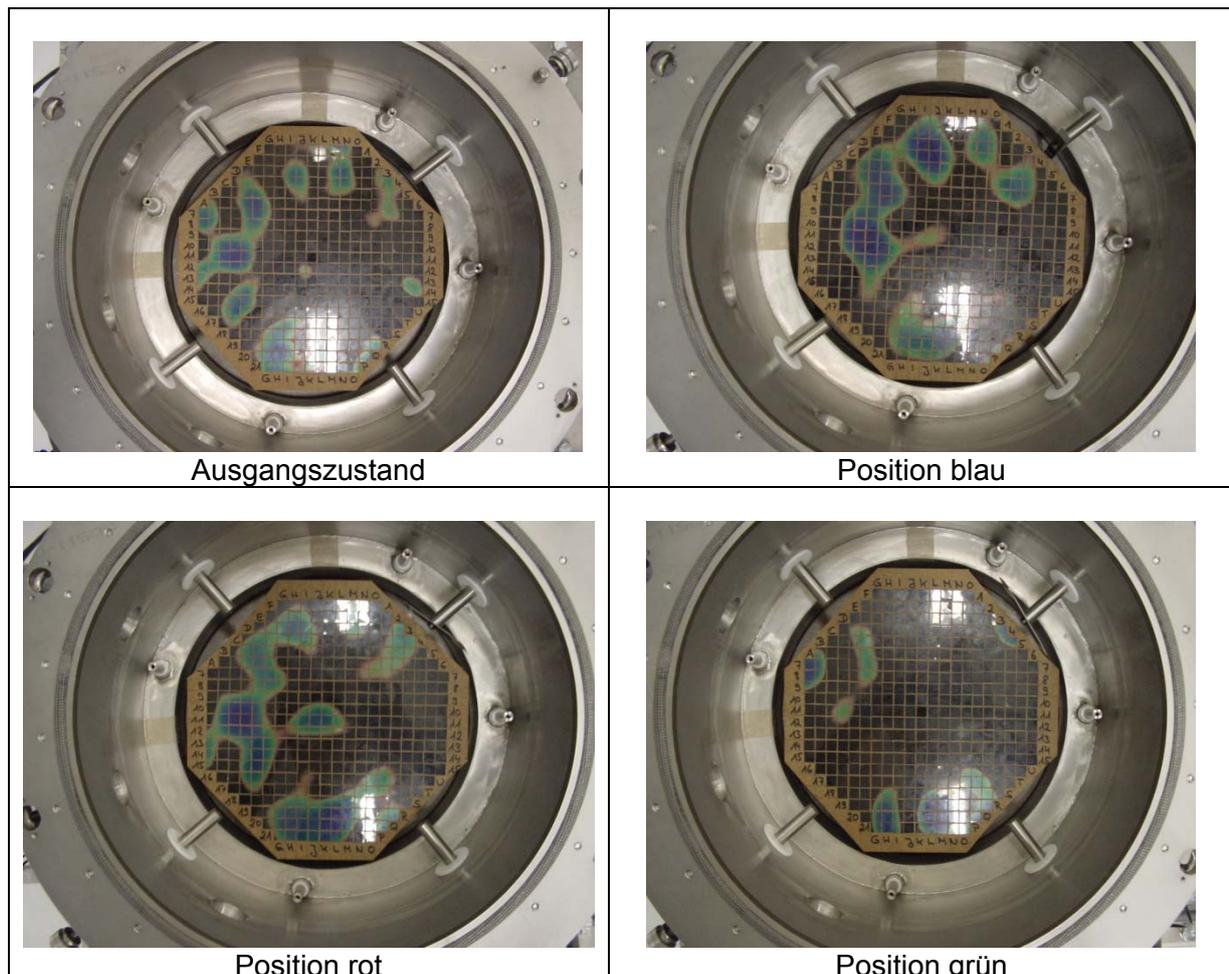


Abbildung 5.18: Feldverteilung mit gedrehter Antennenspitze

Verbindung der Antennenspitzen

Als weitere Option werden die vier Antennen jeder Frequenz mit einer Ring-Antenne verbunden. Der Aufbau und die dazugehörige Feldverteilung sind in Abbildung 5.19 für die Mikrowellenfrequenz 2,45 GHz dargestellt. Bei diesen Versuchen wird mit beiden Frequenzen gleichzeitig gearbeitet. Für die Darstellung des Feldes wird bei der Frequenz 2,45 GHz mit 750 W und bei der 5,8 GHz mit 600 W für 30 Sekunden eingekoppelt.

Es zeigt sich durch die zusätzliche Antenne eine Veränderung der Feldverteilung. Die zusätzliche Antenne scheint die Feldverteilung weiter an den Kammerrand zu verschieben. Allerdings zeigt sich durch die zusätzliche Applikation keine Verbesserung des Feldes. Auch dieser Aufbau ist für die Verarbeitung von rieselfähigen Formmassen nicht geeignet, da im Kammerinneren keine homogene Feldverteilung erzeugt werden kann.

Der gleiche Versuch wird für die 5,8 GHz Frequenz durchgeführt. Auch hierbei werden die Antennen mit einer Flachantenne verbunden. Der Aufbau und die Ergebnisse sind in Abbildung 5.20 zu sehen. Bei diesem Versuch wird ebenfalls die andere Frequenz zusätzlich in die Kammer eingekoppelt. Es zeigt sich auch durch die Verbindung der 5,8 GHz-Antennen keine Homogenisierung des Feldes.

Verbindung der vier
2,45 GHz-Antennen

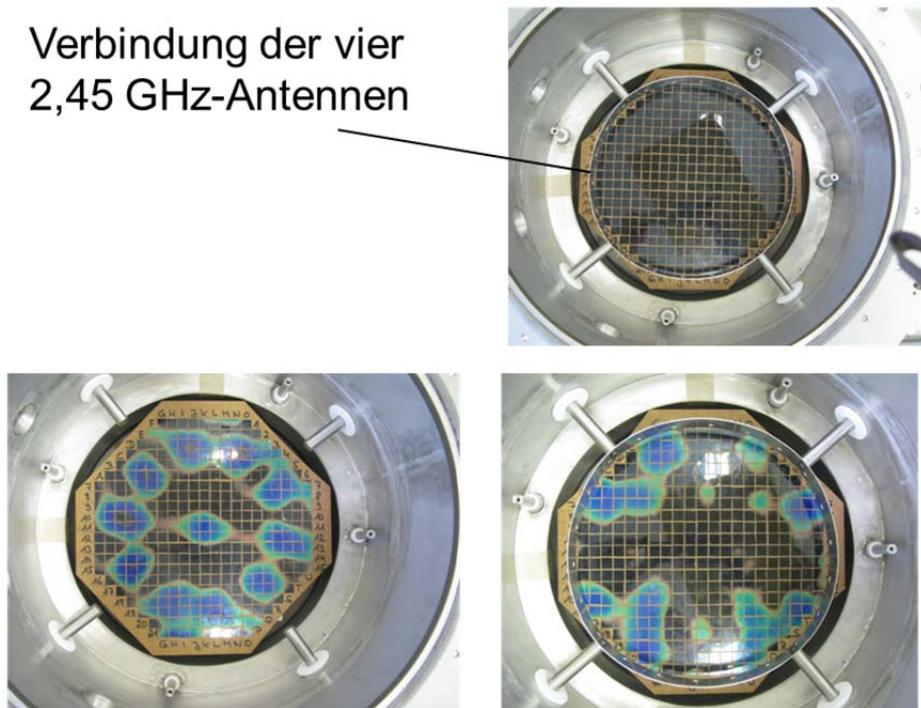


Abbildung 5.19: Verbundene Antennen 2,45 GHz

Verbindung der vier
5,8 GHz Antennen

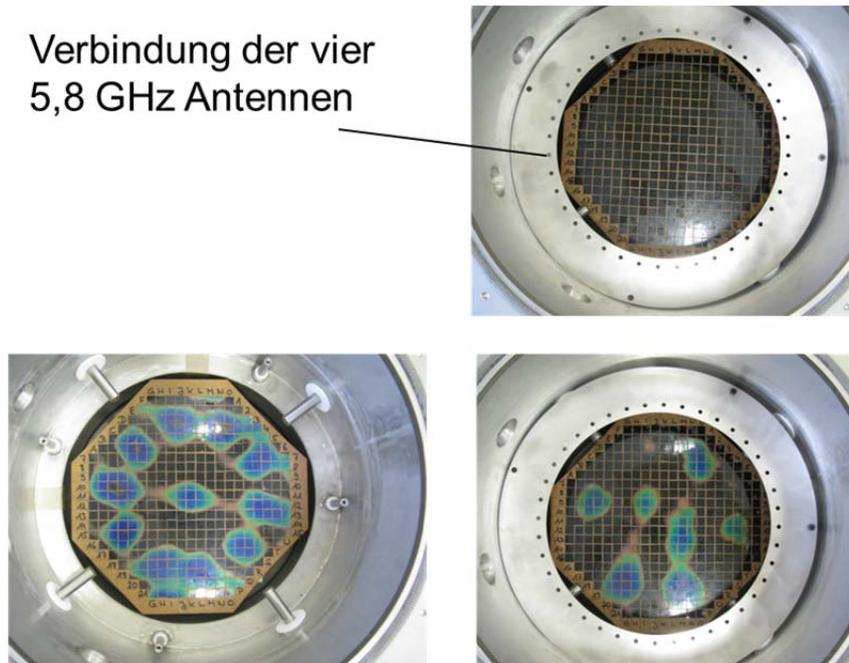
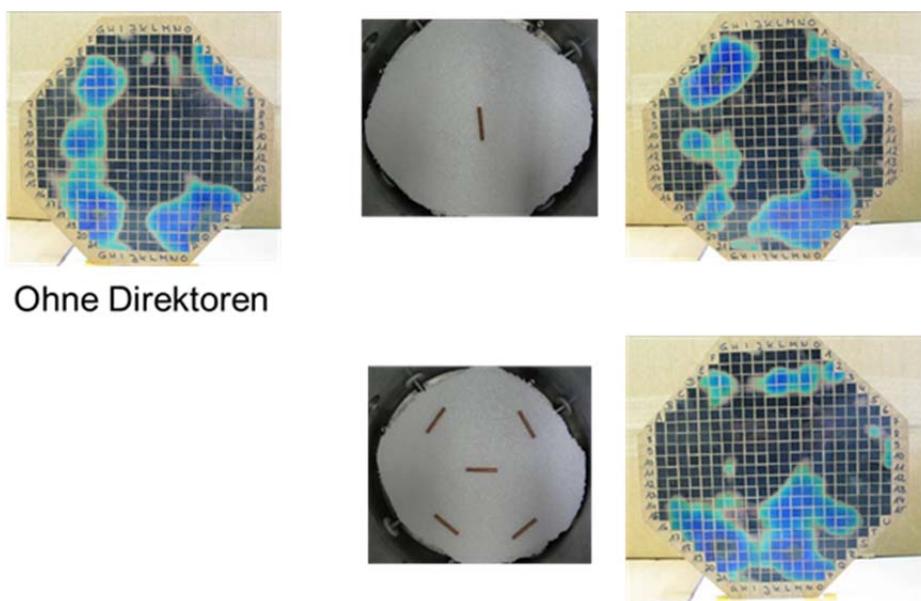


Abbildung 5.20: Verbundene Antennen 5,8 GHz

5.1.4 $\lambda/2$ -Direktoren und zirkularpolarisierte Direktoren

Als weitere Modifikationsmöglichkeit wird untersucht, ob die Anwendung von Direktoren in der Mikrowellenkammer eine Homogenisierung der Feldverteilung bewirkt. Dazu werden $\lambda/2$ -Direktoren, bezogen auf die Wellenlänge der 2,45 GHz Frequenz, ausgewählt. Die Direktoren sollen in Resonanz mit den eingekoppelten Mikrowellen treten und diese gerichtet wieder abstrahlen. Ziel ist es, hierdurch die Inhomogenität des Feldes innerhalb der Kammer zumindest teilweise auszugleichen.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22 dargestellt.



Ohne Direktoren

Abbildung 5.21: Feldverteilung 2,45 GHz mit $\lambda/2$ - Direktoren

Die Verwendung von einzelnen $\lambda/2$ -Direktoren in der Mikrowellenkammer bewirkt keine Homogenisierung der Feldverteilung für die Aushärtung großflächiger Proben. Für die Untersuchungen wurden zusätzlich Kombinationen von mehreren Direktoren verschieden in der Mikrowellenkammer positioniert. Die Formationen sind den jeweiligen resultierenden Feldverteilungen zugeordnet. Die Verwendung mehrerer $\lambda/2$ -Direktoren führt zwar zu einer leichten Verbesserung der Feldverteilung; gleichwohl zeigt sich bei allen Versuchen nach wie vor die Ausbildung von Hot- und Cold-Spots.

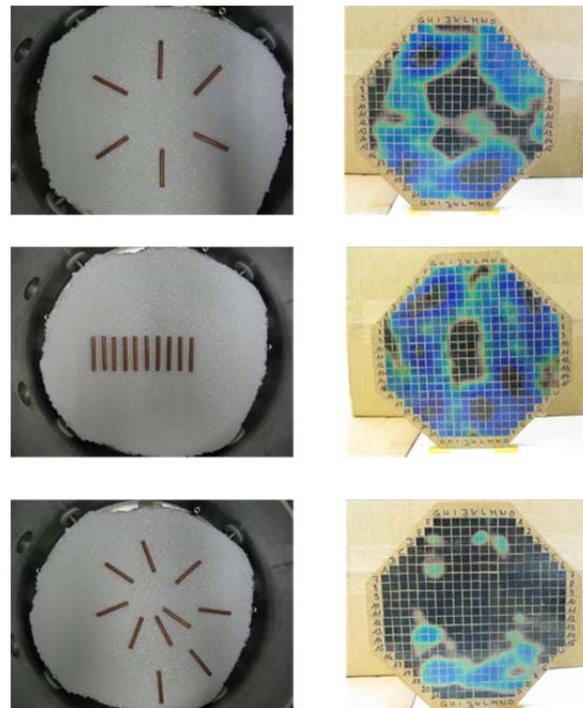


Abbildung 5.22: Feldverteilung 2,45 GHz mit Lambda/2 – Direktoren II

Die Anwendung von zirkularpolarisierten Direktoren zeigt ebenfalls nicht den gewünschten Erfolg. Untersucht wurden Direktoren mit ein bis vier Windungen (Abbildung 5.23). Eine Windung entspricht dabei der Wellenlänge der verwendeten Mikrowellenfrequenz. Der Abstand der Windungen sollte dabei ein Viertel der Wellenlänge betragen. Die Windungen sollen eine zirkulare Polarisation der vom Direktor abgestrahlten elektromagnetischen Welle erzeugen und hierdurch eine bessere „Durchmischung“ des Feldes in der Kammer ermöglichen.

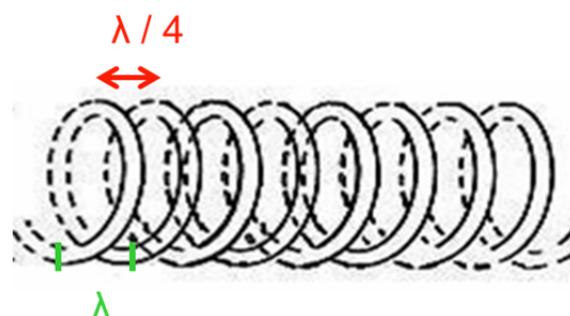


Abbildung 5.23: Zirkularpolarisierter Direktor

Die Positionierung der zirkularpolarisierten Direktoren erfolgt an verschiedenen Stellen. Dargestellt sind die unterschiedlichen Positionen für die zirkularpolarisierte Direktoren mit vier Windungen in Abbildung 5.24. Im Folgenden werden die Positionen mit Position 1, Position 2, Position 3 und Position 4 benannt. Im Falle der Position 1 und Position 2 werden die Direktoren jeweils ohne Befestigung auf eine mikrowellentransparente Platte aus expandiertem Polystyrol (EPS) gelegt und für Position 3 und Position 4 in vertikalen Anordnung auf eine EPS-Platte gesteckt. Sinn dieser Platten ist es einen Abstand der leitfähigen Antenne zum Rand und Boden der Mikrowellenkammer einzuhalten, um Überschläge und Entladungen zu vermeiden. Die zusätzliche EPS-Platte im Mikrowellenraum kann aufgrund ihrer Permittivität von nahezu $\epsilon = 1$ die Feldverteilung nicht wesentlich beeinträchtigen.



Position 1: senkrecht



Position 2: horizontal



Position 3: hochkant (mittig)



Position 4: hochkant (seitlich)

Abbildung 5.24: Positionen zirkularpolarisierte Direktoren am Beispiel des Direktors mit vier Windungen

Die Ergebnisse für den zirkularpolarisierten Direktor mit vier Windungen sind in Abbildung 5.25 dargestellt. Es zeigt sich durch das Positionieren des Direktors in der Mikrowellenkammer keine Verschiebung der Hot- und Cold-Spot-Verteilung.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Verwendung des zirkularpolarisierten Direktors mit drei Windungen, siehe Abbildung 5.26. In Position 1 ist nur eine sehr leichte Verfärbung der Flüssigkristallfolie auf der MDF-Platte erkennbar. Die Unterschiede zwischen Position zwei und drei sind jeweils marginal. Während der Versuche ist mit einer hochkantigen Anordnung des Direktors eine leichte Verstärkung der Feldverteilung zu erzielen, vgl. Abbildung 5.26 Position 3 und Position 4.

Die erzielten Ergebnisse lassen sich auch auf die Anwendung des zirkularpolarisierten Direktors mit zwei und des zirkularpolarisierten Direktors mit einer Windung übertragen. Eine

Verschiebung der Hot- und Cold-Spots ist damit nicht möglich, lediglich die Intensität kann auch hier durch eine horizontale Anordnung verstärkt werden. Die Ergebnisse der Direktoren mit einer und zwei Windungen sind in Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 dargestellt.

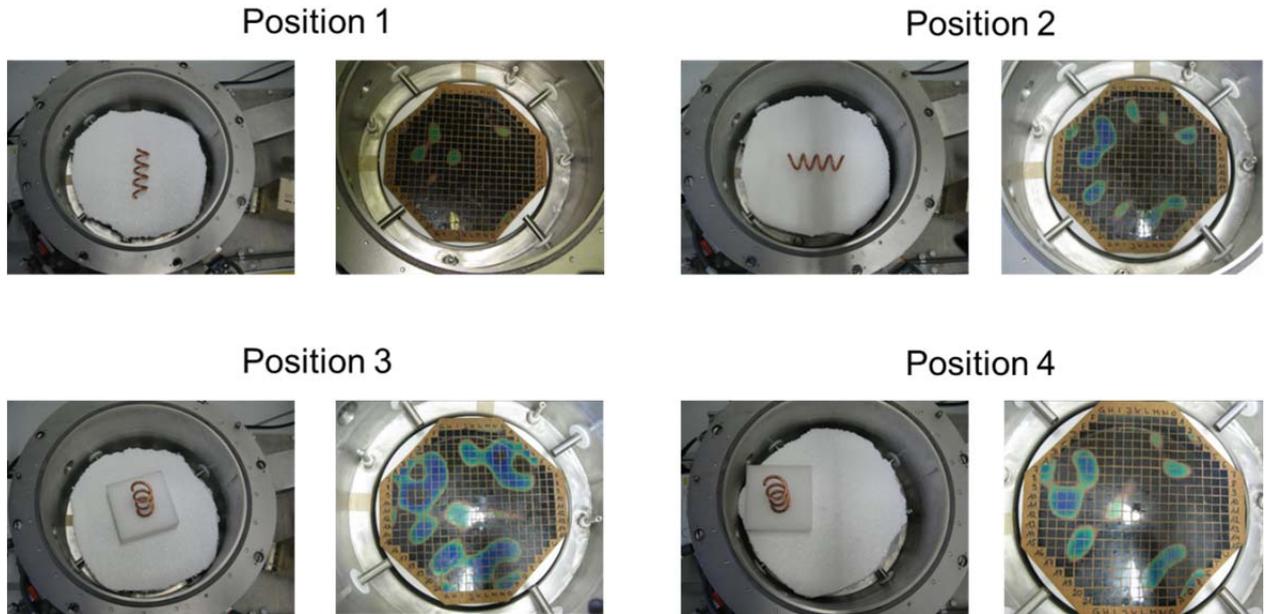


Abbildung 5.25: Feldverteilung zirkularpolarisierter Direktor mit vier Windungen

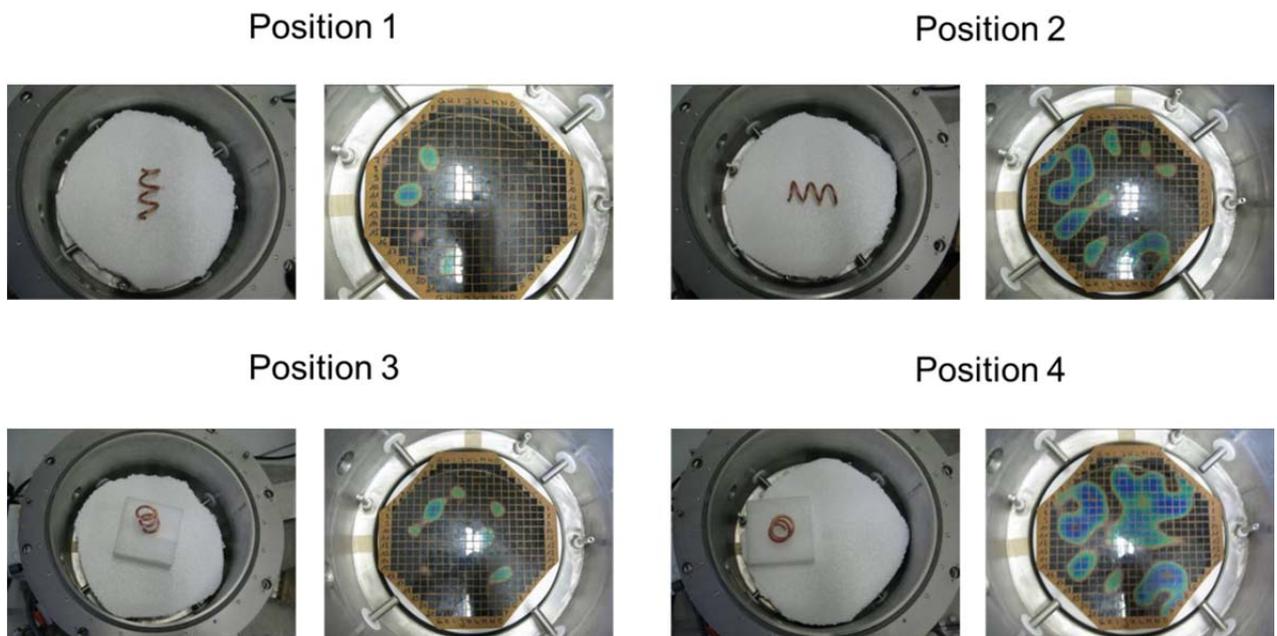


Abbildung 5.26: Feldverteilung zirkularpolarisierter Direktor mit drei Windungen

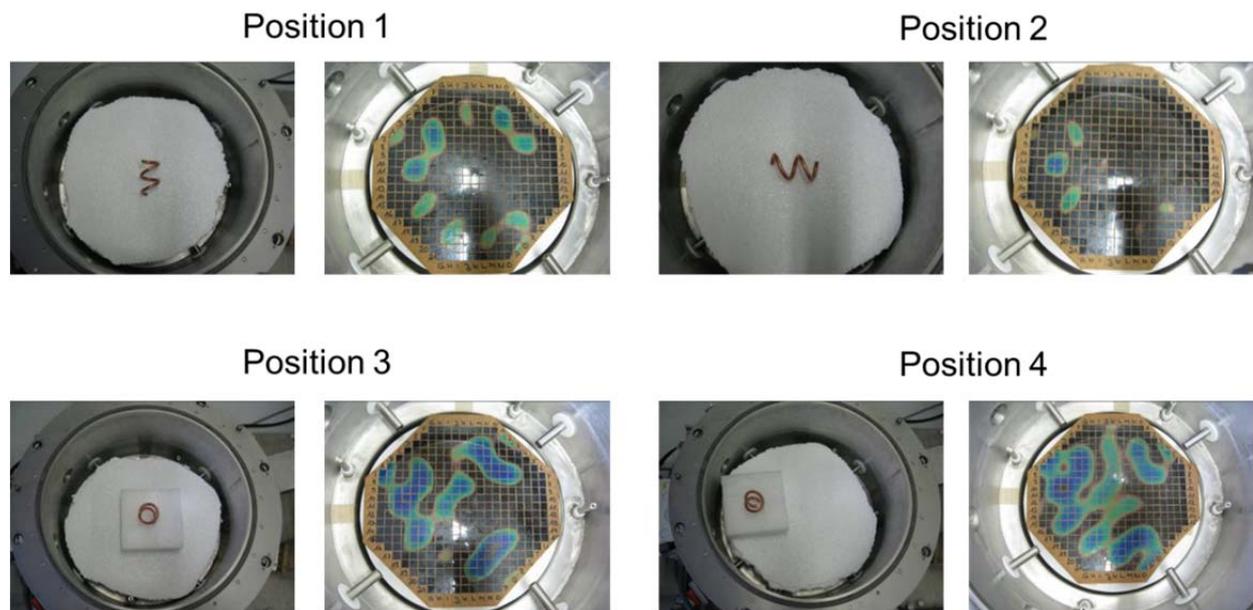


Abbildung 5.27: Feldverteilung zirkularpolarisierter Direktor mit zwei Windungen

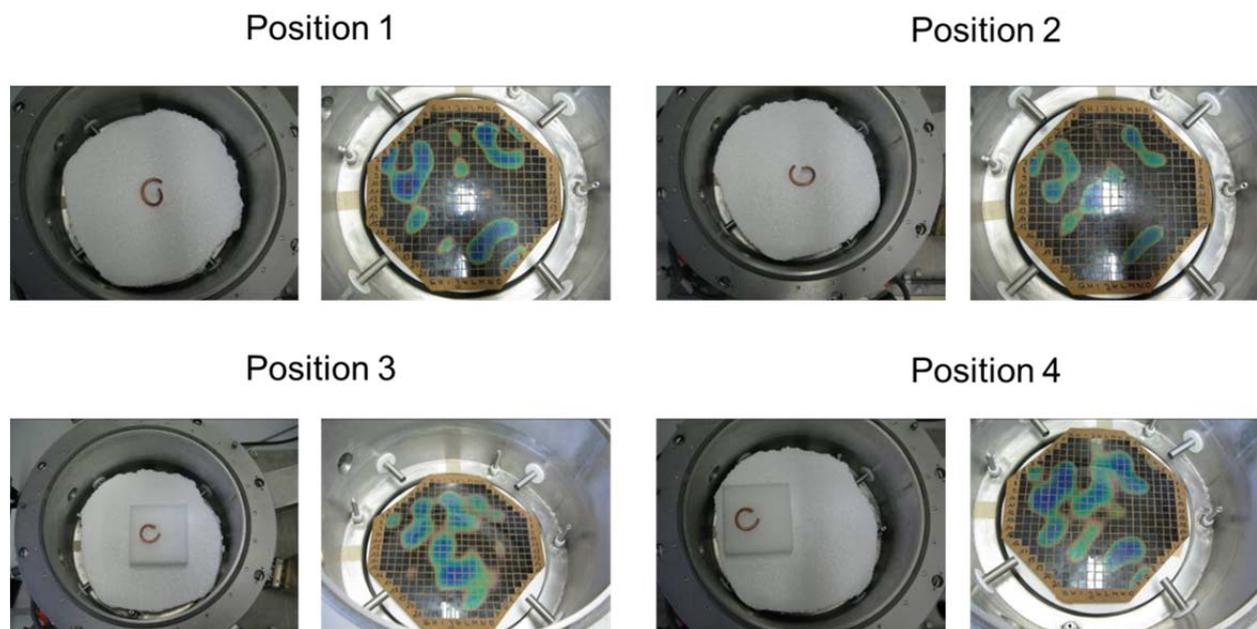


Abbildung 5.28: Feldverteilung zirkularpolarisierter Direktor mit einer Windung

Auf Basis dieser Ergebnisse wird versucht, durch die Anordnung mehrerer zirkularpolarisierter Direktoren die Feldverteilung zu beeinflussen. Eine Auswahl der am vielversprechendsten Kombinationen zeigt Abbildung 5.29. Die Ergebnisse aus den Versuchen mit einzelnen Direktoren zeigen, dass eine hochkantige Anordnung der Direktoren einen größeren Einfluss auf die Feldverteilung hat als eine vertikale Positionierung. Aufgrund dieser Erkenntnisse werden Anordnungen mit zwei und vier Direktoren in hochkantiger Anordnung untersucht. Die Feldverteilung ist auch durch mehrere

Direktoren im Mikrowellenraum nicht weiter zu homogenisieren. Die Optimierung des statischen Feld kann mit dieser Methode ebenfalls nicht durchgeführt werden.

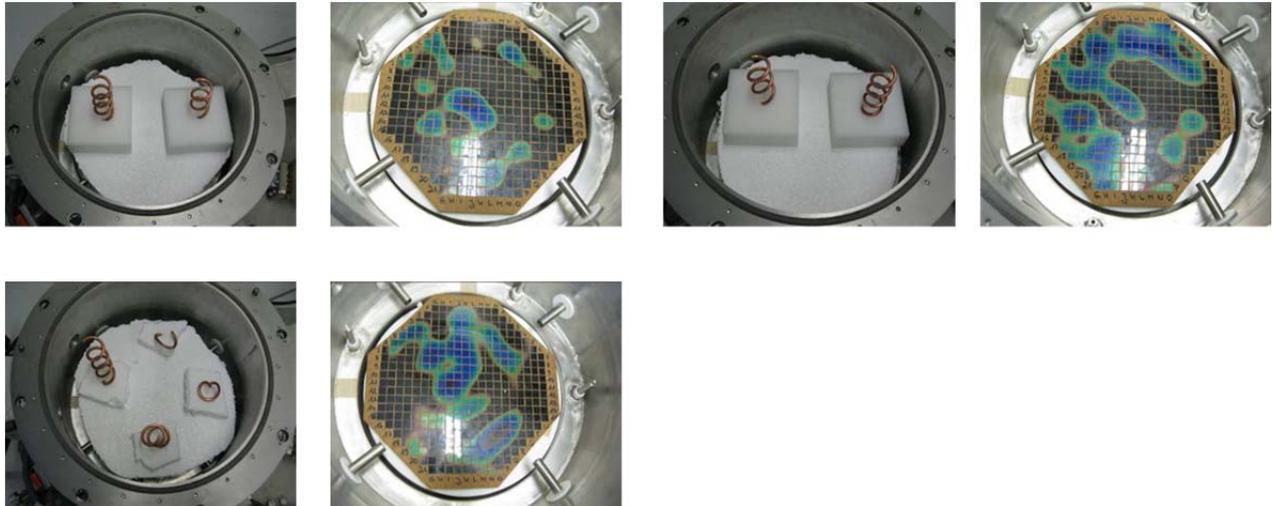


Abbildung 5.29: Kombination mehrerer zirkularpolarisierter Antennen

5.1.5 Rotierende Maske

Auf Basis der Untersuchungen der Ring-Schlitz-Hohlleitereinkopplung wird von der Firma Fricke und Mallah GmbH das Konzept einer rotierenden Maske angedacht, die während der Aushärtung einzelne Schlitze überdeckt und damit schließt und öffnet. Über diesen Wechsel sollte es möglich sein, das Feld zumindest zeitlich zu homogenisieren. Für diesen Aufbau wird der vorhandene Deckel der Anlage mit einem Motor versehen, der über ein Zahnrad die rotierende Maske antreibt. In Abbildung 5.30 ist der Aufbau erkennbar. Der Deckel erschwert sich durch den Umbau auf etwa 25 kg.

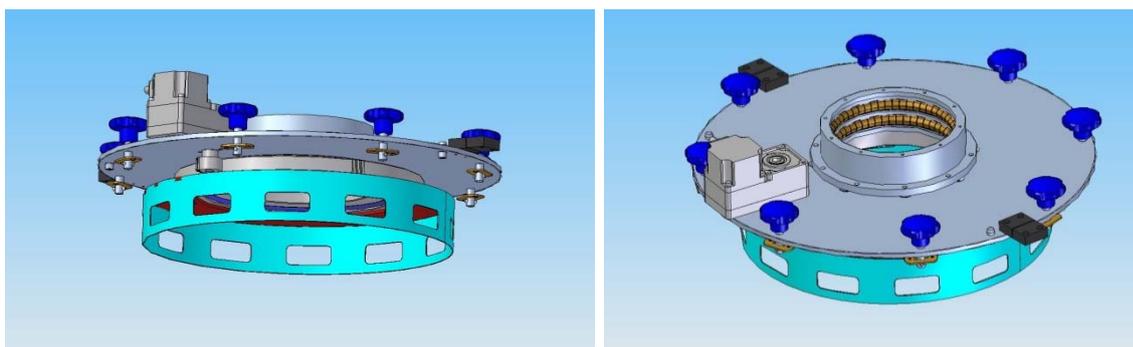


Abbildung 5.30: Modifizierter Deckel für die Einkopplungsvariante rotierende Maske (Quelle: Fricke und Mallah)

Bis zum Ende der Projektlaufzeit wurde das Konzept der Forschungsstelle noch nicht zur Verfügung gestellt. Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf Simulationen mit dem Simulationsprogramm Comsol Multiphysics und Messungen der Firma Fricke und Mallah GmbH aus Peine.

Beim Mikrowellenhersteller wurde parallel Untersuchungen zur Feldverteilung mittels rotierender Maske durchgeführt, die Ergebnisse werden nachfolgend kurz dargestellt. In Abbildung 5.31 ist die Konstruktion der rotierenden Maske zu sehen. An den Drehring sind dabei acht Winkel angebracht, die das Einkopplungsprofil der einzelnen Schlitze beeinflussen. Weitere Versuche wurden mit Schrauben durchgeführt, die ebenfalls eine Wirkung auf die Feldverteilung zeigen sollen, siehe Abbildung 5.31.

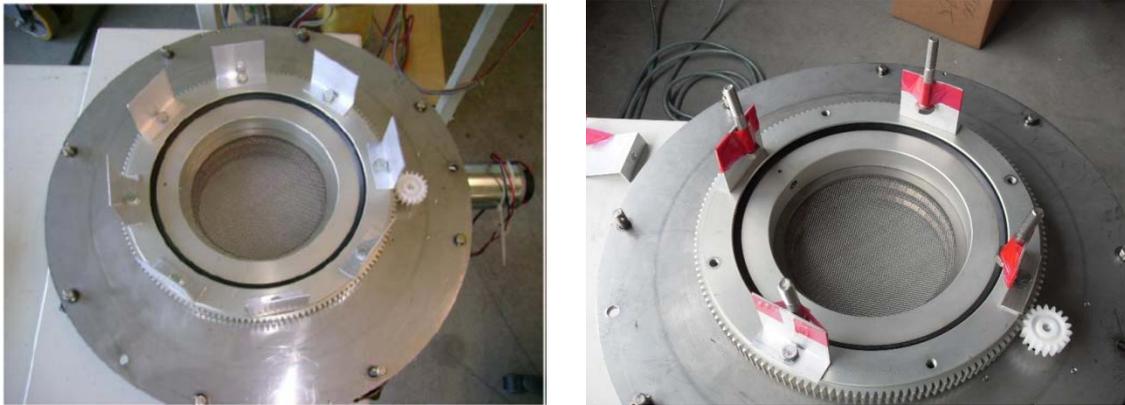


Abbildung 5.31: Deckel mit unterschiedlichen Maskenvarianten (Quelle: Fricke und Mallah)

Die Feldverteilung wurde mit Hilfe des Simulationsprogramms Comsol Multiphysics simuliert. Dabei wird die Maske jeweils um 5° rotiert und dann die Feldverteilung simuliert. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5.32.

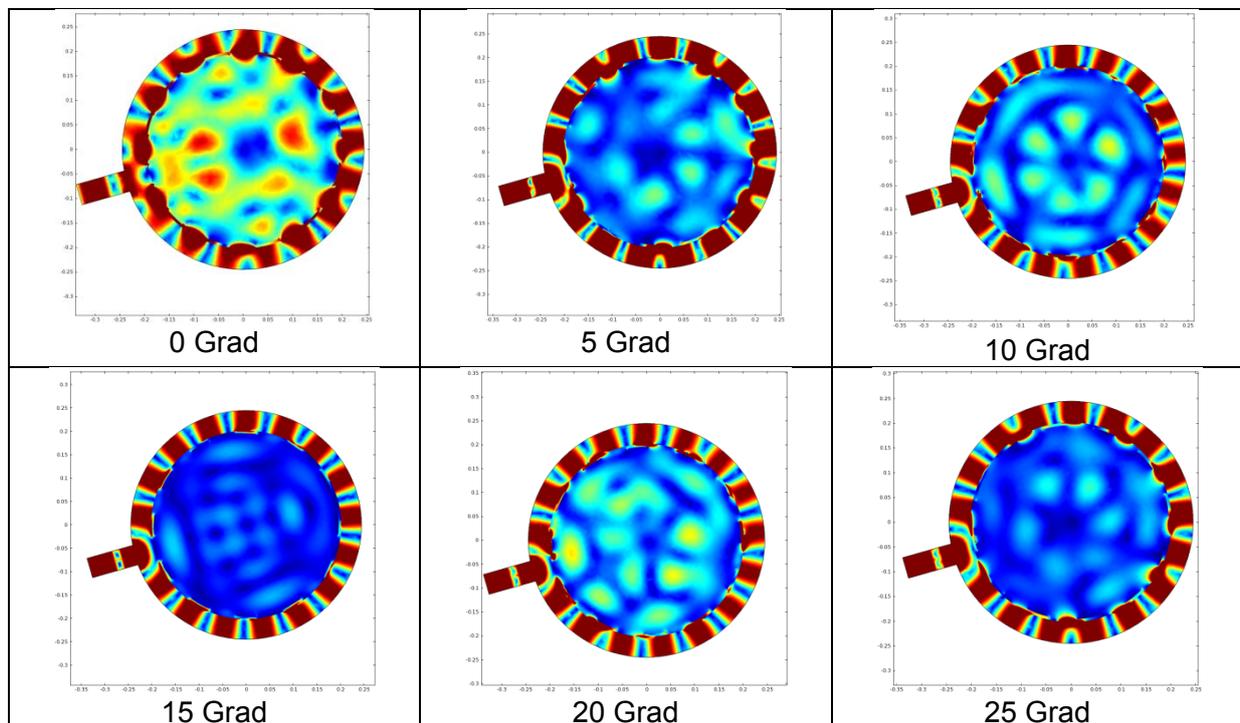


Abbildung 5.32: Simulation der Feldverteilung bei rotierender Maske in 5° Abständen (Quelle: Fricke und Mallah)

Die Simulationen zeigen, dass auch mit der Anwendung einer rotierenden Maske keine Verschiebung der Feldverteilung in das Zentrum der Mikrowellenkammer erfolgt. Die Bilder zeigen, dass an der Stelle, wo später das Werkzeug mit den rieselfähigen Formmassen positioniert werden müsste, weiterhin mit einem Cold-Spot zu rechnen ist.

Die Praxisversuche werden mit Hilfe einer Wärmebildkamera und einer MDF-Platte aufgenommen. Nachfolgend sind die Ergebnisse dargestellt, Abbildung 5.33.

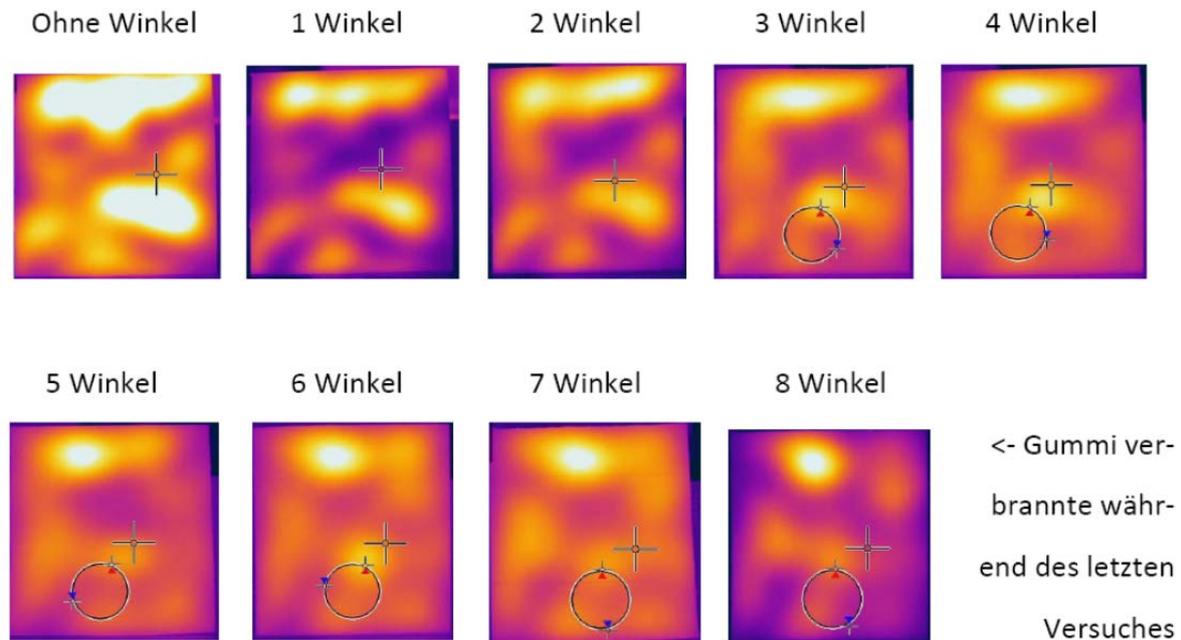


Abbildung 5.33: Feldverteilung gemessen mit Wärmebildkamera und MDF-Platte
(Quelle: Fricke und Mallah)

Durch das Hinzufügen mehrerer Schlitze zu der Maskenkonstruktion verändert die Feldverteilung quantitativ nicht. Eine Verschiebung der Hot- und Cold-Spotanordnungen, sowie eine zeitliche Homogenisierung der Feldverteilung ist nicht ersichtlich.

Die Konsequenzen einer inhomogenen Feldverteilung im Materialvolumen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

5.1.6 Auswirkungen inhomogener Feldverteilung auf den Vernetzungsprozess

Die Resultate einer inhomogenen Feldverteilung sind in den folgenden Abbildungen, Abbildung 5.34 und Abbildung 5.35 erkennbar. Für die Aufnahmen wurden großflächige Proben mit den Abmessungen 120 mm x 120 mm mit einer Stärke von etwa 4 mm in einer Form aus PTFE in der Mikrowelle verarbeitet. Die Einkopplungsvariante ist in Abbildung 5.34 die beschriebene Ring-Schlitz-Hohlleitereinkopplung mit einer Probe aus Rapid P1T. In Abbildung 5.35 ist eine Wepuran-Probe zusehen, die in der Mikrowellenkammer mit Antenneneinkopplung verarbeitet wurde.

Zu sehen ist, dass es aufgrund der Inhomogenität zur Ausbildung von Hot- und Cold-Spots im Material kommt. Bereiche des Materialvolumens werden stärker thermisch beansprucht als andere. Die Folge ist, dass es in Hot-Spotbereichen zu einer starken Erwärmung kommt und das Material sich thermisch zersetzt. Die Bereiche zeigen zusätzlich eine dunkle Färbung. Bereiche, in welchen sich Cold-Spots ausbilden, sind noch unernetzt. Die Vernetzungsreaktion hat aufgrund von mangelnder Temperaturzufuhr noch nicht eingesetzt. Die Temperaturunterschiede wurden bei der Wepuran-Probe mittels Wärmebildkamera aufgenommen und zeigen Differenzen von etwa 80 °C.



Abbildung 5.34: Folgen inhomogener Feldverteilung (Rapid P1T Vergussmasse / Ring-Schlitz- Hohlleiter)

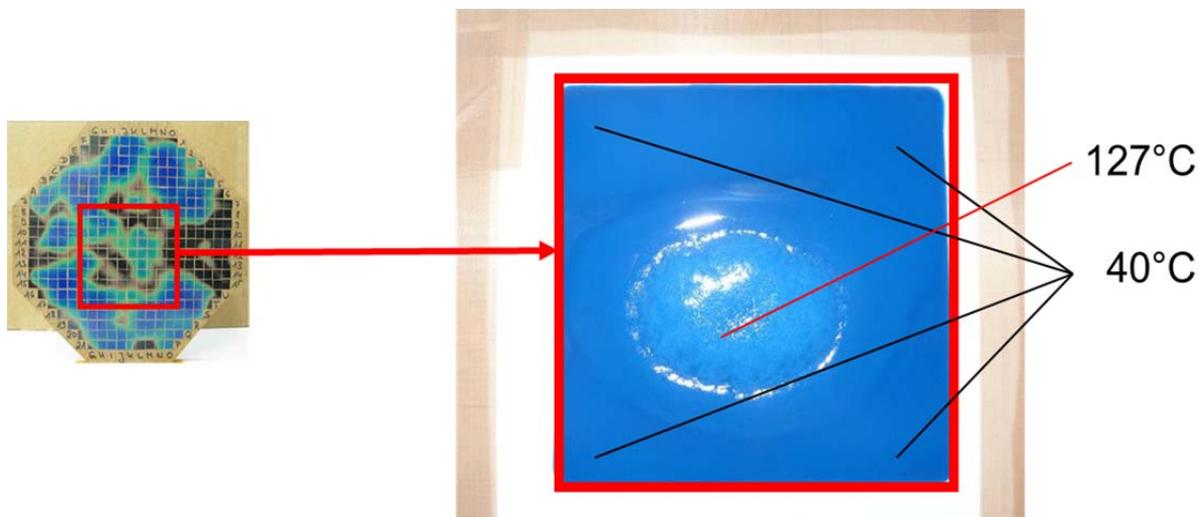


Abbildung 5.35: Folgen inhomogener Feldverteilung (Wepuran VU 4452 Vergussmasse / Antenneneinkopplung)

Die Eigenschaften der Probe werden im Falle einer ungleichmäßigen Vernetzung ebenfalls inhomogen sein. Aufgrund der hohen Temperaturunterschiede über eine verhältnismäßig kleine Fläche bedingen Unterschiede im Eigenschaftsprofil. Die Vorteile der Mikrowellenerwärmung die Materialien möglichst gleichmäßig und volumetrisch zu erwärmen kann demzufolge nur mit einer homogenen Feldverteilung im gesamten auszuhärtenden Gut sichergestellt werden.

5.1.7 Drehteller

Alle Maßnahmen zur Homogenisierung des Feldes in der Kammer waren letztlich nicht ausreichend, um flächigere Proben gleichmäßig auszuhärten. Um dies dennoch umzusetzen, wurde ein Drehteller, ähnlich wie bei einem haushaltsüblichen Mikrowellenherd, in die Kammer integriert. Dies sollte durch das verfolgte Anlagenkonzept zwar gerade vermieden werden, um eine Integration der Mikrowellenkammer in eine Presse für

duroplastische Formmassen zu ermöglichen. Die Vorgehensweise war für die Aushärtung von Vergussmassen jedoch immerhin dahingehend erfolgreich, dass die Hotspots zumindest „verschmiert“ werden konnten, so dass eine Aushärtung von prüfbaren Probekörpern zur Ermittlung mechanischer Materialeigenschaften möglich wurde (vgl. Abschnitt 5.3).

5.1.8 Zusammenfassende Bewertung des Anlagenkonzeptes

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass die Mängel des Anlagenkonzeptes sich stark limitierend auf die Umsetzung von Aushärtungsversuchen sowohl an den Vergussmassen als auch bei den rieselfähigen Formmassen ausgewirkt haben. Eine Versuchsdurchführung mit rieselfähigen Formmassen im Pressverfahren war aufgrund nicht zu beheberender Inhomogenitäten des Mikrowellenfeldes nicht möglich.

Gleichwohl konnte aufgrund der Probleme mit der Feldverteilung ein umfangreicher Erfahrungsschatz gewonnen werden – insbesondere beim Hersteller der Mikrowellenanlage, in dessen Verantwortungsbereich dies lag, aber auch bei den Forschungsstellen. Ein zukünftiges Anlagenkonzept wäre unter Nutzung dieser Erfahrung sicherlich zielführend umsetzbar, setzt aber eine Neukonzeption voraus. Dies war innerhalb des laufenden Projektes bedauerlicherweise nicht mehr umsetzbar.

5.2 Analytische Untersuchungen Vergussmassen – Materialanalyse

5.2.1 TGA Untersuchungen

Für die Analyse der Temperaturstabilität von Harz- und Härter Komponente wird eine TGA Analyse durchgeführt. Zusätzlich wird das unvernetzte Gemisch ebenfalls einer TGA Analyse unterzogen. Dabei wird eine Kleinmenge erwärmt und deren Gewichtsveränderung über eine sensible Waage in Abhängigkeit der Temperatur aufgezeichnet.

Ziel ist zu sehen, in welchem Temperaturbereich es zu einer Zersetzung der Einzelkomponenten und des Gemisches kommt. Die durch die Analyse ermittelten Umwandlungs- bzw. Zersetzungstemperaturen können hierbei als Grenzwerte für einen späteren Verarbeitungsprozess in der Mikrowelle herangezogen werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den Abbildungen 5.36 bis 5.41 gezeigt. Alle Versuche wurden bis zu einer Temperatur von 450 °C durchgeführt. Die Heizrate betrug sowohl bei den Einzelkomponenten als auch bei den Gemischen 20 K/min.

Für die Auswertungen wurde jeweils die Onset-Temperatur der ersten Reaktionsstufe ermittelt. Es zeigt sich bei allen untersuchten Harzsystemen, dass die Einzelkomponenten temperatursensibler sind als das Gemisch. Der Gewichtsverlust setzt bei der Harz- und Härter Komponente jeweils früher ein als beim Harzsystem. Dies kann durch die beginnende Vernetzungsreaktion der Harzgemische erklärt werden. Durch die Vernetzung werden die Systeme temperaturstabiler. Zu sehen ist dies an den höheren Onset-Temperaturen der Gemische. Des Weiteren wurde anhand der Kurven die jeweilige Temperatur ermittelt, ab welcher es zu einem ersten Masseverlust unabhängig von der Reaktionsstufe kommt. Diese Temperatur wird für die Prozessoptimierung als Grenzwert festgelegt, da unter ihr mit einer vollständigen Vernetzung ohne Veränderungen des Eigenschaftsprofils zu rechnen ist.

Eine Auffälligkeit ist bei der Vergussmasse Guronic erkennbar. Bei einer Temperatur von etwa 210 °C ist bei der Härter Komponente ein Masseanstieg zu erkennen. Dieser ist in geringem Maße ebenfalls bei der Kurve des Gemisches erkennbar. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf die Aufnahme von Sauerstoff aus der Prüfatmosphäre.

Auf Basis der Ergebnisse wird für die Optimierung des Vernetzungsprozesses der Vergussmassen eine Grenztemperatur von 150 °C festgelegt. Die Angaben der Materialhersteller bestätigen diese Temperatur ebenfalls.

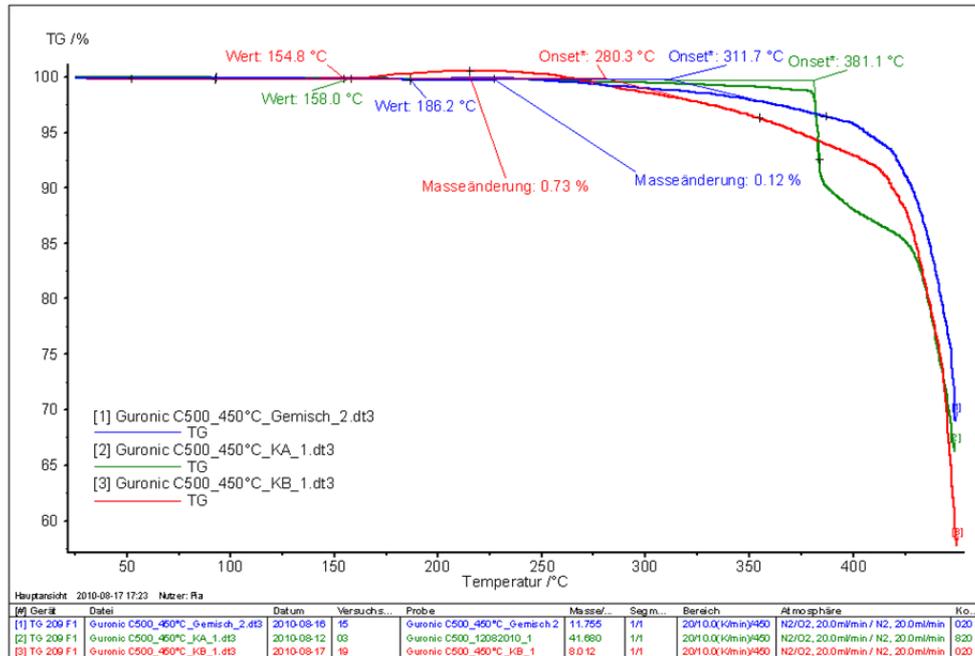


Abbildung 5.36: TGA Untersuchung Guronic

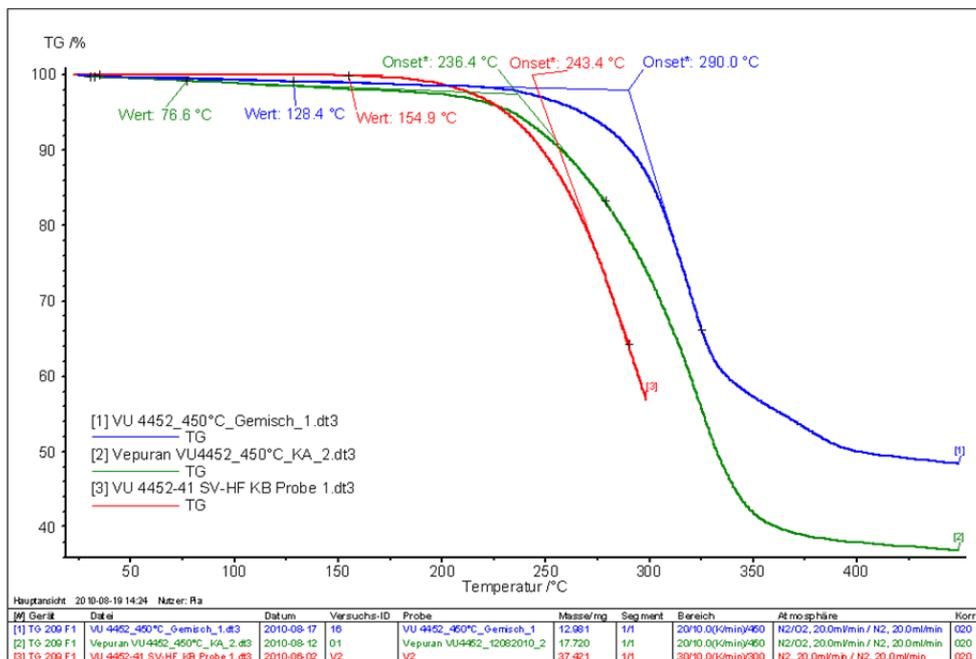


Abbildung 5.37: TGA Untersuchung Wepuran VU 4452

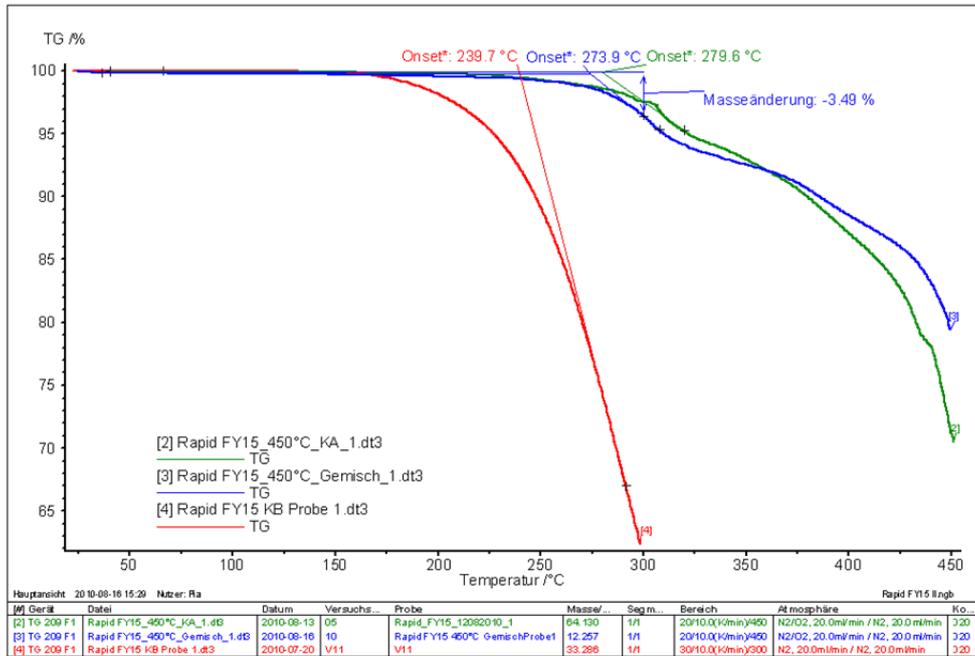


Abbildung 5.38: TGA Untersuchung Rapid FY15

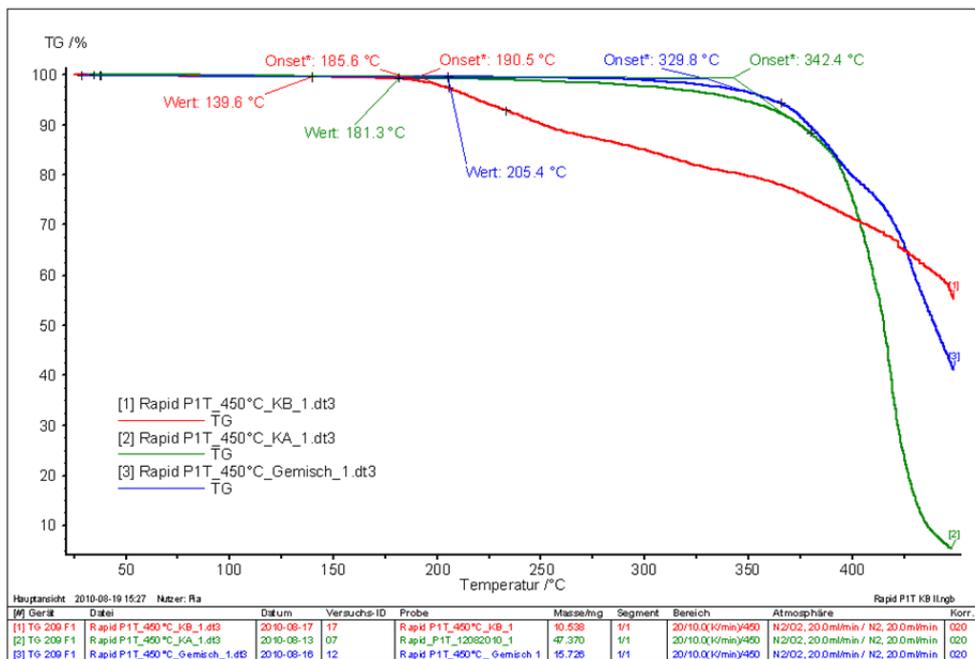


Abbildung 5.39: TGA Untersuchung Rapid P1T

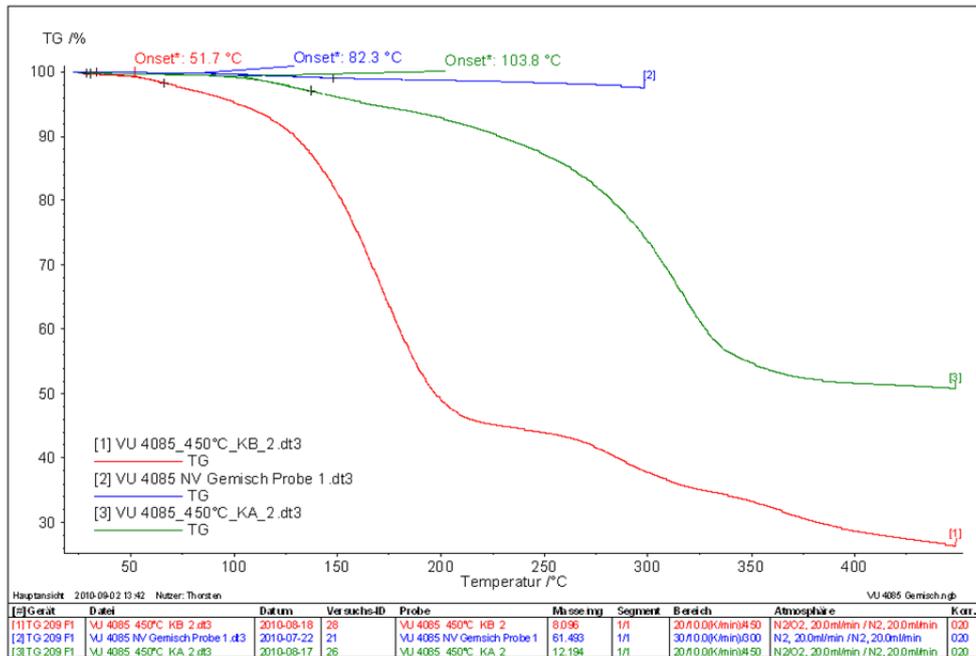


Abbildung 5.40: TGA Untersuchung Wepox VU 4085

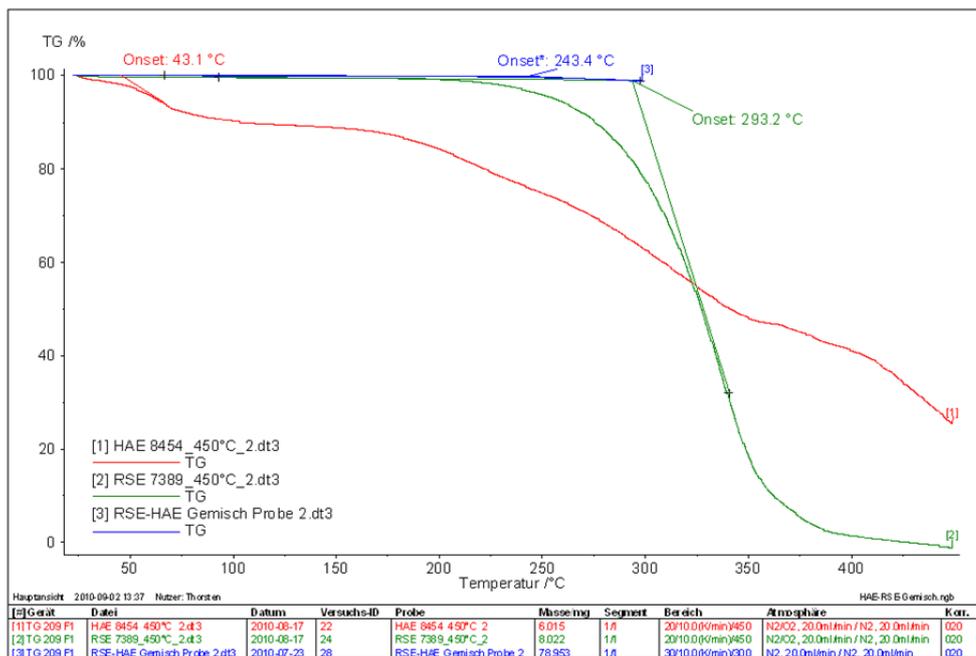


Abbildung 5.41: TGA Untersuchung RSE 7389 / HAE 8454

5.2.2 Messungen der dielektrischen Eigenschaften mittels Resonatormethode

Die dielektrischen Eigenschaften eines Materials, insbesondere der Imaginärteil der Permittivität $\underline{\epsilon} = \epsilon' + j \epsilon''$ (Verlustindex) sind für dessen Erwärmung mittels Mikrowellen entscheidend. Durch ein Resonatormessverfahren können diese in Abhängigkeit von Temperatur und Vernetzungsgrad aufgenommen werden.

In Abbildung 5.42 ist der Messaufbau zu sehen. In einem Quarzröhrchen wird das Material ausgehärtet und in einer Messzelle die dielektrischen Eigenschaften festgestellt. Mittels eines Netzwerkanalysators kann die Güte und die Resonanzfrequenz des Systems gemessen werden. Durch Vergleich der gemessenen Werte mit den Werten des ungefüllten Glasröhrchens kann die komplexe Permittivität sehr genau berechnet werden.

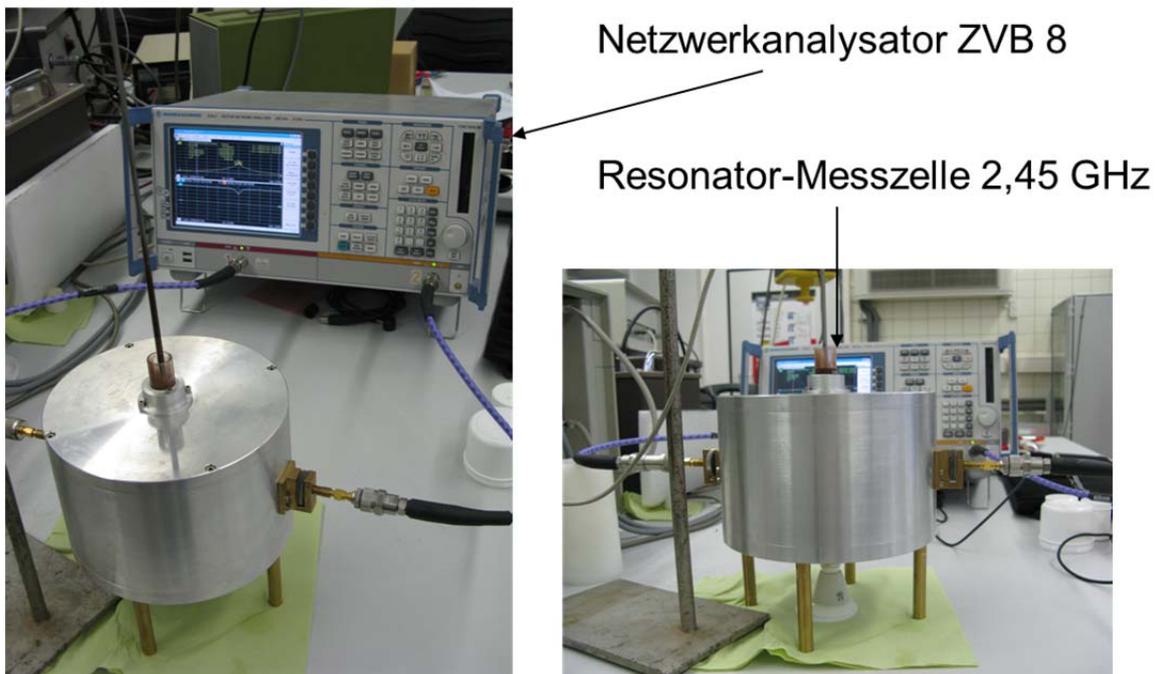


Abbildung 5.42: Messaufbau dielektrische Eigenschaften

Zunächst werden die dielektrischen Eigenschaften der Einzelkomponenten (Harz und Härter) in Abhängigkeit der Temperatur aufgenommen. Für die Messungen werden die mit Material gefüllten Quarzröhrchen im Ofen erwärmt und in der Resonatormesszelle abgekühlt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen für eine Messfrequenz von 2,45 GHz dargestellt, siehe Abbildung 5.43 bis Abbildung 5.48.

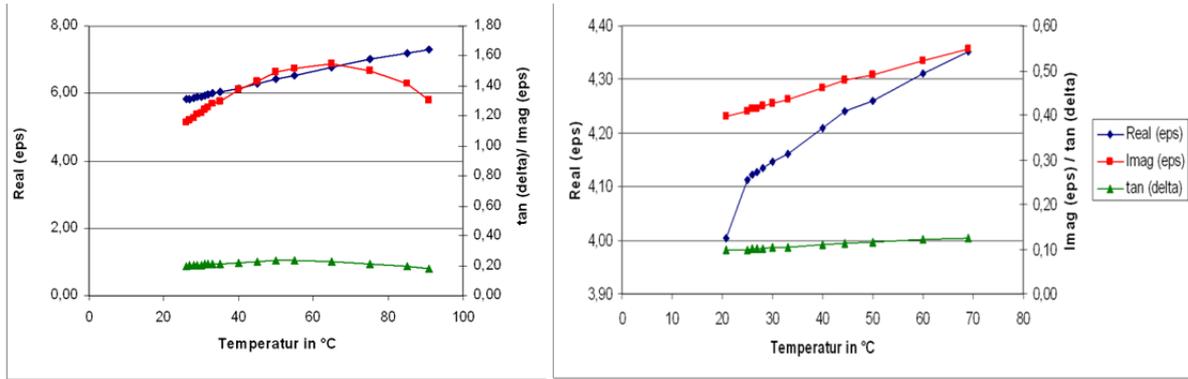


Abbildung 5.43: Dielektrische Eigenschaften Wepox KA und KB

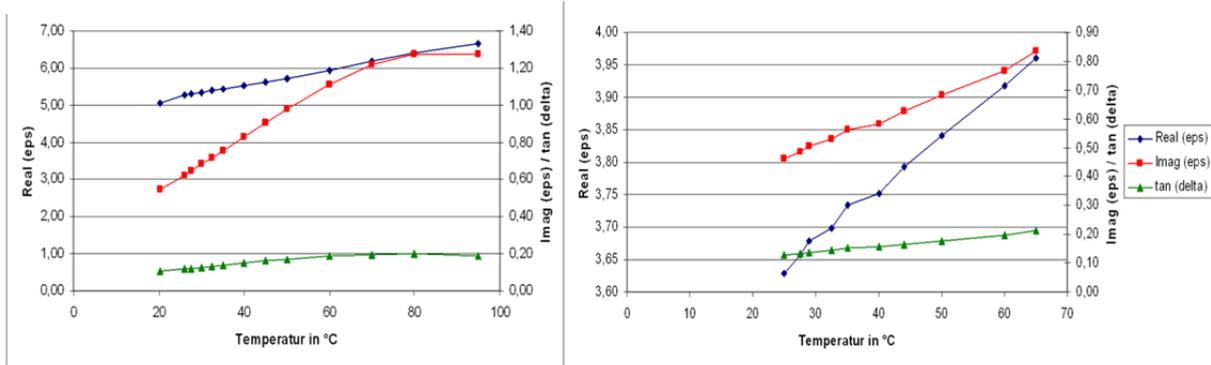


Abbildung 5.44: Dielektrische Eigenschaften RSE 7879 und HAE 4854

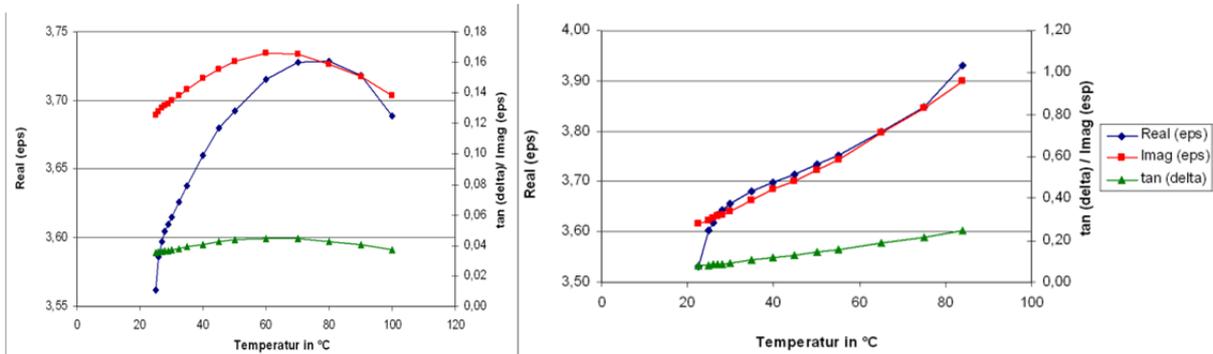


Abbildung 5.45: Dielektrische Eigenschaften Rapid FY15 KA und KB

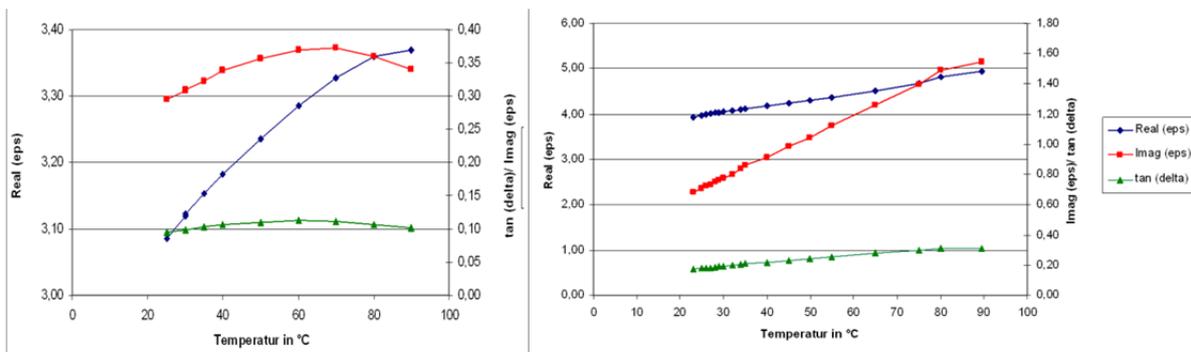


Abbildung 5.46: Dielektrische Eigenschaften Rapid P1T

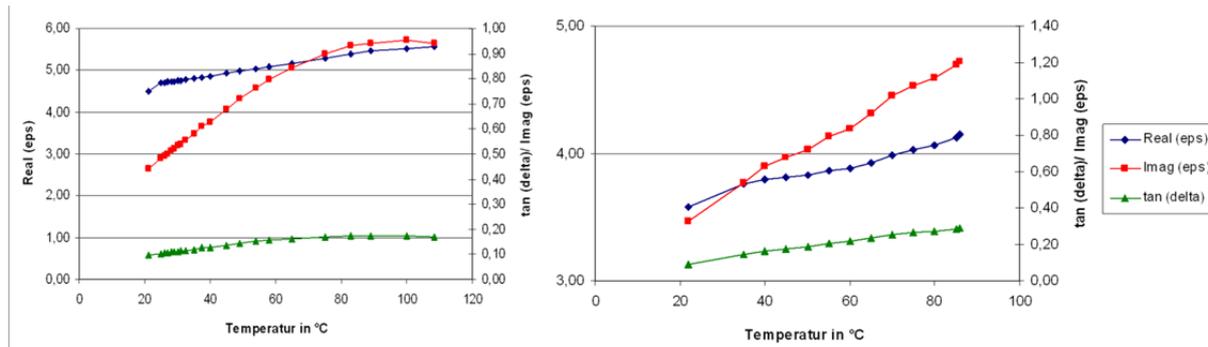


Abbildung 5.47: Dielektrische Eigenschaften Wepuran KA und KB

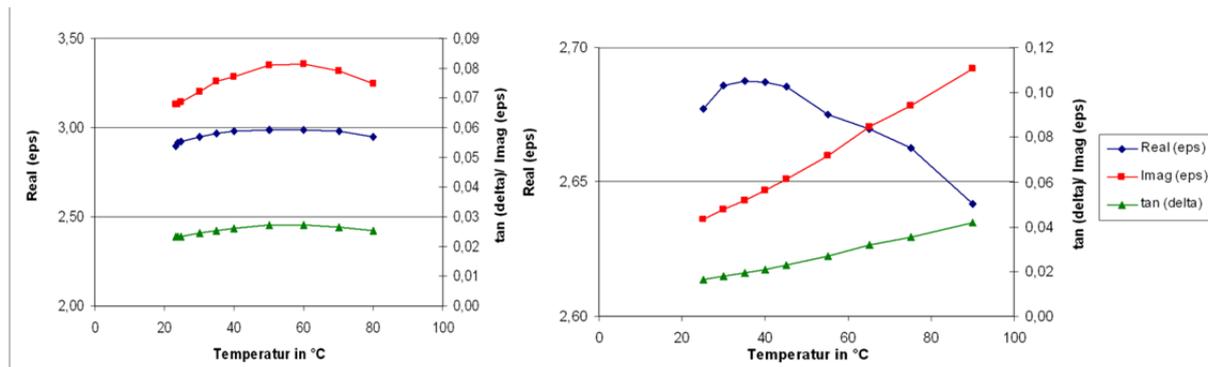


Abbildung 5.48: Dielektrische Eigenschaften Guronic KA und KB

Die Ergebnisse zeigen sowohl für die Härterkomponenten als auch für die Harzkomponenten der untersuchten Vergussmassen eine eindeutige Abhängigkeit deren dielektrischen Eigenschaften von der Temperatur.

Für alle Komponenten nimmt der imaginäre Anteil der Permittivität mit steigender Temperatur zunächst zu. Sowohl bei den Epoxid- als auch Polyurethanharzen lässt sich dieser Effekt erkennen; er ist durch zunehmende Beweglichkeit der für die Orientierungspolarisation verantwortlichen Dipole im Material zu erklären. Bei den Harzkomponenten der Vergussmassen Wepox und Rapid FY15 zeigt diese Größe im untersuchten Temperaturbereich zwischen 25 °C und 80 °C ein Maximum. Mit steigenden Temperaturen ist bei diesen Materialien mit einem weiteren Abfall und damit Reduktion der Ankopplungsbereitschaft an die Mikrowelle zu rechnen. Auch dies ist polymerphysikalisch durch die zunehmende Behinderung der schwingenden Moleküle durch die temperaturbedingte Eigenbewegung sowie durch eine temperaturbedingte Verschiebung der Relaxationszeiten begründbar.

Weiterhin wurde untersucht, ob ein Absetzen der enthaltenen Füllstoffe, wie Flammschutzmittel oder Farbstoffe, das Ankopplungsverhalten beeinflusst. Dies erfolgte durch zusätzliche Messungen an ungefüllten Komponenten der Wepox-Vergussmasse und der Wepuran-Vergussmasse. Die Ergebnisse der Messungen (bei 2,45 GHz) sind in Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50 dargestellt.

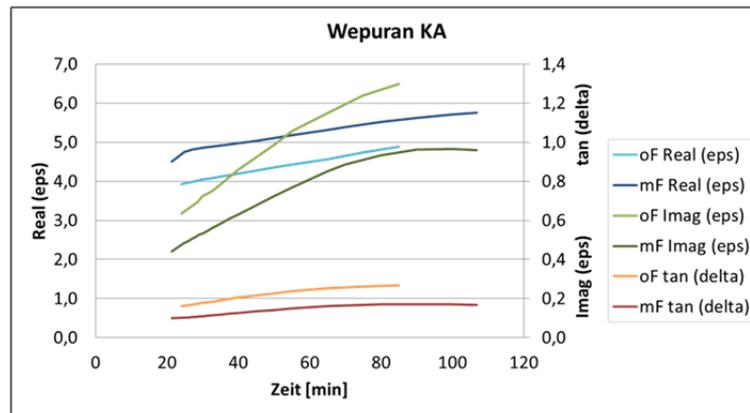


Abbildung 5.49: Dielektrische Eigenschaften Wepuran mit und ohne Füllstoff

Es sind zwischen den Messungen mit und ohne Füllstoff erwartungsgemäß Unterschiede erkennbar, jedoch zeigen auch die Messkurven ohne Füllstoffe die gleiche Abhängigkeit von der Temperatur. Auch bei diesen Messungen sind die dielektrischen Eigenschaften mit der Temperatur veränderbar. Ebenso zeigt sich bei der Harzkomponente der Vergussmasse Wepox ein Maximum im betrachteten Temperaturbereich, siehe Abbildung 5.50. Auch dies wird durch die zugeführten Füllstoffe nicht beeinträchtigt.

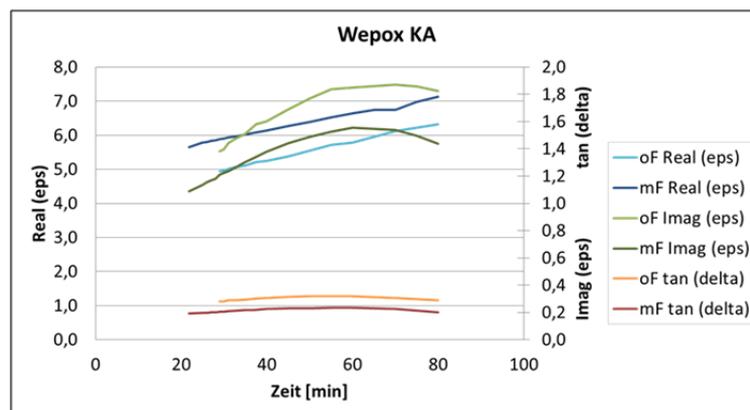


Abbildung 5.50: Dielektrische Eigenschaften Wepuran mit und ohne Füllstoff

Zusätzlich zur Untersuchung der Einzelkomponenten erfolgt die Untersuchung der Gemische in Abhängigkeit zur Vernetzung. Hierzu werden die Harze im Quarzröhrchen unter Temperaturzufuhr bei den jeweiligen vom Hersteller spezifizierten Verarbeitungsbedingungen ausgehärtet und die dielektrischen Eigenschaften gemessen. Für alle Harze erfolgt die Messung bei 2,45 GHz und zusätzlich auch bei 5,8 GHz.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.51 bis 5.55 dargestellt.

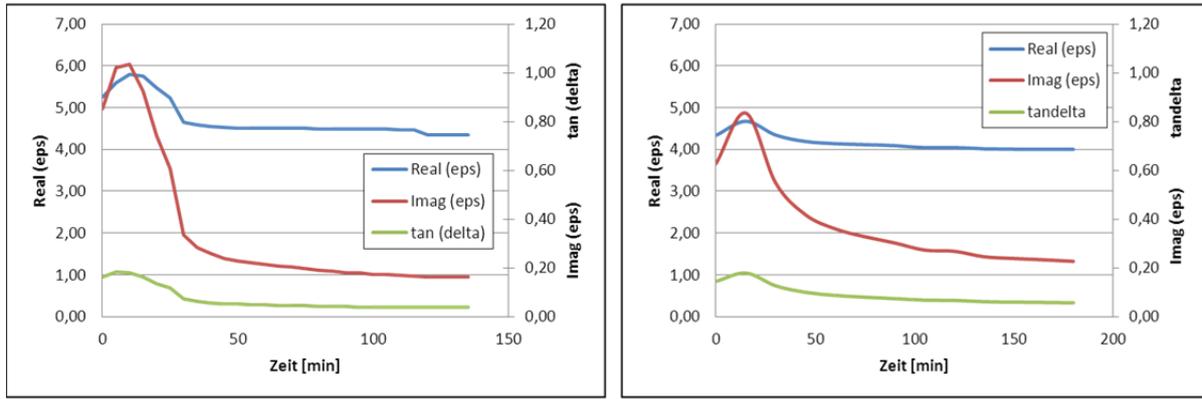


Abbildung 5.51: Dielektrische Eigenschaften Wepox

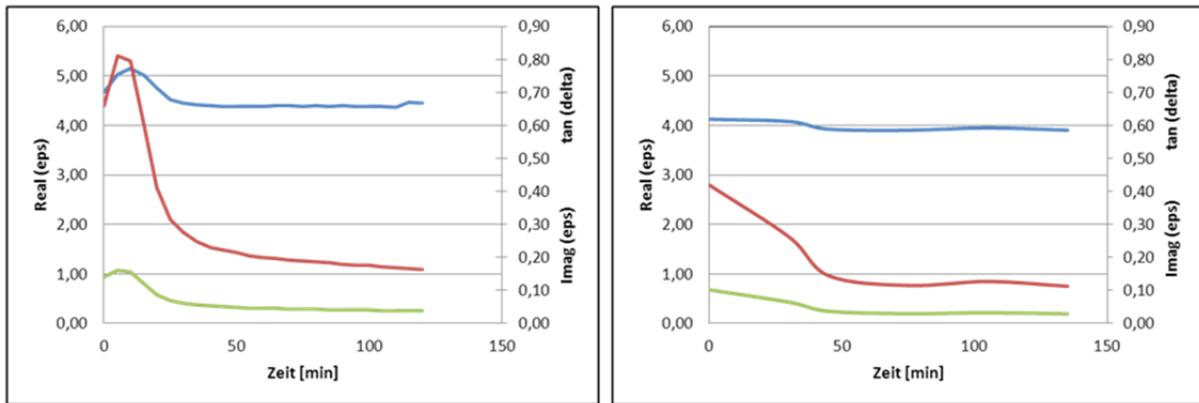


Abbildung 5.52: Dielektrische Eigenschaften RSE / HAE

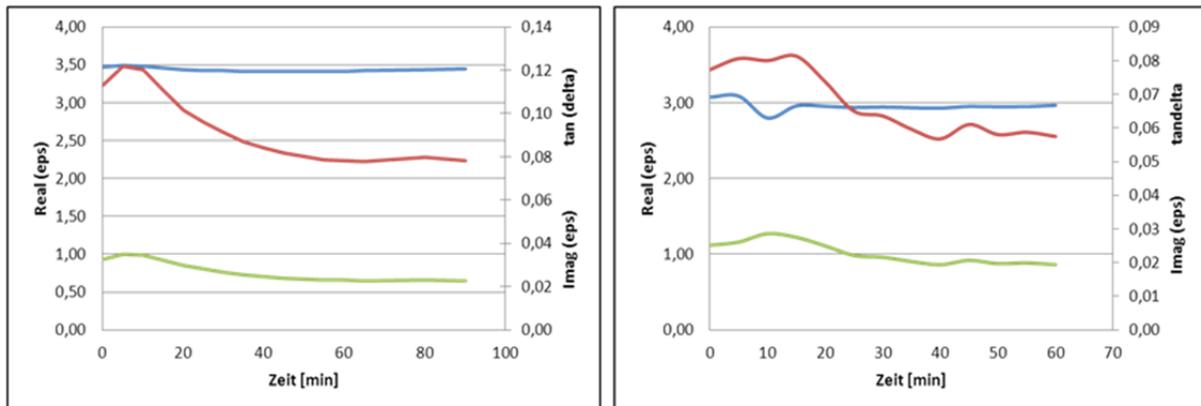


Abbildung 5.53: Dielektrische Eigenschaften Rapid FY 15

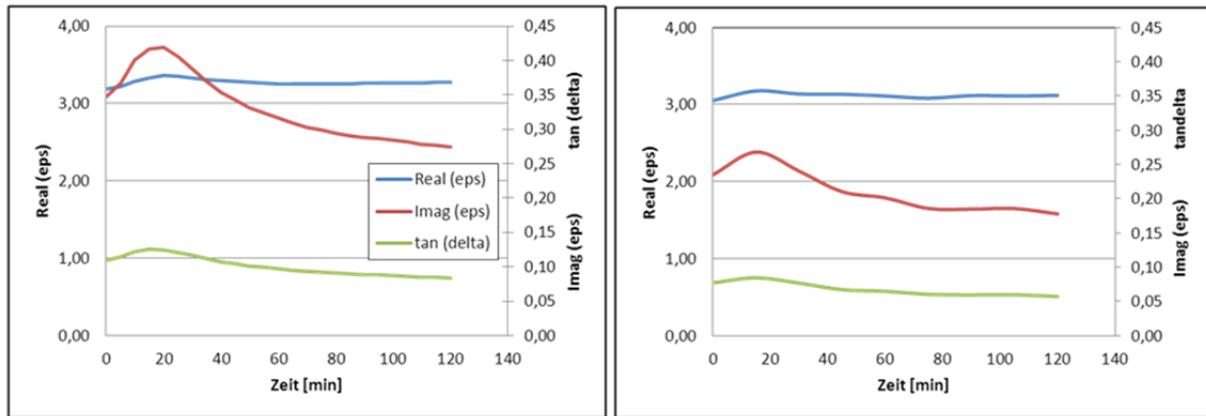


Abbildung 5.54: Dielektrische Eigenschaften Rapid P1T

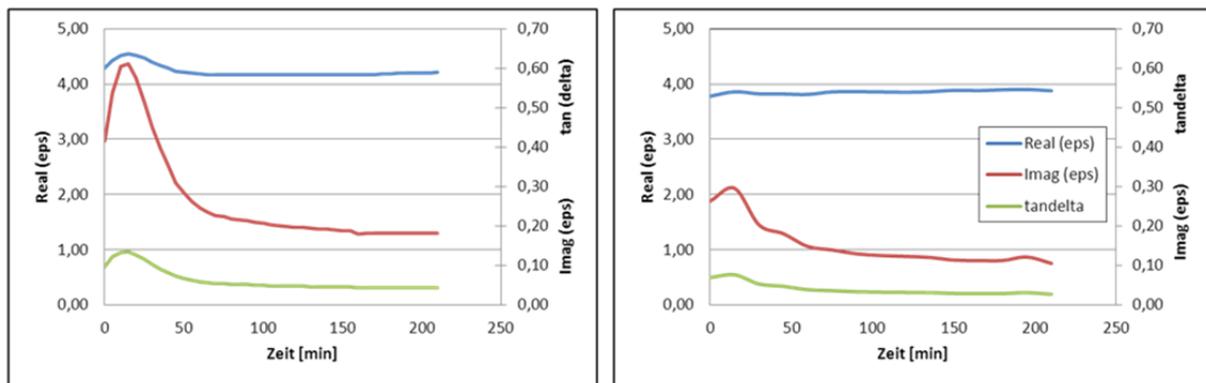


Abbildung 5.55: Dielektrische Eigenschaften Wepuran VU 4452

Für alle Vergussmassen zeigt sich bei beiden Frequenzen ein Effekt. Der imaginäre Anteil der Permittivität nimmt während der Vernetzung zunächst zu und erreicht ein Maximum. Danach fallen die Werte langsam in Abhängigkeit der steigenden Vernetzung ab. Die Vergussmassen zeigen mit wachsendem Vernetzungsgrad eine reduzierte Ankopplungsbereitschaft an die Mikrowelle. Allerdings ist ebenfalls anzumerken, dass die Werte trotz vollständiger Aushärtung nicht derart abfallen, dass die Materialien keinerlei Absorptionsvermögen besitzen. Es ist auch bei einem nach Datenblatt ausgehärteten Material davon auszugehen, dass es Mikrowellenenergie in Wärme umsetzt.

5.1.1 IR-Spektroskopie

Proben werden sowohl im Ofen und in der Mikrowelle ausgehärtet. Anschließend werden die Proben im ATR-Verfahren IR-spektroskopisch untersucht. Dabei wird die oberste Schicht der Materialprobe aufgenommen. Anhand des charakterisierenden Spektrums kann festgestellt werden, inwieweit die chemische Struktur einer im Ofen gehärteten Probe sich von einer in der Mikrowelle gehärteten Probe unterscheidet. Unterschiede in Bezug auf eine veränderte Aushärtereaktion sind damit feststellbar.

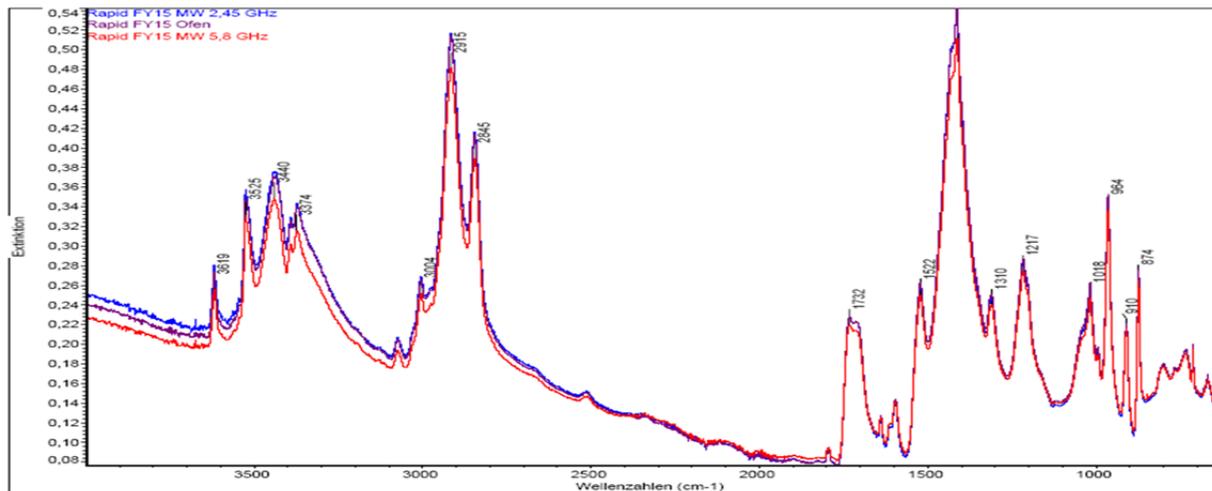


Abbildung 5.56: IR-Spektrum Rapid FY15 Mikrowellen- und Ofenproben

Abbildung 5.56 zeigt die IR-Spektren sowohl einer im Ofen gehärteten Probe sowie zweier Mikrowellenproben (Vergussmasse Rapid FY15). Eine wurde unter der 2,45 GHz, die andere unter der 5,8 GHz Mikrowellenfrequenz verarbeitet. Die Ergebnisse zeigen anhand der Spektren keinerlei Differenzen. Es ist bei diesem Material davon aus zu gehen, dass die Vernetzung im Ofen und in der Mikrowelle in der gleichen Art und Weise stattfinden.

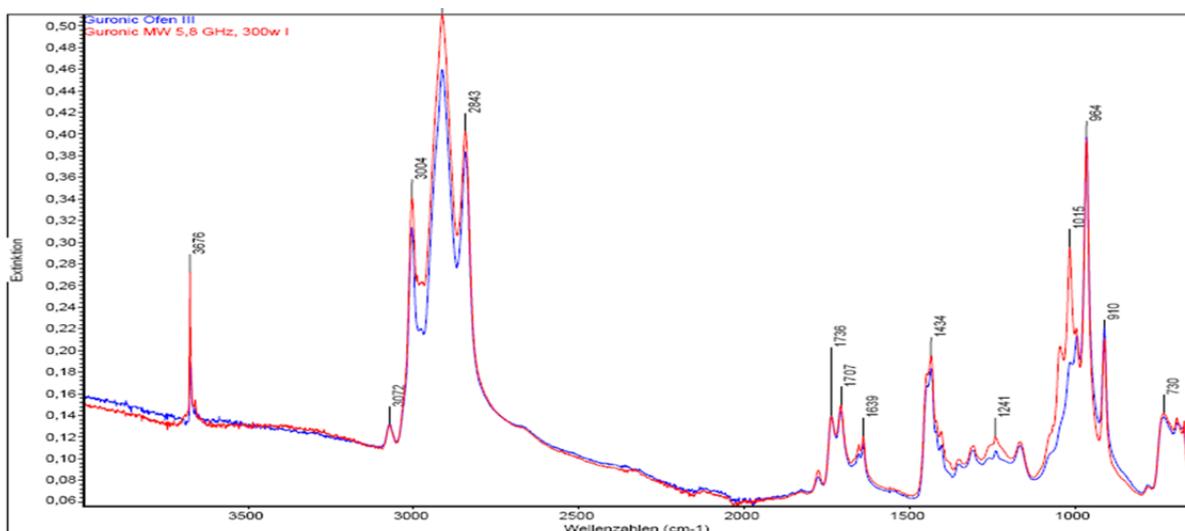


Abbildung 5.57: IR-Spektrum Guronic Mikrowellen- und Ofenproben

Abbildung 5.57 zeigt die IR-Spektren der Vergussmasse Guronic. Hier ist ebenfalls der Vergleich zwischen einer Mikrowellenprobe und einer Ofenprobe dargestellt. Es zeigt sich, dass die Spektren keine qualitativen Unterschiede aufweisen. Unter einer moderaten Temperaturführung während der Verarbeitung sind auch für diese Vergussmasse keine Veränderungen des Eigenschaftsprofils zu erwarten.

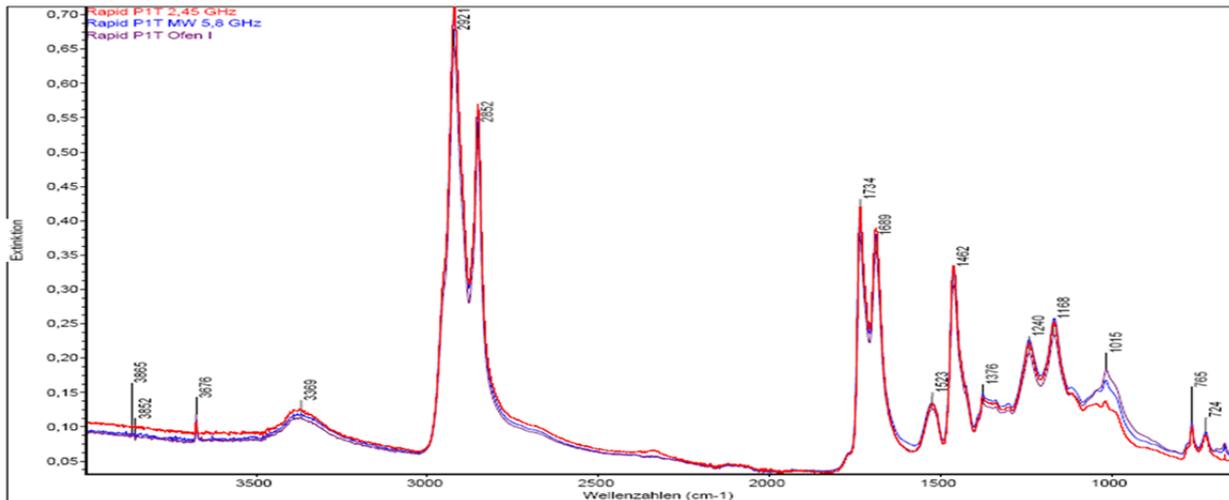


Abbildung 5.58: IR-Spektrum Rapid P1T Mikrowellen- und Ofenproben

Die gleichen Zusammenhänge ergeben sich ebenfalls für die Wepuran Vergussmasse und die Vergussmasse Rapid P1T, zu sehen in Abbildung 5.58. Ein Unterschied innerhalb der IR-Spektren ist auch hier nicht erkennbar.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass unter moderater Prozess- und Temperaturführung die ausgehärtete Struktur der im Mikrowellenverfahren gehärteten Proben derer im Ofen gehärteten gleicht. Das Aushärteverfahren demzufolge keine Auswirkungen auf das spätere Eigenschaftsprofil hat.

5.2 Aushärteversuche Vergussmassen

Aufgrund der inhomogenen Feldverteilung innerhalb der aufgebauten Anlage sind Untersuchungen an großflächigen Bauteilen vorerst nicht realisierbar. Die folgenden Untersuchungen werden daher zunächst an Kleinstproben durchgeführt. Ziel ist dabei, das Verhalten der Vergussmassen in der Mikrowelle zu untersuchen. Aufgetragen wird jeweils die Temperatur über der tatsächlichen Mikrowelleneinkopplung. Es ist anzumerken, dass zwischen jedem der dargestellten Messpunkte eine Temperaturmessung stattgefunden hat. Die Temperaturmessung beinhaltet das Herunterfahren und Öffnen der Anlage, sowie die Temperaturmessung selbst, das Schließen der Anlage und das erneute Anfahren. Insgesamt sind für eine Temperaturmessung etwa 40 Sekunden einzuplanen.

Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils drei Messkurven, so dass etwaige Streuungen eliminiert werden.

5.3.1 Einzelkomponenten

Als erstes werden die Einzelkomponenten der Vergussmassen untersucht. Für alle Vergussmassen zeigt sich bei diesen Versuchen, dass die Härterkomponente besser auf die Mikrowelle anspricht. Stellvertretend sind hier in Abbildung 5.59 die Ergebnisse der Vergussmasse Rapid FY 15 dargestellt. Die Differenzen sind am deutlichsten bei der Vergussmasse Rapid FY15 zu erkennen. Es zeigt sich für alle Untersuchungen zunächst ein steiler Anstieg der Temperatur im ersten Abschnitt der Messung. Danach nimmt die Temperatur lediglich in geringem Maße zu.

Es zeigt sich, dass die Effekte ebenfalls bei der Frequenz 5,8 GHz auftreten. Die gemessenen Temperaturen sind etwas niedriger als bei der 2,45 GHz- Frequenz. Eine Möglichkeit hierfür können Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften in Bezug auf die Frequenz sein sowie unterschiedlich hohe Feldstärken im Bereich der Probe, was ebenfalls mit der Frequenz gekoppelt ist.

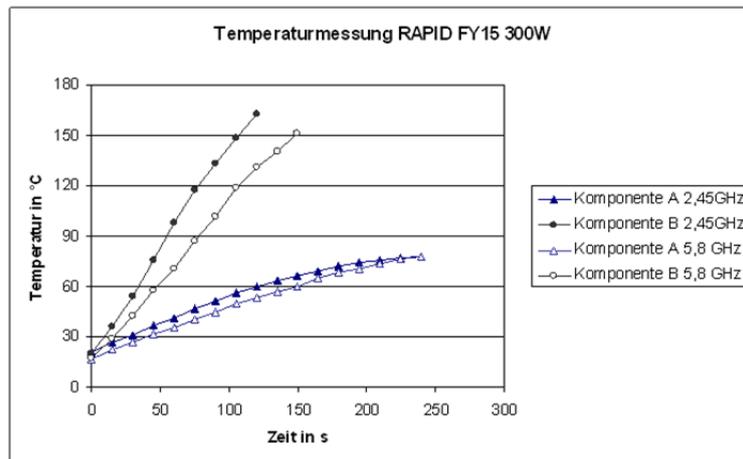


Abbildung 5.59: Temperaturaufnahme Einzelkomponenten Rapid FY 15, Vergleich Komponente A und Komponente B

Eine Ausnahme in diesem Verhalten zeigt die Guronic Vergussmasse, dargestellt in Abbildung 5.60. Da bei dieser Vergussmasse mit einem Mischungsverhältnis von 1:1 gearbeitet wird, sollte der Anteil an funktionellen Gruppen mit Dipolcharakter im Materialvolumen in etwa gleich sein. Dies spricht auch für die Ergebnisse, die zeigen, dass sowohl die Komponente A als auch die Komponente B mit gleichen Temperaturunterschieden auf die Mikrowelle ansprechen.

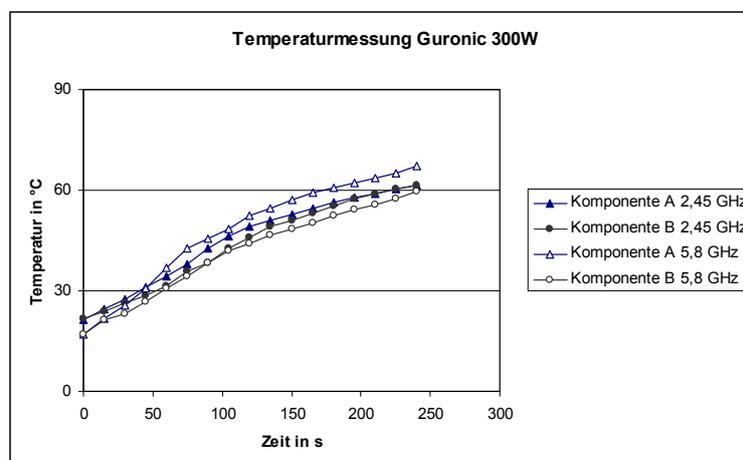


Abbildung 5.60: Temperaturaufnahme Einzelkomponenten Guronic, Vergleich Komponente A und Komponente B

5.3.2 Gemische – Verarbeitungsparameter

Zusätzlich zu den Einzelkomponenten werden die Gemische in der Mikrowelle untersucht. Auch hier wird zunächst mit Kleinstproben gearbeitet, um ein möglichst homogenes Feld im Bereich der Probe sicherzustellen.

Die Einflüsse der Prozessparameter Leistung und Frequenz werden exemplarisch an der Vergussmasse Wepox gezeigt. In Abbildung 5.61 sind die Ergebnisse der Untersuchungen bei 2,45 GHz dargestellt. Für diese Frequenz zeigt sich, dass eine Abhängigkeit der Temperaturentwicklung im Materialvolumen von der gewählten Leistung besteht. Zu erkennen ist, dass gerade unter höheren Leistungen mit einem schnelleren Aufheizvorgang im Materialvolumen zu rechnen ist.

Es ist ebenfalls festzustellen, dass sich nach einer gewissen Prozesszeit eine Grenztemperatur im Material einstellt, ab welcher das Volumen nicht weiter erwärmt wird. Zusehen ist dies für die Leistungsstufen 500 W, 600 W und 750 W. Die Erwärmung unter 150 W ist so gering, dass diese Grenztemperatur im Rahmen der Untersuchungen nicht erreicht wird.

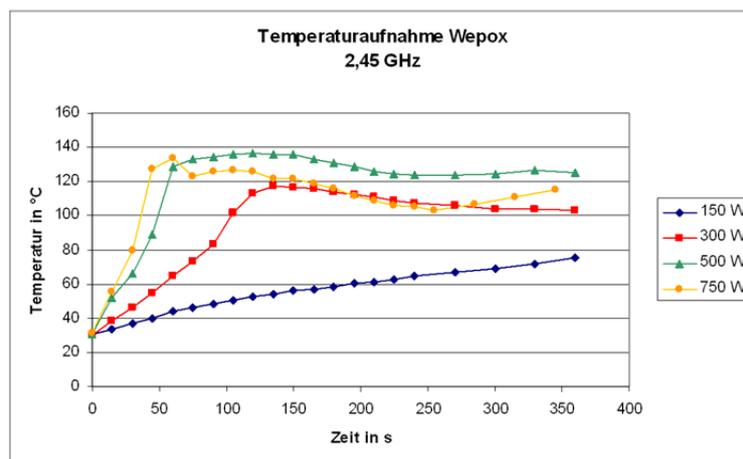


Abbildung 5.61: Vergussmasse Wepox 2,45 GHz, Parameter Leistung

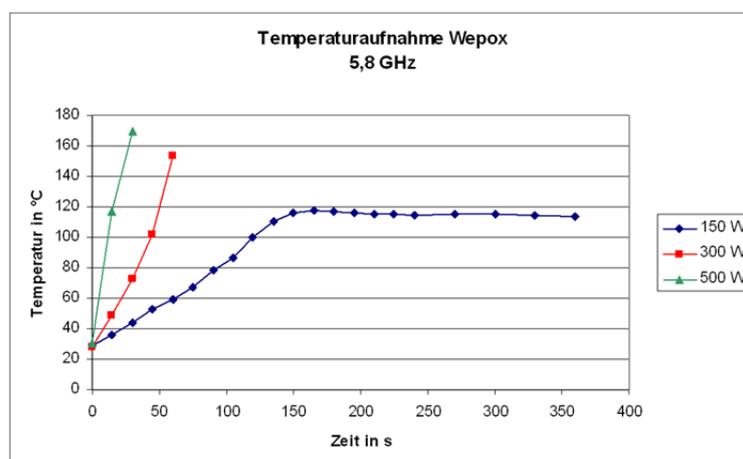


Abbildung 5.62: Vergussmasse Wepox 5,8 GHz, Parameter Leistung

Die Ergebnisse der Untersuchungen bei 5,8 GHz zeigen einen identischen Zusammenhang, siehe Abbildung 5.62. Die Untersuchungen zeigen erwartungsgemäß eine Abhängigkeit der im Materialvolumen entstehenden Temperatur von der zugeführten Leistung. Es zeigt sich ferner, dass das Material mit höheren Temperaturwerten auf die Einkopplung der Mikrowelle reagiert. Die Versuche bei 300 W und 500 W werden aufgrund der hohen Heizrate zwischen zwei Messungen vorzeitig abgebrochen. Es wurden die Grenztemperaturen von 150°C erreicht, die laut TGA Untersuchungen mit einem Masseverlust der beteiligten Komponenten verbunden ist.

Vergleich der untersuchten Materialien

Ein Vergleich der untersuchten Vergussmassen ist in Abbildung 5.63 dargestellt. Zu sehen ist der Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei einer festen Parameterkonstellation. Einkoppelt wurde jeweils für 30 Sekunden mit 300 W bei 2,45 GHz. Der Vergleich zeigt, inwieweit die Materialien unterschiedlich auf die Einwirkung von Mikrowellen reagieren.

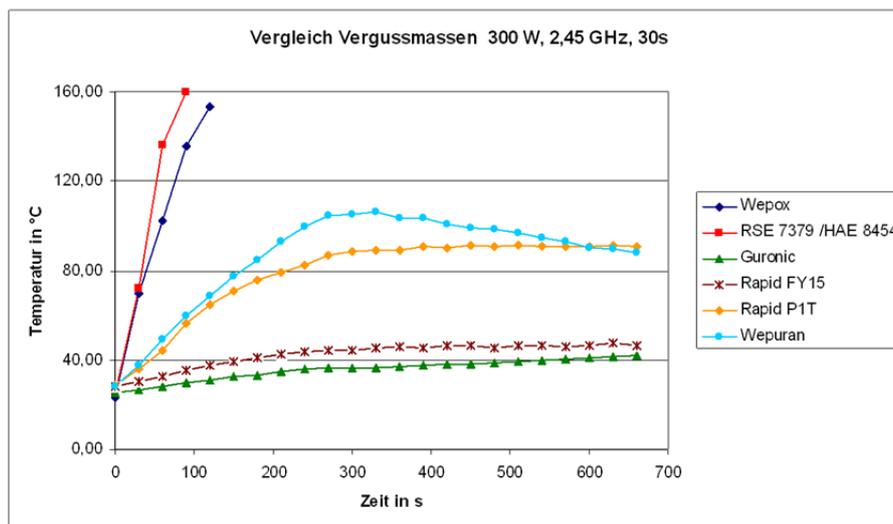


Abbildung 5.63: Temperaturaufnahme Vergussmassen 2,45 GHz 150 W

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Vergussmassen auf Epoxidharzbasis und denen auf Polyurethanbasis zu erkennen. Die beiden Epoxidharzvergussmassen Wepox und RSE 7479/HAE 8454 zeigen einen größeren Temperaturanstieg in der ersten Phase der Untersuchung. Beide Vergussmassen erreichen nach relativ kurzer Mikrowelleneinkopplung eine Grenztemperatur von 160 °C, bei welcher der Versuch abgebrochen wurde. Der schnelle Temperaturanstieg lässt sich nicht nur durch eine höhere Ankopplung, sondern auch mit der exothermen Vernetzungsreaktion der Epoxidharze begründen, da hier zusätzlich zur Temperaturentwicklung durch die Mikrowelle, Temperatur im Materialvolumen durch Reaktionswärme entsteht.

Die Temperaturentwicklung der Polyurethanvergussmassen ist etwas moderater. Es entstehen unter den oben genannten Prozessparametern Temperaturen von etwa 110 °C. Die Vernetzung kann unter diesen Umständen ohne thermisch begründete Zersetzungserscheinungen erfolgen. Es lässt sich gerade bei den Vergussmassen Wepuran und Rapid P1T ebenfalls eine maximale Temperatur und die Annäherung an einen Temperaturgrenzwert erkennen. Die Vergussmasse Guronic und die Polyurethan-Vergussmasse Rapid FY15 reagieren im Vergleich mit den anderen Materialien träger auf die Mikrowelleneinwirkung. Die Annäherung an eine Grenztemperatur ist bei diesen beiden Vergussmassen andeutungsweise erkennbar. Die im Materialvolumen entstehenden Temperaturen liegen bei etwa 45 °C. In der Praxis wären für diese Materialien höhere Mikrowellenleistungen zu wählen, als bei diesem Vergleichsversuch, um gegenüber einer rein thermischen Härtung im Ofen eine Beschleunigung des Aushärtungsvorgangs zu erzielen.

Die Ergebnisse bei der höheren Frequenz 5,8 GHz werden bei einer niedrigeren Leistung durchgeführt. Für diese Versuche werden in die Materialprobe jeweils 150 W für jeweils 30 Sekunden eingekoppelt und anschließend die Temperatur gemessen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5.64

Die qualitativen Zusammenhänge spiegeln sich auch bei dieser Parameterkonfiguration wieder. Es zeigt sich, dass die Epoxidharze auch bei diesen Einstellungen schnell die Grenztemperatur von 160 °C erreichen. Die Vergussmassen Wepuran VU 4452 und Rapid P1T sprechen auch in diesem Fall besser an die Mikrowelle an als die Vergussmassen Guronic und die Polyurethanvergussmasse Rapid FY15. Die Polyurethanvergussmassen erreichen unter den gegebenen Prozessparametern maximale Prozesstemperaturen von 120 °C.

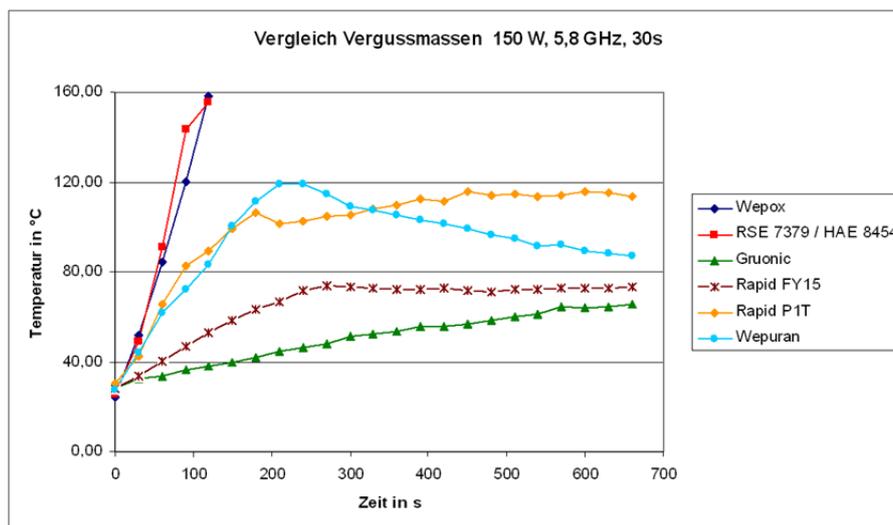


Abbildung 5.64: Temperaturentwicklung Vergussmassen 5,8 GHz 150 W

In Tabelle 5.1 werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Aufgeführt ist, bis zu welcher Leistungsstufe die Vergussmasse sinnvoll verarbeitet werden kann. Es ist zusätzlich eingetragen, unter welchen Einkopplungsintervallen mit einer vollständigen Aushärtung der

Materialien zu rechnen ist. Die Ergebnisse sind sowohl für die 2,45 GHz Frequenz als auch für die 5,8 GHz Frequenz ermittelt.

Anzumerken ist, dass die Ergebnisse lediglich für die untersuchten Kleinstproben und die vorhandene Anlage mit der entsprechenden Einkopplungsvariante gelten. Abweichungen in Form von Geometrie, Anlagentechnik und Material beeinflussen die Ergebnisse maßgeblich.

Tabelle 5.1: Ergebnisse Einkopplungsversuche Vergussmassen

Material	Max Leistung 2,45 GHz	Summe Mikrowellen- einwirkzeit bis Material fest	Max Leistung 5,8 GHz	Summe Mikrowellen- einwirkzeit bis Material fest
PUR				
Guronic	1000 W	630 s /30	500 W	660 s /30
Rapid FY15	500 – 750 W	360 s /30	300 W	360 s /30
Rapid P1T	300 – 500 W	270 s /30	150 W	270 s /30
Wepuran	300 – 500 W	240 s /30	150 W	270 s /30
Epoxidharze				
Wepox	150 W	90 s /30	150 W	90 s /30
RSE 7379 / HAE 8454	150 W	90 s /30	150 W	90 s /30

In Abbildung 5.65 sind Proben dargestellt, die ein etwas größeres Volumen besitzen. Die Aushärtung dieser Volumen erfolgt mit dem Einbau eines von Seiten der Forschungsstelle integrierten Drehtellers. Durch diesen wurde es möglich, das vorhandene inhomogene Mikrowellenfeld zumindest über die Zeit hinweg zu homogenisieren, so dass auch größere Proben mit dem Mikrowellenverfahren ausgehärtet werden konnten.

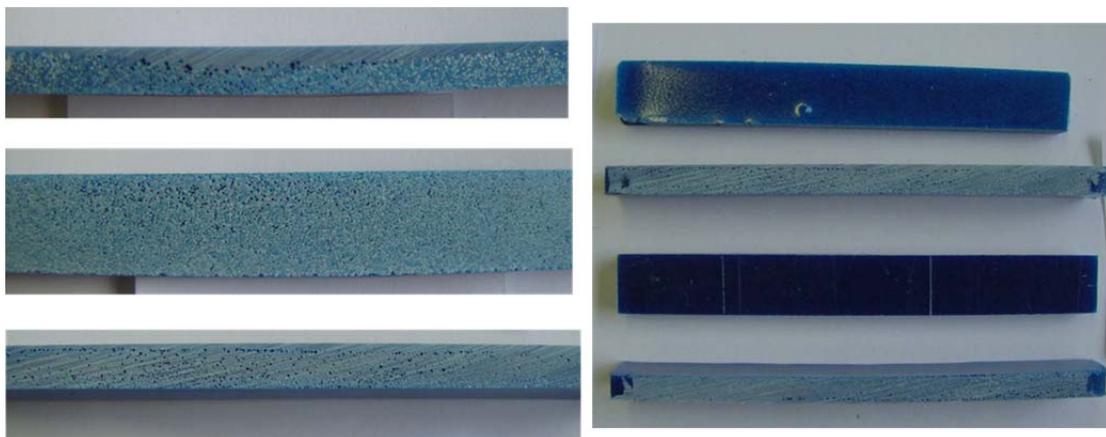


Abbildung 5.65: Blasenbildung Vergussmasse Wepuran

Die Proben zeigen, dass es durch den Einsatz der Mikrowelle zu einer verstärkten Blasenbildung im Volumen kommen kann. Da auch innerhalb der Ofenproben vereinzelt Bläschen festgestellt werden, ist dieser Effekt zum einen durch das Material selbst zu begründen, zum anderen durch die Temperaturentwicklung im Materialvolumen, was eine Blasenbildung begünstigen kann.

Die größeren Proben besitzen ein Volumen von 20 mm x 90 mm x 4 mm. Aus diesen Proben können durch mechanische Bearbeitung Proben für die Kennwertermittlung (z.B. Biegeversuch) hergestellt werden. Die Temperaturmessung erfolgt bei diesen Proben mittels IR-Thermometer. Es werden bei diesem Proben zwei Messpunkte ausgewählt, ein Punkt in der Mitte der Materialprobe und ein Punkt am Rand.

Die Differenzen werden in den folgenden Abbildungen deutlich. Alle sechs untersuchten Vergussmassen zeigen eine stärkere Erwärmung in der Mitte des Materials, die äußeren Bereiche erwärmen sich zwar ebenfalls, jedoch in einem Temperaturbereich, der etwa 10°C niedriger ist. Dieser Effekt ist materialunabhängig und spricht für das volumetrische Erwärmen durch die Mikrowelle. Die Wärme wird in diesem Fall über die Oberfläche abgegeben, so dass sich Bereiche am Rand der Probe schneller abkühlen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.66 und Abbildung 5.67 zu sehen.

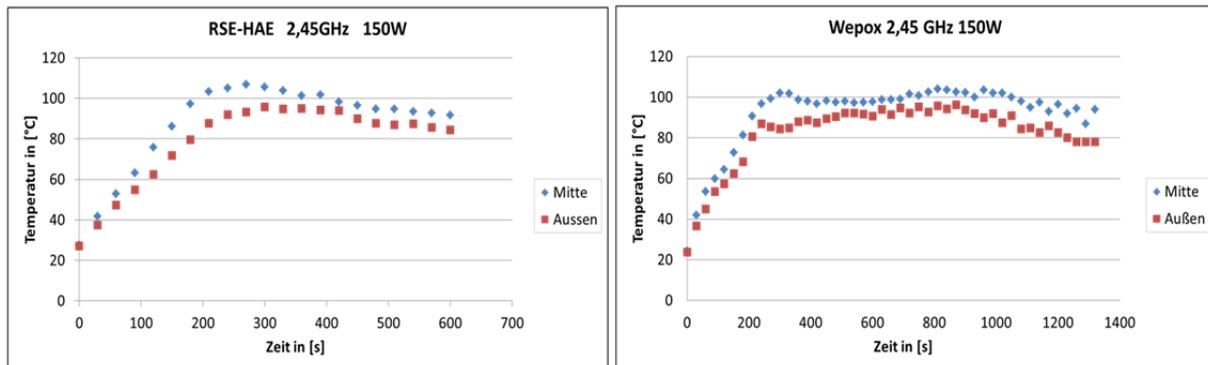


Abbildung 5.66: Temperaturentwicklung im Materialvolumen Epoxidharze

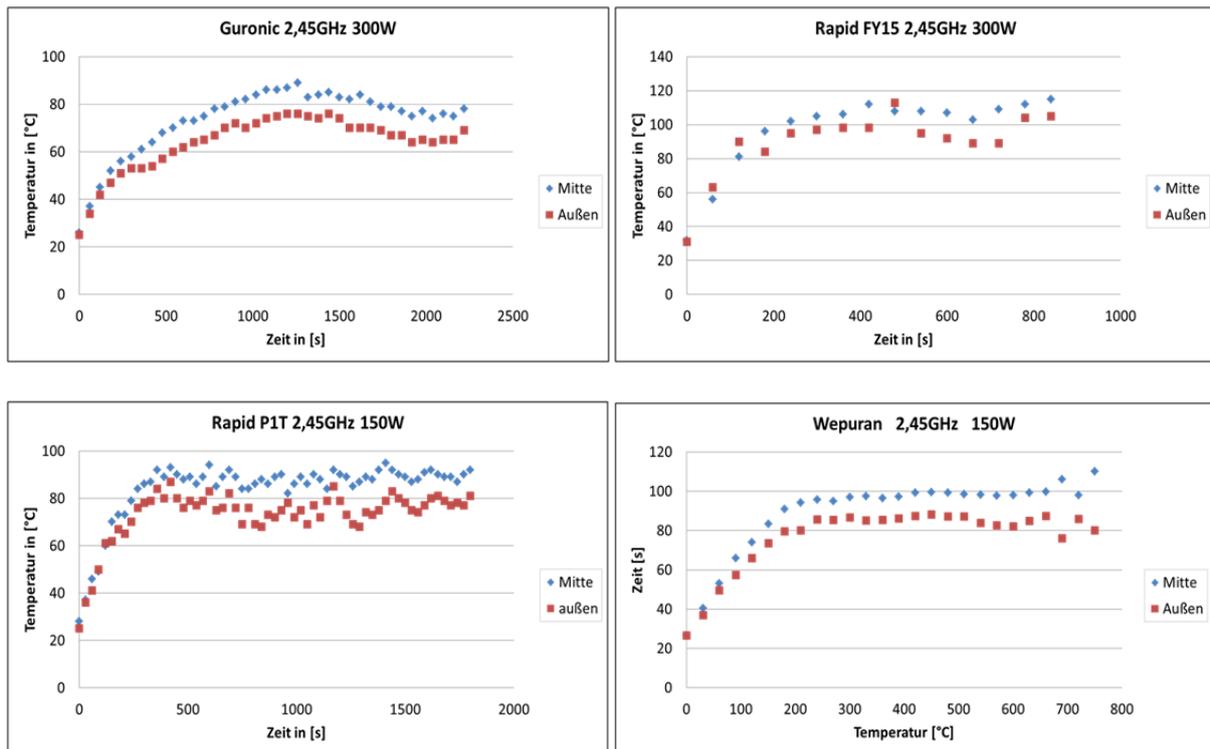


Abbildung 5.67: Temperaturentwicklung im Materialvolumen Guronic, Rapid P1T, Rapid FY15, Wepuran VU 4452

5.3 Mechanische Kennwerte

Die großflächigen Proben werden nach der Aushärtung in der Mikrowelle und im Ofen mechanisch bearbeitet. Für die Prüfung der Biegespannung werden nach Norm Prüfkörper mit Abmaßen 80 mm x 10 mm x 4 mm benötigt. Die Polyurethanvergussmassen sind für die Ermittlung der Biegefestigkeit zu weich. Aus diesem Grund wird die Biegefestigkeit an den Exoxidharzen sowie der Polyurethanvergussmasse Wepuran VU 4452 durchgeführt.

5.4.2 Biegeversuche

Die Ergebnisse der Biegedehnung beim Bruch sind vergleichend in Abbildung 5.68 aufgeführt. Die Werte setzen sich jeweils aus einer Mittelwertbildung von fünf Messungen zusammen. Die Streuungen sind jeweils durch Streubänder markiert.

Hinsichtlich der Biegedehnung beim Bruch ist eine Tendenz zu erkennen, dass die im Mikrowellenverfahren gehärteten Proben eine geringfügig größere Bruchdehnung aufweisen. Die Werte bewegen sich laut Herstellerangaben jedoch alle im Bereich der normalen Materialstreuung, so dass nicht von einem veränderten Eigenschaftsprofil ausgegangen werden kann. Ggf. machen sich hier ein geringfügig veränderter Aushärtungsgrad oder ein geringer Restmonomergehalt (Weichmachereffekt) bemerkbar. Die Abweichungen können aber auch auf Schwankungen der Komponentenchargen beruhen oder durch Differenzen beim Mischen der Proben entstehen.

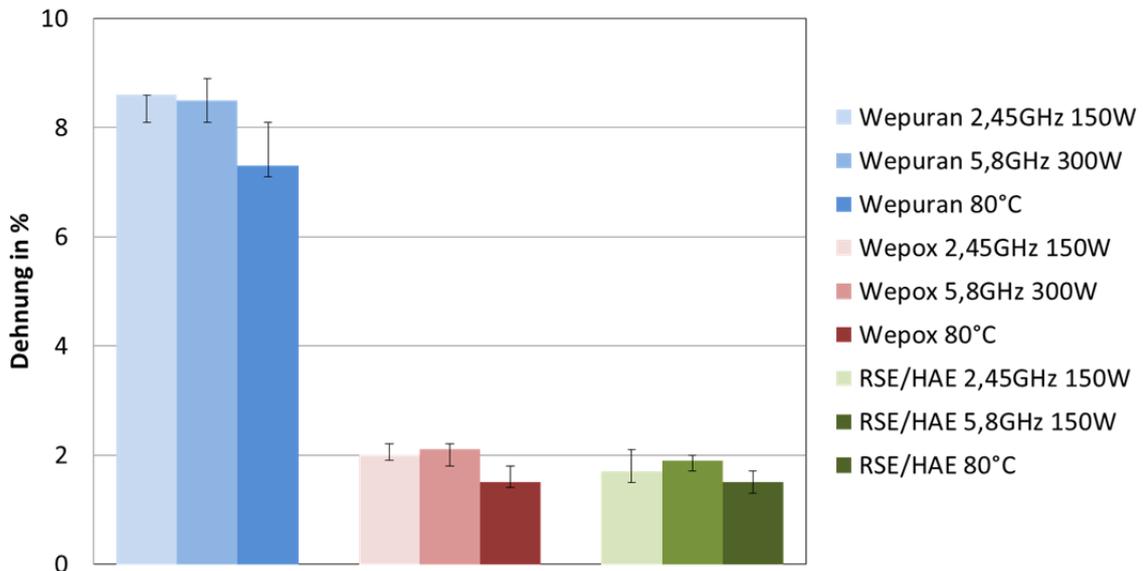


Abbildung 5.68: Biegedehnung beim Bruch

Die gemessenen Biegespannungen beim Bruch liegen ebenfalls in einem Bereich, der auf die normalen Streuungen der Materialchargen zurückzuführen ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.69 zu sehen. Bei der Wepuran VU 4452 Vergussmasse und dem Epoxidharz RSE 7879/HAE 8454 zeigt sich durch den Mikrowellenprozess eine Tendenz, dass die Biegespannung etwas niedriger ausfällt. Für das Epoxidharz Wepox kann dieser Effekt nicht bestätigt werden. Bei diesen Messungen ist die Biegespannung der unter Mikrowellen gehärteten Proben höher.

In Abbildung 5.70 wurde erneut die Biegespannung beim Bruch an Proben der Wepuran VU 4452 Vergussmasse aufgenommen. Die Proben wurden aus einer anderen Materialcharge hergestellt. Es zeigen sich geringe Unterschiede bei der Messgröße Biegespannung. Die Streuungen fallen bei den Proben aus der Mikrowelle erneut geringer aus.

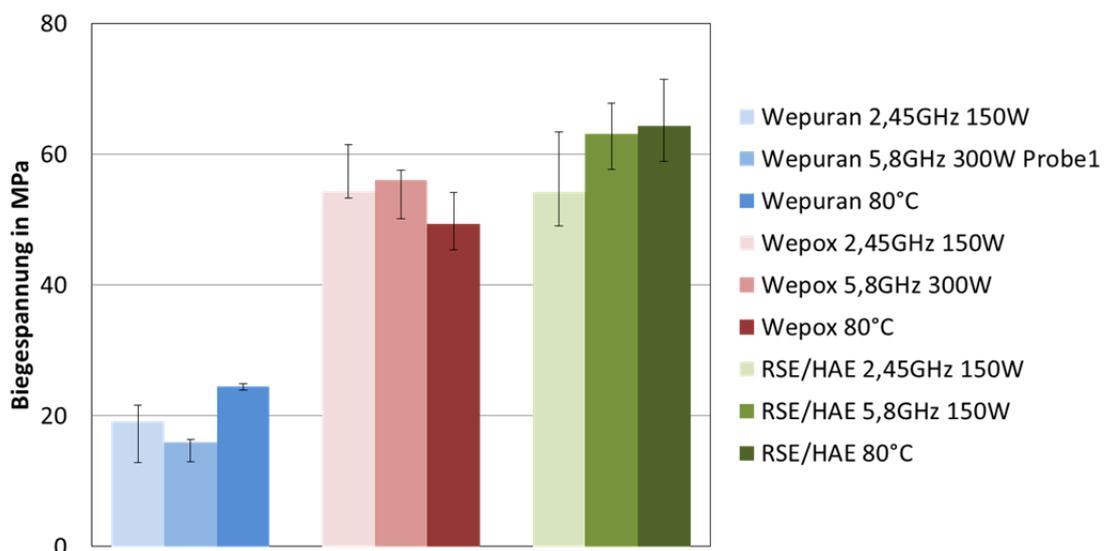


Abbildung 5.69: Biegespannung beim Bruch, Vergleich Proben aus dem Ofen und der Mikrowelle

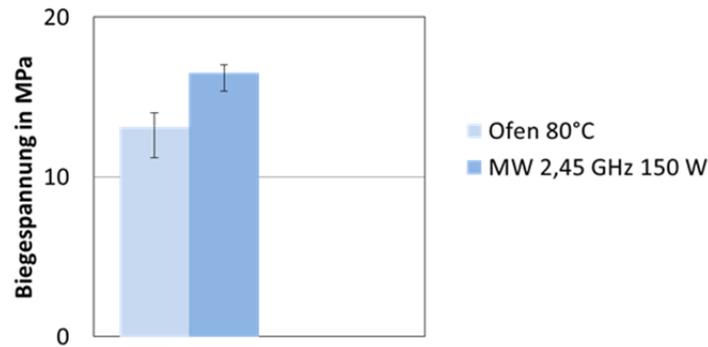


Abbildung 5.70: Vergleich der Biegespannung beim Bruch (Wepuran, andere Charge) im Ofen und Mikrowelle gehärtet

5.4.3 Mikrohärte

Für die weicheren Polyurethanvergussmassen Rapid FY15 und Rapid P1T wurden Mikrohärteprüfungen durchgeführt. In Abbildung 5.71 sind die Ergebnisse vergleichend aufgezeigt. Es zeigt sich für die beiden Vergussmassen, dass die Werte unabhängig vom gewählten Aushärteverfahren und dessen Parametern nahezu unabhängig sind. Die aufgetretenen Schwankungen liegen auch für diese Versuche im normalen Schwankungsbereich der Materialien selbst. Durch diese Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Eigenschaftsprofile der vernetzten Vergussmassen sich nicht unterscheiden.

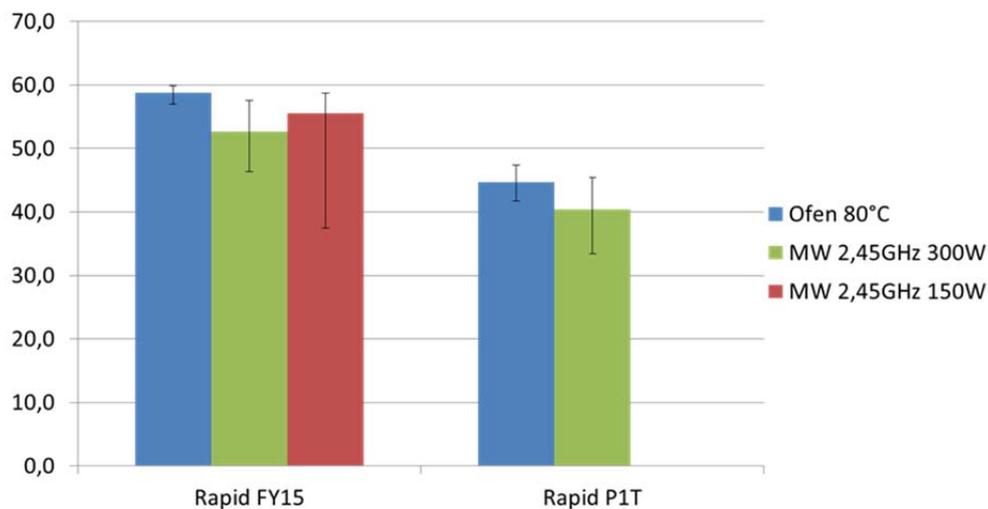


Abbildung 5.71 Mikrohärteprüfung Rapid FY15 und Rapid P1T

Für die Durchführung weiterer mechanischer und elektrischer Untersuchungen sind die herzustellenden Proben geometrisch zu klein. Die aktuelle Feldverteilung in der Kammer ermöglicht es nicht, großflächige Proben herzustellen, die vergleichbar mit Proben, die im Ofen gehärtet wurden, sind.

5.5 Verarbeitung rieselfähiger Formmassen

Die Verarbeitung der rieselfähigen Formmassen erfolgt in Kombination zwischen Mikrowellenenergie und aufgebrachtem Druck durch eine Presse. Wie bereits beschrieben, ist dafür die Konstruktion des metallischen Werkzeuges in Form eines Keramikwerkzeugs notwendig. Diese wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet und wird im Folgenden beschrieben. Neben der Konzeption und Konstruktion wurden zusätzliche Simulationen mit Comsol Multiphysics angefertigt.

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde auf eine Fertigung des Werkzeuges verzichtet. Die technische Umsetzung der Konstruktion bleibt somit einem Folgeprojekt vorbehalten (siehe unten).

5.5.1 Keramikwerkzeug

Für die Verarbeitung der rieselfähigen Formmassen ist die Aushärtung unter zusätzlichem Druck erforderlich. Um den Druck auf die Materialien aufbringen zu können, ist die Verwendung eines Werkzeuges notwendig. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Werkzeugen aus Metall, ist für die Mikrowelle ein mikrowellentransparentes Werkzeug zu konstruieren und in die Mikrowelle zu integrieren. Zusätzlich muss es den mechanischen Einflüssen während es Pressvorgangs standhalten.

Auf dieser Grundlage wird als Werkstoff eine Aluminiumoxid-Keramik mit einem geringen dielektrischen Verlust ausgewählt.

Das Werkzeug setzt sich aus drei Teilen zusammen. Dies sind der Stempel, der Auswerfer und das Werkzeugunterteil. In Abbildung 5.71 sind eine Skizze sowie eine technische Zeichnung des Werkzeugs zu sehen.

In einem weiteren Schritt wurden die auftretenden Spannungen im Innern des Werkzeuges mittels Comsol Multiphysics simuliert. In Abbildung 5.72 ist zu sehen, dass der Druck im Werkzeuginnern am Größten ist und hier auf einen Werkstoff zurück zu greifen ist, der diesem gewachsen ist. Zum besseren Entformen der späteren Proben ist der Einsatz eines Auswerfers sinnvoll. Die rieselfähigen Formmassen werden während der Verarbeitung flüssig, so dass dies bei der Berechnung der Spaltmaße zu berücksichtigen ist. Die Oberfläche des Werkzeugmaterials sollte möglichst glatt ausgelegt sein und evtl. durch Entformungsmittel zusätzlich verbessert werden.

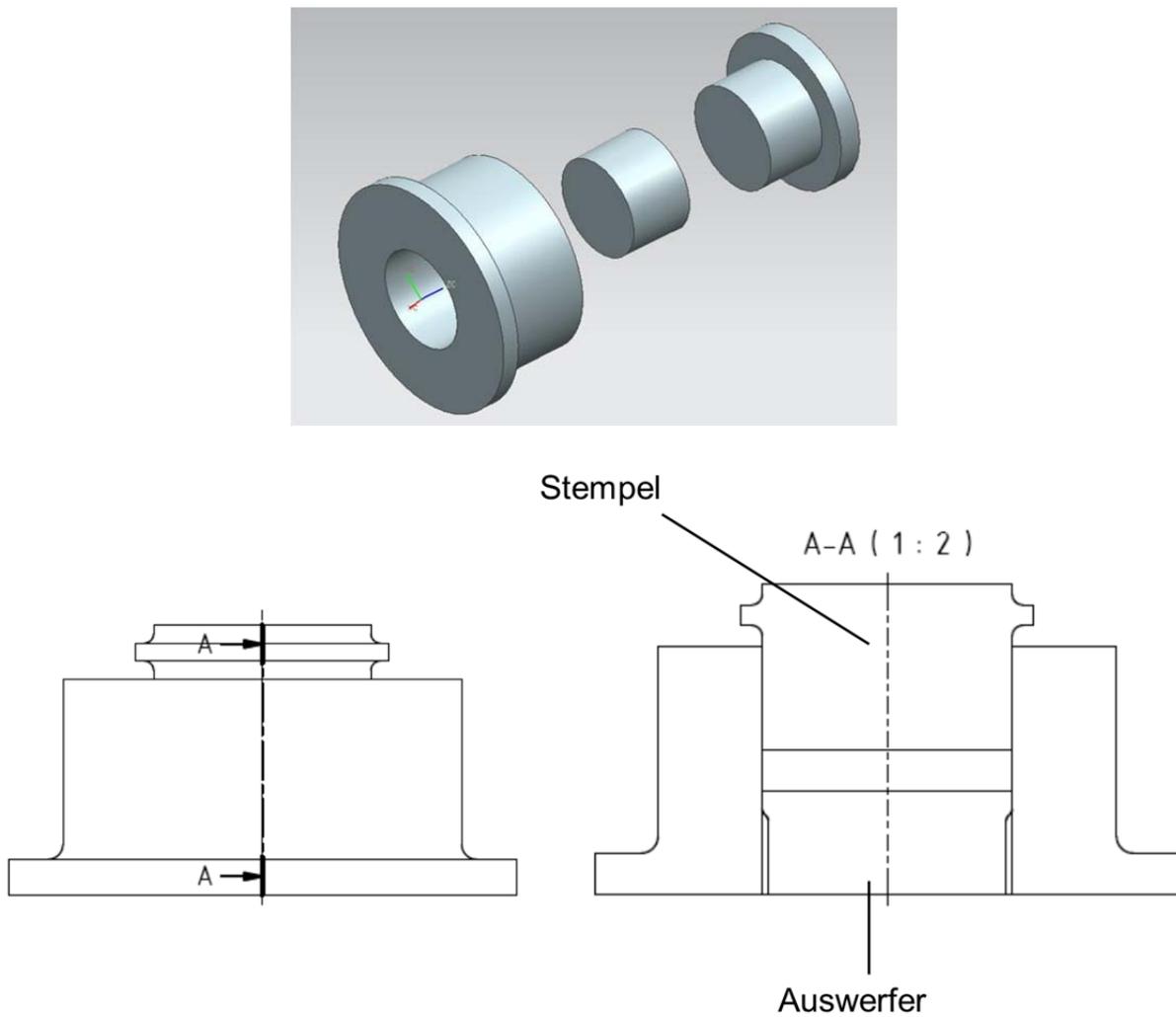


Abbildung 5.71: Skizze und technische Zeichnung des Keramikwerkzeugs

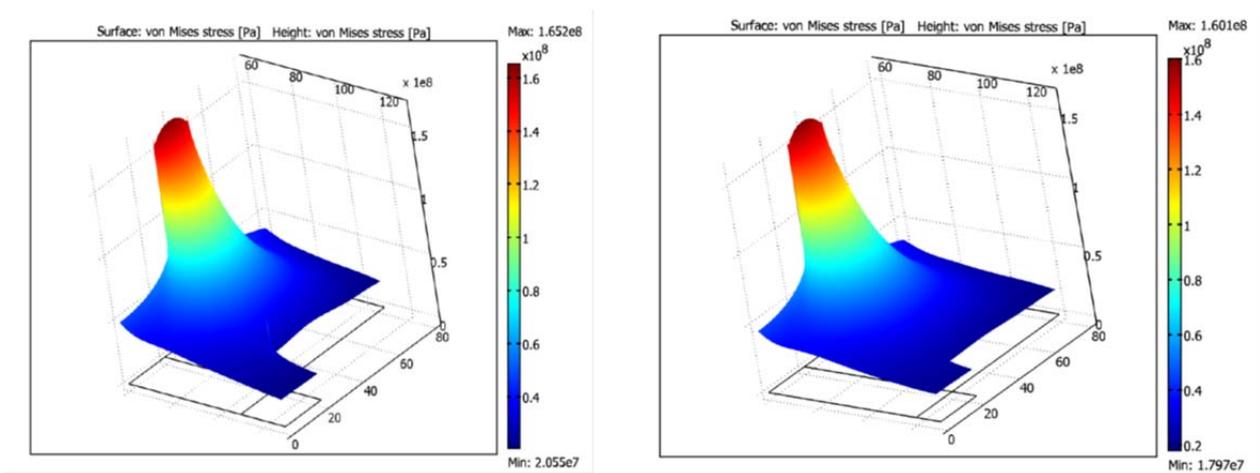


Abbildung 5.72: Simulation mit Comsol

Für die Entformung der ausgehärteten Formmassen ist der Stempel des Werkzeugs später per Hand aus der Mikrowelle zu nehmen. Um ein besseres Handling zu erzielen, wird angedacht den Stempel mit zwei Griffen zu versehen, vgl. Abbildung 5.73. Je nach Konzept können diese auch nach der Verarbeitung angebracht und nur für den Entformungsvorgang genutzt werden.

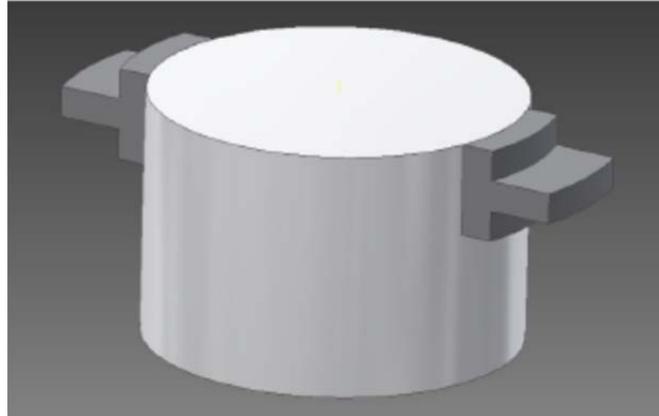


Abbildung 5.73: Beispiel des Werkzeugstempels

5.5.2 Anwendung des Mikrowellenverfahrens auf das Pressverfahren

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit den gewählten Anlagenkonzepten im Bereich der späteren Materialprobe im Keramikwerkzeug kein homogenes Feld zu erreichen ist.

Mit der Einkopplung über einen Ring-Schlitz-Hohlleiter, sowie die Einkopplung über Antennen konnte keine Einstellung gefunden werden, die mit diesem Aufbau eine erfolgreiche Erprobung der Technik zur Folge gehabt hätte. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass für eine homogene Feldverteilung in einem statischen Aufbau eine Vorrichtung existieren sollte, die das Feld zumindest zeitlich im Bereich der Materialprobe homogenisiert.

Für die Verarbeitung der Vergussmassen oder der Leiterplatten kann dies über eine Rotation der Bauteile im Mikrowellenfeld erfolgen. Im späteren industriellen Einsatz kann auch ein Durchlaufkonzept eine sinnvolle Alternative darstellen.

Die Verarbeitung der rieselfähigen Formmassen erlaubt nur sehr geringe Temperaturunterschiede im Materialvolumen während der Verarbeitung, um möglichst eigenspannungsfreie und gleichmäßig vernetzte Proben herzustellen. Die Anforderungen liegen hier laut Herstellerangaben bei maximal +/- 1°C. Wie bereits bei der Aufnahme der Feldverteilungen zu sehen, entstehen in der Kammer bereits nach wenigen Sekunden der Mikrowelleneinkopplung Temperaturunterschiede von größer 5°C.

Sowohl die Simulationen als auch die Praxisversuche zeigen aktuell keine Maßnahmen, mit welchen das Feld homogenisiert werden kann. Trotz der Verlängerung des Projekts um ein weiteres Jahr, ist es dem Mikrowellenhersteller nicht gelungen, ein homogenes Feld zu realisieren. Auf dieser Grundlage wurde vom Arbeitskreis in diesem Projekt von einer Anwendung auf rieselfähige Formmassen abgesehen. Der zusätzliche, noch notwendige Entwicklungsaufwand im Bereich der Mikrowellentechnik würde die im Projekt veranschlagten Ressourcen weit übersteigen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Vorversuchen mit den rieselfähigen Formmassen gezeigt. Es konnte zumindest im kleinen Maßstab gezeigt werden, dass eine Verarbeitung der Materialien generell möglich ist und sie Mikrowellenenergie absorbieren. Der notwendige Druck konnte im Rahmen der Vorversuche allerdings nicht aufgebracht werden.

5.5.3 Rieselfähige Formmassen – Vorversuche

Im Rahmen der Vorversuche wurden bei einer Frequenz von 2,45 GHz Kleinstproben der im Projekt verwendeten rieselfähigen Formmassen ausgehärtet. In Abbildung 5.74 ist die Skizze des Versuchsaufbaus erkennbar. Als Form diente ein Stück Teflon-Rohr, sowie ein Stempel ebenfalls aus Teflon. Teflon zeichnet sich durch einen geringen dielektrischen Verlustfaktor aus. Die Mikrowellenenergie wird von der Form demzufolge nicht absorbiert und kann direkt in das auszuhärtende Gut eindringen.

Für die Versuche wurden Proben unterschiedlicher Dauer dem Mikrowellenfeld ausgesetzt. Dabei wurde eine Kraft auf den Stempel der kleinen Form aufgebracht, um die Formmasse unter zumindest leichtem Druck auszuhärten. Die in der Praxis üblichen Drücke von mehreren 100 bar konnten in dieser Form aber nicht realisiert werden.

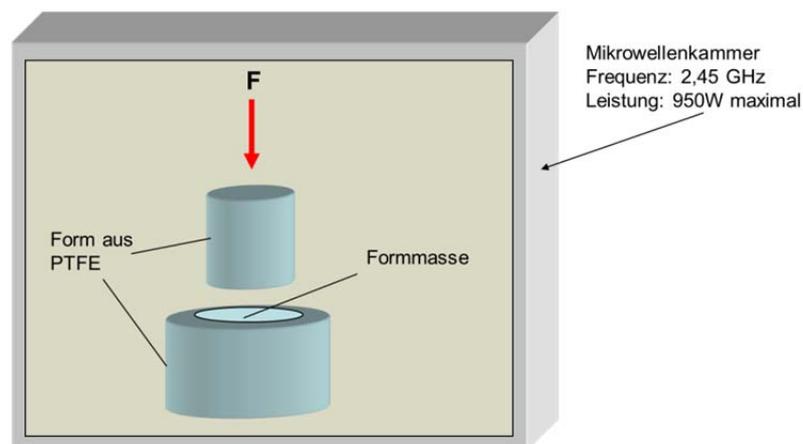


Abbildung 5.74: Skizze Vorversuche rieselfähige Formmassen

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abbildungen 5.75 bis 5.81 gezeigt. Die beiden Polyesterformmassen UP 3420 und UP 804 zeigen ein Aufschmelzen und Vernetzen. Die dafür notwendige Prozessdauer beträgt allerdings ein Vielfaches von der mittels konventioneller Härtung. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf eine nur geringe Ankopplung der rieselfähigen Masse im noch nicht aufgeschmolzenen Zustand sowie darauf, dass der aufgebrauchte Druck nicht ausreicht. Es zeigt sich bei beiden Formmassen nach wenigen Minuten eine Reaktion, welche zeigt, dass die Formmassen generell auf die Mikrowelle reagieren und das Mikrowellenverfahren durchaus für die Verarbeitung der Formmassen anwendbar ist.

Zur Optimierung der Ankopplung wäre hierbei ein hybrides Erwärmungsverfahren durch Kombination einer vorplastifizierten Masse mit einer nachfolgenden Mikrowellenhärtung in Erwägung zu ziehen.



Abbildung 5.75: Vorversuche UP 804, Polyesterformmasse



Abbildung 5.76: Vorversuche UP 3420, Polyesterformmasse

Die Phenolformmassen reagieren unter den gegebenen Bedingungen nicht ganz so gut wie die Polyesterformmassen. Hier ist eine Differenz in Abhängigkeit der Schüttdichte zu erkennen. Die Formmasse mit einer höheren Schüttdichte reagierte langsamer auf den Einfluss der Mikrowelle als die Phenolformmasse mit einer niedrigeren Schüttdichte. Dieser Effekt lässt sich insbesondere durch den zu geringen Verarbeitungsdruck erklären



Abbildung 5.77: Vorversuche PF 1110, Phenolformmasse



Abbildung 5.78: Vorversuche PF 6510, Phenolformmasse



Abbildung 5.79: Vorversuche PF 31-9005-51, Phenolformmasse

Die Abhängigkeit der Verarbeitung von der Schüttdichte der Formmasse ist ebenfalls anhand der Ergebnisse der Melaminformmasse MG-MP und der Harnstoffharz-Formmasse 161 erkennbar. Die untersuchten Formmassen besitzen eine vergleichsweise hohe Schüttdichte und konnten unter den gegebenen Verarbeitungsbedingungen nicht vollständig aufgeschmolzen und vernetzt werden. Allerdings zeigt sich auch bei diesen, dass sie auf die Mikrowelle ansprechen und deren Energie absorbieren. Die Verarbeitung sollte auch für diese Materialgruppe unter optimierten Bedingungen mittels Mikrowellen möglich sein.



Abbildung 5.80: Vorversuche MG-MP Melochem, Melaminformmasse



Abbildung 5.81: Vorversuche Formmasse 161, Harnstoffharz-Formmasse

6 Ergebnisse Uni Rostock

6.1 Voruntersuchungen

6.1.1 Voruntersuchungen zur Materialauswahl

Für eine erste Klassierung der Materialien bzgl. ihrer grundsätzlichen Eignung für die Mikrowellenerwärmung wurden, bis zur Bereitstellung einer Laboranlage durch die Fa. Fricke und Mallah, die ersten Voruntersuchungen mit einer modifizierten Haushaltsmikrowelle durchgeführt. Bei dieser Anlage wurde der Drehteller durch einen festen Probenhalter ersetzt und der Innenraum mit Mantelthermoelementen zur Erfassung der Probentemperaturen ausgestattet. Auf diese Weise sollen feste Positionen der Proben zu reproduzierbaren Ergebnissen führen. Da eine Homogenisierung der Feldverteilung ohne den Drehteller nicht erfolgen kann, wurde der Innenraum der Mikrowellenanlage mittels Thermopapier bezüglich seiner Feldverteilung vermessen und evaluiert. Durch die Messung der Verteilung in mehreren Ebenen entsteht quasi ein dreidimensionales Bild. Die folgende Abbildung 6.1 zeigt die Verteilungen in verschiedenen Ebenen der Anlage.

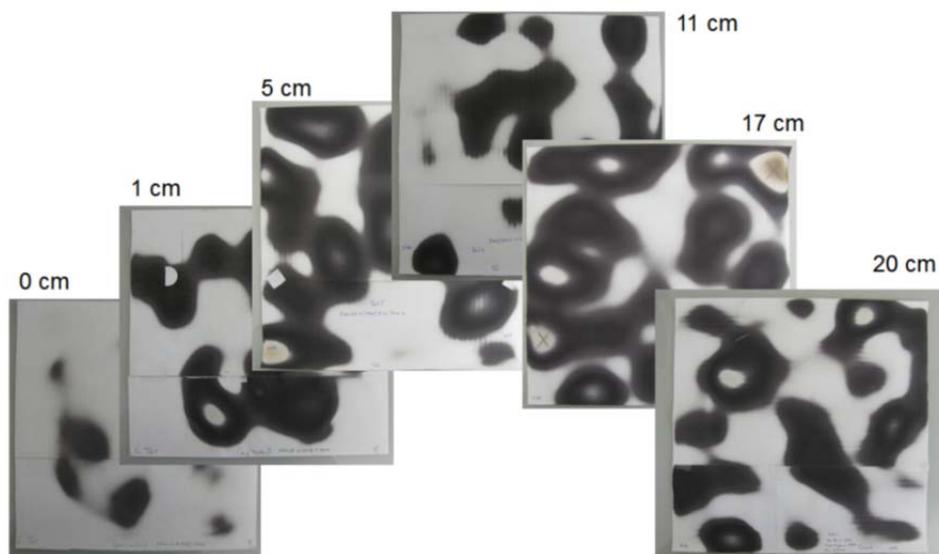


Abbildung 6.1: Temperatur-/Feldverteilung in der Mikrowelle (in 6 Ebenen)

Für die Vorversuche wurde für alle Proben die gleiche Position in der Anlage festgelegt. Als Versuchsmaterialien wurden die von den Lackwerken Peters zur Verfügung gestellten Beschichtungsmaterialien bzw. deren Einzelkomponenten getestet, wie in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 6.1: Beschichtungsstoffe aus der Baugruppentechologie/Leiterplattentechnik

			Basis	Farbe
Conformal Coating	Peters	SL 1301	Polyurethan	farblos
Dickschichtfüller	Peters	DSF 2707	Polyurethan	farblos
Lötstopplack	Peters	SD 2496 TSW	Bisphenol-Epoxidharz	weiß
Dickschichtlack	Peters	DSL1705	Silikon	farblos
Durchsteigerfüller	Peters	VF 2467A	Novolak-Epoxy	dunkelgrün
Durchsteigerfüller	Peters	VF 2467B	Novolak-Epoxy	gelblich
Abziehlack	Peters	SD 2962 P	Epoxy	grün
Vergußmasse	Guronic	DoFR0 0.15 blau	Polyurethan	blau
Vergußmasse	Guronic	DoFR0 0.15 braun	Polyurethan	braun
Vergußmasse	Guronic	DoFR0 1:4 (60°C)	Polyurethan	braun

Diese Materialien wurden auf ihre grundsätzliche Eignung zur Mikrowellenankopplung untersucht und bewertet. Dazu wurde jeweils eine Menge von 20 g in einen Aluminiumoxid-Keramikziegel gefüllt, da dieses Material für die Mikrowelle transparent ist. Die Proben wurden an der festgelegten Position für jeweils 3, 5 und 10 min bei niedrigster Stufe in der Mikrowelle erwärmt. Die Leistungsstufe des Gerätes entspricht einer Gesamtleistung von etwa 300 W. Da die Messung der Temperatur während der Mikrowellenbehandlung mit dem Thermoelement nicht möglich ist, wurde jeweils die Endtemperatur, d.h. nach Abschalten der Mikrowelle registriert und ausgewertet.

Die folgenden Diagramme Abb. 6.2-6.8 zeigen die Einkopplung/Erwärmung der Materialproben unter gleichen Bedingungen.

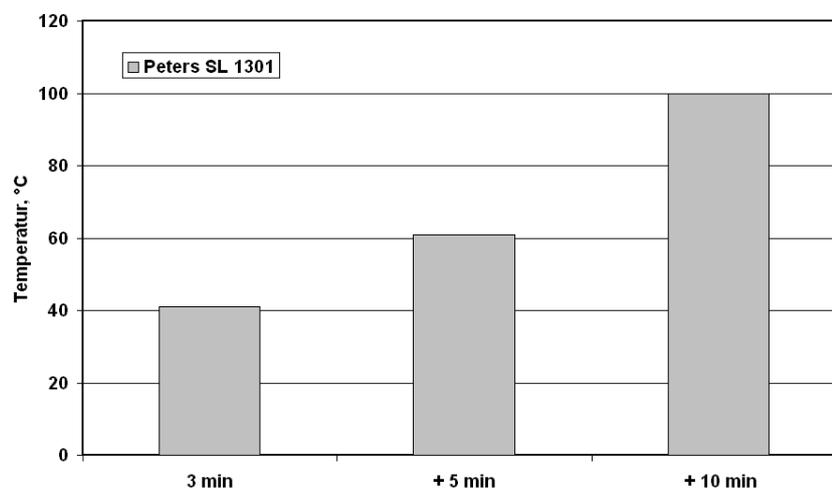


Abbildung 6.2: Conformal Coating (MW 2,45 GHz / 300W)

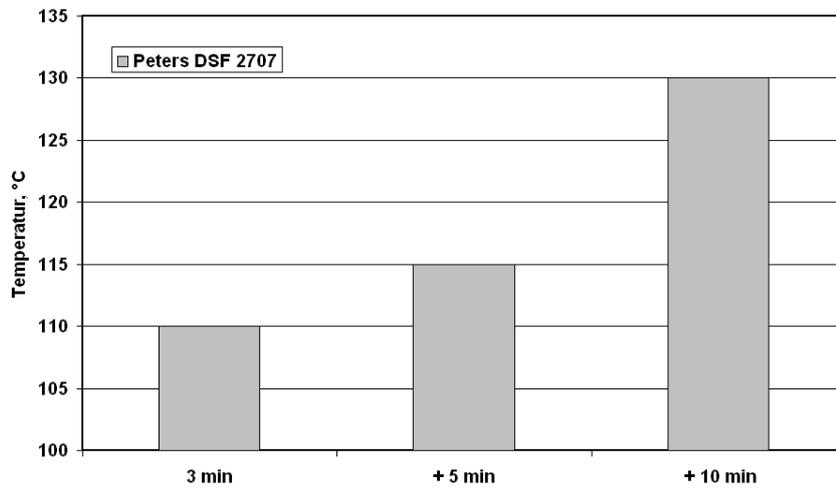


Abbildung 6.3: Dickschichtfüller (MW 2,45 GHz / 300W)

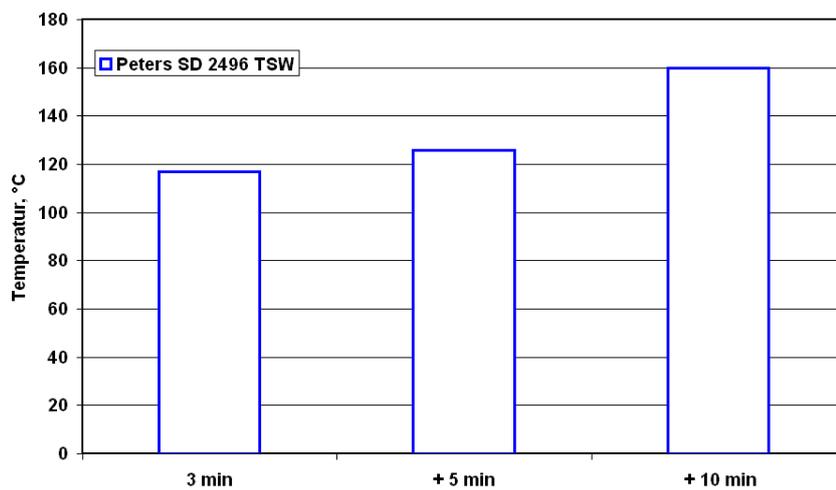


Abbildung 6.4: Lötstopplack (MW 2,45 GHz / 300W)

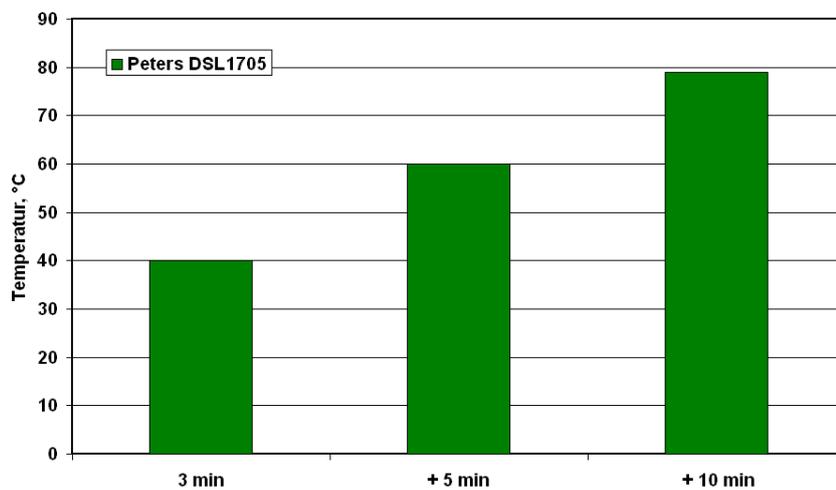


Abbildung 6.5: Dickschichtlack (MW 2,45 GHz / 300W)

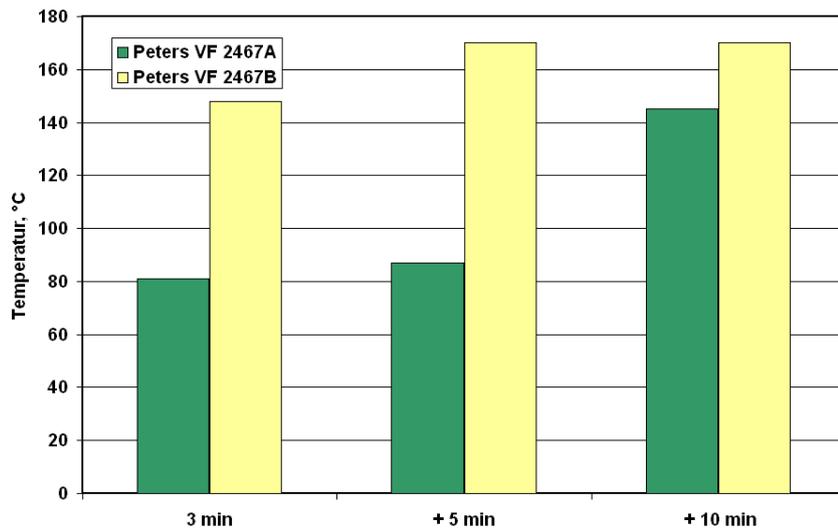


Abbildung 6.6: Durchsteigerfüller (MW 2,45 GHz / 300W)

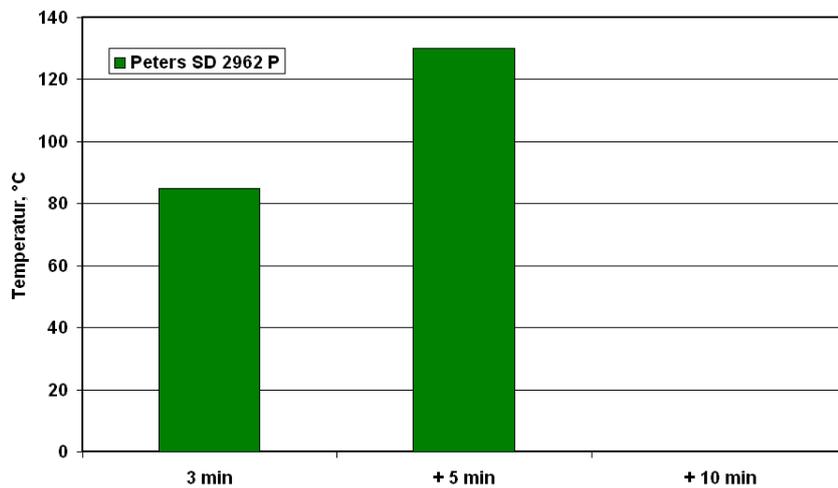


Abbildung 6.7: Abziehlack (MW 2,45 GHz / 300W)

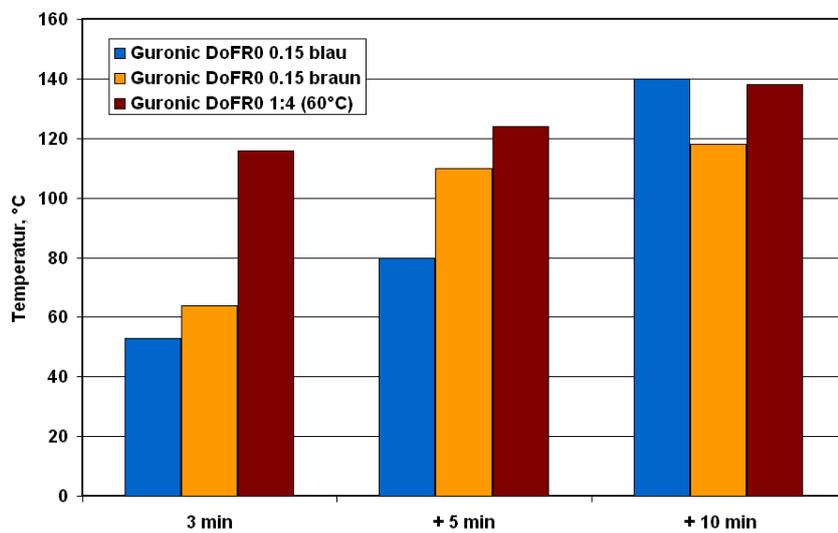


Abbildung 6.8: Vergussmasse (MW 2,45 GHz / 300W)

Neben der wichtigen Eigenschaft der Erwärmung in der Mikrowelle zeigte sich, dass vor allem der Abziehlack SD2962 und die Komponente VF2467B des Durchsteigerfüllers sehr stark aufschäumen, so dass eine Auswertung nur bedingt möglich war. Die besten Ergebnisse wurden mit dem Dickschichtfüller DSF 2707 (für Dickkupfertechnik - 400 µm), dem weißen Lötstopplack SD 2496 (für Anwendungen in der Automobil- und Optoelektronik) sowie der Vergussmasse Guronic DoFR0 erzielt. Diese war nach der Mikrowellenhärtung noch leicht klebrig, was aber lt. Anwender auch den Eigenschaften nach der normalen thermischen Aushärtung entspricht.

6.1.2 Voruntersuchungen zur Prozessanpassung

Zur Ermittlung der maximal zulässigen Energiedichten in der Mikrowelle, ist die Empfindlichkeit der zu beschichtenden elektronischen Baugruppen von Interesse. In den Vorversuchen mit Leiterplatten mit der Standard-Mikrowelle erwies sich das sog. SIR-Kammlayout als besonders kritisch. Bei dieser Struktur handelt es sich um ein spezielles Testfeld, das für die Messung von Oberflächenisolationswiderständen auf Leiterplatten entwickelt wurde, wie es auch zur Bewertung des Ergebnisses der Mikrowellenhärtung sinnvoll eingesetzt werden kann. Besonders die langen parallelen Kupferstrukturen mit geringem Abstand sind mit einem hohen Risiko für elektrische Überschläge in der Mikrowelle verbunden. Durch verschiedene Layoutanpassungen konnte dieses Risiko verkleinert werden. Zum einen wurde der Kamm außen kurzgeschlossen (für die spätere Messung wird diese Verbindung getrennt), zum andere wurde systematisch versucht, die Abstände der Kämmen zu vergrößern, was zu einer Reduzierung der Feldstärke führt (Abb. 6.9). Diese Proben eignen sich damit auch zur Ermittlung und Bewertung der elektrischen bzw. dielektrischen Eigenschaften der mikrowellengehärteten Beschichtungsstoffe.

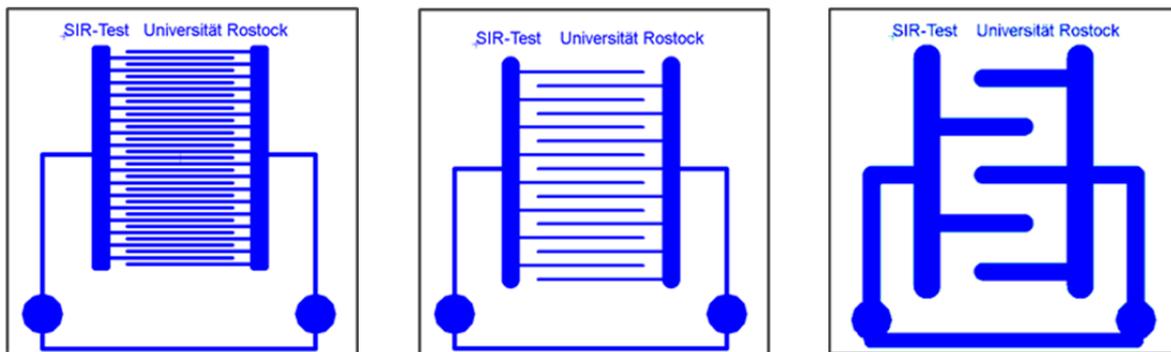


Abbildung 6.9: Vergleich der SIR-Kammstrukturen mit 1, 2 und 5 mm Abstand

Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der lokalen Feldstärkemaxima, die dann zu Überschlägen führen, ist die Dämpfung der Leistung insgesamt. Da die Spitzenleistung der Standard-Mikrowelle nicht regelbar ist (es wird üblicherweise nur die Zeitdauer getaktet), ist eine solche Dämpfung die einzige Möglichkeit um die Maxima (allerdings damit auch die effektive Leistung) zu reduzieren. Erreicht wurde das, indem eine stark absorbierende SiC-Keramik, die durch den PBA-Partner Fricke und Mallah angefertigt wurde, vor die Einkoppelstelle in der Kammer gestellt wurde.



Abbildung 6.10: SiC Absorptionsversuche mit FR4 Testplatine – Mikrowelle 90W

Durch verschieden dicke Keramikelemente konnte das Verhältnis zwischen Absorption und Transmission eingestellt werden, was sich in der unterschiedlichen Erwärmung des Absorbers und einer FR4-Testleiterplatte nachweisen lässt.

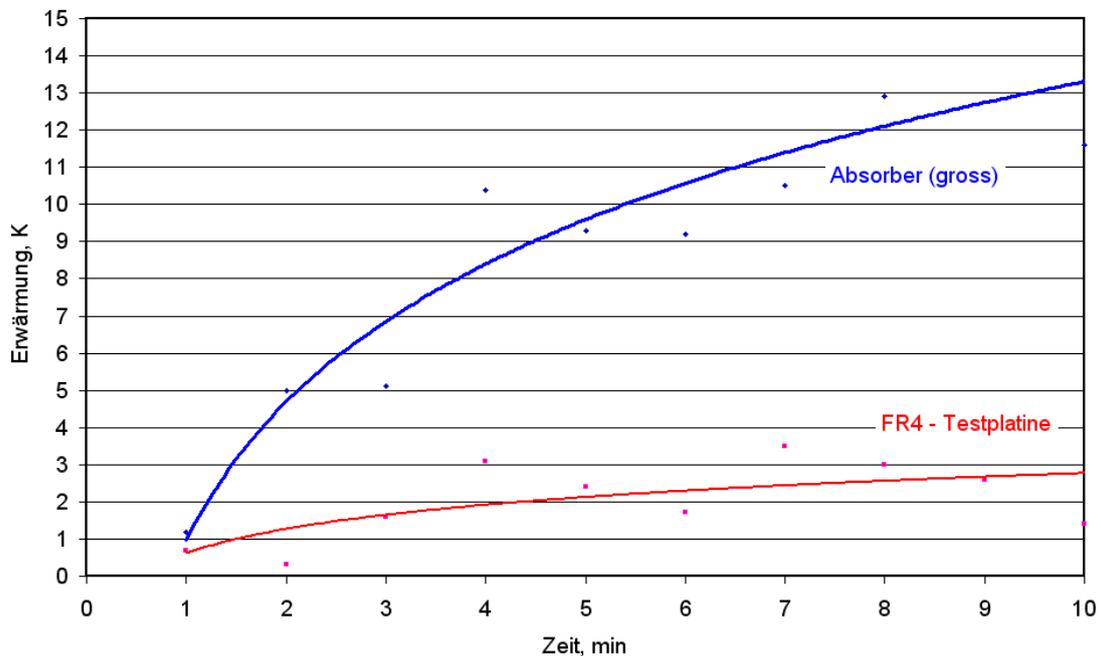


Abbildung 6.11: SiC Absorptionsversuche mit FR4 Testplatine – Mikrowelle 90W

Eine deutliche Verbesserung in der Versuchsdurchführung konnte mit dem externen Generator mit kontinuierlich regelbarer Leistung erreicht werden. Mit dieser erweiterten Anlage auf Basis einer Haushalts-Mikrowelle konnte die lokale Leistung so weit reduziert werden, bis auch ohne zusätzliche Absorber keine Schädigungen der Leiterplattenstrukturen auftraten.



Abbildung 6.12: Durch externen Generator regelbare Mikrowellenanlage des Partners Fricke & Mallah

Auf Grund der vorhandenen Inhomogenitäten der Feldverteilung, die sich bereits in der Wärmeverteilung gezeigt hatten, ist allerdings auch hier mit verschiedener maximaler Leistung bis zum elektrischen Überschlag auf einer Leiterplatte zu rechnen. Diese Werte wurden experimentell in einer 6 x 6 Felder-Matrix für die unterste Ebene der Anlage ermittelt. Die eingestellten maximalen Gesamt-Leistungen, die im jeweiligen Feld zum Überschlag führten, sind in Abb. 6.13 dargestellt.

	5	10	15	20	25	30
5	800	250	250	700	200	1000
10	500	500	350	350	1000	450
15	600	450	400	350	750	1000
20	250	300	600	700	300	750
25	500	900	450	500	650	1000
30	1000	350	1000	600	400	500

Abbildung 6.13: Im Versuch ermittelte Verteilung der kritischen MW-Leistungen (Arcing auf LP)

Dabei entsprechen Felder mit einem hohen eingestellten Wert (max. 1000 Watt) einer geringen Feldstärke und Felder mit einem geringen Wert (Minimum 250 Watt) einer

besonders hohen Feldstärke. Für alle folgenden Versuche wurde zum einen die Position der Proben sowie auch die maximale Leistung mit 200 W festgelegt. Die bisher untersuchten Materialproben wurden ergänzend auch mit der neuen Anlage untersucht, wobei die prinzipielle Eignung der ausgewählten Varianten sich im Wesentlichen bestätigte.

Zur Ermittlung des möglichen Prozessfensters und in Vorbereitung auf spätere Versuche mit kombinierter Erwärmung kompletter elektronischer Baugruppen, wurden mit einer speziellen Anlage mit variabler Frequenz (VFM am Fraunhofer IZM) Versuche zur Baugruppenverträglichkeit bei unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt. Mit steigender Frequenz wird eine intensivere Erwärmung von Leiterplattenmaterialien (FR4) sowie eine Verbesserung der Homogenität auf den Platinen festgestellt (Abb. 6.14).

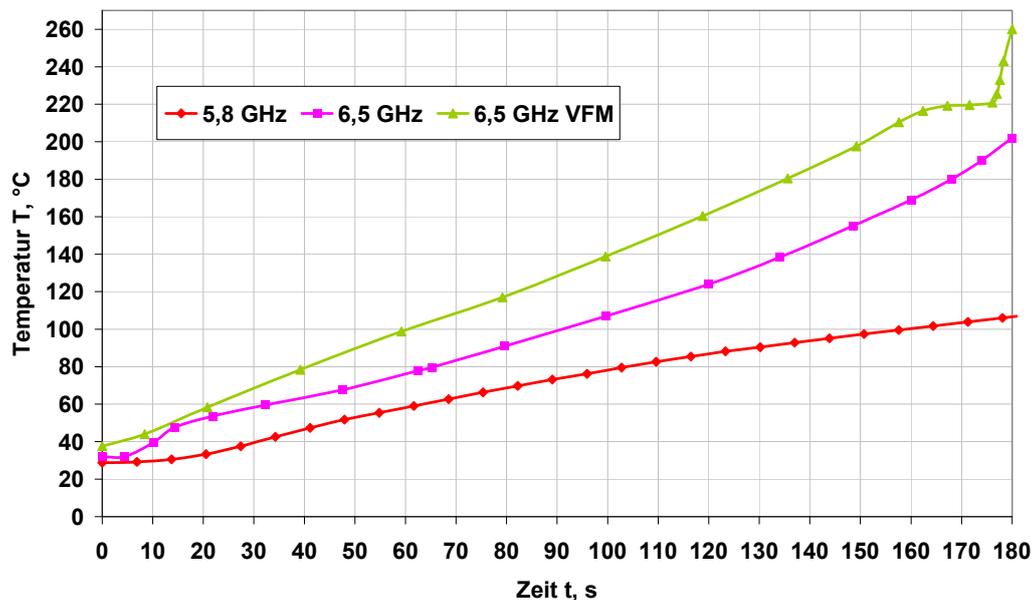


Abbildung 6.14: Vergleichende Bewertung der Erwärmung von FR4-Leiterplatten mit variabler Frequenz (VFM)

6.2 Optimierung der Materialeigenschaften

6.2.1 Anpassung der Mikrowellen-Prozesstechnik

Auf der Basis der Vorversuche wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Fricke und Mallah ein Labormodul erarbeitet, das folgende Eigenschaften besitzt:

Abmaße (Innenraum)	Breite: 310 mm Länge: 275 mm Höhe: 220 mm
MW-Leistung:	0 ... 1000 W, stufenlos einstellbar
Heizleistung (Konvektion)	0 ... 1000 W, stufenlos einstellbar

Darüber hinaus wurde die Anlage so angepasst, dass die Frontklappe wahlweise durch ein mikrowellendichtes Fenster oder ein Gitter verschlossen werden kann. Durch das Gitter ist

es möglich, mit einem IR-Thermometer bzw. Pyrometer berührungslos die Probertemperatur während des Prozesses zu überwachen. Auch Aufnahmen mit der Thermografie-Kamera lassen sich (mit Einschränkungen) auf diese Weise realisieren (Abb. 6.15 und 6.16).



Abbildung 6.15: Labor-Mikrowellenmodul der Fa. Fricke und Mallah mit regelbarer Mikrowellenleistung und hybrider Konvektionsheizung



Abbildung 6.16: Positionierung der Proben in der Kammer und geöffnetes Fenster (durchlässig zur IR-Messung)

An der grundsätzlich inhomogenen Feldverteilung der Mikrowelle lässt sich in einer geschlossenen Kammer mit konventionellen Mitteln, d.h. durch Antennenkonstruktionen, Reflektoren und Feldrührer, keine Verbesserung erzielen. Da diese konventionellen Maßnahmen alle auf eine Feldhomogenisierung im zeitlichen Mittel abzielen, die für die elektrisch empfindlichen Bauteile der Elektronik aber deutlich zu träge ist, wurden für die weiteren Laborversuche keine derartigen Maßnahmen ergriffen. Für kleine Proben, die in der Elektronik aber durchaus realistische Anwendung finden können, kann man die Versuche aber auf bestimmte Bereiche innerhalb der Kammer beschränken. Es wurde nach verschiedenen Vorversuchen ein Bereich gewählt, der nicht in einem Hotspot (Maximum) liegt, sondern in einer Zone mittlerer Feldstärke. Dieser Bereich erwies sich für die Steuerung/Regelung als besser überwachbar und damit stabiler. Nachdem sich herausstellte, dass auch die geschützten Mantelthermoelemente die Verteilung des Mikrowellenfeldes beeinflussen, wurde in den weiteren Versuchen eine berührungslose Temperaturkontrolle über Infrarotmessungen durchgeführt. Insbesondere die Beobachtung mittels Thermografie erwies sich als besonders zweckmäßig, da auf diese Weise auch lokale Hot-Spots auf den Baugruppen rechtzeitig erkannt werden können. Eine mögliche Schädigung der Baugruppen konnte auf diese Weise in den meisten Fällen vermieden werden.

Die beschriebene Vorgehensweise ist für Laborversuche durchaus praktikabel. Für eine industrielle Umsetzung muss aber auch die Homogenisierung und Leistungskontrolle für größere Baugruppen bzw. für eine größere Anzahl kleiner Module möglich sein. Dafür ist eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik notwendig, die im Rahmen des Projektes nicht möglich war. Auch eine Automatisierung der Temperaturüberwachung, z.B. durch eine Kombination der Thermografie mit einer intelligenten Bildauswertung, ist für die fertigungsnahe Anwendung denkbar und wünschenswert.

6.2.2 Nachweis der Isolationseigenschaften

Nach einer erste Klassierung der Beschichtungsstoffe in den Voruntersuchungen erfolgte nach der Anpassung und Optimierung der Prozesstechnik die eingehende Charakterisierung der Materialeigenschaften. Eine Bewertung der ausgewählten Beschichtungsstoffe, die auf die entwickelten Leiterplatten-Teststrukturen aufgetragen wurden, erfolgte sowohl thermisch, durch die Messung der Erwärmung in der Mikrowelle, als auch elektrisch, bezüglich der Isolationseigenschaften durch die Messung des Isolationswiderstandes. Zu diesem Zweck wurde ein Terraohmmeter vom Typ Chauvin Arnoux C.A. 6543 verwendet. Mit diesem Terraohmmeter wurden sowohl die Leiterplatten-Messstrukturen (Vergleich mit Standard-Leiterplatten) als auch die beschichteten und mikrowellen-gehärteten Versuchsleiterplatten und Baugruppen gemessen. Darüber hinaus wurden qualitative Aussagen zur Klebrigkeit und Haftung bzw. zu Delaminationen getroffen.

Mit den an die Mikrowelle angepassten Testlayouts (zur Vermeidung von Überschlügen) wurden die Isolationswiderstände auf den beschichteten Leiterplatten gemessen. Zur Herstellung der Vergleichbarkeit und zur Prüfung des Messbereiches wurden entsprechende Vergleichsmessungen mit gelöteten Referenzleiterplatten vorgenommen. Die bereits in den Vorversuchen im Tiegel untersuchten und selektierten Beschichtungsstoffe wurden durch Siebdruck auf die Teststrukturen aufgebracht und nach der Mikrowellenhärtung vermessen. Dabei ist vor allem der Vergleich zu den konventionell gehärteten Beschichtungsstoffen (Konvektion bzw. UV) von Bedeutung. Die Messungen ergaben Werte im maximalen Bereich des Terraohmmeters, die mit den Referenzproben aus diesem Grund nur qualitativ bzw. tendenziell verglichen werden können (siehe Abb. 6.18). Die Tendenzen aus den Vorversuchen konnten dabei bestätigt werden.

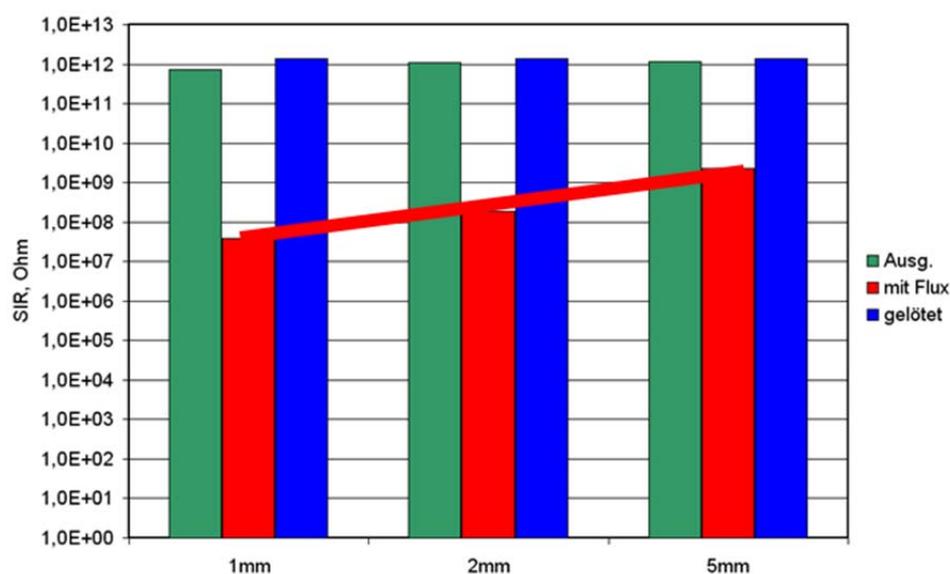


Abbildung 6.17: Vergleich der SIR-Kammstrukturen mit 1, 2 und 5 mm Abstand

Material	Herst.	Bezeichnung	Basis	Tendenz (aktuell)	Tendenz (bisher)
Leiterplattenmaterial	Referenz	FR4	Epoxydharz/Glasfaser		
Conformal Coating	Peters	SL 1301	Polyurethan	↑	↗
Dickschichtfüller	Peters	DSF 2707*	Polyurethan	↙ ↘	↑
Lötstopplack	Peters	SD 2496 TSW	Bisphenol-Epoxydharz	↓	↘
Dickschichtlack	Peters	DSL1705	Silikon	↑	↘
Durchsteigerfüller	Peters	VF 2467A	Novolak-Epoxy	↓	
Abziehlack	Peters	SD 2962 P	Epoxy	↓	
Vergußmasse	Guronic	DoFR0	Polyurethan	↓	↑

Abbildung 6.18: Qualitative Aussagen zu Tendenzen des Isolationswiderstandes nach Mikrowellenhärtung

Weitere vergleichende Isolationsmessungen wurden mit den Guronic-Vergussmaterialien DoFR0 (braun) und dem C500 (transparent) durchgeführt. Die Messung auf den SIR-Testleiterplatten ergaben vergleichbare Isolationswerte für die thermische Härtung und die Mikrowellenhärtung:

Guronic DoFR0:	Ofenhärtung 2 h / 80°C	380 GOhm
	nach MW-Härtung 200W/30min	100 GOhm
Guronic C500:	Ofenhärtung 8 h / 80°C	1,2 TOhm
	nach MW-Härtung 200W/30min	1,4 TOhm

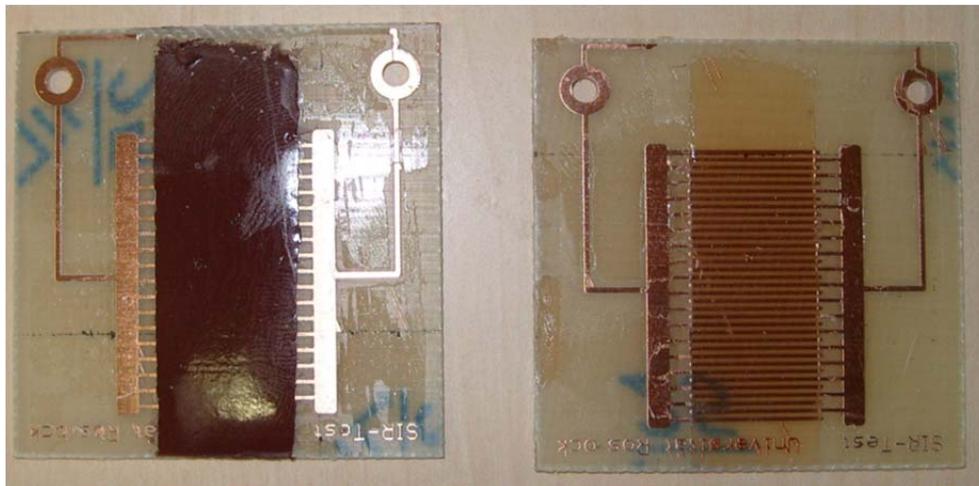


Abbildung 6.19: Guronic DoFR0 und Guronic C500 auf Isolations-Teststrukturen (Siebdruck)

Eine klare Tendenz bzgl. der Isolationseigenschaften wurde bei diesen Messungen nicht sichtbar. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass diese Materialien nicht für den Siebdruck bzw. für dünne Schichten vorgesehen sind. Diese werden bestimmungsgemäß zur Einbettung elektronischer Schaltungen in entsprechenden Gehäusemodulen verwendet. Da hier weniger der Oberflächenwiderstand als der Volumenwiderstand des Materials von Bedeutung ist, ist die Anwendung der Testleiterplatten mit dem Kammlayout für diese Materialien nicht zweckmäßig. Die Bewertung der Isolationseigenschaften wurde deshalb mit nadelförmigen Elektroden vorgenommen, die in das Vergussmaterial in definiertem Abstand in einem gefüllten Tiegel mit definierter Tiefe eingestochen werden. Als Referenz dienten wiederum konventionell gehärtete Proben:

Guronic DoFR0:	Ofenhärtung 2 h / 80°C	> 4 TOhm
	nach MW-Härtung 200W/30min	> 4 TOhm
Guronic C500:	Ofenhärtung 8 h / 80°C	> 4 TOhm
	nach MW-Härtung 200W/30min	> 4 TOhm

Für beide Materialien wurden Isolationswiderstände am Maximum der Nachweisgrenze (4 TOhm) ermittelt. Die Mikrowellenhärtung erreicht somit nach 30 min vergleichbare Eigenschaften wie nach konventioneller Härtung nach 2 h bzw. 8 h.

Für eine weitergehende Untersuchung der Beschichtungsstoffe wurde die dielektrische Analyse (DEA) ebenfalls auf Leiterplattenebene angepasst und eingesetzt. Mit dieser dielektrischen Analyse kann neben dem Verlustwinkel (Strom-Spannung) auch der Realteil und der Imaginärteil der Permittivität gemessen werden. Üblicherweise verwendet man dafür spezielle kapazitive Sensoren, die in das Harz eingebettet werden. Für die Zwecke des

Projektes wurde ein solcher Sensor als Layoutstruktur für Leiterplatten entwickelt, so dass die Messungen auf der gleichen Substratebene wie die elektronischen Module selbst realisiert werden können.

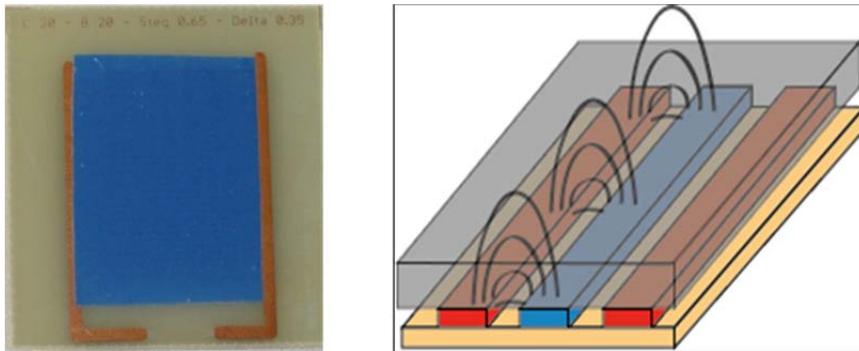


Abbildung 6.20: Kapazitiver Sensor als Leiterplattenstruktur zur dielektrischen Charakterisierung der Beschichtungsstoffe

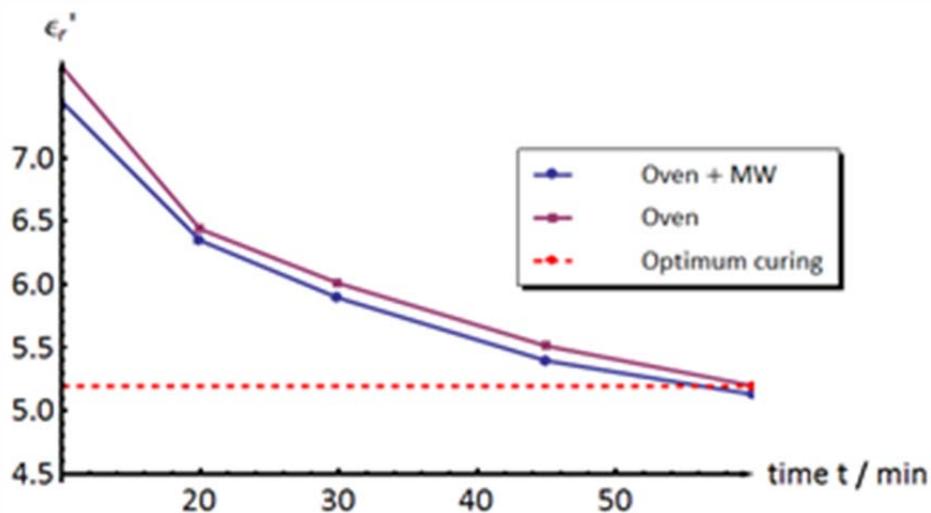


Abbildung 6.21: Permittivität eines Lötstopplackes während der Aushärtung

Mit den in den Vorversuchen ermittelten maximalen Mikrowellenleistungen wurden mittels der DEA die Behandlungszeiten bestimmt, um eine Aushärtung der Beschichtungs- und Vergussmaterialien zu erreichen. Diese wurden dann für die spätere Härtung der Beschichtungen auf den Funktionsmodulen bzw. Testbaugruppen verwendet. Auf diese Weise ist eine quantitativ eindeutige Darstellung der Aushärtung möglich. Die Messungen entsprechend Abb. 6.21 zeigen auch im Vergleich zwischen der reinen Ofenhärtung und der kombinierten (hybriden) Mikrowellen+Ofenhärtung, dass die Aushärtung schneller erreicht wird bzw. bei gleicher Prozesszeit eine vollständigere Vernetzung erreicht werden kann. Die Kombination der Mikrowellen und der Ofenhärtung hat sich für die dünnen Schichten als zweckmäßig erwiesen. Da bei diesen Proben das Verhältnis zwischen Volumen und Oberfläche sehr ungünstig ist, wird bei der reinen Mikrowellenhärtung die Wärme sehr schnell an die Umgebung abgeführt, was einem effizienten Härtungsprozess entgegenwirkt.

6.3 Versuche an Demonstratoren / Testbaugruppen

6.3.1 Anpassung der Prozessparameter

Als Testbaugruppen für die Mikrowellenhärtung von Beschichtungsstoffe in der Elektronik wurden induktive Sensormodule des PBA-Partners Tyco Electronic ausgewählt. Diese Module sind für den Einsatz in feuchter Umgebung ausgelegt und müssen deshalb möglichst dicht versiegelt werden. Die Beschichtung erfolgte mit dem bereits in den Voruntersuchungen betrachteten elastischen Polyurethan-Harzsystem Guronic DoFR0 sowie einem weiteren (langsamer härtenden) verwandten System Guronic C500. Die Baugruppen waren bereits komplett montiert und befinden sich in einem Spritzgussgehäuse. Eine ebenfalls montierte Antenne auf einem Ferritkern im Inneren der Baugruppe stellt eine besondere Herausforderung dar, da sich Ferrite in der Mikrowelle sehr stark erwärmen können. Zu Verarbeitung der elektronischen Baugruppen wurden deshalb Vorversuche durchgeführt, bei denen die maximale Erwärmung und Temperaturverteilung am Gehäuse sowie an den zugänglichen Stellen der Baugruppe ermittelt wurde.

Die Sensormodule wurden darüber hinaus am Fraunhofer IZM in einer speziellen Mikrowellenanlage mit variabler Frequenz (VFM) behandelt, da diese eine besonders schonende Mikrowellenhärtung erlaubt und somit als Referenz dient. So konnte nachgewiesen werden, dass eine Erwärmung/Härtung der Baugruppen in der Mikrowelle ohne thermische oder elektrische Schädigungen möglich ist. Die folgenden Versuchsreihen an der Universität Rostock dienen dazu, mit der wesentlich einfacheren (und damit erheblich preiswerteren und serien-nahen Anlagentechnik mit konstanter Standard-Frequenz) vergleichbare Bedingungen zu reproduzieren. Bei der Verarbeitung der Baugruppen in der Laboranlage mit fester Frequenz konnte die Mikrowelle mit 200 W so eingestellt werden, dass keine Überschläge entstanden und sich nach einigen Minuten ein deutlicher Temperaturanstieg einstellte.



Abbildung 6.22: Vergossene und in der Mikrowelle gehärtete Proben
(links Guronic DoFR0, braun / rechts Guronic C500, transparent)

Für beide Materialien, Guronic DoFR0 und C500, wurden unterschiedliche Erwärmungskurven aufgenommen. Es musste ein Kompromiss zwischen schneller Erwärmung und sicherer (überschlagsfreier) elektrischer Behandlung der Baugruppen gefunden werden. Außerdem stellte die Ferritantenne, die sich sehr stark erhitzt, eine weitere Begrenzung bzgl. Leistung/Zeit dar. Das Optimum wurde mit 200W

Mikrowellenleistung ermittelt. Bei diesen Parametern erfolgt die Erwärmung des Guronic DoFR0 relativ schnell und verbleibt dann bei ca. 90°C (Abb. 6.23).

Im Gegensatz dazu stieg die Temperatur im Harzsystem Guronic C500 langsamer, überschritt nach 30 min aber ebenfalls nicht den Wert von 90°C. Bei beiden Materialien stellte sich aber nach erfolgter Mikrowellen-Härtung eine elastische Konsistenz sowie ein sehr hoher Isolationswiderstand von > 4 TOhm ein, was der Qualität des konventionell gehärteten Materials entspricht (Abb. 6.24).

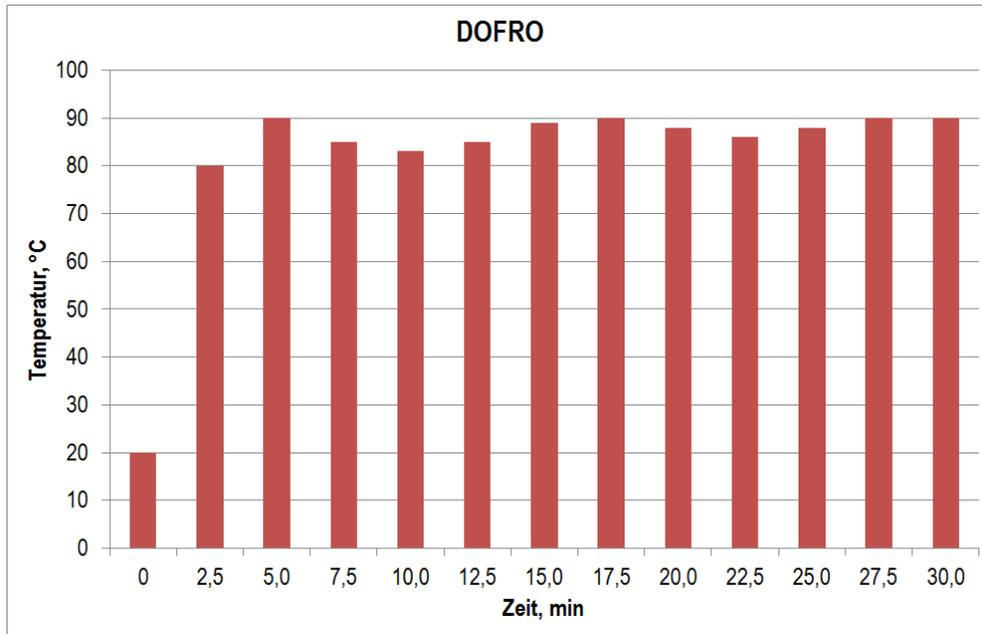


Abbildung 6.23: MW-Erwärmung elektronischer Baugruppe (200 W) mit dem Vergussmaterial Guronic DoFR0

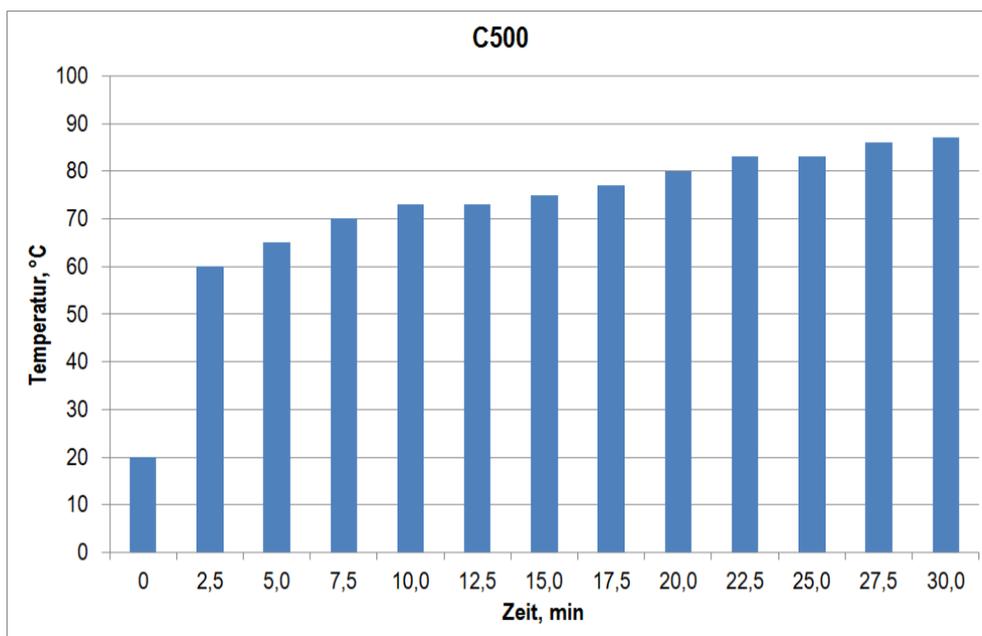


Abbildung 6.24: MW-Erwärmung elektronischer Baugruppe (200 W) mit dem Vergussmaterial Guronic C500

Die Versuchsreihen mit den Funktionsbaugruppen zeigten dabei deutlich, dass im Hotspot der Anlage eine Behandlung nicht ohne Schädigungsrisiko möglich ist. Das ist vor allem darin begründet, dass die Sensorbaugruppen über große Induktivitäten verfügen (es wurde absichtlich eine besonders kritische Baugruppe ausgewählt), die sich in der Mikrowelle auf Grund der Permeabilität des Ferritkerns besonders stark aufheizt. Durch das nachgerüstete Sichtfenster in der Laboranlage war es aber möglich, einerseits den Einfluss der Versuchsobjekte auf die Feldverteilung sichtbar zu machen, andererseits relativ schnell Bereiche mit geringerer und vor allem gleichmäßiger Energieverteilung innerhalb der Kammer aufzufinden.



Hotspots der Mikrowelle



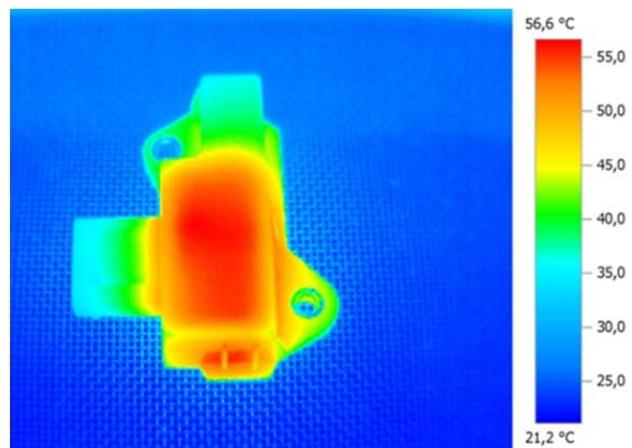
Bereiche abgeschwächter Energie

Abbildung 6.25: Positionierung der Sensormodule in der Mikrowelle

Die thermische Schädigung der Sensormodule, die auf eine lokale Überhitzung im Bereich der Ferritantenne erfolgt, wird erst sichtbar, wenn das Gehäusematerial sich äußerlich verändert. Durch die thermografische in-situ Überwachung der Versuche, können Überhitzungen allerdings bereits frühzeitig erkannt werden.



Schädigung des Sensormoduls durch lokale Überhitzung



thermografische Überwachung
Mikrowellenbehandlung

Abbildung 6.26: Gefahr der lokalen Überhitzung der Sensormodule in der Mikrowelle

Aufgrund der ersten Versuchsreihen mit thermisch geschädigten Baugruppen im Hotspot der Mikrowelle wurden alle weiteren Versuche im Bereich der abgeschwächten Energie durchgeführt. Hier wurden in Versuchsreihen bis 800 W Mikrowellenleistung ermittelt, dass ab 400 W elektrische Überschlüsse an den Kontakten des Moduls auftreten können. Für alle Folgeversuche wurde deshalb die Mikrowellenleistung auf 50% dieses Wertes, also auf max. 200 W begrenzt.

Mit den genannten Parametern wurde weiterhin ermittelt, wie stabil bzw. homogen die Erwärmung der Baugruppen erfolgen kann, da die Homogenität das Hauptproblem bei der Behandlung mit konstanter Frequenz (Standardfrequenz 2,45 GHz) ist. Die folgenden Messkurven wurden als Spitzenwerte der Sensormodule in Zeitintervallen bis zu 30 min bei 100, 150 und 200 W Leistung ermittelt. Der Kurvenverlauf zeigt, dass sich bei niedrigen Leistungen (100 und 150 W) nach etwa 10 min ein konstantes Temperaturniveau einstellt. Dieser Kurvenverlauf spricht für ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen lokaler Erwärmung und Abkühlung durch Wärmeleitung, was zu einer Homogenisierung der Temperaturverteilung führt.

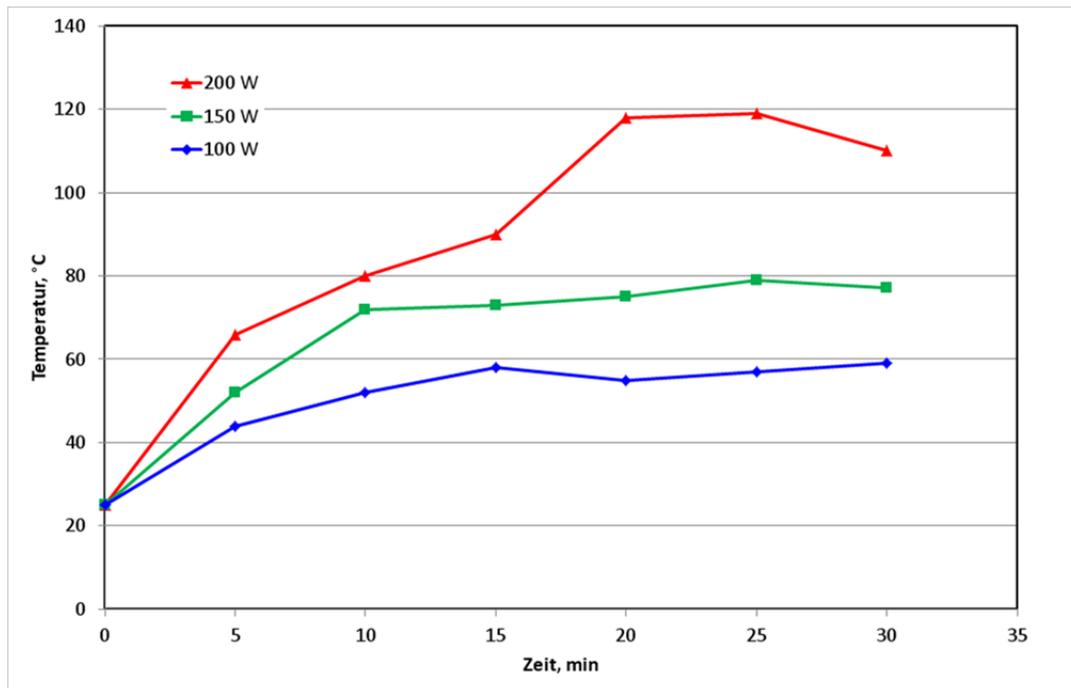


Abbildung 6.27: Aufgezeichnete Spitzentemperaturen der Sensorbaugruppe während der Mikrowellenbehandlung (im Bereich abgeschwächter Energie) bei verschiedenen Leistungen

Die Versuche mit realen Leiterstrukturen haben gezeigt, dass besonders lange Leitungen und Anschlusskontakte kritisch für die Sicherheit der Baugruppen sind. Prinzipiell müssen die zulässigen Grenzwerte für jede Baugruppe und Struktur individuell ermittelt und entsprechende Sicherheiten eingestellt werden. Um generelle Aussagen zu kritischen Strukturen und ggf. auch Empfehlungen zur Layoutgestaltung besonders robuster Baugruppen geben zu können, wurden zusätzlich zu den Experimenten Simulationen durchgeführt. Durch die Simulation der elektrischen Wechselwirkungen zwischen Mikrowelle und Baugruppe kann ein schnelleres Auffinden des Optimums unter realistischen Randbedingungen erreicht werden.

Da sich besonders lange Leiter sowie enge Isolationsabstände als kritisch für die Mikrowellenbehandlung erwiesen, wurden verschiedene Testleiterplatten speziell für die Optimierung unter diesen Randbedingungen entworfen und getestet. Auf diesen konnte durch Thermografie die Wechselwirkung mit der Mikrowelle sichtbar gemacht und durch Simulation verifiziert werden.

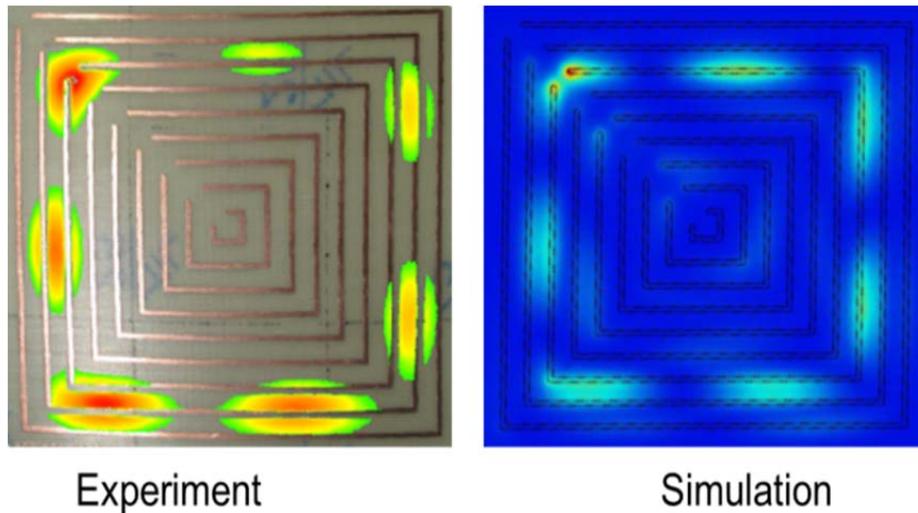


Abbildung 6.27: Vergleich von Experiment und Simulation bzgl. der Ausbildung von Hotspots in der Mikrowelle

Die regelmäßigen Temperaturspitzen auf der Testleiterplatte (links) zeigen den Zusammenhang zwischen den Leiterbahnen und der Wellenlänge, die Simulation bestätigt diese Verteilung durch die berechneten maximalen Feldstärken (rechts)

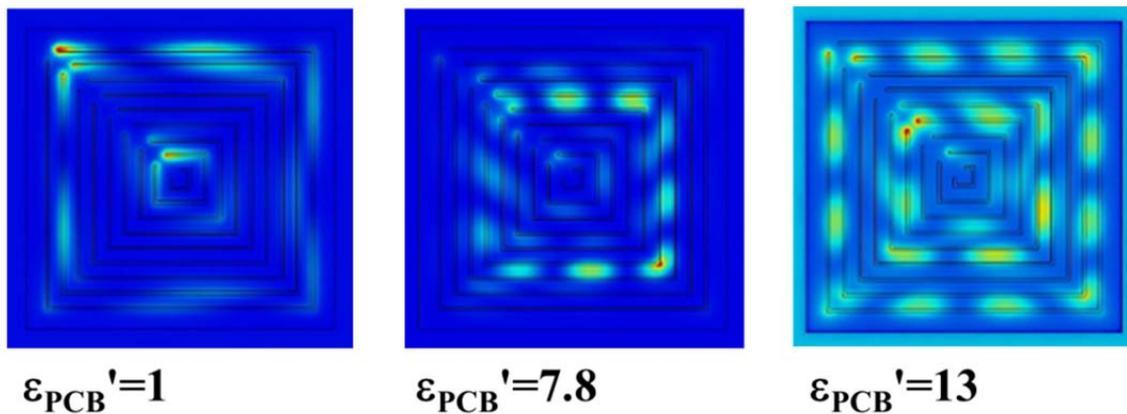


Abbildung 6.28: Berechnete Feldverteilungen mit variablen Materialkenngrößen (Permittivität)

Die Simulation gestattet es durch einfache Parameterwahl den Einfluss bestimmter Materialkenngrößen, wie Permittivität oder Temperatur, sichtbar zu machen. Die Berechnungen zeigen, wie bei konstanter Frequenz die Wellenlänge durch die verwendeten Dielektrika beeinflusst wird. Eine Verkürzung der Wellenlänge kann eine Homogenisierung der Feldverteilung unterstützen, ähnlich wie bei den Versuchen mit variabler Frequenz (VFM).

6.3.2 Funktionsnachweis an Demonstratoren/Testbaugruppen

Für den Funktionsnachweis an den Testmodulen wurden diese im Labor zunächst mit den 2K-Vergussmassen Guronic DoFR0 und Guronic C500 vergossen und anschließend entsprechend den ermittelten Grenzwerten in der Mikrowelle gehärtet.

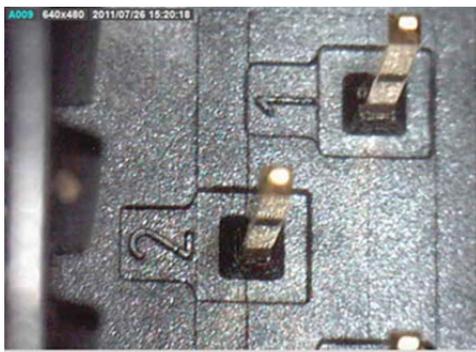


Abbildung 6.29: Manueller Verguss eines Sensormoduls

Für die Härtung war in der Kammer-Position mit abgeschwächter Mikrowellenleistung eine maximale Leistung von 200 W und eine Behandlungszeit von insgesamt 30 Minuten erforderlich. Während der Härtung wurde die Temperatur der Module thermografisch überwacht. Die behandelten Module waren äußerlich unversehrt und wiesen keinerlei Spuren von Überhitzungen oder elektrischen Überschlügen auf. Die anschließende Funktionsprüfung beim PBA-Partner Tyco wies allerdings unzulässige Veränderungen der elektrischen Parameter und Funktionsstörungen auf.

Nach den Ausfällen im Funktionstest, wurden die defekten Proben durch den PBA-Partner Tyco Electronic wieder an die Universität Rostock zurückgesandt, um Fehlerort und Fehlerursache weiter aufzuklären. Da die Proben äußerlich augenscheinlich unversehrt waren, mussten zunächst die Vergussmassen (mechanisch) entfernt werden. Nach dem Freilegen der Leiterplatte wurde diese demontiert (ausgelötet) und weiter mikroskopisch untersucht.

Während es äußerlich keine Anzeichen für Überhitzungen gab, waren im Inneren in der Nähe des Ferritkernes Spuren (besonders an den Enden) einer unzulässigen Erwärmung sichtbar.



Steckkontakte des Sensormoduls,
äußerlich unversehrt



Überhitzung im Inneren
des Sensormoduls an dem Ferritkern

Abbildung 6.30: Im Inneren der Module entdeckte Fehlerstellen

Weiterhin wurden auf der Leiterplatte Spuren elektrischer Überschlüge bzw. Verbrennungen im Umfeld der angelöteten Steckkontakte gefunden. Offensichtlich wirken gerade die langen Drahtenden als Antennen, was zu Spannungsspitzen und elektrischen Überschlügen führen kann.



Abbildung 6.31: Verbrennungen neben bzw. zwischen Durchkontaktierungen und eingelöteten Stiften

Da die elektrische Charakterisierung und funktionale Prüfung der Sensormodule beim PBA-Partner Tyco erfolgen musste, was mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist, wurden für eine schnellere Prozesskontrolle und Überwachung der Funktionsfähigkeit eigene Testschaltungen entwickelt, die eine unmittelbare Überprüfung der Funktion erlauben. Zu diesem Zweck wurden zwei LED-Module verwendet, die mit unterschiedlicher Komplexität aufgebaut wurden. In einem Fall handelt es sich um ein einfaches Leuchtdioden-Modul mit passiver Beschaltung (LED-Leuchte) und ein aktiv angesteuertes LED-Blinkmodul. Diese Testschaltungen wurden mit den gleichen Mikrowellen-Parametern und einem transparenten Verguss mit Guronic C500 verarbeitet.

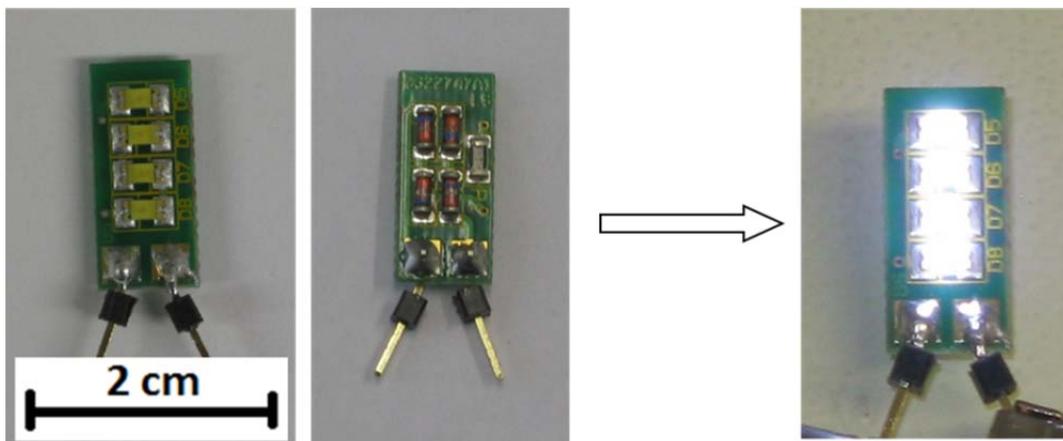


Abbildung 6.32: SMD-LED-Modul (4 Dioden, 1 Widerstand), tauchbeschichtet mit transparenter Vergussmasse Guronic C500, Mikrowellenbehandlung und Funktionstest

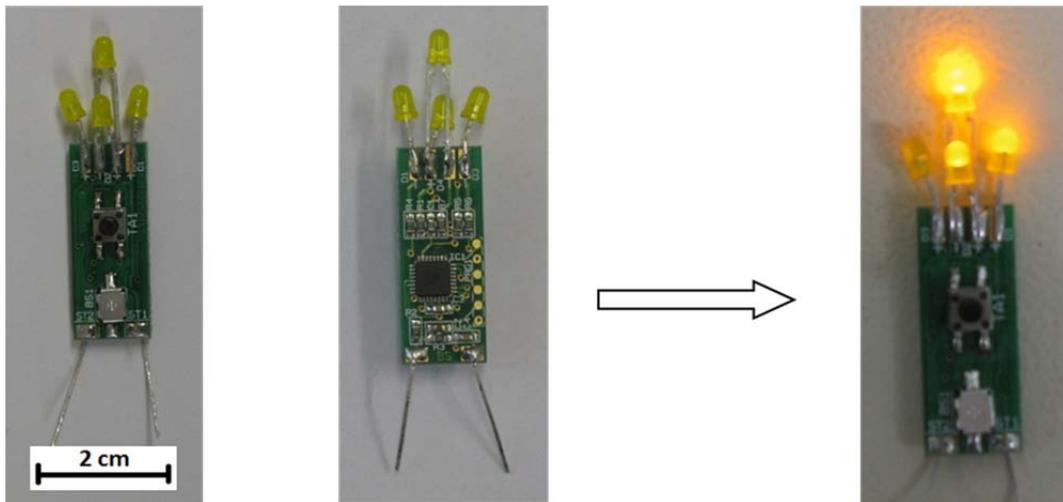


Abbildung 6.33: LED-Blinkmodul (4 LEDs, 1 IC, Schalter, mehrere R, C), tauchbeschichtet mit transparenter Vergussmasse Guronic C500, Mikrowellenbehandlung und Funktionstest

Sowohl an den Sensormodulen des PBA-Partners als auch an den beiden LED-Testmodulen der Universität Rostock wurden Untersuchungen zu den Schädigungen nach einer thermischen und/oder elektrischen Überlastung der Baugruppen in der Mikrowelle durchgeführt. Für die beiden Varianten der LED-Module, die den Funktionstest bestanden, wurden gezielt Überlastversuche durchgeführt, um das Prozessfenster zu ermitteln.

Da die LED-Module bei 200W und der ausgewählten Kammer-Position mit geringerer Energiedichte den Funktionstest bestanden, wurden mit diesen gezielt Überlastversuche durchgeführt, um die maximal zulässige Leistung zu ermitteln. Während an dem (einfachen) LED-Modul bis 500W bereits nach 2 Sekunden eine Erwärmung von 66°C ermittelt wurde, ohne dass eine Funktionsstörung oder eine andere unzulässige Veränderung beobachtet werden konnte, kam es bei der LED-Blinkschaltung bei 500W bereits nach 2 Sekunden zu elektrischen Überschlügen. Diese zerstörten offensichtlich den integrierten Schaltkreis auf der SMD-Platine. Die Baugruppe erwärmte sich in dieser kurzen Zeit auf 87°C.

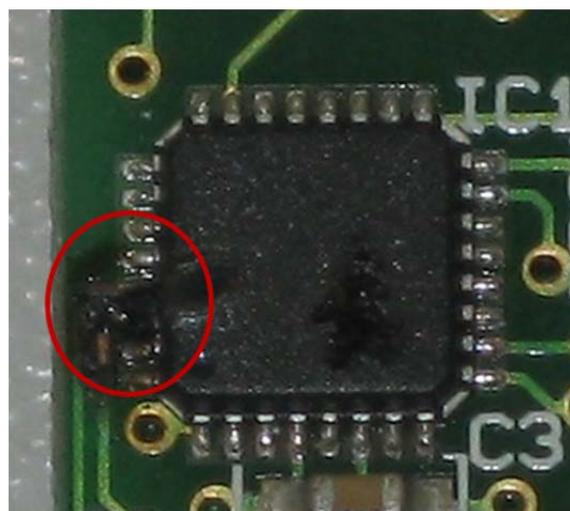


Abbildung 6.34: Geschädigter Schaltkreis nach 2 Sekunden / 500 Watt (gezielter Überlastversuch)

7 Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden von Seiten der Forschungsstelle TU Darmstadt umfangreiche Untersuchungen zum Verarbeiten von Vergussmassen mittels Mikrowellen durchgeführt.

Im Vorfeld waren Untersuchungen bezgl. der Anlagenkonzeption und Funktionsuntersuchungen notwendig. Diese waren essentiell, um eine homogene Verarbeitung der Vergussmassen sicherzustellen und um grundlegende Erkenntnisse für das Verarbeiten rieselfähiger Formmassen zu gewinnen.

Mehrere Möglichkeiten die Feldverteilung in der Kammer zu visualisieren wurde von Seiten der Forschungsstelle evaluiert. Als die effektivste Methode erwies sich im Rahmen des Projekts die Anwendung von MDF-Platten, die mit Flüssigkristallfolie besetzt sind. Damit lässt sich sowohl qualitativ und quantitativ eine Aussage über die Feldverteilung erbringen.

Die untersuchten Einkopplungsvarianten: Schlitzeinkopplung und Antenneneinkopplung, führten im Rahmen des Projekts zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, was für einen industriellen Einsatz der Mikrowellentechnik geeignet wäre. Da es sich bei dem verwendeten Aufbau um eine statische Anordnung handelt, bilden sich im Mikrowellenraum stehende Wellen aus, die jeweils an den gleichen Stellen, Hot- und Cold-Spotausbildungen begünstigen. Ohne den Einsatz von Rotation oder Durchlauf der Proben durch eine Anlage ist keine homogene Aushärtung der Materialien realisierbar.

Die Ergebnisse der Schlitzeinkopplung zeigten im Vergleich ein besseres Feldverteilungsbild als die Antenneneinkopplung. Die Feldverteilung der Antenneneinkopplung konnte trotz Variation der Antennenspitzen, der Antennenlängen und der Antennenausrichtung nicht beeinflusst und gezielt verbessert werden. Einen direkten Einfluss der unterschiedlichen Variationen konnte nicht festgestellt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Schlitzeinkopplung wurde vom Mikrowellenhersteller die Anordnung einer rotierenden Maske in die Mikrowellenkammer konzipiert. Damit sollte ein abwechselndes Öffnen und Schließen der Schlitze ermöglicht werden. Die Umsetzung steht bis zum Ende der Projektlaufzeit noch aus. Es konnten bisweilen von Seiten der Forschungsstelle keine Untersuchungen durchgeführt werden.

Als Lösungsansatz wurde von der Forschungsstelle ein drehbarer Teller in die Anlage eingebaut, durch diesen waren zumindest die Versuche, die sich auf die Verarbeitung der Vergussmassen konzentrieren durchführbar. Allerdings mit der Einschränkung, dass keine großflächigen Geometrien in der Anlage verarbeitet werden konnten. Aus diesem Grund konnten einige veranschlagte Prüfungen zur Charakterisierung der Materialien nicht durchgeführt werden.

Die Versuche an sich zeigen jedoch, dass der Einsatz der Mikrowellentechnik zum Beschleunigen der Vernetzungsreaktion herangezogen werden kann. Einsparungen im zweistelligen Prozentbereich sind realisierbar.

Die Abhängigkeiten des Verarbeitungsprozesses von den gegebenen Prozessparametern wurden ermittelt. Die Abhängigkeit von der Leistung zeigt, dass es mit einer höheren

Leistung zu höheren Heizraten im Materialvolumen kommt. Ebenso ist die Abhängigkeit von der eingekoppelten Frequenz erkennbar. Die Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für den späteren Einsatz der Mikrowellentechnik im industriellen Bereich. Es konnten Ansätze gezeigt werden, mit welchen der Übertrag auf technische Anwendungen möglich ist. Bei diesem Übertrag ist allerdings die Veränderungen der Anlagentechnik zu berücksichtigen. Die Ergebnisse und benötigten Aushärtezeiten gelten für die vorhandene Anlagentechnik.

Der Bereich rieselfähige Formmassen konnte aufgrund der inhomogenen Feldverteilung nur anhand von Vorversuchen berücksichtigt werden. Auch hier konnte die Funktionsweise des Aushärteverfahrens gezeigt werden. Im kleinen Maßstab war es allerdings nicht realisierbar, den benötigten Druck für eine homogene Verarbeitung aufzubringen. Die Ergebnisse sind jedoch vielversprechend, dass die Mikrowellentechnik auch für die Verarbeitung der rieselfähigen Formmassen eingesetzt werden kann. Hierzu ist jedoch noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf auf Seiten der Anlagentechnik (z.B. Hybridverfahren) zu leisten. Die Sicherstellung einer homogenen Feldverteilung durch ein mikrowellentransparentes Werkzeug, sowie die dann homogene Feldverteilung im Bereich der Materialprobe sind die größte Herausforderung.

Die Versuche an der Uni Rostock zur Beschichtung bzw. Verguss elektronischer Baugruppen haben gezeigt, dass die Sensibilität einzelner Baugruppen und Komponenten gegenüber der Mikrowellenstrahlung sehr unterschiedlich sein kann. Eine individuelle Ermittlung der zulässigen Leistungsgrenzen an den speziellen Baugruppen erscheint unerlässlich. Dabei hat sich herausgestellt, dass insbesondere längere Leitungen im Zentimeterbereich besonders kritisch bezüglich der Einkopplung sind. Weiterhin besitzen besonders stark einkoppelnde dielektrische und magnetische Materialien, wie z.B. Ferrite, die Gefahr einer lokalen Überhitzung. Für einfache Schaltungen kleinerer Dimensionen können aber nutzbare Prozessfenster mit unkritischen Parametern aufgefunden werden. Für künftige Entwicklungen ist zu empfehlen, die aus den Erfahrungen gesammelten Richtlinien in die Layoutgestaltung einfließen zu lassen bzw. durch Simulationen, wie am Beispiel gezeigt, kritische Strukturen zu vermeiden.

Weiterhin haben die Versuche an elektronischen Baugruppen und Modulen gezeigt, dass sich mit der vorhandenen Labortechnik homogene Bedingungen nur in lokal sehr begrenzten Bereichen herstellen lassen. Für größere Baugruppen und eine größere Anzahl simultan herzustellender Module ist eine Homogenisierung in einem größeren Kammervolumen erstrebenswert. Entsprechende Konzepte und Vorschläge wurden mit dem Projektpartner Fricke und Mallah diskutiert, erfordern aber einen erheblichen technischen Aufwand. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass eine Temperaturüberwachung der Baugruppen während der Mikrowellenbehandlung mittels Thermografie bzw. IR-Messungen erforderlich ist. Eine automatische Auswertung durch Bildverarbeitung / AOI bietet sich für den industriellen Einsatz an.

Literaturverzeichnis

- [AFT03] AFT Components; Greiner: „*Design rules for thin-film substrates*“, Version 01, Backnang, 2003.
- [AVK04] AVK-TV: „*Faserverstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen*“, Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe – Technische Vereinigung, Frankfurt a. M., 2004.
- [Bär00] Bär, Kai K. O.: „*In Sekunden trocknen mit nahem Infrarot*“, besser lackieren, Vincent Verlag, 15/00, S. 3, 2000.
- [Bec88] Becker, Gerhard W.; Braun, Dietrich: „*Kunststoff Handbuch – Duroplaste*“, Band 10, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1988.
- [Boe00] Boey, F. Y. C.; Rath, Santosh Kumar: „*Microwave Radiation Curing of Polymers: Using a Temperature Equivalent Method for Cure Reaction Analysis*“, Advances in Polymer Technology, Vol. 19, Nr. 3, S. 194 – 200, 2000.
- [Buc05] Buchenhorst, Daniel: „*Anwendung von Radiowellen zur Erwärmung von Adsorbentien und Katalysatoren*“, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 2005.
- [Che93] Chen, M.; Siochi, E. J.; Ward, T.C.; Mcgrath, J. E.: „*Basic Ideas of Microwave Processing of Polymers*“, Polymer Engineering and science, MID-September, Vol. 33, Nr. 17, 1993
- [Cor01] Corning International Europe: „*Marcor spanend bearbeitbare Glaskeramik*“ Datenblatt, Wiesbaden, 2001, abrufbar unter: <http://www.schroederglas.com/download/MacorProduktbeschreibung.pdf>
- [Dau06] Dauth, Christoph: „*Effektive Trocknungstechnologien für die Möbelindustrie*“, besser lackieren, Vincent Verlag, 13/06, S. 10, 2006.
- [Det06] Detlefsen, Jürgen; Sirat, Uwe: „*Grundlagen der Hochfrequenztechnik*“, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2006.
- [DLR08] DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: „*DLR Center of Excellence (CoE) Composit Structures - Microwave Assisted Manufacturing Technologies, Tools and Facilities for CFRP Production*“, Braunschweig, 2008.
- [Dom05] Domininghaus, Hans: „*Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*“, 6. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York, 2005.

- [Ehr03] Ehrenstein, G. W.; Riedel, Gabriela; Trawiel, Pia: *„Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen“*, 2. Auflage, Hanser Verlag, München 2003
- [Emm08] Emmerich, Rudolf: *„Mikrowellentechnik“*, ICT Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, Pfinztal, 2008.
- [End07] Endres, Bernd: *„Electroless Nickel/Gold – Practical Aspects of „Black Pad“-free and High Sophisticated Lead Free Surfaces for Solder-and Wire Bonding Applications“*, China SMT Forum 07, Shanghai, 2007.
- [Feh09] *Feher, Lambert: “Energy Efficient Microwave Systems Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications”, Springer Verlag, Berlin 2009*
- [Fis07] Fischer, B.; Lampke, Th.; Walter, G.; Wielage, B.: *„Mikrowellenangepasstes Sintern von Ferriten“*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 38, Nr. 10, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2007
- [FZK04] Forschungszentrum Karlsruhe: *„Heureka! CFK-Verbundwerkstoffe können mit Mikrowellen gefertigt werden“*, FZK marktplatz r2b - 1/2004, Karlsruhe, 2004.
- [Gas07] Gassmann, Stefan: *„Printed Circuit Boards in Microfluidic Applications“*; China SMT Forum 07, Shanghai, 2007.
- [Gro01] Gronau, Gregor: *„Höchstfrequenztechnik“*, Springer, Berlin, 2001.
- [Grü93] Grünberg, M.; Persch, c.; Schubert, H.: *„Modelle zur Berechnung der Mikrowellen-Erwärmung von Dielektrika am Beispiel von Lebensmitteln“*, Chem.-Ing.-Tech. 65, Nr. 9, S. 1045 – 1136, Karlsruhe, 1993.
- [Hab06] Habenicht, Gerd: *„Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen“*, VDI-Buch, 5. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [Han99] Hannemann, M.; Nowottnick, M.; Zajitschek, R.: *„Lötbar Oberflächen für Leiterplatten“*, TGBZ D. Zajitschek, Steinheim/Main, 1999.
- [Has02] Hasenender, R.: *„Mit Mikrowellen schneller härten“*, EPP 05/02, 2002, S.52.
- [Hil02] Hill, David J.T.; George, Graeme A.; Rogers, David G.: *„A Systematic Study of the Microwave and Thermal Cure Kinetics of the DGEBA/DDS and DGEBA/DDM Epoxy-amine Resin Systems“*, Polymers For Advanced Technologies, Vol.13, John Wiley & Sons, S. 353 – 362, Brisbane, 2002.

- [Hin07] Hinken, Johann H.: „*Mikrowellenbasierte zerstörungsfreie Prüfung*“, Zfp-Zeitung, 104, April 2007, S. 37-42.
- [ICT07] Fraunhofer ICT: „*Mikrowellentechnologie*“, Pfinztal, 2007.
- [IEV08] International Electrotechnical Vocabulary, www.iec.ch
- [IZM05] Nowotnick, Mathias: „*Selektives und Simultanes Reflowlöten mit der Mikrowelle*“, VTE aus Forschung und Technologie, Produktion von Leiterplatten und Systemen, 06/2005, Berlin, 2005.
- [Käs91] Käs, G.; Pauli, P.: „*Mikrowellentechnik*“, Franzis-Verlag, München, 1991.
- [Kar04] Karavakis, Konstantine (Gus); Bertling, Silvio: „*Conductive Anodic Filament (CAF): The Threat to Miniaturization of the Electronics Industry*“, MEPTEC REPORT / QUARTER FOUR, 2004.
- [Ker08] Homepage des Keramikverbandes, Informationszentrum Technische Keramik: <http://www.keramverband.de/ksuche>, Selb, 2008
- [Kle91] Klein Wassink, R.J.: Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage; Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991.
- [Mic06] Michaeli, Walter: „*Einführung in die Kunststoffverarbeitung*“, 5. Auflage, Hanser Verlag, München Wien, 2006.
- [Mij90] Mijovic, Jovan; Wijaya, Jony: „*Review of Cure of Polymers and Composites by Microwave Energy*“, Polymer Composites, Vol. 11, Nr. 3, New York, 1990.
- [Möi04] Möllmann, Klaus-Peter; Vollmer, Michael: „*Die Physik der Haushaltsmikrowelle – Kochen mit Zentimeterwellen*“, Physik in unserer Zeit, 35. Jahrgang 2004, Nr. 1, S. 38 – 44, 2004.
- [NoM05] Nowotnick, M.; Scheel, W.: Plenarvortrag: „*Die Leiterplatte als multifunktionale Systemplattform*“, 13. FED-Konferenz, Fulda 22.+23.09.2005
- [NoM06] Nowotnick, Mathias; Scheel, Wolfgang; Pape, Uwe; Diehm, Rolf; Wiese, Joachim; Kempe, Wolfgang; Mallah, Marcel; Suppa, Manfred; Fink, Peter: „*Solder Pastes for Microwave Application*“, MICROFLOW, Rostock, Berlin, Karlsruhe, 2006.
- [Now05] Nowotnick, Mathias: „*Selektive Erwärmung elektronischer Baugruppen durch Mikrowellen*“, Fraunhofer IZM Berlin, Berlin 2005.

- [Pap08] Papargyris, D. A.; Day, R. J.; Nesbitt, A.; Bakavos, D.: „*Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating*“, Composites Science and Technologie, Vol. 68, Elsevier, Manchester, S. 1854 – 1861, 2008
- [Pap05] Pape, Uwe; Diehm, Rolf L.; Nowottnick, Mathias: „*Reflowlötten in Kombination mit der Mikrowelle*“, ZVEI, 2005.
- [Pap07] Pape, Uwe; Diehm, Rolf L.; Nowottnick, Mathias: „*Reflowlötten mit zusätzlicher Mikrowelle*“, EPP, 11/07, S. 64, Berlin, 2007
- [Per97] Persch, Christine: „*Messung von Dielektrizitätskonstanten im Bereich von 0,2 bis 6 GHz und deren Bedeutung für die Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln*“, TH Karlsruhe, Karlsruhe, 1997
- [Pet02] Peters, N.; Nunge, S.; Geldermann, J.; Renz, O.: „*Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland*“, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Karlsruhe, 2002.
- [Pro99] Pro Technik: „*Bleifreies Lötten: Materialien, Komponenten, Prozesse*“, Schriftreihe Pro Technik, 1999.
- [Sch05] Scheel, W.; Wittke, K.; Nowottnick, M. (Hrsg.): „*Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik*“, Buchreihe: Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik - aktuelle Berichte Band 2; Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin 2005
- [Sch08] Scheel, W.; Wittke, K.; Nowottnick, M.: „*Niedrigtemperaturmontage hochintegrierter elektronischer Baugruppen durch selektive Mikrowellenerwärmung MICROFLOW*“, Dr. Marcus S. Detert, Templin, 2008.
- [She99] Scheel, Wolfgang (Hrsg.): „*Baugruppentechologie der Elektronik, Montage, Verlag Technik*“, Berlin, 1999.
- [Sch99] Schleusner, Jörg: „*Holzindustrie: Trocknungszeit verkürzen mit Mikrowellen*“, besser lackieren, Vincent Verlag, Nr. 02/ 1999, 1999, S. 11 - 12.
- [Sch00] Schroeder, K. F.: „*Energieriche Strahlen zur Härtung von Beschichtungen erzeugen*“, besser lackieren, Vincent Verlag, 18/00, S. 12, 2000.
- [Sch83] Schubert, Helmar; Theo, Grünewald: „*Wärmequellenverteilung in Modellkörpern bei der Mikrowellen-Erhitzung*“, Chemie Ingenieur Technik, 55 Nr. 7, S. 553 – 555, 1983

- [She86] Sheppard, Norman F. JR; Senturia, Stephen D.: „*Chemical Interpretation of the Relaxed Permittivity During Epoxy Resin Cure*“, Polymer Engineering and Science, Mid-March, Vol. 26, Nr. 5, S. 354 – 357, Cambridge, 1986.
- [The07] Theißen, Ralph: „*Mit Mikrowellentechnik Lacke forciert trocknen*“, besser lackieren, Vincent Verlag, 18/07, S. 2, 2007.
- [Win04] Winter, Ellen: „*Deutschlands erster Anwender trocknet Wasserlacke auf Holz per Mikrowelle*“, besser lackieren, Vincent Verlag, 05/04, S. 7, 2004.
- [Zon05] Zong, Liming; Kempel, Leo C.; Hawley, Martin C.: „*Dielectric studies of three resin systems during microwave cure*“, Polymer, 46, Elsevier, S. 2638 – 2645, East Lansing, 2005