



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7701

# **Faserverbund-Leichtbau mit Automatisierter Mikrowellenprozesstechnik hoher Energieeffizienz (FLAME)**

Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes

G. Link, T. Kayser, F. Köster, R. Weiß, S. Betz, R. Wiesehöfer,  
T. Sames, N. Boulkertous, D. Teufl, S. Zarembo, F. Heidbrink,  
M. Maus, R. Ghomeshi, S. Küppers, M. Milwich (Hrsg.)



G. Link, T. Kayser, F. Köster, R. Weiß, S. Betz, R. Wiesehöfer,  
T. Sames, N. Boulkertous, D. Teufl, S. Zaremba, F. Heidbrink,  
M. Maus, R. Ghomeshi, S. Küppers, M. Milwich (Hrsg.)

**Faserverbund-Leichtbau mit  
Automatisierter Mikrowellenprozesstechnik  
hoher Energieeffizienz (FLAME)**

Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes

**Karlsruhe Institute of Technology**  
**KIT SCIENTIFIC REPORTS 7701**

# **Faserverbund-Leichtbau mit Automatisierter Mikrowellenprozesstechnik hoher Energieeffizienz (FLAME)**

Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes

von

**Guido Link | Thorsten Kayser**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Fabian Köster | Roland Weiß**

Schunk Kohlenstofftechnik GmbH (SKT)

**Stefan Betz | Reiner Wiesehöfer**

Vötsch Industrietechnik GmbH (VIT)

**Tobias Sames | Nabil Boulkertous**

Sika Deutschland GmbH

**Daniel Teufl | Swen Zarembo**

TU München, Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC)

**Frank Heidbrink | Matthias Maus**

Maus GmbH Modell- und Formenbau

**Ravand Ghomeshi | Simon Küppers | Markus Milwich**

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV)

### Hinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Verbundprojekt „FLAME“, Förderkennzeichen 02PJ2130 bis 02PJ2135) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

### Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover – is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License (CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0396-5

DOI: 10.5445/KSP/1000047509

# Kurzfassung

Durch den Einsatz von Verstärkungsfasern wird das Leistungspotenzial von Kunststoffen seit vielen Jahren deutlich erhöht. So haben faserverstärkte Kunststoffe mittlerweile in zahlreichen Anwendungen wie Luft- und Raumfahrt, Automobil, Maschinenbau und Sport erfolgreich Einzug gehalten. Das Anwendungspotential ist jedoch noch lange nicht erschöpft, unter anderem auch wegen zu hoher Bauteil- bzw. Herstellungskosten. Um dem existierenden Kostendruck Rechnung zu tragen, gewinnen in jüngster Zeit die Aspekte der Automatisierung und Effizienzsteigerung immer mehr an Bedeutung. Nur so kann den prognostizierten wachsenden Märkten für Faserverbundwerkstoffe Rechnung getragen werden.

Die am Karlsruher Institut für Technologie entwickelte und patentierte modulare HEPHAISTOS Mikrowellen-Systemtechnologie ermöglicht weltweit erstmals die mikrowellenunterstützte Aushärtung von faserverstärkten Kunststoffen mit minimiertem Energieaufwand und industrieller Relevanz. Auf dieser Grundlage wurde im Rahmen des im folgenden beschriebenen BMBF-geförderten Verbundprojektes FLAME diese HEPHAISTOS Technologie hinsichtlich Energieeffizienz und Prozessautomatisierung weiter optimiert und mit geeigneten Werkzeugen für die Härtung von dickwandigen CFK Wickelbauteilen ausgestattet.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurden darüber hinaus kompakte und optimierte, ein- und zweiteilige Werkzeugkonzepte für das mikrowellenunterstützte Strangziehen von kohlefaserverstärkten Kunststoffprofilen entwickelt und erfolgreich getestet. Durch den Einsatz der Mikrowellentechnologie konnte auch hier das Potential der Effizienzsteigerung gegenüber konventionell geheizten Werkzeugen demonstriert werden.





# Abstract

Through the application of fibers, the performance potential of plastics has been increasing significantly since many years. Thus fiber-reinforced plastics have now successfully been introduced into numerous applications such as aerospace, automotive, engineering, sports. However, the application potential is far from been exhausted, due to high component and fabrication costs. In order to resist the existing cost pressure, the aspects of the automation and efficiency improvement received more and more of importance. Only this approach can provide for the predicted markets growths of fiber composites.

The modular HEPHAISTOS microwave technology, designed and patented at the Karlsruhe Institute of Technology provides the first microwave-assisted curing of fiber reinforced plastics with minimized energy consumption and industrial relevance. On this basis, this HEPHAISTOS technology has been optimized in terms of energy efficiency and process automation and equipped with suitable tools for the curing of thick-walled CFRP winding components within the BMBF-funded joint research project FLAME as described below.

As part of this project compact and optimized, single and two-piece mold concepts for the microwave-assisted pultrusion of carbon fiber reinforced plastic profiles were also developed and successfully tested. Through the use of microwave technology the potential for increased efficiency in comparison to conventionally heated tools could be demonstrated.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste verwendeter Symbole und Variablen</b> .....	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemlage.....	2
<b>2 Ziele des Verbundprojektes</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>7</b>
3.1 Wärmeeinbringungsmethoden und Mikrowellenheizung.....	7
3.1.1 Verfügbare Wärmeübertragungsmechanismen in der Faserverbundherstellung.....	7
3.1.2 Vorteile der Mikrowellentechnik für die Faserverbundherstellung.....	10
3.2 Bisherige Arbeiten der Antragsteller.....	11
<b>4 Eingehende Darstellung der Forschungsergebnisse</b> .....	<b>13</b>
4.1 Entwicklung eines Mikrowellen-Pultrusionsverfahrens.....	13
4.1.1 Entwicklung geeigneter mikrowellenunterstützter Pultrusionswerkzeuge.....	13
4.1.2 Optimierung der verwendeten Harze.....	25
4.1.3 Prozessoptimierung.....	27
4.1.4 Charakterisierung der hergestellten Profile.....	32
4.2 Entwicklung eines energieeffizienten hybriden Mikrowellensystems.....	36
4.2.1 Weiterentwicklung der modularen HEPHAISTOS Mikrowellenkammertechnologie.....	36
4.2.2 Entwicklung von adaptiven und selbstlernenden Regelungen.....	52
4.2.3 Dielektrische Charakterisierung.....	59
4.3 Wickeltechnik.....	61
4.3.1 Entwicklung eines geeigneten mikrowellenverträglichen Werkzeuges zum Rotieren der Wickelkörper beim Aushärten.....	61
4.3.2 Optimierung eines für den mikrowellenunterstützten Wickelprozess geeigneten Harzes.....	64
4.3.3 Entwicklung des Fertigungsprozesses zum Aushärten Präzisionswickelkörpern.....	68
4.3.4 Charakterisierung der hergestellten Bauteile.....	71
4.4 Allgemeine Hinweise für die Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellen.....	77
4.4.1 Temperaturmessung in der Mikrowelle.....	77
4.4.2 Werkzeugkonzepte für die Faserkunststoffverbundaushärtung.....	80
4.4.3 Prinzipversuche zu einfachen Werkzeugkonzepten.....	82
4.4.4 Anpassung von Materialien zur Mikrowellenabsorption.....	86
4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der entwickelten Verfahren.....	88
4.5.1 Vergleich der erzielten Materialqualitäten.....	88

4.5.2	Vergleich der Mikrowellenprozesse mit konventionellen Prozessen hinsichtlich Prozesszeit und Energieeffizienz .....	89
4.5.3	Analyse der entwickelten Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit als Motivation für den nächsten Schritt zur Industrialisierung.....	91
<b>5</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>94</b>

# Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFC	carbonfaserverstärkter Kohlenstoff
CNC	Cupterized Numerical Control
DSC	Differential Scanning Calorimetry
FOT	Faseroptischer Temperatursensor
FVA	Faservolumenanteil
FVK	faserverstärkte Kunststoffe
FLAME	Faserverbund-Leichtbau mit automatisierter Mikrowellenprozesstechnik hoher Energieeffizienz
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HEC	HEPHAISTOS Experimental Center
HSC	High Speed Cutting
KIT	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik
LCC	Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites
MW	Mikrowelle
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PTFE	Polytetrafluorethylen
PEEK	Polyetheretherketone
PVC	Polyvinylchlorid
Sika	Sika Deutschland GmbH
SKT	Schunk Kohlenstofftechnik GmbH
TE	Thermoelement
VIT	Vötsch Industrietechnik GmbH



# Liste verwendeter Symbole und Variablen

$D_p$	Eindringtiefe
$\varepsilon_0$	Permittivität des Vakuums
$\varepsilon_r$	relative Permittivität
$\varepsilon_r'$	relative Dielektrizitätskonstante
$\varepsilon_r''$	relativer dielektrischer Verlustfaktor
$E$	elektrische Feldstärke
$f$	Frequenz
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_0$	Freiraumwellenlänge
$p$	Leistungsdichte
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$T$	Temperatur
$T_G$	Glasübergangstemperatur





# 1 Einleitung

In einer Studie von McKinsey von 2012 wird der Markt von Kohlenstofffasern von zuletzt 20 000 t bis 2030 auf 500 000 t Fasern wachsen. Neben wachsendem Bedarf in der Luftfahrt, Windenergie, Maschinenbau und für Sportartikel wird der größte Bedarf in der Fahrzeugindustrie erwartet, vorausgesetzt dass sich das Preisgefüge dafür drastisch ändert. Der Leichtbau mit CFK erlaubt zwar bis zu 50 % Gewichtsreduktion gegenüber Stahl, ist bisher aber mindestens sechsmal teurer als die gleichen Komponenten aus Stahl. Das wird sich laut der McKinsey-Studie bis 2030 ändern<sup>1</sup>.

Mit der richtigen Technologie Energie sparen und Herstellkosten senken, wird in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag leisten. Die Kosten für den Energieverbrauch in der Kunststoff verarbeitenden Industrie sind heute völlig unterbewertet und kaum beachtet. Welcher Verarbeiter kennt schon seine produktbezogenen Energiekosten? Ein klares Ergebnis der Studie: die produktbezogenen Energiekosten sind im Allgemeinen deutlich höher als die produktbezogene Abschreibung der jeweiligen Produktionsmaschine. Und speziell für den Leichtbau gilt: Die Bedeutung der Energieeffizienz in der Produktion wird eindeutig zunehmen. Zykluszeiten werden aufgrund komplexerer Prozesse (Verkettung, Einlegen, Entnehmen,...) eher länger, speziell dann, wenn auch nicht-thermoplastische Materialien mit verarbeitet werden. Energiekosten werden tendenziell steigen und damit den Kostenanteil an den Herstellkosten deutlich erhöhen.

Eine Investition in Energieeffizienz rechnet sich und bringt längerfristige Wettbewerbsvorteile. Das enorme Marktpotenzial für Leichtbau wird nur dann realisiert werden, wenn die Produktionsbetriebe diese Nachfrage in gleicher Geschwindigkeit erfüllen können. Rascher Kompetenzaufbau wird somit ein wesentliches Erfolgskriterium. Netzwerke und beratende Spezialisten liefern dabei wichtige Beiträge.

## 1.1 Motivation

Produkte aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) finden aufgrund ihres hohen Leichtbaupotenzials sowie wegen ihrer spezifischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften immer mehr Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Fahrzeugbau und dem allgemeinen Maschinenbau, sowie im Bereich der Baustoffträger.

Hierbei ist das Potential des Leichtbaus, Ressourcen bei der Fertigung einzusparen, bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Alleine durch die Substitution traditioneller Materialien wie z.B. Stahl durch neue Werkstoffe und Werkstoffverbunde wie z.B. glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), Kohlenfaser-verstärkte Kunststoffe (CFK) sinken nicht nur die Rohstoffkosten, auch die Energieeffizienz in der Produktion steigt. Durch den Einsatz von Leichtbau in Transportbereich, wie z.B. bei Schienenfahrzeugen, im Automobil und Luftfahrtbereich besteht ein erhebliches Potential, Treibstoffe einzusparen. So bewirkt beispielsweise jedes Kilo Gewichtseinsparung in einem Passagierflugzeug die Einsparung von ca. 3.000 kg Kerosin im Laufe eines Flugzeugslebens. All dieses kann einen signifikanten Betrag zu nationalen und internationalen Klimaschutzziele hinsichtlich der geplanten Reduktion von CO<sub>2</sub> Emissionen leisten.

In vielen Fällen sind auch die speziellen Fertigungsmöglichkeiten, z.B. zur Herstellung sehr großer Strukturen bei akzeptablem Werkzeugaufwand, das Argument für den Einsatz von FVK an Stelle von Metallen. Auch bei kleineren Stückzahlen kann durch die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen und durch die geringeren Werkzeugkosten ein günstigerer Stückpreis erzielt werden.

---

<sup>1</sup> [http://www.kunststoff-cluster.com/files/KC\\_aktuell\\_02\\_2012\\_endversion.pdf](http://www.kunststoff-cluster.com/files/KC_aktuell_02_2012_endversion.pdf)

Bei größeren Stückzahlen gibt es jedoch im Vergleich zu den Metallen häufig das Einsatzhemmnis durch die aufwändigere Fertigung und die langen Zykluszeiten, wie sie bei herkömmlichen Duroplastmatrix-Systemen gegeben sind. Ein Schlüssel zur Reduzierung der Herstellkosten von Faserverbundwerkstoffen ist daher die Entwicklung und Anwendung von neuartigen Härte- und Fertigungsverfahren, welche eine schnellere und energieeffizientere Produktion ermöglichen. Ein neuartiger innovativer Ansatz zur Reduzierung der erforderlichen Energie und Herstellkosten von Faserverbundwerkstoffen liegt in der industriellen Nutzung der im KIT entwickelten HEPHAISTOS-Mikrowellentechnik, mit welcher Leichtbaustrukturen ohne teure, thermisch beheizte Werkzeuge bzw. Öfen schnell und energieeffizient, sowie autoklavlos hergestellt werden können. Die Mikrowellentechnik ermöglicht, aufgrund deren Potentials direkt im Volumen zu heizen, eine Prozesskette mit geringerem Energiebedarf und besserer CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz, insbesondere bei dickwandigen CFK-Wickelbauteilen und -Strangprofilen, die Bestandteil dieses Verbundprojektes waren. Insbesondere Dickwandige Bauteile erfordern längere Prozesszeiten in thermischen Aushärteöfen bzw. erfordern entsprechende kurze Zuggeschwindigkeiten beim Strandziehen um eine ausreichende und gleichmäßige Polymerisation der Matrix zu gewährleisten

Die in dem BMBF-Vorhaben „Innovative Modulare Mikrowellentechnik für die Aushärtung von CFK-Verbundstrukturen“ entwickelte modulare HEPHAISTOS Mikrowellen-Systemtechnologie [1] wird bereits heute in der Industrie für die Qualifizierung von Vakuum-unterstützten Prozessen mit deutlich minimiertem Energieaufwand betrieben. Auf Grundlage dieser Arbeiten wurde im Rahmen des FLAME Verbundprojektes die HEPHAISTOS Technologie hinsichtlich Energieeffizienz und Prozessautomatisierung weiter optimiert und mit geeigneten Werkzeugen für die Härtung von dickwandigen CFK Wickelbauteilen ausgestattet.

Die aktuell stark expandierende Nachfrage von dickwandigen CFK Bauteilen, werden, bei einem erfolgreichen Abschluss dieses Projektes, auch eine erheblich Nachfrage nach entsprechenden innovativen Mikrowellenanlagen nach sich ziehen. Die Erfahrungen aus diesem Projekt und die dabei entwickelten Mikrowellensysteme lassen sich mit entsprechenden Systemanpassungen auch leicht auf andere Bereiche der Faserverbundherstellung, wie Automobil, Luftfahrt oder Windkraft übertragen. Damit könnte sich mit der innovativen HE-PHAISTOS-Mikrowellentechnologie gerade in Zeiten der Energiewendepolitik ein deutliches Marktpotential entwickeln.

## 1.2 Problemlage

Faserverbundbauteile werden zunehmend auch im Maschinenbau, in der Anlagentechnik und zukünftig auch im Automobilbereich eingesetzt. Daher stellt die kostengünstige und schnelle Herstellung, vor allem für den Serieneinsatz, eine zwingende Notwendigkeit dar, um derartige Anwendungspotentiale zu erschließen. Dies gilt insbesondere für Präzisionswickelteile, die heute noch herkömmlich mit Standard-Trockenschränken thermisch gehärtet werden müssen. Dies erfordert, besonders bei dickwandigen Bauteilen, wie sie in diesem Vorhaben untersucht wurden, sehr lange Härtings- und Haltezeiten. Bei der isolierenden Wirkung der CFK-Strukturen die notwendige homogene Durchwärmung zu erzielen, erfordert gerade in dickwandigen Bauteildicken sehr lange Haltezeiten und einen langsamen Temperaturfortschritt, um möglichst keine Reaktionsbeschleunigung durch exotherme Reaktionen in dem Bauteil zu erzeugen. Die Temperaturkontrolle spielt dabei besonders bei der Herstellung von Präzisionsbauteilen eine äußerst wichtige Rolle, da es sonst nicht gelingt, die extremen Toleranzanforderungen für derartige Bauteile erfüllen zu können.

Die Pultrusionstechnik hat ihr technisches und wirtschaftliches Potenzial bereits in sehr vielen Anwendungen, vor allem im Bauwesen (Brückenbau, leichte Dachkonstruktionen, Verkleidungsteile), unter Beweis gestellt. Die Fertigung von einfachen Profilen durch thermische Pultrusion ist längst nach China abgewandert, während die Chance einer industriellen Pultrusion in Deutschland und Europa in der Pro-

duktion von Spezialitäten bzw. komplexen Profilen nur durch energieeffiziente Pultrusionstechniken realisiert werden kann. Ein Ziel des Projektes war demzufolge die Mikrowellen-unterstützte Pultrusion von voluminösen CFK-Komponenten, die sich z.B. für Strukturelemente und Tragstrukturen eignen.

Die Mikrowellentechnik ermöglicht, aufgrund deren Potentials direkt im Volumen zu heizen, eine Prozesskette mit geringerem Energiebedarf und besserer CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz, insbesondere bei dickwandigen Wickelbauteilen und Strangprofilen. Darüber hinaus kann man unter Einsatz der Mikrowellentechnik einer unerwünschten Reaktionsbeschleunigung durch exotherme Reaktionen sofort und wirkungsvoll entgegenwirken, indem die Mikrowellenleistung einfach reduziert oder ausgeschaltet wird. Dies erfordert jedoch die Echtzeiterfassung der Temperaturverteilung auf den Bauteilen und eine Echtzeit-Automatisierungstechnologie, die eine Feinabstimmung der Temperaturhomogenität am Bauteil durch selbstlernende Regelungsalgorithmen ermöglicht. Ziel ist es, einer „Iso-Temperatur-Fläche“ für das aufliegende Bauteil durch elektronische Regelung des trägheitslosen Mikrowelleneintrages so nahe wie möglich zu kommen.



## 2 Ziele des Verbundprojektes

Das diesem Bericht zugrundeliegende Verbundprojekt wurde im BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ innerhalb der Aktivitäten zur „Ressourceneffizienz in der Produktion“ bei dem Ideenwettbewerb „Energieeffizienter Leichtbau“ von unabhängigen Experten als förderwürdig ausgewählt. Mit der Förderung sollen Unternehmen besser in die Lage versetzt werden, auf Veränderungen rasch zu reagieren und den erforderlichen Wandel aktiv mit zu gestalten.

Die klassischen Prozesse in thermischen Öfen oder Autoklaven zur Herstellung von monolithischen Bauteilen ist durch lange Prozesszeiten, ineffiziente Ausnutzungsgrade und hohe Werkzeugbelegzeiten nur eingeschränkt für die Fertigung größerer Stückzahlen geeignet.

Mikrowellentechnik ermöglicht als einziges physikalisches Erwärmungsverfahren eine gezielte, zeitlich und örtlich begrenzte volumetrische und selektive Aufheizung eines Bauteils – die Umgebung sowie die Ofenkammer bleiben kalt. In diesem Projekt wurden, basierend auf diesen besonderen physikalischen Eigenschaften, folgende Ziele für einen „Energieeffizienten Leichtbau in der Produktion“ definiert:

- Entwicklung von hochintegrierten, geometrisch kompakten Mikrowellensystemen und Komponenten zur ressourcen- und energieeffizienten automatisierten Fertigung von CFK-Profilen durch Strangziehverfahren (Pultrusion) in den Bereichen Automobiltechnik und allgemeiner Maschinenbau
- Weiterentwicklung der Mikrowellentechnologie für große Produktionsanlagen durch neue Werkzeug-, Antennen- und Wellenführungskonzepte und Echtzeit-Automatisierung für die energieeffiziente und gleichmäßige Aushärtung von dickwandigen CFK Wickelkörpern.
- Auswahl mikrowellenaktiver Harze als Produktionsmittel für die beschleunigte, selektive Aushärtung der Bauteile.
- Aufbau von automatisierten, exemplarischen Prozessketten im Labormaßstab zur Erprobung und Bewertung der Technologien anhand von Demonstrator- und Schikanebauteilen.



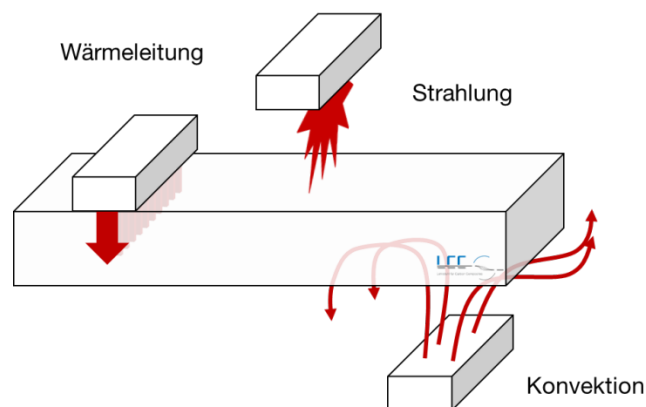
## 3 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn hinsichtlich des Einsatzes von Mikrowellen zum Prozessieren von Kohlefaserverbundwerkstoffen war im Wesentlichen durch die Arbeiten aus dem Vorgängerprojekt gegeben (siehe Abschnitt 3.2 - KIT). Alternative, vergleichbar erfolgreiche Mikrowellenkonzepten auf diesem Gebiet waren bis dahin nicht bekannt.

### 3.1 Wärmeeinbringungsmethoden und Mikrowellenheizung

#### 3.1.1 Verfügbare Wärmeübertragungsmechanismen in der Faserverbundherstellung

Wärme ist ein wesentliches Element bei der Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen mit Duromeren. Eine Temperierung wird zum Beispiel benötigt, um die Viskosität eines Harzes so weit zu reduzieren bis es flüssig genug für die Infiltration ist oder, um die Aushärtezeit zu verkürzen. Die Temperaturführung kann in drei Phasen eingeteilt werden: Aufheizung, Haltezeit und Abkühlung. In Abhängigkeit des jeweiligen Prozesses ändern sich dabei die Anforderungen. Die Binderaktivierung beispielsweise benötigt im Vergleich zum Aushärteprozess von Luftfahrtbauteilen eine steile Heizrampe größer 5 K/min, eine kurze Haltezeit und eine schnelle Abkühlung von unter -5 K/min. Im Gegenzug hierzu muss bei der Aushärtung eine gleichmäßige Aufheizrate von 3K/min, eine Haltezeit größer 1,5 h und eine Abkühlrate über -5 K/min eingehalten werden. Aus diesem Grund werden für unterschiedliche Prozesse verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen (Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung) angewandt, siehe Abbildung 3.1.



**Abbildung 3.1**

Schematische Übersicht möglicher Wärmeeinbringungsmechanismen

Zur Optimierung des Wärmeeintrags in Abhängigkeit der beteiligten Materialien und der erforderlichen Prozessparameter dient ein Verständnis der physikalischen Verhältnisse der unterschiedlichen Wärmeübertragungsmechanismen [2, 3].

Der **konvektive Wärmeübergang** ist in Umluftöfen und Autoklaven der dominierende Mechanismus. Hier ist der Wärmefluss proportional zur Differenz der Werkstücktemperatur  $T_W$  gegenüber der Umgebungstemperatur bzw. der Temperatur der Umluft  $T_\infty$  und ist immer mit einem Stofftransport verbunden, in diesem Fall die warme Luft. Die Art des Stofftransportes an der Grenzfläche Werkstück und Luft bestimmte den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ . Der Wärmefluss  $\dot{Q}$  über eine Oberfläche  $A$  lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{Q} = \alpha (T_\infty - T_W) A \quad 3.1$$

Um den konvektiven Wärmeübertrag zu vergrößern, muss folglich  $\alpha$  erhöht werden. Von Seiten des Prozesses kann die Temperatur, die Dichte und die Geschwindigkeit des Fluides variiert werden. Die verwendeten Materialien setzen dabei eine Grenze für die Erhöhung der Temperatur. Für die Erhöhung des Druckes wird eine Druckkammer benötigt. Diese kommt beim Autoklaven zum Einsatz, in welchen oftmals auch Stickstoff als Prozessmedium mit Brandschutzfunktion zum Einsatz kommt. Aufgrund der großen thermische Masse solcher Anlagen ist, abhängig von der Ofengröße und der installierten Heizleistung, der erreichbaren Heizrate Grenzen gesetzt.

Eine Wärmeübertragung mittels **Wärmeleitung** kommt ausschließlich dann zum Tragen, wenn das Werkstück in direktem Kontakt mit einem geheizten Werkzeug ist. Hierbei kann das Werkzeug, abhängig von der geforderten Temperatur mit unterschiedlichen Techniken geheizt, z.B. elektrisch oder mit heißen Fluiden. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  ist proportional zu den vorherrschenden Temperaturgradienten  $dT/dx$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Materials, und der Fläche  $A$  senkrecht zum Wärmestrom ab, und lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad 3.2$$

Auch hier sind den möglichen Heizraten Grenzen gesetzt, das ein effektiver Wärmeübergang erst dann stattfinden kann wenn die erforderliche Werkzeugtemperatur erreicht ist. So hängt die maximale Heizrate im Wesentlichen von der Masse des Werkzeuges und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstückes ab.

Die **Strahlungsheizung** ist ein kontaktloses Verfahren. So gibt jeder Körper dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin) liegt, Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Der Wärmestrom bzw. die Strahlungsleistung  $\dot{Q}$  skaliert hier mit der 4-ten Potenz der Temperatur, mit der Fläche  $A$  des Strahlers, bzw. dessen Emissionskoeffizienten  $\epsilon$ :

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4 \quad 3.3$$

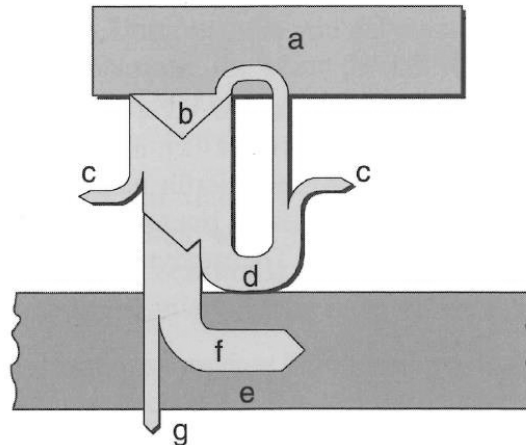
hierbei ist  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  ist die Stefan Boltzmann-Konstante. Durch die 4-te Potenz in der Temperaturabhängigkeit dominiert bei hohen Temperaturen diese Form des Wärmeübergangs die Konvektion bzw. die Wärmeleitung. Durch den Einsatz leistungsfähiger Heizstrahler können deutlich schnellere Heizraten realisiert werden als über Konvektion oder Wärmeleitung möglich sind. Abhängig von der Temperatur liegt das Spektrum solcher Strahler im infraroten oder sichtbaren Strahlungsbereich, was sich durch sehr geringe Eindringtiefen in übliche Materialien auszeichnet. D.h. hier sowie in den zuvor beschriebenen Heizmethoden ist die direkt Erwärmung auf eine  $\mu\text{m}$ -dünne Oberflächenschicht begrenzt. Die Wärmeübertragung in das Bauteilvolumen beruht ausschließlich auf der Wärmeleitung, die gerade für kunststoffbasierte Materialien sehr begrenzt ist und, insbesondere für dickwandige Bauteile, erheblichen Zeitaufwand erfordert und Temperaturgradienten provoziert.

Ein Möglichkeit, die geringen Eindringtiefe zu umgehen und, unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit des zu erwärmenden Materials, eine schnelle und direkte Erwärmung im Bauteilvolumen zu erzielen, ist bei dielektrischen Materialien durch den Einsatz von Strahlungsquellen im Radiofrequenz- und Mikrowellenbereich gegeben.



Abhängig vom Strahlertyp werden elektromagnetische Wellen eines mehr oder weniger breiten spektralen Bereiches, abhängig vom zu erwärmenden Material, teilweise an der Grenzfläche reflektiert. Die restliche Strahlung wird auf dem Weg durch das Material ganz oder teilweise absorbiert bzw. transmittiert (siehe Abbildung 3.2). Wie groß die Anteile der reflektierten, transmittierten und absorbierten Strahlung sind, hängt neben der Geometrie des Objektes von den dielektrischen Eigenschaften des Materiales ab.

- a Strahler
- b Abgegebene Strahlung
- c Strahlungsverluste
- d Reflektion
- e Absorber / Material
- f Absorption
- g Transmission



**Abbildung 3.2**

Verluste während der Strahlungsheizung [4]

Mikrowellen liegen in einem Wellenlängenbereich von 1 mm bis 1 m, was Frequenzen im Bereich von 300 GHz bis 300 MHz entspricht. In industriellen Anwendungen werden jedoch nur Frequenzen in sogenannten ISM-Bändern genutzt, da nur diese frei genutzt werden können für industrielle, wissenschaftlichen und medizinische Zwecke. Die Weltweit für industrielle Zwecke am intensivsten genutzten ISM-Bänder im Mikrowellenbereich liegen bei  $2,45 \pm 0,5$  GHz (12,24 cm) und  $915 \pm 13$  MHz (32,8 cm), wobei letzteres in Europa nicht zugelassen ist.

Die Wechselwirkung der Materialien mit dem elektromagnetischen Feld wird durch die effektive relative Permittivität  $\epsilon_r$  beschrieben.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad 3.4$$

Dies ist eine komplexe Größe, wobei der Realteil  $\epsilon_r'$  der relativen Dielektrizitätskonstante entspricht und ein Maß für die im Material speicherbare elektromagnetische Energie ist. Der Imaginärteil  $\epsilon_r''$  ist ein Maß für das Absorptionsvermögen und wird relativer dielektrischer Verlustfaktor genannt.

Abhängig von den bestrahlten Materialien wirken unterschiedliche Verlustmechanismen zu der Absorption der Mikrowellenstrahlung bei. Im Mikrowellenbereich dominieren in flüssigen und feuchten Medien die Absorption aufgrund der Relaxation von Dipolen im elektromagnetischen Wechselfeld [3, 5]. Je stärker der Dipolcharakter einzelner Moleküle umso stärker ist die zu erwartenden Absorption. Des Weiteren werden durch freie Ladungsträger wie Ionen oder Elektronen Ströme im Material induziert die ebenfalls zu Verlusten führen. Je größer die Leitfähigkeit bzw. die dielektrischen Verluste eines Materials, umso weniger vermag die Mikrowelle in das Material einzudringen. Die Eindringtiefe  $D_p$  wird durch

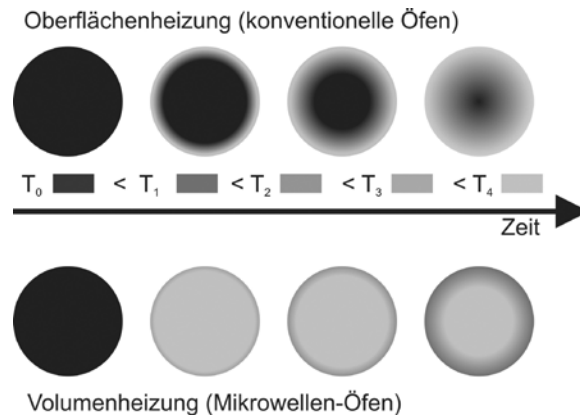
$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r'}}{2\pi \epsilon_r''} \quad \text{für } \epsilon_r'' < \epsilon_r' \quad 3.5$$

beschrieben [5], und ist als die Tiefe in ein Material definiert, bei der die Leistungsdichte der Strahlung auf  $1/e$  der Oberflächenintensität abgefallen ist. Die Leistungsdichte ist proportional zum Quadrat des elektri-

schen Feldes im Material  $E$  und dem Verlustfaktor  $\varepsilon_r''$ . Die Materialeigenschaften  $\varepsilon_r'$  und  $\varepsilon_r''$  hängen dabei sowohl von der Frequenz als auch von der Temperatur ab,  $\lambda_0$  ist die Wellenlänge im Vakuum.

Das Verhältnis zwischen der Eindringtiefe und der Materialdicke ist ein Hinweis auf die Effektivität des Heizsystems. Die Leistungsdichte  $p$  der im Material umgesetzten Mikrowellenleistung lässt sich wie folgt abschätzen:

$$p = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E_i^2 \quad 3.6$$



**Abbildung 3.3**

Temperaturverteilung beim Heizen mit einem Ofen und einer Mikrowellenanlage

Der Unterschied im Aufheizverhalten zwischen konventioneller Oberflächenheizung und volumetrischer Mikrowellenheizung, welche zu einer homogeneren Temperaturverteilung in kürzerer Zeit führt, ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Stellt sich in konventionell beheizten Öfen nach einiger Zeit eine gleichmäßige Temperaturverteilung ein, sobald das Werkstück sich im thermodynamischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindet, stellt sich solch ein Gleichgewicht im Falle der Mikrowellenheizung nie ein. Hier steht dem schnellen Energieeintrag im Volumen ein kontinuierlicher Energieverlust von der Werkstückoberfläche zur kalten Ofenwand bzw. zum kalten Werkzeug mittels Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung entgegen. Diese kann in manchen Anwendungsfällen die Kombination von beiden Heizmethoden, die im Folgenden als hybride Heizung beschrieben wird, erforderlich machen

### 3.1.2 Vorteile der Mikrowellentechnik für die Faserverbundherstellung

Während Laser zum lokalen Heizen bei der automatisierten Faserablage genutzt werden und Infrarotheizung für die Temperierung bei lokalen Reparaturen, gibt es heute noch keine industrielle Fertigung von Faserverbundbauteilen mit Mikrowelle, obwohl das Potential der Mikrowellenheizung wohlbekannt ist [1, 6-15]. Gründe hierfür sind unter anderem das fehlende Verständnis für das Materialverhalten in Wechselwirkung mit Mikrowellen, fehlende Größen für die Prozessauslegung und der Anpassungsbedarf der besteht, wenn herkömmliche Fertigungsmethoden durch Mikrowellenprozesse ersetzt werden sollen. Dabei erfordern die notwendigen Anpassungen derzeit noch einen großen Erfahrungsschatz, da keine ausreichende Dokumentation von Standardverfahren und Anpassungen vorhanden sind. Aus diesem Grund werden die Projektergebnisse des Projektes FLAME, welches sich hauptsächlich mit der Mikrowellenaushärtung von Wickelbauteilen und der mikrowellengestützten Pultrusion beschäftigte, in diesem Bericht ausführlich vorgestellt.

## 3.2 Bisherige Arbeiten der Antragsteller

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

In dem BMBF-Vorhaben „Innovative Modulare Mikrowellentechnik für die Aushärtung von CFK-Verbundstrukturen“ wurde weltweit führend die HEPHAISTOS-Technologie als erste Kammertechnologie zur energieeffizienten Aushärtung von großen CFK-Verbundstrukturen entwickelt. Dabei konnten Energieeinsparungen bei VAP-Prozessen von bis zu 80% gegenüber bestehenden industriellen Verfahren nachgewiesen werden. Für die Industrie wurde das HEPHAISTOS Experimental Center (HEC) (siehe Abbildung 3.4) als Dienstleistungszentrum zur Prozessentwicklung gegründet. Auch zum Thema Pultrusion von CFK Profilen wurden im Rahmen dieses Projektes erste Erfahrungen gesammelt und Untersuchungen mit einteiligen Werkzeugen durchgeführt, womit bereits etliche Meter eines einfachen CFK-Rundprofils gezogen werden konnten.

Aus den Arbeiten in dem vorangegangenen Projekt entstanden zahlreiche Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften und auf internationalen Konferenzen [16-22].



**Abbildung 3.4**

Das HEPHAISTOS Experimental Center (HEC) (links), Mikrowellenausgehärtete Porsche-Heckklappe (rechts)

### Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC)

Der Lehrstuhl für Carbon Composites der TU München war zu Projektbeginn wenige Jahre alt. In dieser Zeit wurden zahlreiche Vorhaben, teilweise öffentlich gefördert oder bilaterale Industrieprojekte, im Bereich Faserverbund-Fertigungstechnik durchgeführt. Dieses Wissen aber auch die Erfahrung der Mitarbeiter, teilweise aus vorherigen Industrietätigkeiten, konnte somit in das hier beschriebene Vorhaben einfließen. Insbesondere im Bereich der Faserverbund-Materialwissenschaft, sowie der Prozess- und Verarbeitungstechnik kann hier auf ein breit angelegtes Know-how zurückgegriffen werden. Im speziellen Bereich der Mikrowellenprozesstechnik sind am LCC bisher keine Vorhaben durchgeführt worden.

### Vötsch Industrietechnik GmbH (VIT)

Vötsch Industrietechnik ist seit 2003 Industriepartner und Lizenznehmer vom KIT und war vor Projektbeginn mit den Partnern KIT, EADS und IFB (Institut für Flugzeugbau der Uni Stuttgart) bei der Erforschung der HEPHAISTOS – Technologie beteiligt. Bereits vor Projektbeginn wurden einige Anlagen für Forschungs- und Versuchszwecke angefertigt.

### **Maus GmbH (Maus)**

Die Fa. Maus GmbH ist in Deutschland Marktführer bei Planung und Herstellung von Rotationsgießformen, welche ähnliche Produkte wie durch Blasformen abbilden. Hinzu kommt die Kompetenz im Großformenbau, welche durch die Übernahme von Mitarbeitern der Firma Eck Formenbau in Rastatt (Zieh- und Blaswerkformen aus Aluminium für Kunststoffteile mit bis zu 5.000 l Volumengröße) gefestigt wird.

Im Bereich der CFK-Verbundstrukturen hat die Firma Maus Prototypenwerkzeuge, Formen, Teile für den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrt, den Maschinenbau u.a. entwickelt, hergestellt und CNC- bearbeitet. Hinzu kommt die Entwicklung von Antihaft-Formbeschichtungen für CFK- Teile.

Mit 7x HSC-CNC Bearbeitungszentren und einem max. Bearbeitungs-bereich von bis zu 6000 x 3000 x 1500 mm 5-achsig werden unterschiedlichste Materialien bearbeitet, wie z.B.: Holz, Metall, Kunststoff, Sand, Gips und diverse andere Materialien.

Durch spezielle Bearbeitungswerkzeuge, Bearbeitungsstrategien und Know-how ist die Fa. Maus in der Lage keramische und faserverstärkte Werkstoffe zu bearbeiten, was für die Herstellung mikrowellentauglicher Formen eine wichtige (Vorraussetzung) Qualifikation ist.

### **Schunk Kohlenstofftechnik GmbH (SKT)**

Schunk Kohlenstofftechnik GmbH (SKT) stellt bereits seit 1984 Präzisionswickelteile in Serie aus CFK her. Diese CFK-Wickelbauteile werden z. B. in extrem schnell laufenden Pumpen oder Maschinen eingesetzt, wobei die Umfangsgeschwindigkeiten  $> 300$  m/s sind. Dies erfordert die Einhaltung extrem enger Toleranzen, was nur dadurch realisierbar ist, dass der Aushärteprozess extrem genau gesteuert wird. Daher erfolgte die Härtung dieser Wickelbauteile bisher ausschließlich thermisch, unter Verwendung sehr langer Haltezeiten im Bereich der Vernetzungsreaktion, so dass der Prozess quasi isotherm gefahren wurde. Im Rahmen der Entwicklung dickwandiger Wickelbauteile für die Automobilindustrie mit ähnlichen Anforderungsprofilen sind allerdings die rein thermischen Verfahren nicht mehr kosteneffektiv. Deshalb soll im Rahmen des beantragten Vorhabens untersucht werden, welche Energie und Kosteneinsparungen realisierbar wären, wenn dickwandige CFK-Teile mikrowellenunterstützt thermisch ausgehärtet werden, wobei allerdings die geforderte Bauteiltoleranzen auf jeden Fall einhaltbar sind. Da SKT bisher über keinerlei Erfahrungen mikrowellenunterstützter Härtungsprozesse verfügt, sollen diese Arbeiten in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit in dem Verbundvorhaben mit Partnern durchgeführt werden, welche bereits über fundierte Kenntnisse der Mikrowellenprozesse verfügen.

### **Sika Deutschland GmbH (Sika)**

Die Projektabwicklung zur Fertigung einer Kunstskulptur aus bis zu 40 m langen, im Filament-Winding Verfahren hergestellten carbonfaserverstärkten Rohren mit Epoxidharz- Matrix führte zu einer Entwicklung auf Basis eines bestehenden Filament-Winding Harzsystems. Dabei lag die Herausforderung in der technischen Entwicklung in enger Zusammenarbeit mit dem Verarbeiter sowie dem Entwicklungszeitraum von wenigen Wochen.

Aus vorhergehenden Entwicklungen der Sika AG in der Schweiz lagen Ergebnisse zur Mikrowellenunterstützten Aushärtung von Klebstoffen vor. Im Hinblick auf die mikrowellenunterstützte Aushärtung von flüssigen Epoxidharzen konnte jedoch nicht auf im Vorfeld generiertes Wissen zurückgegriffen werden.

## 4 Eingehende Darstellung der Forschungsergebnisse

### 4.1 Entwicklung eines Mikrowellen-Pultrusionsverfahrens

In diesem Arbeitspaket wurden für die mikrowellenunterstützte Pultrusion geeignete Werkzeuge entwickelt, wo zunächst geeignete Werkzeugmaterialien mit ausreichender Mikrowellentransparenz bei gleichzeitig ausreichender mechanischer Stabilität zu finden wäre. Erste Versuche wurden daher mit einfachen Profilgeometrien gefahren, womit die verwendeten Phenolharze für das mikrowellenunterstützte Strangziehen optimiert werden. Parallel dazu wurden zweiteilige Pultrusionswerkzeuge für die Fertigung komplexerer CFK Endlosprofile entwickelt. Auch hier wurden die erzielten Materialeigenschaften und der für den Prozess notwendige Energiebedarf mit dem konventioneller Pultrusionsverfahren verglichen.

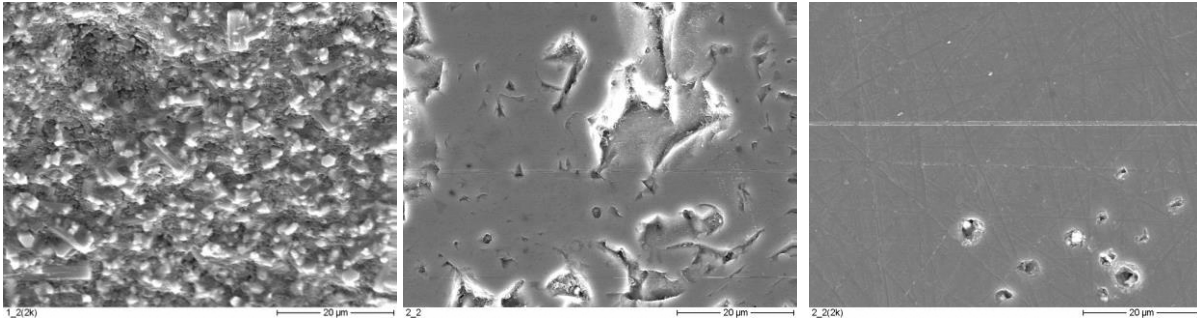
#### 4.1.1 Entwicklung geeigneter mikrowellenunterstützter Pultrusionswerkzeuge

Die Grundidee ist, die zur Aushärtung notwendige Erwärmung mittels Mikrowelle einzubringen. Durch die direkte Einbringung der Wärme in den Faserstrang (volumetrische Erwärmung) ist eine schnellere Heizung möglich als mit konventioneller, auf Wärmeleitung basierender Heizung. Zudem wird vorrangig nur der auszuhärtende Faserstrang erwärmt. Das Vorheizen eines ganzen Werkzeugs auf die zum Aushärten notwendige Temperatur entfällt, wodurch Energie eingespart werden kann. Somit haben mikrowellenunterstützte Pultrusionsprozesse das Potential, im Vergleich zu konventionell beheizten Prozessen höhere Abzugsgeschwindigkeiten in kürzeren Werkzeugen zu realisieren. Eine weitgehend trägheitslose Regelung erlaubt es, unmittelbar auf sich verändernde Prozessbedingungen zu reagieren. So sollte es z.B. auch möglich sein, den Aushärteprozess während des Strangziehens gezielt und kurzzeitig auszusetzen, um z.B. in einem nachgelagerten Prozessschritt die Profilgeometrie anwendungsspezifisch nachzuverformen oder Rahmenstrukturen mit andern Profilen herzustellen. Letzteres war allerdings nicht Inhalt des Projektplanes.

Um die prinzipielle Machbarkeit zu demonstrieren bzw. um die notwendigen Erkenntnisse hinsichtlich Prozessparameter und Anforderungen an geeignete Werkzeugmaterialien zu gewinnen, wurde zunächst ein einfaches Rundprofilwerkzeug entwickelt [23]. Die Erkenntnisse hieraus flossen dann in die Entwicklung eines weiteren, zweiteiligen Pultrusionswerkzeuges, um eine größerer Variabilität der Pultrusionsprofile zu demonstrieren.

Anders als in konventionellen Verfahren üblich, sind hier die Formwerkzeuge aus keramischen Materialien zu entwickeln und in einen dafür optimierten Mikrowellenapplikator zu integrieren.

Damit das Einbringen der Mikrowellenenergie während der Formgebung möglich ist, muss das formgebende Werkzeug aus einem mikrowellentransparenten Material gefertigt sein. Werkzeuge aus Metall sind daher nicht möglich. Da zugleich auch mechanische Stabilität und hohe Abriebfestigkeit gefordert sind, fiel die Wahl auf ein Werkzeug aus Keramik. Untersucht wurden hier Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Siliziumnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$  da diese nur sehr geringe dielektrische Verluste aufweisen. Kritisch sind hier jedoch die Eigenschaften der Oberfläche. Da Keramiken aus gesinterten Körnern bestehen, sind diese nur sehr schwer mit glatten Oberflächen herzustellen. Zudem spielt die Struktur der Oberfläche eine Rolle: an scharfkantigen Korngrenzen könnten Fasern verletzt werden und reißen, in Poren könnte sich Harz ansammeln und verkleben. Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft REM-Aufnahmen typischer Keramikoberflächen



**Abbildung 4.1**

REM Aufnahmen der Oberfläche von geschliffenen Frialit Keramikproben: Links: GP 79 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), Mitte: F99,7hf ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) extrudiert, Rechts: F99,7hf ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) geCIPpt.

Wie sich daraus erkennen lässt, weist die Oberfläche von  $\text{Si}_3\text{N}_4$  raue, scharfkantige Strukturen auf. Die Struktur von extrudiertem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist weniger dicht als die kalt-isostatisch-gepresste (CIP) Variante. Entsprechend weniger porös ist die geschliffene Oberfläche der geCIPpten Probe.

Es wurden Keramikrohre mit 9 mm lichter Weite mit Radius auf der Einzugsseite aus Siliziumnitrid und aus Aluminiumoxid von verschiedenen Herstellern in Pultrusionsversuchen getestet. Dabei sind zahlreiche Keramikrohre gebrochen. Am haltbarsten erwiesen sich Rohre aus Aluminiumoxid der Marke Frialit F99,7hf.

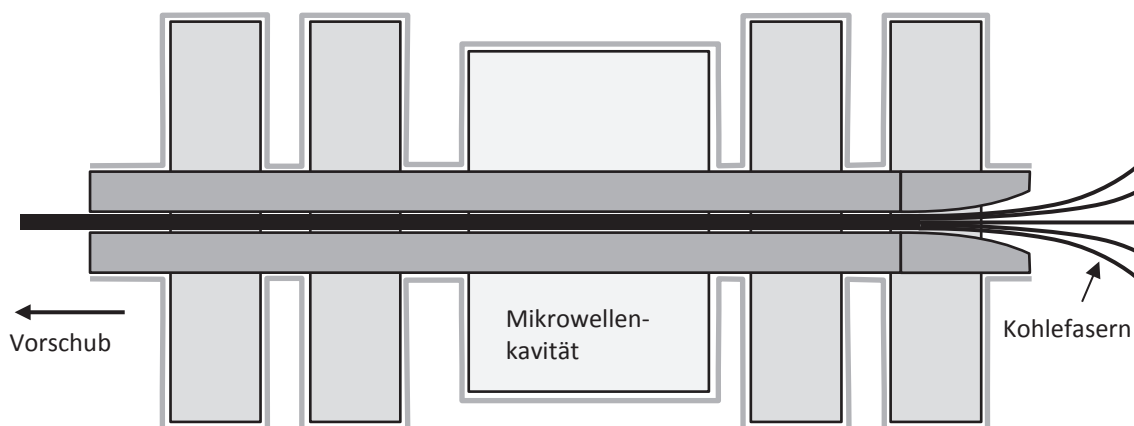
Um die Porosität als Angriffsfläche für anhaftendes Harz zu reduzieren und damit die Haltbarkeit der Keramikrohre weiter zu erhöhen, wurden diese im Vakuum innenbeschichtet. Dadurch sollte die Porosität der Innenfläche der Keramikrohre gefüllt werden, sodass sich die Reibung verringert und die Haltbarkeit der Keramikrohre verbessert. Es wurden Beschichtungen auf Basis von PTFE, PEEK und Polyimid in Rohren aus Siliziumnitrid und Aluminiumoxid, bei Pultrusionsversuchen mit Beheizung durch Mikrowellen getestet. Die mit Abstand längste Haltbarkeit wurde mit Rohren erreicht, auf die eine grüne Maus-Innen-Beschichtung auf PTFE-Basis im Vakuum aufgebracht wurde, in Rohren aus Aluminiumoxid der Marke Frialit F99,7hf. Damit wurden über 150 m Rundprofil mit Beheizung durch Mikrowellen pultrudiert.

#### 4.1.1.1 Mikrowellendesign der Pultrusionswerkzeuge

##### 4.1.1.1.1 Einteiliges Pultrusionswerkzeug für 9 mm Rundprofi

Die mit Harz getränkten Fasern werden durch das formgebende Werkzeug aus Keramik gezogen. Um dieses möglichst einfach zu gestalten wurde für die ersten Versuche ein Standard Keramikrohr aus FRIALIT F99,7hf verwendet mit einer lichten Weite von 9 mm. Das Keramikrohr verläuft teilweise durch eine Mikrowellenkavität. Diese ist von den Abmessungen monomodig ausgelegt. Das elektrische Feld ist senkrecht zum Faserverlauf orientiert, wodurch ein besseres Eindringen der Mikrowelle in das Faserbündel ermöglicht wird. Abbildung 4.2 zeigt eine Prinzipskizze des Mikrowellenapplikators.

Mittig angeordnet ist die Mikrowellenkavität. Dort koppeln über das mikrowellentransparente Keramikrohr die Mikrowellen in das Volumen des harzgetränkten Faserstrangs ein und erwärmen diesen, wodurch dieser aushärtet. Bei richtiger Einstellung des Prozesses erhält man somit einen soliden Rundstab mit 9 mm im Durchmesser am Ausgang des Applikators. Links und rechts des Applikators sind Filter angeordnet, die ein Austreten von Mikrowellenstrahlung durch die Ein- und Austrittsöffnungen für das Material verhindern. Diese Filter sind so dimensioniert, dass die Ausbreitung der Mikrowelle bei der Betriebsfrequenz 2,45 GHz unterdrückt und die Welle stattdessen zurück in die Kavität reflektiert wird.

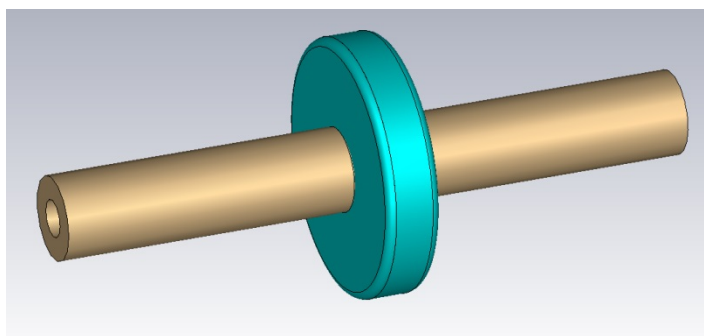


**Abbildung 4.2**

Prinzipdarstellung des Mikrowellen-Pultrusionsapplikators.

Die Kavität selbst ist von den Abmessungen so gestaltet, dass sich nur eine definierte Feldkonfiguration (Grundmode) mit definierter Feldrichtung ausbilden kann. Abgesehen davon wird diese aber nicht speziell auf die Last angepasst. Stattdessen wird diese beidseitig offen gestaltet und durch externe Beschaltung mit Kurzschlusschieber und 3-Stub-Tuner im Versuchsaufbau abgestimmt.

Um den Austritt von Mikrowellenstrahlung aus den Öffnungen für den Materialtransport zu verhindern, wurde ein sogenanntes Choke-Filter entwickelt. Für den Rundstab ist die Ausführung eine rotationssymmetrische Koaxialstruktur, deren Innenleiter durch den (leitfähigen) Kohlefaserstab selbst gebildet wird. Realisiert wird das Filter durch zwei gegensätzliche Impedanzsprünge in der Koaxialstruktur bedingt durch eine Veränderung des Durchmessers und Einsetzen eines Dielektrikums. Damit bildet sich eine Struktur wie in Abbildung 4.3 gezeigt.

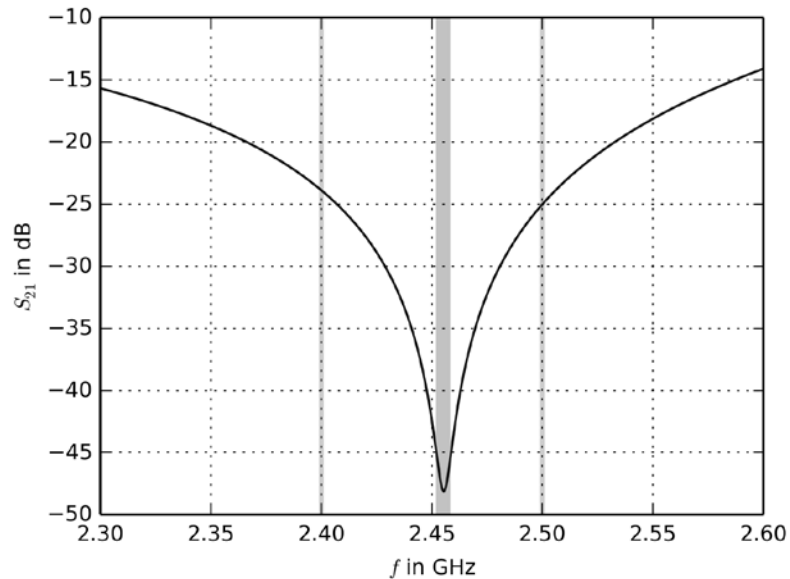


**Abbildung 4.3**

Filter Einzelement. Das Keramikrohr wird von einer PEEK-Scheibe umschlossen. Die Gesamtstruktur wird komplett in Metall eingebettet, dies bildet den Außenleiter der Koaxialstruktur.

Für das Dielektrikum wird eine PEEK-Scheibe mit  $\epsilon_r' = 3,4$  verwendet. Das Rohr besteht aus Aluminiumoxid mit  $\epsilon_r' = 10$ . Die Abmessungen dieser Scheibe werden mittels Simulation optimiert, so dass sich eine möglichst minimale Transmission  $S_{21}$  ergibt. Die Transmission über der Frequenz ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

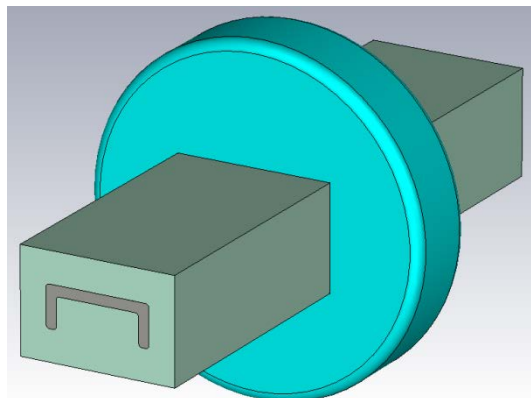
Im relevanten Frequenzbereich von 2,4 GHz bis 2,5 GHz liegt die Transmission unterhalb etwa -25 dB. Dies ist für eine Einhaltung der Grenzwerte zu wenig. Daher sollten am Ein- und Auslauf jeweils zwei solcher Elemente in Serie geschaltet werden, wodurch eine Dämpfung durch den Choke von jeweils mindestens 50 dB erreicht wird.

**Abbildung 4.4**

Transmission  $S_{21}$  durch ein Filterelement.

#### 4.1.1.1.2 Zweiteiligen Pultrusionswerkzeug für ein U-Profil

Die Pultrusion des Rundstabes eignet sich gut zur Demonstration der grundsätzlichen Machbarkeit der Mikrowellenpultrusion. Für die Anwendung werden aber in der Regel kompliziertere Querschnittsgeometrien benötigt. Daher wurde im nächsten Schritt ein Pultrusionswerkzeug für ein U-Profil entworfen. Dieses wurde vom Querschnitt her kompakt gehalten, um bezüglich der Mikrowellentechnik nicht zu viele Parameter simultan verändern zu müssen. Insbesondere soll die Querschnittsfläche etwa gleich bleiben, um Zuggeschwindigkeit und Mikrowellenleistung wie beim Rundstab halten zu können. Die Abmessungen sollen ferner nicht zu groß sein, um weiterhin mit einer monomodigen Kavität arbeiten zu können, um somit eine homogene Heizung zu erzielen. Als weiterer Vorteil des kompakten Designs ergibt sich eine Vereinfachung des Choke-Designs. Zuletzt hat man sich für ein U-Profil mit den Abmessungen 10 mm x 20 mm bei 1,3 mm Wandstärke geeinigt. Der prinzipielle Aufbau des Werkzeuges für das Rundprofil wurde beibehalten.

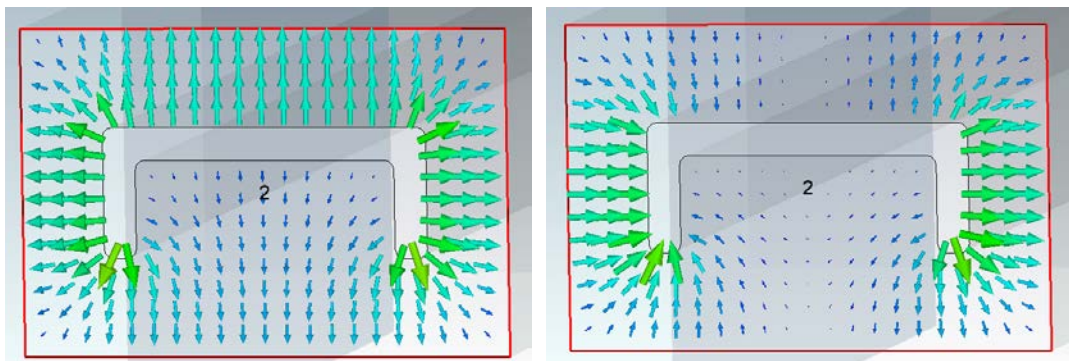
**Abbildung 4.5**

Filter-Einzelement für das U-Profil.



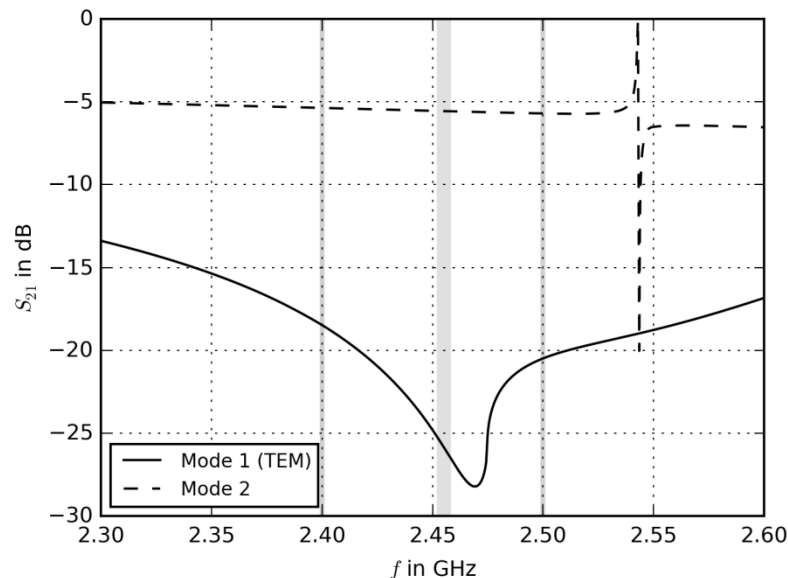
Auch für das U-Profil-Werkzeug wurden zum Schutz vor austretender Mikrowellenstrahlung geeignete Filter (Chokes) benötigt. Das Aufbauprinzip bleibt unverändert, jedoch ist das zentrale Rohr nicht mehr rund, stattdessen befindet sich dort der Keramik-Werkzeug-Einsatz mit U-Profil. Ein Filterelement sieht daher wie in Abbildung 4.5 aus.

Das Prinzip ist das gleiche wie beim Rundprofil, gemäß Abbildung 4.3. Ein entscheidender Unterschied besteht jedoch darin, dass die Struktur nicht rotationssymmetrisch ist und dass aufgrund des größeren Querschnittes höhere Moden ausbreitungsfähig sind. Um die Anzahl der Moden möglichst gering zu halten, wurde die Querschnittsfläche möglichst klein gehalten (30 mm x 20 mm).



**Abbildung 4.6**

Feldbild (E-Feld) der beiden am stärksten angeregten Moden im Querschnitt des U-Profiles: links Mode 1 (TEM), rechts Mode 2.



**Abbildung 4.7**

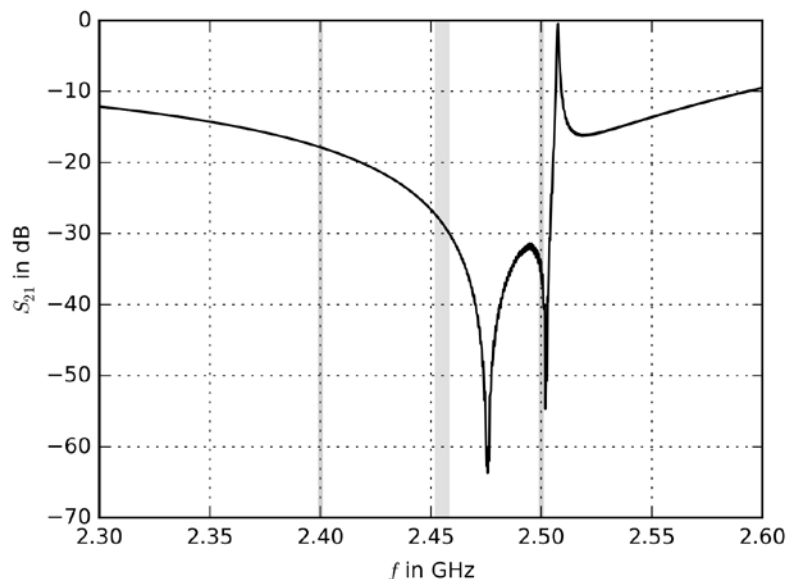
Transmission der beiden betrachteten Moden durch das Filter-Element für Mode 1.

Dennoch sind 5 Moden ausbreitungsfähig. Für jede dieser Moden ist grundsätzlich ein eigenes Filter notwendig, wodurch die gesamte Filterlänge steigt: sähe man für jeden Mode zwei Filter vor, so wären 10 Filterelemente in Serie erforderlich. Die gesamte Werkzeuglänge würde steigen, was aufgrund des beschränkten Platzangebots am Versuchsstand schwer zu realisieren ist. Daher wurde zunächst mittels

Simulation ermittelt, wie stark die einzelnen Moden angeregt werden, und nur für die beiden am stärksten angeregten jeweils ein Filterelement ausgelegt. Abbildung 4.6 zeigt die Feldbilder für diese beiden Moden im Querschnitt des U-Profiles.

Der erste Choke wurde auf möglichst geringe Transmission  $S_{21}$  von Mode 1 ausgelegt. Diese ist in Abbildung 4.7 dargestellt und beträgt bei Betriebsfrequenz besser als -20 dB. Mit eingezeichnet ist die Transmission für Mode 2 durch diesen Choke, welche nur bei ca. -5 dB liegt. Für diesen Mode ist daher kaum Filterwirkung gegeben. Daher wird ein weiterer Choke notwendig, der auf Mode 2 abgestimmt ist. Dieser ist gleich aufgebaut, besitzt jedoch andere Abmessungen für die PEEK-Scheibe. Hier wird ebenfalls eine Transmission von besser als -20 dB erreicht, wie in Abbildung 4.8 dargestellt. Dort ist auch zu erkennen, dass die Abmessungen des Chokes kritisch sind, da nur knapp außerhalb des Frequenzbandes 2,4 GHz bis 2,5 GHz ein Maximum für die Transmission auftritt, also eine Minimierung der Schirmwirkung.

Auf diese Weise wird ersichtlich, dass für jeden Mode normalerweise mindestens ein Filterelement erforderlich ist. Beim aufgebauten Applikator wurde aus Platzgründen am Ausgang nur ein Filter für Mode 1 eingebaut. Dies hat sich während des Versuchs erwartungsgemäß als unzureichend herausgestellt. Es trat dort zeitweise Arcing am Ausgang auf. Die Personenschutzgrenzwerte im zugänglichen Bereich wurden jedoch eingehalten



**Abbildung 4.8**

Transmission von Mode 2 durch das zugehörige Filterelement.

#### 4.1.1.2 Mechanisches Design der Pultrusionswerkzeuge

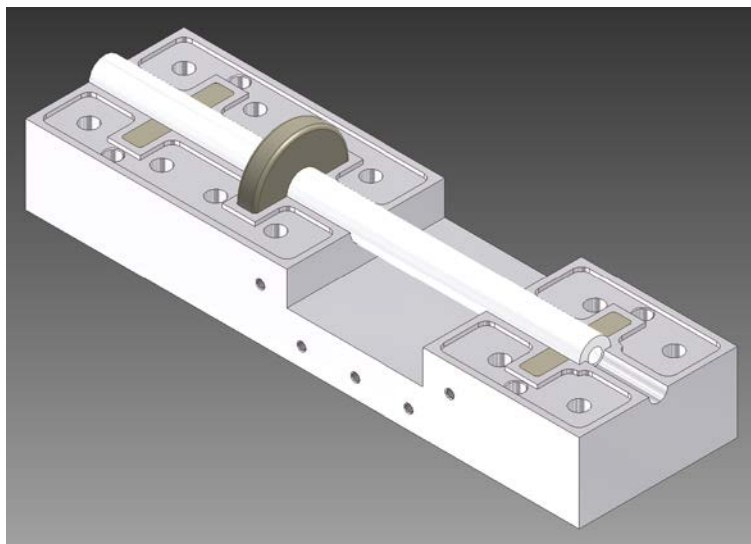
##### 4.1.1.2.1 Einteiliges Pultrusionswerkzeug für 9 mm Rundprofi

Das Keramikwerkzeug und die Chokestruktur werden in ein Werkzeug aus Aluminium integriert. Dieses besteht aus zwei nahezu symmetrischen massiven Hälften, in welche die benötigten Strukturen gefräst wurden. Abbildung 4.9 zeigt ein CAD-Modell, wobei nur die obere Hälfte dargestellt ist, um Einblick in die Innenstruktur zu gewähren. Ein Foto des gefertigten Werkzeuges im offenen Zustand ist in Abbildung 4.10 zu sehen.

Das in Abbildung 4.10 dargestellte Werkzeug dient zur Aufnahme des Keramikrohres (1) mit einer Länge von 310 mm, mit einem Außendurchmesser von 20 mm und 9 mm Innendurchmesser.

Durch das Verschrauben der unteren Werkzeughälfte (2) mit der oberen Werkzeughälfte (3) wird das Keramikrohr (1), durch welches die Fasern gezogen werden, in den eingefrästen Halbschalen der Werkzeughälften eingeklemmt. Wie in der Abbildung 4.10 zu sehen ist, befindet sich an der Stirnfläche des Rohres ein im Aluminium-Werkzeug integrierter Anschlag (6), der das Rohr sicher in Position hält.

Die breite Vertiefung in der Mitte stellt die Mikrowellenkavität (5) dar. Zusammen mit der oberen Hälfte bildet sich der Querschnitt eines WR340 Standard-Hohlleiters. An beiden Seitenflächen des Werkzeugs befinden sich Bohrungen (4) zum direkten Anschluss des Mikrowellengenerators auf der einen Seite und eines Kurzschlusschiebers zur Abstimmung auf der gegenüberliegenden Seite, jeweils über einen Standard WR340 Hohlleiter-Flansch. Gut zu erkennen sind auch die Choke-Filter mit den runden PEEK-Einsätzen (7). Am Ausgang wurde aus Platzgründen, um das Keramikrohr möglichst kurz zu halten, nur ein Filter vorgesehen. Dennoch wurde im Versuch dort keine erhöhte Leckstrahlung gemessen, da die Öffnung am Faserabzug wesentlich kleiner gehalten ist als am Fasereinzug. An der Stelle des Fasereinzugs (hier nicht sichtbar) ist die Eintrittsöffnung im Keramikrohr trichterförmig gerundet, um keine Kanten im Materialfluss zu haben, an welchen sich Harz festsetzen könnte oder die Faser beschädigt würde. Aus demselben Grund wurde darauf geachtet, keine Werkstückübergänge (z.B. Metall-Keramik) im Materialfluss zu haben. Die Fasern verlaufen im Werkzeug bis zu vollständigen Aushärtung komplett in der Keramik.

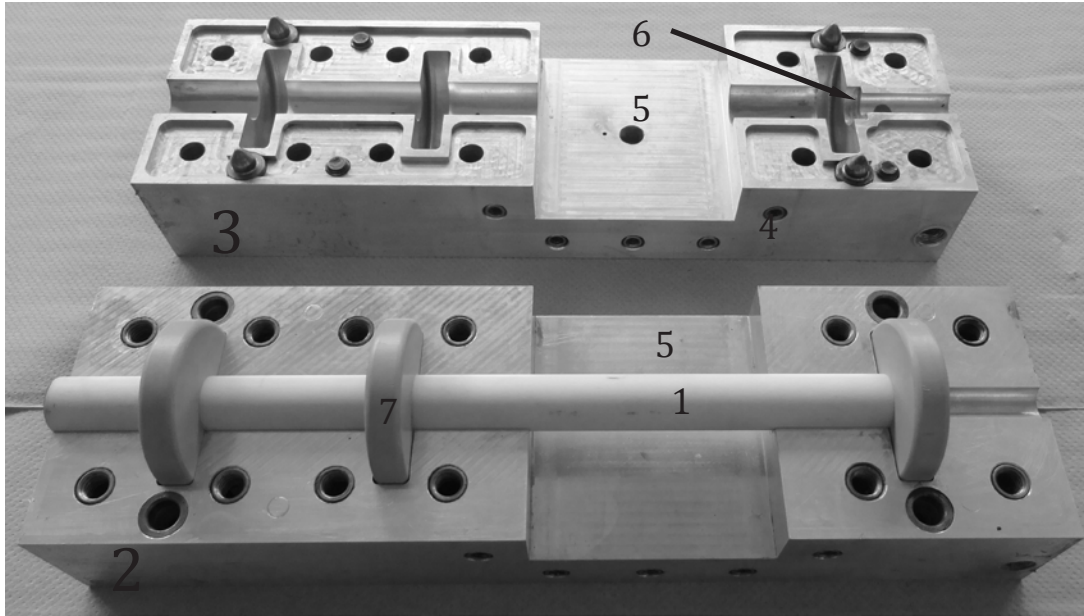


**Abbildung 4.9**

CAD-Modell für das Mikrowellen-Pultrusionswerkzeug (geöffnete Darstellung).

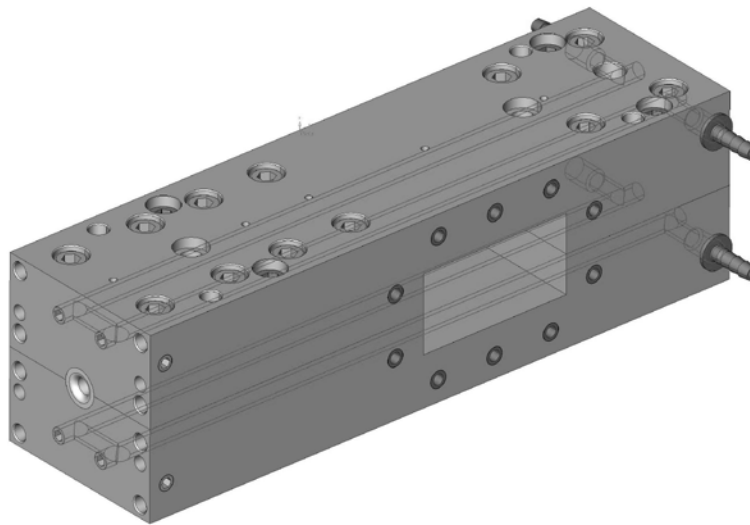
Die obere und untere Werkzeughälfte enthalten außerdem noch Bohrungen für die gegenseitige Verschraubung, Stifte bzw. spezielle Dübel der Firma Maus zur Zentrierung und ein System von Bohrungen zur Durchleitung von Wasser zur Kühlung bzw. Temperierung der Werkzeughälften. Durch die Temperierkanäle (siehe Abbildung 4.11) kann das Werkzeug auf eine definierte Temperatur (z.B. 50°C) erwärmt werden, um die Viskosität des Harzes am Werkzeugeingang und somit die für das Strangziehen notwendigen Zugkräfte ausreichend gering zu halten. Für eine schnelle und gleichmäßige Wärmeverteilung in den Werkzeughälften bestehen diese aus hochfestem Aluminium. Die Erwärmung und Härtung des Rundprofils erfolgt aber durch den abgestimmten Mono- Mode Mikrowellenapplikator. Zur Temperaturüberwachung befinden sich in der oberen Werkzeughälfte (3) mehrere Bohrungen für Temperatursensoren.

Durch den Aufbau des oben dargestellten Werkzeugs auf eine Säulenführung Abbildung 4.12 mit 2 Verschiebeschlitten (2), war es möglich mithilfe eines Drucksensors, welcher an der Stelle (1) montiert wird, kontinuierlich die Abzugskraft zu messen.



**Abbildung 4.10**

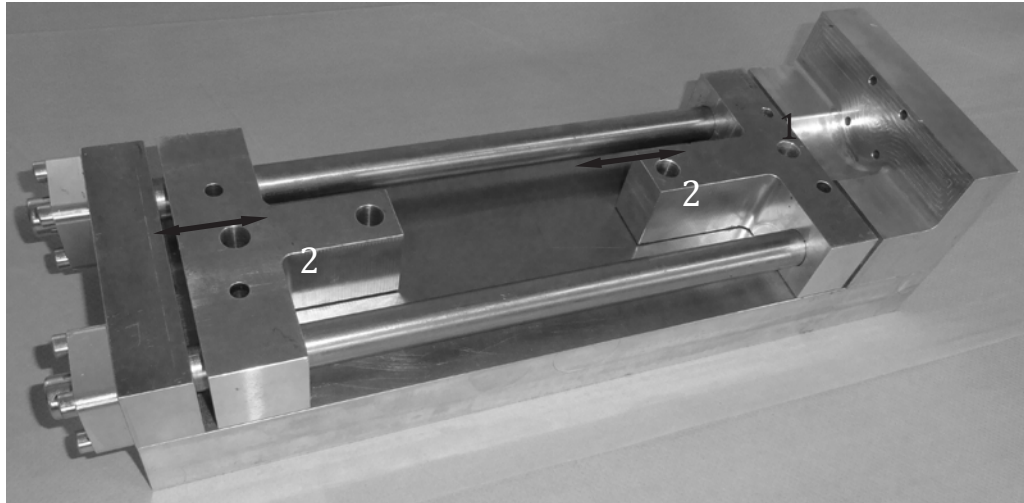
Foto Pultrusionswerkzeug Rund- Profil offen.



**Abbildung 4.11**

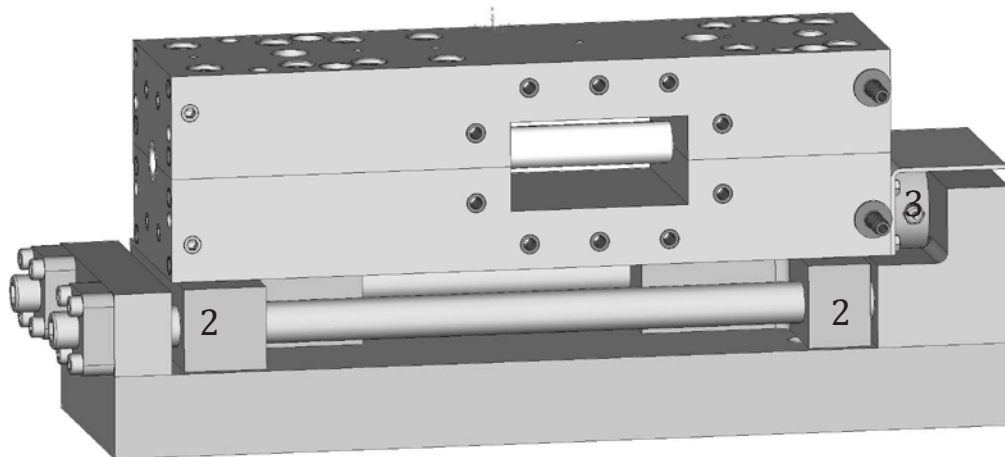
Pultrusionswerkzeug Rundprofil, Darstellung der gebohrten Temperierkanäle.

Ein CAD Modell des kompletten Werkzeuges inclusive des installierten Drucksensors (3) ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Mit Rohren aus Aluminiumoxid der Marke Frialit®99,7hf, welche im Vakuum innenbeschichtet sind, mit einer Maus-Beschichtung auf PTFE- Basis, wurden die geringsten Abzugskräfte benötigt. Darüber hinaus ermöglichte diese Druckmessung im Prozess systematische Untersuchungen, die der Prozessoptimierung dienten und Aufschluss gaben über Harzanhaftungsprobleme im Werkzeug. Außerdem wurden kritische Abzugskräfte ermittelt, welche kurz vor dem Bruch von Keramikeinsätzen auftraten. Auf den Verschiebeschlitten (2) lassen sich all die im Rahmen des Projektes entwickelten Pultrusionswerkzeuge für Rundprofil und U-Profil verschrauben und verstemmen.



**Abbildung 4.12**

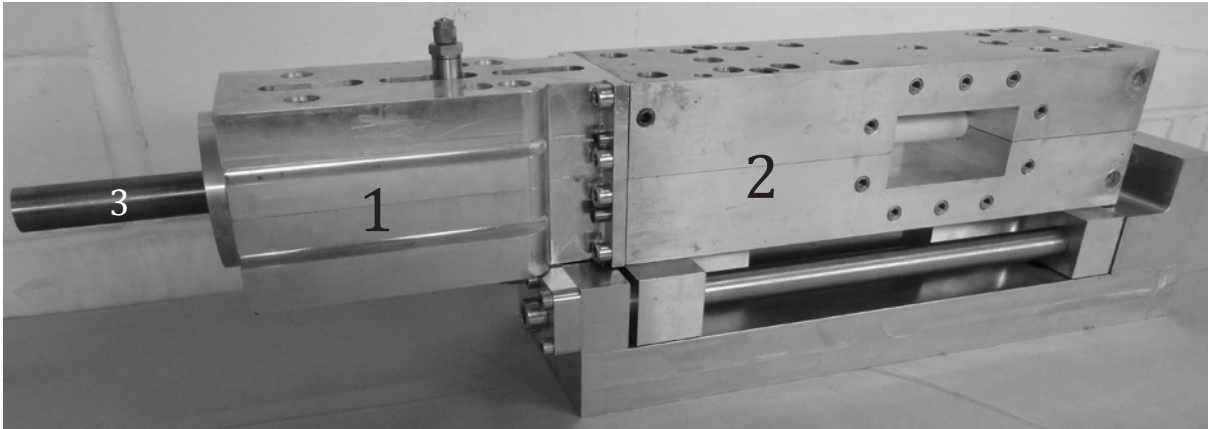
Foto Säulenführung für die mit Mikrowellen beheizten Pultrusionswerkzeuge



**Abbildung 4.13**

Darstellung Pultrusionswerkzeug Rundprofil auf Säulenführung

Bei den ersten Versuchen zur Pultrusion mit Beheizung durch Mikrowellen wurden Rovings im Harzbad benetzt und über eine Fadenführung in das Pultrusionswerkzeug Rundprofil geführt. Um immer frisch gemischtes Harz zu verarbeiten, den Arbeitsaufwand zu verringern und Harz zu sparen wurde eine Harzinjektionseinheit (1) (siehe Abbildung 4.14) für das Pultrusionswerkzeug Rundprofil (2) konstruiert und hergestellt. Es wurden verschiedene Einsätze (3) für die Harzinjektionseinheit getestet. Die Einsätze sind mit der Maus-Beschichtung auf PTFE-Basis innenbeschichtet, was die Reinigung der Einsätze sehr erleichtert hat. Die Abbildung zeigt den Aufbau, mit welchem die besten Ergebnisse erzielt wurden. Allerdings führte die Imprägnierung im Harzbad zu einer günstigeren Harzverteilung im pultrudierten Rundprofil, weshalb spätere Versuche ohne Harzinjektionseinheit, mit Imprägnierung im Harzbad durchgeführt wurden.



**Abbildung 4.14**

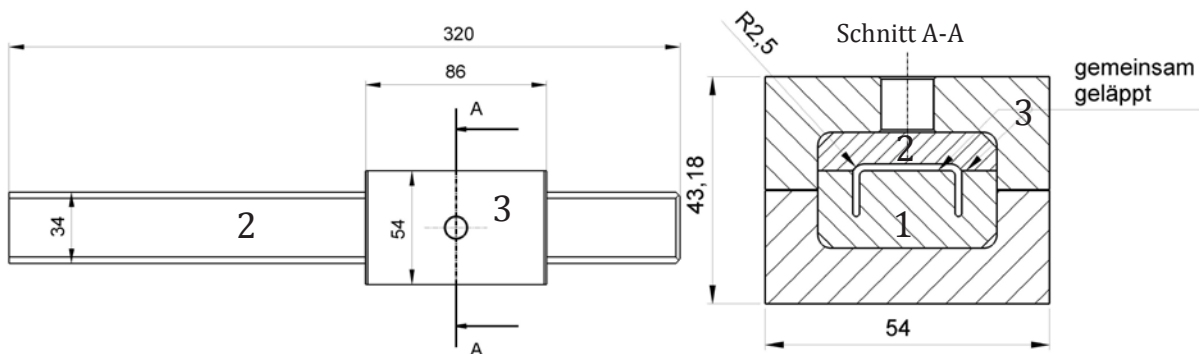
Foto Pultrusionswerkzeug Rundprofil auf Säulenführung mit Harzinjektionseinheit

#### 4.1.1.2.2 Pultrusionswerkzeug U-Profil mit Keramikeinsätzen

Da sich die Aluminiumoxid- Keramik Frialit® 99,7hf bereits im Rundprofilwerkzeug bewährt hat, sind auch die Einsätze für das Pultrusionswerkzeug U-Profil aus diesem Werkstoff hergestellt. Allerdings können die Einsätze für das Pultrusionswerkzeug U-Profil nicht, wie die rohrförmigen Einsätze für das Rundprofil extrudiert werden. Auch wegen der höheren Belastung eines zweiteiligen Werkzeugs, in Verbindung mit dem viel größeren Umfang des Profils, wurden die Keramikeinsätze für das U-Profil Werkzeug aus isostatisch gepressten Grünkörpern herausgearbeitet, unter Berücksichtigung des Sinterschrumpfes. In die gesinterten Werkzeugeinsätze wurden anschließend durch Bürsten und Schleifen das endgültige U-Profil eingearbeitet. Die Trennflächen wurden geläpft.

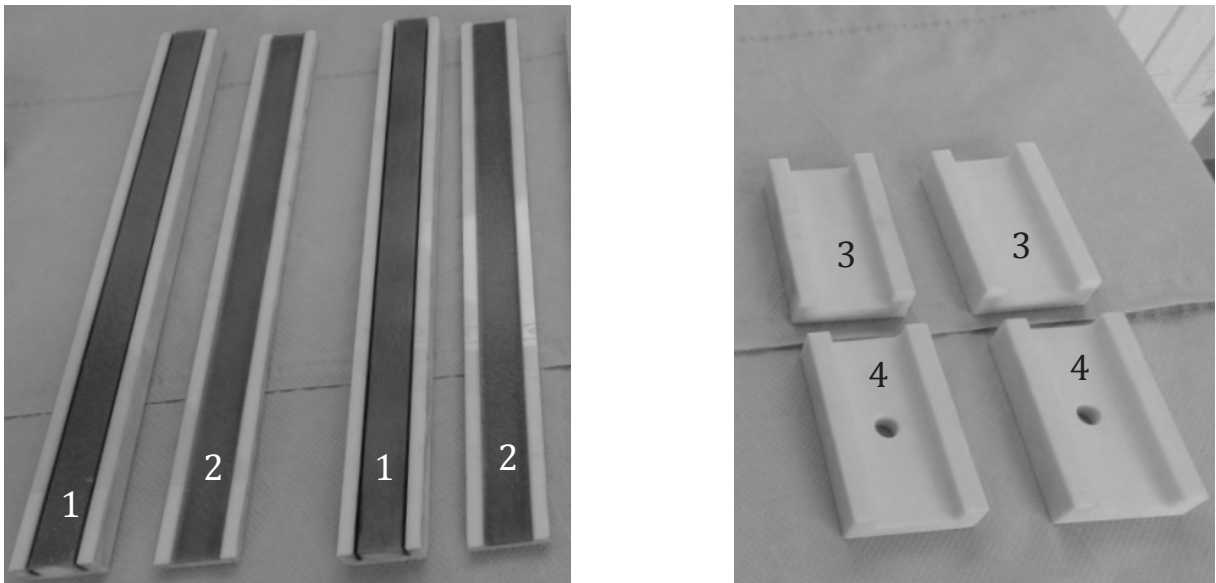
Damit die unteren U-Profil Einsätze (1) und die oberen (2) im Bereich der Mikrowellendurchführung gestützt werden und nicht brechen, mussten Klammern (3) hergestellt werden, welche ebenfalls aus Frialit® 99,7hf bestehen.

Die Flächen der U- Profil Einsätze sind mit der gleichen Maus-Beschichtung auf PTFE- Basis im Vakuum beschichtet, wie die Rundprofil Einsätze. Die Trennflächen und die Außenflächen der Einsätze wurden vor dem Einbrennen der Beschichtung gereinigt und sind daher unbeschichtet. Abbildung 4.16 zeigt die Vakuumbeschichteten U-Profil Einsätze (1) und (2), sowie die im Wellenleiter zur Abstützung notwendigen Keramikklammern-Unter- (3) und Oberteile (4).



**Abbildung 4.15**

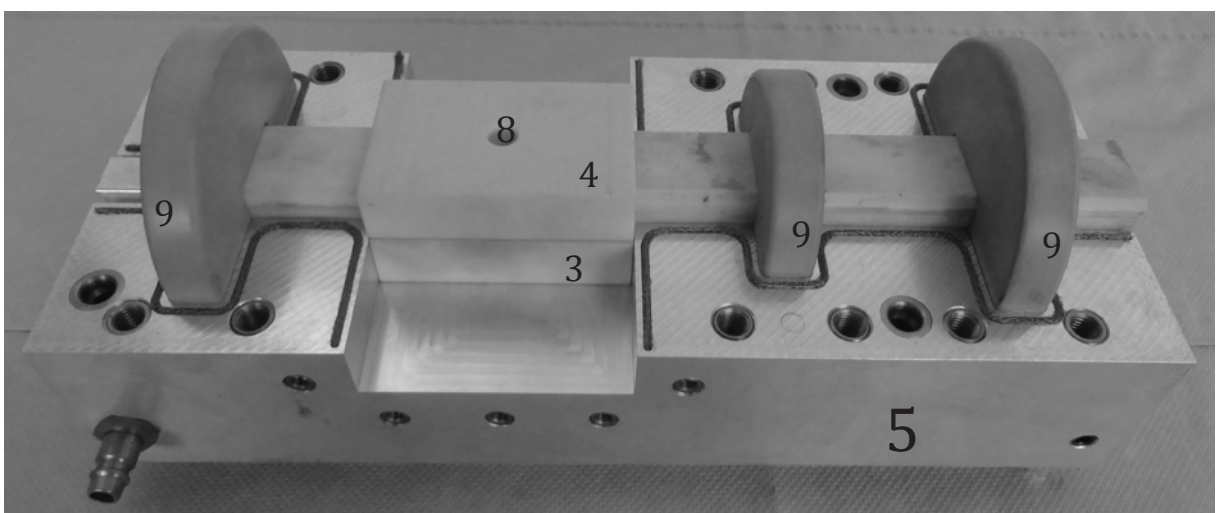
Teilung der Keramik-Einsätze für das U- Profil Werkzeug



**Abbildung 4.16**

Mit PTFE vakuumbeschichtete U- Profil Einsätze (links) und Klammern für U- Profil Einsätze (rechts)

Für die U- Profil Einsätze wurde ein Aluminiumwerkzeug konstruiert, welches auf der vorhandenen Säulenführung Abbildung 4.12 montiert werden kann, damit wie beim Rundprofil-Werkzeug die Abzugskräfte gemessen werden können. Abbildung 4.17 zeigt die erste Ausführung des U- Profil Pultrusionswerkzeuges. Die Mikrowellenfilter zur Vermeidung von Mikrowellenleckstrahlung oberhalb der zulässigen Grenzwerte wurden, wie in Kapitel 4.1.1.1.2 beschrieben mit entsprechend abgestimmten PEEK-Scheiben (9) realisiert. Um den Druck der oberen Werkzeughälfte (6) auf die Einsätze aus Frialit® 99,7hf sicher zu stellen, ist zwischen den Werkzeughälften im verschraubten Zustand ein Spalt von ca. 0,1 mm. Um trotz dieses Spaltes für ausreichend Strahlungssicherheit zu sorgen, ist zusätzlich in die untere Werkzeughälfte (5) ein Edelstahl- Abschirmband in einer dafür vorgesehenen Nut eingebracht. Die Verschraubung für den Mikrowellenhohlleiter entspricht der des Rundprofil- Werkzeugs ebenso wie die Anordnung der Temperierkanäle in der unteren (5) bzw. oberen (6) Werkzeughälfte.

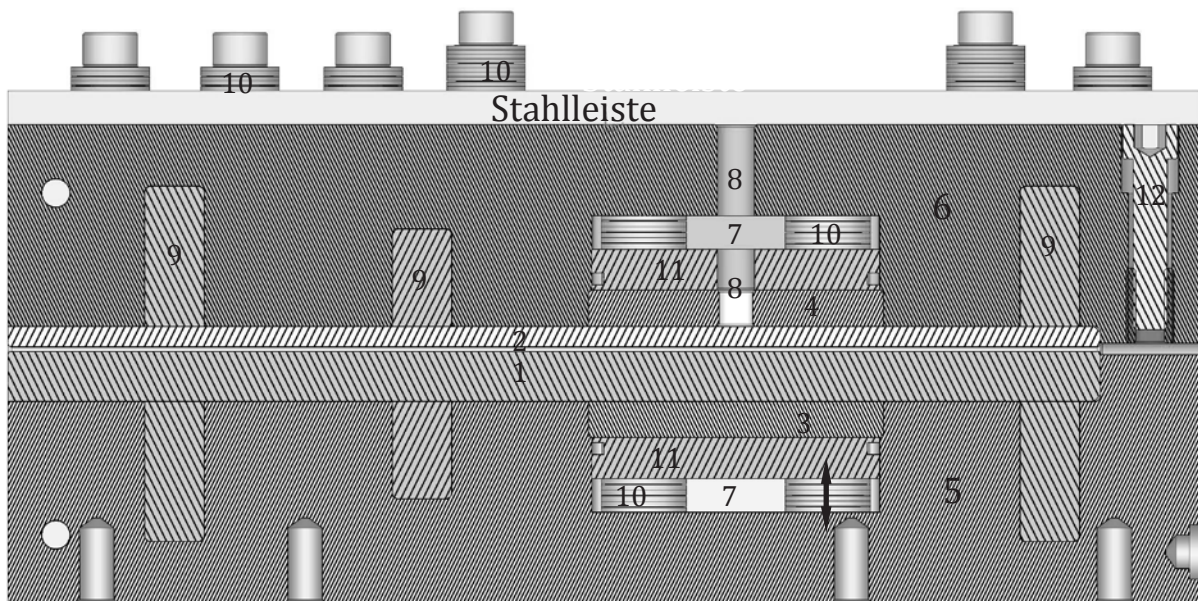


**Abbildung 4.17**

Pultrusionswerkzeug U- Profil ohne Obere Werkzeughälfte

Um einen gleichmäßigeren, definierten Druck auf die Keramikeinsätze zu erreichen, wurde das Werkzeug mit Tellerfedern für die untere Klammer (3) und die obere Klammer (4) sowie für die Verschraubung des Werkzeugs ausgestattet. Dazu wurden in beide Werkzeughälften Vertiefungen (7) eingefräst (siehe Abbildung 4.18), in der Tellerfedern (10) auf Passstiften sitzen und über Druckplatten (11) mit Edelstahl-Abschirmband auf die untere bzw. obere Keramikklammer (3,4) drücken. Auf der Oberseite befinden sich Tellerfedern (10), welche einen definierten Druck auf die Verschraubung ausüben. Hierbei wirken die Kräfte der Tellerfedern (10) unter den Druckplatten (11) den Tellerfedern unter den Verschraubungen entgegen. Daher sind unter den 4 Schrauben rund um den Wellenleiterquerschnitt jeweils doppelt so viele Tellerfedern, wie unter den anderen Schrauben. Mit diesem Schraubkonzept Konzept wird eine geschätzte Gesamtschließkraft von ca.48 kN (4,9 t) erreicht.

Durch die hohen Anforderungen an die Oberflächen und die Präzision der Einsätze sind solche Werkzeuge auf keramischer Basis sehr kostenintensiv und könnten eine mögliche Markteinführung aufgrund der dadurch bedingten geringeren Wirtschaftlichkeit gefährden. Daher wurde das U- Profil Werkzeug weiter modifiziert und zuletzt mit Einsätzen aus Stahl im Ein- und Auslaufbereich sowie aus mikrowellentransparentem PTFE im Wellenleiterbereich ausgestattet (Abbildung 4.19). Hier sind die Stahleinsätze (3) auf der Einzugsseite mit jeweils 2 Rippen (4) versehen, wodurch die Einsätze in den Aussparungen für die PEEK-Filter verankert werden können (5). Weil die Stahleinsätze für Mikrowellen undurchlässig sind und die leitfähigen Karbonfasern nun nicht mehr durch einen Keramikeinsatz gegenüber dem Gehäuse isoliert sind, sollte das Werkzeug ausreichend mikrowellendicht sein, so dass man auf die bisher genutzten PEEK Filter verzichten kann.

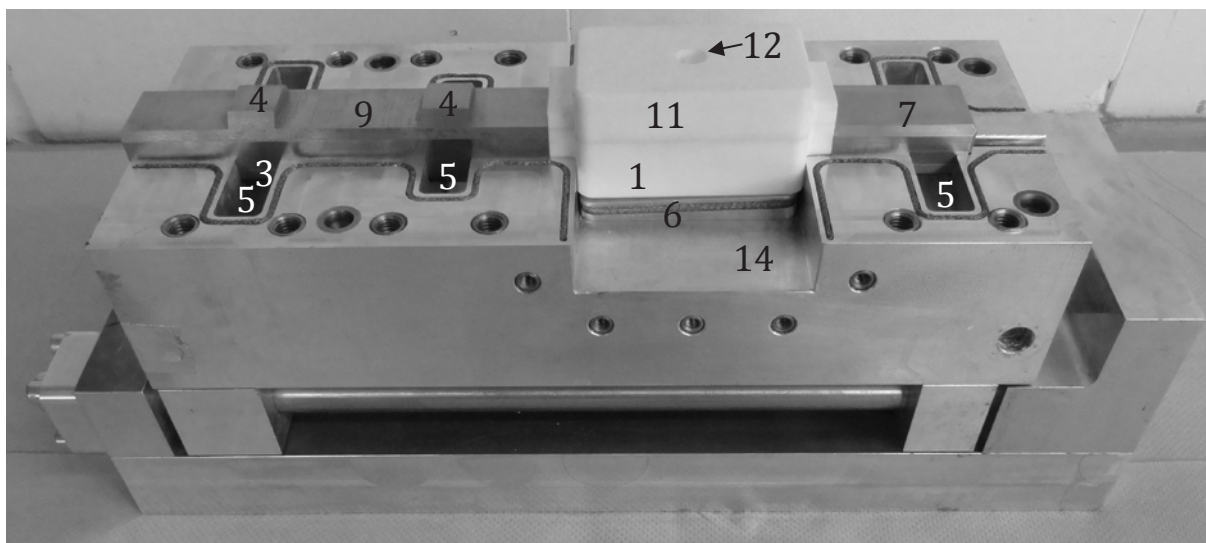


(1) Unterer und oberer (2) U-Profil- Einsatz aus Frialit® 99,7hf, (3) untere und obere (4) Klammer aus Frialit® 99,7hf, (8) Bohrung für Temperatursensor, (9) Choke-Filter aus PEEK, (11) Druckplatte, (12) Abdrückschraube

#### Abbildung 4.18

Schnittdarstellung Pultrusionswerkzeug U-Profil mit Tellerfedern



**Abbildung 4.19**

Pultrusionswerkzeug U-Profil mit Stahl und PTFE-Einsätzen

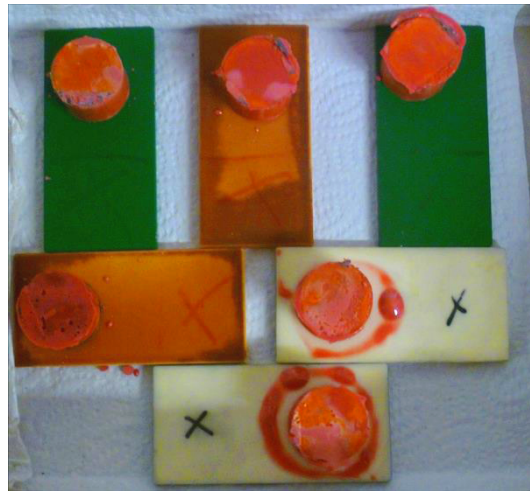
Daher konnten die dafür vorgesehenen Räume für die Fixierung der Stahleinsätze genutzt werden. Die Tellerfedern hinter den Druckplatten im Wellenleiter wurden gegen Schraubenfedern getauscht, die eine reduzierte Andruckkraft von ca. 4x90N zur Verfügung stellen, um eine plastischen Verformung der PTFE-Einsätze durch den zu hohen Druck der Tellerfedern zu vermeiden. Die Stahleinsätze auf der Abzugsseite (7) nutzen den gleichen Anschlag wie zuvor die Einsätze aus Frialit® 99,7hf (siehe Abbildung 4.19). Die PTFE-Einsätze (10,11) sind im Wellenleiter mit Hilfe von kurzen Auskragungen in den Ein- bzw. Auslaufbereich verankert. Die Oberseite ist mit einer Sacklochbohrung (12) für die Temperaturmessung versehen. Der PTFE-Einsatz hat hier aufgrund der geringen mechanischen Stabilität weniger eine formgebende Funktion als vielmehr eine Dichtungsfunktion, um zu vermeiden, dass das erwärmte niedrigviskose Harz in den Wellenleiter (14) eindringt und dort Problemen verursacht. Die obere Werkzeughälfte ist mit der unteren Werkzeughälfte (1), wie bei dem Pultrusionswerkzeug mit keramischen U-Profil-Einsätzen, mit Tellerfedern verschraubt.

Leider war die Werkzeugmodifikation mit Stahl und PTFE-Einsätzen vor Projektende nicht mehr rechtzeitig fertigzustellen, um noch getestet zu werden. So stehen diese Versuche noch aus und sind auch nach Projektende noch fest eingeplant. Bei positivem Ausgang, könnte dies vielversprechende Entwicklungen nach sich ziehen.

#### 4.1.2 Optimierung der verwendeten Harze

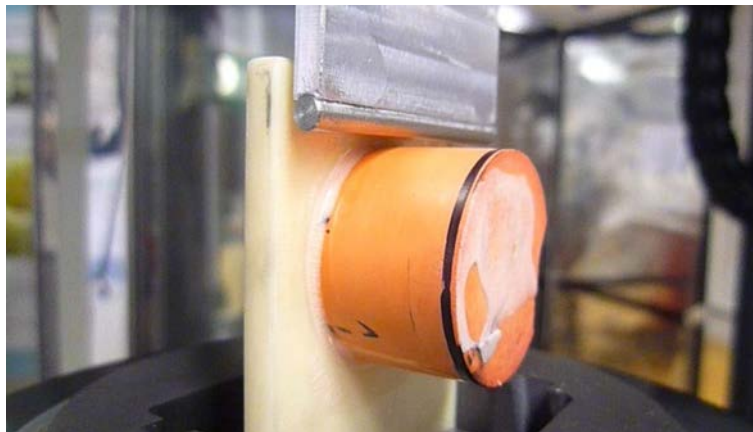
Um aus den gezogenen CFK Profilen, wie vorgesehen, über anschließende Pyrolysen und Infiltrationsprozesse CFC in möglichst hohen Dichten herzustellen wurde für das Strangziehen Phenolharz benutzt, das diese Harz bei der Pyrolyse eine hohe Kohlenstoffausbeute gewährleistet. Das verwendete Harz EPONOL™ type 2509 wurde von dem assoziierten Partner Momentive bereitgestellt ebenso der dafür notwendige Härter EPONOL™ 2501/B. Um das Problem der Harzanhaftung im Werkzeug zu vermeiden, wurde zusätzlich ein internes Trennmittel vom Typ INT-1850HT von AXEL Plastic, USA eingesetzt. In dieser Zusammensetzung werden in den Produktdatenblättern Werkzeugtemperaturen im Bereich von 180 bis 200 °C empfohlen und eine Zuggeschwindigkeit, die in etwa der beheizten Werkzeuglänge pro Minute entspricht.

Zur Untersuchung der Haftungseigenschaften zwischen dem Phenolharz und dem Werkstoff des Pultrusionswerkzeuges wurden spezielle Versuche mit Hilfe einer Prüfmaschine durchgeführt. Dazu wurden definierte Phenolharz-Zylinderproben mit 30 mm Durchmesser mit unterschiedlichen Anteilen an internem Trennmittel gegossen und ausgehärtet. Nach dem Entformen wurde die Oberfläche der Klebeseite der Proben mechanisch plan gedreht. Anschließend wurden die Proben mit dem gleichen Phenolharzansatz auf Platten unterschiedlicher keramischer Werkstoffe geklebt (Abbildung 4.20). Nach dem Kleben bei Raumtemperatur, wurden die Proben 4 Stunden bei 80°C getempert und über 24 Stunden auf Raumtemperatur abgekühlt. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Phenolharz ( $\alpha_{\text{Phenol}} = 20 - 30 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) und Rubalit ( $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 6,5 - 8,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) trennen sich die Proben von der Rubalitplatte. Für die weitere Probenherstellung wurde auf das Tempern verzichtet. Dafür wurde die Aushärtezeit des Klebstoffs bei Raumtemperatur auf 3 Tage verlängert.



**Abbildung 4.20**

Phenolharz-Probekörper mit Phenolharz auf unterschiedlich beschichtete keramische Substratplatten geklebt

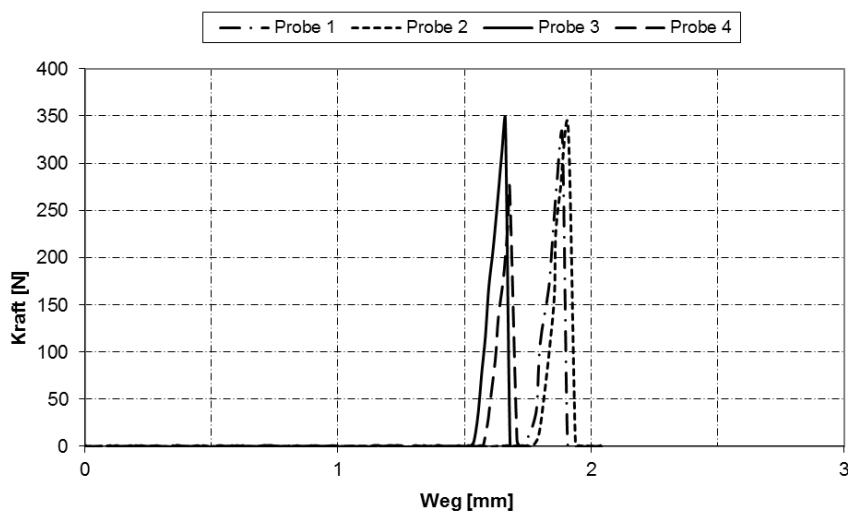


**Abbildung 4.21**

Probekörper aus Phenolharz auf eine unbeschichtete Substratplatte geklebt, eingespannt in eine Prüfmaschine mit Druckstempel

Anschließend wurden die Platten senkrecht stehend in eine Prüfmaschine eingespannt, so dass die aufgeklebten Phenolharzproben radial in einem Abstand von 2 mm von den Platten auf Scherung durch den Druckstempel belastet wurden. Dieser Versuchsaufbau sollte die Scherbelastung des Pultrudats im Werkzeug abbilden. Die Proben wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min geprüft, dabei ergab sich eine mittlere Scherkraft von  $321,5 \text{ N} \pm 28,64 \text{ N}$  (siehe Abbildung 4.22).

Als Konsequenz aus diesen Ergebnissen wurden spezielle temperaturbeständige Beschichtungen auf Basis von PEEK und PTFE entwickelt und auf die keramischen Substrate aufgebracht. Damit war es gelungen das Anhaften des Phenolharzes auf den Substratplatten komplett zu unterbinden.



**Abbildung 4.22**

Ergebnisse der Prüfmaschine für Phenolharz-Probekörper auf unbeschichteten Substratplatten

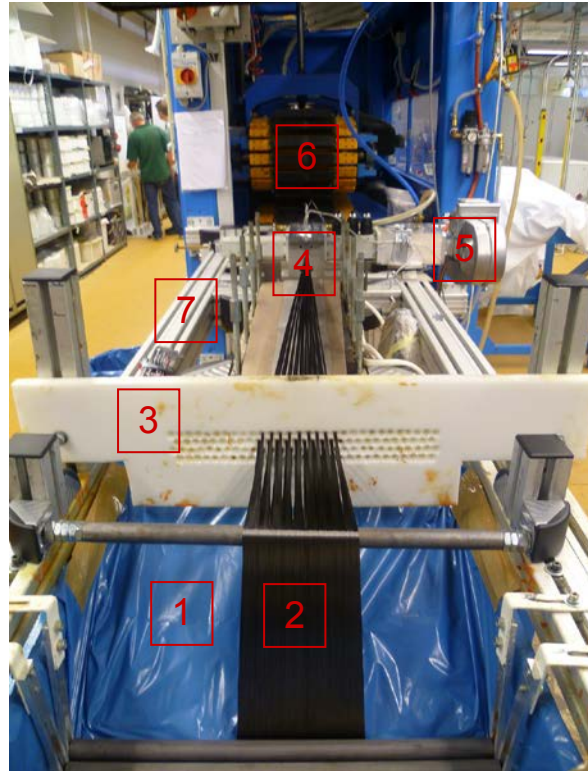
### 4.1.3 Prozessoptimierung

Mit den entwickelten Pultrusionswerkzeugen wird der Pultrusionsprozess hinsichtlich Ziehgeschwindigkeit und Faser-Volumen-Gehalt optimiert

#### 4.1.3.1 Aufbau der Pultrusionslinie

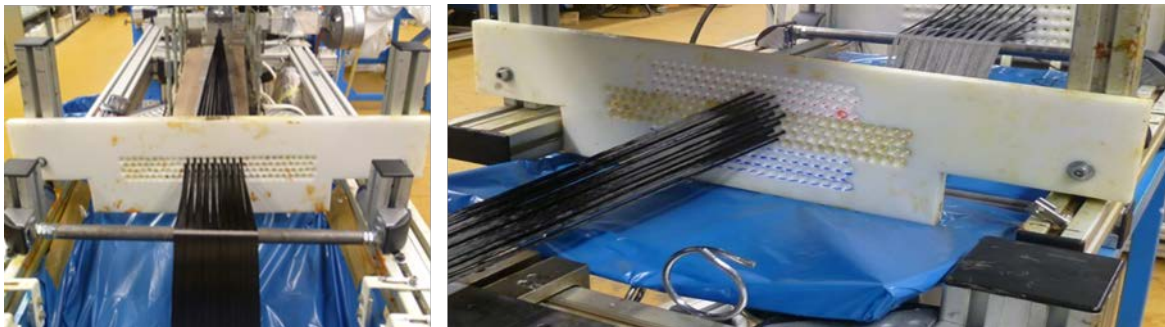
Am ITV Denkendorf wurde eine bestehende, konventionelle Pultrusionsanlage für den Einsatz des in Kapitel 4.1.1 beschriebenen, mit Mikrowellen beheizten Werkzeuges umgebaut. Dafür wurde das elektrisch beheizte Werkzeug entfernt und neue Befestigungspunkte für das mit den notwendigen Mikrowellenkomponenten bestückte Werkzeug geschaffen (siehe Abbildung 4.23). Für die Pultrusionsversuche wurde 36 Carbonrovings vom Typ 24K (1650 tex) der Qualität Torayca T 700 S auf ein geeignetes Spulengatter installiert. Durch, für das angestrebte Profil optimierte Fadenführungselemente (siehe Abbildung 4.24) wurde die Rovings so in das Werkzeug eingeführt, um eine möglichst gleichmäßige Filamentverteilung im hergestellten CFK Profil zu erlangen. Eine exakte Justierung der Fadenführungselemente im Bezug zur Werkzeugachse und der Achse des Raupenabzuges ist erforderlich, um möglichst gerade Endlosprofile ziehen zu können.

Für die Imprägnierung der Kohlefaserfilamente wurden die Rovings mit Hilfe der Fadenführungselemente und Umlenkwalzen durch eine mit Phenolharz gefüllte Wanne geführt. Dieses Konzept ist einfach und bewährt, hat aber ein paar entscheidende Nachteile. Zum einen ist es ein offenes System, sodass aus Gründen der Arbeitssicherheit für eine ausreichende Luftabsaugung über der Harzwanne zu sorgen ist. Zum anderen nimmt die Viskosität des Harzes mit zunehmender Prozesszeit aufgrund der begrenzten Topfzeit stetig zu, was zu wachsenden Abzugkräften führt mit zunehmender Gefahr von Faserstau und Faserbruch im Werkzeug.



**Abbildung 4.23**

Mikrowellen-Pultrusionsanlage mit: Harzbad (1); Carbonrovinge (2); Fadenführungsplatten (3); Pultrusionswerkzeug (4); Mikrowelle (5); Raupenabzug (6); Gestell zum Fixieren des Werkzeugs (7)

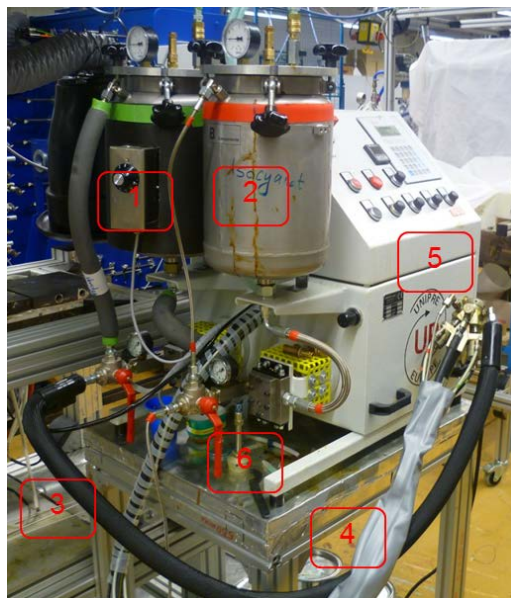


**Abbildung 4.24**

Faserführungsplatte vor dem Einlauf in das Pultrusionswerkzeug, links: anfängliche Ausführung (Blick in Abzugsrichtung) rechts: neue Ausführung (Blick gegen Abzugsrichtung)

Um das Problem der gesundheitsschädlichen Emissionen zu lösen, wurde versucht, gegen Ende der Projektlaufzeit das Werkzeug durch ein geschlossenes Harzinjektionsmodul (siehe Abbildung 4.14) zu ergänzen. Leider führte diese im Vergleich zu der Imprägnierung mit der Harzwanne zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen, So konnte damit keine gleichmäßige Imprägnierung erreicht werden. Aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit war die Möglichkeit, das vielversprechende Konzept weiter zu verbessern und zu optimieren, leider nicht gegeben. Das Problem der begrenzten Topfzeit des Harzes mit sich stetig verändernder Viskosität wurde durch den Einsatz einer Harzmisch- und Dosieranlage (siehe Abbildung 4.25) gelöst. Diese Anlage war dazu an die Anforderungen des Phenolharzes bzw. Pultusionsexperimen-

tes anzupassen. Zum genaueren Einstellen des Mischungsverhältnisses von Harz und Härter bei der erforderlichen geringen Dosisleistung waren geeignete Dosierpumpe einzubauen. Dadurch wurde ebenfalls eine genaue Einstellung der Injektionsmenge in das Pultrusionswerkzeug möglich.

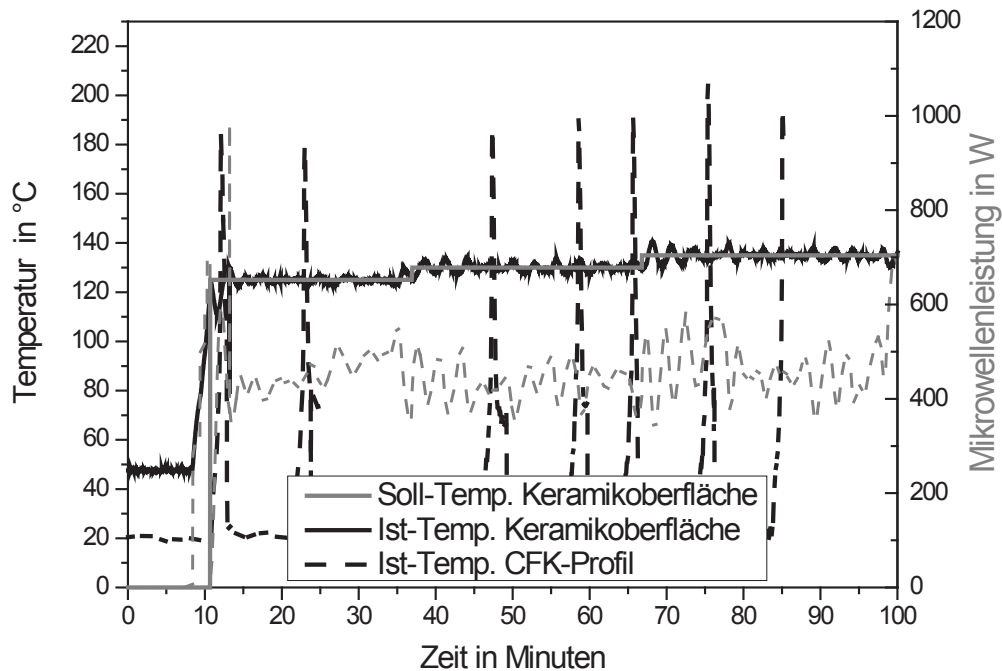


**Abbildung 4.25**

Zweikomponenten Harzmisch- und Dosieranlage mit Behälter A, beheizbar, Fassungsvermögen 10 Liter (1); Behälter B, nicht beheizbar (2); Beheizbarer Schlauch zur Förderung des Harzes (3); Schlauch zur Förderung des Härters (4); Mischkopf, zur Mischung der zwei Komponenten (5); Zahnrad-Dosierpumpe (6)

#### 4.1.3.2 Versuchsdurchführung

Mit der in Kapitel 4.1.3.1 aufgebauten und auf das Mikrowellenwerkzeug bzw. auf das zu ziehende Profil angepasste Pultrusionsanlage am ITV wurde systematische Versuchsreihen durchgeführt. Neben der im vorherigen Kapitel beschriebenen Variationen der Harzimprägnierung wurden Prozessparameter, wie die Zuggeschwindigkeit, Faservolumenanteil sowie Prozess Temperatur variiert. Da mit dieser mikrowellenunterstützten Technologie nicht das Werkzeug sondern nur die harzgetränkten Fasern geheizt werden, ist es kaum möglich, die reale Temperatur des Pultrudates im Werkzeug zu bestimmen. Ersatzweise wurde die Temperatur an der Außenoberfläche des Keramikwerkzeuges im Bereich des stärksten Mikrowellenfeldes gemessen. Um das Mikrowellenfeld durch die Temperatursensorik nicht zu stören, wurden für die Temperaturmessung sowohl Pyrometer als auch faseroptische Temperatursensoren eingesetzt. Die so gemessene Temperatur wurde mit Hilfe einer LabView-basierten Software und einer PID Regelschleife auf zuvor definierte Zieltemperaturen eingeregelt. Dabei war zu beachten, dass von dem mikrowellengeheizten Pultrusionsprofil zu der Keramikoberflächen signifikante Temperaturgradienten bestehen, weshalb die Zieltemperaturen auf deutlich niedrigeren Niveaus liegen müssen, als die von Harzhersteller empfohlenen Aushärtetemperaturen von 180°C bis 200°C. Zur Verifikation, bei welchen Regeltemperaturen tatsächlich die notwendige Härtetemperatur im Pultrusionsprofil erreicht werden, wurde während mancher Versuche ein Thermoelement mit in den Stab einverleimt und durch das Werkzeug gezogen. Dies erlaubt es direkt die Temperatur im Kern des Kohlefaserstabs während des Prozessierens aufzuzeichnen.

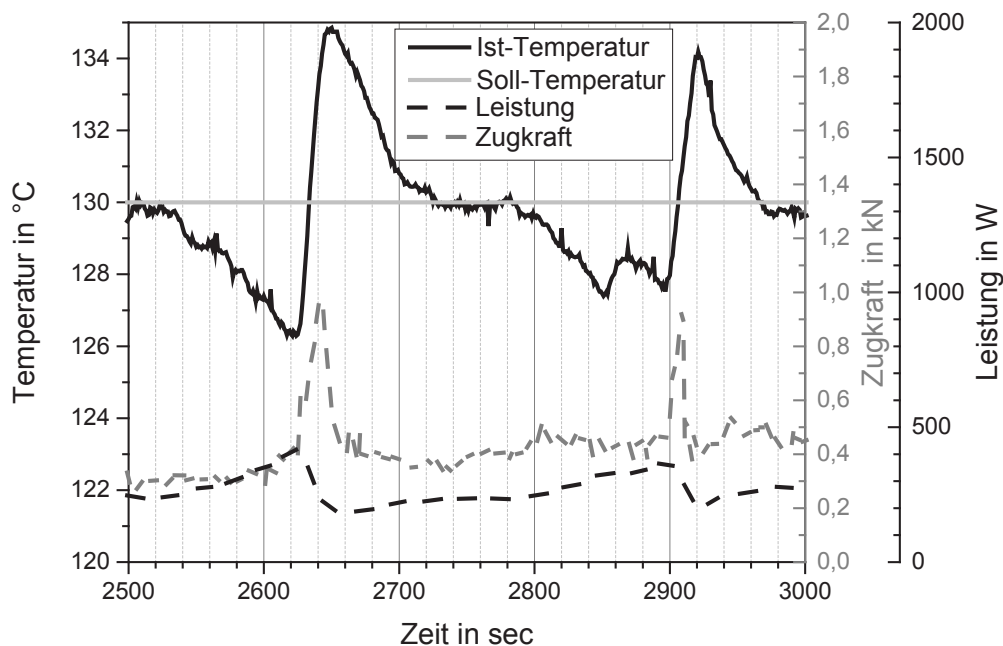


**Abbildung 4.26**

Zeitlicher Verlauf der gemessenen Temperaturen auf der Werkzeugoberfläche und im Kern des CFK Profils. Zusätzlich eingezeichnet sind die Solltemperatur (125°C – 135°C) und die Mikrowellenleistung (grau gestrichelt).

Abbildung 4.26 zeigt typische gemessene Temperaturverläufe während eines Versuchs, bei dem in zeitlich regelmäßigen Abständen, zusätzlich zu der räumlich festen Temperaturerfassung, Temperatursensoren im Kern des Faserbündels durch das Werkzeug mitgeführt werden. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur der Werkzeugoberfläche der Sollwertvorgabe weitgehend folgt. Da die im Rundstab eingelegten Thermolemente sich mit dem Stab mitbewegen, weist deren Temperatur einen Spitzenwert im Bereich von 180°C bis 200°C auf, immer dann wenn ein Thermolement durch die Mikrowellenkavität läuft.

Bei unbeschichteten Werkzeugen, in den hin und wieder Harzanhaftungen zu Problemen führen macht sich der Beginn solcher Probleme im Allgemeinen durch einen kontinuierlichen Abfall der Temperatur aufgrund des schlechter werdenden Wärmeüberganges bemerkbar (siehe Abbildung 4.27). Dies wiederum versucht die Regelung durch eine stetig steigende Mikrowellenleistung auszugleichen was das Harzanhaftungsproblem noch weiter verstärkt bis sich ein starker Anstieg der Zugkräfte bemerkbar macht. In einigen Fällen führte dies am Ende zu einem Faserstau und im schlimmsten Fall zu einem Werkzeugbruch. In den meisten Fällen löst sich die Harzanhaftung im Werkzeug jedoch wieder, die Zugkraft fällt auf Normalwerte zurück und der Wärmeübergang vom CFK Profil zum Werkzeug normalisiert. Letzteres sorgt für einen Anstieg der Temperatur über den Sollwert hinaus ansteigt was jedoch über den Regler wieder ausgeglichen wird, bis das ganze Spiel nach einiger Zeit wieder von neuem beginnt.



**Abbildung 4.27**

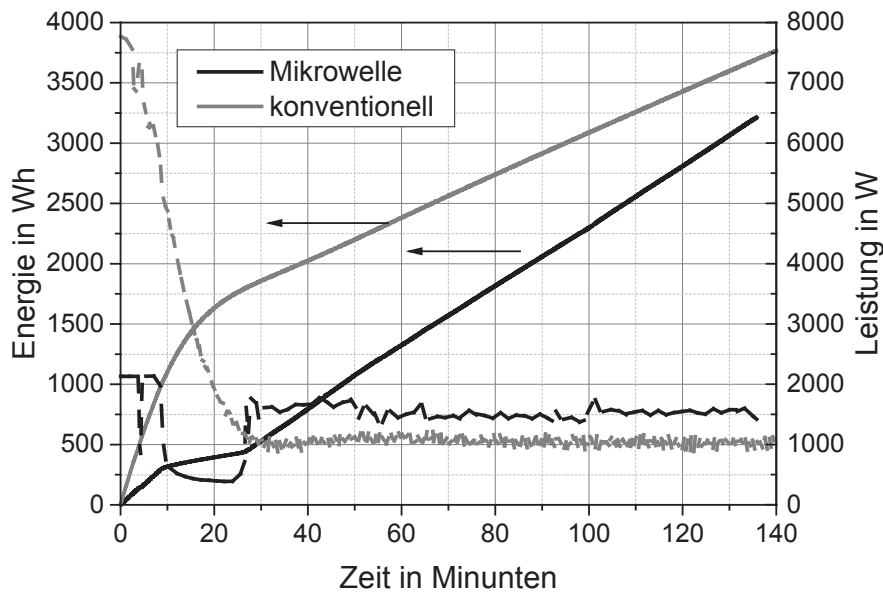
Verlauf der gemessenen Temperaturen auf der Werkzeuoberfläche in Verbindung mit der ermittelten Zugkraft und dem Bedarf an Mikrowellenleistung in einem Betriebszustand mit Harzanhaftungsproblemen.

Durch umfangreiche Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Werkzeugmaterialien und Beschichtungsmethoden, der Regelparameter sowie der Harzimprägnierung konnten bis zum Projektenden mit diesem Applikator deutlich mehr als 100 m Rundstab mit Zuggeschwindigkeiten bis hin zu ca. 25 cm/min erfolgreich pultrudiert werden, ohne dass es Qualitätsmängel oder Beschädigung am Werkzeug gab. Versuche mit höheren Geschwindigkeiten bis hin zu 45 cm/min führten jedoch trotz zeitweise akzeptabler Profilqualität nach einigen Metern im Allgemeinen zum Werkzeugversagen.

#### 4.1.3.2.1 Energiemessungen

Zur Beurteilung der Energieeffizienz wurde während eines Versuches die Energieaufnahme aus dem Stromnetz gemessen und mit entsprechenden Messungen an einem konventionell geheizten Werkzeug für Rundstäbe verglichen. Allerdings war hierfür nur ein Werkzeug für Profile mit nur 6 mm im Durchmesser verfügbar und die geheizte Länge des konventionellen Werkzeuges war mit mehr als 40 cm deutliche länger als im mit Mikrowellen geheizten Fall, wo nur über eine Strecke von 8 cm geheizt wird.

Abbildung 4.28 zeigt die Energieaufnahme des Mikrowellenapplikators für das 9 mm Rundstab-Werkzeug. Nach dem Einschalten findet zunächst eine Vorwärmung des Werkzeuges auf 50°C statt. Diese ist wichtig, um die richtige Viskosität des Harzes am Werkzeugeingang zu gewährleisten. Im stationären Pultrusionsbetrieb steigt die aufgenommene Energie linear an. Die Steigung entspricht der aufgenommenen elektrischen Leistung und beträgt hier für den untersuchten Beispielprozess 1440 W.



**Abbildung 4.28**

Energie- bzw. Leistungsaufnahme des konventionell (6 mm; 18 cm/min) und mit Mikrowellen (9 mm; 21 cm/min) beheizten Werkzeuges.

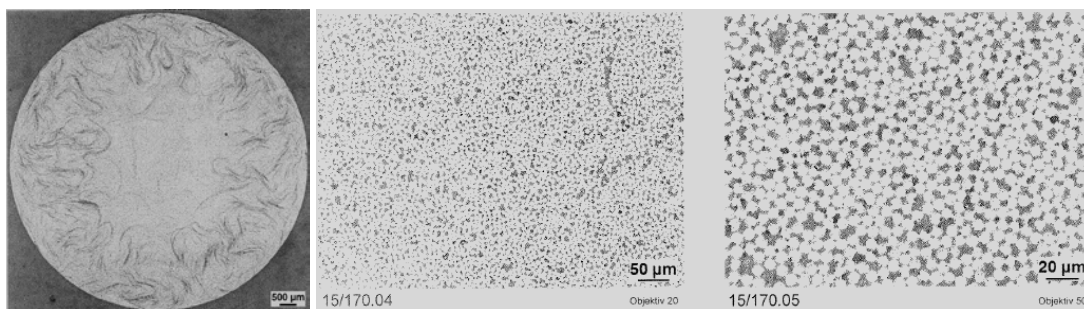
Ebenso ist in Abbildung 4.28 die gleiche Messung für das konventionell beheizte Werkzeug für eine 6 mm Rundprofil zu finden. Hier muss eine viel größere Masse auf eine höhere Temperatur erwärmt werden. Daher benötigt das Werkzeug während der Aufwärmphase mehr Energie. Im stationären Betrieb sind die Steigung und damit auch die Leistungsaufnahme geringer. Dies ist auf den höheren Wirkungsgrad der konventionellen Heizung zurückzuführen.

Die Mikrowelle ist damit vom Energiebedarf vor allem dann günstiger, wenn der Prozess häufige Abkühl- und Aufheizphasen enthält. Auch ist die auf die beheizte Werkzeuglänge bezogene Zuggeschwindigkeit bei der Mikrowelle um ein Vielfaches höher, da die Wärme schneller eingebracht werden kann.

#### 4.1.4 Charakterisierung der hergestellten Profile

Die hergestellten Pultrusionsrundprofile wurden auf ihren Vernetzungsgrad hin mittels DSC-Analyse untersucht, welche eine vollständige Vernetzung durch das Mikrowellenfeld bestätigte. Die maximale Temperatur in den Profilen betrug hierbei 185°C. Zusätzlich wurden Schliiffuntersuchungen durchgeführt an welchen mittels einer Gauwertanalyse der Faservolumengehalt bestimmt wurde. Der angestrebte Faservolumengehalt von 55% wurde mit den durchschnittlich gemessenen 57% nahezu erreicht. Wie in Abbildung X bis x zu erkennen, besitzen die pultrudierten Rundprofile eine gleichmäßige Faser/ Matrixverteilung mit geringer Porosität.

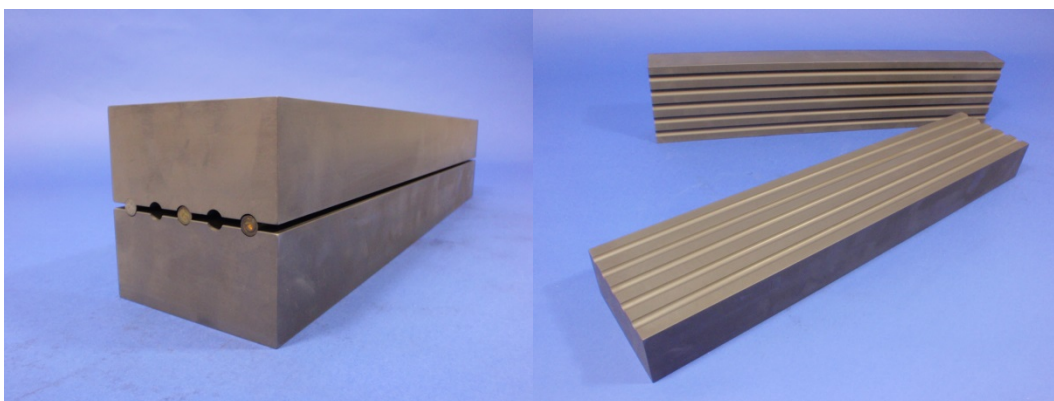




**Abbildung 4.29**

Querschliff eines Pultrusionsstabes im Grünzustand

Da diese CF-Phenolharz Profile als Grünkörper für die CFC Herstellung entwickelt sind, wurde der gesamte CFC Herstellprozess mit Carbonisierung und Graphitierung untersucht. Die Wärmebehandlungen wurden analog zur konventionellen CFC Herstellung in einem eigens hergestellten Graphitwerkzeug durchgeführt, um die Profile während des Prozesses zu stützen, siehe Abbildung 9 und 10.



**Abbildung 4.30**

Graphitwerkzeug für die Wärmebehandlung (links), mit eingelegten Pultrusionsstäben (rechts).

Es wurden nach jedem Prozessschritt die Länge, Rundheit, Geradheit und die Porosität der Stabprofile untersucht. Die Porosität beginnt im Grünteil ca. 2% und nimmt dann bis zur Graphitierung bis hin zu etwa 25% stetig zu, da alle organischen Bestandteile sukzessive aus der Phenolharzmatrix entfernt werden und natürlich Poren zurückbleiben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.31 und Abbildung 4.33 zu sehen.

### Porosität

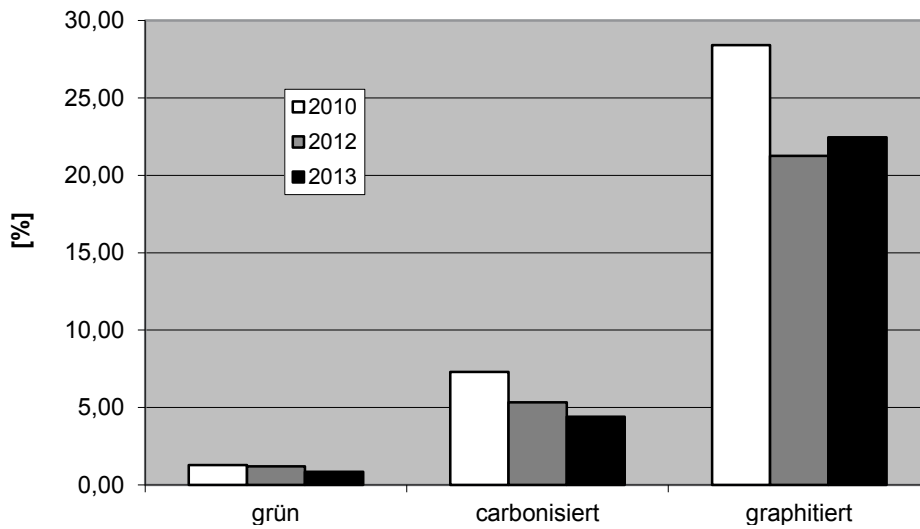


Abbildung 4.31

Porositätszunahme während der Wärmebehandlung.

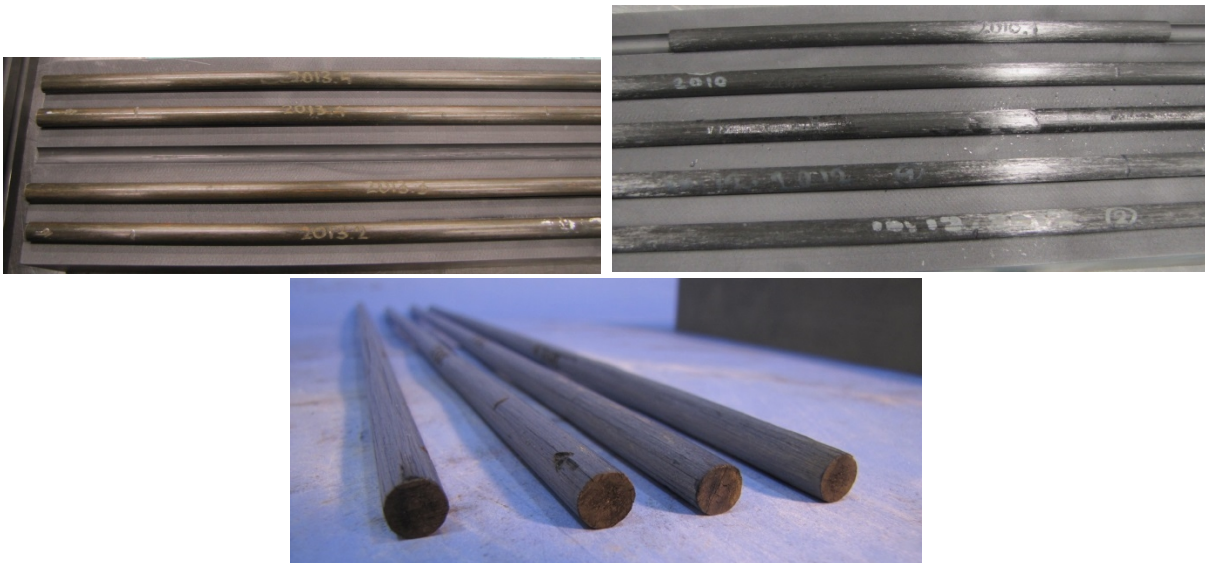
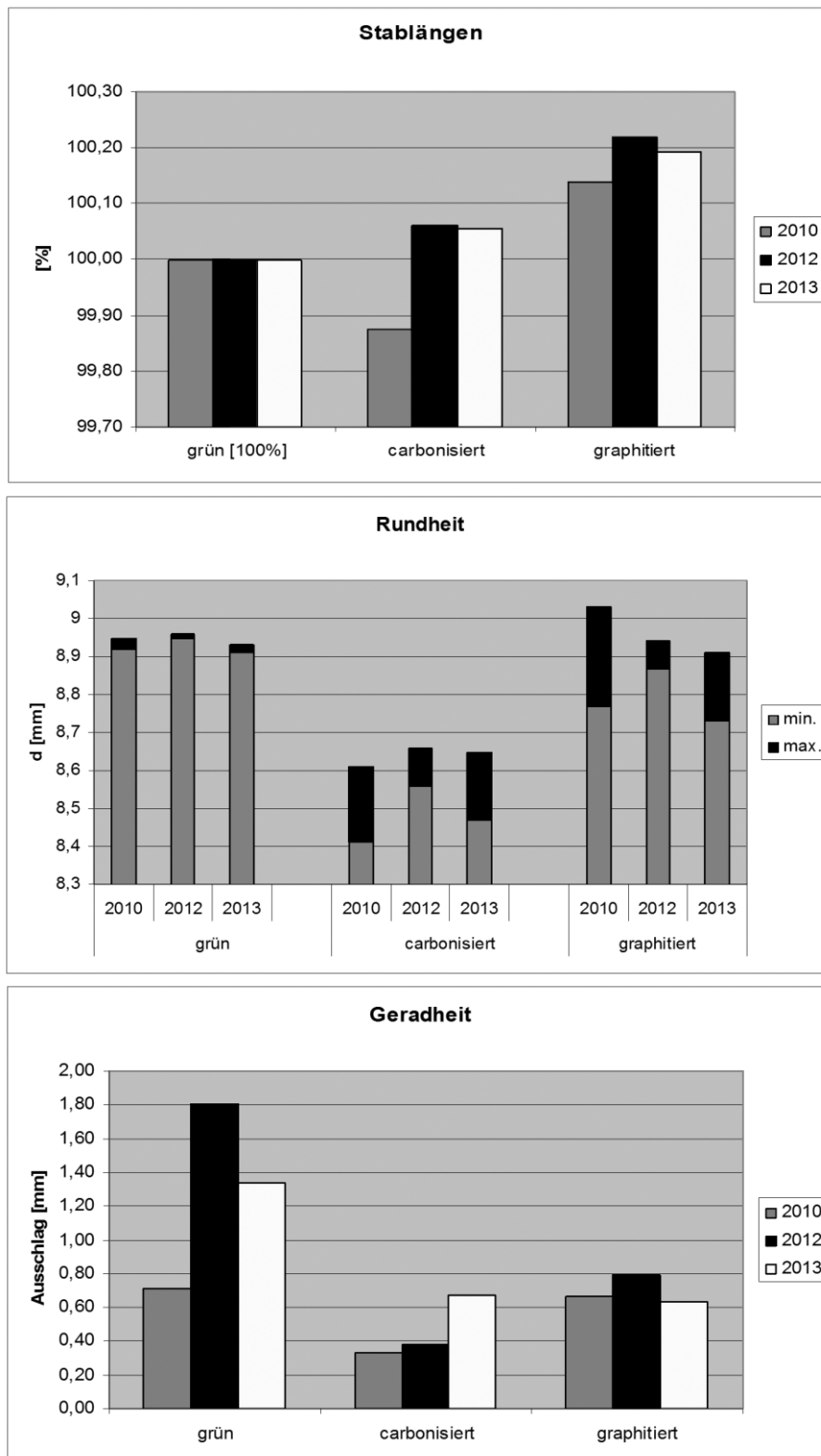


Abbildung 4.32

Putrusionsstäbe als Grünteil (oben links), carbonisiert (oben rechts), und graphitiert, (unten).

Die Ergebnisse sind dem untenstehenden Diagramm zu entnehmen. Der Durchmesser der Proben nimmt während der Carbonisierung zunächst stark ab, nimmt dann aber, wohl aufgrund irreversibler Ausdehnung während der Graphitierung, wieder zu. Die Stablängen nehmen dabei bis zu einem Wert von + 0,2 % zu, die Geradheit verbessert sich deutlich des Zwanges durch das Graphitwerkzeug. Die Veränderungen aller drei Größen während der Wärmebehandlung sind in den Abbildungen 15 bis 17 zu sehen.



**Abbildung 4.33**

Veränderung von Länge (oben), Durchmesser (mitte) und Geradheit (unten) durch die Wärmebehandlung.

## 4.2 Entwicklung eines energieeffizienten hybriden Mikrowellensystems

Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Entwicklung und Weiteroptimierung der bestehenden HEPHAISTOS Technologie. Es wurden die bisher eingesetzten Wellenleiterantennen hinsichtlich ihrer Abstrahlcharakteristika verbessert, um eine weitere Energieeffizienzsteigerung zu erzielen. Darüber hinaus wurden das Türdichtungskonzept und die Kühltechnik überarbeitet, um somit eine Kombination mit Heißluft-Heiztechnik zu ermöglichen. Gleichzeitig wurde das bestehende Regelkonzept mit fixen Regelparametern, durch ein flexibleres bzw. intelligentes Konzept erweitert. Dies soll ermöglichen, dass die Regelparameter sich in Echtzeit den sich änderndem Systemverhalten anpassen bzw. autark und während des Prozesses Einfluss auf die sich ändernde Temperaturverteilung nehmen. Des Weiteren wurden die einwickelten Harze und Werkzeugmaterialien hinsichtlich ihrer dielektrischen Eigenschaften charakterisiert.

### 4.2.1 Weiterentwicklung der modularen HEPHAISTOS Mikrowellen-Technologie

Die existierende HEPHAISTOS Technologie wurde mit einer verbesserten Mikrowellentechnik ausgestattet (optimierte Wellenleiterantennen, verbesserte Feldhomogenität, neues Türdichtungskonzept, Wasserkühlung für den Einsatz im Dauerbetrieb). Für die Aushärtung von Wickelkörpern wird die Kombination mit konventionellen Heizverfahren entwickelt.

#### 4.2.1.1 Umrüstung der HEPHAISTOS CA3 Anlage

Die am KIT vorhandene große HEPHAISTOS-Anlage CA3 besteht aus 3 Modulen mit einer Gesamtlänge von 3 m und einem Kammerdurchmesser von ca. 1,80 m. Bei dieser Anlage wurde die Mikrowelleneinspeisung modernisiert. Insbesondere wurde damit eine stufenlose Regelung der Mikrowellenleistung ermöglicht, was die Grundlage für verbesserte Regelungsverfahren schafft.

Bei der Anlage handelt es sich um die erste in dieser Größe aufgebaute HEPHAISTOS Anlage. Eingesetzt waren bisher preisgünstige Magnetrons mit einer Leistung von jeweils 800 W in Verbindung mit einfachen LC-Netzteilen. Diese lassen sich nicht in ihrer Leistung steuern, sondern nur takten, d. h. abwechselnd ein- und ausschalten. Die erreichbare Taktfrequenz ist darüber hinaus sehr niedrig und liegt unter einem Hz. Entsprechend liegen die Ein- bzw. Ausschaltdauer bei über 1 s. Dieses Konzept erlaubte gerade bei Prozessen mit geringem Leistungsbedarf die Aktivierung von nur wenigen Magnetrons, womit die Regelmöglichkeiten erheblich eingeschränkt werden. Darüber hinaus bewirkt eine solche Leistungsregelung, allein über Änderung des Puls-Pausen Verhältnisses, stets die maximale Spitzenleistung im Puls, resultierend in deutlich höheren lokalen Feldstärken als im Vergleich zu einem Dauerstrichbetrieb der Magnetrons mit reduzierten Leistungspegeln.

Zu hohe lokale Feldstärken können gerade bei der Behandlung von Kohlefaserverstärkten Kunststoffen zu Problemen führen, insbesondere dann wenn vereinzelt abstehende Kohlefaserenden dem Mikrowellenfeld ausgesetzt sind. Dadurch wird die Entstehung von Arcing (Lichtbögen) begünstigt. Der Aushärteprozess muss dann abgebrochen werden und das Werkstück ist defekt. Um diesen Effekt zu vermeiden, muss die Feldstärke reduziert werden. Dies ist mit dem derzeit gegebenen Aufbau nicht möglich. Gespeist wurde die Anlage bisher von 36 Antennen (12 für jedes Modul), welche die Energie der Magnetrons in die Kammer einkoppeln. Ausgelegt sind die Antennen als Hohlleiter-Schlitzantennen.

Die Magnetrons waren direkt auf dem Hohlleiter montiert. Diese Methode spart zwar Platz und ist günstig, hat aber den Nachteil, dass keine definierte Schnittstelle auf der Hochfrequenzseite des Magnetrons gegeben ist. Damit lässt sich die Anpassung an die Antenne nur schlecht oder gar nicht messtechnisch überprüfen. Zudem fehlte bisher ein Isolator bzw. Zirkulator. Dieser schützt das Magnetron vor Mikrowel-

lenenergie die aus der Kavität zurück ins Magnetron reflektiert oder von anderen Magnetrons über die Kavität einkoppelt. Dies kann gerade bei Prozessen mit schwach absorbierenden Lasten zu instabilem Betrieb bis hin zur Zerstörung von Magnetrons und den zugehörigen Netzteilen führen.

Die Neuausstattung des Mikrowellentechnik für den HEPHAISTOS CA3 umfasst die Netzteile, Magnetrons und die Antennen. Die vorhandene Ausstattung wurde dabei komplett entfernt. Die Gesamtzahl der Magnetrons und Antennen wurde auf die Hälfte reduziert: 6 statt 12 Einspeisungen pro Modul, also insgesamt 18 statt 36 Einspeiseantennen. Dafür wurde die Leistung pro Magnetron von 800 W auf 2 kW erhöht, so dass eine gesamte, maximal verfügbare Leistung von 36 kW erreicht wird. Der Hintergrund für die Reduktion der Anzahl der Einspeisepunkte ist, dass die auf die Leistung bezogenen Kosten reduziert werden, da ein System aus Magnetronkopf und Netzteil in 2 kW Ausführung günstiger ist als zwei äquivalente Systeme zu 1 kW. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf teure Bauelemente wie Zirkulatoren, die nur in der halben Anzahl benötigt werden. Auch haben praktische Versuche und Simulationen gezeigt, dass die verringerte Zahl an Quellen zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems führt und eine mögliche Auswirkung auf die Homogenität des Feldes vernachlässigbar ist.

#### 4.2.1.1.1 Netzteile

Zur Versorgung der insgesamt 18 Magnetrons wird pro Magnetron je 1 Netzteil benötigt. Aufgabe der Netzteile ist die Bereitstellung einer negativen Hochspannung an der Kathode der Magnetrons. Primärseitig werden diese durch das 3-phasige 400 V-Netz gespeist. Um, für eine mögliche zukünftige Kommerzialisierung, den Einfluss der Netzteil auf das Systemverhalten besser untersuchen zu können, wurden für den Umbau der Anlage zwei verschiedene Netzteil-Systeme der Firma Muegge zum Einsatz gebracht. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Stabilität der Hochspannung und werden im Folgenden als „Standard-Ripple“ bzw. „Low-Ripple“-Netzteil bezeichnet. Die nominell maximal einstellbare Mikrowellenleistung per Magnetron beträgt in allen Fällen 2 kW.

Bei dem Standard-Ripple-Netzteil handelt es sich um ein Dual-Netzteil Typ MX4000X-110KE welches zwei unabhängige Netzteile zu je 2 kW in einem Gehäuse vereint. Im Gegensatz zu den bisher installierten Netzteilen ermöglicht dieses Netzteil eine Steuerung der Mikrowellenleistung über deren Amplitude. Dabei wird direkt die elektrische Ausgangsleistung (das Produkt aus Spannung  $U$  und Strom  $I$ ) geregelt. Somit kann die Mikrowellenleistung stufenlos eingestellt werden und für kleinen Leistungsbedarf die Feldstärken im Ofen reduziert werden, was für die Prozessierung von Kohlefasermaterialien entscheidend sein kann. Aus technischen Gründen kann dabei jedoch im eingeschalteten Zustand eine Mindestleistung von 10% nicht unterschritten werden. Um eine noch geringere (Durchschnitts-)Leistung zu erreichen, muss zusätzlich ein getakteter Betrieb realisiert werden. Beim diesem Netzteiltyp handelt es sich um ein Schaltnetzteil ohne aufwändige Siebung. Die Ausgangsspannung enthält daher einen Rippel, der sowohl Reste der 300 Hz Netzfrequenz (50 Hz mit 3-Phasen Vollweggleichrichtung) und der Schaltfrequenz 15 kHz enthält. Das Netzteil erlaubt eine externe Taktung (schnelles Ein- und Ausschalten) über einen separaten Takteingang mit einer Frequenz bis zu 2 kHz. Über diese Taktung kann einerseits die effektive (mittlere) Mikrowellenleistung reduziert werden zum Anderen kann der Einfluss von Takten und Pulsen auf den Mikrowellenprozess untersucht werden. Dazu wird der Takteingang mit der Steuerung verbunden. Mit diesem Typ Netzteil werden insgesamt 12 der 18 Magnetrons versorgt. Dafür werden insgesamt 6 solche Dual-Netzteile benötigt.

Für die Low-Ripple-Netzteile werden 6 Stück des Typs ML2000D113TC verwendet. Diese Netzteile verfügen über eine nahezu glatte Ausgangsspannung mit einem Ripple  $< 1\%$  sind dafür aber mit schweren Transformatoren und großen Kondensatoren ausgestattet. Jedes Netzteil versorgt genau ein Magnetron. Wie beim Standard-Ripple-Netzteil ist eine Steuerung der Ausgangsleistung durch die Amplitude und eine externe Taktung möglich. Die Taktfrequenz muss dabei im Bereich 500 Hz bis 25 kHz liegen. Durch die gegenüber dem „Standard-Rippel“ glattere Ausgangsspannung wird der Einfluss des Rippels auf das Mikrowellenfeld weitgehend unterdrückt. Dadurch lassen sich Mikrowellenprozesse, die ein zeitlich

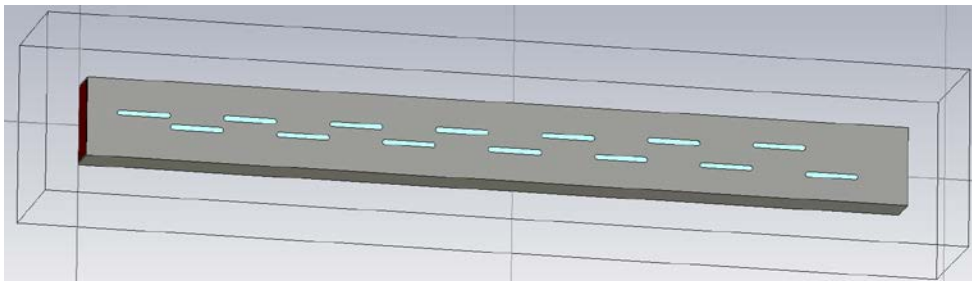
stationäres Mikrowellenfeld benötigen, untersuchen. Zudem ist es möglich, die Kopplungs-Effekte, die beim gleichzeitigen Betrieb mehrerer Magnetrons, die über eine gemeinsame Ofenkavität gekoppelt sind, zu messen. Hierfür wird eine glatte Versorgungsspannung benötigt um Modulationseffekte durch die Kopplung von Schwankungen der Versorgungsspannung unterscheiden zu können.

#### 4.2.1.1.2 Magnetronköpfe

Zur Speisung der Antennen werden Magnetron-Kompaktköpfe der Firma Muegge vom Typ MH2000F-211CM verwendet. Diese vereinen das Magnetron, den Heiztrafo, den Launcher (Übergang in Standardhohlleiter), einen Zirkulator mit Messmöglichkeit der Rückwärtsleistung und einen 3-Stub-Tuner. Der 3-Stub-Tuner wird für die Anwendung nicht benötigt, ist jedoch vorhanden. Die Magnetronköpfe sind für den Betrieb mit den vorgenannten Netzteilen vorgesehen. Insgesamt werden 18 solche Magnetronköpfe in der Anlage verwendet. Jede der 18 Einspeiseantennen wird dabei von einem eigenen Magnetronkopf gespeist.

#### 4.2.1.1.3 Antennen

Die bisher verwendeten Antennen sind Hohlleiter Schlitzantennen. Diese waren nicht auf eine möglichst gute Anpassung hin optimiert. Somit wurde stets ein Teil der Mikrowellenleistung zurück in das Magnetron reflektiert. Zudem wurde das Magnetron direkt auf dem Hohlleiter montiert, so dass sich der erste Schlitz noch im Bereich der Einkopplung befand, wodurch diese beeinflusst wird. In Abbildung 4.34 ist das CST-Simulationsmodell des bisher verwendeten Antennentyps zu sehen. Es besteht aus einem Standard-Hohlleiter mit 14 Schlitzten, welche von der Mitte des Hohlleiters unterschiedlich versetzt sind. Die Magnetron-Einkopplung ist hier nicht mit simuliert, stattdessen ist die Einspeisung mittels eines Waveports modelliert. Der Grund hierfür ist, dass Details für die korrekte Modellierung der Magnetron-Ankopplung nicht bekannt sind, die Simulation erlaubt jedoch eine Beurteilung der Performanz des Schlitzmusters. Die mit diesem Modell berechnete Anpassung  $S_{11}$  über der Frequenz wird nachfolgend in Abbildung 4.34 im Vergleich zur überarbeiteten Version der Antenne dargestellt.



**Abbildung 4.34**

CST-Simulationsmodell bzw. Skizze der bisher im Hephaistos CA3 bisher verwendeten Antennen. Der Port für die Einspeisung ist links an der Stirnseite.

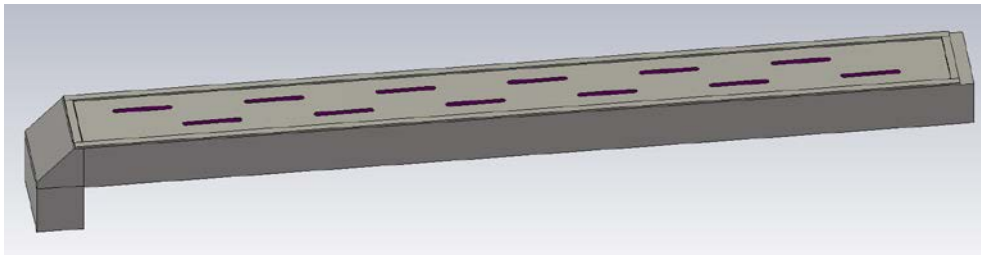
Bei den bisherigen Antennen kommt zusätzlich eine Abdeckung aus dünnem Glimmer zum Einsatz, welche direkt außen auf die Schlitzte aufgebracht wird. Diese dient dem mechanischen Schutz und verhindert, dass Schmutz oder Dämpfe in die Antenne gelangen. Diese ist im Design der Antennen nicht berücksichtigt und verschlechtert damit die Anpassung der Antenne unkontrolliert.

Bei den neuen Antennen wurde eine definierte Einkopplung über einen Hohlleiterflansch geschaffen. Der Vorteil ist, dass nun die Anpassung bzgl. einer genau definierten Schnittstelle (Port) sowohl mittels Simulation als auch mittels Messung bestimmt werden kann. Die Speisung erfolgt statt über ein einfaches Magnetron durch einen Kompaktkopf (Abschnitt 4.2.1.1.2). Dieser Kompaktkopf enthält u. a. einen Launcher welcher die Mikrowellenenergie des Magnetrons definiert über den Port in den Wellenleiter Einkoppelt. Die Anpassung der Antenne kann dann direkt über diesen Port erfolgen welcher als Flanschanschluss

ausgeführt ist. Abbildung 4.36 zeigt das Modell der Antenne. Sie weist 12 gleiche äquidistante Schlitze auf. Auf der Speiseseite ist direkt ein 90°-Knick integriert. Dies ist aufgrund der gegebenen baulichen Anforderungen im HEPHASITOS erforderlich. Die Antenne weist eine 0,13 mm dicke Kaptonfolie mit der dielektrischen Permittivität  $\epsilon_r' = 4,7$ , welche die Schlitze abdeckt (im Bild nicht dargestellt). Diese ist im optimierten Design berücksichtigt.

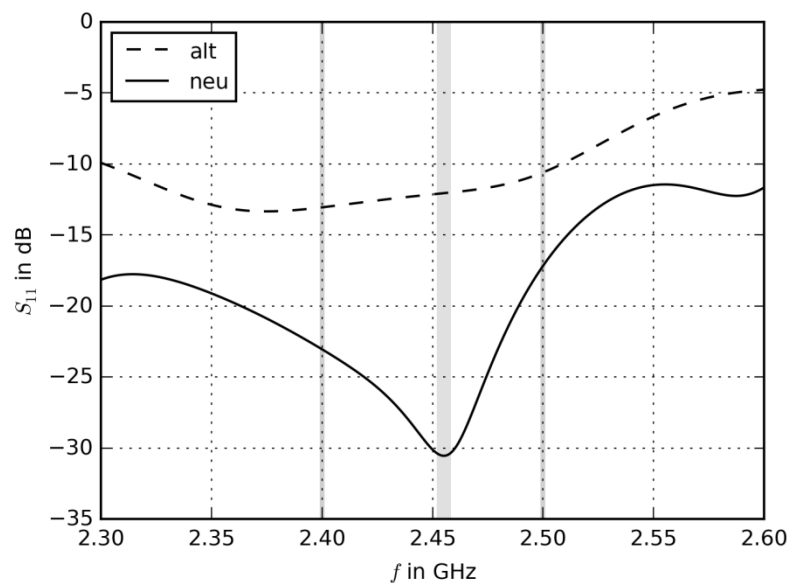
Das Design der Antenne wurde mittels CST Microwave Studio auf eine gute Anpassung optimiert. Abbildung 4.36 zeigt die Anpassung dieser Antenne im Vergleich zur bisherigen Antenne.

Abbildung 4.37 zeigt ein Exemplar der aufgebauten Antenne, mit aufgebrachter Kapton-Abdeckung. Für die Vermessung der Anpassung wurde diese provisorisch mit Klebestreifen befestigt.



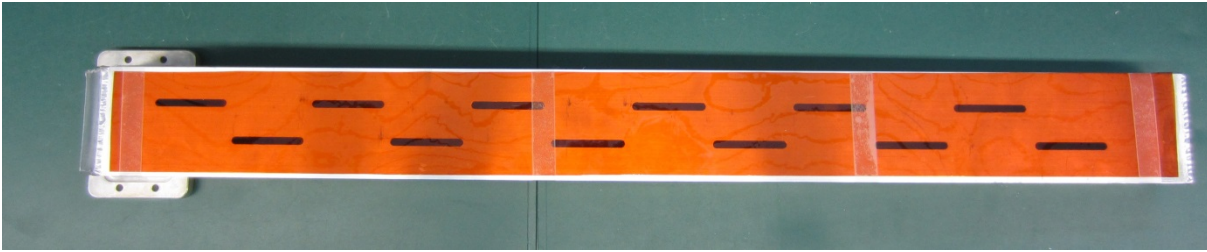
**Abbildung 4.35**

CST-Simulationsmodell bzw. Skizze der neuen im HEPHAISTOS CA3 zu installierenden Antennen. Der Port für die Einspeisung befindet sich links unten am Knick.



**Abbildung 4.36**

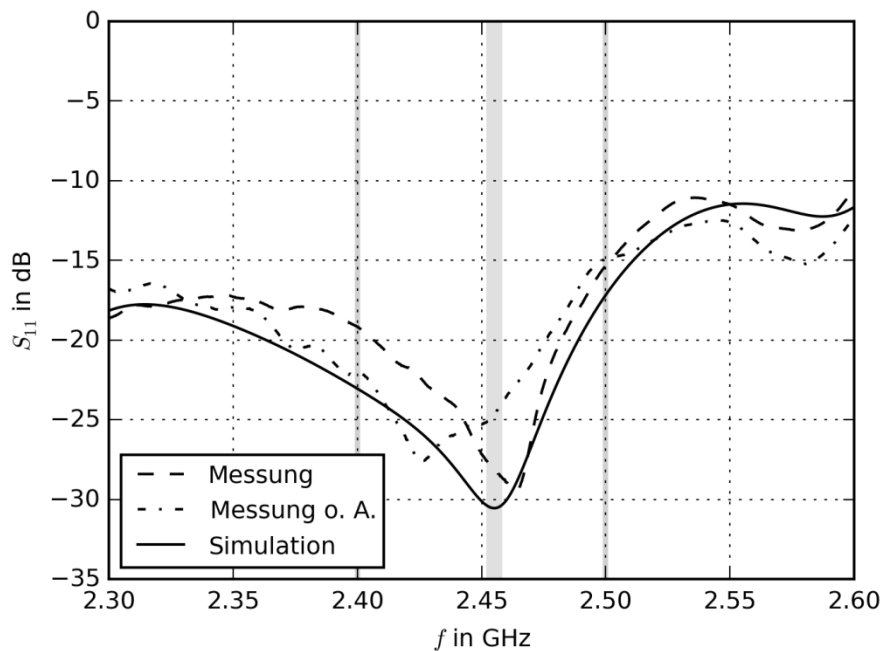
Simulierte Anpassung für die neue Antenne mit Kapton-Abdeckung („neu“) im Vergleich zur simulierten Anpassung der bisher verwendeten Antenne („alt“).



**Abbildung 4.37**

Aufgebautes Exemplar der neuen Antenne für den CA3. Unter der durchscheinenden Kapton-Folie für die Abdeckung sind die 12 Schlitzte zu erkennen. Links befindet sich unter dem Knick der Flansch für den Anschluss.

Abbildung 4.38 zeigt die gemessene Anpassung der aufgebauten Antenne und stellt diese dem Simulationsergebnis gegenüber. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Zusätzlich zeigt sie die Veränderung, wenn in der Messung die Kapton-Folie als Abdeckung weggelassen wird. Die Antenne wird dadurch verstimmt bleibt jedoch immer noch einsatzfähig.

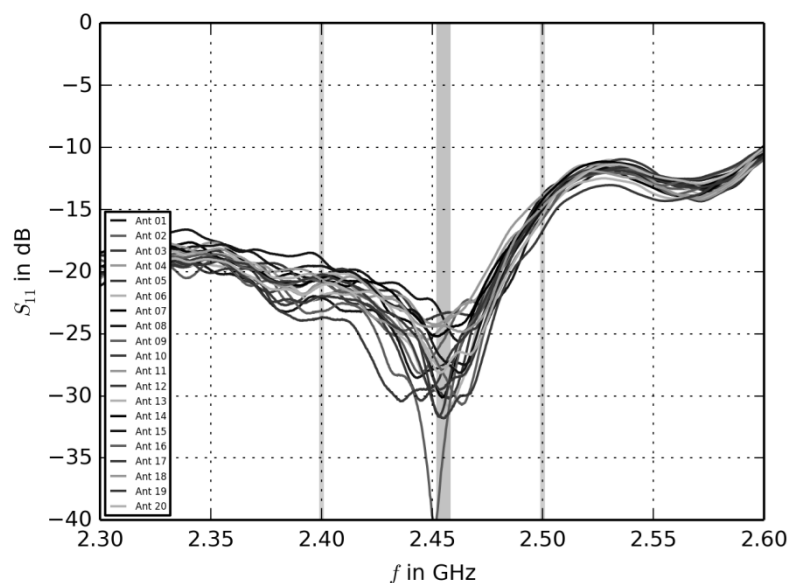


**Abbildung 4.38**

Gemessene Anpassung der aufgebauten Testantenne im Vergleich mit der Simulation (o. A.: Messung ohne Kapton-Abdeckung).

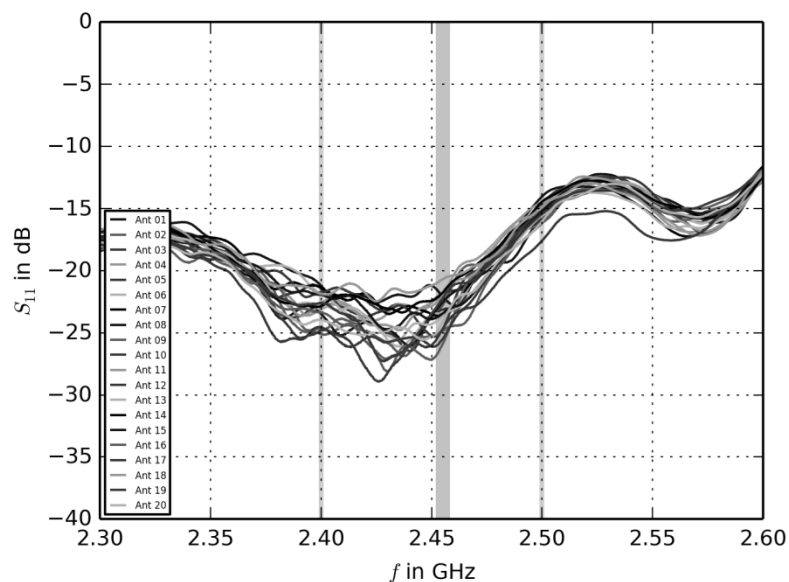
Insgesamt wurden 20 Antennen gefertigt, wovon 18 für den Einbau in den HEPHAISTOS CA3 benötigt werden. Die Anpassung wurde im Freiraum (Laborumgebung, keine Absorberkammer) mittels eines vektoriiellen Netzwerkanalysators vermessen. Das Resultat ist in Abbildung 4.39 zu sehen. Die Ergebnisse decken sich gut mit der Simulation.



**Abbildung 4.39**

Gemessene Anpassung für die gefertigten neuen Antennen mit Kapton Abdeckung.

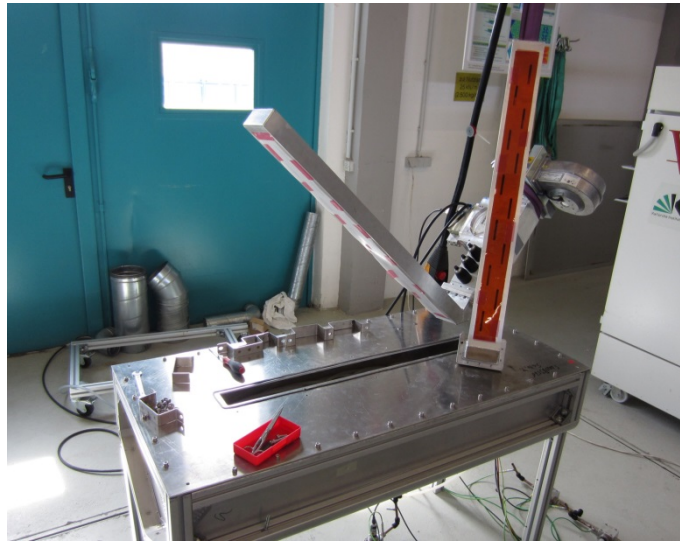
Für den Fall, dass sich die Kapton-Folie ablöst, wurde noch untersucht, wie sich die einzelnen Antennen ohne Abdeckung verhalten. Die gemessene Anpassung für diesen Fall ist in Abbildung 4.40. Erwartungsgemäß verschlechtert sich die Anpassung der Antennen, ist aber mit besser als  $-20$  dB immer noch sehr gut.

**Abbildung 4.40**

Gemessene Anpassung für die gefertigten neuen Antennen ohne Kapton Abdeckung.

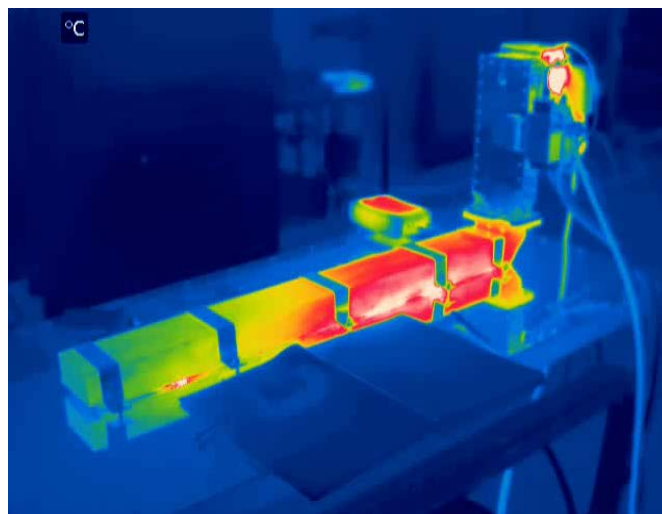
Zusätzlich wurden alle Antennen mit Hochleistung von 3 kW an einer speziellen Last getestet. Damit soll sichergestellt werden, dass die Antennen beim späteren Betrieb (mit maximal 2 kW pro Antenne) nicht überlastet sind, sich unzulässig erwärmen oder Arcing auftritt. Abbildung 4.41 zeigt den zugehörigen Teststand. Die im Inneren der Kavität installierte Wasserlast absorbiert dabei die Mikrowellenleistung

und ermöglicht dabei zugleich deren Messung. Einzelne Antennen wurden über einen Zeitraum von mehreren Stunden getestet, andere nur kurzzeitig. Dabei sind keine Probleme beobachtet worden.



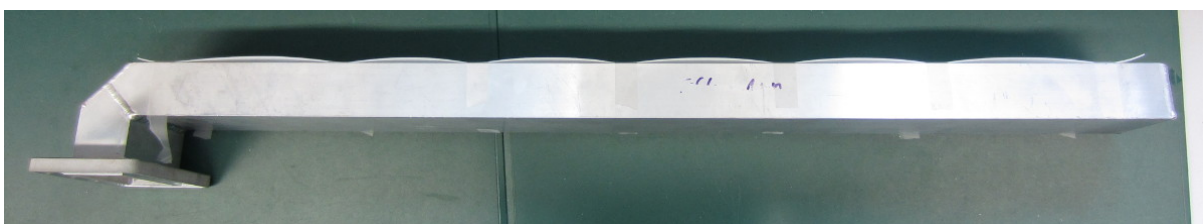
**Abbildung 4.41**

Teststand zur Prüfung der Antenne mittels Hochleistungs-Mikrowelle (3kW). Die Antenne (hier demontiert dargestellt) strahlt in die Kavität, in welcher sich eine Wasserlast befindet.



**Abbildung 4.42**

Thermoaufnahme einer Antenne im Betrieb am Teststand. Der helle Bereich ist etwa handwarm.



**Abbildung 4.43**

Aufgebautes Exemplar einer Antenne für den CA3 mit einer Abdeckung aus Teflon-Folie (Seitenansicht). Gut zu erkennen ist die wellenförmige Verwerfung der Folie.

Abbildung 4.42 zeigt eine Wärmebildaufnahme einer Antenne nach mehrstündigem Betrieb. Die Antenne erwärmt sich leicht im Bereich der Mikrowelleneinkopplung. Vorne ist eine lokale Übererwärmung zu erkennen im Bereich der Dichtung zum Teststand. Ursache hierfür war ein lokal mangelnder Kontakt der Metallgewebedichtung. Abgesehen von der Antenne mit der Kapton-Abdeckung wurden Varianten dieser Antenne mit unterschiedlichen Materialien für die Abdeckung simuliert und aufgebaut. Dies erforderte im Detail jeweils unterschiedliche Abmessung für das Schlitzmuster. Probiert wurden u. a. Abdeckungen aus Phlogopit (Glimmer), PEEK, Quarzglas und Teflon. Diese scheiterten aber beim Hochleistungstest. Entweder gab es Probleme mit lokaler Überhitzung und Durchbrennen (Hot-Spots) oder das Material genügte nicht den mechanischen Anforderungen hinsichtlich Bruchfestigkeit. Zudem war im Hinblick auf Anwendung für einen Hybridofen (mit Heißluftereinheit) eine gewisse Wärmebeständigkeit gefordert. Abbildung 4.43 zeigt beispielhaft eine Antenne mit einer Abdeckung aus Teflon-Folie, welche die Tendenz aufweist, sich wellenförmig zu verziehen.

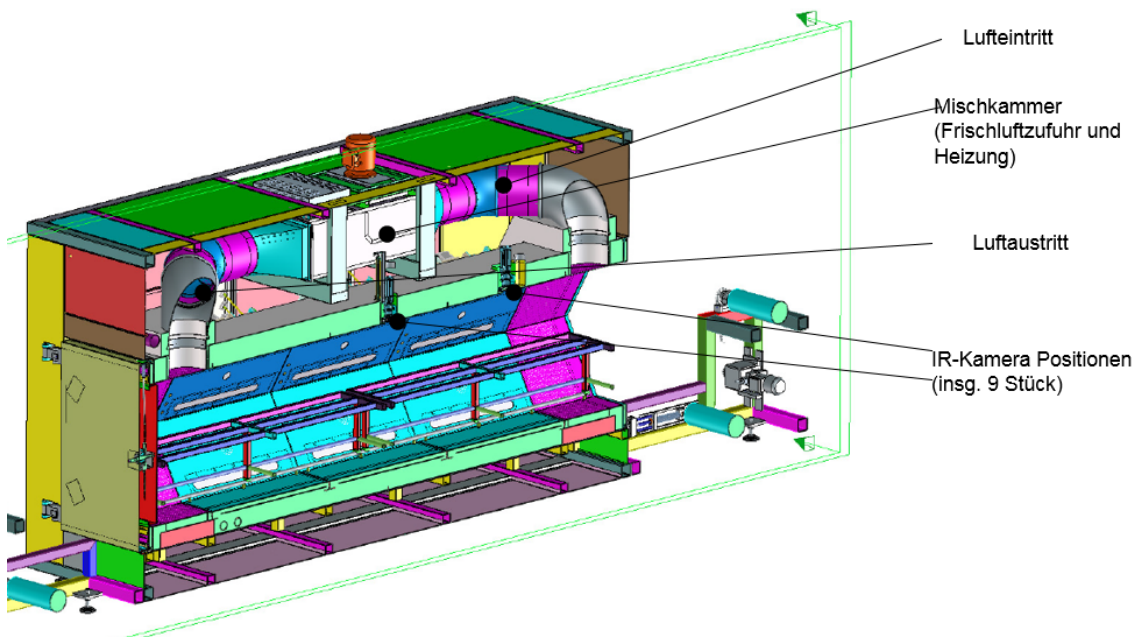
#### 4.2.1.2 HEPHAISTOS Hybridanlage

Im Rahmen des Projekts wurde eine komplett neue HEPHAISTOS Anlage zusammen mit dem Kooperationspartner Vötsch entworfen und aufgebaut. Diese erlaubt einen hybriden Betrieb, der neben der Mikrowelle eine konventionelle Heizung mit Heißluft vorsieht. Beide Heizmethoden können sowohl einzeln als auch simultan betrieben werden. Haupteinsatzzweck der Heißluft ist das Betreiben kritischer Prozesse, welche ein besonders homogenes Temperaturprofil benötigen. Da die Mikrowelle primär im Volumen heizt, durch die Oberfläche aber Wärme an die kalte Umgebung abgegeben wird, stellt sich automatisch ein unerwünschter Temperaturgradient im Material ein. Um diesen Effekt zu minimieren hilft es nur, die Umgebung ebenfalls aufzuheizen. Dies geschieht mittels Heißluft, die mittels eines Umluftsystems realisiert ist. Der Durchmesser des Ofenraums der Hybridanlage ist mit ca. 1 m ist kleiner als beim CA3. Die Länge ist mit 3 Mikrowellenmodulen zu jeweils 1 m und zwei Modulen für Ein- und Auslass der Heißluft insgesamt ca. 4 m lang.

Das Umlufttemperatursystem wurde so konzipiert, dass es der hexagonalen Kammerstruktur und dem eher Röhrencharakter des Innenbehälters gerecht wurde. Die Luftführung wurde so gewählt, dass der Innenbehälter gleichmäßig durchströmt wird und sich eine optimale Temperaturverteilung einstellt. Umluftsystem und Mikrowellenbeheizung arbeiten unabhängig voneinander, d.h. die Umlufttemperatur kann separiert von der Mikrowellentemperatur geregelt werden. Bei Trocknungsprozessen kann dabei ein Umluftvolumenstrom mit höherer Temperatur eingestellt werden, der die über die Verdampfung entstehende Feuchte sicher abführt und damit Kondensatbildung im Nutzraum vermeidet. Ebenso ist eine Überlagerung des Prozesses mit warmer Umgebungsluft möglich. Eine Schnittdarstellung der Konstruktionsweise ist in Abbildung 4.44 gegeben.

Die Umluftleistung ist stufenlos zwischen 40% und 100% einstellbar. Mit maximaler Umluftleistung ergab sich bei 100°C Nutzraumtemperatur eine räumliche Temperaturverteilung von  $\pm 1,5\text{K}$ . Damit lagen die Werte in einem optimalen Bereich für Industrieofenanlagen.

In Abbildung 4.44 sind ebenfalls Positionen dargestellt, an denen eine IR-Kamera in das System integriert werden kann. Insgesamt wurden 9 Positionen – 3 pro Modul – vorgesehen. Die Integration der IR-Kameras an diesen Positionen erlaubt ein Beobachten des Prozesses aus 3 Winkeln und bei genügend Kameras auch über 3m Länge. Die verwendete Konstruktionsweise des Kamerafensters ermöglichte eine berührungslose Temperaturerfassung ohne die Werte auch bei einem Weitwinkelobjektiv zu verfälschen. Abbildung 4.45 zeigt das gefertigte System mit eingebrachtem Wickelwerkzeug.



**Abbildung 4.44**  
Schnittdarstellung Hybrid Anlage

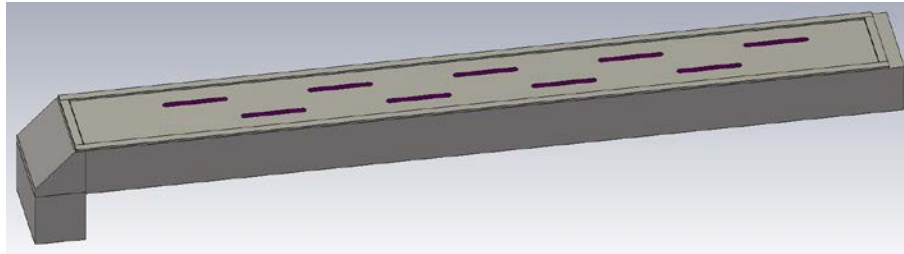


**Abbildung 4.45**  
Hybrid Anlage mit Wickelwerkzeug

#### 4.2.1.2.1 Antennen

Die Antennen entsprechen vom grundsätzlichen Design denen für den HEPHAISTOS CA3 weitgehend. Aufgrund anderer Einbauverhältnisse ist jedoch eine etwas kürzere Ausführung nötig. Die Antennen weisen daher nur 9 Schlitze auf. Das Modell für die Simulation ist in Abbildung 4.46 gezeigt. Das Design der Antenne wurde mittels CST Microwave Studio auf eine gute Anpassung optimiert. Die Antenne wurde aufgebaut und vermessen wie in Abbildung 4.42 dargestellt. Abbildung 4.48 zeigt die gemessene Anpassung  $S_{11}$  im Vergleich zur Simulation. Hier sind die Abweichungen zur Simulation höher als im Fall der

Antenne für den CA3. Die erreichte Anpassung ist etwas schlechter. Insbesondere liegt die Resonanzfrequenz (Punkt bester Anpassung) etwas zu hoch. Mit ca.  $-20$  dB in der Umgebung der Sollfrequenz ist die Anpassung aber immer noch sehr gut, so dass auf eine weitergehende Optimierung verzichtet wurde.



**Abbildung 4.46**

CST-Simulationsmodell bzw. Skizze der neuen Antenne für die Hephaistos-Hybridanlage. Der Port für die Einspeisung befindet sich links unten am Knick.

Abbildung 4.48 zeigt auch die Veränderung, wenn in der Messung die Kapton-Folie als Abdeckung weggelassen wird. Interessanterweise verbessert sich die Antenne dadurch sogar etwas, da die Resonanzfrequenz sich zu tieferen Frequenzen verschiebt. Insgesamt wurden 21 Antennen gefertigt, wovon 18 für den Einbau in die Hephaistos-Hybridanlage benötigt werden. Die Anpassung wurde im Freiraum (Laborumgebung, keine Absorberkammer) mittels eines vektoriiellen Netzwerkanalysators vermessen. Das Resultat ist in Abbildung 4.49 zu sehen. Die Ergebnisse decken sich gut mit der Simulation. Für den Fall, dass sich die Kapton-Folie ablöst, wurde noch untersucht, wie sich die Antenne ohne Abdeckung verhält. Die gemessene Anpassung für diesen Fall ist in Abbildung 4.50 gezeigt. Wie schon die Messung der Einzelantenne erwarten ließ, verbessert sich die Anpassung der Antennen in diesem Fall etwas. Auch hier lässt sich die Antenne somit problemlos für beide Betriebsarten einsetzen. Der geringe Einfluss der Kapton-Folie ist auf deren geringe Dicke zurückzuführen.



**Abbildung 4.47**

Aufgebautes Exemplar der neuen Antenne für die HEPHASITOS Hybrid-Anlage während der Messung. Unter der durchscheinenden Kapton-Folie für die Abdeckung sind die 9 Schlitze zu erkennen. Rechts befindet sich unter dem Knick der Flansch der an den Netzwerkanalysator angeschlossen ist.

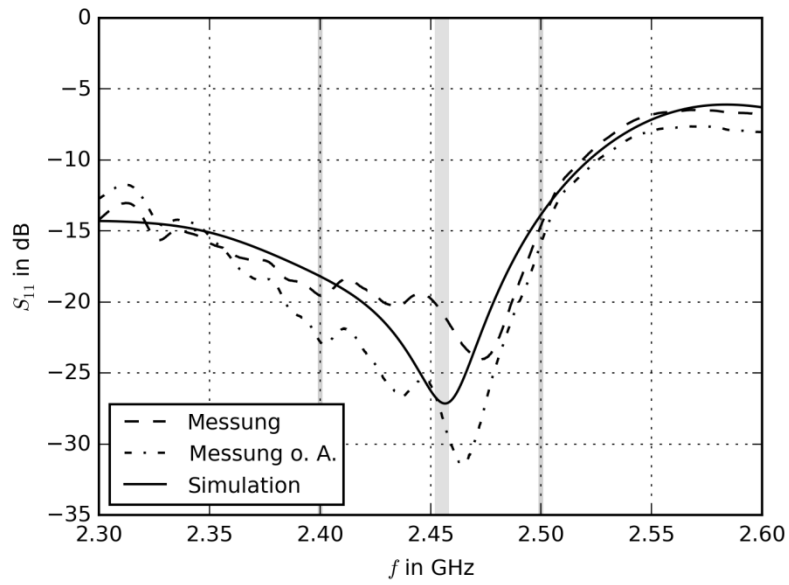


Abbildung 4.48

Gemessene Anpassung der aufgebauten Testantenne im Vergleich mit der Simulation (o. A.: Messung ohne Kapton-Abdeckung).

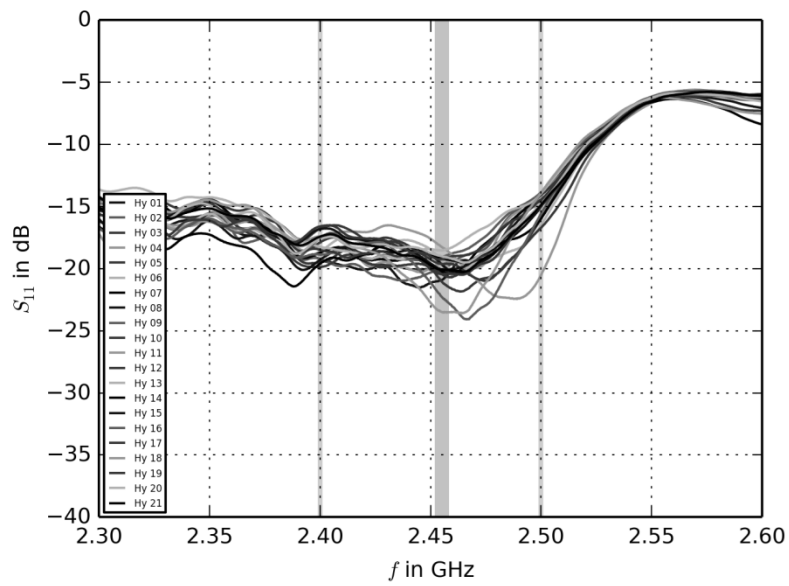


Abbildung 4.49

Gemessene Anpassung für die gefertigten neuen Antennen mit Kapton Abdeckung.

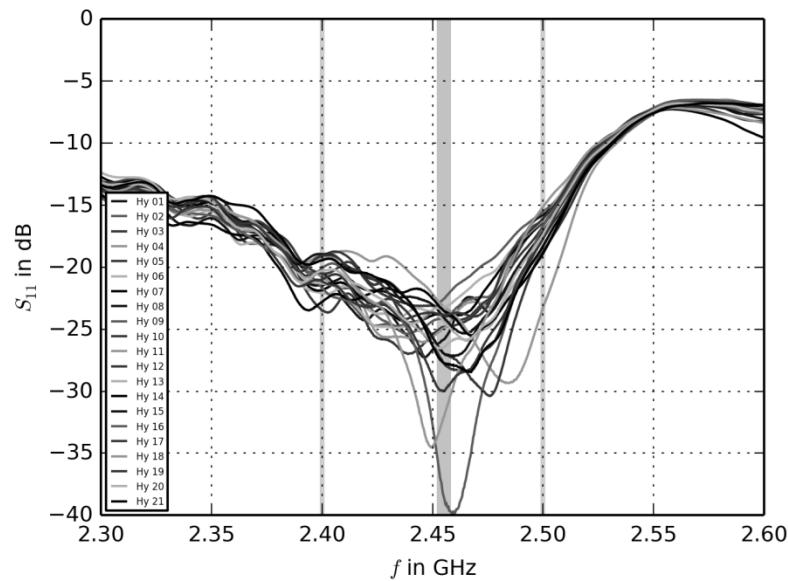


Abbildung 4.50

Gemessene Anpassung für die gefertigten neuen Antennen ohne Kapton-Abdeckung..

#### 4.2.1.2.2 Türchokes

Die Hybridanlage wird erstmalig für ein HEPHAISTOS-System mit einem Tür-Choke statt einer Kupfer-Beryllium Feder ausgerüstet. Aufgabe des Chokes bzw. der Dichtung ist die Verhinderung des Austretens von Mikrowellenstrahlung im (unvermeidlichen) Spalt zwischen Ofentür und Ofenflansch. Die bisher übliche Dichtung mit einer Kupfer-Beryllium-Feder weist zwar eine ausgezeichnete Dichtwirkung für die Mikrowelle auf, sie beruht jedoch auf einem ohmschen Kontakt zwischen Tür und Ofenflansch. Dies ist anfällig für Verschmutzung, zudem lässt die Federwirkung im Laufe der Zeit allmählich nach. Dies führt zu einem nicht zuverlässigen Kontakt. Da hier auch sehr hohe Ströme fließen, kann dies zu Arcing zwischen Feder und Flansch führen. Dieses ist zwar sehr schwach ausgeprägt führt aber über die Zeit zu deutlichen Oxidationsspuren, wie sie an bisherigen HEPHAISTOS-Anlagen teilweise zu beobachten sind.

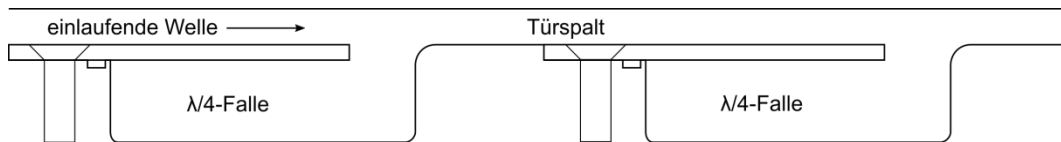
Herausforderung beim Design des Chokes ist hierbei die sehr hohe Mikrowellenleistung innerhalb des Ofens mit bis zu 36 kW. Dies erfordert eine zuverlässige hohe Durchgangsdämpfung, um die Abstrahlung auf Werte unterhalb der Personenschutzgrenzwerte von  $S_{\max}=5 \text{ mWcm}^{-2}$  in 5 cm Abstand zu drücken. Zur Abschätzung der notwendigen Dämpfung wird von lokaler Abstrahlung von Kugelwellen in den Halbraum ausgegangen. Daraus folgt eine theoretisch notwendige Mindest-Dämpfung von

$$10 \lg \frac{P_{\text{MW}}}{S_{\max} 2\pi R^2} = 10 \lg \frac{36 \text{ kW}}{5 \text{ mW cm}^{-2} 2\pi (5 \text{ cm})^2} = 47 \text{ dB} \quad 4.1$$

In der Praxis sollte die erforderliche Dämpfung deutlich höher angesetzt werden, z. B. 60 dB, da die Dämpfung der Welle je nach Ausbreitungsrichtung oder angeregtem Mode verschieden ausfallen kann.

Das Chokedesign erfolgt durch Optimierung basierend auf Simulationen und Messungen. Die Modellierung erfolgt für den einfachsten Fall. Dabei wird der Spalt zwischen Tür und Choke als zwei parallele Platten angenommen. Der Abstand zwischen den Platten ist dabei deutlich kleiner als die Wellenlänge. Dies reduziert die möglichen Moden auf TE-Typen und den TEM Parallelplattenmode. Letzterer wird als der dominante Mode angenommen. Damit lässt sich das Modell des Spalts und des Chokes auf zwei Dimensionen reduzieren. Randeffekte und Ecken werden dabei erstmal nicht berücksichtigt.

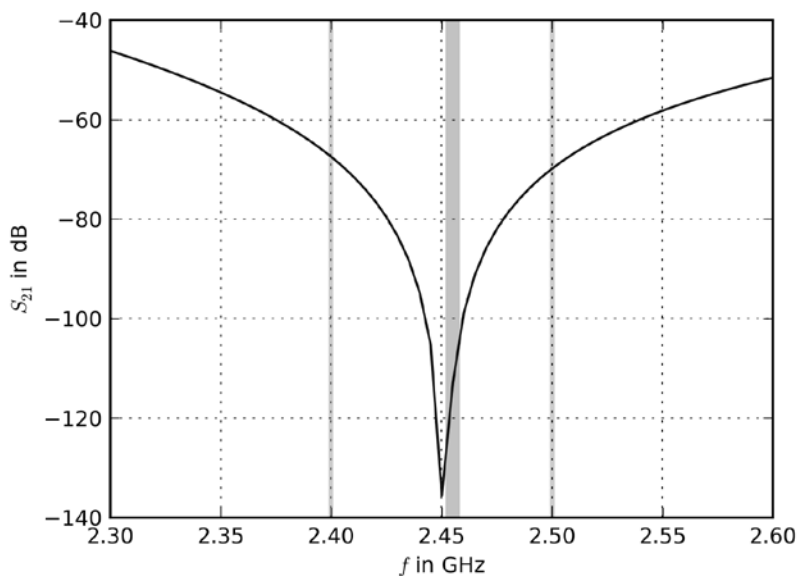
Als Funktionsprinzip wird eine klassische  $\lambda/4$ -Falle gewählt. Dabei wird eine Abzweigung mit einer  $\lambda/4$ -Stichleitung in den Spalt geschaltet, die am anderen Ende kurzgeschlossen ist. Dieser Kurzschluss transformiert sich an der Abzweigung zu einem Leerlauf, der elektrisch in Serie in die Parallelplattenleitung eingebunden ist. Dadurch entsteht an der Stelle eine hohe Impedanz an welcher die Welle reflektiert wird. Um die Dämpfung zu erhöhen werden zwei solcher Strukturen in Serie geschaltet. Die Simulation und Optimierung findet mit COMSOL-Multiphysics statt. Abbildung 4.51 zeigt die Chokestruktur im Querschnitt, mit den nach der Optimierung ermittelten Abmessungen. Wichtig ist auch der gegenseitige Abstand der beiden  $\lambda/4$ -Fällen, der bei ungünstiger Wahl die Wirksamkeit reduziert.



**Abbildung 4.51**

Skizze der Choke-Struktur für die Tür am Hybrid-Hephaistos.

Deutlich sichtbar sind die zwei Kammern, welche die  $\lambda/4$ -Stichleitungen bilden und über einen Koppelspalt an den Türspalt angeschlossen sind. Diese Struktur wurde in die Ofentür integriert. Auf der oberen Seite wird diese durch den metallischen Ofenflansch zur Parallelplattenleitung ergänzt. Zum Schutz vor Schmutz wird der Choke mit einer 4 mm starken Teflon-Abdeckung versehen. Diese dient zugleich auch als Abstandshalter um einen konstanten Spalt zwischen Ofentür und Ofenflansch zu gewährleisten. Dies ist wichtig für eine gute Funktion des Chokes. Zugleich wirkt das Material als Dielektrikum für die Welle im Türspalt. Die benötigte Gesamtlänge für den Choke beträgt etwa 125 mm, inklusive ca. 20 mm Spaltlänge an beiden Enden für den definierten Ein- und Auslauf der Welle. Die Wirksamkeit des Chokes wird über die Transmission  $S_{21}$  definiert, welche gemäß der Bemerkung nach (4.1) kleiner als  $-60$  dB im Frequenzbereich  $2,45 \text{ GHz} \pm 50 \text{ MHz}$  ausfallen sollte. Abbildung 4.52 zeigt die mit Comsol Multiphysics berechnete Transmission für die Struktur nach Abbildung 4.51.



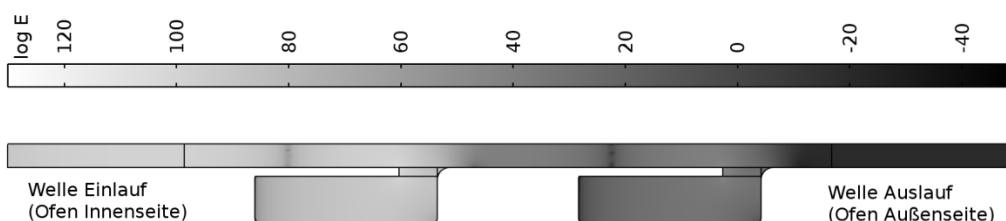
**Abbildung 4.52**

Berechnete Transmission durch den Choke für die Hybridanlage.



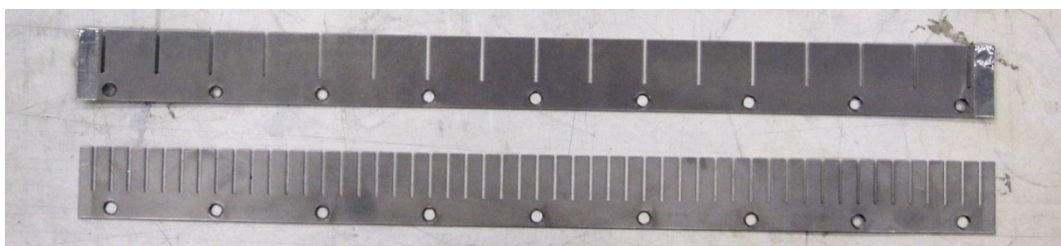
Wie zu erkennen, erfüllt diese Struktur die Forderung einer minimalen Dämpfung von 60 dB im Frequenzbereich 2,4 GHz bis 2,5 GHz, bei der Mittenfrequenz der Mikrowelle 2,45 GHz ist diese besser als 100 dB. Die Resonanz ist relativ schmalbandig und sehr empfindlich gegenüber Variation der geometrischen Parameter. Insbesondere geht hier die effektive Länge der Stichleitungen ein, wozu neben der Länge der beiden Kammern auch die Breite des Chokeyblechs und die Türspaltbreite mitzählt. Abbildung 4.53 zeigt den Verlauf der Feldstärke im Türspalt.

Es ist deutlich zu erkennen, wie das Feld von der Ofen-Innenseite zur Außenseite hin abnimmt. Diese Dämpfung gilt aber nur für den genau definierten Fall einer sich senkrecht zum Koppelspalt ausbreitenden TEM Welle. Für andere Einfallsrichtungen und Moden ergeben sich andere Dämpfungen, die deutlich geringer ausfallen können. Für derartige Anregung lässt sich aber die zweidimensionale Betrachtung nicht mehr durchführen. Ein vollständige 3D-Betrachtung wird nötig, wobei zusätzliche Parameter wie die Länge der Struktur und Randbedingungen an den Enden eingehen.



**Abbildung 4.53**

Logarithmische Darstellung der elektrischen Feldstärke (normiert) im Türspalt bzw. Choke bei einer Frequenz von 2,455 GHz.



**Abbildung 4.54**

Verschiedene getestete Schlitzbleche für den Türchoke mit Schlitzabständen von  $\lambda/4$  und  $\lambda/10$ .



**Abbildung 4.55**

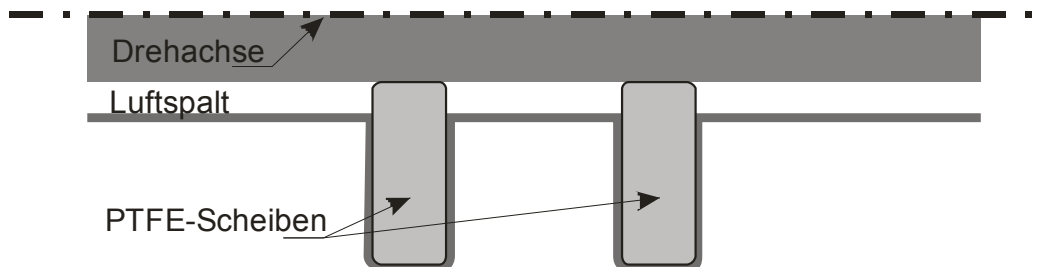
Türchoke an der Tür der HEPHAISTOS Hybridanlage (links mit geöffneter Abdeckung, wodurch die geschlitzten Bleche sichtbar werden, rechts mit Teflon Abdeckung und Fugen zur Wärmeausdehnung).

Um den Einfluss unerwünschter Moden weitgehend zu unterdrücken wird ausgenutzt, dass die Stromrichtung dieser höheren Moden nicht konstant senkrecht zum Koppelspalt ist. Durch geeignete Schlitze im Blech, können diese Moden daher in ihrer Ausbreitung weitgehend unterdrückt werden. Dies wurde experimentell untersucht mit verschiedenen Schlitzabständen, vergleiche Abbildung 4.54. Schlitzabstände von etwa  $\lambda/10$  erzielten dabei das beste Ergebnis. Abbildung 4.55 zeigt den in die Ofentür integrierten Choke bei der HEPHAISTOS Hybridanlage.

#### 4.2.1.2.3 Drehdurchführung für Rotations-Wickelkörper

Für eine gleichmäßige Aushärtung von Wickelkörpern ist es erforderlich diese entlang ihrer Achse während des Aushärtens kontinuierlich zu drehen. Damit wird vermieden, dass sich das Harz unter Einfluss der Schwerkraft ungleichmäßig verteilt. Zugleich verstärkt dies auch die Gleichmäßigkeit der Mikrowellenheizung.

Vorgesehen ist eine Drehung entlang der Längsachse in der Mitte der Ofenkammer mit Antrieb durch einen Elektromotor, der zum Schutz vor Wärme und Mikrowellen außerhalb des Ofens angebracht ist. Dafür wird die Ofentür durch ein andockbaren Stopfen ersetzt, der die Drehmechanik enthält. Zur Einkopplung des mechanischen Drehmoments wird eine Drehdurchführung benötigt. Damit keine Mikrowellenstrahlung nach außen gelangt ist eine geeignete Chokestruktur erforderlich. Dafür wird die Drehdurchführung als rotationssymmetrische koaxiale Struktur realisiert. Die Filterwirkung wird durch zwei geeignete Impedanzsprünge an den Übergängen zu einer Teflonscheibe mit geeigneten Abmessungen bewirkt. Während die Maße des Innenrohres (Drehstab) gegeben sind, können die Abmessungen der Teflonscheibe auf maximale Filterwirkung optimiert werden. Filterwirkung heißt, dass die Mikrowellenleistung am Choke reflektiert statt transmittiert wird. Die Wirksamkeit wird über die Transmission  $S_{21}$  beurteilt. Um diese zu verbessern werden zwei solche Filter hintereinander geschaltet. Da die Geometrie rotationssymmetrisch ist, wird zur Simulation das Programm Comsol Multiphysics verwendet. Abbildung 4.56 zeigt einen Querschnitt durch die Drehdurchführung bzw. das Simulationsmodell.

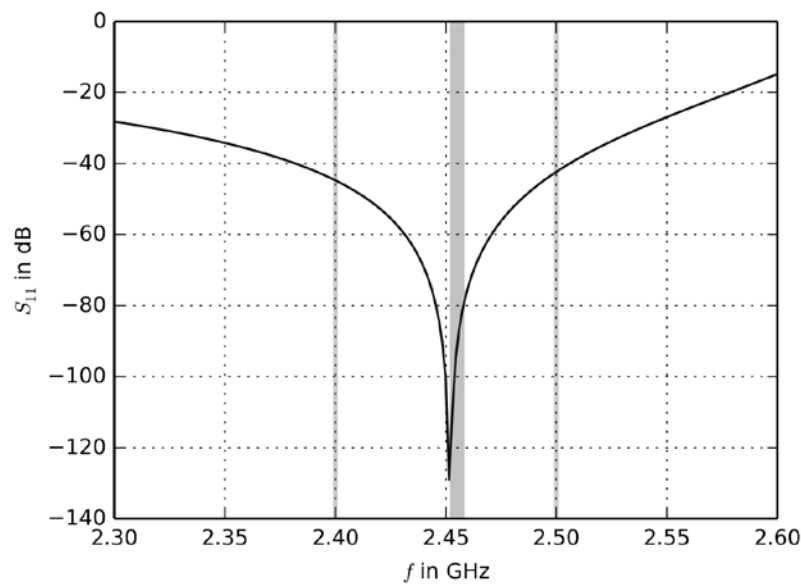


**Abbildung 4.56**

Querschnitt durch den Choke für die Drehdurchführung.

Abbildung 4.57 zeigt die berechnete Transmission nach Optimierung der Struktur. Diese ist besser als -40 dB im relevanten Frequenzbereich. Dies ist ausreichend, da die Chokestruktur zusätzlich in ein Gehäuse eingebaut ist und nicht unmittelbar zugänglich ist.

Abbildung 4.58 zeigt die fertig aufgebaute Drehdurchführung, welche statt der Ofentür an der Anlage andockt werden kann.



**Abbildung 4.57**

Transmission durch den Choke der Drehdurchführung



**Abbildung 4.58**

Drehdurchführung für die HEPHAISTOS Hybridanlage. In der Mitte ist der Antriebsmotor für die Drehachse. Der Choke ist hier nicht sichtbar in die Drehdurchführung integriert.

#### 4.2.1.3 Durchlaufsystem

Das one piece flow Konzept aus dem Lean Production aber auch Trocknungsprozesse bei Schüttgütern, feuchten Materialien oder Pulvern bedingen in vielen Fällen einen kontinuierlichen Prozessablauf, der sich grundsätzlich vom Batch-Betrieb unterscheidet. In der Wärmetechnik spricht man bei der Umsetzung meist von einem Durchlaufofen, der ein Förderband durch eine beheizte Zone führt. Im Rahmen des FLAME Projektes wurde ein solches System auch für die Mikrowellentechnik entwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil war dabei die Realisierung von Ein- und Auslauffunneln, die dazu genutzt werden können, die Mikrowellenleckstrahlung sicher zu vermeiden. Das vorgesehene Konzept beruhte dabei auf dem Prinzip von Reflektion und Absorption. Gemäß den normativen Sicherheitsanforderungen sind die Ein- und

Auslaufmodule der Anlage so auszugelegen, dass die Werte für die Leckstrahlung unterhalb der Personenschutzgrenzwerte liegen. Das Tunnelsystem wurde modular ausgelegt, so dass beim Entwicklungspartner KIT verschiedene Filtertypen zur Reflexion der austretenden Mikrowellenleistung für Versuchs- und Entwicklungszwecke konfiguriert werden können. Abbildung 4.59 zeigt das Mikrowellendurchlaufsystem.



**Abbildung 4.59**

Mikrowellendurchlaufsystem in Hybrid Technologie

#### 4.2.2 Entwicklung von adaptiven und selbstlernenden Regelungen

Auf Grundlage adaptiven und selbstlernenden Algorithmen wird eine neuartige Regelung für Erwärmungsprozesse mit Mikrowelle im HEPHAISTOS entwickelt. Diese wird es erlauben Bauteilimmanente Temperaturinhomogenitäten auf ein erlaubtes Mindestmaß zu minimieren. Hierzu wird die Temperatur des zu erwärmenden Werkstückes während des gesamten Prozesses beobachtet. Dies geschieht entweder über eine ausreichende Anzahl von faseroptischen Temperaturfühler oder besser flächig mittels einer Thermokamera. Auf diese Weise werden unerwünschte Abweichungen von der gewünschten Temperaturverteilung bzw. Homogenität unmittelbar erkannt. Auf diese Verteilung kann Einfluss genommen werden, da die Mikrowellenleistung beim HEPHAISTOS über ein räumlich verteiltes Antennensystem eingespeist wird, wobei die Sendeleistung jeder Antenne einzeln und stufenlos eingestellt werden kann. Dies erlaubt es, die Feldverteilung in der Kammer in gewissen Grenzen zu ändern. Ziel ist, dass die Feldverteilung laufend so anpasst wird, dass Bereiche, die zu kalt sind, einen höheren Leistungseintrag bekommen und zu warme Bereiche einen geringeren Leistungseintrag.

Die Feldverteilung wird außer durch die Einspeisung auch durch die Form und Eigenschaften des Werkstücks bestimmt. Diese sind in der Regel nicht mit der erforderlichen Präzision bekannt und ändern sich im Allgemeinen während des Prozesses durch die Erwärmung oder Zustandsänderungen des Materials. Somit ist es schwierig, einen deterministischen Zusammenhang zwischen der Ansteuerung der Mikrowelleneinkopplung und der resultierenden Erwärmung zu finden bzw. zu nutzen.

Zur Lösung des Problems werden verschiedene Verfahren implementiert und getestet. Diese lassen sich in adaptive und selbstlernende Verfahren einteilen. Ziel ist jeweils, dass sich die Regelung dynamisch laufend an die Gegebenheiten und Beladung in der Ofenkammer anpasst. Da die Funktionsweise der neuen Regelungsalgorithmen vergleichsweise kompliziert ist und Spezialwissen voraussetzt, erfolgt hier nur eine Überblicksdarstellung. Für weiterführende Details sei auf die wissenschaftlichen Veröffentlichungen [24-26] verwiesen.

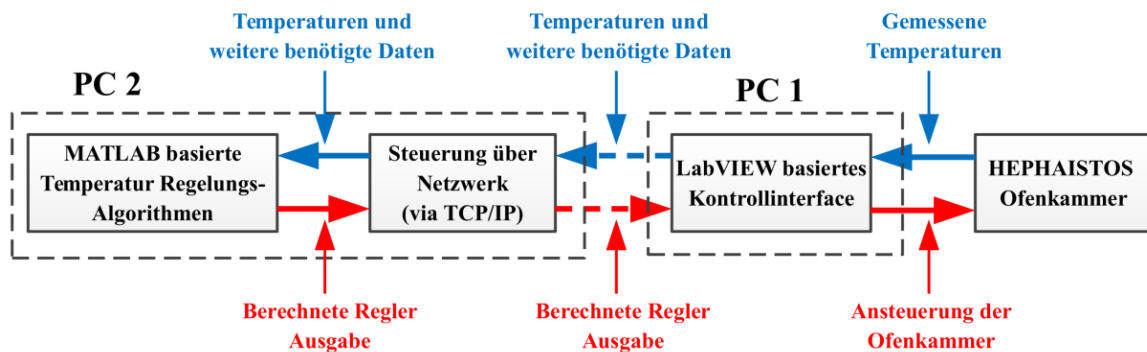
Ein wichtiger Unterschied der betrachteten Regelungsprinzipien zu einem herkömmlichen Regler ist, dass hier Temperaturvorgabe und gemessene Temperatur keine Einzelwerte, sondern vielmehr die angestrebte und tatsächliche räumliche Verteilung der Temperatur sind. Eine Minimierung der Regelabweichung bedeutet daher, die reale gemessene Temperaturverteilung an die gewünschte Vorgabe anzugleichen. Der wichtigste Sonderfall ist die Vorgabe einer homogenen Temperaturverteilung. Der Prozess wird hierbei somit aktiv auf eine möglichst homogene Temperaturverteilung hin gesteuert, statt sich auf physikalische Prozesse zum Temperatúrausgleich zu verlassen. Letzteres wäre problematisch, da die Wärmewirkung von Mikrowellen selbst bei homogenem elektromagnetischen Feld im Allgemeinen nicht gleich verteilt ist, da die physikalischen Eigenschaften des Werkstücks und die Randbedingungen in der Regel örtlich variieren.

Da das Verfahren eine permanente, ganzheitliche Erfassung der Temperatur im Werkstück vorsieht, beschränkt sich die Anwendung bei Verwendung einer Thermokamera momentan auf Werkstücke, deren Temperaturverteilung sich repräsentativ durch deren sichtbare Oberfläche abbilden lässt. Dies ist bei hinreichend dünnen flächigen Werkstücken der Fall.

#### 4.2.2.1 Implementierung der Regler-Software

Die Regler-Software besteht aus zwei Teilen. Die LabVIEW basierte Komponente stellt das Benutzerinterface und die Ansteuerung der Hardware zur Verfügung. Die Implementierung der Regelungsalgorithmen erfolgt mittels MATLAB und ist auf einem zweiten Computer (PC) installiert. Dies ist in Abbildung 4.60 visualisiert.

Die Steuerung der HEPHAISTOS Hardware geschieht über INTERBUS. Um die Regelung zukünftig auch im Hybrid-HEPHAISTOS einsetzen zu können, wird auch PROFINET unterstützt. Die Software empfängt Temperaturdaten aus der Ofenkammer (faseroptische Sensoren oder Thermokamera) und sendet Steuerbefehle an die Magnetrons.



**Abbildung 4.60**

Blockdiagramm zur Implementierung der Regler-Software.

Das Kontrollinterface bietet eine grafische Benutzerschnittstelle mit der Temperaturvorgaben inklusive des zeitlichen Verlaufs oder eine manuelle Steuerung der Mikrowellenleistung vorgenommen werden können. Auch die gezielte Ansteuerung einzelner Magnetrons ist damit möglich. Zudem bietet die Software die Möglichkeit, die mittels faseroptischer Sensoren gemessenen Temperaturen aufzuzeichnen. Das automatische Regeln nach diesen Temperaturen mittels eines gewöhnlichen PID Reglers ist ebenfalls möglich. Dies wurde direkt in LabVIEW mittels VIs und Toolboxes realisiert. Abbildung 4.61 zeigt ein Bildschirmfoto der grafischen Benutzerschnittstelle.

Die Algorithmen für die adaptiven bzw. selbstlernenden Regelungen sind in MATLAB implementiert, da LabVIEW als graphische Programmiersprache keine effizienten Möglichkeiten bereitstellt, um mit größeren Matrizen zu rechnen. Beide Systeme (LabVIEW und MATLAB) laufen auf zwei unterschiedlichen PCs,

da beide Systeme zeitkritisch sind und damit ausreichend Rechenleistung für beide zur Verfügung steht. Die Kommunikation zwischen beiden Systemen verläuft über eine Netzwerkschnittstelle via TCP/IP. Übertragen werden darüber sowohl Temperaturmessdaten aus der Ofenkammer zur Regelung als auch die Steuerkommandos vom Regler an die HEPHAISTOS Magnetron Steuerung.

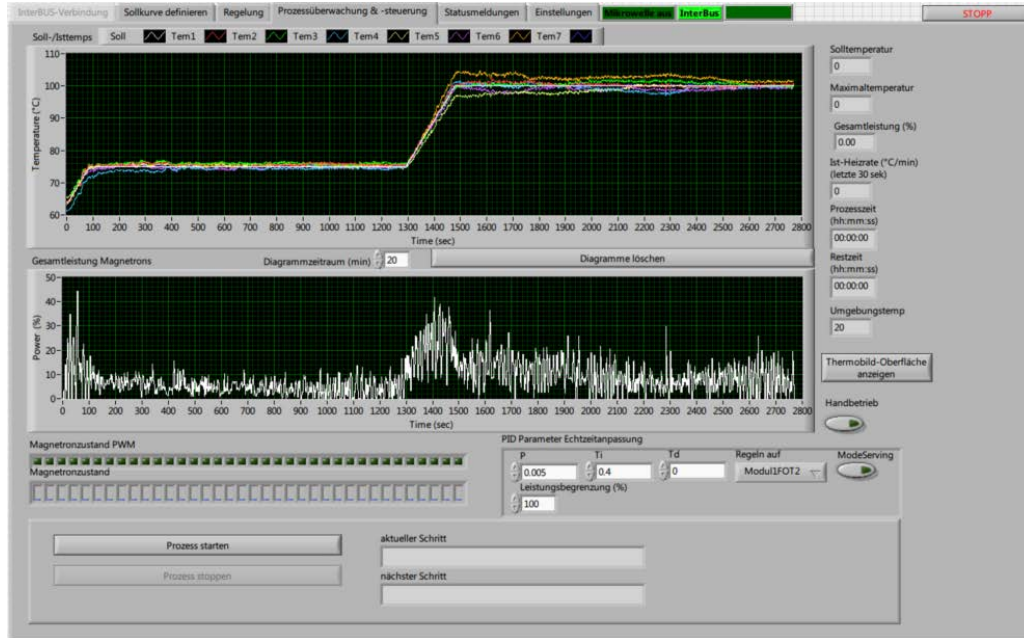


Abbildung 4.61

Grafische Benutzerschnittstelle (Bildschirmfoto) zur HEPHAISTOS Regel- und Kontrollsoftware.

#### 4.2.2.1.1 Adaptive Regelungsalgorithmen

Die adaptiven Regler benutzen einen Modell-Schätzer, welcher den Zusammenhang zwischen Ansteuerung der Magnetrons und deren Auswirkung auf die Temperaturverteilung abschätzt. Diese Abschätzung geht als dritte Eingangsgröße, neben der Temperaturvorgabe und der Ist-Temperaturverteilung in den Regler ein, der daraus gezielt die Leistungsverteilung für die einzelnen Magnetrons berechnet. Auf diese Weise passt sich der Regler selbständig laufend an die aktuellen Eigenschaften der Regelstrecke (Ofenkammer mit Werkstück) an. Abbildung 4.62 veranschaulicht die Struktur des adaptiven Reglers.

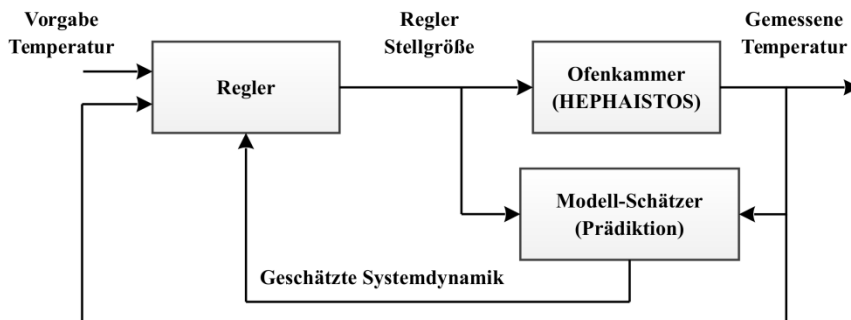


Abbildung 4.62

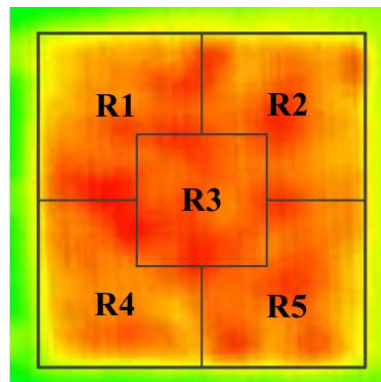
Blockschaltbild des adaptiven Reglers.

Der Modell-Schätzer hat die Aufgabe, das dynamische Verhalten in der Ofenkammer anhand der Stellgröße und der gemessenen Temperaturen abzuschätzen und dies dem Regler zur Verfügung zu stellen. Dafür werden zwei verschiedenen Möglichkeiten implementiert: Das Modellprädiktive Verfahren (MPC, Model Predictive Control) basiert auf physikalischer Modellierung des Erwärmungsprozesses und benutzt ein analytisches Zustandsraummodell. Ein weiteres Verfahren benutzt hierfür stattdessen ein geeignet programmiertes neuronales Netzwerk (NNC, Neural Network Control). Dies beobachtet direkt den Einfluss der Stellgröße auf die Temperaturverteilung und benötigt daher keine physikalische Modellierung.

#### 4.2.2.1.2 Selbstlernender Regelalgorithmus

Dieser Regler basiert auf dem Prinzip des sogenannten bestärkenden Lernens (RLC, Reinforcement Learning Control). Hierfür wird Temperatur der gesamten Oberfläche mittels einer Thermokamera erfasst. Diese wird in Regionen eingeteilt. Bestimmt wird die minimale und maximale Temperatur am Werkstück sowie die Positionen (Regionen) in welchen diese auftreten (vergleiche Abbildung 4.63).

Die minimale und maximale Temperatur bilden zusammen mit den zugehörigen Regionen einen 4-elementigen Datenvektor welcher zusammen mit der Temperaturvorgabe einem Markow-Entscheidungsprozess zugeführt wird. Daraus ergibt sich die Ansteuerung für die Leistungsverteilung auf die Magnetrons in der Ofenkammer. Eine Einschränkung dieses Prinzips ist, dass nur eine feste Zielvorgabe für die Temperatur möglich ist und der Lernvorgang mehrere Durchläufe benötigt.



**Abbildung 4.63**

Temperaturmessung und Aufteilung in Regionen für den selbstlernenden Regler.

#### 4.2.2.2 Versuche mit neuen Regelungsprinzipien

Um die Vorteile der neuen Regelprinzipien zu demonstrieren, wurden Versuche im HEPHAISTOS durchgeführt. Dabei wird der Aufbau zur Aushärtung von CFK mit Vakuum-Anpressdruck nachgestellt. Statt CFK wird jedoch eine 2 mm dicke Silikon-Gummi-Folie eingelegt, da diese wiederverwendbar ist. Diese befindet sich zwischen einem Aluminiumträger und einer mikrowellenaktiven Folie. Diese Folie besteht aus einem speziellen mikrowellenabsorbierenden Material. Die oberste Schicht bildet eine Folie unter der ein Vakuum erzeugt wird. Der äußere Luftdruck presst diese Konstruktion zusammen und zugleich werden Luftschlüsse vermieden. Die Abmessungen sind 0,5 m x 0,5 m. Abbildung 4.64 zeigt den zugehörigen Aufbau.

Während der Tests wurde der zeitliche Verlauf für den Sollwert einer homogenen Temperaturverteilung, bestehend aus zwei abwechselnden Erwärmungs- und Haltephasen, vorgegeben wie in Abbildung 4.65 dargestellt.

Aufgezeichnet wird der zeitliche Verlauf der Temperatur am Werkstück über der Zeit an 5 Positionen, die über die Werkstückoberfläche verteilt sind.

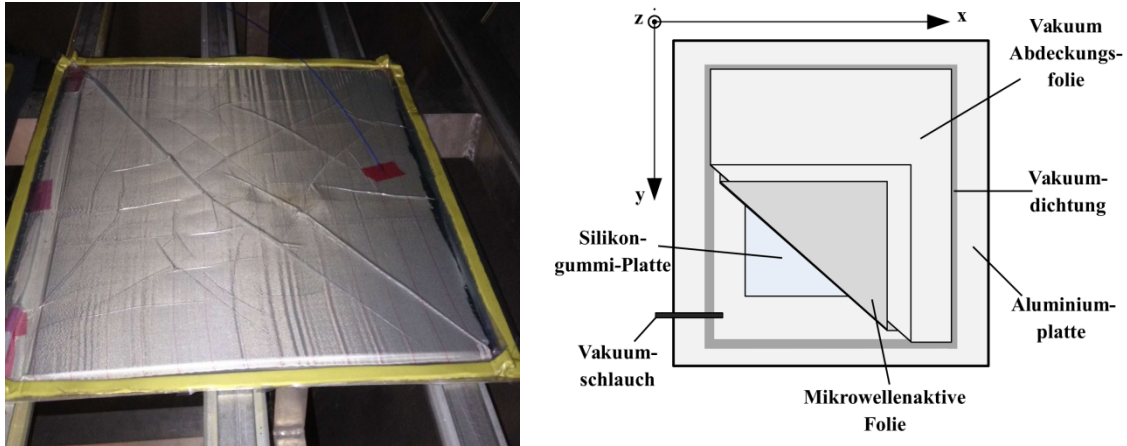


Abbildung 4.64

Versuchsaufbau zum Testen der neuen Regelung. Rechts im Bild ist der schematische Aufbau dargestellt.

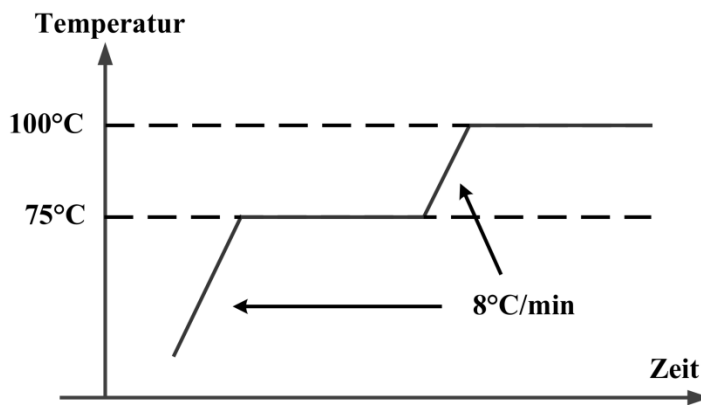


Abbildung 4.65

Zeitlicher Verlauf der Vorgabe der Sollwerttemperatur.

Für Referenzzwecke und um die Performanz für die neuartigen Reglerprinzipien testen zu können, wurde der Prozess zunächst mit einem PID-Regler gefahren. Der zeitliche Verlauf der gemessenen Temperaturen ist in Abbildung 4.66 gezeigt. Der Unterschied zwischen den Kurven ist ein Maß für die erreichte Homogenität.

Wie zu erkennen verläuft nur die Temperatur T1 nach dem Sollwert, da nur diese als Eingangsgröße für die Regelung dient. Die übrigen Temperaturen haben keinen direkten Einfluss auf die Regelung. Die Temperaturdifferenz beträgt hier bis zu 14°C.

In Abbildung 4.67 ist der gemessene Temperaturverlauf für den modellprädiktiven Regler (MPC) dargestellt. Im Unterschied zum PID Regler gibt es hier keine ausgezeichnete Temperatur, die als Regelgröße dient. Daher folgt keine der Temperaturen T1-T5 direkt der Solltemperatur, wie dies T1 beim PID Regler tat. Die resultierende Temperaturdifferenz aller Messpunkte ist mit 7,3°C jedoch geringer. Allerdings weist T3 in der zweiten Erwärmungsphase einen deutlichen Überschwinger in der Temperatur auf, der vom Regler jedoch später kompensiert wird.



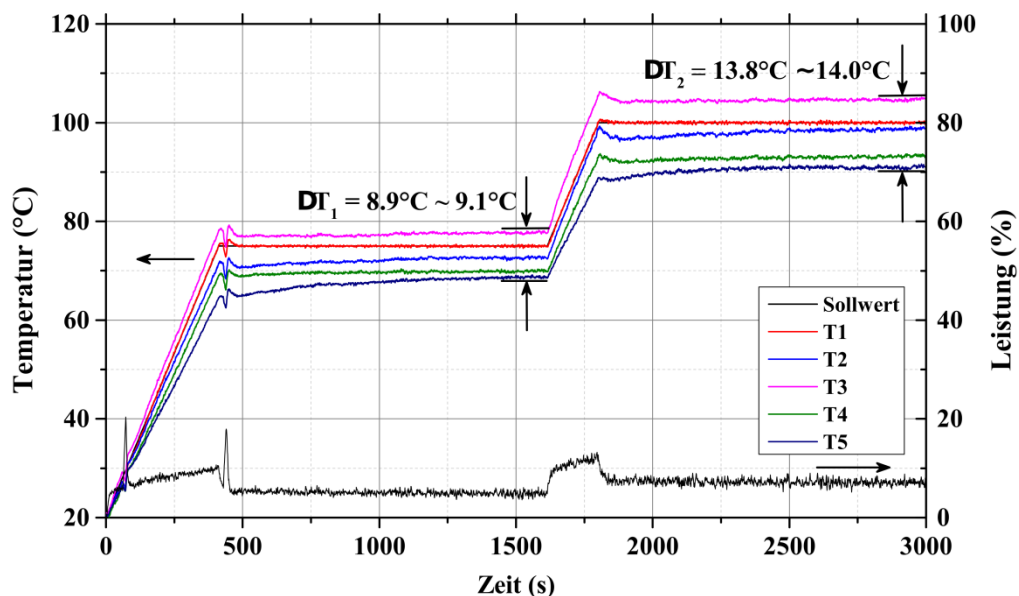


Abbildung 4.66

Gemessener Temperaturverlauf mit PID Regler an den Messpunkten. Mit eingezeichnet ist der Verlauf der Mikrowellenleistung (unterste Kurve).

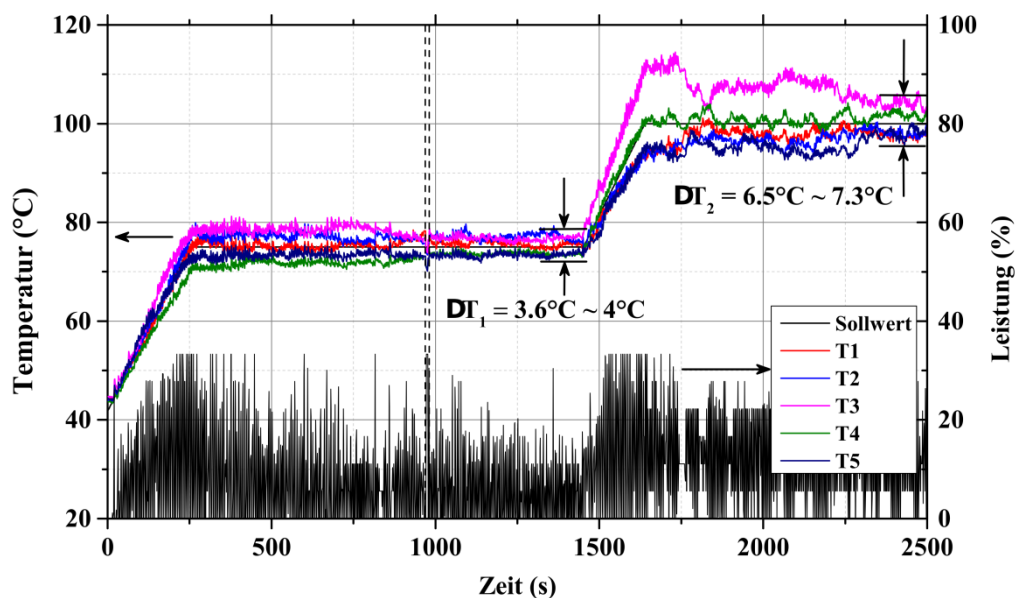


Abbildung 4.67

Gemessener Temperaturverlauf für den modellprädiktiven Regler (MPC) an den Messpunkten. Mit eingezeichnet ist der Verlauf der Mikrowellenleistung (unterste Kurve).

In Abbildung 4.68 ist der gemessene Temperaturverlauf für den adaptiven Regler mit neuronalem Netzwerk gezeigt. Die Temperaturdifferenz ist mit max. 6°C besser als für den modellprädiktiven Regler, da hier das reale Verhalten der Ofenkammer mit Werkstück berücksichtigt wird. Auch folgt der Temperaturverlauf an allen Messpunkten besser der Vorgabe.

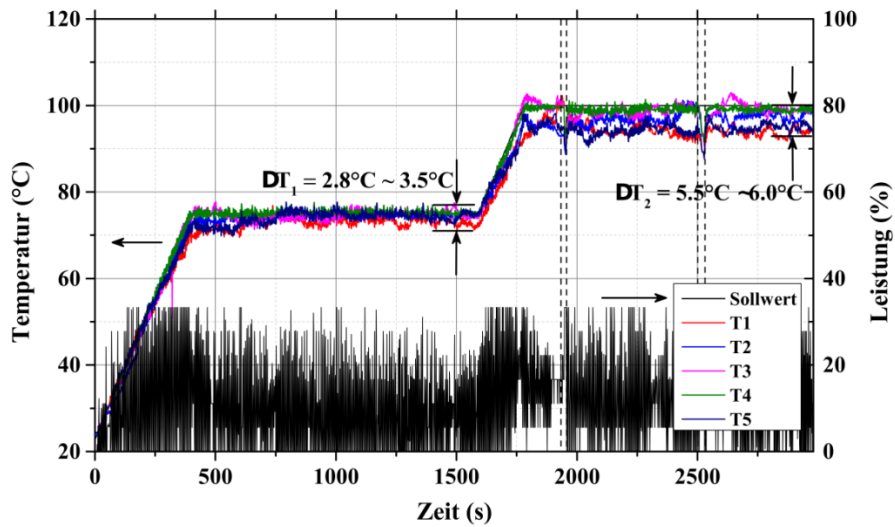


Abbildung 4.68

Gemessener Temperaturverlauf für den adaptiven Regler mit neuronalem Netzwerk (NNC) an den Messpunkten. Mit eingezeichnet ist der Verlauf der Mikrowellenleistung (unterste Kurve).

Der selbstlernende Regler benötigt einige Prozessdurchläufe um sich optimal an den Prozess anzupassen. In Abbildung 4.69 sind die Temperaturverläufe für den ersten (initialen) Durchlauf und nach zwei weiteren Durchläufen gezeigt.

Prinzipbedingt ist bei diesem Reglertyp nur die Vorgabe einer Zieltemperatur möglich, die hier zu 80°C gewählt wurde. Die Aufheizphase von 30°C bis 75°C wurde mittels MPC bzw. NNC geregelt. Im ersten Durchlauf (ohne Vorwissen) ist das Ergebnis geringfügig schlechter als beim PID Regler. Nach drei Durchläufen ist das Ergebnis ähnlich wie beim Regler mit neuronalem Netzwerk. Zu beachten ist jedoch, dass hier die minimale und maximale Temperatur über die gesamte geheizte Fläche betrachtet werden und nicht nur an fünf ausgewählten Punkten. Das Ergebnis ist daher mehr aussagekräftig. Allerdings kann die Temperaturspanne hier höher sein als im Fall einzeln ausgewählter Punkte, selbst wenn die Homogenität insgesamt besser ist. Daher lässt sich das Ergebnis nicht direkt mit den adaptiven Verfahren vergleichen.

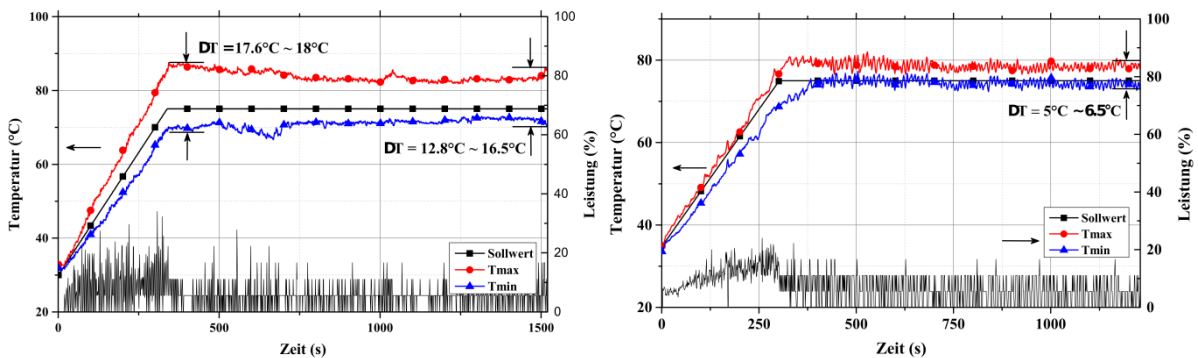
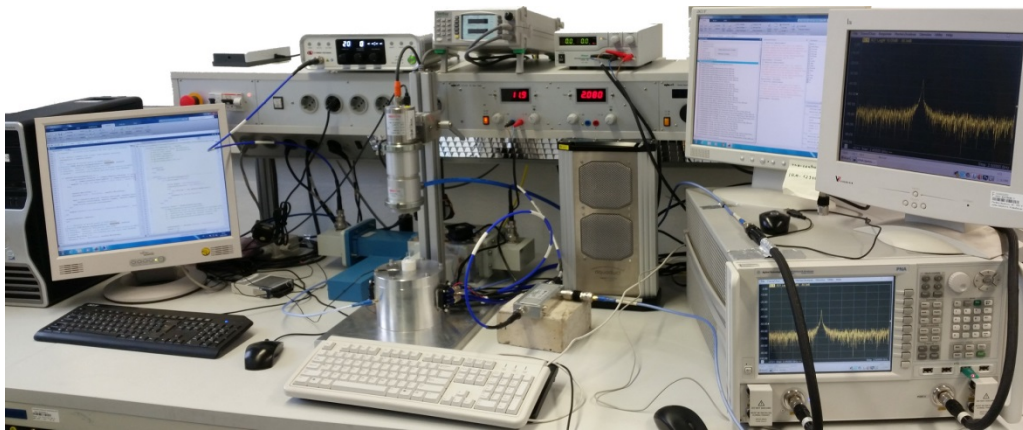


Abbildung 4.69

Gemessener Temperaturverlauf für den selbstlernenden Regler (RLC) an den Messpunkten. Mit eingezeichnet ist der Verlauf der Mikrowellenleistung (unterste Kurve). Links: nach 1 Iteration, rechts: nach 3 Iterationen.

### 4.2.3 Dielektrische Charakterisierung

Die Entwicklung von mikrowelleneigneten Werkzeugen und Harzen bedarf der Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften aller Komponenten die dem Mikrowellenfeld ausgesetzt sind und damit auch das Systemverhalten beeinflussen. Die Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften ist Voraussetzung für die Berechnung des elektromagnetischen Feldes womit prozessangepasste Mikrowellensysteme üblicherweise designe und optimiert werden. Schwierig in diesem Zusammenhang ist die Charakterisierung von Harzen, das dessen dielektrischen Eigenschaften sich während des Aushärteprozesses sowohl mit der Temperatur als auch mit der Zeit ändern. Die dielektrischen Eigenschaften sind somit nicht nur eine Funktion der Temperatur sondern auch des Aushärtezustandes.



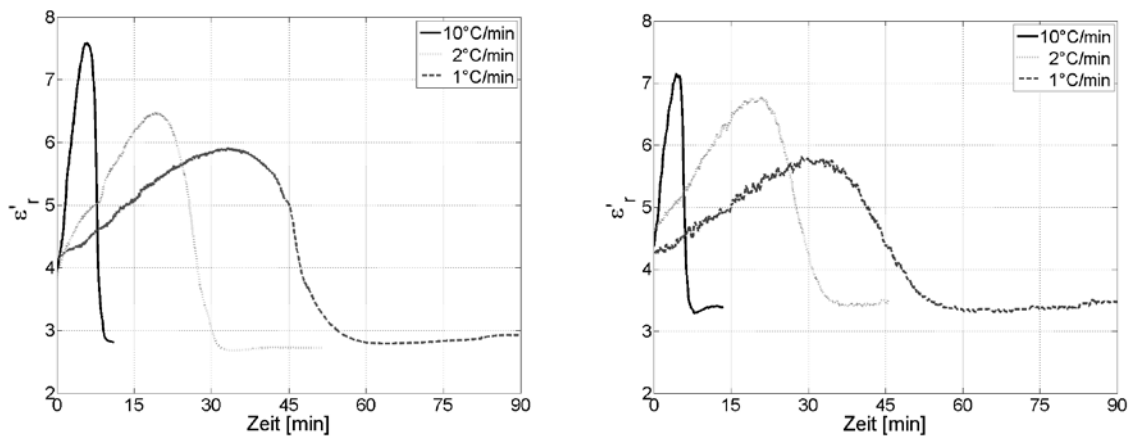
**Abbildung 4.70**

Messplatz für dielektrische in situ Messungen während der Mikrowellenprozessierung. In der Mitte befindet sich der Resonator mit der Probe, darüber das Pyrometer zur Temperaturmessung. Rechts im Bild ist der Netzwerkanalysator. Auf der oberen Ablage: Leistungsverstärker und Messgeräte zur Mikrowellenleistungsmessung.

Für diesen Zweck wurde ein neuartiger Messaufbau entwickelt, der es erlaubt, die dielektrischen Eigenschaften einer Materialprobe in-situ während der Mikrowellenunterstützten Erwärmung bei 2,45 GHz zu messen[27]. Es besteht aus einer resonanten zylindrischen Kavität, in welcher die Materialprobe mit definierter Geometrie platziert wird. Aus dem Vergleich des Resonanzverhaltens des leeren bzw. mit Probe bestückten Resonators lassen sich auf Basis der Störkörpermethode die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r'$  und der dielektrische Verlustfaktor  $\epsilon_r''$  bestimmen. Ersteres ist ein Maß für die in dem Material gespeicherte elektromagnetische Energie, letzteres ein Maß für die im Material absorbierte Leistung. Um die sich im Resonator befindliche Probe erwärmen zu können, wird das für die Messung genutzte Signal eines vektoriiellen Netzwerkanalysators über einen geeigneten Verstärker auf Leistungen von bis zu 100 mW verstärkt und in den Resonator eingekoppelt. Parallel dazu wird die Temperatur der Probe permanent mit einem Pyrometer erfasst und über einen Computergesteuerten PID-Regelalgorithmus entlang eines vorgegebenen Temperaturprofils gesteuert. Abbildung 4.70 zeigt den hierzu aufgebauten Messplatz.

#### 4.2.3.1 Messergebnisse für Sika Epoxidharze

Im Folgenden werden die Ergebnisse der dielektrischen Messung für zwei von Sika für das Projekt entwickelte Epoxidharze gezeigt. Dargestellt werden getrennt der Realteil  $\epsilon_r'$  der Permittivität und der Imaginärteil  $\epsilon_r''$  als Funktion der Zeit bei konstanter Heizrate. Die Daten repräsentieren den gesamten Prozess bei unterschiedlichen Heizraten von 1, 2 und 10 °C/min, angefangen vom Ausgangsprodukt bis zum fertig ausgehärteten Harz. Die Temperatur wird geregelt, lässt sich aber wegen der insbesondere bei hohen Heizraten einsetzenden Exothermie nur eingeschränkt kontrollieren. Der gemessene Temperaturverlauf über der Zeit wird mit angegeben. Die Ergebnisse für die FLAME-Harzproben 17 und 20 sind in Abbildung 4.71 bzw. Abbildung 4.72 gezeigt.

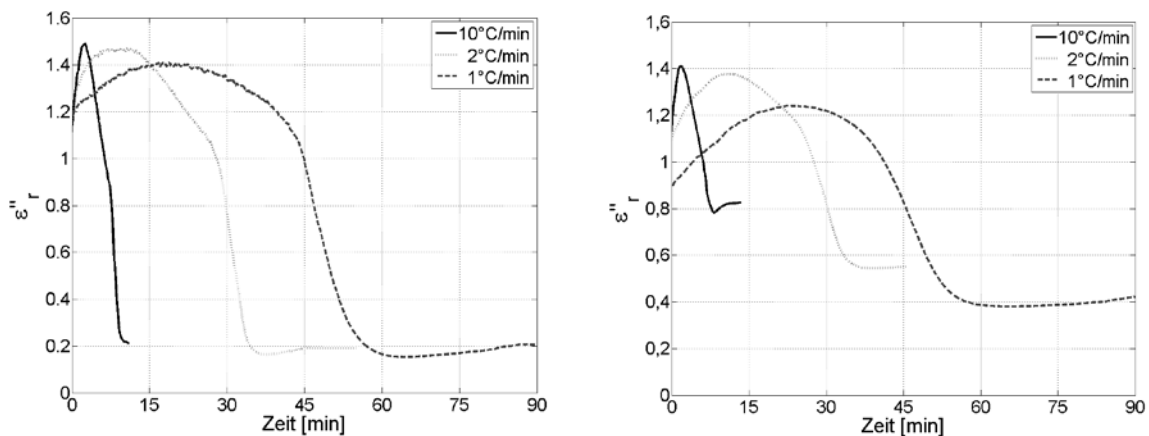


**Abbildung 4.71**

Gemessene Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  der Sika Harzprobe 17 (links) und 20 (rechts) als Funktion der Zeit bei unterschiedlichen Heizraten.

Zu erkennen ist, dass der Permittivitätsverlauf von der Heizrate abhängig ist. Insbesondere ist bei Probe 20 ein Unterschied in der Permittivität am Ende des Prozesses zu erkennen. Daraus folgt, dass das Endergebnis vom Prozessverlauf abhängt. Bestärkt wird diese Feststellung auch dadurch, dass die ausgehärteten Proben je nach Heizrate unterschiedliche Färbung aufwiesen. Es ist also wichtig für die Messung genau die Prozessgeschwindigkeit zu wählen, die auch später im Prozess verwendet wird.

Abbildung 4.73 zeigt die zu den Messungen gehörenden gemessenen Temperaturverläufe. Die ausgeprägte Spitze für die Heizrate von 10°C/min ist auf die einsetzende Exothermie des Epoxydharzes zurückzuführen. Diese lässt sich nicht ausregeln.



**Abbildung 4.72**

Gemessener dielektrischer Verlustfaktor  $\epsilon''$  der Sika Harzprobe 17 (links) und 20 (rechts) als Funktion der Zeit bei unterschiedlichen Heizraten.

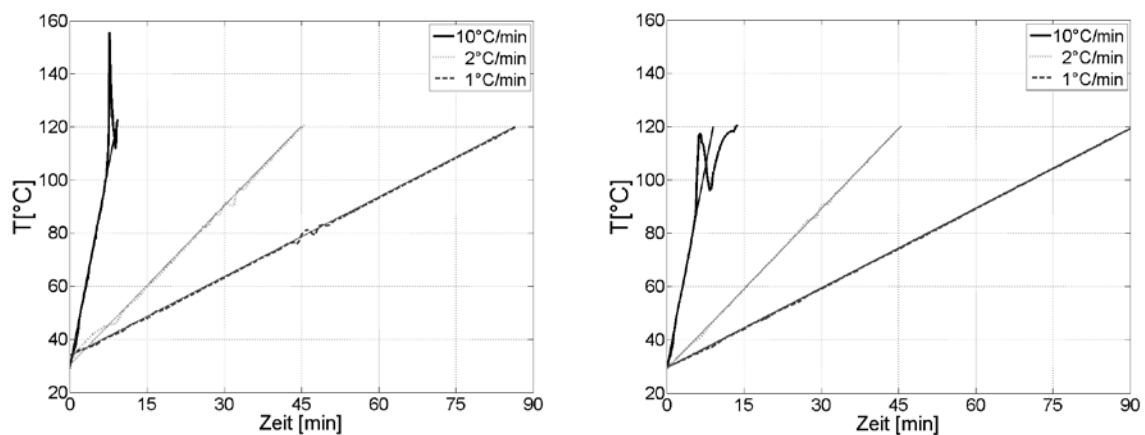


Abbildung 4.73

Gemessener Temperaturverlauf während der Messung der dielektrischen Permittivität.  
Links: FLAME Harz Probe Nr. 17, rechts: FLAME Harz Probe Nr. 20.

## 4.3 Wickeltechnik

In diesem Arbeitspaket wurde eine geeignete energieeffiziente Mikrowellenkammertechnologie für das Aushärten von CFK Präzisionswickelkörpern mit einer Matrix aus Epoxidharzen entwickelt. Auf Grundlage der definierten Demonstratorbauteile wurde die weltweit einzigartige modulare HEPHAISTOS Technologie den Bedürfnissen entsprechend modifiziert und mit geeigneten Werkzeugen versehen. Darüber hinaus wurde die Mikrowellentechnologie mit konventionellen Heizmethoden kombiniert, um auftretende Temperaturgradienten, die für diese Bauteile besonders kritischen sind, auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Neben einer Harzentwicklung mit dem Ziel die Ankopplung der Mikrowellen an den Faserverbundwerkstoff zu optimieren wurden geeignete Prozessparameter erarbeitet, so dass die in konventionellen Verfahren erzielten Spezifikationen für das endgültige Produkt eingehalten werden. Darüber hinaus wurde das Mikrowellenverfahren mit etablierten konventionellen Verfahren energetisch verglichen.

### 4.3.1 Entwicklung eines geeigneten mikrowellenverträglichen Werkzeuges zum Rotieren der Wickelkörper beim Aushärten

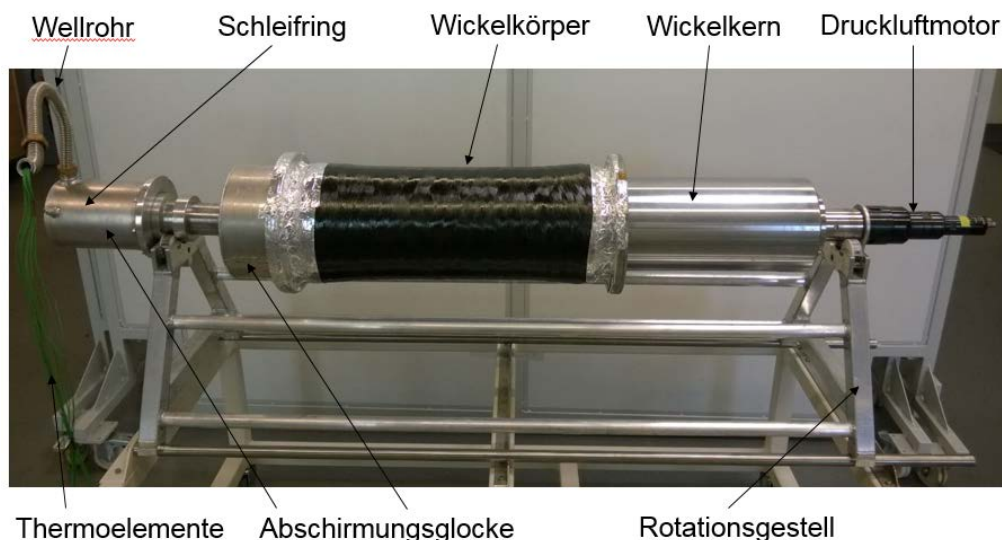
Für das Aushärten von CFK Präzisionswickelkörpern in einem Mikrowellenfeld spielen verschiedene Einflussfaktoren eine Rolle und bestimmen das Ergebnis. Einer der Einflussfaktoren ist die Benutzung eines geeigneten Wickelwerkzeuges, welches im Rahmen des FLAME Projektes entwickelt wurde. Das Wickelwerkzeug musste verschiedene Aufgaben und Kriterien erfüllen:

- Sichere Aufnahme der bewickelten Werkzeugkerne
- Gleichmäßige Rotation des Wickelkernes während der Mikrowellenaushärtung
- Messwerterfassung (Aufnahme eines Schleifringübertragers zur Datenübertragung)
- Mikrowellengerechte Bauweise um Einkopplung und Erwärmung zu verhindern (Werkstoffe, Grundgeometrie, Radien etc.)
- Anpassung auf die Kammergröße
- Einsetzbarkeit in Mikrowellenofen und Trockenschrank
- Anpassung Wickelkörpergröße

Dickwandige Wickelkörper, wie der gewählte Demonstrator-Wickelkörper mit den Abmessungen von 232 x 200 x 650 mm, müssen zwingend waagrecht unter Rotation zum fertigen Composite Bauteil ausgehär-

tet werden. Andernfalls würde das nach dem Wickelvorgang noch niedrigviskose Matrixharz aufgrund der Schwerkraft nach unten aus dem Wickelkörper auslaufen, was einen inakzeptablen Matrixverlust sowie eine ungleichmäßige Faser-Matrixverteilung über den Umfang zur Folge hätte. Zudem darf der nicht ausgehärtete Wickelkörper keine radiale Belastung, (z.B. durch Aufliegen während des Transportes), erfahren, da diese ebenfalls zu bleibenden Schäden durch Verformungen und Verschiebungen im Faserpaket führen. Dieser Einfluss ist unabhängig von der benutzten Energiequelle, d.h. auch bei den Mikrowellenhärtprozessen war eine Rotationsbewegung notwendig. Zur Problemlösung wurde zunächst ein Druckluftmotor mit dem Wickelkern verbunden, der einen kontinuierlichen Betrieb während des Aushärtens erlaubte. Im Prinzip ist die Rotation nur bis zur ersten Aushärtetemperatur notwendig, da sich hier die Geometrie des Bauteils einstellt und bei den höheren Temperaturen zur Erlangung der  $T_G$  Werte keine gravimetrischen Einflüsse mehr ausschlaggebend sind. In einem zweiten Schritt wurde der Druckluftmotor durch eine Drehdurchführung ersetzt. Diese erlaubte die Übertragung einer Rotationsbewegung in eine Mikrowellenkammer bei gleichzeitiger Vermeidung von Leckstrahlung (siehe Kap. 4.3.1).

Zur Erfassung der Temperaturverteilung während des Aushärtprozesses wurden bis zu 8 Thermoelemente des Typs K mit eingewickelt und in bestimmten Abständen im Wickelkörper verteilt. Diese Sensoren lieferten kontinuierlich Daten während des Härteprozesses und wurden auch als Regelfühler verwendet. Eine Mehrfach Temperaturerfassung ist bei HEPHAISTOS Anlagen über die SIMPAC Steuerung Standard, ebenso wie die Auswahl verschiedener Messstellen als Regelfühler. Die Anforderung der Rotation wurde über einen Schleifring Messwertkoppler gelöst. Die Thermoelemente wurden durch die Deckscheibe und die Rotationsachse des Werkzeuges zum Schleifring geführt. Der Schleifringanschluss wurde permanent mit Ausgleichsleitungen und Steckverbindern versehen, um einen möglichst einfachen Anschluss der Thermoelemente zu gewährleisten. Da die Thermoelemente nach dem Härteprozess fest mit der Matrix verbunden waren, war eine neue Bestückung pro Wickelkörperversuch notwendig.



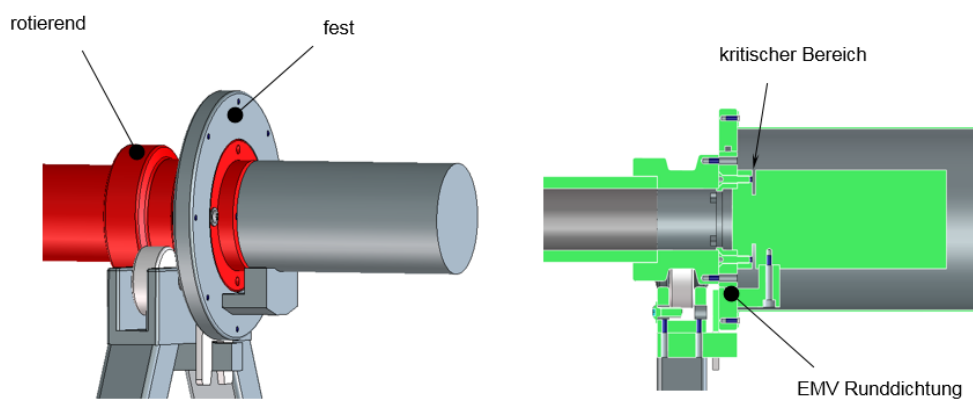
**Abbildung 4.74**

Mikrowellenverträgliches Aushärtewerkzeug für Wickelkörper

Schwieriger gestaltete sich die Anforderung nach einem mikrowellenverträglichem Werkzeug, d.h. das Werkzeug war während des gesamten Härteprozesses innerhalb des Mikrowellenfeldes und damit der Mikrowellenstrahlung ausgesetzt. Neben der Vermeidung von ungünstigen, elektrisch wirksamen Geometrien (Ausbildung von Antennenstrukturen) und der Verwendung von leitfähigen oder isolierenden Materialien, war auf eine sichere Abschirmung der Messwerterfassung zu achten. Sämtliche Verbindungs-

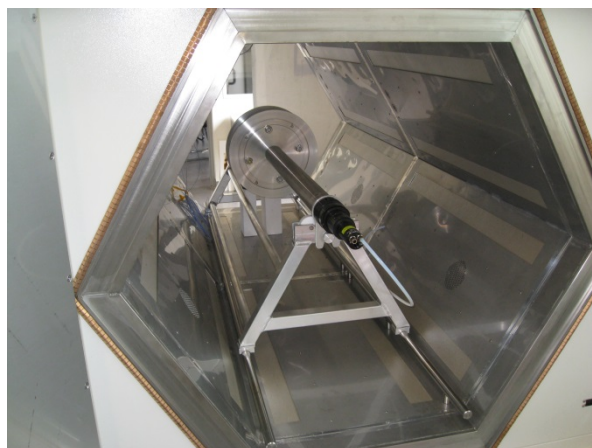
stellen und bewegten Flächen wurden EMV-gerecht geschirmt. Die Ausgleichsleitungen der Thermoelemente wurden über ein Wellrohr geschirmt aus der Kammer geführt und mit der Steuerung verbunden. Die vorgenommenen Maßnahmen führten zu keiner Beeinflussung der Messergebnisse durch die Mikrowellenstrahlung.

Die im Rahmen des Projektes zur Verfügung stehenden HEPAHISTOS Anlagen wiesen eine bestimmte Kammergröße auf. Um die Transportwege möglichst gering zu halten, wurde entschieden, den Körper bei Schunk in Heuchelheim zu wickeln und im gefrorenen Zustand mit dem Werkzeug zu Vötsch nach Reiskirchen zu transportieren. Die Werkzeuggröße wurde dabei von der vorhandenen Applikationsanlage mit den Abmessungen 2 m Länge und 1 m Durchmesser des Hexagonhüllkreises bestimmt. Damit stand ausreichend Platz für die Wickelkörper zur Verfügung, um den Anforderungen an eine Flywheel Konstruktion gerecht zu werden. Eine finale Einbindung des Mikrowellenhärtens in den Produktionsprozess erfolgt idealerweise ohne die Zwischenschritte Einfrieren und Transport.



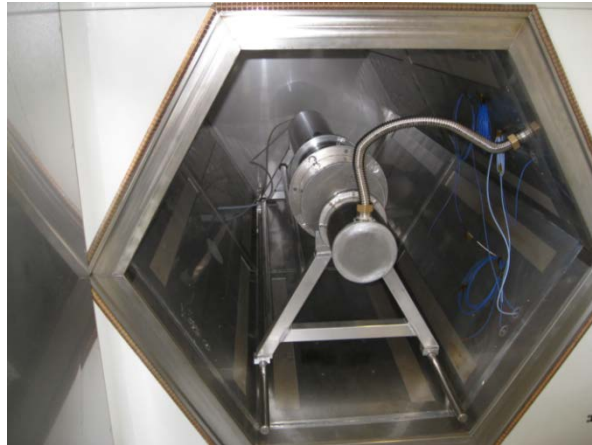
**Abbildung 4.75**

EMV-Maßnahmen Schleifringübertrager



**Abbildung 4.76**

Aushärtewerkzeug in Mikrowellenkammer



**Abbildung 4.77**

Werkzeug in Mikrowellenkammer mit Thermoelementauskopplung über Wellrohr

### 4.3.2 Optimierung eines für den mikrowellenunterstützten Wickelprozess geeigneten Harzes

Die Sika Deutschland GmbH beschäftigt sich seit Mitte der 90er Jahre intensiv mit der Entwicklung und den Verarbeitungstechniken aus dem Bereich Composites. Basierend auf einer Jahrzehntelangen Erfahrung mit flüssigen Epoxid- und Polyurethanharzsystemen für Anwendungen im Werkzeugbau, wurde in diesem Zeitraum eine umfangreiche Produktpalette an Harzsystemen entwickelt und ein breites Wissen bzgl. der Verarbeitungsverfahren aufgebaut.

Zum Zeitpunkt des Projektstartes lagen bei der Sika Deutschland GmbH keine grundlegenden Erkenntnisse über die Mikrowellenunterstützte Aushärtung von flüssigen Epoxidharzen vor, jedoch konnte auf Erfahrungen des Sika AG Mutterkonzerns zur mikrowellenunterstützten Aushärtung von Klebstoffen zurückgegriffen werden.

Die Harzentwicklung im Rahmen des Projektes FLAME wurde gezielt auf Anwendungen der Wickeltechnik im Tauchbadverfahren bei der Fa. Schunk Kohlenstofftechnik (SKT) ausgerichtet. Die Anforderungen der Fa. SKT an das Harzsystem für die Herstellung von dickwandigen Präzisionswickelkörpern sind sehr hoch. So ist eine geringe Mischviskosität und ein sehr geringer Viskositätsanstieg über 2 Stunden bei 50°C Harzsystemtemperatur sowie eine geringe Exothermie des Harzsystems erforderlich, um Microrisse im Bauteil bei der Aushärtung zu vermeiden. Bei Harzsystemen, die sich für diese Anwendungen eignen, ist sichergestellt, dass sich auch bei weiteren industriellen Anwendern starkes Interesse erzeugen lässt.

Die grundsätzliche Wahl fiel auf ein 3 Komponenten Anhydrid- Epoxidharzsystem, bestehend aus Harz, Härter (Anhydrid) sowie Beschleuniger. Nur mit einem solchen 3-Komponentensystem konnten die grundlegenden Anforderungen erfüllt werden. Evtl. notwendige Adaptionen für weitere Anwendungen, insbesondere im Hinblick auf die Viskosität und Verarbeitungszeit, sind jedoch in Zukunft möglich.

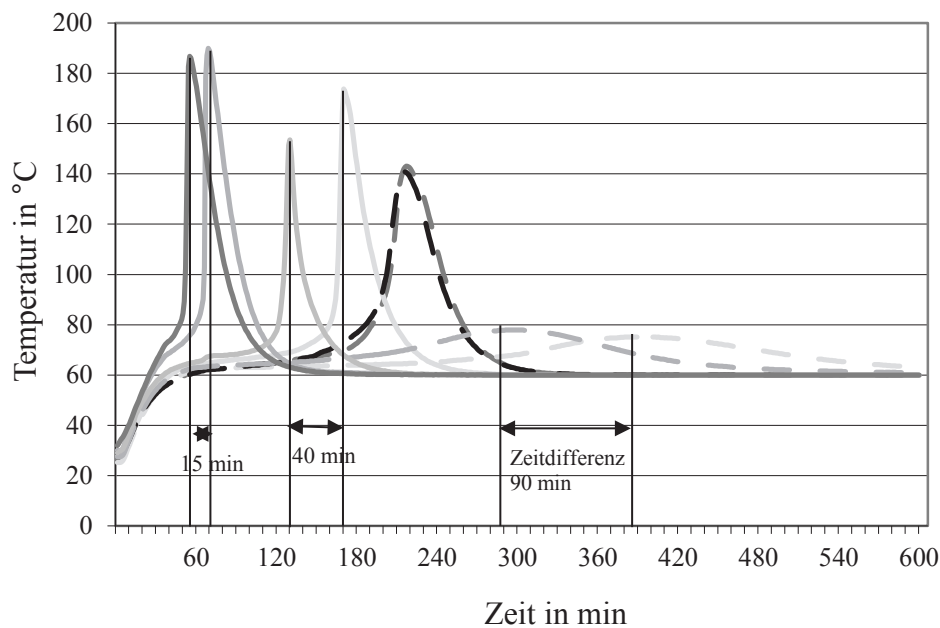
Da sich sowohl die Viskosität als auch die Verarbeitungszeit eines Harzsystems sehr stark Temperaturabhängig verhalten, musste diesem Aspekt eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Die Erreichung des Meilensteins „optimiertes, mikrowellengeeignetes Harzsystem“ im 20. Projektmonat war zu jedem Zeitpunkt das erklärte Ziel, um im verbleibenden Projektzeitraum die Verarbeitungs- und Aushärteeigenschaften bei Fa. SKT hinreichend prüfen zu können.



In 2011 und 2012 wurde an zahlreichen Epoxidharzformulierungen die Reaktionskinetik und Viskosität als Funktion der Zeit bei konstanten Temperaturen von 40°C, 50°C, 60°C, 70°C und 80°C inklusive Zwischenstufen gemessen, um ein Harzsystem mit geeigneter Tropfzeit/ Viskosität zu identifizieren. Für die Harzsysteme, welche diesem Anforderungsprofil am besten entsprachen, wurden die mechanischen Kennwerte ermittelt.

Weiterführend wurden an diesen Epoxidharzformulierungen die Wärmeausdehnungskoeffizienten bestimmt. Im Temperaturbereich bis zur Glasübergangstemperatur ( $T_G$ ) lag dieser Wert bei allen Systemen bei ca. 60  $\mu\text{m}/\text{m K}$ .



**Abbildung 4.78**

Reaktionsverlauf verschiedener Anhydridsysteme bei  $T=60^\circ\text{C}$  Ansatz 100g ohne Isolierung

Gegen Ende des Jahres 2012 wurde mit Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Sika AG in Zürich damit begonnen, das Ansprechverhalten der potentiellen Harzsysteme gegenüber dem Mikrowellen- Ansprechverhalten zu analysieren und zu optimieren. Dazu wurden zunächst die Parameter der dort zu wissenschaftlichen Untersuchungen vorhandenen Mikrowelle und unter Verwendung dieser Harzsysteme ermittelt. Expertenwissen aus früheren Projekten der Sika AG Schweiz zur mikrowellenunterstützten Aushärtung von Klebstoffen wurde eingeholt und umgesetzt.

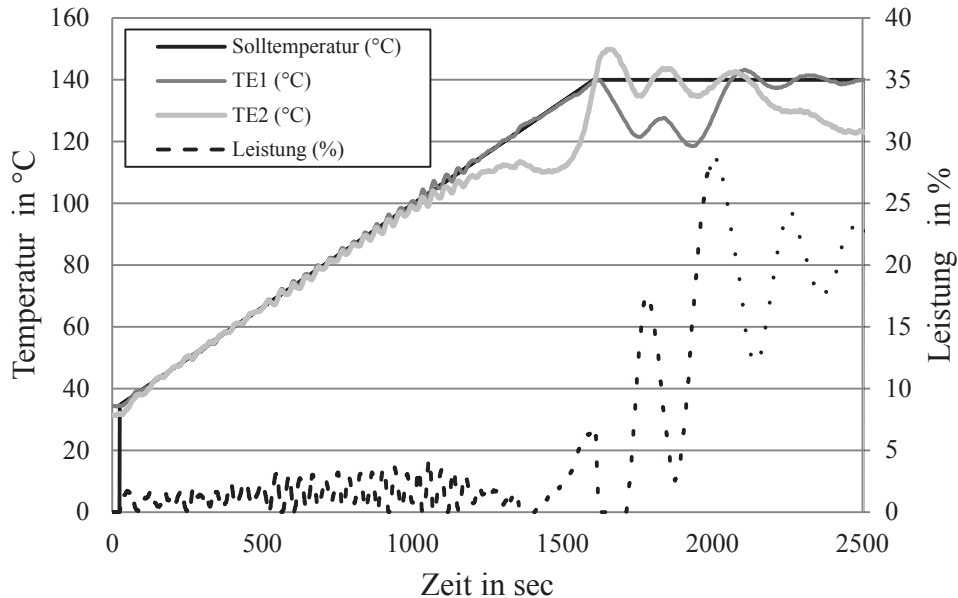
Es wurden weiterführende Untersuchungen mit größtenteils kohlenstoffbasierten Additiven durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Leistungsparameter der Mikrowelle als auch die prozentualen Beimischungen der relevanten Additive angepasst.

Es stellte sich heraus, dass die meisten dieser Zusatzstoffe stark negativen Einfluss auf die Viskosität sowie die Verarbeitungseigenschaften hatten sowie die Lagerstabilität bzw. Homogenität beeinträchtigten. Aus diesen Gründen beschränkten sich die weiteren Untersuchungen ab Mitte 2013 auf wenige Systeme, welche die Anforderungen erfüllten.

Die eigentlich für die Polymersynthese angewendete wissenschaftliche CEM Mikrowellenanlage der Sika Schweiz AG, die für die Aushärtung von Epoxidharzsystemen nicht optimal geeignet war, die Limitierung der Anmischmengen bei Verwendung dieser Mikrowelle sowie die Möglichkeit, die HEPHAISTOS Mikro-

welle am KIT zu nutzen, führte seit Ende 2013 bis Ende 2014 zu zahlreichen Formulierungen im Labor der Sika Deutschland GmbH in Bad Urach und anschließenden Versuchen am KIT in Karlsruhe.

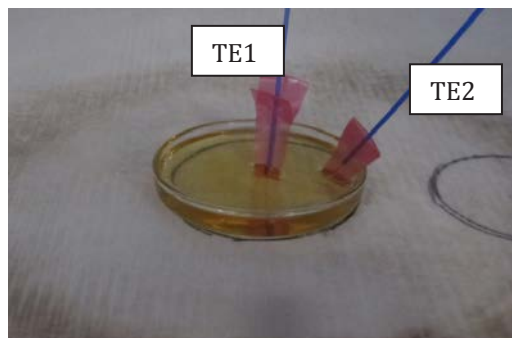
Es wurden Reinharzsysteme sowie adaptierte Harzsystemproben zur Untersuchung des Einkoppel- sowie Aushärteverhaltens in der Hephaistos Mikrowelle am KIT vorgestellt. Nach Ermittlung der Aufheizraten / Temperaturprofile konnte fortan mit definierten und reproduzierbaren Parametern zur Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse gearbeitet werden.



**Abbildung 4.79**

Typischer Prozessverlauf für das mikrowellenunterstützte Aushärten von Sika Harzproben

Ziel der Versuche war eine homogene Aufheizung und Aushärtung der Proben sowie eine möglichst hohe Glasübergangstemperatur nach der Mikrowellenaushärtung. Die Überwachung erfolgte mit Thermoelementen in den Proben sowie per Wärmebildkamera.



**Abbildung 4.80**

Versuchsaufbau zu dem in Abbildung 4.79 gezeigten Prozessverlauf

Weiterhin wurden Dielektrische Messungen im Hohlleiter an Reinharzproben zur Charakterisierung des Absorptionsverhaltens am KIT durchgeführt. Die flüssige Matrix wird hierzu in einem Teflon-Tiegel in einen Wellenleiter eingebracht und mit Ausgabe des Netzwerkanalysators mit einem Simulationsmodell abgeglichen [28]. Die Erwärmung der Proben auf Messtemperaturen (25-120°C) erfolgte konventionell,

mit anschließenden dielektrischen Messungen. Unterschiedliche Absorptionseigenschaften wurden festgestellt und zeigten für einzelne Systeme deutliche höhere Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r'$  und Verlustfaktoren  $\epsilon_r''$  über den definierten Temperaturbereich. Dabei bedeutet ein hoher Verlustfaktor ein höheres Absorptionsvermögen, welches eine wichtige Eigenschaft des Harzsystems ist.

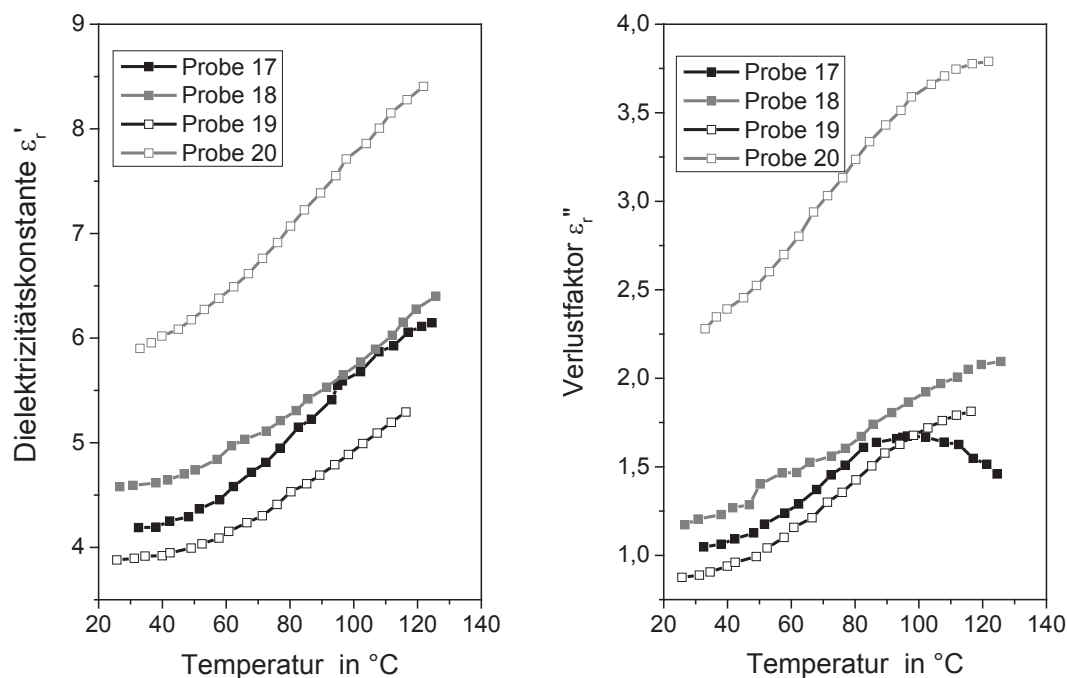


Abbildung 4.81

Ergebnisse dielektrischer Messungen an Reinharzen mit unterschiedlichen Additiven.

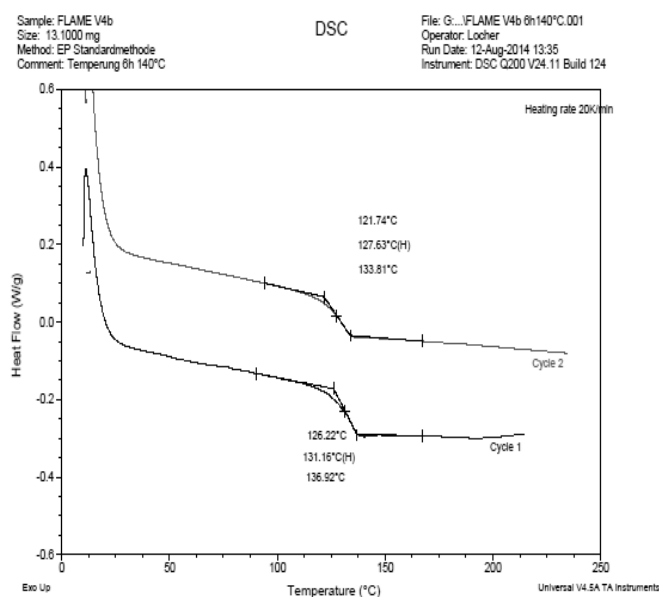


Abbildung 4.82

Bestimmung der Glasübergangstemperatur

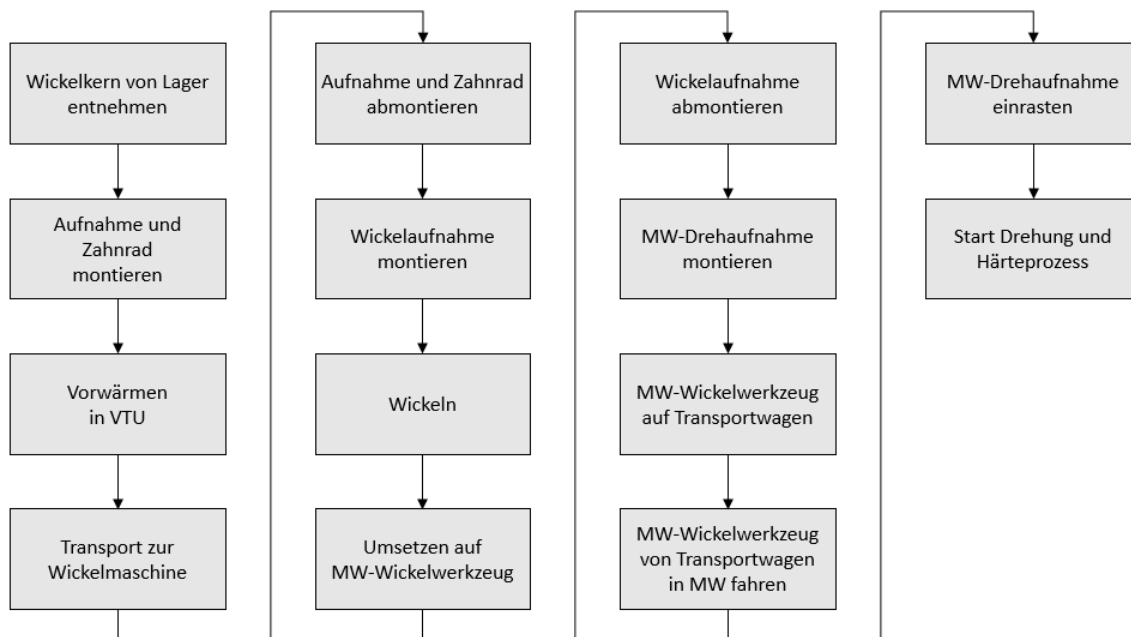
Die nach der Aushärtung durchzuführende Ermittlung der Glasübergangstemperaturen erfolgte per Differential Scanning Calorimetry (DSC) im Labor der Sika Deutschland GmbH in Bad Urach.

Die finale Definition des FLAME Harzsystems erfolgte nach Auswertung sämtlicher Ergebnisse aus den Versuchen am KIT und den Laboren der Sika Deutschland sowie Rückmeldungen zu Verarbeitungs- und Aushärtungsversuchen der Fa. SKT.

Mit diesem definierten FLAME Harzsystem wurden bei SKT identisch aufgebaute Wickelversuche in der Mikrowelle und im Trockenschrank zwecks Vergleichs durchgeführt. Verwendet wurde u.a. ein Demonstratorbauteil mit 650 mm Länge. Es zeigte sich, dass die metallische Peripherie als Wärmesenke wirkt, wodurch die Temperatur geringer ausfällt. Während der Aufheizphase konnte mittels Mikrowellenerwärmung bei dünnwandigen Bauteilen (3 mm) etwa 85%, bei 9 mm 47%, bei 15 mm 23% und bei 21 mm 17% schneller erwärmt werden. Betrachtet wurde jeweils eine Temperaturänderung um 10 K. Damit wurde das Potential des FLAME Harzsystems sowie der Mikrowellentechnik hinreichend aufgezeigt.

### 4.3.3 Entwicklung des Fertigungsprozesses zum Aushärten Präzisionswickelkörpern

Bei der Entwicklung des Fertigungsprozesses wurde auf Praxistauglichkeit geachtet, um eine mögliche, spätere Umsetzung in eine Serienfertigung zu erleichtern. Bei den Temperaturrampen und Haltestufen im Härteprozess wurden die Daten des Sika Harzes verwendet. Zur Untersuchung der Einflüsse von Wickelkörperlänge und Materialstärke wurden verschiedene Versuche gefahren.



**Abbildung 4.83**

Prozessentwicklung Einbindung der Mikrowellenhärtung

Der Wickelprozess bei Schunk sieht verschiedene Fertigungsstufen und Werkzeugwechsel vor. Wichtig für die Prozessentwicklung war, dass keine speziellen Wickelkerne eingesetzt werden sollten, um die Maßhaltigkeit zu garantieren aber auch, um die Kosten für eine mögliche Einführung der Mikrowellentechnologie zu minimieren. Die Mikrowellentechnologie wurde im Prozess anstelle des Härteprozess im Ofen gesetzt. Die Werkzeuge konnten dabei wie die herkömmlichen Werkzeuge einfach montiert werden. Lediglich die Einbindung der Thermoelement Messwertaufnahme war aufwendiger, die aber im finalen Prozess durch

entweder eine reine Leistungssteuerung oder eine pyrometrische Messwerterfassung nicht notwendig ist. Bei der Prozessentwicklung wurde ebenfalls davon ausgegangen, dass eine Drehdurchführung den Druckluftmotorantrieb ersetzt.

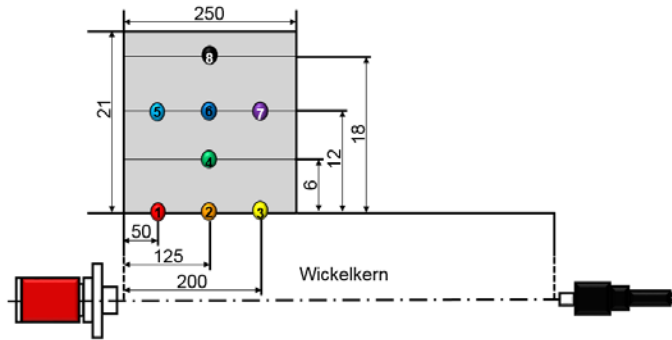
Die als Matrix für die Wickelkörper verwendeten Harzsysteme waren, wie für Hochleistungscomposites üblich, ausschließlich Epoxidharze. Bei deren Aushärteprozess wird Wärme freigesetzt welche, bei zu schroffer Temperaturerhöhung, bedingt durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Wickelkörpers senkrecht zur Faserrichtung, zu einer Autokatalysereaktion führen kann. Dies wird durch große Wandstärken deutlich begünstigt und führt zur thermischen Zerstörung des Matrixharzes und im schlimmsten Falle zur Selbstentzündung des Bauteiles während der Aushärtung. Daher wurden die Wandstärke und Länge der Wickelkörper sukzessive erhöht um einerseits die Autokatalyse zu verhindern und andererseits deren Einfluss auf den Aushärteprozess untersuchen zu können. Diese wurden sowohl im Mikrowellenofen sowie, als Referenz dienend, im Trockenschrank ausgehärtet. Hierbei wurde mit einem Wickelkörper mit vergleichsweise geringer Wandstärke von 10 mm und einer axialen Länge von 250 mm begonnen und sukzessive mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn zunächst die Länge und anschließend die Wandstärke bis auf die Abmessungen des Demonstratorbauteiles erhöht. Eine Übersicht über die hergestellten Wickelkörper ist in Tabelle 1 zu sehen.

**Tabelle 1** Übersicht der hergestellten Wickelkörpergeometrien

Wickelkörper Länge [mm]	250	650	250	650
Wickelkörper Dicke [mm]	10	10	21	21

Zusätzlich wurde ein Versuch mit einem kreuzgewickelten Bauteil mit einem Faserwinkel von  $\pm 75^\circ$  durchgeführt. Dieser zeigte jedoch ein sehr träges Erwärmungsverhalten, sodass im Vergleich zu den UD-Wickelkörpern deutlich mehr Mikrowellenleistung für einen entsprechenden Temperaturanstieg benötigt wird. Es wird vermutet dass die elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern in Winkeln  $\ll 89^\circ$  eine vergleichsweise abschirmende Wirkung auf die elektromagnetischen Mikrowellenstrahlen haben. Der Einfluss des Faserwinkels wurde daher am KIT in Form von CFK Probepplatten eingehender untersucht. Für kreuzgewickelte Bauteile mit flachen Winkeln ist die Mikrowellentechnologie daher weniger geeignet. Da jedoch sehr erfolgreich bereits Gewebelamine in Form von Prepregs ausgehärtet werden lässt sich diese Erkenntnis zunächst nur auf die Wickelkörper übertragen und bedarf eingehenderer Untersuchungen. Die Aushärtezyklen ergaben sich aus der Harzentwicklung. Für das eingesetzte Biresin FLAME R (ein 3K System mit Harz, Härter und Beschleuniger der Fa. Sika) sind die Temperaturstufen wie folgt angegeben:

- 80°C, 3 Stunden Haltezeit
- 120°C, 3 Stunden Haltezeit
- 140°C, 3 Stunden Haltezeit

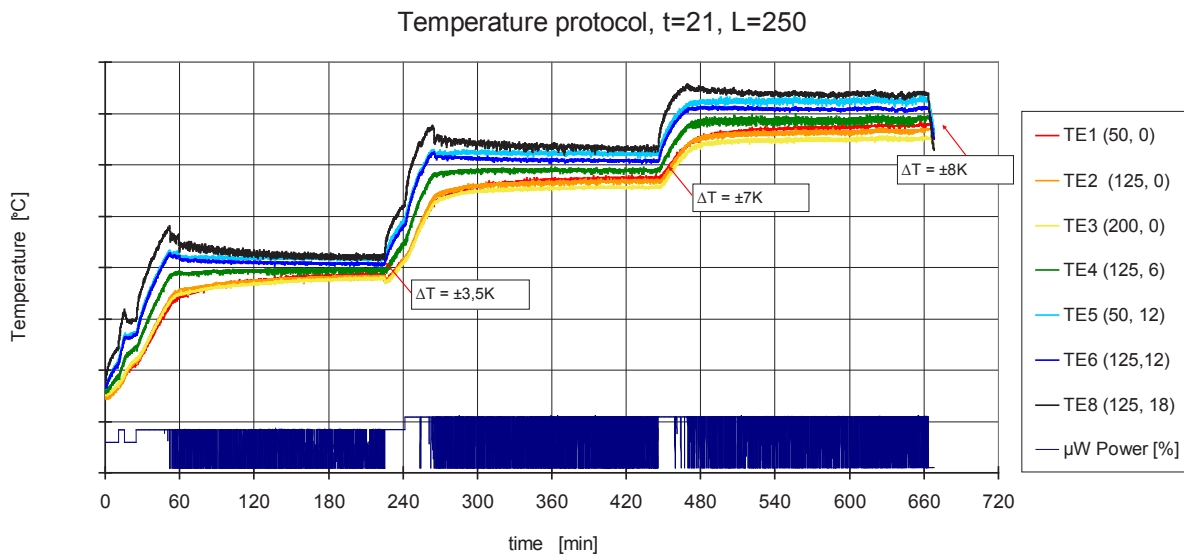


**Abbildung 4.84**

Positionen der Thermoelemente im Wickelkörper Länge 250 und Dicke 21mm

Die 8 Thermoelemente (TE 1 – TE 8) wurden gleichmäßig im Volumen über die Wickelkörper verteilt und während der Aushärteprozesse über die SIMPATI Software mitgeschrieben und aufgezeichnet. Es wurde darauf geachtet, dass die Fühler in den oberen Lagen ausreichend durch CFK-Material abgeschirmt waren.

Geringere Lagenstärken bewirkten einen Einfluss der Mikrowellenstrahlung auf das Messergebnis. Als Anheizrampe stellten sich Werte zwischen 0,8K/min. und 2,5K/min. ein. Höhere Anheizraten waren möglich, hatten jedoch eine größere Temperaturaufspreizung zur Folge. Abbildung 4.7 zeigt einen typischen Temperaturverlauf eines Aushärteprozesses mit Mikrowellentechnologie. Die materialbedingte Eindringtiefe der Mikrowellen wurde ebenfalls aus dem Temperaturprofil ersichtlich. Die oberen Thermoelemente zeigten durchgehend höhere Temperaturen an als die unteren Sensoren.



**Abbildung 4.85**

Temperatur/Zeit Verlauf Aushärteversuch L=250mm, d=21mm

Ein großer Vorteil der Mikrowellenbeheizung war die selektive Erwärmung verbunden mit einer kalten Prozesskammer. Die selektive Erwärmung von Mikrowellen bewirkte eine unmittelbare Erwärmung ausschließlich im Wickelkörper und nur über die Wärmeleitung auch auf das Werkzeug. Bei keinem der durchgeführten Versuche wurde ein Überschwingen der Temperatur durch Exothermie des Harzsystemes festgestellt, da die unbeheizte Prozesskammer die abgegebene Wärme leicht aufnehmen konnte.

Ein Nachteil der Mikrowellenbeheizung war die Temperaturverteilung durch die materialbedingte Eindringtiefe die durch Untersuchungen des KIT an den UD-Platten bestätigt wurden. Bei den Versuchen war ersichtlich, dass sowohl Bauteillänge wie auch Bauteildicke einen Einfluss auf die Temperaturverteilung hatten, wobei die kältesten Punkte immer in Wickelkernnähe lagen.

Bei den UD-Wickelkörpern konnte generell ein sehr deutlicher Einfluss der Wandstärke auf die Mikrowellenerwärmung festgestellt werden. Im Vergleich zum Trockenschrank konnten deutliche Vorteile der Mikrowelle in der Aufwärmzeit festgestellt werden, welche jedoch abhängig von der Wandstärke sehr unterschiedlich ausfielen. So wurde in einem Abstand von 3 mm zur Bauteiloberfläche eine um rund 85% schnellere Erwärmung festgestellt, bei 9 mm waren es hingegen nur noch etwa 47% Zeitvorteil.

Es zeigte sich, dass die Peripherie in Form der Anbauteile der Rotationsvorrichtung sowie der freien, unbewickelten Kernoberfläche, einen erheblichen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten im Randbereich hat. Um diesen Einfluss zu minimieren und eine gute Vergleichbarkeit zum konventionellen Trockenschrankprozess zu gewährleisten wurden die Vergleichsmessungen an Wickelkörpern mit den Originalmessungen von 242 x 200 x 650 mm durchgeführt. Die Thermolemente sind dabei in der axialen Mitte angeordnet. Tabelle 2 zeigt die Werte für die Temperaturverteilung bei verschiedenen Bauteilgrößen.

**Tabelle 2** Temperaturgradienten in Wickelkörper abhängig von Haltetemperaturen und Abmessungen

Wickelkörper Länge [mm]	Wickelkörper Dicke [mm]	$\Delta T$ bei 80°C [K]	$\Delta T$ bei 120°C [K]	$\Delta T$ bei 140°C [K]
250	10	$\pm 1$	$\pm 1,7$	$\pm 3,7$
250	21	$\pm 3,5$	$\pm 7$	$\pm 8$
650	10	$\pm 5$	$\pm 7$	$\pm 8$
650	21	$\pm 5$	$\pm 8$	$\pm 10$

Mit der Entwicklung der Hybrid Anlage wurde eine Möglichkeit geschaffen, diese Temperaturdifferenzen auf ein Minimum zu begrenzen. Bei der Hybrid Anlage stellten sich Temperaturverteilungen von  $\pm 1,5K$  bei 80°C ein und  $\pm 2,5K$  bei 140°C. Diese Werte waren bei genügend langer Temperzeit unabhängig von der Bauteilgeometrie.

Im Fertigungsprozess war eine Integration von Thermolementen nicht vorgesehen. Die Temperaturerfassung innerhalb des Bauteils ist zwar von Vorteil aber zugleich aufwendig und die Abschnitte mit eingebetteten Thermolementen können nicht als Produkt verwendet werden. Der Fertigungsprozess kann leistungsgesteuert erfolgen und über den PowerMode der SIMPAC Steuerung ist eine Temperaturüberwachung und -steuerung an der Wickelkörperoberfläche mittels Pyrometer möglich. Eine pyrometrische Messwerterfassung wurde in die Anlage integriert und kann zu Regelungs- und Dokumentationszwecken eingesetzt werden.

#### 4.3.4 Charakterisierung der hergestellten Bauteile

Entscheidend für die Qualität eines Faserverbundwerkstoffes und damit für das Erreichen von hohen mechanischen Kennwerten ist die einwandfreie Qualität und Prozessierung aller Einzelkomponenten. Nur wenn es gelingt, die Fasern Lastpfadgerecht und ohne nennenswerte Ondulationen/ Verwerfungen mit dem richtigen Anteil im Bauteil abzulegen, und diese bis zur oberen Grenze der Anwendungstemperatur durch ein geeignetes Matrixsystem porenfrei miteinander zu verbinden, kann das volle Potential ausgeschöpft werden. Die einzustellenden bzw. zu erzielenden Parameter sind dabei der Faservolumenanteil

(FVA), die Mikroporosität sowie der Glasübergangspunkt  $T_G$ , welcher die thermische Grenze der Anwendung markiert. Die Anforderungen können je nach Anwendungsfall des späteren Bauteiles völlig unterschiedlich ausfallen. Zusätzlich müssen die Bauteile natürlich noch die an sie gestellten Festigkeitsanforderungen erfüllen. Hierfür wurde ein einfach anzuwendender, radialer Drucktest entwickelt welcher es ermöglicht vergleichende Festigkeitsuntersuchungen an Referenzbauteilen durchzuführen. Für den dickwandigen Demonstrator im FLAME Projekt wurden die Anforderungen entsprechend definiert und sind untenstehend zusammengefasst.

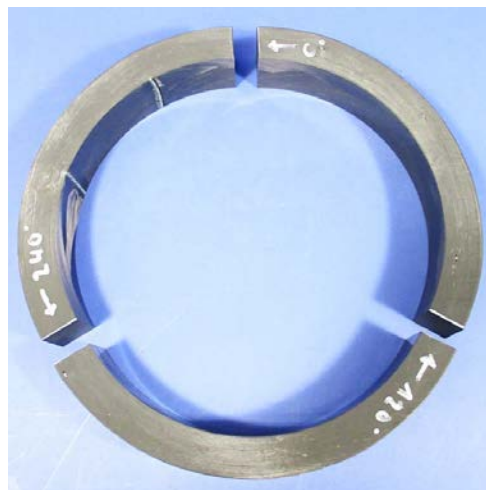
Anforderungsprofil an den Faserverbundwerkstoff des dickwandigen Demonstrators:

- Faservolumengehalt zwischen 65% und 69%
- Mikroporosität kleiner 0,3%
- Glasübergangspunkt von 130°C
- Radiale Druckfestigkeit mindestens 200 MPa

Zur Charakterisierung der Bauteile wurden jeweils Scheiben der Demonstratoren mittels Diamant-Bandsäge heruntergeschnitten und in drei Ringsegmente aufgeteilt. So wurden alle Untersuchungen an jeweils drei Stellen über den Umfang durchgeführt, um eventuelle lokale Abweichungen erkennen zu können. In Abbildung 1 sind exemplarisch die Ringsegmente zu sehen welche für die Untersuchungen angefertigt wurden.

Der Faservolumengehalt in Wickelkörpern wird während des Wickelprozesses durch die Viskosität des Matrixharzes sowie die aufgebrachte Zugspannung auf den Wickelfaden bestimmt. Durch die Rotation der Bauteile während der Aushärtung in Mikrowelle und Trockenschrank wird ein lokales Absacken des Harzes verhindert und der Faservolumengehalt bleibt hierdurch über den Umfang gleichmäßig, erfährt also keine Änderung mehr während des Aushärteprozesses.

Die Bestimmung des Faservolumengehaltes erfolgt nasschemisch durch Herauslösen der Matrix und rückwiegen nach erfolgter Trocknung des Faseranteiles. Der angestrebte Faservolumengehalt von 67 +- 2% wurde bei den meisten Wickelkörpern mit Ausnahme der Kreuzwicklungen übertroffen.



**Abbildung 4.86**

Gesägte Ringsegmente zur Untersuchung der Kennwerte



Die offene Mikroporosität wurde quantitativ über die Dichte und Porositätsbestimmung ermittelt. Hierbei wurde der Probekörper zunächst trocken über und unter Wasser gewogen, dann unter Druck mit Wasser in allen zugänglichen Poren imprägniert und anschließend, nach der Entfernung von Oberflächenfeuchtigkeit, erneut gewogen. Aus der Differenz dieser Werte ergeben sich unter anderem die Dichte der Bauteile sowie deren offene Porosität.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung aufgeführt. Zu erkennen ist, dass bis auf Versuch Nr. 4 alle Porositätswerte, mit erneuter fertigungsbedingter Ausnahme der Kreuzwickelkörper, eine Porosität von < 0,3% aufwiesen. Die mikrowellengehärteten Bauteile lagen mit der offenen Porosität jedoch etwas höher als die Referenzen welche im Trockenschrank ausgehärtet wurden. Die Dichtewerte lagen bei allen unidirektional gewickelten Bauteilen sehr dicht zusammen.

**Tabelle 3** Vergleich der Faservolumengehalte

Versuch	Position	FVA [%]	Mittelwert [%]	Faserorientierung	Matrixsystem	Härtung
1	Anfang	68	70 ± 1	Unidirektional	FLAME-Harz	Mikrowelle
	Mitte	71				
	Ende	69				
2	Anfang	66	67 ± 3	Unidirektional	FLAME-Harz	Trockenschrank
	Mitte	72				
	Ende	64				
3	Anfang	69	70 ± 1	Unidirektional	FLAME-Harz	Mikrowelle
	Mitte	71				
	Ende	69				
4	Anfang	69	70 ± 1	Unidirektional	FLAME-Harz	Mikrowelle
	Mitte	71				
	Ende	69				
5	Anfang	57	59 ± 3	70° Kreuzwicklung	FLAME-Harz	Mikrowelle
	Mitte	63				
	Ende	57				
6	Anfang	68	68 ± 0	70° Kreuzwicklung	SKT-Harz	Mikrowelle
	Mitte	68				
	Ende	68				
7	Anfang	71	70 ± 2	Unidirektional	FLAME-Harz	Trockenschrank
	Mitte	69				
	Ende	72				

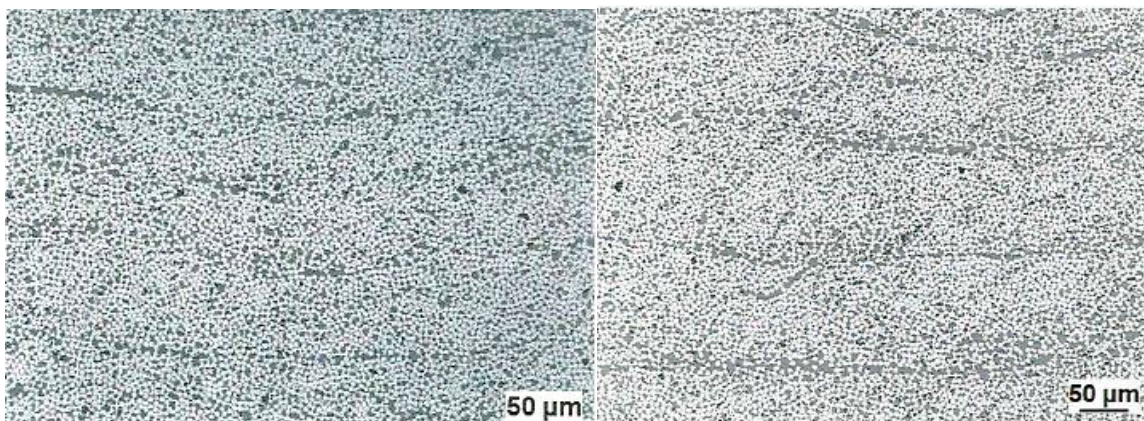
Die Porosität der Bauteile wurde zudem qualitativ durch Schliffuntersuchungen charakterisiert. Hierbei wurden keine Unterschiede der Werkstoffqualität zwischen Mikrowellenhärtung und Trockenschrank festgestellt. In Abbildung x und x ist zu erkennen dass die erzeugte Qualität der Wickelkörper hinsichtlich porengelalt und Faser-Matrixverteilung nahezu identisch hoch war.

Der Glasübergangspunkt  $T_G$  stellt die Grenze für die Anwendungstemperatur dar und wurde mittels DSC-Analyse ermittelt. Die resultierenden Glasübergangspunkte im Faserverbundbauteil fielen i.d.R. etwas niedriger als diejenigen im Reinharz aus. Dies liegt an Verarbeitungseinflüssen wie z.B. angelagerter Feuchtigkeit auf den Fasern, welche in der Matrix als Weichmacher wirkt und alle mechanischen Eigenschaften, so auch den  $T_G$ , herabsetzten.

**Tabelle 4** Ergebnisse der Dichte und Porositätsuntersuchung

Versuch	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Offene Porosität [%]	Faserorientierung	Härtung
1	1,62	0,26	Unidirektional	Mikrowelle
2	1,63	0,15	Unidirektional	Trockenschrank
3	1,63	0,29	Unidirektional	Mikrowelle
4	1,62	0,43	Unidirektional	Mikrowelle
5	1,63	0,48	70° Kreuzwicklung	Mikrowelle
6	1,57	0,48	70° Kreuzwicklung	Mikrowelle
7	1,63	0,18	Unidirektional	Trockenschrank

Der  $T_G$  des SKT-Referenzharzes liegt im Reinharz bei rund 135°C und im Faserverbundbauteil entsprechend bei ca. 130°C. Der  $T_G$  des FLAME-Harzsysteams lagt hingegen etwas tiefer mit 127°C im Reinharz und rund 120°C im Faserverbund. In Tabelle 5 ist eine typische  $T_G$  Verteilung, wie sie an den Bauteilen ermittelt wurde, dargestellt.



**Abbildung 4.87**

Schliffbilder radial; Trockenschrankhärtung (links), Mikrowellenhärtung (rechts)

**Tabelle 5** Typische  $T_G$  Verteilung über den Umfang des Demonstrators(FLAME-Harz Matrix)

Ringabschnitt	Position [°]	$T_G$ [°C]	Mittelwert [°C]
Anfang	0	118	119 ± 1
	120	117	
	240	119	
Mitte	0	119	
	120	120	
	240	120	
Ende	0	118	
	120	118	
	240	118	

Da der Mikrowellenofen zum Aushärten einige Kilometer entfernt vom Herstellort des Wickelkörpers aufgestellt war und der Transport dorthin ohne Rotation stattfand, musste der der gesamte Wickelkörper nach dem Wickelprozess bei  $-18^\circ\text{C}$  tiefgefroren werden um so ein Absacken des Harzes zu verhindern. Um sicherzustellen dass dieses Vorgehen keine negativen Einflüsse auf das Matrixharz bewirkt wurden zuvor die resultierenden Glasübergangspunkte an einer Referenzprobe sowie einer tiefgefrorenen Probe nach Aushärtung ermittelt. Dies erfolgte natürlich für das SKT Referenz-Harz wie für das FLAME-Harz Die nachfolgenden Tabelle 4 und 5 zeigen dass das Tieffrieren keinen negativen Einfluss auf den  $T_G$  beider Systeme hatte.

**Tabelle 6** Glasübergangstemperaturen am Reinharz des SKT-Harzes

Lagertemperatur [°C]	$T_G$ -SKT-Harz [°C]	Abweichung [°C]
RT	136	1
-18	135	

**Tabelle 7** Glasübergangstemperaturen am Reinharz des FLAME-Harzsystems

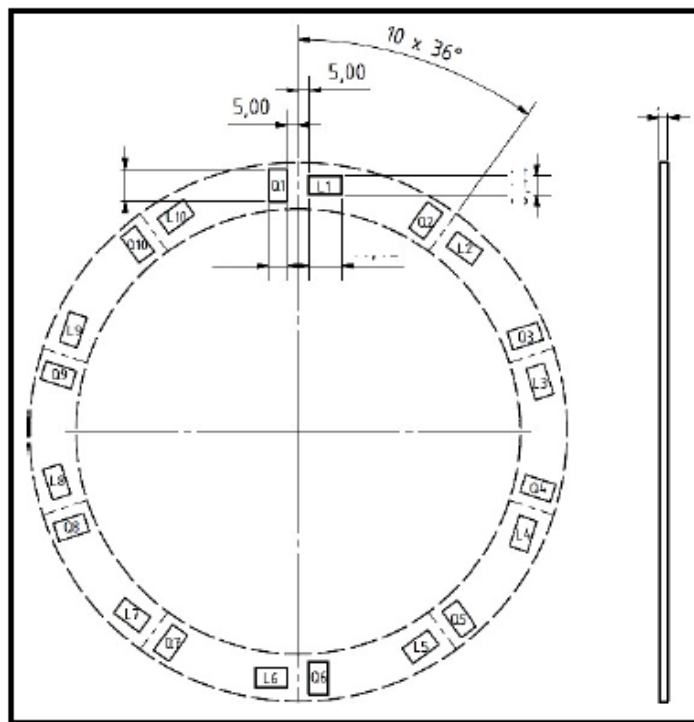
Lagertemperatur [°C]	$T_G$ -FLAME-Harz [°C]	Abweichung [°C]
RT	127	1
-18	128	

Um eine vergleichende Festigkeitsprüfung durchführen zu können wurde im Projekt der radiale Druckversuch in Anlehnung an eine bestehende Norm entwickelt. Die hierfür verwendeten Probekörper wurden stirnseitig aus einem Ringabschnitt der Demonstratoren entnommen. Es wurden zwei verschiedene Entnahmerichtungen, längs- und quer untersucht. Die mit „Q“ bezeichneten Querproben erzielten dabei stets die höheren Werte, weshalb für die folgenden Prüfungen die Q-Entnahmerichtung ausgewählt und der Wert für die Mindestdruckfestigkeit auf 200 MPa festgelegt wurde. Die Q-Proben bilden dabei nahezu den gesamten Lagenaufbau während des Wickelprozesses ab, während die L-Proben mögliche Einflüsse

gegen Ende des Wickelvorganges nicht mehr erfassen, da sie lediglich eine Momentaufnahme der Mittel-  
sektion darstellen können. Die Proben waren dabei gleichmäßig in  $36^\circ$  Schritten über den Umfang verteilt,  
um den etwaige lokale Festigkeitsschwankungen feststellen zu können. Zudem wurde ein erheblicher  
Einfluss der Oberflächengüte der Planfläche festgestellt. Proben, welche lediglich überfräst wurden,  
versagten teilweise schon bei Spannungen von rund 180 MPa. Offensichtlich wirken sich hier kleinste  
Kerben bzw. Kratzer auf der Oberfläche als Rissinitiatoren aus und führen zu einem deutlich früheren  
Versagen. Daher wurden die Proben zusätzlich noch feingeschliffen. In Abbildung 4 ist der Schnittplan der  
Proben mit den beiden Entnahmerichtungen zu erkennen.

Für die Prüfung wurden die Probekörper auf einer Universalprüfmaschine unter Druck bis zum Bruch  
belastet (siehe Tabelle 8). Das Versagensbild war ein Schubbruch parallel zu den Faserachsen, zu erken-  
nen an der nahezu idealen  $\pm 45^\circ$  Bruchlinie. Der Prüfaufbau sowie die Bruchbilder sind in Abbildung 4.89  
dargestellt.

In den Tests haben alle Q- Prüfkörper sowie die meisten der L-Proben den Mindestwert von 200 MPa  
erreicht und um durchschnittlich 5% übertroffen. Die Ergebnisse der getesteten Bauteile sind in der  
untenstehenden Tabelle dargestellt.



**Abbildung 4.88**

Schematischer Schnittplan zur Probenentnahme für die Druckprüfung

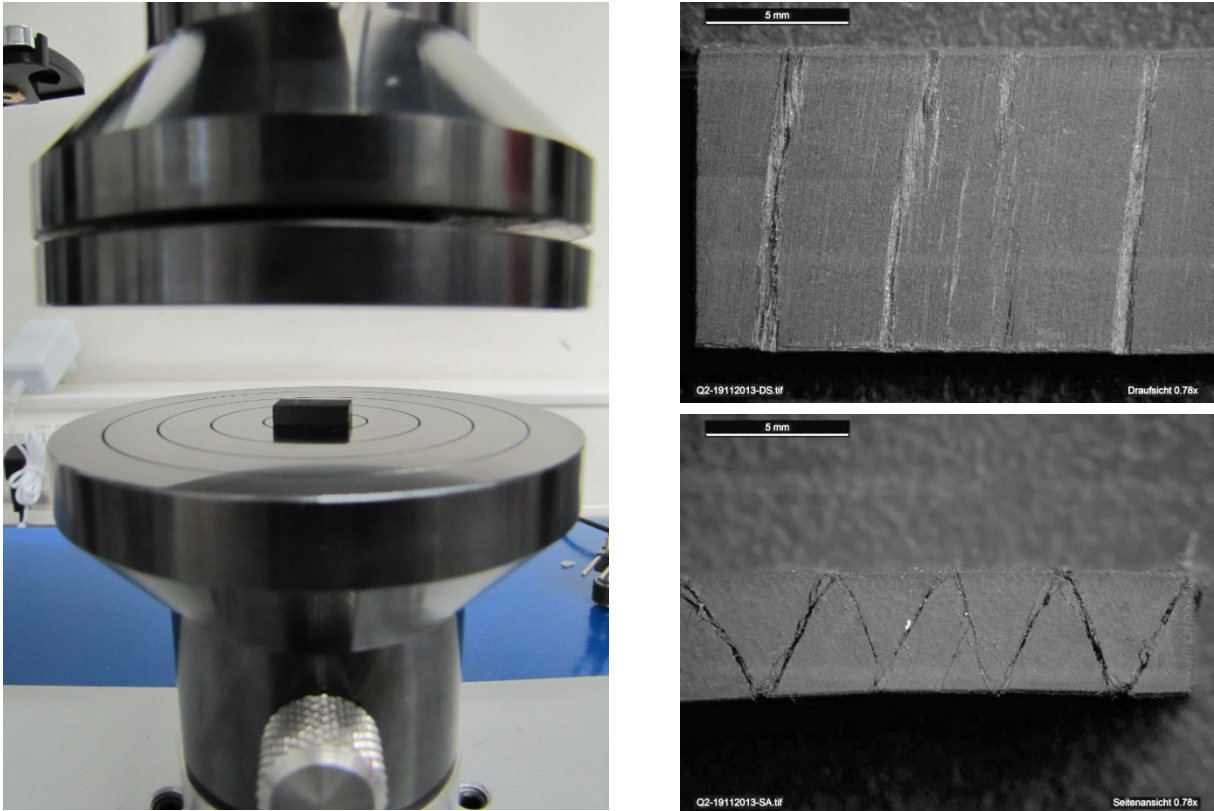


Abbildung 4.89

Druckprüfung (li.) und Schubbruch an einer Q-Probe mit Blick senkrecht (o.) sowie in Faserrichtung (u.)

Tabelle 8 Druckspannungen bis zum Bruch der Probekörper

Versuch	L-Druckspannung [MPa]	Q-Druckspannung [MPa]	Härtung
1	190 ± 16	-	Mikrowelle
2	220 ± 4	251 ± 9	Trockenschrank
3	198 ± 8	230 ± 9	Mikrowelle
4	201 ± 9	208 ± 7	Mikrowelle
7	195 ± 13	236 ± 9	Trockenschrank

## 4.4 Allgemeine Hinweise für die Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellen

### 4.4.1 Temperaturmessung in der Mikrowelle

Die Messung der Laminattemperatur ist ein grundlegender Bestandteil bei der Aushärtung von Faserverbundwerkstoffen mittels Mikrowellenstrahlung. Da die Laminattemperatur nicht in direktem Zusammenhang mit einer äußeren Temperatur wie z.B. der Ofentemperatur steht, ist die Messung der Bauteiltemperatur unabdingbar. Während in konventionellen Anwendungen zumeist Thermoelemente zum Einsatz kommen, so können diese in einer Mikrowellenanlage nur mit bestimmten Vorkehrungen eingesetzt

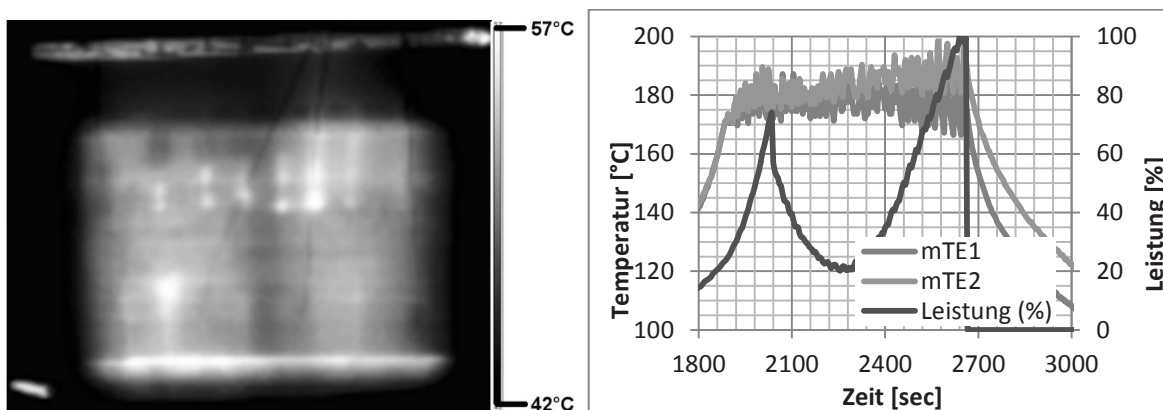
werden. Neben der Messung mit Thermoelementen mit entsprechenden Vorkehrungen, stehen noch weitere Temperaturmessmethoden zur Verfügung, was im Folgenden vorgestellt wird.

#### 4.4.1.1 Vorkehrung zur Temperaturmessung mittels Thermoelemente

Thermoelemente (TE), die aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern bestehen, haben im Vergleich zu anderen Messtechniken den Vorteil, dass sie sehr einfach eingesetzt und wiederverwendet werden können. Ungemantelten Thermoelementen können durch Abzwicken defekter oder einlaminiertes Leiterenden und durch neues Verschweißen der Enden des Thermopaars wieder eingesetzt werden. Ohne die richtigen Vorkehrungen können Thermoelemente in ungünstigen Fällen wie Antennen wirken und sich direkt im Mikrowellenfeld erwärmen. Im Falle von ungemantelten Thermoelementen werden darüber hinaus Spannungen auf der Signalleitung induziert, die das Temperatursignal verfälschen können (siehe Abbildung 4.90). Des Weiteren beeinflussen Thermoelemente das elektrische Feld und damit indirekt auch die Bauteiltemperatur (siehe Abbildung 4.90).

Der Einsatz von Mantelthermoelementen hat sich für gewisse Dauermessungen als geeignet herausgestellt, da diese vollständig geschirmt sind. Mantelthermoelemente lassen sich jedoch nicht einfach wiederaufbereiten und kommen daher nur für Anwendungen in Betracht, bei denen die TEs fest verbaut werden können. Weiterhin muss beim Durchführen der TEs durch die Mikrowellenwandung auf eine geeignete elektrische Schirmung geachtet werden, um eine Auskopplung von Mikrowellenstrahlung aus der Anlage zu vermeiden. Möglichkeiten hierfür bieten die Abschirmung von TEs mit metallischen Litzen oder einem Metallwellschlauch. Besondere Rücksicht muss hier auf die lückenlose Abschirmung bei Übergängen in ein Werkzeug oder den Übergängen aus der Mikrowellenkammer gegeben werden.

Für den Einsatz von TE im Mikrowellenfeld müssen diese separat abgeschirmt werden, soweit diese nicht bereits durch ein CFK-Laminat ausreichender Dicke oder eine metallische Abschirmung realisiert ist.

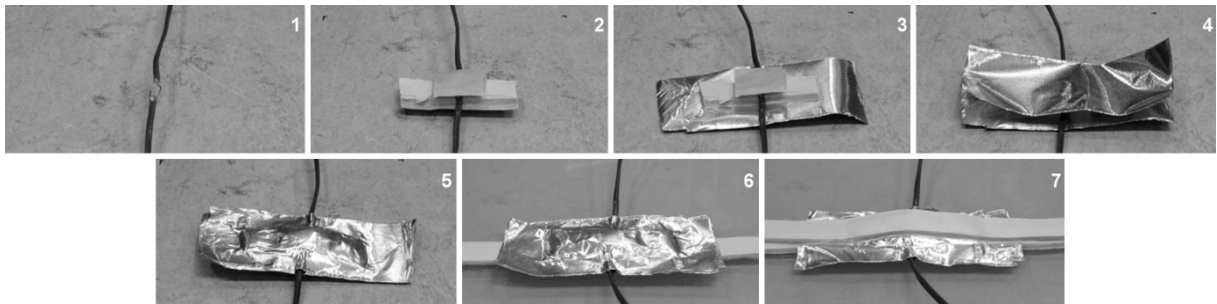


**Abbildung 4.90**

Links: Thermokamerabild einer CFK-Platte mit eingebrachten Thermoelementen, die für eine lokale Überhitzung sorgen; rechts: Temperaturmesssignal von Thermoelementen, welche durch das Mikrowellenfeld gestört werden.

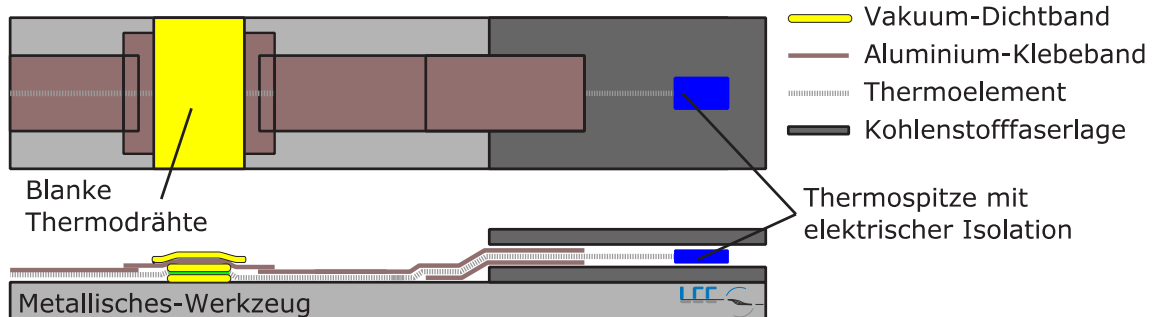
Ein weiteres Problem bei der Verwendung von einfachen TEs ist die Vakuumdichtigkeit und abgeschirmte Durchführung in einen Vakuumaufbau. Diese kann mit einfachem Aluminium-Band sowie Tack-Tape erreicht werden (Abbildung 4.91), die Herstellung einer wiederverwendbaren TE-Durchführung nach diesem Prinzip ist ebenso denkbar, wurde aber nicht umgesetzt. Die Abschirmung der TEs muss vollständig in den Verbund durchgeführt werden, sodass an keiner Stelle Mikrowellenstrahlung an die TEs herankommt. Der Einsatz von TEs in einem CFK-Verbund kann auch ohne Abschirmung im Inneren des Verbundes geschehen, solange die darüber liegenden Kohlenstofffaserschichten eine ausreichende Dicke aufweisen. Aufgrund von Erfahrungswerten kann gesagt werden, dass eine Unidirektionale-Laminatstärke

von ca. 4 mm über den Thermoelementen ausreichend ist, soweit sich auf der Unterseite ein metallisches Werkzeug befindet. Da Laminat mit wechselnder Orientierung eine höhere Abschirmwirkung aufweisen, ist in solchen Anwendungen eine oberflächennähere Verwendung möglich.



**Abbildung 4.91**

Beispiel für eine vakuumdichte und abgeschirmte Durchführung eines TEs in einen Vakuumaufbau ohne äußere Abschirmung auf einem mikrowellentransparenten Material



**Abbildung 4.92**

Schematische Darstellung einer vakuumdichten und abgeschirmten Durchführung eines TEs in einen Vakuumaufbau auf einer metallischen Platte in ein CFK-Laminat

#### 4.4.1.2 Temperaturmessung mittels faseroptischer Temperatursensoren

Die Temperaturmessung mittels faseroptischer Temperatursensoren (FOT) ist eine vollständig mikrowellenkompatible Messmethode. Solche Sensoren sind im Vergleich zu den TEs deutlich teurer mit wesentlich niedrigeren Messgrenzen von maximal 300°C. In einem industriellen Umfeld ist darüber hinaus die mechanische Empfindlichkeit der filigranen Sensoren zu beachten. Eine technische Verbesserung wird von der Otofon AG in Form von erneuerbaren Sensoren angeboten. Diese TSNANO-Sensoren können durch Aufbringen einer neuen Messspitze in Form eines heißhärtenden, fluoreszierenden Klebstoffs von dem Kunden selbst erneuert werden, haben jedoch eine Ansprechzeit von mehreren Sekunden. Während die hohe Ansprechzeit bei den meisten Temperaturzyklen mit entsprechender Regelung kein Problem darstellt, stellt die Erneuerung der Sensoren nichtsdestotrotz einen deutlichen wirtschaftlichen Nachteil im Vergleich zu TEs dar.

#### 4.4.1.3 Temperaturmessung mittels Pyrometer

Pyrometer ermöglichen eine lokale, berührungslose Messung der Oberflächentemperatur. Hierdurch können sie zur Regelung vieler Prozesse herangezogen werden, sind aber ohne geeignete Kalibration nicht einsetzbar, sobald ein relevanter Temperaturgradient zwischen Bauteilinnerem und der messbaren Oberfläche vorliegt. Ebenso ist es nötig, den Emissionskoeffizienten des Messguts vorab zu bestimmen. Pyrometer können außerhalb des Mikrowellenraums positioniert werden, um durch ein kleines Loch in der Wandung die Temperatur zu erfassen, oder sie können mit einem Metallwellschlauch im Mikrowellen-

feld direkt an die Messstelle geführt werden. Abhängig von der Einbringung ermöglicht sie die sehr lokale, einfache und robuste Messung über einen Temperaturbereich von mehreren Hundert °C, wie es z.B. in der Thermoplast Verarbeitung oder Pyrolyse nötig ist.

#### 4.4.1.4 Temperaturmessung mittels Thermokamera

Die Temperaturmessung mittels einer Thermokamera bietet gegenüber dem Pyrometer den Vorteil, dass sie großflächig erfolgt und einer orts aufgelöste Temperaturmessung ermöglicht. Diese Technik erfordert jedoch größere Fenster in der Wand der Mikrowellenkammer. Durch die hier notwendige Mikrowellenabschirmung wird das Messsignal jedoch verfälscht. Solche Signalverfälschungen, sowie weitere Fehlerquellen wie schräge Oberflächen, atmosphärische Dämpfungen oder Reflexionen müssen durch eine aufwendige Kalibration korrigiert werden. Die Regelung nach einer Temperaturverteilung, dessen Potential in Kapitel 4.2.1.3 dargelegt wurde, ist bisher aber noch nicht in die industriell verfügbare Anlagentechnik integriert. Unter allen Umständen muss sichergestellt werden, dass eine Sichtverbindung zwischen Thermokamera und Messobjekt vorhanden ist. Dies ist bei komplexeren Werkzeugen oftmals nicht möglich, wodurch die Nutzung von Thermokameras beschränkt ist.

### 4.4.2 Werkzeugkonzepte für die Faserkunststoffverbundaushärtung

Da die Erwärmung durch Mikrowellen maßgeblich von den Eigenschaften des bestrahlten Materials abhängt, sollen im Folgenden unterschiedliche Werkzeugdesigns vorgestellt werden, welche sich durch die Eindringtiefe ( $D_p$ ) der Mikrowelle in das Werkzeugmaterial unterscheiden [29].

In Tabelle 9 sind die Eindringtiefen hierfür frei in vier Kategorien eingeteilt.

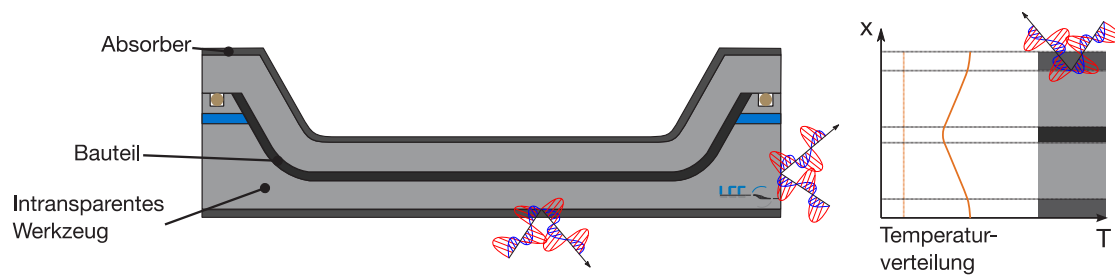
**Tabelle 9** Einteilung von Materialien in vier Kategorien anhand ihrer Eindringtiefe

	<b>Materialkategorie</b>	<b>Eindringtiefe</b>	<b>Beispielmaterial</b>
I	Intransparent	$D_p < 0.1 \text{ mm}$	Metalle, leitende Materialien
II	Semi-Intransparent	$0.1 \text{ mm} < D_p < 30 \text{ cm}$	CFK, SiC, gefüllte Kunststoffe
III	Semi-Transparent	$30 \text{ cm} < D_p < 200 \text{ cm}$	GFK, PA, PVC <sub>120°C</sub> , einige Keramiken
IV	Transparent	$200 \text{ cm} < D_p$	PTFE, PVC <sub>25°C</sub> , PE, PC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

#### 4.4.2.1 Intransparentes Werkzeugmaterial

Geht man von intransparenten Werkzeugwerkstoffen wie z.B. Metallen aus, so ergeben sich klare Begebenheiten. Die Mikrowellen dringen nicht in das Material ein und die gesamte Strahlung wird, bis auf geringe ohmsche Verluste durch induzierte Ströme, vom Werkzeug reflektiert. In einem Halbschalenprozess könnte die Mikrowellenstrahlung mit dem Bauteil interagieren und dieses heizen, wobei das Werkzeug hierbei eine Wärmesenke darstellt. Für ein geschlossenes Werkzeug ist ein intransparentes Material ungeeignet, wird es nicht mit einem semi-intransparenten Material mit hohen Verlusten kombiniert. Appliziert man dieses auf das intransparente Werkzeug, so kann es genutzt werden, um dieses zu heizen. Auf diese Weise kann die vollständige Reflektion des intransparenten Materials genutzt werden um komplexe Bauteile aus unterschiedlichen Materialien, lokalem Sandwich oder mit freien Kohlenstoffasern zu heizen. Die Heizung des Bauteils ist unabhängig von seiner Komplexität, da nur das Werkstück indirekt über das Werkzeug bzw. den dort applizierten Absorber geheizt wird (Abbildung 4.93). Dies ermöglicht die Heizung weit verbreiteter RTM-Werkzeuge mit der Mikrowellentechnik. Während nicht alle Vorteile der Mikrowelle genutzt werden können, so ermöglicht dies doch einen einfachen und breit gefächerten Umstieg von anderen Heizungs-Technologien.

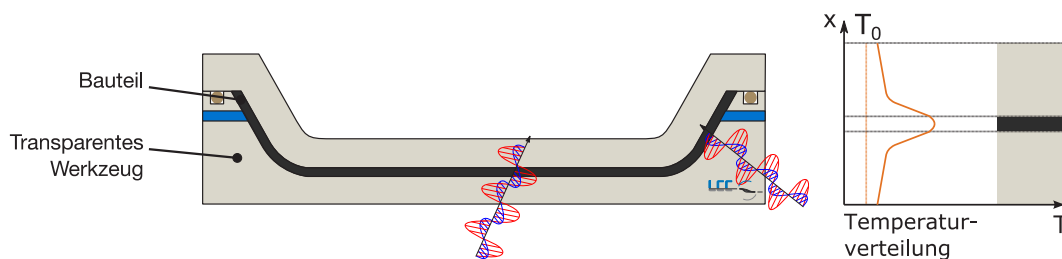


**Abbildung 4.93**

Links: Werkzeug aus intransparentem Material mit semi-intransparentem Material als Heizschicht; Rechts: idealisierte Temperaturverteilung des linken Werkzeugs

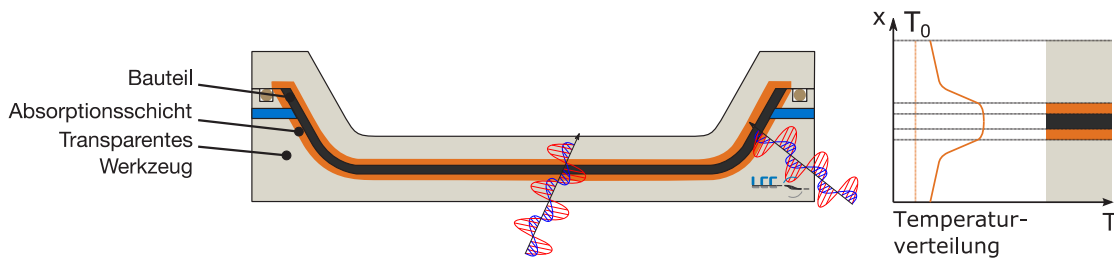
#### 4.4.2.2 Transparentes Werkzeugmaterial

Dem Werkzeug mit intransparentem Material kann ein Werkzeug mit transparentem Material entgegengestellt werden. Beispiele für solche Materialien sind Peek, PTFE, PE und einige Keramiken, welche alle eine Eindringtiefe größer 200 cm aufweisen. Die Mikrowellenstrahlen durchdringen das Werkzeugmaterial somit nahezu vollständig und dieses wird nicht direkt, sondern nur durch Wärmeleitung aus dem Bauteil geheizt (Abbildung 4.94). Hierdurch ist ein unerwünschter Temperaturgradient im Bauteil möglich. Ebenso kann es durch Interaktion zwischen dem Mikrowellenfeld und dem Bauteil zu unerwünschten Effekten kommen. Beispielsweise können sich Kanten überproportional stark erwärmen, oder leitende Materialien wie CFK, Metalle, oder deren Kombinationen können unkontrolliert mit der Mikrowellenstrahlung in Wechselwirkung treten. Solchen Effekten kann mit einem geeigneten Werkzeugdesign entgegengewirkt werden, indem Beispielsweise an geeigneter Stelle Abschirmungen integriert werden, welche wiederum den Energieeintrag lokal gänzlich verhindern.

**Abbildung 4.94**

Links: Werkzeug aus transparentem Material; Rechts: idealisierte Temperaturverteilung des linken Werkzeugs

Da im Falle eines völlig transparenten Werkzeugs der Temperatureintrag einzig und alleine vom Bauteil abhängt, kann es hierdurch auch zu Temperaturinhomogenitäten aufgrund unterschiedlicher Wandstärken kommen. Um auf solche Gegebenheiten einzugehen, kann neben der lokalen Abschirmung, auch auf semi-intransparentes Material zurückgegriffen werden, um lokal oder global die Erwärmung zu unterstützen (Abbildung 4.95). Wie bei einem vollständig transparenten Werkzeug können die Mikrowellen ungehindert bis zur Heizschicht aus semi-intransparentem Material vordringen und dieses und das Bauteil direkt heizen. Auf diese Weise kann eine homogene Heizung des Bauteils, auch bei variierenden Wandstärken, erreicht werden, während das Werkzeugmaterial weitestgehend kalt bleibt. Problematisch an Werkzeugen aus transparenten Materialien ist jedoch, dass einerseits die zur Verfügung stehenden Kunststoffe sehr weich, andererseits die härteren Keramiken sehr teuer und schwer herzustellen sind. Transparente Werkzeuge in relevanter Größe für Faserverbundanwendungen sind daher zurzeit nicht herstellbar, wobei hieran aktiv geforscht wird [8].

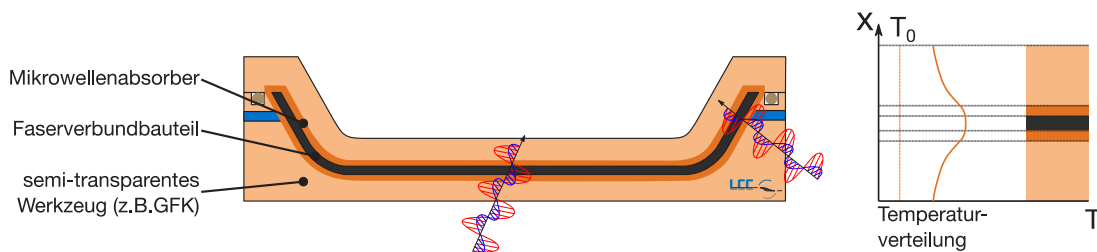


**Abbildung 4.95**

Links: Werkzeug aus transparentem Material mit semi-intransparenter Grenzschicht zur Heizung; Rechts: idealisierte Temperaturverteilung des linken Werkzeugs

#### 4.4.2.3 Semi-Transparentes Werkzeugmaterial

Die Nutzung von semi-transparenten Materialien, auf welches optional semi-intransparente Materialien zur Hilfsheizung auf oder eingebracht werden, stellt das vielversprechendste Konzept für die effiziente Nutzung der Mikrowellentechnik dar. In diese Kategorie fallen beispielsweise Glasfaserverstärkte Kunststoffwerkzeuge mit eingebrachtem Absorber. Diese lassen sich sehr einfach auch für größere Strukturen herstellen. Ein wichtiges Auslegungskriterium bei der Nutzung von semi-transparenten Materialien ist, dass das zu heizende Bauteil und ggf. die zusätzliche Absorberschicht einen wesentlichen Teil der Strahlung absorbiert. Somit findet hier die wesentliche Temperierung statt und das Werkzeug überhitzt nicht (Abbildung 4.96). Während die Eindringtiefe in das Werkzeug möglichst groß sein sollte, muss die Eindringtiefe in das Bauteil und ggf. der Absorberschicht möglichst im Bereich der zugehörigen Materialstärke sein. Obwohl die Energiebilanz eines semi-transparenten Werkzeuges schlechter als die eines transparenten Werkzeuges sein muss, können semi-transparente Werkzeuge viel einfacher und kostengünstiger hergestellt werden. Ihr Potential für die praktische Anwendung ist hierdurch ungleich größer, wobei entsprechende Designrichtlinien noch zu entwickeln sind.



**Abbildung 4.96**

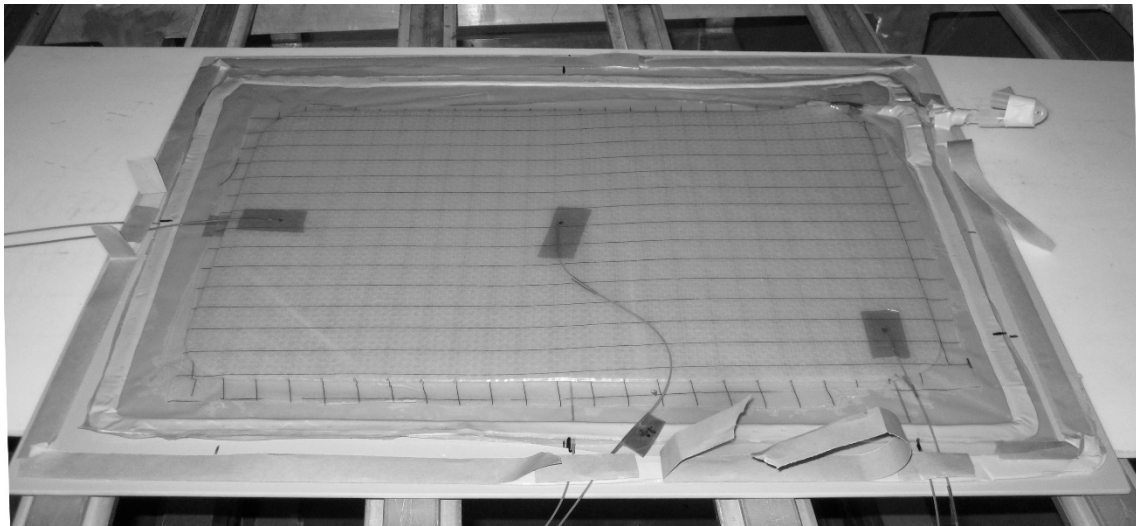
Links: Werkzeug aus semi-transparenten Material mit semi-intransparenter Heizschicht zum Bauteil; Rechts: idealisierte Temperaturverteilung des linken Werkzeugs

#### 4.4.3 Prinzipversuche zu einfachen Werkzeugkonzepten

Im Zuge des Projektes FLAME wurden Prinzipversuche für einfache Platten mit zwei Werkzeugkonzepten durchgeführt. Zum einen wurden GFK und CFK-Platten auf Glaskeramikplatten des Typ Nextrema 724-8 und 712-8 ausgehärtet, zum anderen wurden Aufheizversuche mit einem geschlossenen Aluminiumwerkzeug und applizierten Absorbern durchgeführt und in einem ersten Schritt mit der Ofenheizung verglichen.

#### 4.4.3.1 Aushärtung von GFK-Platten auf keramischen Werkzeugen

Zur erfolgreichen Aushärtung von GFK-Platten auf keramischen Werkzeugen mussten drei Herausforderungen überwunden werden. Bei den ersten Versuchen kam es zu Vakuumverlust aufgrund kurzer, im Aufbau eingeschlossener C-Fasern die überhitzten. Bei weiteren Versuchen konnte ein lokales Überhitzen des Angussbereiches aufgrund der dort vorliegenden gut Mikrowellen einkoppelnden Harzanreicherung und einer starker Regelschwingung während der Aushärtung beobachtet werden.



**Abbildung 4.97**

Aufbau zur Aushärtung einer GFK-Platte ohne Anguss. Die getränkte Preform befindet sich zum Schutz der FOTs in einem geschlossenen Vakuumsack, welcher über einen weiteren Vakuumsack, im Bild noch nicht aufgebracht, niedergedrückt wird.

Für die Umgehung des ersten Problems wurden das Schneiden und Legen der Glasfaserpreforms, sowie das Anfertigen der Vakuumaufbauten, in einem C-Faser-freien Raum durchgeführt. Dem Überhitzen des Angussbereiches kann durch Abschirmen bzw. Entfernen des Angusses entgegengewirkt werden. Ebenso ist es möglich den Anguss in etwas Abstand vom Bauteil zu positionieren, so dass dessen Überhitzung das Bauteil nicht beeinflusst. Letzteres birgt jedoch ein erhöhtes Risiko zur Überhitzung im späteren Prozessverlauf, in welchem sowohl Platte als auch Anguss ausgehärtet ist. In einem ähnlichen Temperzustand ist der Anguss aus reinem Harz der größere Absorber, und kann überhitzen. Der Regelschwingung wurde durch Anpassung der PID-Regelparameter entgegengewirkt, nachdem im manuellen Betrieb und leistungsgesteuerter Aushärtung sehr gute Ergebnisse erzielt wurden (Abbildung 4.97, Abbildung 4.98).

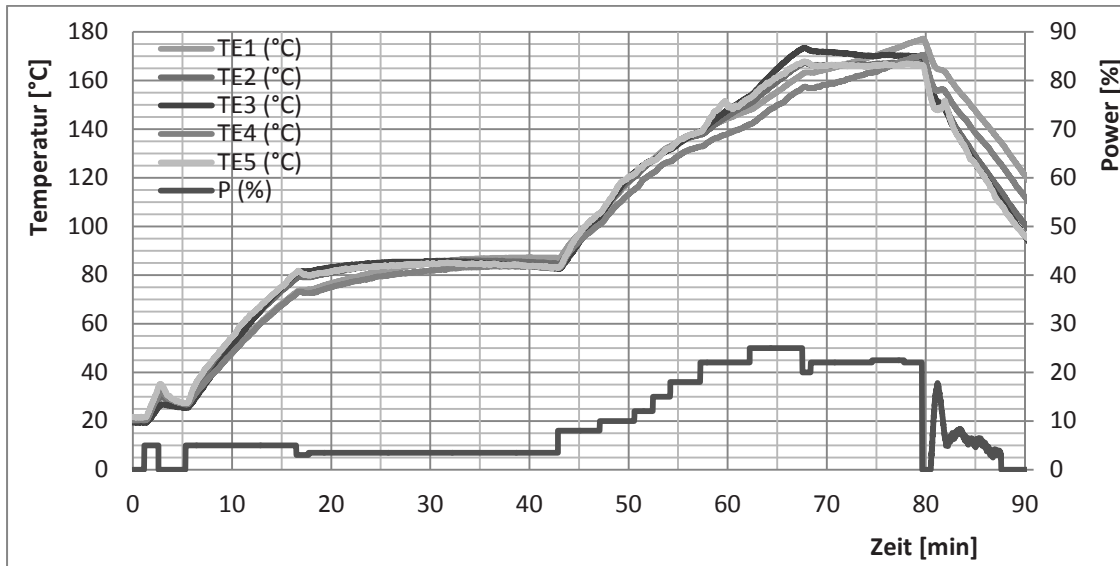


Abbildung 4.98

Temperaturverlauf während der Aushärtung einer GFK-Platte auf einem keramischen Werkzeug mit manueller Leistungssteuerung

#### 4.4.3.2 Aufheizung eines geschlossenen Aluminiumwerkzeuges in der Mikrowelle

Nachdem sich in einer Studie zu Werkzeugkonzepten geschlossene metallische Werkzeuge als potentialträchtig für die Mikrowellenanwendung ergeben haben, waren Prinzipversuche durchzuführen. Für einen ersten Vergleich ist hierfür ein verschraubtes RTM-Aluminium-Werkzeug von der Firma Maus GmbH mit glatter Oberfläche angefertigt worden. Dies ermöglicht die einfache Applikation eines Absorbers, während durch An- und Abguss in eine trockene Glasfaserpreform eingebrachte Thermolemente zur Temperaturüberwachung dienen (Abbildung 4.99).

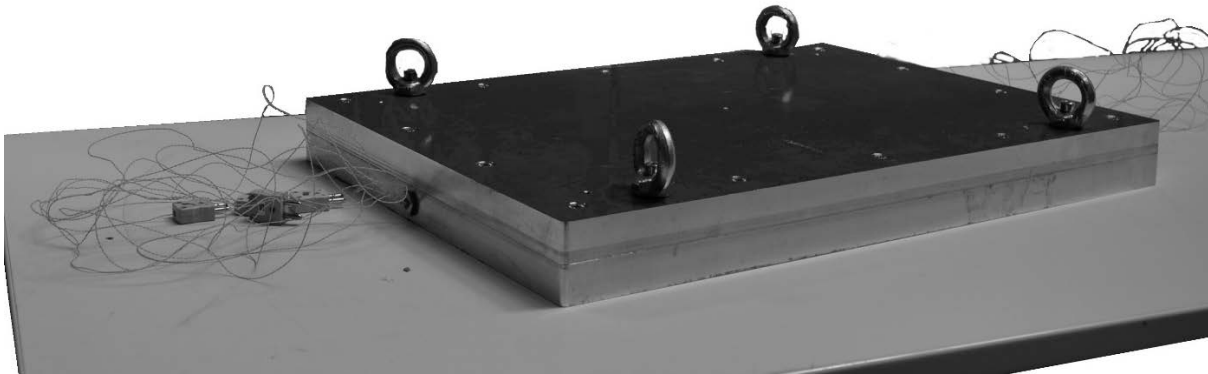
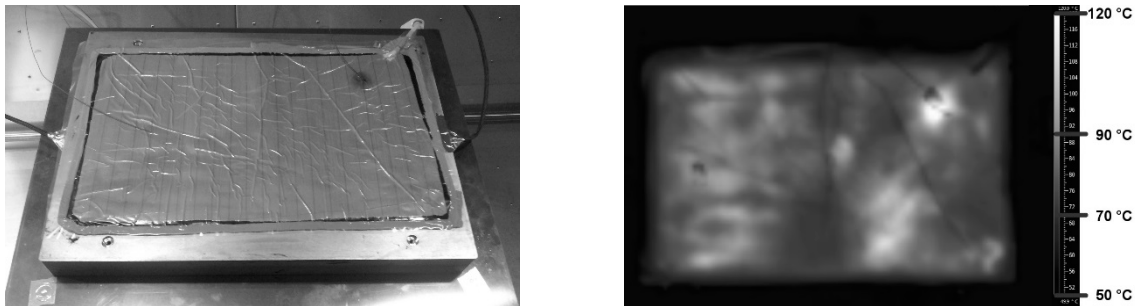


Abbildung 4.99

Verschraubtes Aluminium-RTM-Werkzeug der Firma Maus GmbH mit glatten Werkzeugaußenflächen zur Absorberapplikation

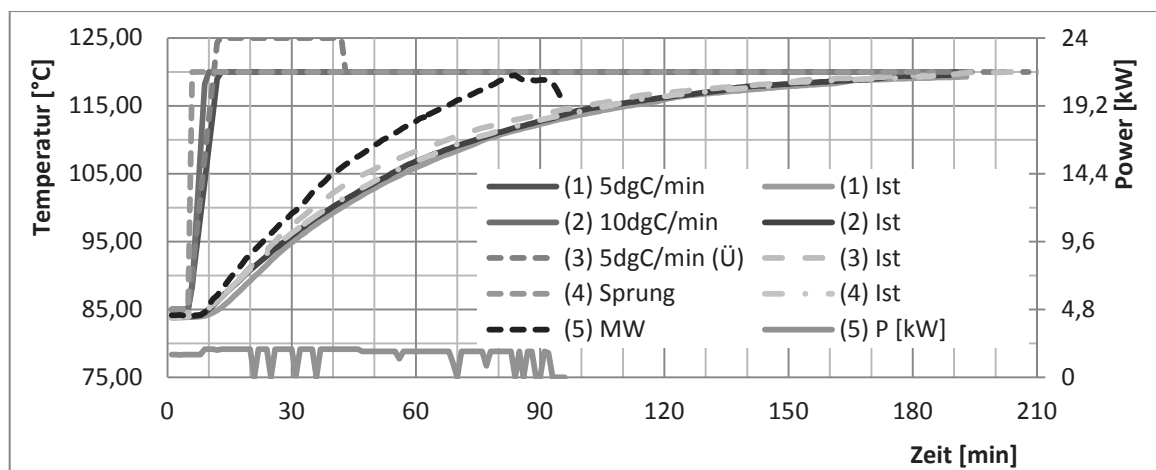
Als Referenz für die spätere Mikrowellenheizung ist das Tool in einem konventionellen Ofen mit einer Größe von 1,5m x 1m x 1m verschiedenen Heizrampen und Temperaturprofilen ausgesetzt worden. Das Aufheizverhalten für Heizraten von 5°C/min, 10°C/min, einen Temperatursprung und die Temperierung des Ofens über die Solltemperatur zeigen keine große Varianz beim Erreichen der Solltemperatur, aufgrund des trägen RTM-Werkzeugs. Die Aufheizung des Werkzeugs in der Mikrowelle erfolgt über eine aufgebraute mikrowellenabsorbierende Schicht, bestehend aus dem Epoxid Sika-EP-S angereichert mit 5

Volumenprozent<sup>2</sup>, des Ruß XE2B der Firma Orion Engineered Carbons GmbH (Abbildung 4.100, links). Aufgrund der hohen Viskosität des Epoxid-Ruß-Gemisches war ein vollständig gleichmäßiger Auftrag der entstandenen Paste mit einem Spachtel nicht möglich. Durch diese Unterschiede in der Absorberdicke, durch eine lokale Abhebung der Absorptionsschicht vom Werkzeug, oder durch eine inhomogene Füllstoffverteilung, konnte in Mikrowelle nur eine sehr inhomogene Aufheizung erzielt werden (Abbildung 4.100, rechts). Obwohl ein Großteil der absorbierenden Schichten auf der Unter- und Oberseite nur unzureichend erhitzt werden konnten, um ein lokales Überhitzen zu vermeiden, konnte in der Mikrowelle bei dem ersten Prinzipversuch schon eine deutlich schnellere Aufheizung des Aluminiumwerkzeuges erreicht werden, siehe Abbildung 4.101. Mit weiterer Erhöhung der Mikrowellenabsorption und der thermischen Leitfähigkeit, sowie einer besseren Verteilung und Anbindung des Absorbers, ist mit einer deutlichen Verbesserung der Heizleistung zu rechnen. Im Vergleich zu anderen Technologien bietet die Mikrowellentechnologie dabei eine höhere Flexibilität und das Potential für deutlich höhere Heizraten, wenn man diese Werkzeugtechnologien weiter vorantreibt. Bei der Nutzung von semi-transparenten Mikrowellenwerkzeugen ist ein deutlich größerer Vorteil zu erwarten. Die Nutzung von metallischen Werkzeugen sollte daher nur als Übergangslösung hin zu deutlich effizienteren semi-transparenten Werkzeugen betrachtet werden.



**Abbildung 4.100**

Links: Aluminium Tool mit aufgebrachtem Absorber in der Mikrowellenanlage; rechts: inhomogene Temperaturverteilung der Absorptionsschicht auf dem Werkzeug



**Abbildung 4.101**

Aufheizverhalten einer Glasfaserpreform in inneren eines Aluminiumtools bei verschiedenen Aufheizszenarien im Ofen und bei Mikrowellenheizung

<sup>2</sup> Volumenprozent des Gesamtmischvolumens: Harz, Härter, Beschleuniger und Füllstoffe = 100%

#### 4.4.4 Anpassung von Materialien zur Mikrowellenabsorption

Für die homogene Aushärtung komplexer Strukturen in der Mikrowelle, ist die Arbeit mit zusätzlichen Abschirmungen oder Mikrowellenabsorbern unabdingbar. Erstere dienen der Abschirmung empfindlicher oder sich zu stark erhaltender Bereiche. Letztere müssen genutzt werden um Wärmesenken auszugleichen, wie sie z.B. metallische Inserts oder Werkzeugelementen darstellen. Bei inhomogenem Aufbau der auszuhärtenden Struktur in Form von Dickensprüngen, Radien oder wechselnden Materialien, kann es ebenso nötig sein, die Temperaturhomogenität durch Anpassung des Werkzeugs oder des Werkstücks mittels Abschirmungen und Absorbern zu verbessern. Grundlage für die Anpassung komplexer Strukturen ist hierbei, dass das nötige Wissen vorhanden ist, geeignete Absorber mit verschiedenen Kennwerten herzustellen. Hierzu ist es nötig, einerseits die Mikrowellenabsorption von Materialien einstellen zu können, genauso muss aber eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit sichergestellt werden, um die erzeugte Energie abzugeben. Je nach Anwendung können auch weitere Randbedingungen nötig sein, wie z.B. die Komptabilität der Wärmeausdehnung oder die chemische Beständigkeit. Für eine erste Einschätzung der Anpassbarkeit der Mikrowellenkennwerte ist ein Standard-Epoxyd Harz der Firma Sika (Sika-EP-S) mit verschiedenen Füllstoffen versehen und vermessen worden. Eine Übersicht der getesteten Proben mit beigemischten Pulvern ist in Tabelle 10 aufgeführt, wobei 100% der vollständigen Mischung mit allen Bestandteilen nach der Aushärtung entspricht.

**Tabelle 10** Übersicht der für die dielektrische Charakterisierung hergestellten Probenqualitäten

Bezeichnung	Additiv 1	Anteil	Additiv 2	Anteil	Additiv 3	Anteil
Sika-EP-S-0-0-0	-	-	-	-	-	-
Sika-EP-S-2-0-2	Printex XE2-B	2,0%	-	-	-	-
Sika-EP-S-2-0-5	Printex XE2-B	5,0%	-	-	-	-
Sika-EP-S-8-1200-5	SiC FE1200	5,0%	-	-	-	-
Sika-EP-S-8-600/1200-2,5/2,5	SiC FE600	2,5%	SiC FE1200	2,5%	-	-
Sika-EP-S-10-0/600-2/5	Printex XE2-B	2,0%	SiC FE600	5,0%	-	-
Sika-EP-S-10-0/1200-2/5	Printex XE2-B	2,0%	SiC FE1200	5,0%	-	-
Sika-EP-S-10-0/600/1200-2/2,5/2,5	Printex XE2-B	2,0%	SiC FE600	2,5%	SiC FE1200	2,5%

Anteile sind in Volumen% der gesamten Mischung nach der Aushärtung angegeben, bestimmt mittels der nominellen Dichte des Harzes und der Füllstoffe.

Die dielektrischen Messungen erfolgten mit einem Messaufbau des KIT, der nach der Resonator-Störkörpermethode funktioniert und zylindrischen Proben präziser Abmessungen ( $D = 7,9\text{mm}$ ,  $h = 10\text{mm}$ ) erfordern (siehe Abschnitt 4.2.3). Die Probenherstellung erfolgte hierbei nach dem Ablauf in Abbildung 4.102, unten.

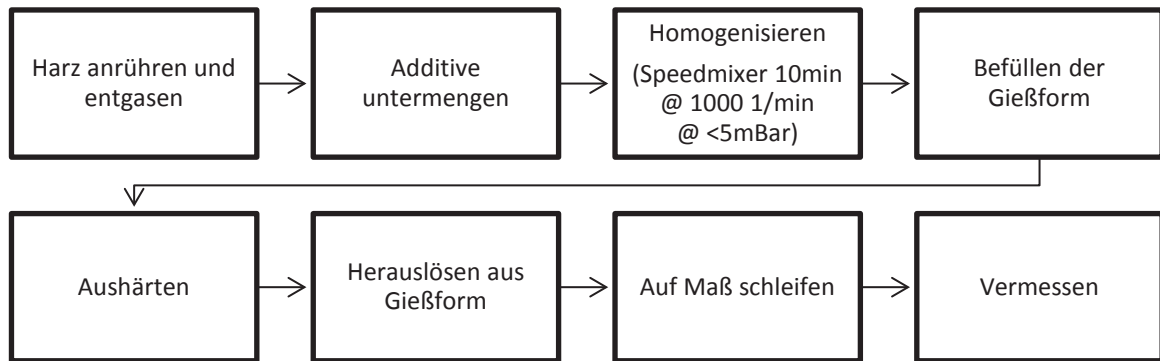


Abbildung 4.102

Ablauf für die Herstellung der Proben zur dielektrischen Messung

Der für die Leitfähigkeitsmodifizierung angepasste Ruß Printex® XE2-B (XE2-B) der Orion Engineered Carbons GmbH zeigt den größten Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften, wobei bei der Beimengung von 2% Ruß deutliche, bei 5% leichte Agglomerationen unter dem Mikroskop zu erkennen sind, welche aus der ursprünglichen Struktur des Ruß resultieren. Durch eine bessere Homogenisierung ist mit einer weiteren Erhöhung der dielektrischen Eigenschaften zu rechnen. Versuche, Proben mit Beimengungen aus reinem SiC FE600 herzustellen scheiterten, da sich das Material aufgrund seiner Dichte und Partikelgröße absetzt. Erste Versuche, die Suspension mit einem Haftvermittler zu stabilisieren, scheiterten. Auch nach einer Vermengung von 2,5% SiC1200, welches die Viskosität des Harzes erhöht, mit 2,5% SiC FE600, setzt sich das grobe Pulver noch ab. Über die Probenhöhe ergab sich eine inhomogene Verteilung, da nicht alle Partikel des SiC FE600 vor der Aushärtung vollständig zu Boden sanken. Im Vergleich zu den dielektrischen Eigenschaften der Proben mit 5% SiC FE1200 zeigten sich minimal niedrigere Permittivitäten für die FE600/FE1200 Mischung. Absolut liegen die Eigenschaften beider Proben deutlich unter den Eigenschaften der Proben mit nur 2% XE2-B. Bei der Vermengung von 2% XE2-B mit zusätzlichen 5% SiC FE1200 zeigt sich eine Erhöhung der Dielektrizitätskonstante und des Verlustfaktors, während sich bei der Beimischung von 5% SiC FE600 bzw. einer Mischung aus 2,5% SiC FE600 und 2,5% SiC FE1200 zu dem Ruß nur die Dielektrizitätskonstante erhöhte. Abhängig davon ob dieser Einfluss durch Absetzen, Agglomerat Bildung, das Aufbrechen von Agglomeraten oder aus anderen Einflüssen kommt, kann dieser möglicherweise zum gezielten Einstellen der dielektrischen Eigenschaften herangezogen werden. Weiter Untersuchungen hierzu stehen aus. Die Einzelergebnisse der Messungen sind grafisch in Abbildung 4.103 dargestellt, deren Mittelwerte werden in Tabelle 11 wiedergegeben.

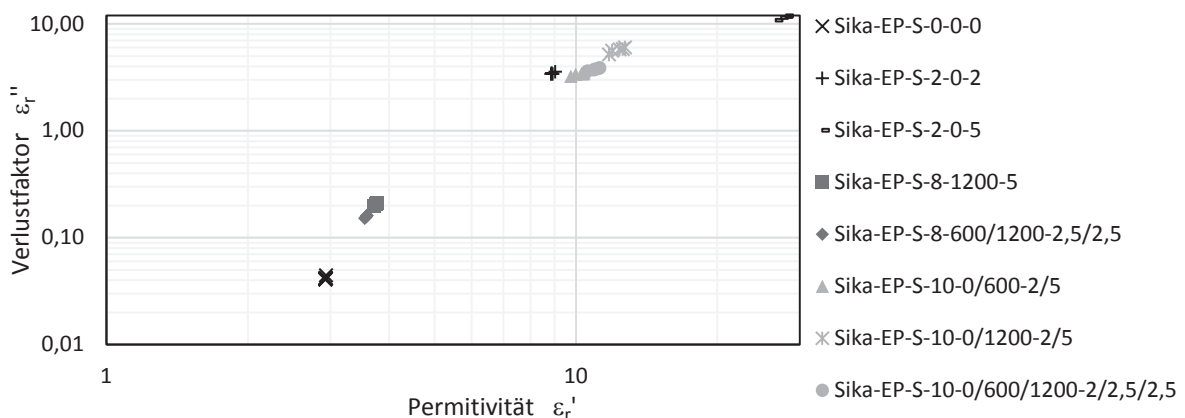


Abbildung 4.103

Ergebnisse der dielektrischen Messungen logarithmisch Aufgetragen

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass sich die dielektrischen Eigenschaften über einen größeren Bereich einstellen lassen, um Absorber für Werkzeuge zu optimieren. Bis zur allgemeinen Anwendung sind jedoch noch weitere Analysen nötig. Neben der Untersuchung mit anderen Kunststoffen, muss der Einfluss der Partikelverteilung auf die dielektrischen Eigenschaften untersucht werden. Ebenso ist die Wärmeleitung anzupassen, sodass in hochabsorbierenden oder dickeren Beschichtungen die erzeugte Wärme weitertransportiert werden kann. Ein Ziel ist damit, ein Materialsystem zu entwickeln, bei welchen die verschiedenen Eigenschaften voneinander weitestgehend unabhängig eingestellt werden können.

**Tabelle 11** Gemittelte Ergebnisse der dielektrischen Messungen mit Probenanzahl und Standardabweichung

Probentyp	Anzahl	$\epsilon_r'$	$\epsilon_r''$
Sika-EP-S-0-0-0	8	2,93 ± 0,004	0,042 ± 0,001
Sika-EP-S-2-0-2	5	8,93 ± 0,07	3,45 ± 0,07
Sika-EP-S-2-0-5	4	27,6 ± 0,6	11,4 ± 0,4
Sika-EP-S-8-1200-5	5	3,75 ± 0,02	0,206 ± 0,004
Sika-EP-S-8-600/1200-2,5/2,5	5	3,58 ± 0,02	0,157 ± 0,004
Sika-EP-S-10-0/600-2/5	5	10,2 ± 0,3	3,4 ± 0,1
Sika-EP-S-10-0/1200-2/5	5	12,3 ± 0,4	5,7 ± 0,3
Sika-EP-S-10-0/600/1200-2/2,5/2,5	5	11,0 ± 0,23	3,75 ± 0,09

## 4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse der entwickelten Verfahren

Zu guter Letzt wurden nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten die erreichten Ergebnisse objektiv bewertet, mit konventionellen Verfahren verglichen, um die Vor- bzw. Nachteile der entwickelten Technologien herauszuarbeiten. Die Kriterien hierfür sind neben den erzielten Materialeigenschaften der gefertigten CFK Bauteile auch der Energiebedarf und die Prozesszeiten, was am Ende in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse mündet.

### 4.5.1 Vergleich der erzielten Materialqualitäten

Die mit Mikrowellenhärtung erzielten Materialqualitäten der Wickelbauteile sind gleichwertig mit denjenigen aus dem Standardprozess im Trockenschrank. Die Dichte und Porositätsmessung ergab zwar geringfügig höhere Porositäten für die Mikrowellenbauteile, jedoch konnte dies durch die nachfolgenden Schliiffuntersuchungen nicht gefunden werden. Beide Varianten zeigen eine gleichmäßige, verschmierte Faser-Matrix Verteilung in welcher keine diskreten Wickellagen mehr zu erkennen waren. Die Porositäten waren sehr gering, ein negativer Einfluss der Mikrowellenhärtung konnte nicht bestätigt werden. Bei den Glasübergangstemperaturen lieferte das FLAME Harzsystem etwas geringere Werte als das SKT-Referenzharz, jedoch ist dies im Harzsystem selbst begründet, wie auch die vorangegangenen Reinharzversuche in Mikrowelle und Trockenschrank gezeigt haben. Ein negativer Einfluss der Mikrowelle war auch hier nicht feststellbar, da jedes Harzsystem in Mikrowelle und Trockenschrank die für sich typischen Werte lieferte.

In der Druckprüfung erreichten alle der getesteten Bauteile den Mindestwert von 200 MPa und lagen durchschnittlich etwa 5% darüber. Überraschenderweise zeigten das FLAME Harzsystem bei den in der Mikrowelle gehärteten Bauteilen Druckfestigkeiten, welche noch einmal 10 % bis 20 % über dem Standardsystem lagen. Dies könnte zum einen durch eine geringfügig höhere Duktilität durch die Füllstoffe



und den geringeren  $T_G$  des FLAME-Harzsystemes begründet sein. Zum anderen könnte es aber auch einen positiven Einfluss des durch Mikrowellen angeregten Vernetzungsprozesses selbst geben. Für die abschließende Klärung dieses Effektes bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen welche im Rahmen des FLAME Projektes nicht mehr durchgeführt werden konnten. Sollte sich ein derartiger, positiver Einfluss auf die Festigkeit von mikrowellengehärteten Bauteilen bestätigen, wäre dies ein deutlicher Vorteil im Vergleich zur konventionellen Härtung im Trockenschrank.

Die pultrudierten Rundstäbe konnten problemlos bis zur Graphitierung gefahren werden. Die gemessenen Werte für die entstehende Porosität sowie die Geometrieänderungen waren durchaus mit Serienbauteilen vergleichbar sodass sich die im FLAME Projekt erzeugte CFC Werkstoffqualität ohne Einschränkungen für den Hochtemperatureinsatz eignet.

#### 4.5.2 Vergleich der Mikrowellenprozesse mit konventionellen Prozessen hinsichtlich Prozesszeit und Energieeffizienz

Mit der entwickelten Hybrid Anlage konnten drei verschiedene Beheizungsarten realisiert und verglichen werden.

- Hybrid (Mikrowellen- und Umluftbeheizung)
- Umluftbeheizung
- Mikrowellenstrahlung

Um die Varianten miteinander zu vergleichen, wurde an einem UD-Wickelkörper der Länge 650mm und der Wandstärke 21mm die Temperaturstufe 80°C in der Hybrid Anlage angefahren. Neben den Anheizraten und der Temperaturverteilung wurde auch der Energieverbrauch gemessen. Entsprechende Werte sind in Tabelle 12 dargestellt.

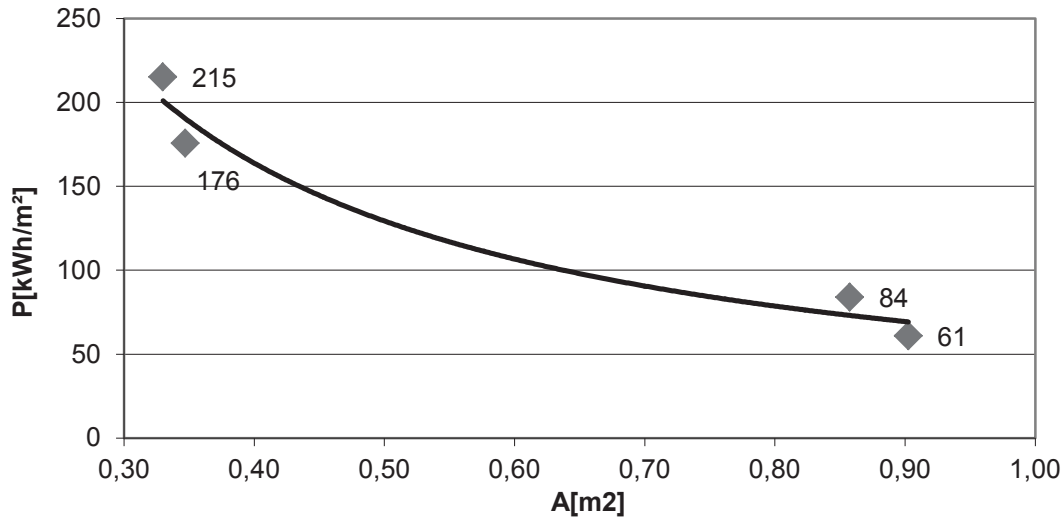
Im Vergleich zur Umluftbeheizung im Trockenschrank konnten deutliche Vorteile der Mikrowelle in der Aufwärmzeit festgestellt werden, welche jedoch abhängig von der Wandstärke sehr unterschiedlich ausfallen. So wurde in einem Abstand von 3 mm zur Bauteiloberfläche eine um rund 85% schnellere Erwärmung festgestellt, bei 9 mm waren es hingegen nur noch etwa 47% Zeitvorteil.

**Tabelle 12** Vergleich der unterschiedlichen Heizmethoden

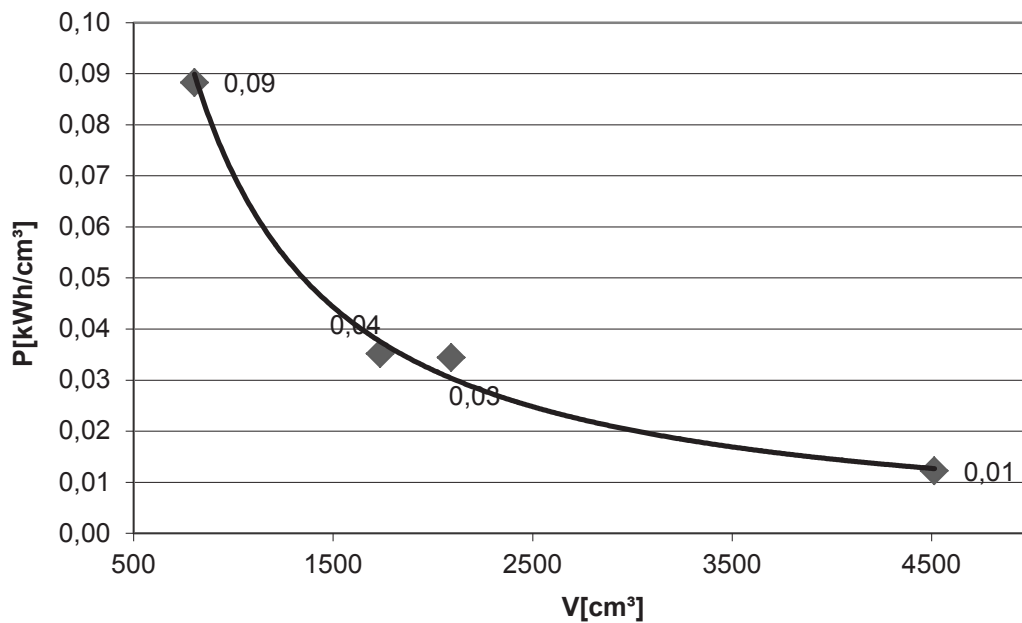
	Hybrid	Umluft	Mikrowelle
Anheizzeit T2 6 auf 78°C [min.]	79	86	42
Energieverbrauch [kWh]	16	22	5
$\Delta T$ in der Anheizphase [K]	$\pm 9$	$\pm 5$	$\pm 11$
$\Delta T$ in der Haltephase [K]	$\pm 3$	$\pm 1,5$	$\pm 5$

Für die Hybrid Anlage ist noch Optimierungspotential für die Anheizzeit und damit auch für den Energieverbrauch vorhanden. Im Prinzip sollten die Werte für die Anheizzeit im Bereich der reinen Mikrowellenbeheizung liegen. Es wurde aus den Tests ersichtlich, dass eine zusätzliche Umluftbeheizung die Temperaturverteilung verbessert. Bei einem Umschalten auf reine Umluftheizung nach der Anheizphase stellten sich optimale Werte für die Temperaturverteilung ein.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den Beheizungsarten lag im Energieverbrauch. Das hybride System benötigte ca. 75% der Energiemenge im Vergleich zur Umluftbeheizung. Die Mikrowellenbeheizung lag im Energieverbrauchswert bei ca. 25% im Vergleich zur Umluftbeheizung.



**Abbildung 4.104**  
Energieverbrauch Oberflächen Diagramm



**Abbildung 4.105**  
Energieverbrauch Volumen Diagramm

Anhand der Bauteilgeometrien konnte eine Berechnung des Energieverbrauchs im Volumen und zur erreichbaren Oberfläche erstellt werden (siehe Abbildung 4.104 und Abbildung 4.105). Die erreichbare Oberfläche bezieht sich auf die Fläche, die von der Mikrowellenstrahlung erreicht und damit im Volumen abhängig von der Eindringtiefe erwärmt werden kann. Geschirmte Flächen wie beispielsweise die Rand-

bereiche im Wickelwerkzeug werden nicht direkt erreicht und tragen somit nicht zur Heizungsoberfläche bzw. zum Heizvolumen bei. Aus den Kurven wurde ersichtlich, dass bei zunehmender Oberfläche und zunehmendem Volumen mehr Mikrowellenenergie in Wärmeenergie umgesetzt werden kann. Die benötigte Energiemenge pro  $\text{cm}^3$  und  $\text{m}^2$  nimmt bei steigendem Volumen und größerer Oberfläche ab. Den größeren Einfluss hatte die Bauteillänge, d.h. der niedrigste Energieverbrauchswerte wurden mit einem  $L=650$  mm und  $d=21$  mm Demonstrator erzielt. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass auch mehrere Wickelkörper parallel in einer Mikrowellenanlage ausgehärtet werden können, solange die erreichbare Oberfläche gegeben ist.

#### 4.5.3 Analyse der entwickelten Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit als Motivation für den nächsten Schritt zur Industrialisierung

Die ermittelten Materialqualitäten in den Wickelkörpern zeigten keine wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Beheizungsarten. Die Materialqualität ist damit unabhängig von der Beheizungsart. Die erhöhte Druckfestigkeit beim FLAME-Harzsystem mit Mikrowellenaushärtung muss noch eingehender untersucht werden, um einen positiven Einfluss sicher nachzuweisen. Anheizzeit und Energieverbrauchswerte zeigten deutliche Vorteile bei der Mikrowellentechnologie.

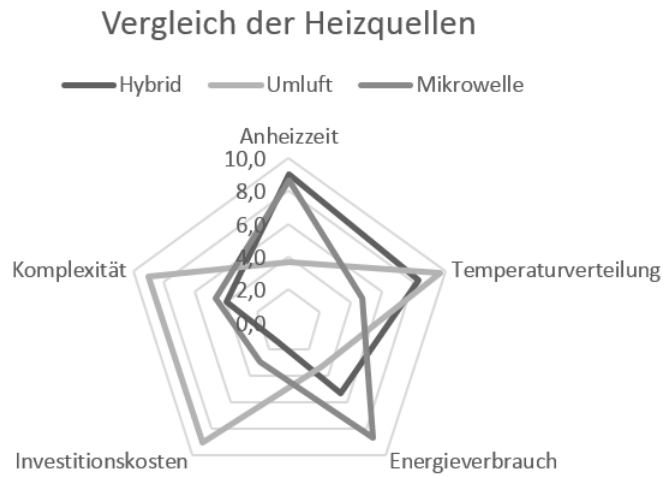
Die herkömmliche Prozesszeit konnte in der Anheizphase mit  $>50\%$  deutlich reduziert werden. Das Gesamtsystem ist hinsichtlich der benötigten Haltezeiten noch nicht endgültig untersucht. Hier liegt ein weiteres Potential zur Prozesszeitoptimierung, da die Haltezeit den größten Anteil der Prozesszeit darstellt.

Die Energieverbrauchswerte liegen in der Mikrowellentechnologie deutlich am niedrigsten. Pro Bauteil können alleine in der Anheizphase auf  $80^\circ\text{C}$  75% Energie (hier 17 kWh) eingespart werden. Bei einem Industriestrompreis von 8,44 Euro Cent pro kWh (Jahreswert von 2014) liegen die Einsparungen pro Bauteil bei € 1,44. Es ist davon auszugehen, dass auch in den Haltephasen und in den zwei weiteren Anheizphasen bei der Mikrowellentechnologie geringere Energieverbrauchswerte vorliegen. Schätzungen liegen bei einem 3-fachen Faktor, müssen aber noch experimentell nachgewiesen werden. Damit wären Einsparungen von € 4,43 pro Bauteil möglich.

Für den Vergleich der einzelnen Beheizungsarten wurden folgende Kriterien betrachtet:

- Anheizzeit
- Temperaturverteilung
- Energieverbrauch
- Investitionskosten
- Komplexität

Anheizzeit, Temperaturverteilung und Energieverbrauch wurden im Rahmen der FLAME Versuche ermittelt. Die jeweils bessere Technologie erhielt einen höheren Wert in einer Skala von 1 bis 10. Bei den Investitionskosten wurden Wiederbeschaffungskosten ermittelt. Die Komplexität bezog sich auf die Implementierung des Prozesses und die damit verbundenen Aufwendungen. Beide Kriterien wurden ebenfalls in einer Skala von 1-10 bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.106 dargestellt.



**Abbildung 4.106**

Bewertung der Heiztechnologien Hybrid - Umluft - Mikrowelle im Vergleich

Für eine weitere Bewertung der Verfahren sind vergleichende Messungen über den gesamten Prozessverlauf notwendig. Prinzipiell kann die Mikrowellentechnologie aber für Präzisionswickelkörper nach dem UD-Verfahren eingesetzt werden. Experimentell nachzuweisen ist die Eignung für eine gleichzeitige Aushärtung von mehreren Bauteilen.

## 5 Ausblick

Die, im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundvorhaben FLAME, gemeinsam weiterentwickelte, modulare HEPHAISTOS Mikrowellen-Systemtechnologie ermöglicht die Aushärtung von faserverstärkten Kunststoffen mit hybrider Heizung mit industrieller Relevanz. Dieses Konzept erlaubt nicht nur die kombinierte Heizung mit Mikrowellen und Heißluft sondern erstmals auch einen direkten Vergleich der einzelnen Heizmethoden in ein und derselben Anlage hinsichtlich Energieeffizienz und Prozesszeit. Erste vergleichende Untersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes zeigen bereits signifikante Prozessvorteile auf. Diese Vorteile machen sich am deutlichsten bei Bauteildicken bemerkbar, die im Bereich der Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung liegen. So wäre der Einsatz dieser Einwicklung für die Wickelkörper mit Wanddicken im Bereich von 10 mm und weniger am effizientesten.

Für den rentablen Einsatz dieser Technologie in realen industriellen Härteprozessen von UD Wickelkörpern ist in weiterführenden Untersuchungen und Entwicklungen eine Anlagenbeschickung mit mehreren Wickelkörpern zu realisieren. Entsprechende Konzepte wurden im Projekt zwar diskutiert, konnten aber im Rahmen der vorhandenen Ressourcen nicht realisiert werden.

Neben den im Rahmen des Projektes untersuchten Prozessen wird die entwickelte, modulare Anlage, mit der Möglichkeit der hybriden Heizung bzw. der möglichen Installation eines Förderbandes, die Entwicklung einer Vielzahl weiterer thermischer Prozesse in industrierelevantem Maßstab ermöglichen.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes wurden darüber hinaus kompakte und optimierte, ein- und zweiteilige Werkzeugkonzepte für das mikrowellenunterstützte Strangziehen von kohlefaserverstärkten Kunststoffprofilen entwickelt und erfolgreich getestet. Durch den Einsatz der Mikrowellentechnologie konnte auch hier das Potential der Effizienzsteigerung gegenüber konventionell geheizten Werkzeugen demonstriert werden. Das entwickelte Werkzeugkonzept auf Basis mikrowellentransparenter keramischer Materialien erlaubt, nach sorgfältiger Auswahl geeigneter Keramikqualitäten, die Demonstration stabiler Pultrusionprozesse, mit sehr deutlichen Vorteilen hinsichtlich der auf die Werkzeuglänge bezogene Zuggeschwindigkeiten. Andererseits wird durch den keramischen Werkstoff die gestalterische Freiheit für Profilgeometrien erheblich eingeschränkt und führt bereits bei einfachen Profilgeometrien zu erheblichen Werkzeugkosten. Zur weiteren Verbesserung der Prozessqualität, auch mit einfachen Profilen und keramischen Werkzeugen, könnte ein Umdenken bei den eingesetzten Trennmitteln erforderlich sein, welche bisher ausschließlich für konventionell beheizte, metallische Werkzeugen entwickelt wurden.



## 6 Literaturverzeichnis

1. Link, G., et al., *Innovative, modulare Mikrowellentechnologie zur Herstellung von Faserverbundstrukturen*, 2011, KIT.
2. Polifke, W. and J. Kopitz, *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. 2., aktualis. Aufl. ed. Ing - Maschinenbau 2009, München [u.a.]: Pearson. 606 S.
3. Metaxas, A.C., *Foundations of electroheat: A unified approach* 1996, Chichester; New York: Wiley. xxvii, 500.
4. *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen ; mit 46 Tabellen*. 3., vollst. überarb. Aufl. ed. Praxis 2010, Wiesbaden: Vieweg + Teubner. 584 S.
5. Meredith, R.J., *Engineers' handbook of industrial microwave heating*. IEE power series 1998, London: Institution of Electrical Engineers. xiv, 363.
6. Feher, L.E. and M.K. Thumm, *Microwave Innovation for Industrial Composite Fabrication—The HEPHAISTOS Technology*. Ieee Transactions on Plasma Science, 2004. **32**(1).
7. Beaumont, M. and J. Filsinger, *Potential of Microwave Heating for Out-of-Autoclave Composites Manufacturing of Aerospace Structures*, in *Sampe* 2011, Soc For Adv Of Materials: Covina.
8. *Novel tooling for composites curing under microwave heating: EU Research Project*. 2011 11.07.2014]; Available from: <http://cordis.europa.eu/docs/results/286/286717/final1-mutool-final-report-figures-and-tables.pdf>.
9. Herkner, T., *Microwave curing of composites: The 25th annual international SICOMP conference*, in *Sicomp Conference 2014*: Pitea Sweden.
10. Nightingale, C., *Microwave assisted curing of epoxy resins and composites*, in *Institute of Science and Technology* 2000, Manchester.
11. Papargyris, D.A., et al., *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 Technology, 2008. **68**(7-8): p. 1854–1861.
12. Tanrattanakul, V. and K. SaeTiaw, *Comparison of microwave and thermal cure of epoxy-anhydride resins: Mechanical properties and dynamic characteristics*. Journal of Applied Polymer Science, 2005. **97**(4): p. 1442–1461.
13. Tanrattanakul, V. and D. Jaroendee, *Comparison between microwave and thermal curing of glass fiber-epoxy composites: Effect of microwave-heating cycle on mechanical properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2006. **102**(2): p. 1059–1070.
14. Visco, A.M., et al., *Fiber Reinforced Polyester Resins Polymerized by Microwave Source*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007. **16**(6): p. 792–799.
15. Yusoff, R., *Microwave assisted RTM processing of carbon/epoxy composites*, in *Manchester Material Science Centre* 2004, University of Manchester.
16. Akhtar, M.J., L.E. Feher, and M. Thumm, *Noninvasive Procedure for Measuring the Complex Permittivity of Resins, Catalysts, and Other Liquids Using a Partially Filled Rectangular Waveguide Structure*. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2009. **57**(2): p. 458-470.
17. Feher, L.E., *Energy Efficient Microwave Systems: Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications* 2009: Springer Berlin Heidelberg.
18. Akhtar, M.J., L. Feher, and M. Thumm. *Effects of Hardeners, Catalysts and Accelerators on Dielectric Properties of Different Resin Systems for Microwave Material Processing Applications*. in *12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 2009)*. 2009. Karlsruhe, Germany: Feher, L.

- 
19. Akhtar, M., L. Feher, and M. Thumm, *Nondestructive approach for measuring temperature-dependent dielectric properties of epoxy resins*. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Jul. 2008. **42**.
  20. Feher, L., et al. *Microwave curing of aerospace and automotive composite structures at HEPHAISTOS experimental centre (HEC)*. in *Global Congress on Microwave Energy Applications (GCMEA 2008, MAJIC 1st)*. 2008. Otsu, Japan.
  21. Akhtar, M.J., L.E. Feher, and M. Thumm, *A Closed-Form Solution for Reconstruction of Permittivity of Dielectric Slabs Placed at the Center of a Rectangular Waveguide*. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2007. **4**(1): p. 122-126.
  22. Feher, L., et al. *Technology developments and high-frequency materials investigations for microwave cured aerospace composites*. in *11th International Conference on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE 11)*. Sep. 2007. Oradea, Romania.
  23. Link, G., et al. *Microwave assisted pultrusion of carbon fibre reinforced polymers*. in *14th International Conference on Microwave and High Frequency Heating*. 2013. Nottingham, GB.
  24. Sun, Y., et al., *A Novel Temperature Control Approach of Distributed Microwave Feeding Systems*, in *International Scientific Colloquium: Modelling for Electromagnetic Processing 2014*: Hannover.
  25. Sun, Y., et al., *Advanced Temperature Control of Distributed Microwave Coupling Systems*, in *16th Seminar Computer Modeling in Microwave Power Engineering 2014*: Karlsruhe, Germany.
  26. Sun, Y., *Adaptive and Intelligent Temperature Control of Microwave Heating Systems with Multiple Sources*, 2015, Karlsruhe Institute of Technology: Karlsruhe.
  27. Ramopoulos, V., et al. *System for in-situ dielectric and calorimetric measurements during microwave curing of resins*. . in *German Microwave Conference (GeMic 2015)*. 2015. Nürnberg.
  28. Prastiyanto, D., et al. *Time- and temperature-dependent dielectric measurements of thermosetting resins*. in *16th Seminar Computer Modeling in Microwave Power Engineering*. 2014. Karlsruhe.
  29. Teufl, D., S. Zaremba, and K. Drechsler, *Evaluation of tooling concepts for the use in microwave processing of fiber reinforced plastics*, in *SETEC 14 TAMPERE - 9th. Technical Conference & Table Top Exhibition*, S.E. Conference, Editor 2014. p. 63–71.







Faserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch hohe spezifische Festigkeiten aus und bieten die Möglichkeit, mit Hilfe entsprechender Herstellungsverfahren Bauteile mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften herzustellen. Daraus ergeben sich wachsende Absatzmärkte in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Automobil, Maschinenbau und Sport. Um den hohen Bauteil- bzw. Herstellungskosten Rechnung zu tragen, gewinnen in jüngster Zeit die Aspekte der Automatisierung und Effizienzsteigerung immer mehr an Bedeutung. Die am Karlsruher Institut für Technologie entwickelte und patentierte modulare HEPHAISTOS Mikrowellen-Systemtechnologie ermöglicht erstmals die mikrowellenunterstützte Aushärtung von faserverstärkten Kunststoffen mit minimiertem Energieaufwand und industrieller Relevanz. Diese Technologie wurde mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft hinsichtlich Energieeffizienz und Prozessautomatisierung weiter optimiert. Mit dem Einsatz geeigneter, mikrowellentauglicher Werkzeuge, wurde die Härtung von dickwandigen CFK Wickelbauteilen erfolgreich demonstriert. Darüber hinaus wurden kompakte Werkzeugkonzepte für das mikrowellenunterstützte Strangziehen von kohlefaserverstärkten Kunststoffprofilen entwickelt und erfolgreich getestet. Durch den Einsatz der Mikrowellentechnologie konnte auch hier das Potential der Effizienzsteigerung gegenüber konventionell geheizten Werkzeugen demonstriert werden. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des 3 ½-jährigen Verbundprojektes FLAME zusammen, welches mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut wurde.