

Schlussbericht zu Nr. 3.2

Zuwendungsempfänger: Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bauchemie und Polymere Werkstoffe, Coudraystr. 11A, 99423 Weimar Prof. Dr.-Ing. Andrea Osburg andrea.osburg@uni-weimar.de +49 (0)3643 584 713 Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH (:fm) Werner-Nordmeyer-Straße 25 31226 Peine, Germany Dipl.-Ing. Marcel Mallah marcel.mallah@microwaveheating.net +49 (0)5171 5457 102 Grunewald GmbH & Co KG Biemenhorster Weg 19 46395 Bocholt Dr. Joachim Gundlach j.gundlach@grunewald.de +49 (0)2871 2507 151 RWTH Aachen (RWTH) Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University Otto-Blumenthal-Straße 1 52074 Aachen Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries und Andreas Bündgens, M.Sc. info@ita.rwth-aachen.de +49 (0)241 80 23400 ISOLITE GmbH, (assoziiierter Partner) Industriestraße 125 67063 Ludwigshafen Manuel Kühn, B. Eng. manuel.kuehn@isolite.de +49 (0)621 91109 542	Förderkennzeichen: 03EN4026C Gefördert durch:  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
Vorhabenbezeichnung: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 bis 31.12.2023, kostenneutral Verlängert bis 30.04.2024	
Berichtszeitraum: 01.01.2022 bis 30.04.2024	

A1: Grundlagenermittlung, Beschaffung und Anmusterung

Die Ermittlung wesentlicher Grundlagen zum Herstellungsprozess der Glasfaser-dämmmatten erfolgte durch eine Literaturrecherche und ein Projekttreffen vom 31.03.2022 beim assoziierten Partner Isolite GmbH. Es wurden die wesentlichen Entwicklungskonzepte besprochen und der Herstellungsprozess durch Begutachtung der Produktionshallen für die Projektpartner zugänglich gemacht. Hieraus wurde ein gemeinsames Lasten- und Pflichtenheft der Partner entwickelt, welches im weiteren Projektverlauf fortgeschrieben wurde. Darüber hinaus wurde vom assoziierten Partner Isolite GmbH eine Musterprobe der Glasfaserdämmmatte und der bisher eingesetzte Binder zur Verfügung gestellt.

An der Bauhaus-Universität Weimar wurde der bisher eingesetzte Binder zunächst durch chemische (ICP-OES) und mineralogische Analyse (Röntgenpulverdiffraktometrie) analysiert. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** dargestellt. Beim eingesetzten Bindersystem handelt es sich um eine wässrige Bentonit-Suspension, die auf die Glasfaserdämmmatten aufgesprüht und anschließend durch Heißpressen in Form gebracht und getrocknet wird. Das zur Verfügung gestellte Musterstück der Glasfaserdämmmatte zeigte Absandungen des Binders, was darauf hindeutet, dass dem Bentonit-Binder beim Herstellungsprozess lediglich Wasser entzogen wird und keine chemische Reaktion im Sinne eines Bindemittels auftritt.

Tabelle 1: Chemische Analyse des bei Isolite GmbH eingesetzten Binders

Probe	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	TiO ₂ [%]	K ₂ O [%]	Na ₂ O [%]	MnO [%]	SO ₃ [%]	TV* [105 °C] [%]
Bentonit-Binder	60,6	17,8	2,2	2,0	3,4	0,12	0,96	2,74	0,13	0,3	10,1

* TV: Trockenverlust bei 105 °C

Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung des bei der Isolite GmbH eingesetzten Binders

Mineralphase	Phasenanteil [%]
Muscovit	46,0 ± 3,3
Orthoclas	12,2 ± 2,2
Plagioclas Anorthit	33,9 ± 3,9
Quarz	8,0 ± 0,9

Im nächsten Arbeitsschritt wurden, gemäß dem Arbeitsplan, die für das zu entwickelnde Bindersystem notwendigen Basismaterialien (Alkalisilicat-Lösungen, Härter-Komponenten) beschafft und charakterisiert. Ein wesentlicher Aspekt der Beschaffung und Anmusterung war dabei, dass die Basismaterialien zukünftig verfügbar sein müssen.

Aus diesem Grunde wurde eine Alkalisilicatlösung (Betol 39T) der Fa. Wöllner beschafft und zunächst charakterisiert. Es handelt sich um ein Natriumwasserglas mit einem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis (Wasserglasmodul, WGM) von 3,3 und einen Feststoffgehalt von ca. 36 %. Die chemische Analyse des Natriumwasserglases erfolgt durch Elementanalyse mittels ICP-OES und ist in **Tabelle 3** aufgeführt.

Tabelle 3: Chemische Analyse der Natriumsilicatlösung Betol 39T der Fa. Wöllner

Probe	TV* 105 °C	GV* 950 °C	SiO_2	Na_2O	Feststoffgehalt	WGM
Betol 39T	58 %	6,1 %	27,6 %	8,03 %	35,9 %	3,3

*TV: Trocknungsverlust bei 105 °C, GV: Glühverlust bei 1000 °C

Für die Umsetzung des Bindemittelkonzeptes, d. h. die Entwicklung eines schnell abbindenden Binders auf Geopolymerbasis, wurden verschiedene Aluminiumquellen als Härter-Komponente beschafft. Diese waren ein Metakaolin (MetaverO) der Fa. NEWCHEM GmbH und ein Aluminiumorthophosphat (Lithopix P26) der Fa. Zschirmer & Schwarz GmbH. Dabei handelt es sich um pulverförmige Ausgangsmaterialien, die zunächst durch chemische (ICP-OES) und mineralogische Analyse (Röntgenpulverdiffraktometrie) charakterisiert wurden. **Tabelle 4** zeigt die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Metakaolins MetaverO und die **Tabelle 5** die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Aluminiumorthophosphats. Beim MetaverO handelt es sich um einen Metakaolin, d. h. einen calcinierten Kaolin der einen hohen amorphen Anteil (> 90 %) und eine hohe puzzolanische Reaktivität (ermittelt durch Chapelle-Test; Umsetzung mit CaO) von 1275 $\text{mg/g}_{\text{Feststoff}}$ aufweist.

Tabelle 4: Chemische und mineralogische Analyse des Metakaolin MetaverO

Chemische Analyse				
SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	K_2O	Si/Al
52,1 %	47,3 %	0,47 %	0,49 %	1:1
Röntgenphasenanalyse				
Amorpher Anteil	Kaolinit		Quarz	
92,4 %	6,3 %		1,3 %	

Darüber hinaus wurden die spezifischen Oberflächen und die Korngrößenverteilungen der Härter auf Aluminat-Basis durch Stickstoffadsorption (BET) und Lasergranulometrie bestimmt. Der Metakaolin MetaverO weist eine spezifische Oberfläche von ca. 11,5 m^2/g und eine mittlere Korngröße d_{50} von ca. 8,2 μm auf. Für das Aluminiumorthophosphat wurde eine spezifische Oberfläche von 1,9 m^2/g und eine mittlere Korngröße von $d_{50} = 13 \mu\text{m}$ ermittelt.

Tabelle 5: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Aluminiumorthophosphats Lithopix P26

Chemische Zusammensetzung (Ma.-%)	
Al_2O_3	35.9
P_2O_5	57.0
SiO_2	0.6
Na_2O	0.15
Andere Oxide < 0.1 Ma.-%	0.15
Trockenverlust	0.9
Glühverlust	5.3
Mineralogische Zusammensetzung (Ma.-%)	
AlPO_4 hexagonal	96.7 ± 1.2
$\text{Al}(\text{PO}_3)_3$	3.3 ± 1.2

A2: Entwicklung des Alkalisilicatbinders

Für die Entwicklung des Alkalisilicatbinders wurde zunächst ein Binderkonzept entwickelt. Dieses sieht vor, dass ausgehend von einer definierten Alkalisilicat-Lösung und einer Aluminiumquelle, ein unter Mikrowelleneinkopplung schnellabbindendes amorphes alumosilicatisches Netzwerk gebildet werden soll. Die **Abbildung 1** verdeutlicht das zu entwickelnde Bindersystem.

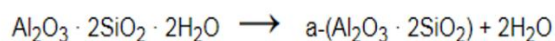
Reaktiver Feststoff:

+

Alkalischer Aktivator:



Geopolymerbinder:



Natriumsilicatlösung

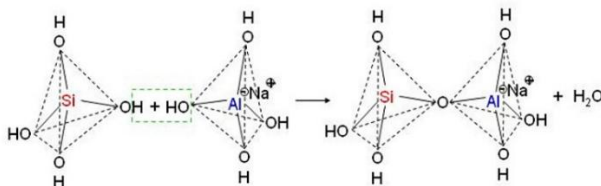
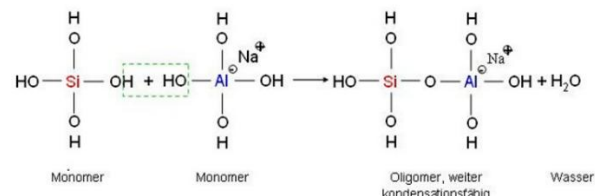


Abbildung 1: Konzept der Binderentwicklung durch Bildung alumosilicatischer Netzwerke

Dabei erfolgt zunächst ein Lösevorgang der Aluminiumquelle in der Natriumsilicatlösung, wodurch monomere Silicat- und Aluminat-Spezies frei werden. Diese Monomere verknüpfen sich in einer Polykondensationsreaktion unter Wasserabspaltung zu einem alumosilicatischen Netzwerk.

Für eine schnelle Reaktion der Natriumsilicatlösung mit der Aluminiumquelle ist ein hohe Alkalität des Wasserglases notwendig. Das Basis-Wasserglas Betol 39T weist einen hohen Modul von 3,3 und damit eine niedrige Alkalität auf, so dass durch Zugabe von NaOH-Pellets weitere Wasserglas-Lösungen mit Moduln von 1,6; 2,0 und 2,4 synthetisiert wurden. Infolge der Alkalizugabe verändert sich der Kondensationsgrad der Natriumsilicatlösungen, wodurch die Rheologie und die Reaktivität mit der Aluminatquelle beeinflusst wird. Die **Abbildung 2** zeigt die ^{29}Si NMR Spektren der verschiedenen Natriumsilicatlösungen in Abhängigkeit vom Wasserglasmodul. Insbesondere die Natriumsilicatlösung mit dem niedrigsten Modul (höchste Alkalität) zeigt den niedrigsten Kondensationsgrad. Daraus lässt sich eine hohe Reaktivität ableiten, da wenige kondensierte Si – O – Si – Einheiten vorliegen.

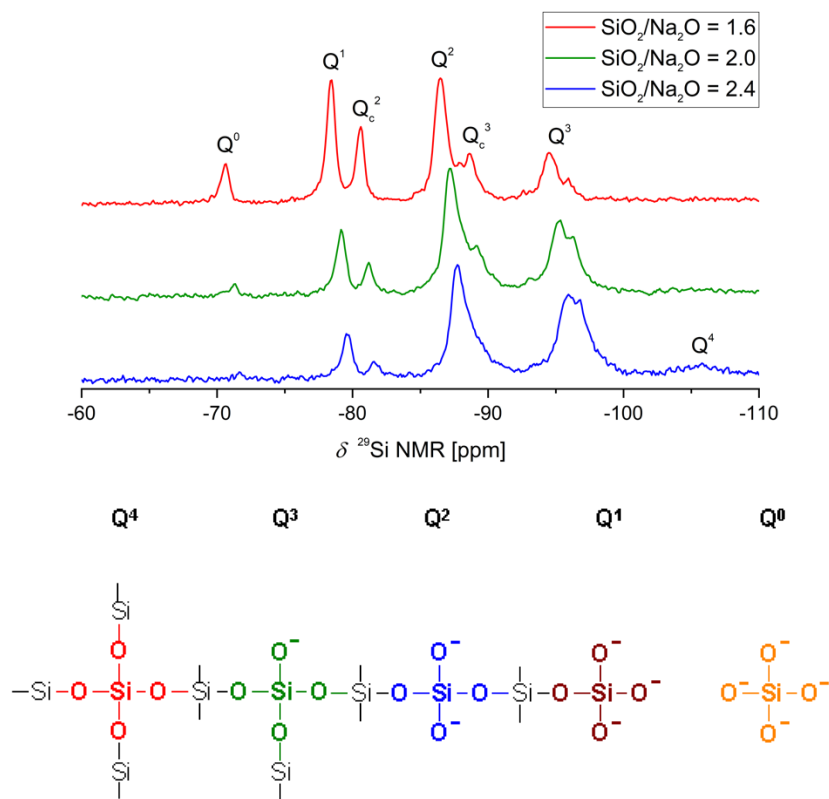


Abbildung 2: ^{29}Si NMR-Spektren der erzeugten Alkalisilicat-Lösungen mit Moduln 1,6; 2,0 und 2,4

Abbildung 3 zeigt die Scherspannungen der Natriumsilicatlösungen, ermittelt durch Rotationsviskosimetrie bei einer Drehzahl von 60 U/min.

Für die Bestimmung des Reaktionsverhaltens der Alkalisilicatlösungen mit den Aluminiumquellen wurde die isotherme Wärmeflusskalorimetrie genutzt. Zunächst wurde das Reaktionsverhalten der drei synthetisierten Natriumsilicatlösungen mit den beiden Aluminiumquellen bei 25 °C und im Weiteren bei 60 °C und 80 °C untersucht, so dass erste Benchmarks für das Verfestigungsverhalten unter Temperatureinfluss, wie er bei der Mikrowelleneinkopplung auftritt, ermittelt wurden. Mit steigender Temperatur wurde eine beschleunigte Reaktionskinetik, d. h. Auflösung und Polykondensation zum alumosilicatischen Netzwerk festgestellt.

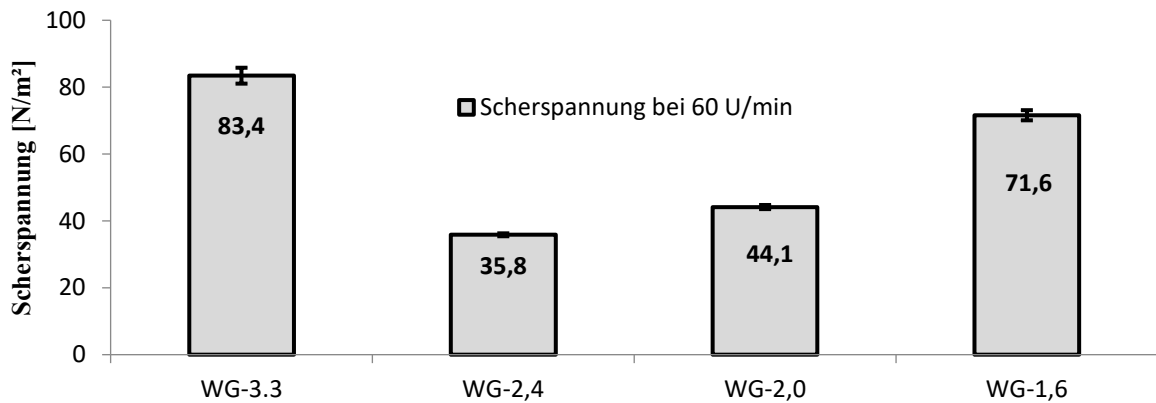


Abbildung 3: Rheologische Eigenschaften der synthetisierten Natriumsilicatlösungen in Abhängigkeit vom eingestellten Modul

Für die Bestimmung des Reaktionsverhaltens der Alkalisilicatlösungen mit ausgewählten Aluminiumquellen wurde die isotherme Wärmeflusskalorimetrie genutzt. Zunächst wurde das Reaktionsverhalten der drei synthetisierten Natriumsilicatlösungen mit den beiden Aluminiumquellen bei 20 °C und bei der Verwendung des Metakaolins bei 40 °C und 60 °C untersucht, so dass erste Benchmarks für das Verfestigungsverhalten unter Temperatureinfluss, wie er bei der Mikrowelleneinkopplung auftritt, ermittelt wurden. Aufgrund der sehr schnellen Reaktion des Aluminiumorthophosphats mit den Natriumsilicat-Lösungen wurden die kalorimetrischen Untersuchungen ausschließlich bei 20 °C durchgeführt und sind in der **Abbildung 4** aufgeführt.

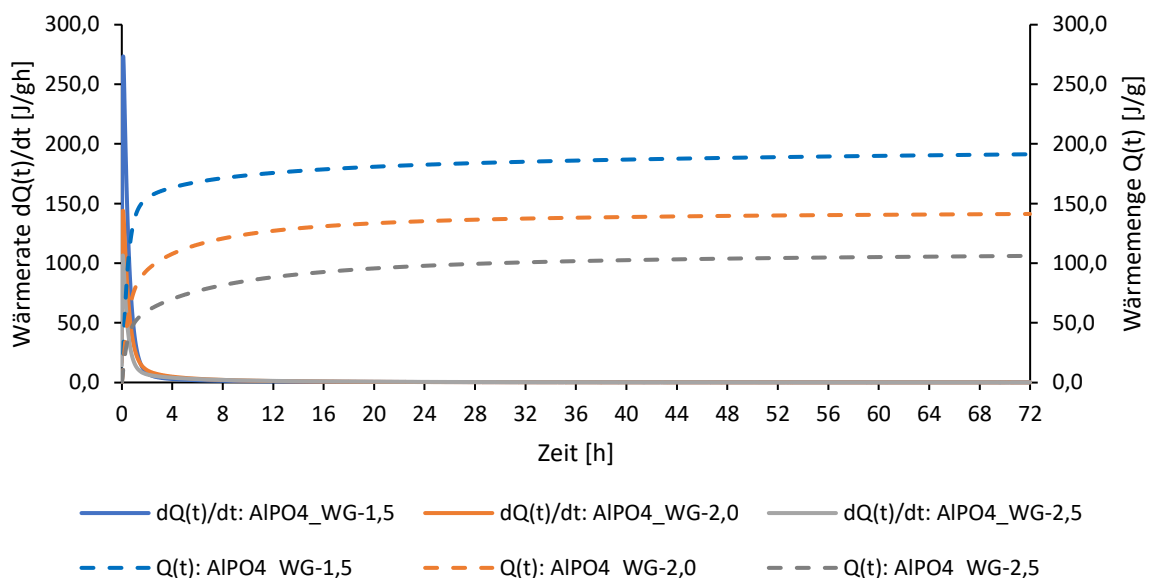


Abbildung 4: Wärmerate und Gesamtwärmefreisetzung des Aluminiumorthophosphats in Abhängigkeit vom alkalischen Aktivator bei 20 °C

Die Ergebnisse zeigen, dass mit sinkendem Modul der Alkalisilicat-Lösungen eine beschleunigte Reaktionskinetik einsetzt und auch der Reaktionsumsatz innerhalb der untersuchten 72 h von ca. 105 J/g (Natriumsilicat-Lösung mit Modul 2,5) auf ca. 185 J/g (Natriumsilicatlösung mit Modul 1,5) ansteigt. Neben dem Temperatureinfluss auf die Reaktionskinetik wurde für das Metakaolin als Aluminiumquelle eine wesentliche Abhängigkeit

vom verwendeten Aktivator (Alkalität der Alkalisilicatlösung) festgestellt. Mit sinkendem Modul, d. h. steigender Alkalität, steigt der Reaktionsumsatz. Die Reaktionskinetik, d. h. die Auflösung und Polykondensation zum alumosilicatischen Netzwerk wird beschleunigt. Die höchste Reaktionsbeschleunigung und der höchste Reaktionsumsatz innerhalb von 72 h wurde mit der Alkalisilicat-Lösung mit einem Modul von 1,5 erreicht und ist der Abbildung 5 zu entnehmen

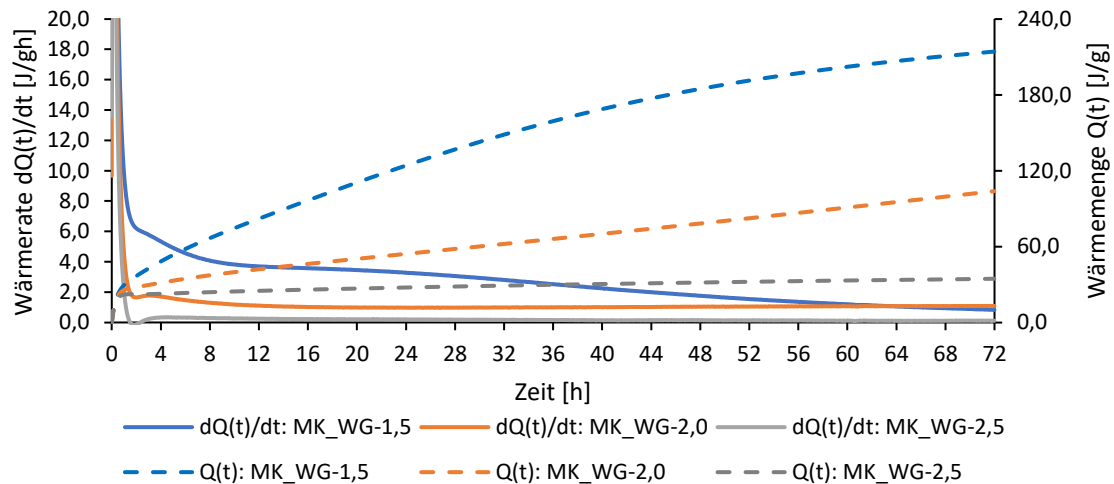


Abbildung 5: Wärmerate und Gesamtwärmefreisetzung des Metakaolins in Abhängigkeit vom alkalischen Aktivator bei 20 °C

Aufgrund der hohen Reaktivität des Metakaolins mit der Alkalisilicat-Lösung mit einem Modul von 1,5 wurde im Weiteren untersucht, inwieweit die Reaktionskinetik und der Reaktionsumsatz durch Temperaturerhöhung, wie sie durch die Mikrowelleneinkopplung hervorgerufen wird, beeinflusst wird. Dazu wurde die Temperatur im isotherm arbeitenden Kalorimeter auf 40 °C und 60 °C eingestellt. Die **Abbildung 6** zeigt die Ergebnisse der kalorimetrischen Untersuchungen des Metakaolins mit dem alkalischen Aktivator mit einem Modul von 1,5 bei 20 °C, 40 °C und 60 °C Reaktionstemperatur.

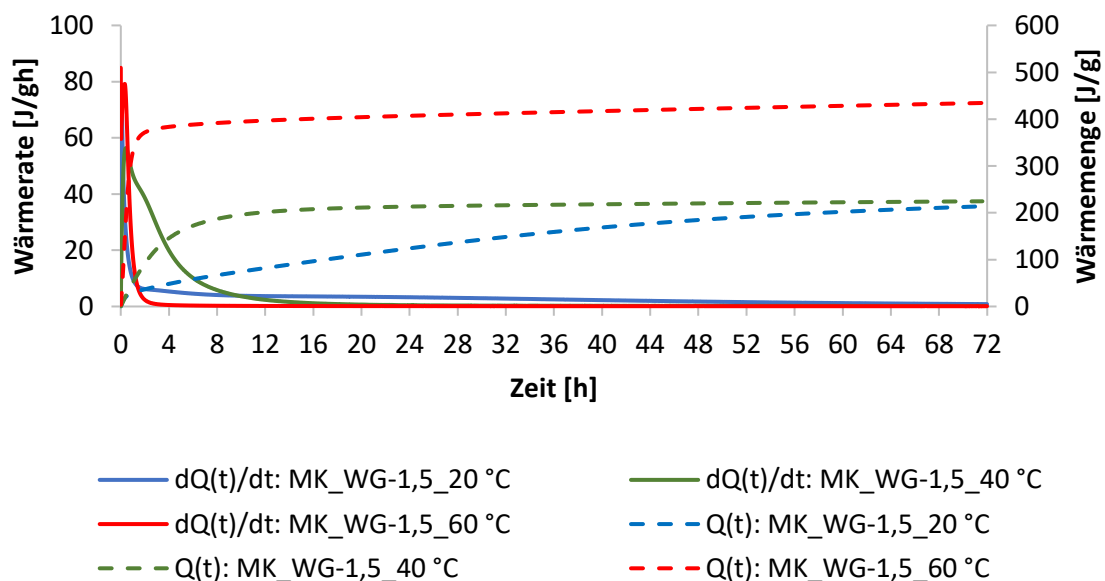


Abbildung 6: Wärmerate und Gesamtwärmeentwicklung des Metakaolins mit der Alkalisilicat-Lösung bei einer Temperatur von 20 °C, 40 °C und 60 °C

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass bei einer Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C die Gesamtwärmefreisetzung innerhalb von 72 h nahezu identisch ist. Dies deutet daraufhin, dass der Reaktionsumsatz nahezu identisch ist. Die Reaktionskinetik hingegen zeigt, dass es durch die Temperaturerhöhung auf 40 °C zu einer beschleunigten Reaktion kommt. Noch deutlicher wird die beschleunigte Reaktion infolge der Temperatur bei einer Erhöhung auf 60 °C. Hier wird bereits das Maximum der Gesamtreaktionswärmefreisetzung nach wenigen Minuten erreicht und steigt anschließend unwesentlich weiter an (Nachkondensation). Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Temperaturerhöhung auf 60 °C innerhalb der ersten 72 h zu einer Erhöhung des Reaktionsumsatzes führt, was sich in einer verdoppelten Gesamtwärmefreisetzung von ca. 430 J/g niederschlägt. Die Ergebnisse der kalorimetrischen Untersuchungen haben gezeigt, dass für den Metakaolin-basierten Binder durch Temperaturerhöhung ein hohes Potential für eine schnelle Verfestigung vorliegt. Für den Aluminiumorthophosphat-basierten Binder konnte gezeigt werden, dass dieser bereits bei 20 °C das Potential einer schnellen Verfestigung aufweist.

A3: Charakterisierung des Verfestigungsverhaltens des Binder-Härter-Systems (Bauhaus-Universität Weimar)

Das Verfestigungsverhalten ausgewählter Binder wurde durch Ultraschalllaufzeitmessungen unter Variation der Binderzusammensetzung und der Temperatur (25 °C und 60 °C) untersucht. Hierfür wurde die Versuchsanordnung (Ultraschallformen mit Sender und Empfänger) in einen Trockenschrank implementiert. **Abbildung 7** zeigt die Silikonformen, in die Sender und Empfänger für die Ultraschalllaufzeitmessungen integriert sind und den mittig platzierten Binder.



Abbildung 7: Silikonformen mit integriertem Sender und Empfänger zur Bestimmung der Erstarrung und Erhärtung der ausgewählten Binder

Die Ultraschalllaufzeitmessungen an ausgewählten Bindern dienen zum einen dazu, die Topfzeit (Verarbeitungszeit der fertig angemischten Binder mit verschiedenen Aluminiumquellen und Natriumsilicat-Lösungen) zu bestimmen und zum anderen zu untersuchen, wie schnell die Binder bei erhöhter Temperatur abbinden und erhärten. Hierfür wurde die Entwicklung der Schallgeschwindigkeit in der Probe herangezogen. Die **Abbildung 8** zeigt die Ergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Reaktionszeit ausgewählter Binder.

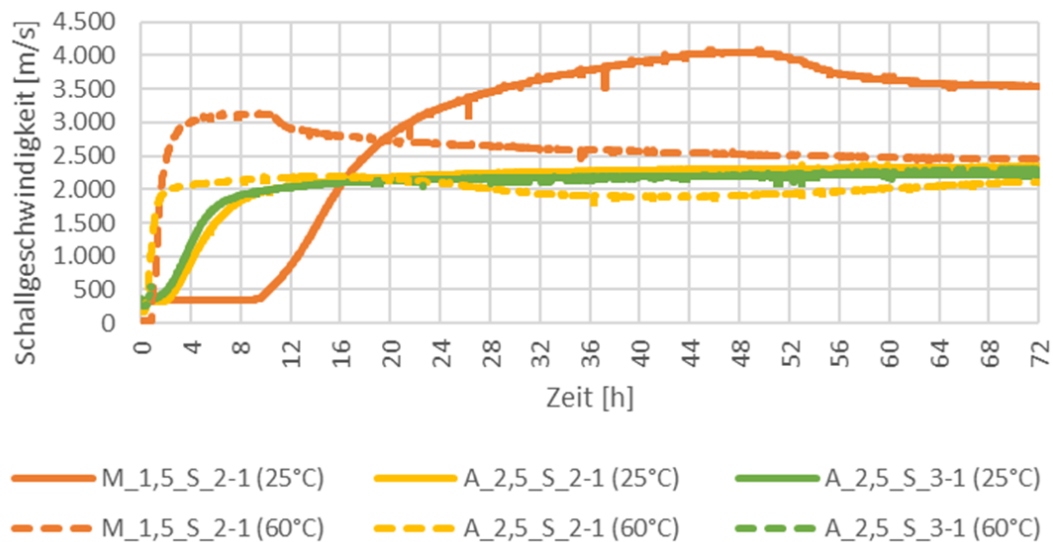


Abbildung 8: Untersuchungen zur Entwicklung der Schallgeschwindigkeit ausgewählter Binder bei 25 °C und 60 °C

Aufgrund des ausgeprägten Schwindverhaltens der Binder wurden diese mit einem Brechsand der Körnung 0 – 0,5 mm als Füller versetzt. Dabei ist zu erkennen, dass lediglich der Metakaolin-basierte Binder M_1,5_S_2-1 eine ausreichend lange Topfzeit von ca. 8 h für die kontinuierliche Beschickung der Fasermatten über den gesamten Produktionstag aufweist. Die Aluminiumorthophosphat-basierten Binder (A_2,5_S_2-1 und A_2,5_S_3-1) zeigen bereits nach 1 h einen kontinuierlichen Anstieg der Schallgeschwindigkeit, wodurch der vorhandene Beschickungsprozess der Fasermatten verändert werden müsste. Beispielsweise müsste vorher genau bekannt sein, wie viele Matten beschickt werden und der Binder kurz vor dem Beschickungsprozess angemischt werden bzw. kontinuierlich nachgemischt werden. Darüberhinaus ist der Abbildung 8 zu entnehmen, dass eine Temperaturerhöhung von 25 °C auf 60 °C bei allen Bindern zu einem höheren Anstieg der Schallgeschwindigkeit führt. Insbesondere der Metakaolin-basierte Binder zeigt bereits nach 10 min eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit. Dieser Anstieg korreliert mit der Gelbildung im Binder und dementsprechend mit dem Beginn des Abbindeprozesses.

Darüber hinaus wurde eine Labormikrowelle mit Drehteller und Magnetrührwerk sowie einer Durchführung für Sensorik (Temperaturmessfühler) beschafft und in Betrieb genommen (**Abbildung 9**).



Abbildung 9: Labormikrowelle (links) und Filmdosen die mit dem ausgewählten Bindern gefüllt waren positioniert in der Labormikrowelle (rechts)

Ein manuelles Vicatgerät, mit dem der Erstarrungsbeginn erfasst werden kann, wurde mit der Labormikrowelle kombiniert. Dadurch war es möglich, die Erstarrungszeiten in Kombination mit der durch die Mikrowellenstrahlung verursachten Temperaturerhöhung im Binder anwendungsorientiert zu erfassen. Die durch Mikrowellenstrahlung hervorgerufene Temperaturerhöhung im Binder wurde durch Temperaturmessfühler aufgezeichnet, um erste Benchmarks für den Fertigungsprozess zu ermitteln. Durch Variation der Leistung der Mikrowellenstrahlung sowie der chemischen Zusammensetzung der Binder (Wasserglasmodul, Aluminiumquelle und Konzentration der Aluminiumquelle) wurden die erforderlichen technischen Parameter der schnellen Binderaushärtung erfasst und definiert. **Tabelle 6** zeigt den Temperaturanstieg und die Erstarrungszeit ausgewählter Binder unter Mikrowellenbestrahlung. Hierfür wurden die Binder 5 s bestrahlt und anschließend der Temperaturanstieg mittels Temperaturmessfühlers ermittelt und anschließend weitere 5 s bestrahlt und die Temperatur im Binder erneut gemessen. Dieser Vorgang wurde bis zu einer maximalen Bestrahlungszeit von 120 s wiederholt. Neben der Temperaturmessung wurde der Vicat-Test zur Bestimmung des Erstarrungsbeginns jeweils nach 5 s Bestrahlungszeit durchgeführt. Die Bindermasse betrug zunächst 33 g. Die Deklaration der Binder wurde dabei wie folgt vorgenommen:

M*: Metakaolin als Aluminiumquelle

A*: Aluminiumorthophosphat als Aluminiumquelle

** : Modul der Natriumsilicat-Lösung (Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)

***: Si/Al-Verhältnis

Tabelle 6: Ergebnisse der Temperaturmessungen und Verfestigung der Binder infolge Mikrowelleneinkopplung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Binder

Probe	Anfangs-temperatur [°C]	Endtemperatur [°C]	Erstarrungszeit oder keine Erstarrung innerhalb der Verweilzeit von 120 s in der Mikrowelle (MW)
M*_1,5**_2-1***	24,0	70,3	65 s in MW
M_2,0_2-1	24,0	96,5	keine Erstarrung
M_2,5_2-1	24,3	95,1	keine Erstarrung
A*_1,5**_2-1***	35,5	60,3	55 s in MW
A_2,0_2-1	30,9	69,7	60 s in MW
A_2,5_2-1	27,1	70,3	70 s in MW
A_1,5_3-1	31,2	78,4	keine Erstarrung
A_2,0_3-1	28,3	80,6	keine Erstarrung
A_2,5_3-1	26,7	78,7	keine Erstarrung

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass insbesondere der Metakaolin-basierte Binder mit einem Si/Al-Verhältnis von 2:1 und der Natriumsilicat-Lösung mit der höchsten Alkalität infolge der Mikrowelleneinkopplung eine sehr schnelle Verfestigung (nach 65 s) erfährt. Ebenso verfestigen die Binder, basierend auf dem Aluminiumorthophosphat, mit einem Si/Al-Verhältnis von 2:1 innerhalb von 2 min. Die Alkalität der Natriumsilicat-Lösung zeigte bei den Aluminiumorthophosphat-basierten Bindern einen weniger stark ausgeprägten Einfluss im Vergleich zu den Metakaolin-basierten Bindern. Neben der Mikrowellenleistung, der Binderzusammensetzung und der Dauer der Mikrowelleneinkopplung ist die Masse des Binders entscheidend für den Temperaturanstieg in der Probe. Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Bindermasse ist in **Abbildung 10** am Beispiel des Metakaolin-basierten Binders M_1,5_2-1 aufgeführt. Hieraus wird ersichtlich, dass mit zunehmender Bindermasse eine längere Zeit benötigt wird bis 70 °C erreicht werden. Dabei entspricht die einfache Grundrezeptur 33 g Binder. Entsprechend **Gleichung 1** lässt sich die benötigte elektrische Energie berechnen, die für die jeweilige Temperaturerhöhung im Binder erforderlich ist. **Abbildung 11** zeigt beispielhaft für den Binder M_1,5:2-1 die benötigte elektrische Energie der Mikrowelleneinkopplung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Bindermasse. Wird die eingebrachte Energie pro Masse (Spezifische Energie [J/g] über der Temperatur dargestellt, dann ergibt der Anstieg der Regressionsgeraden den spezifischen Wärmebedarf des Binders. Dieser Wärmebedarf ist exemplarisch für den Binder M_1,5_2-1 in aufgeführt und errechnet sich zu 0,08 J/(g*K²).

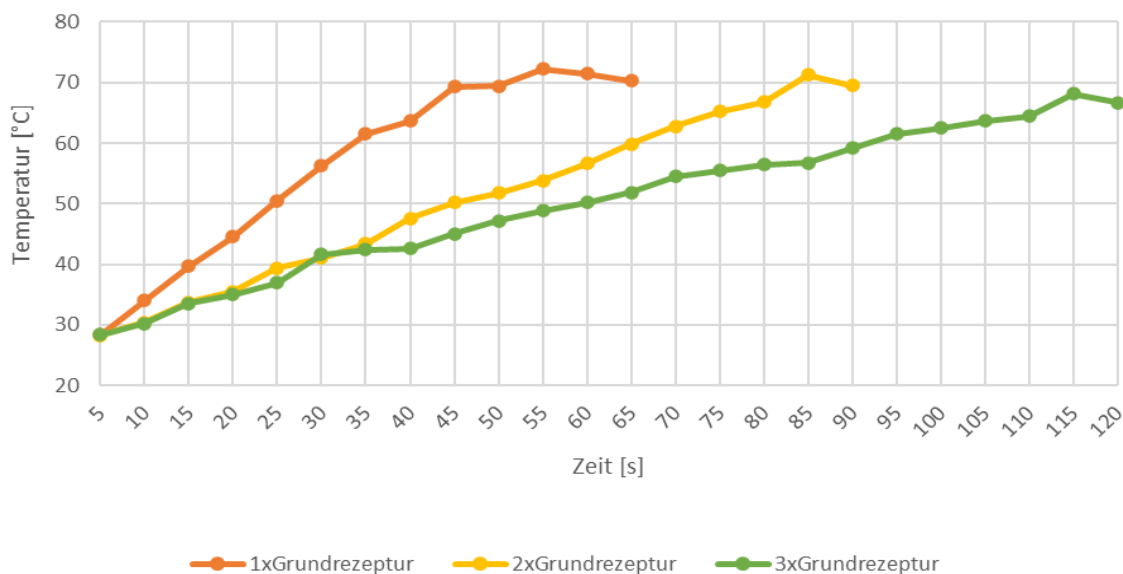


Abbildung 10: Temperaturanstieg infolge von Mikrowelleneinkopplung in Abhängigkeit von der Bindermasse (orange: 33 g; gelb: 66 g und grün: 99 g)

$$\text{Elektrische Energie} = \frac{\text{Leistung [W]} \times \text{Impulszeit [s]}}{3600}$$

Gl. 1

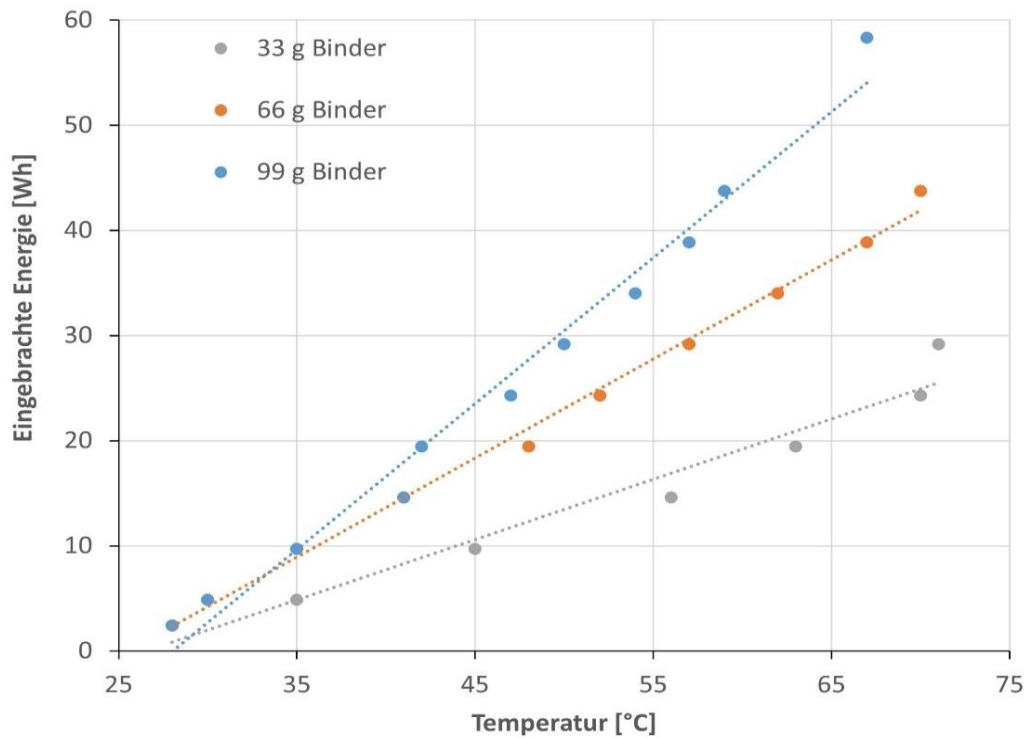


Abbildung 11: Zusammenhang aus benötigter elektrischer Energie in Form von Mikrowellen und Temperaturanstieg im Metakaolin-basierten Binder in Abhängigkeit von der Bindermasse

Darüber hinaus wurde ein Bestrahlungsregime für die weiteren Untersuchungen an ausgewählten Bindern festgelegt. Dieses bestand aus 3 s Mikrowelleneinkopplung und 7 s Pause im Wechsel, bis eine Bindertemperatur von 70 °C erreicht wurde.

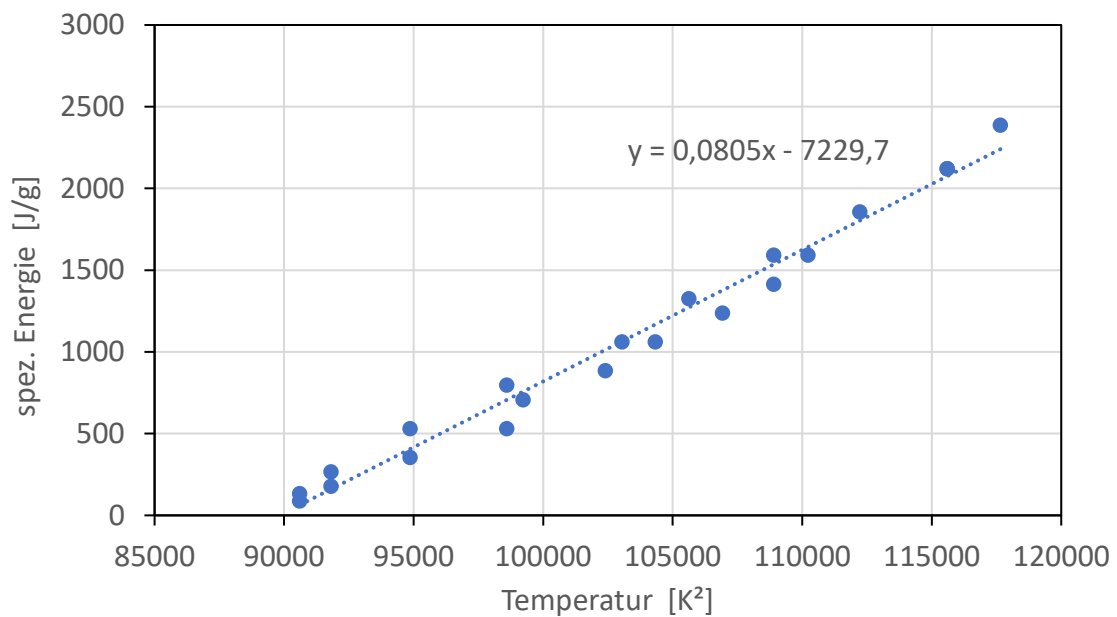


Abbildung 12: Grafische Ermittlung des spezifischen Wärmebedarfs des Metakaolin-basierten Binders M_1,5_2-1

A4: Ermittlung und Anpassung der rheologischen Parameter an die Technologie (Bauhaus-Universität Weimar)

Die Applikation des Binders für dessen Durchdringung der Glasfaserdämmmaterialien kann auf zwei Wegen erfolgen. Der Binder kann durch Sprühen aufgetragen werden oder durch Tränken des Materials. Im Anschluss erfolgt das Einbringen in die Formen. Beide Varianten stellen unterschiedliche Anforderungen an die Rheologie des Binders. Beim Drucksprühen sind niedrig viskose Alkalisilicatlösungen und Härter mit geringer Partikelgröße zu bevorzugen. Beim Tränken der Glasfaserdämmmaterialien können höher viskose Alkalisilicatlösungen verwendet werden; maßgeblich ist die Porigkeit des Dämmmaterials.

Für das Auftragen des Binders durch Sprühen sind definierte rheologische Eigenschaften erforderlich. Um erste Benchmark-Werte hinsichtlich erforderlicher Viskosität und Fließgrenze zu erhalten, wurde das bisher eingesetzte Bentonit-basierte Bindersystem herangezogen. Die **Abbildung 13** und **Abbildung 14** zeigen die Fließ- und Viskositätskurven des bisher verwendeten Bentonit-basierten Binders im Vergleich zum entwickelten Metakaolin-basierten Binder. Die Berechnung der rheologischen Kennwerte erfolgt anhand des Herschel-Bulkley-Potenzansatzes, der die gemessenen Fließkurven zu 92,5 % (Bentonit-Binder) und 99,8 % (Metakaolin-basierter Binder) abbildet. Der Bentonit-basierte Binder, wie er bisher bei der Isolite GmbH eingesetzt wird, weist eine Fließgrenze von 21 N/m² und einen Fließindex von 1,75 auf. Der Metakaolin-basierte Binder weist eine deutlich geringere Fließgrenze von 3,37 N/m² und einen Fließindex von 0,99 auf. Anhand der Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass ein Besprühen der Glasfasermatten mit dem entwickelten Binder realisierbar ist. Für beide Bindersysteme wurden keine Sedimentationen während der rheologischen Beanspruchung festgestellt. Dies ist entscheidend, damit es während des Beschickungsprozesses zu keinen Entmischungserscheinungen kommt.

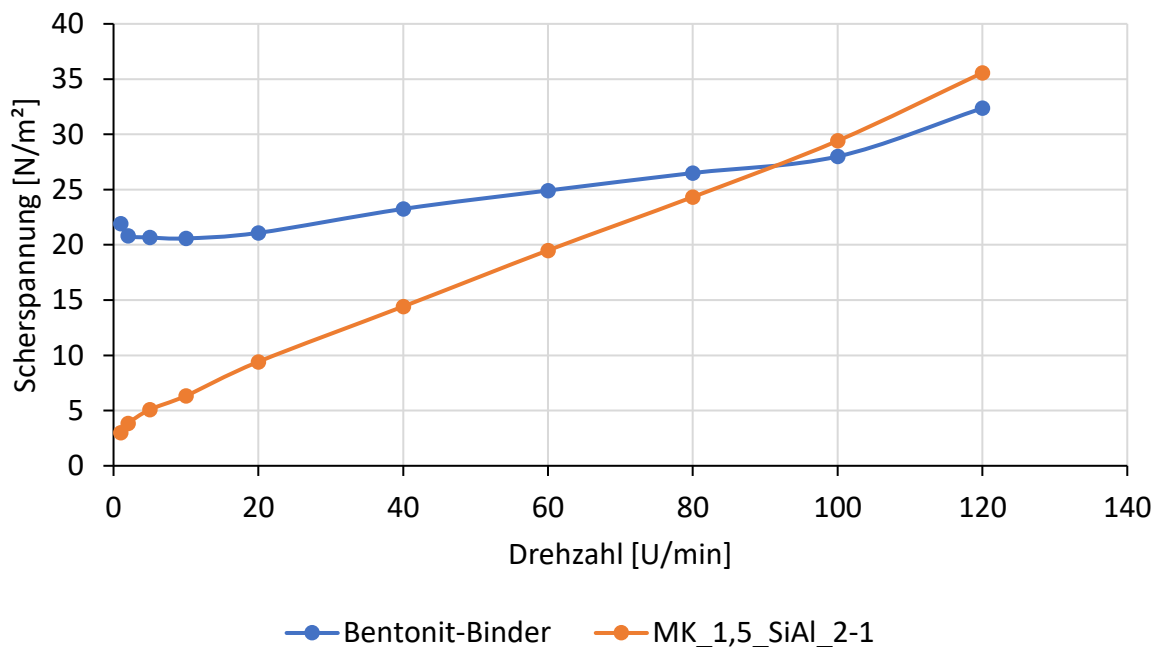


Abbildung 13: Vergleich der Fließkurven des Bentonit-basierten Binders und des entwickelten Metakaolin-basierten Binders MK-1,5_SiAl_2-1 mit einem Si : Al - Verhältnis von 2 : 1 und einer Natriumsilicatlösung (Modul 1,5)

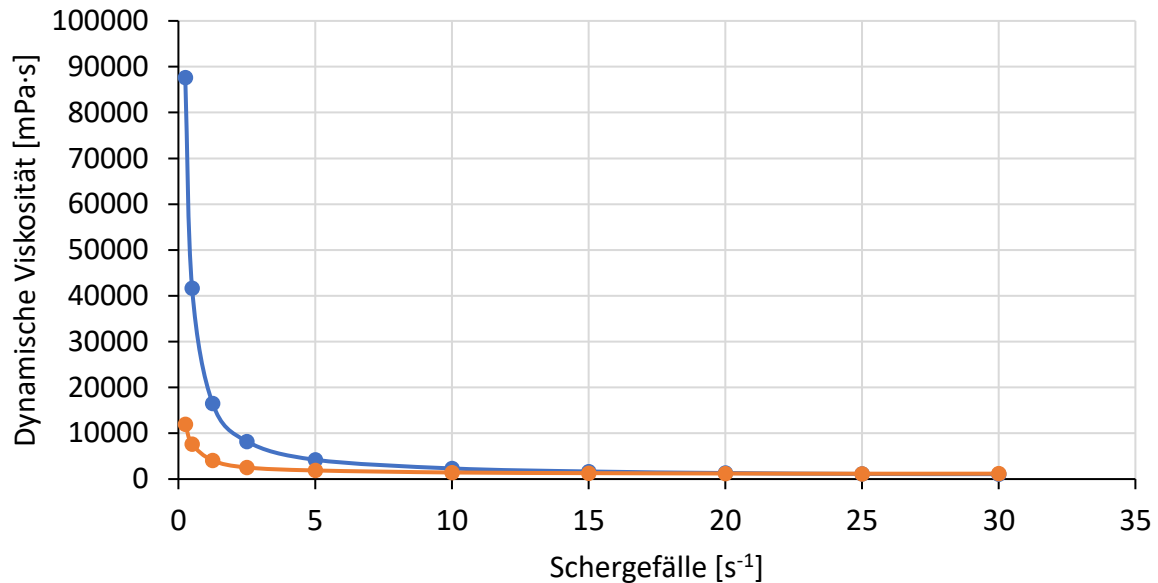


Abbildung 14: Vergleich der Fließkurven des Bentonit-basierten Binders und des entwickelten Metakaolin-basierten Binders MK-1,5_SiAl_2-1 mit einem Si : Al - Verhältnis von 2 : 1 und einer Natriumsilicatlösung (Modul 1,5)

A5: Untersuchung der ausgehärteten Binder (Bauhaus-Universität Weimar)

Entsprechend den vorherigen Arbeitspaketen wurden Metakaolin und Aluminiumorthophosphat als Aluminiumquelle für die Bildung des Aluminosilicatbinders verwendet. Die durch Mikrowelleneinkopplung ausgehärteten Binder, die mit Aluminiumorthophosphat versetzt waren, wurden durch qualitative und quantitative Röntgenphasenanalysen charakterisiert und der Umsatzgrad bewertet. Die **Abbildung 15** zeigt die aluminosilicatischen Binder kurz nach dem Anmischen und die Verfestigung infolge der Mikrowelleneinkopplung. Darüber hinaus sind die durch Mikrowelleneinkopplung ermittelten Abbindezeiten und die entstehenden Temperaturen in **Tabelle 7** dargestellt.

Anhand der Verfestigungszeiten wurden die in der **Tabelle 7** rot markierten Binderzusammensetzung für die Herstellung von Glasfaserdämmkörper favorisiert und ausgewählt.



Abbildung 15: Metakaolin-basierte Binder vor der Mikrowelleneinkopplung (links) und Verfestigung durch Mikrowelleneinkopplung (rechts)

Tabelle 7: Ergebnisse der Temperaturmessungen und Verfestigung der Binder infolge Mikrowelleneinkopplung in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Binder

Probe	Anfangs-temperatur [°C]	Endtemperatur [°C]	Erstarrungszeit oder keine Erstarrung innerhalb der Verweilzeit von 120 s in der Mikrowelle (MW)
M*_1,5**_2-1***	24,0	70,3	65 s in MW
M_2,0_2-1	24,0	96,5	keine Erstarrung
M_2,5_2-1	24,3	95,1	keine Erstarrung
A*_1,5**_2-1***	35,5	60,3	55 s in MW
A_2,0_2-1	30,9	69,7	60 s in MW
A_2,5_2-1	27,1	70,3	70 s in MW
A_1,5_3-1	31,2	78,4	keine Erstarrung
A_2,0_3-1	28,3	80,6	keine Erstarrung
A_2,5_3-1	26,7	78,7	keine Erstarrung
M*: Metakaolin als Aluminiumquelle A*: Aluminiumorthophosphat als Aluminiumquelle **: Modul der Natriumsilicat-Lösung (Verhältnis SiO ₂ /Na ₂ O) ***: Si/Al-Verhältnis			

Die Ergebnisse der quantitativen Röntgenphasenanalyse sind in **Abbildung 16** aufgeführt. Es wird deutlich, dass mit Abnahme der Alkalität der Alkalisilicatlösung der Umsatzgrad von ca. 96 % auf 85 % sinkt. Analog dazu steigt der Anteil des nicht reagiertem Aluminiumorthophosphats an. Für die Binder, die mit Metakaolin versetzt wurden, war die Methode ungeeignet, da das verwendete Metakaolin ebenfalls amorph vorliegt und der Umsatzgrad nicht ermittelt werden konnte. Diese Binder wiesen einen amorphen Anteil > 90 % auf. Entsprechend den Ergebnissen wurden Optimierungen im Hinblick auf den Wasserglasmodul und die Konzentration der Aluminatquellen vorgenommen und zwei Rezepturen ausgewählt, die bei der Dämmkörperherstellung verwendet werden sollen und eine schnelle Verfestigung durch Mikrowelleneinkopplung erfahren.

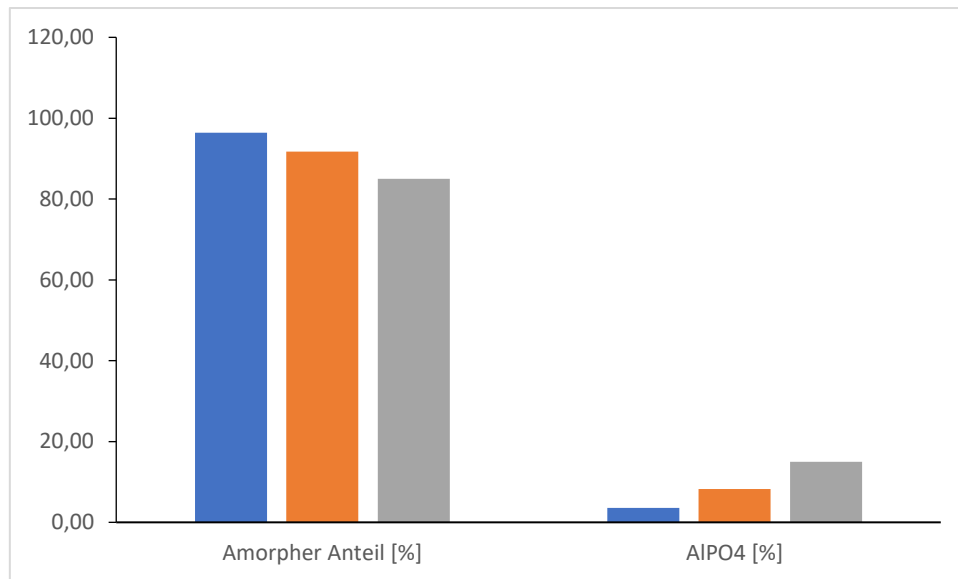


Abbildung 16: Phasenzusammensetzung der Aluminiumorthophosphat-basierten Binder ermittelt durch Röntgenphasenanalyse und Rietveld

Des Weiteren wurden die mechanischen Eigenschaften der aluminosilicatischen Binder, die durch Mikrowelleneinkopplung verfestigt wurden, ermittelt. Wie in den vorausgegangenen Berichten dargestellt, wurde ein Silicium- / Aluminium-Verhältnis von 2:1 für die Herstellung von zylindrischen Probekörpern verwendet. Variiert wurden die Aluminiumquelle (Metakaolin und Aluminiumorthophosphat) und die Alkalität der Silicatlösungen. Um Risse durch Schwindung der Binder zu vermeiden, wurden die Binder mit einem Granitbrechsand der Körnung 0 mm– 0,5 mm versetzt. Die Mörtelproben wurden anschließend durch Mikrowelleneinkopplung und bei Raumtemperatur verfestigt und nach 2 d, 7 d und 14 d die Druckfestigkeit bestimmt. Die **Abbildung 17** zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeits-prüfungen.

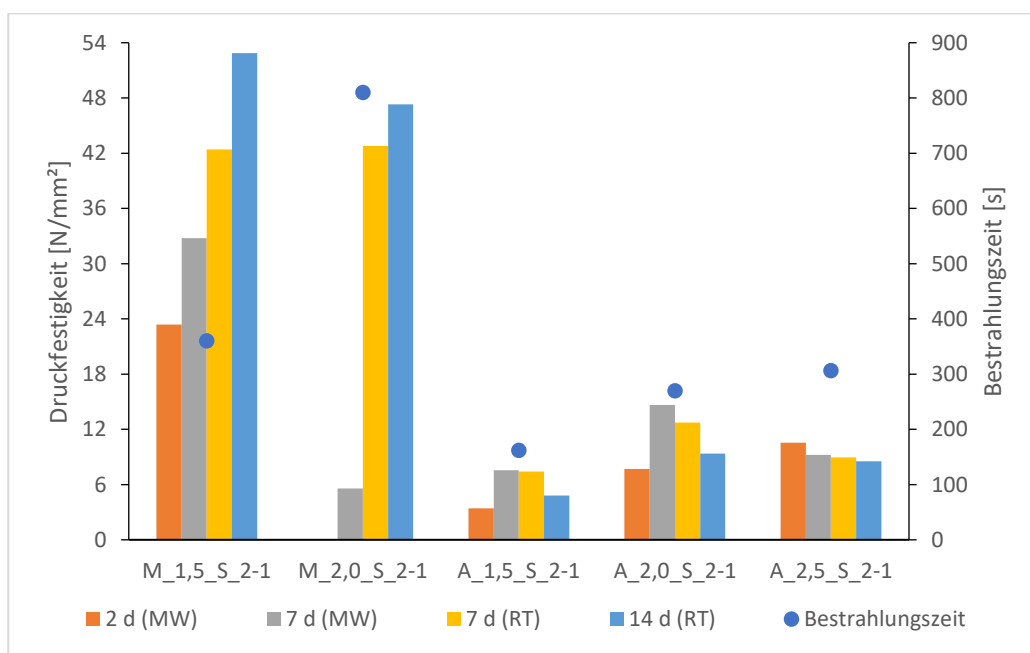


Abbildung 17: Druckfestigkeiten der aluminosilicatischen Mörtel nach 2 d, 7 d und 14 d in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer durch Mikrowellen.

Die mit Metakaolin als Aluminatquelle hergestellten alumosilicatischen Mörtel wiesen sehr hohe Druckfestigkeiten im Bereich von ca. 24 N/mm² - 54 N/mm² auf. Des Weiteren waren für die Binder längere Bestrahlungszeiten erforderlich. Die mit Aluminiumorthophosphat hergestellten Mörtel benötigten deutlich kürzere Bestrahlungszeiten 150 s – 300 s und wiesen deutlich niedrigere Druckfestigkeiten im Bereich von 4 N/mm² - 15 N/mm² auf.

Darüber hinaus wurde die Verklebung der Glasfaserdämmmaterialien mit dem alumosilicatischen Bindersystem durch bildgebende Verfahren analysiert. CT-Untersuchungen (CT: Computertomographie) wurden durchgeführt, um den Verbund zwischen Fasern und Binder zu visualisieren und festzustellen, wie weit der Binder in das Glasfaserdämmmaterial eingedrungen ist. Die Abbildung 18 zeigt die Herstellung der Glasfaserdämmkörper durch Auftragen der Binder mittels Pinsels und anschließende Verfestigung durch Mikrowelleneinkopplung ohne Pressdruckbeaufschlagung. Die Glasfaserdämmmatten wurden in 5 x 5 cm² große Probekörper (5 Probekörper pro Binderzusammensetzung) geschnitten und durchschnittlich mit 2,2 kg/m² (Metakaolin-basierter Binder) einseitig bzw. 3,6 kg/m² beidseitig mit den ausgewählten Bindern bestrichen. Die Glasfaserdämmkörper, die mit dem Aluminiumorthophosphat-basierten Binder bestrichen wurden, wiesen einen Binderanteil von 2,0 kg/m² (einseitig bestrichen) bzw. 2,7 kg/m² (beidseitig bestrichen) auf. Durch Wägung vor und nach der Verfestigung mit Mikrowellen wurde der Wasserverlust ermittelt. Dieser betrug für den Metakaolin-basierten Binder 8,5 % und für den Aluminiumorthophosphat-basierten Binder 8,0 %.



Abbildung 18: Herstellung der Glasfaserdämmkörper durch Bestreichen mittels Pinsels (links) und Verfestigung der Dämmkörper durch Mikrowelleneinkopplung (rechts)

Die CT-Untersuchungen zur Visualisierung der Verklebung der Glasfaserdämmkörper mit den alumosilicatischen Bindern sind in der **Abbildung 19** und **Abbildung 20** dargestellt. Insbesondere das Schnittbild aus dem Inneren des Dämmkörpers verdeutlicht, dass der Binder lediglich auf der Oberfläche des Dämmkörpers appliziert ist und im Inneren, die nicht benetzten Glasfasern und Lufteinschlüsse vorhanden sind.

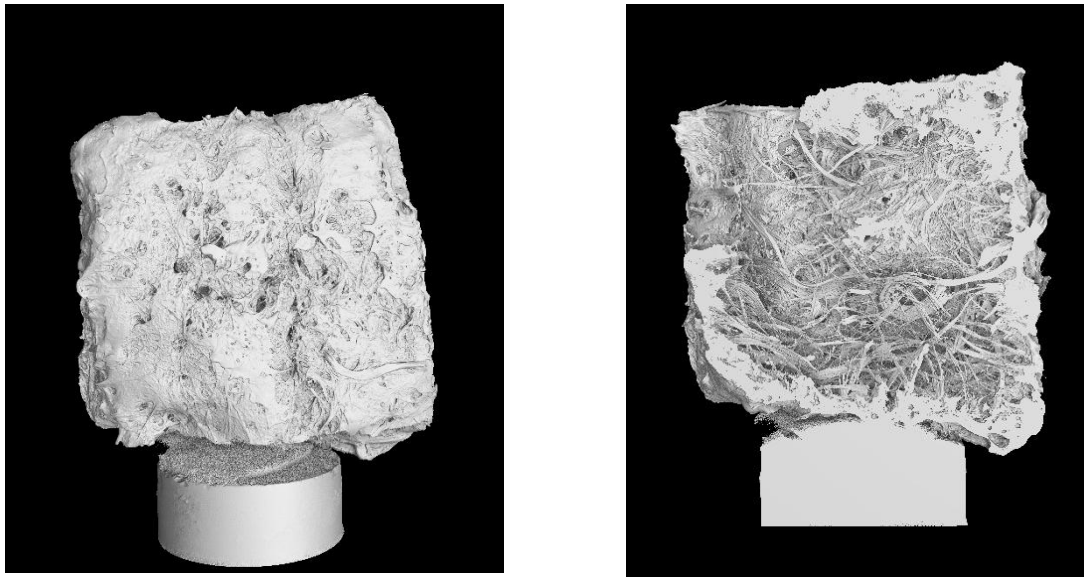


Abbildung 19: CT-Aufnahmen des durch Mikrowelleneinkopplung verfestigten Dämmkörpers (Metakaolin-basierter Binder), links: Oberfläche des Dämmkörpers, rechts: Schnittbild, innere Fläche des Dämmkörpers

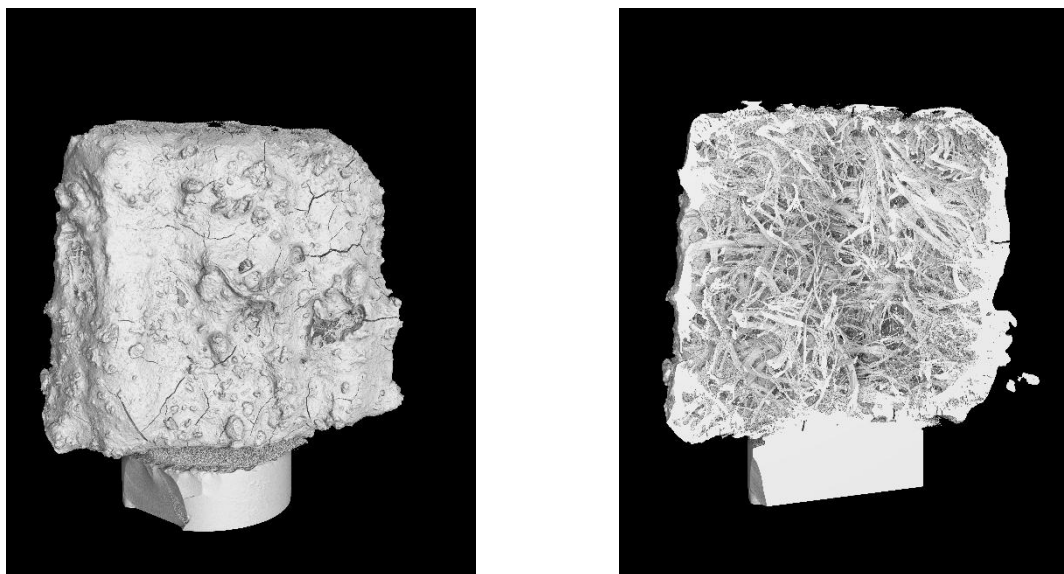


Abbildung 20: CT-Aufnahmen des durch Mikrowelleneinkopplung verfestigten Dämmkörpers (Aluminiumorthophosphat-basierter Binder), links: Oberfläche des Dämmkörpers, rechts: Schnittbild, innere Fläche des Dämmkörpers

A6: Untersuchung der Dauerhaftigkeit und Stabilität des entwickelten Binders

Im aktuell noch laufendem Arbeitspaket 6 wurden die alumosilicatischen Binder hinsichtlich der Temperaturstabilität und Beständigkeit gegenüber Auslaugung charakterisiert. Für die Untersuchung der Temperaturstabilität der ausgewählten alumosilicatischen Binder wurden die Glasfaserdämmkörper aus dem Arbeitspaket A5 im Muffelofen bei 1000 °C für 4 h gelagert. Anschließend wurden die Probekörper mittels Computertomographie begutachtet. Die **Abbildung 21** und **Abbildung 22** zeigen die CT-Aufnahmen der Glasfaserdämmkörper nach einer Temperaturbeaufschlagung von 1000 °C für 4 h.

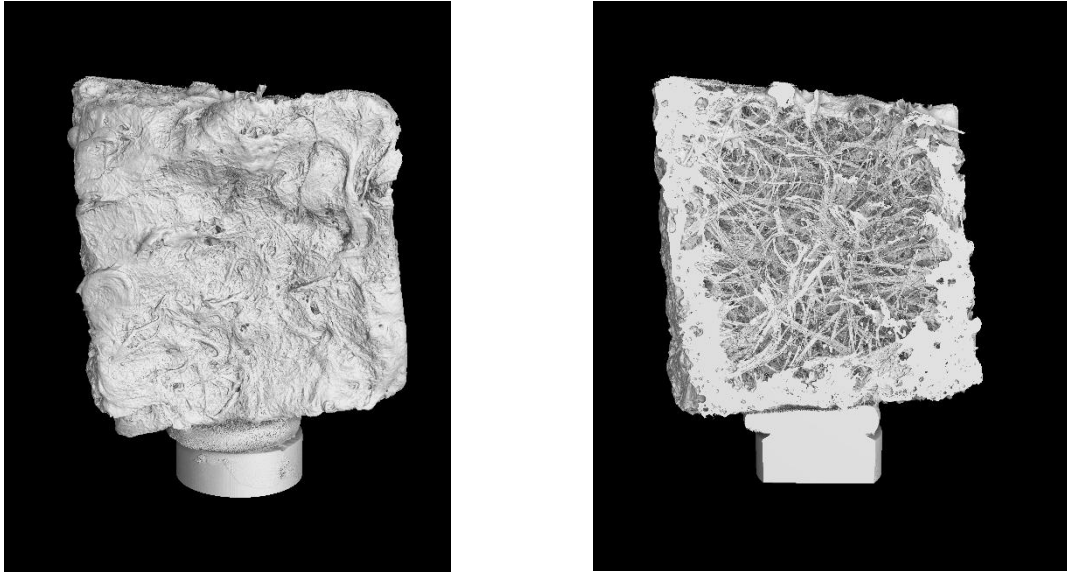


Abbildung 21: CT-Aufnahmen des durch Mikrowelleneinkopplung verfestigten Dämmkörpers (Metakaolin-basierter Binder) nach Temperaturbeanspruchung (1000 °C, links: Oberfläche des Dämmkörpers, rechts: Schnittbild, innere Fläche des Dämmkörpers

Durch Vergleich mit den Aufnahmen aus Arbeitspaket A5 wird deutlich, dass keine Veränderungen in der äußeren und inneren Struktur der Dämmkörper auftreten. Des Weiteren wurde kein Aufschmelzen der beiden Binder beobachtet.

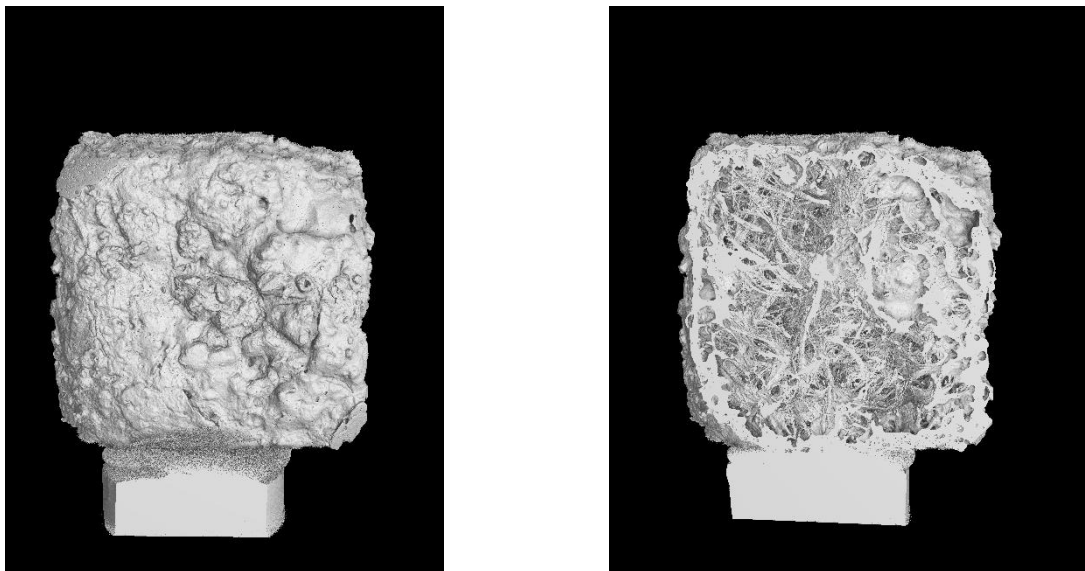


Abbildung 22: CT-Aufnahmen des durch Mikrowelleneinkopplung verfestigten Dämmkörpers (Aluminiumorthophosphat-basierter Binder) nach Temperaturbeanspruchung (1000 °C), links: Oberfläche des Dämmkörpers, rechts: Schnittbild, innere Fläche des Dämmkörpers

Die Untersuchungen zur Temperaturbeständigkeit durch Thermoanalyse, gekoppelt mit Massenspektroskopie, wurden unter Argon-Gasatmosphäre im Temperaturbereich von 40 °C – 1000 °C durchgeführt und sind in den **Abbildung 23** und **Abbildung 24** dargestellt.

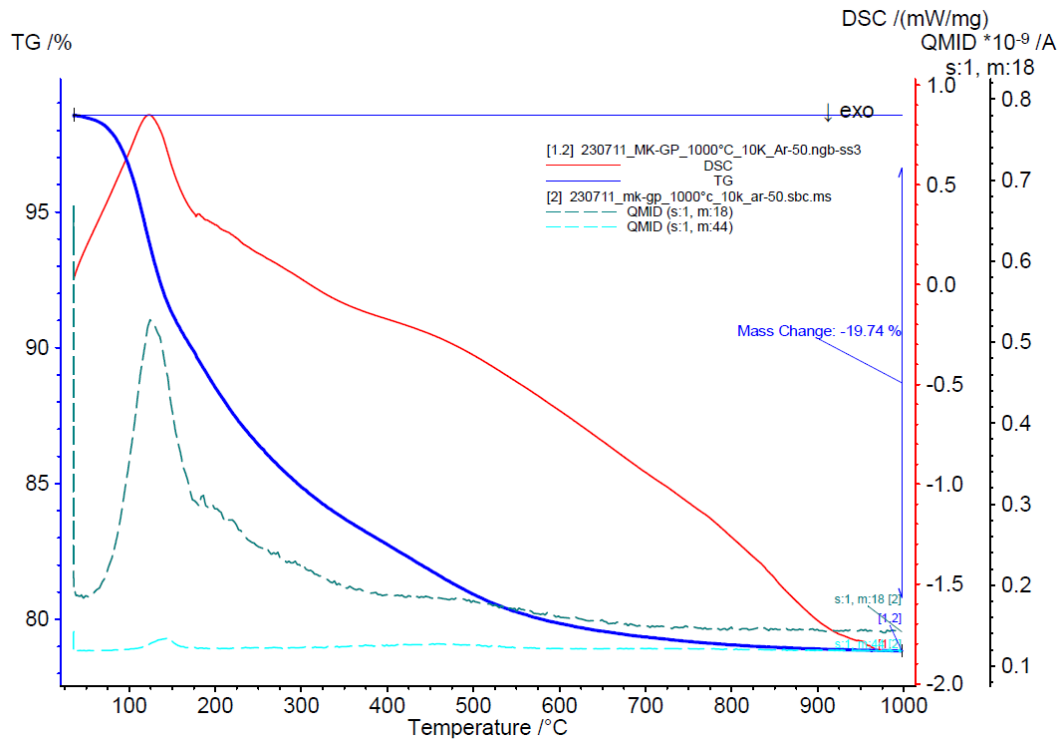


Abbildung 23: TG- / DSC- / MS-Kurven des Metakaolin-basierten Binders im Temperaturbereich von 40 °C – 1000 °C

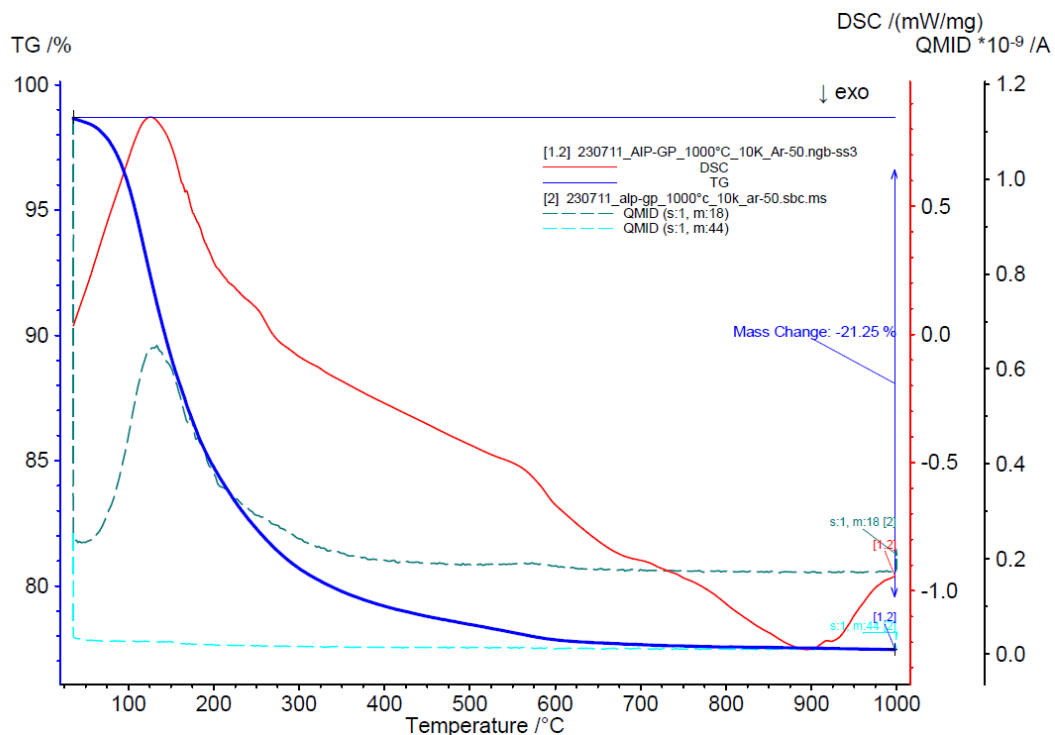


Abbildung 24: TG-DSC-MS-Kurven des Metakaolin-basierten Binders im Temperaturbereich von 40 °C – 1000 °C

Dabei ist zu erkennen, dass der Metakaolin-basierte Binder über den gesamten Temperaturbereich eine Massenabnahme (ca. 20%) erfährt. Durch Auswertung des Massenspektrums, konnte die Massenabnahme mit einem Wasserentzug (Kristallwasser, adsorbiertes Wasser)

im Temperaturbereich von 50 °C bis 600 °C korreliert werden (Massezahl 18). Die DSC-Kurve zeigt zunächst einen endothermen Verlauf, was ebenfalls mit dem Freiwerden von Wasser korreliert und anschließend bis 1000 °C einen exothermen Verlauf. Neben Wasser wird während der Temperaturbeanspruchung auch CO₂ (Massezahl 44) frei, welches in Form von Carbonat bei der Aushärtung des Binders gebunden wird.

Der auf Aluminiumorthophosphat-basierte Binder zeigt eine ähnlich TG-DSC-MS-Kurve, im Vergleich zum Metakaolinbasierten Binder. Die Massenabnahme beträgt ca. 21,3 % und wird ebenfalls durch das Austreiben von adsorbiertem Wasser und Kristallwasser hervorgerufen. Ebenso wird CO₂ durch die Temperaturbeanspruchung aus dem Binder ausgetrieben. Im Unterschied zum Metakaolin-basierten Binder tritt bei 900 °C eine weitere exotherme Wärmefreisetzung auf, die als Schmelzwärme identifiziert werden konnte.

Die Auslaugversuche und chemischen Analysen der Eluate wurden nach dem S4-Verfahren durchgeführt und sind in der **Tabelle 8** aufgeführt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Auslaugversuche durch chemische Analyse der Eluate nach dem S4-Verfahren

Anteile der Ionen/Verbindungen in M.-%				
Binder		M_1,5_S_2-1	A_2,0_S_2-1	A_2,5_S_2-1
Al	gelöst	0,031 ± 2,00	0,026 ± 2,00	0,071 ± 2,00
Al ₂ O ₃	enthalten	15,14	10,47	10,95
Si	gelöst	0,119 ± 2,00	0,042 ± 2,00	0,041 ± 2,00
SiO ₂	enthalten	51,78	39,04	40,48
PO ₄	gelöst	0,021 ± 2,00	9,147 ± 2,00	7,675 ± 2,00
P ₂ O ₅	enthalten	0,29	7,63	7,98
Na	gelöst	1,356 ± 2,00	3,882 ± 2,00	3,021 ± 2,00
Na ₂ O	enthalten	1,75	1,31	1,37
NaOH	enthalten	6,18	8,42	6,86
pH-Wert [-]		10,75	8,84	8,38

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass insbesondere die als geeignet festgelegten Binder M_1,5_S_2-1 und A-1,5_S_2-1 nahezu keine Aluminium- und Siliciumionen freisetzen. Dies deutet darauf hin, dass durch die Mikrowellenverfestigung ein wasserstabiles Bindersystem vorliegt. Darüber hinaus ist der Anteil gelöster Alkalien sehr niedrig und liegt im Bereich der Fehlertoleranz des Messverfahrens. Des Weiteren zeigen die ermittelten pH-Werte, dass die bei der Umsetzung zum Alumosilicatischen Netzwerk notwendigen Kationen, fest eingebunden sind.

Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der ausgewählten Binder erfolgte zudem durch Lagerung von Probekörpern unter Klimawechselbeanspruchung. Hierfür wurden Probekörper der Zusammensetzung M_1,5_S_2-1 und A_2,0_S_2-1 in eine Klimaprüftruhe eingelagert und gemäß **Abbildung 25** mit einer definierten Klimawechselbeanspruchung ausgesetzt. Dabei wurde erhöhte Temperatur (60 °C) durch Bestrahlung mit UV-Lampen, Feuchte (Beregnung) und niedrige Temperaturen (-30 °C) Frostbeanspruchung im Wechsel simuliert.

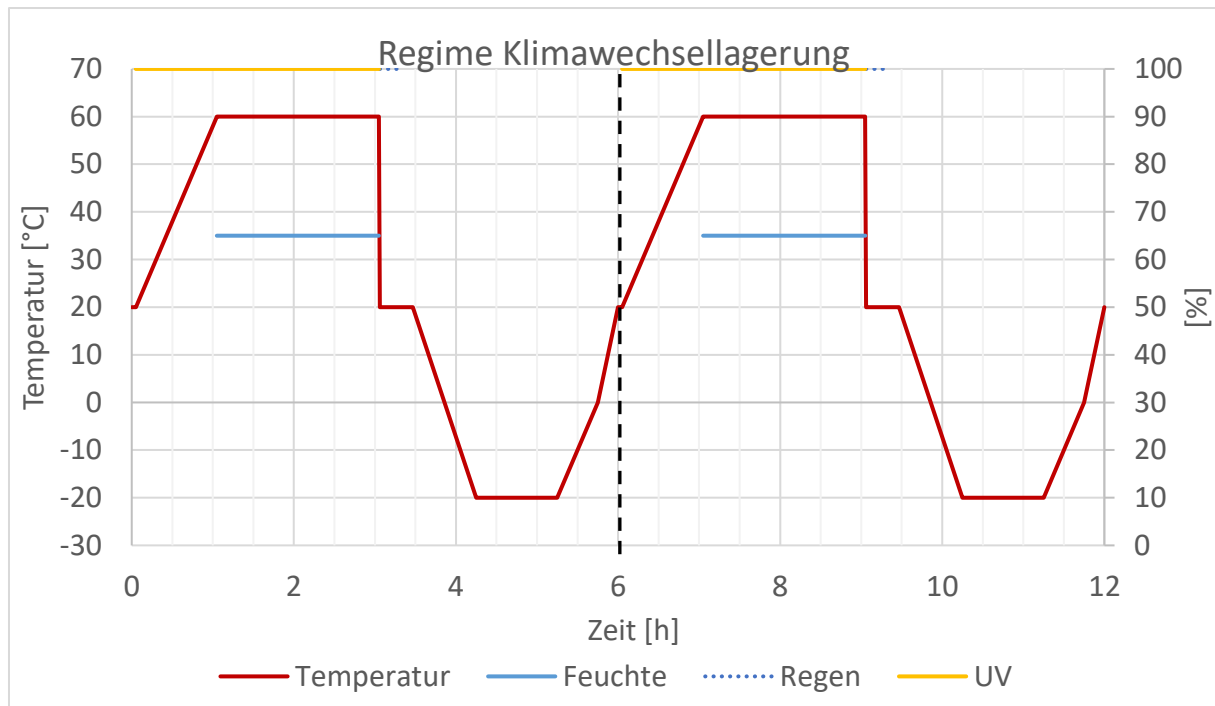


Abbildung 25: Darstellung des Klimawechsellaagerungsregimes (4 Zyklen pro Tag) zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der ausgewählten Binder

Insgesamt wurden die Probekörper mit 44 Zyklen beansprucht und anschließend hinsichtlich der Stabilität optisch und durch Druckfestigkeitsmessung beurteilt. Die **Abbildung 26** zeigt die Aluminiumorthophosphat-basierten Binder nach der Klimawechselbeanspruchung. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass Abplatzungen und größere Risse in den Probekörpern auftraten. Die Bestimmung der Druckfestigkeit war aufgrund der zerstörten Strukturen, nicht möglich.



Abbildung 26: Aufnahmen der Aluminiumorthophosphat-basierte Binder (A_2,0_S_2-1) nach der Klimawechsellaagerung

Die **Abbildung 27** zeigt die Probekörper der Metakaolin-basierten Binder nach der Klimawechsellagerung. Diese zeigten eine hohe Dauerhaftigkeit gegenüber Klimawechselbeanspruchung und eine Druckfestigkeit von ca. 30 N/mm², wodurch diese Binderzusammensetzung für die Beschichtung der Glasfaserdämmmatten für die Pressversuche mit dem Mikrowellenwerkzeug ausgewählt wurde.



Abbildung 27: Aufnahmen der Aluminiumorthophosphat-basierte Binder (M_1,5_S_2-1) nach der Klimawechsellagerung

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Das **Arbeitspaket B** (Werkzeugentwicklung) wurde durch Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH (:fm), Grunewald GmbH & Co KG und RWTH Aachen (RWTH), Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University bearbeitet. Im Folgenden wird über die Ergebnisse der Unterarbeitspakete berichtet:

B1: Anforderungsanalyse → Werkzeugkonzept → Lastenheft

Die Anforderungsanalyse wurde in Rücksprache mit dem assoziierten Partner Isolite GmbH, durch Beschreibung des aktuellen Produktionsprozesses erarbeitet und wird im Folgenden aufgeführt:

Produktionsprozess:

- Das Trägermaterial wird mit dem wasserbasierten Binder beidseitig benetzt und in das beheizte Werkzeug eingelegt.
- Die Presse fährt zu und das eingelegte Material wird in Form gebracht (Form und Kontur).
- Über direkte Wärmeleitung wird das Wasser verdampft und das Bauteil getrocknet, eine mögliche Restfeuchte wird über eine nachgelagerte Trocknung vermieden.
- Pressdruck: bis zu 200 Tonnen; Temperatur 180 bis 300 C; Haltezeit 2,5 bis 4,5 min.

Anforderungsanalyse:

- Optimierung / Alternative zum bestehenden Binder
- Verringerung von Verformung der Dämmschalen nach dem Formprozess durch unzureichende Stabilität des Binders
- Überwachung der Restfeuchte (optional)
- Verringerung von Verformung der Dämmschalen nach dem Formprozess durch Restfeuchte
- Verringerung der Haltezeit
- größere Ausbringungsmenge
- Reduzierung der thermischen Einflüsse auf die Mitarbeiter
- Geringeres Gefährdungspotential durch Verbrennungen
- Reduzierung von Krankheitsfällen durch große Temperaturschwankungen
- Steigerung der Motivation und Zufriedenheit der Mitarbeiter durch bessere Arbeitsbedingungen

Anhand des Produktionsprozesses und der Anforderungsanalyse wurde das nachfolgend dargestellt Lastenheft (**Tabelle 9**) entwickelt.

Tabelle 9: Lastenheft

Anforderung	Festforderung (F) / Wunsch (W)
Energieeintrag mittels Mikrowellen	F
Aktivierung des Bindermaterials möglich	F
Aktivierungsdauer des Bindermaterials < 6 min	F
Aktivierungsdauer des Bindermaterials < 3 min	W
Keine Kondensation von Wasser im Werkzeug	F
Formgebung des Trägermaterials	F
Aufheizzeit < 30 s	W
Energieeintrag oben und unten	W
Thermische Isolation zur Steigerung der Energieeffizienz	W
Thermische Isolation zur Reduktion der thermischen Einflüsse auf Werker	W
Monitoring der Restfeuchte im Bauteil	W

B2: Entwicklung Mikrowelle für Pressenwerkzeug (Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH; Grunewald GmbH & Co. KG; Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University)

Durch intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern wurde entschieden, das geplante Versuchswerkzeug zunächst für die Presse am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) zu entwickeln und anzufertigen. Ursächlich sind hierbei die entstehenden hohen Kosten für die parallele Entwicklung des Werkzeugs und der Mikrowellenimplementierung. Dementsprechend sieht der Arbeitsplan abweichend vor, ein Mikrowellenwerkzeug für die Presse am ITA zu entwickeln, welches durch entsprechende Adaption, auch für die Presse der Firma Isolite GmbH genutzt werden kann.

Auf Grundlage des bestehenden Presseneinbauraums wurden passende Designs von Dämmelementen ausgewählt und positioniert. Die ausgewählten Elemente sind in der **Abbildung 28** dargestellt.

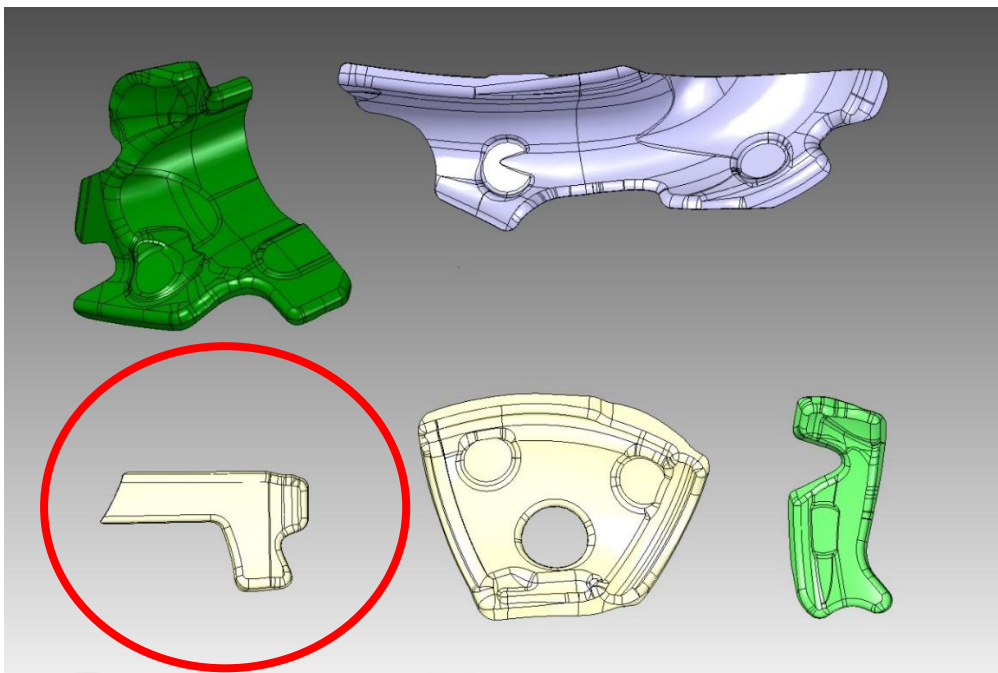


Abbildung 28: Ausgewählte Geometrien der Dämmmaterialien

Durch intensiven Austausch der Firma Grunewald GmbH & Co. KG und der Firma Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH wurde entschieden, in einem ersten Schritt zunächst nur ein Dämmelement exemplarisch zu konstruieren und im Anschluss näher zu untersuchen. Ausgewählt wurde das kleinste und somit kritischste Dämmelement. Bei einer erfolgreichen Realisierbarkeit können die weiteren Elemente, entsprechend den erzielten Ergebnissen, angepasst werden. Es wurde ein mikrowellengeeignetes Material durch Fa. Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH und Grunewald GmbH & Co. KG unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit der Mikrowellenstrahlung vorausgewählt. Die **Abbildung 29** zeigt die zur Verfügung stehenden Materialien, die für die Mikrowellendurchlässigkeit in Frage kamen.

	Einheit	AS 500 M	AS 600 M	AS 800 M
Größe	mm	380x500	1000x1200	1000x1200
Stärke	mm	3-30	0,5-75	0,5-75
Dichte	kg/dm ³	2,6	2,2	2,2
Druckfestigkeit $\perp$	20°C N/mm ²	260	400	330
	200°C N/mm ²	180	250	240
Druckfestigkeit $\parallel$	23°C	-	100	-
Stauchverformung	% bei 50 N/mm ²	1-2	5-6	5-6
Biegefestigkeit $\perp$	N/mm ²	120	190	170
Zugfestigkeit	N/mm ²	50	170	120
Grenztemperatur	Kurzzeit °C	-	600	800
	Dauer °C	500	500	700
Wärmeleitzahl	W/(m*K) 100°C	0,75	0,26	0,26
	W/(m*K) 200°C	-	0,28	0,28
Ausdehnungskoeffizient	$\parallel 10^{-6} K^{-1}$	10	10	10
	$\perp 10^{-6} K^{-1}$	10	100	100
Durchschlagsfestigkeit	kV/mm	20	25	25
Lichtbogenfestigkeit	VDE 0303	L 6	L 3	L 3
Kriechstromfestigkeit	VDE 0303	CTI 600	CTI 600	CTI 600
spez. Durchgangswiderstand	$\Omega \cdot \text{cm}$	$>10^{16}$	$>10^{16}$	$>10^{16}$
Dielektrizitätszahl	VDE 0303	7	6,5	6
Feuerwiderstandsklasse	UL 94	-	94 V-0	94 V-0
Wasseraufnahme	% 24h	0	<1	<1

* K-Therm® AS 600 und 800 M sind Schichtpresstoffe. AS 500M ist ein homogener Werkstoff.

Abbildung 29: Geometrien und Materialparameter der Dämmmaterialien

Aufgrund der vorherrschenden hohen Druckbeanspruchung beim Pressen wurde als Material K-Therm AS 600M von der Fa. AGK ausgewählt. Das Material besitzt eine hohe Druckfestigkeit und hat eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme. Die Spanbarkeit des Materials wurde in Fräsversuchen bei der Fa. Grunewald GmbH & Co. KG ermittelt. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau des Materials konnten in definierten Bereichen (z.B. Radienausläufe), bei denen die einzelne Schicht auf nahezu 0 abgefräst wurde, Ausbrüche beobachtet werden. Konstruktiv sollte auf das Ausbrechen reagiert werden, indem möglichst auf Fälle verzichtet wird, bei denen dies im Vorfeld bekannt ist.

Im Bereich der Pinchkanten kann das Material nicht eingesetzt werden, da die hier auftretenden Kräfte zu groß sind. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus o.g. Versuchen kann das Werkzeug nur in Mischbauweise ausgeführt werden. Als Materialien wurde K-Therm AS 600M und Stahl der Güte 1.2312 ausgewählt und die Modell-Konstruktion entwickelt.

Anhand dieser Erkenntnisse wurde das in **Abbildung 30** dargestellte Modell einer Pressform für das ausgewählte Element unter den Kooperationspartnern gemeinsam erstellt.

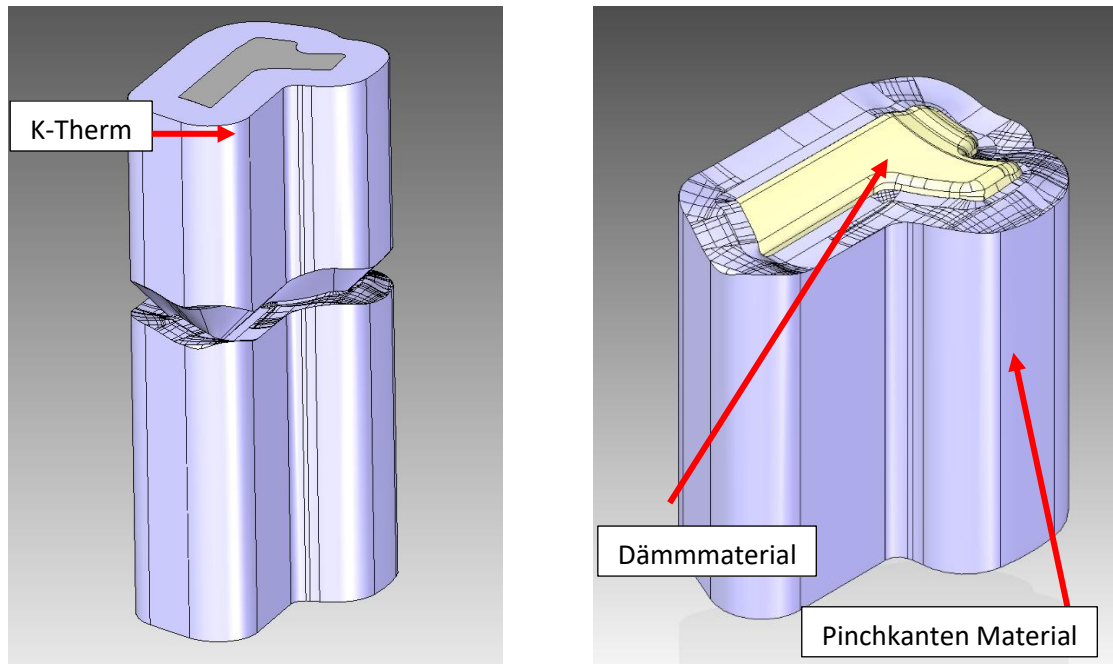


Abbildung 30: Exemplarisches Modell

Zur Implementierung der Mikrowelle ist die Verwendung des nahezu mikrowellentransparenten Materials (K-Therm) über den inneren Teil der Pressform erforderlich. Dieses Material soll einen großen Teil des Werkzeuges ausmachen. Unterstützt wird das Material durch eine dünne Stahlwand, welche die Pinchkanten abbilden soll. Das Material befindet sich somit direkt oberhalb und unterhalb des zu formenden Elements. Somit ist gewährleistet, dass die Mikrowelle in das dünne Material der Dämmelemente eindringen kann und eine ausreichende Ausbreitung des Mikrowellenfeldes garantiert wird.

Erste Berechnungen haben ergeben, dass eine Mikrowellenleistung von 12 kW für eine erfolgreiche Prozessdurchführung erforderlich ist. Geplant ist eine mögliche Umsetzung der Leistung mittels 24 x 500 W oder 10 x 1250 W Mikrowellengeneratoren.

Mithilfe des beschriebenen Modells sollte die genaue Anordnung der Mikrowelleneinkopplungen im Werkzeug simulativ überprüft und bestimmt werden. Die Festlegung der Positionen und die Verteilungen der Einkopplungen ist für die Erzeugung eines homogenen Mikrowellenfeldes von enormer Bedeutung.

Im ersten Schritt wurde anhand des neu entwickelten Versuchswerkzeugs und des bisher bei ISOLITE GmbH verwendeten Bentonit-Binders, dielektrische Untersuchungen durchgeführt.

Die Resultate der dielektrischen Eigenschaften des Bentonit-Binders und der alumosilicatischen Binder (Binder 1: Metakaolin-basierter Binder, Binder 2: Aluminiumorthophosphat-basierter Binder) im flüssigen Zustand sind in **Tabelle 10**, **Tabelle 11** und **Tabelle 12** aufgeführt. Im Allgemeinen führt ein höherer tangentialer Verlust des Materials zu einer höheren Absorption von Mikrowellenenergie. Die Ergebnisse zeigen, dass die Proben für Frequenzbänder von 2,45 GHz einen hohen tangentialen Verlust mit Werten von etwa 0,7 besitzen und somit eine hohe Absorption von Mikrowellen aufweisen.

Tabelle 10: Dielektrische Messung des Aluminiumorthophosphat-basierten Binders

Wet Binder 1		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	23.441632	1.125886
2450	16.748535	0.967923

Binder 1 After 1 hour in free space		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	17.939887	0.680201
2450	13.586706	0.662324

Tabelle 11: Dielektrische Messung des Metakaolin-basierten Binder 2

Wet Binder 2		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	24.508848	1.165418
2450	18.293510	0.945478

Binder 2 After 1 hour in free space		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	11.962825	0.732416
2450	9.451606	0.679384

Tabelle 12: Dielektrische Messung des Bentonit-Binders

Wet Binder 3		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	60.509191	0.178166
2450	58.952566	0.215613

Binder 3 After 1 hour in free space		
Frequency (MHz)	Dielectric Constant	Tangent Loss
915	57.092742	0.259413
2450	55.489959	0.262231

Bei den folgenden Simulationen wurden die dielektrischen Eigenschaften des Bentonit-Binders nach 1 Stunde bei 2,45 GHz mit dem niedrigsten Tangentialverlust gewählt.

Anhand dieser Resultate wurde das Mikrowellensystem auf der Grundlage der gemessenen Dielektrizitätskonstante modelliert. Somit konnte das elektromagnetische Verhalten des

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem BauteilAuswurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Modells wie Impedanzanpassung, elektrische Feldverteilung, Leistungsfluss und Verlustleistungsdichte identifiziert und optimiert werden.

Aufgrund der geringen Maße und insbesondere der geringen Höhe der ITA Presse, verzögerte sich die Simulation deutlich. Zwischenzeitlich konnte eine Einkopplung der Mikrowelle aufgrund mangelnden Bauraums nicht gewährleistet werden. Diese mangelnden Platzverhältnisse stellten sich erst nach Aussagekräftigen Positionierungen der Antenne im Werkzeug heraus. Hierfür wurde eine aufwendige Simulation benötigt. Die folgenden **Abbildung 31** und **Abbildung 32** zeigen den Platzbedarf der zur Einkopplung benötigten Komponente.

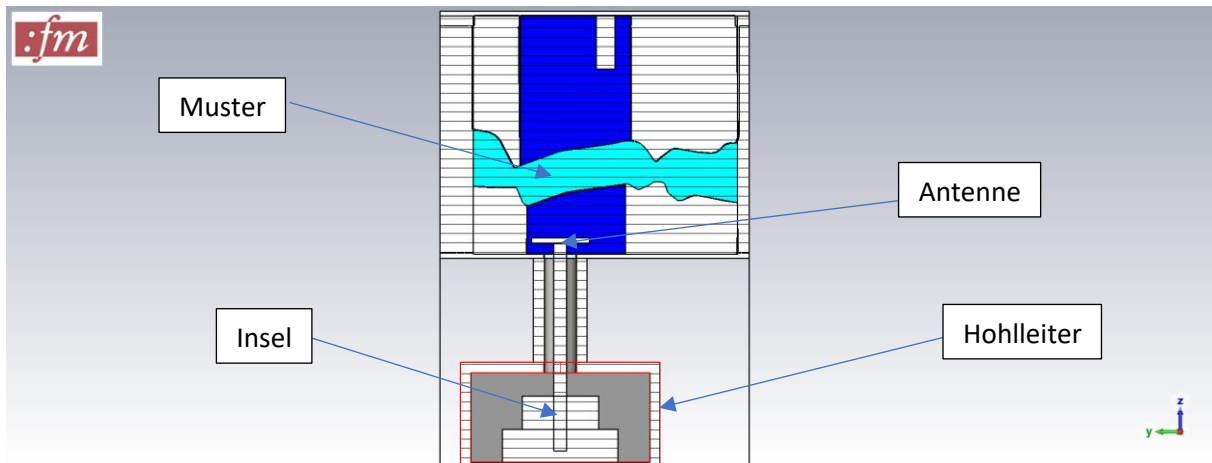


Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau Mikrowelleneinkopplung

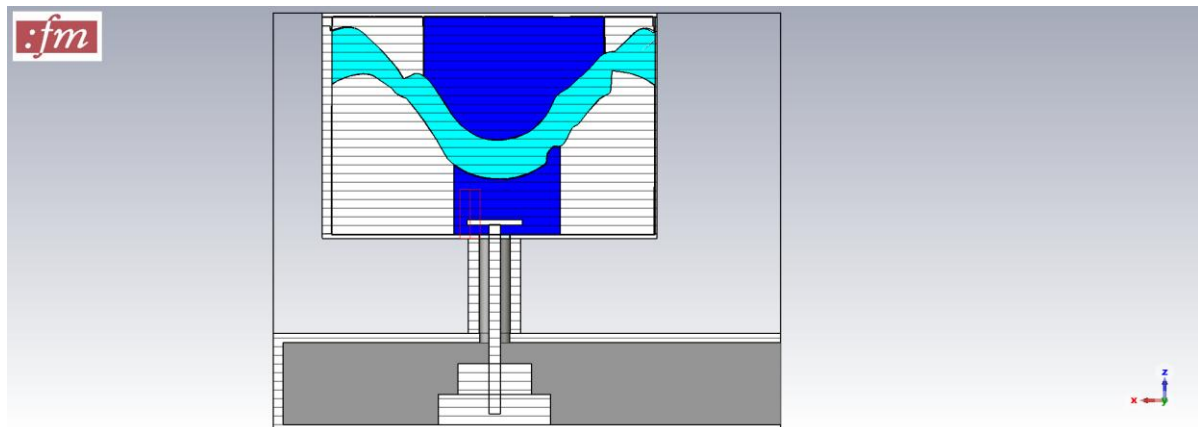


Abbildung 32: Seitliche Ansicht

Die Simulationen wurden aufgrund der rechenintensiven 3D-Kontur des Werkzeuges einzeln pro Bauteil durchgeführt. Auch dieses Vorgehen führte zu sehr aufwendigen Simulationen, die sehr zeitintensiv waren.

Hier gilt es ebenfalls zu erwähnen, dass zusätzlich zu der aufgetretenen Platzproblematik, die Anpassungen zur Realisierung einer realistischen Simulation, deutlich aufwändiger war als ursprünglich kalkuliert. Anhand der nachfolgenden Abbildung ist die 3D-Struktur zu erkennen. Die damit verbundene Erstellung einer Gitterstruktur allein für die Implementierung dieses Modells, stellte sich in der Simulationssoftware als sehr schwierig dar. Zusätzlich zur dargestellten Gitterstruktur, erzeugt das Programm eine nochmals feinere Mesh-Struktur. Diese Struktur führte dazu, dass einige Anpassungen und Glättungen durchgeführt werden musste, die bei der Planung nicht berücksichtigt wurden.

In der folgenden **Abbildung 33** sind die ersten zwei Bauteile markiert, an welchen die ersten Simulationen stattgefunden haben.

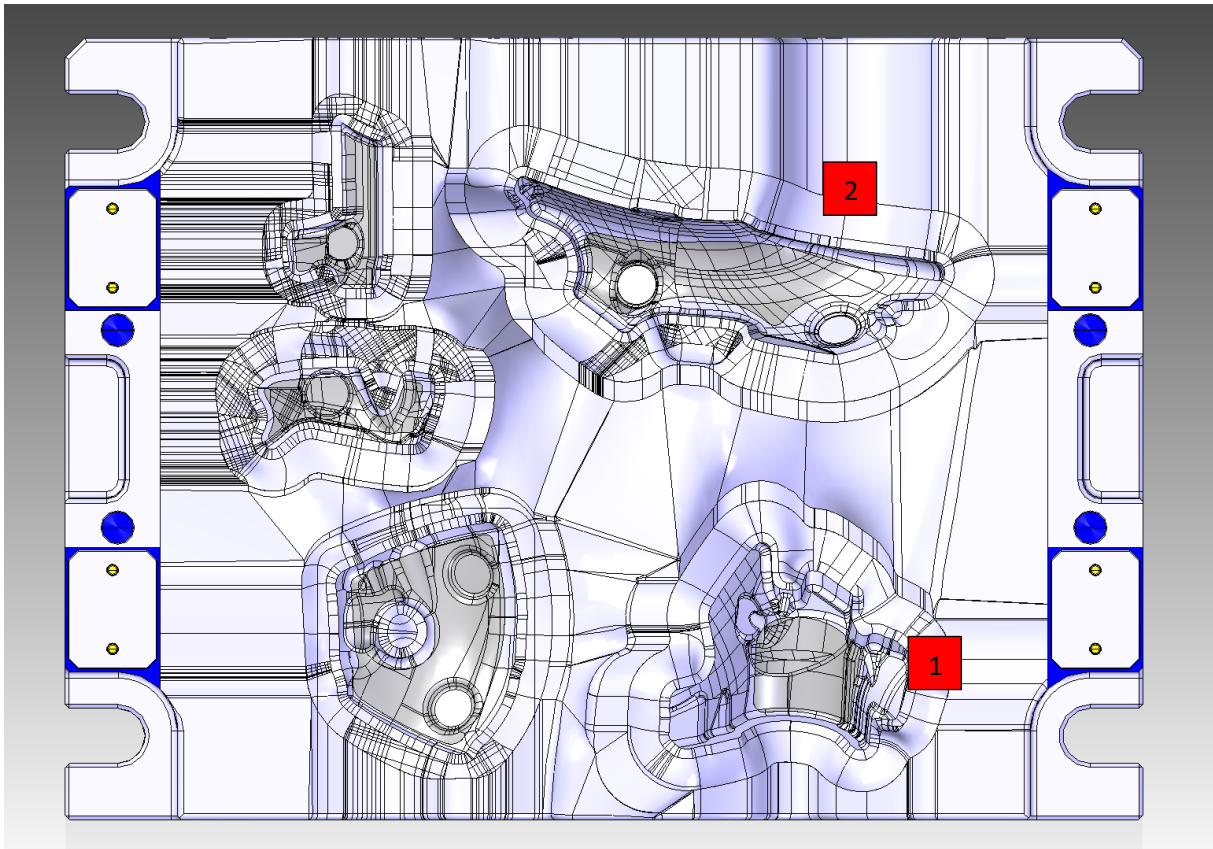


Abbildung 33: Presswerkzeug mit Markierung der bereits simulierten Bauteile 1 und 2

B3: Regelungs- und Messtechnik der selbstgeregelten MW (Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH und Grunewald GmbH & Co. KG)

Zur Entwicklung der Mess- und Regelungstechnik zur Automatisierung des Konsolidierungsprozesses wurden im Arbeitspaket B3 die Mikrowellenfelder jedes einzelnen Bauteils mit Hilfe der Software CST-STUDIO simuliert. Für diese Simulationen wurde in Arbeitspaket B2 die dielektrische Charakterisierung der Werkstoffe mit einem entsprechenden Messplatz als Funktion der Temperatur vorgenommen.

Nach den Simulationen wurden die Ausführung und Positionierung der Mikrowellenantennen im Werkzeug sowie die Optimierung der Werkzeugabmessungen im Hinblick auf die homogene Verteilung des Mikrowellenfeldes ermittelt bzw. durchgeführt.

Für die verschiedenen Bauteile wurden zuerst der S-Parameter bestimmt um die Reflexionsleistung zu minimieren. Anschließend wurde die Verlustleistungsdichte über das gesamte Bauteil simuliert.

Bauteilspezifische Simulation:

Bauteil 1:

Die folgende **Abbildung 34** zeigt den S-Parameter bei 2450 MHz für die drei Proben der Bindemittel 1-3. Alle drei Proben sind stark absorbierend. Die maximalen Reflexionsraten der Bindemittel 1 und 2 bei 2,45 GHz betragen etwa 5 %. Bei Bindemittel 3 liegt die Reflexionsleistung bei etwa 7,5 %.

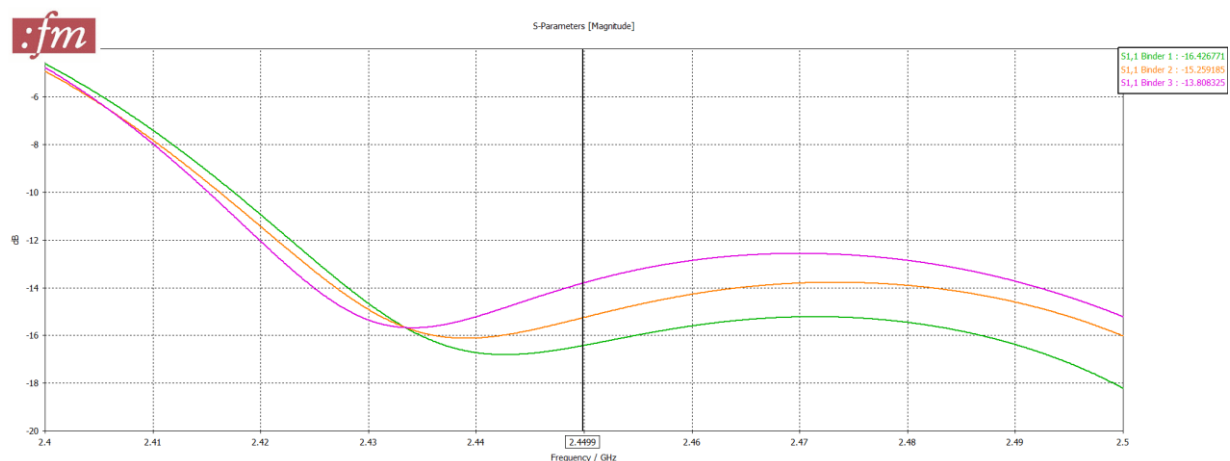


Abbildung 34: S-Parameter Simulationsergebnisse

Die Reflexionsleistung konnte minimiert werden. Dazu musste jedoch sichergestellt werden, dass die Mikrowellenenergie von der Bindemittelprobe und nicht durch das K-Therm-Material absorbiert wird. Die folgende **Abbildung 35** des Volumenverlustes zeigt, dass mehr als 93 % der Mikrowellenleistung von der vorgeschlagenen Probe absorbiert wurde. Die Ergebnisse wurden für 2,5 kW simuliert und sind linear skalierbar. Die Bindemittel 1, 2 und 3 konnten die Leistung von 2,384 kW, 2,365 kW bzw. 2,329 kW von den aufgegebenen 2,5 kW absorbieren.

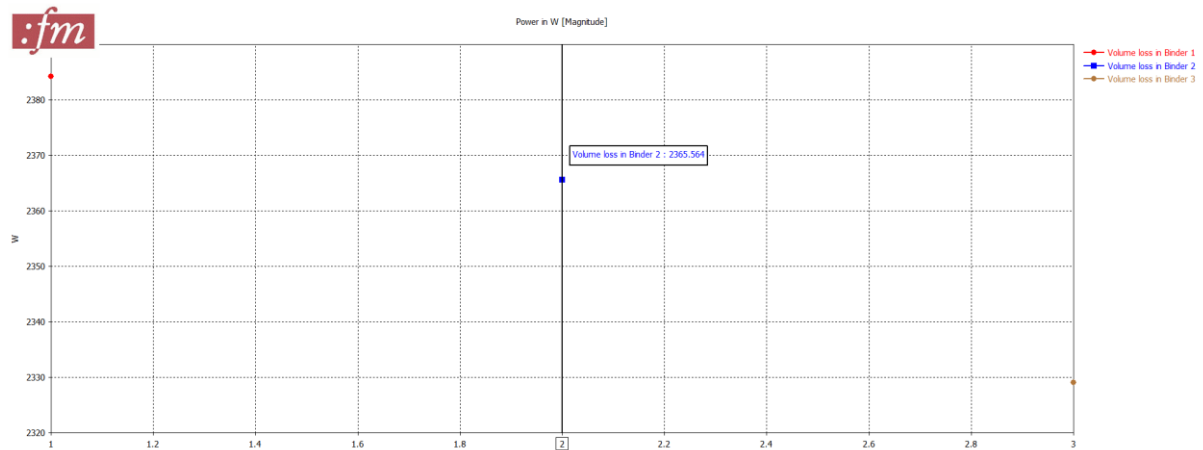


Abbildung 35: Verluste bei 2450 MHz

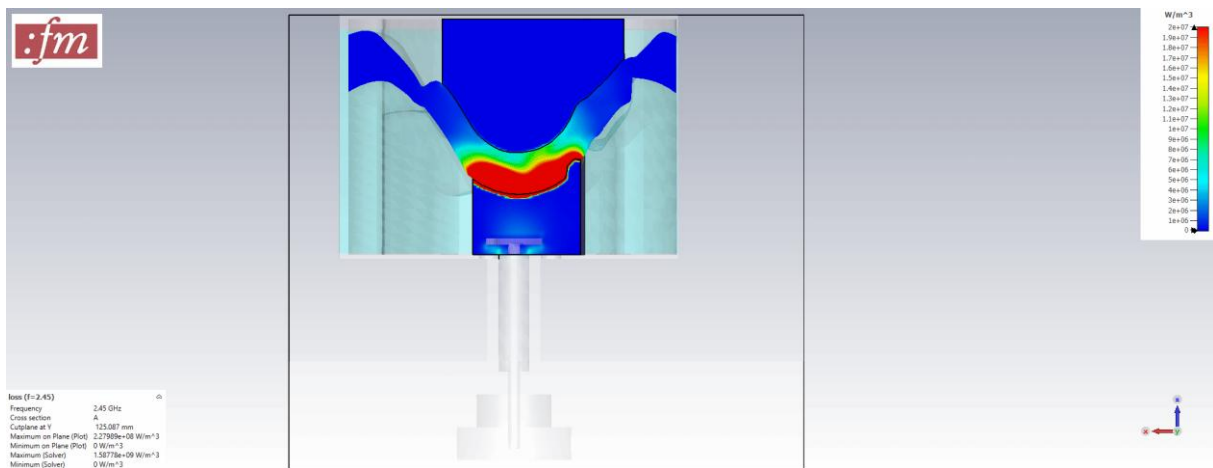


Abbildung 36: Verlustleistungsdichteverteilung (X-Z-Ebene) bei 2450 MHz.

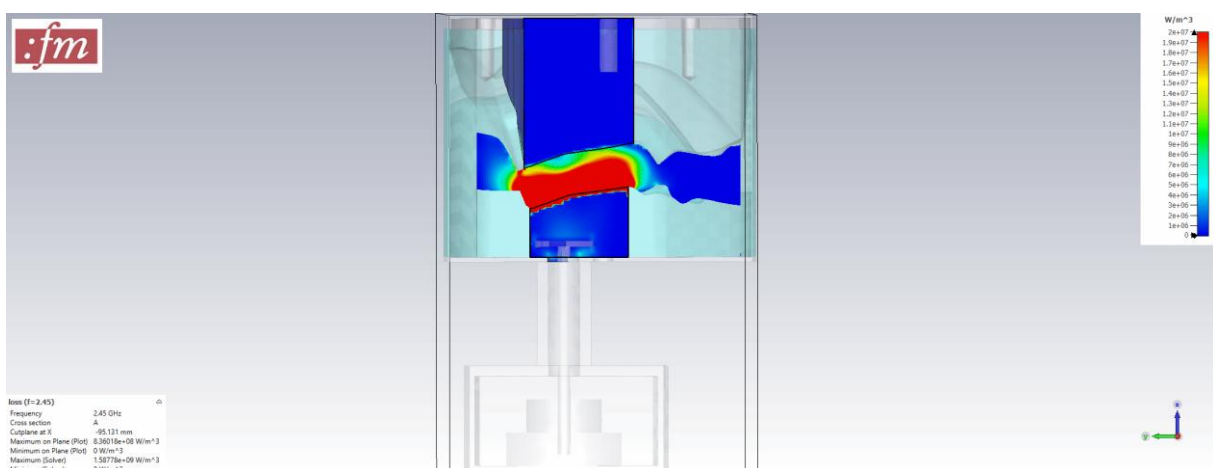


Abbildung 37: Verlustleistungsdichteverteilung (Y-Z-Ebene) bei 2450 MHz

Die Verlustleistungsdichte in der XZ- und YZ-Ebene bei 2450 MHz ist in **Abbildung 36** und **Abbildung 37** dargestellt. Dabei ist eine gute Absorption der Mikrowellenenergie durch die Probe im K-Therm-Bereich zu erkennen. Aufgrund der Probengeometrie zeigt sich eine jedoch niedrige Verlustleistungsdichteverteilung im Randbereich, in dem die Probe zwischen zwei

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem BauteilAuswurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Metallteilen eingeschlossen ist. Dies ist jedoch eine physikalische Einschränkung, die nicht vermieden werden kann.

Bauteil 2:

Wie bereits zuvor bei Bauteil 1 dargestellt, werden nachfolgend die prinzipiellen Aufbauten der Mikrowelleneinkopplung für Bauteil 2 gezeigt:

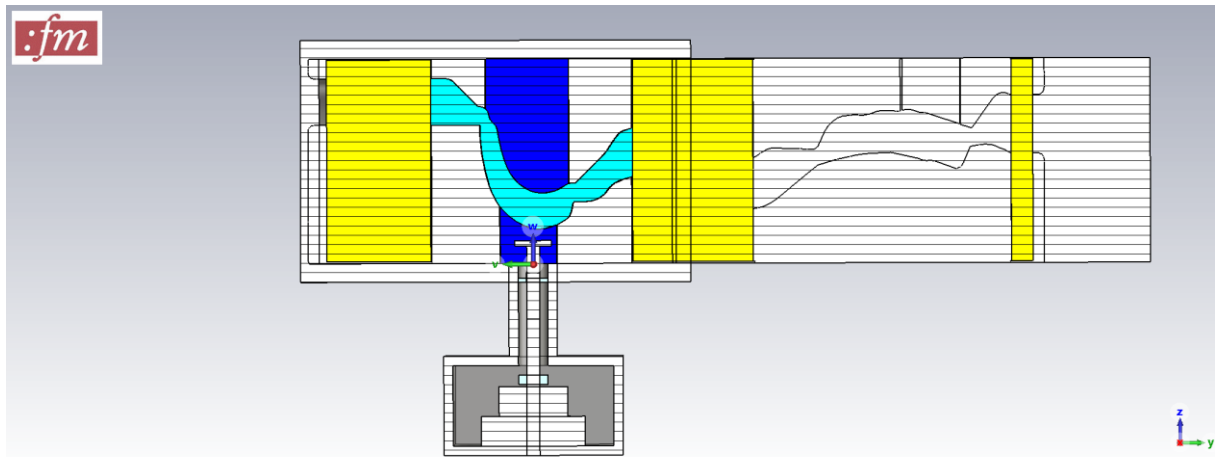


Abbildung 38: Prinzipieller Aufbau Mikrowelleneinkopplung

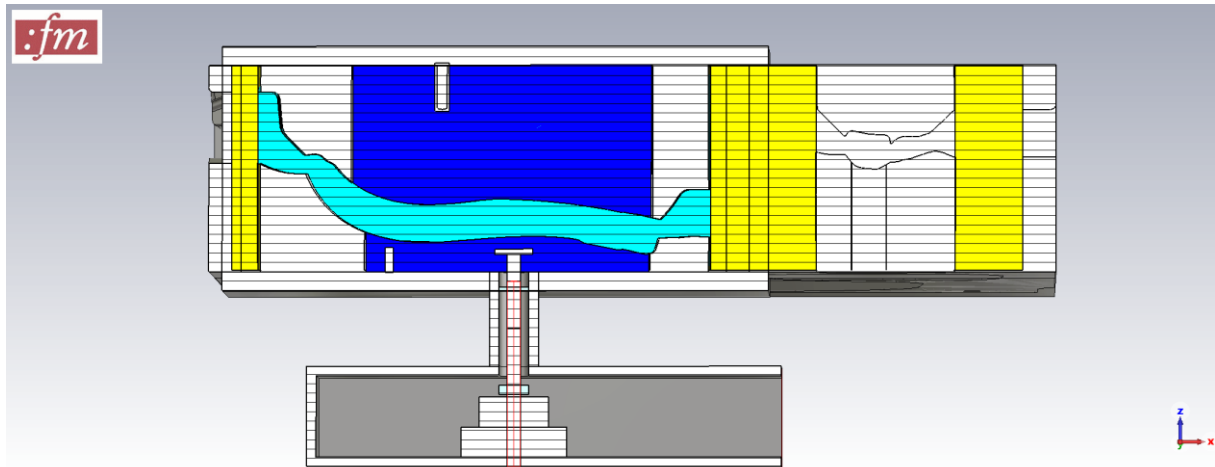


Abbildung 39: Seitliche Ansicht

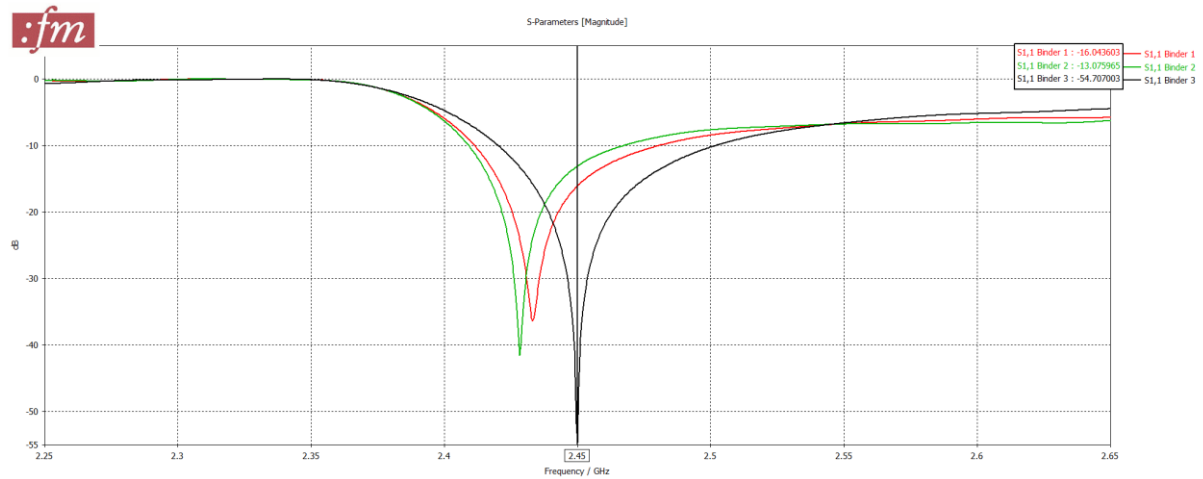


Abbildung 40: S-Parameter Simulationsergebnisse

Die Reflexionsleistung konnte, wie in **Abbildung 40** dargestellt minimiert werden. Dazu muss jedoch sichergestellt werden, dass die Mikrowellenenergie von der Bindemittelprobe und nicht von K-Therm absorbiert wird. Die folgende **Abbildung 41** des Volumenverlustes zeigt, dass mehr als 94 % der Mikrowellenleistung von der Probe absorbiert wurde.

Die Ergebnisse wurden für 0,5 W simuliert und sind linear skalierbar. Die Bindemittel 1, 2 und 3 haben eine Leistung von 0,482 kW, 0,469 W bzw. 0,496 W von den aufgegebenen 0,5 W absorbiert.

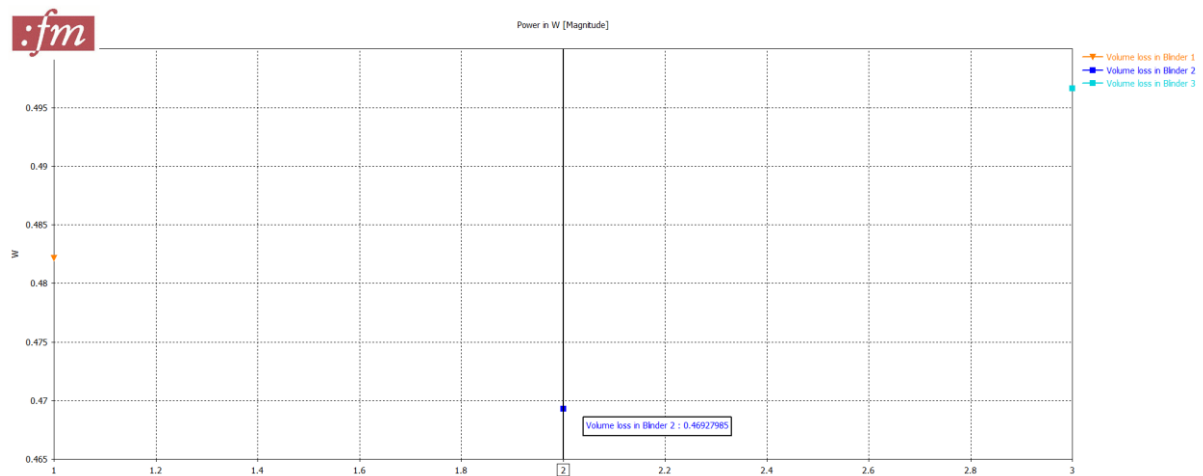


Abbildung 41: Verluste bei 2450 MHz

Die Verlustleistungsdichte in der XZ- und YZ-Ebene bei 2450 MHz ist in den folgenden **Abbildung 42** und **Abbildung 43** dargestellt. Die Verlustleistungsverteilungsdichte an den Probenrändern ist niedrig. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das Bauteil an den Rändern zwischen zwei Metallplatten liegt. Somit kann dieser Effekt nicht vermieden werden. Im K-Therm-Bereich ist eine gute Absorption der eingebrachten Energie erkennbar

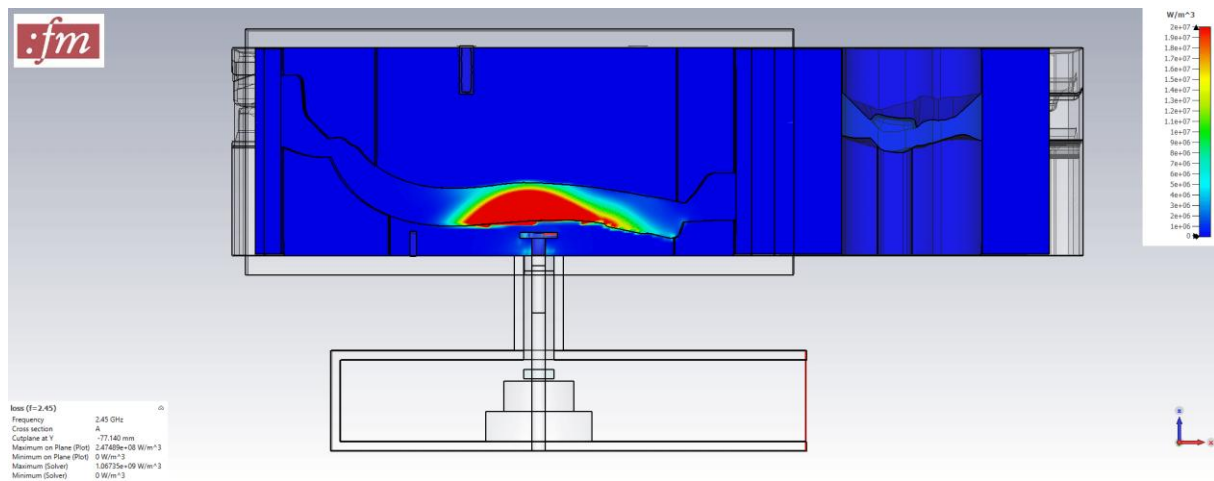


Abbildung 42: Verlustleistungsdichteverteilung (X-Z-Ebene) bei 2450 MHz.

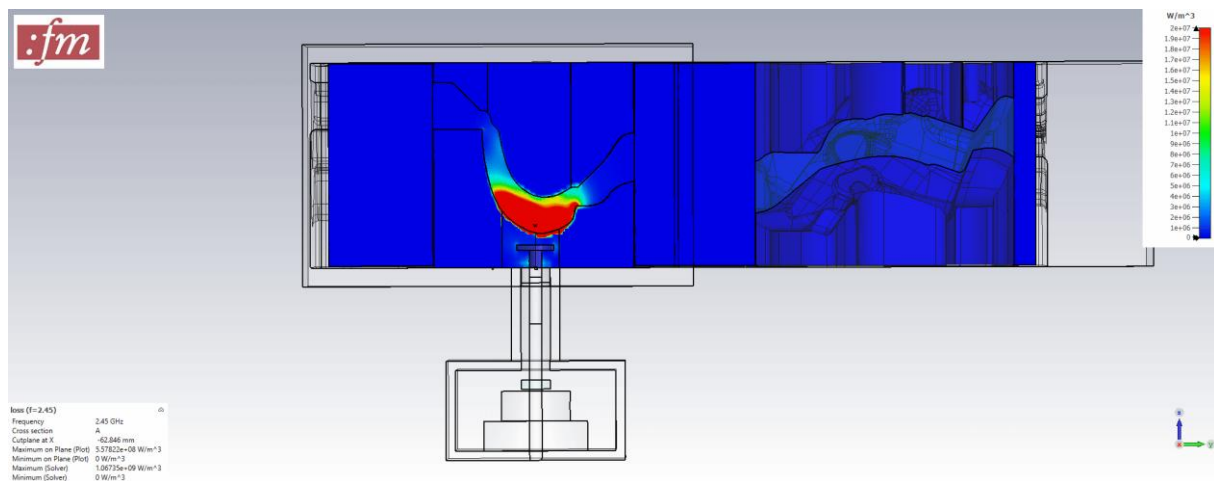


Abbildung 43: Verlustleistungsdichteverteilung (Y-Z-Ebene) bei 2450 MHz

Zwischenfazit:

Die Simulationen zeigen eine gute Absorption der Mikrowellen im Material. Allerdings lässt sich auch erkennen, dass es sich nicht um eine komplett homogene Verteilung über die Fläche handelt. Dies liegt an der komplexen 3D-Geometrie der Bauteile. Diese Komplexität der Bauteile erschwert und verlängert die Simulation deutlich. Hierbei geht es darum den bestmöglichen Punkt der Positionierung der Antenne zu identifizieren. Aufgrund der komplexen Geometrien können allerdings schon leichte Veränderungen einen großen Einfluss haben. Eine zu 100 % homogene Verteilung wird in diesem Fall nicht zu erreichen sein. Daher muss die Trocknung des Binders im Produkt teilweise über die entstehende Wärme innerhalb des Materials erfolgen.

Wie bereits beschrieben, wurde entschieden, das geplante Versuchswerkzeug für die Presse am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) zu entwickeln und anzufertigen. Als Anpassung an die gegebenen Umstände und die möglichen entstehenden Kosten wurde entschieden, das Werkzeug für die am ITA vorhandene Presse zu konstruieren. Das so geplante Werkzeug ist ebenso für die Firma ISOLITE GmbH nutzbar. Durch diese Anpassung können hohe Planungs- und Entwicklungskosten eingespart werden. Ursächlich sind hierbei die entstehenden hohen Kosten für die parallele Entwicklung des Werkzeugs und der Mikrowellenimplementierung. Dementsprechend sieht der Arbeitsplan abweichend vor, ein

Mikrowellenwerkzeug für die Presse am ITA zu entwickeln, welches durch entsprechende Adaption auch für die Presse der Firma ISOLITE GmbH genutzt werden kann.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller des ursprünglich geplanten Materials für die Einsätze stellte sich heraus, dass dieses in der vorgesehenen Form nicht herstellbar ist. Deshalb war es notwendig, ein alternatives Material für die Einsätze der Mikrowelleneinkopplung zu verwenden.

Aufgrund seiner Festigkeit und der zu erwartenden Temperaturen wurde Peek als Ersatzmaterial gewählt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der daraus resultierenden Simulationen präsentiert.

Da sich die Antennenpositionen und -längen im Vergleich zum vorherigen Aufbau nur minimal verändert haben, wird hierauf nicht erneut eingegangen.

Bauteil 1:

Die nachstehende **Abbildung 44** präsentiert die S-Parameter bei einer Frequenz von 2450 MHz. Hierbei ist zu bemerken, dass der Binder eine Absorption von etwa 13 dB aufweist, was in relativen Prozentzahlen etwa 95 % entspricht. Das bedeutet, dass lediglich 5 % der eingebrachten Leistung reflektiert werden.

Dieses Ergebnis ist von entscheidender Bedeutung, da es auf eine effektive Nutzung der eingebrachten Leistung hinweist und gleichzeitig darauf hindeutet, dass der Binder eine überwiegend absorbierende Wirkung aufweist, was für die angestrebte Anwendung von großer Relevanz ist.

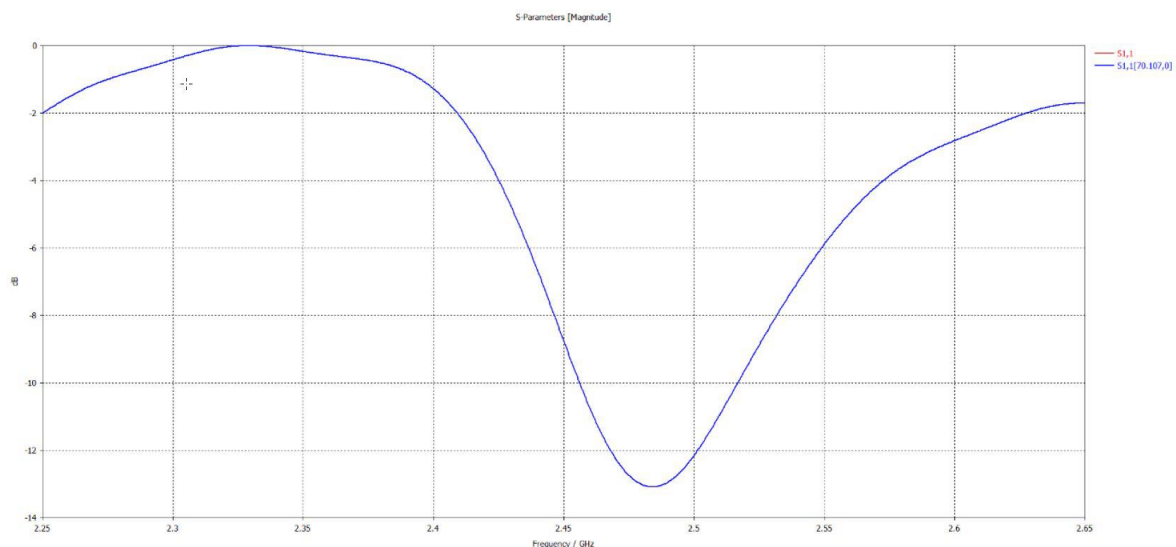


Abbildung 44: S Parameter Bauteil 1

Die vorliegende **Abbildung 45** illustriert den Volumenverlust im Zusammenhang mit der Absorption von Mikrowellenleistung. Die Daten zeigen, dass mehr als 2 kW der eingekoppelten 2,5 kW Mikrowellenleistung von der vorgeschlagenen Probe absorbiert wurden. Dies verdeutlicht die Effektivität der Probe bei der Absorption von Mikrowellenenergie und deutet auf eine hohe Leistungsfähigkeit hin.

Die Ergebnisse wurden durch Simulationen für eine Leistung von 2,5 kW erzielt und können linear laut der Erfahrung von F&M auf andere Leistungsniveaus skaliert werden. Diese Skalierbarkeit ist ein wichtiger Aspekt, der darauf hinweist, dass die Absorptionseigenschaften der Probe konsistent und verlässlich sind, unabhängig von der eingekoppelten Leistung.

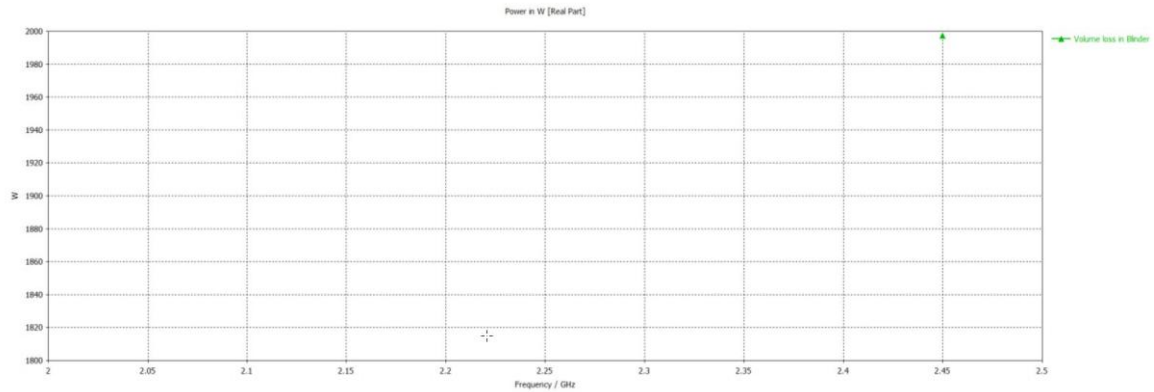


Abbildung 45: Volumenverlust

Abbildung 46 bis **Abbildung 48** bieten eine detaillierte Darstellung der Verteilung der Verlustleistungsdichte innerhalb des betrachteten Bauteils. Diese Visualisierungen ermöglichen eine umfassende Analyse der Wärmeverteilung und zeigen auf, wie sich die Energie innerhalb des Bauteils verteilt. Durch die Veranschaulichung der Verlustleistungsdichte wird deutlich, welche Bereiche des Bauteils besonders stark von Wärmeentwicklung betroffen sind und wo potenzielle Hotspots auftreten können.

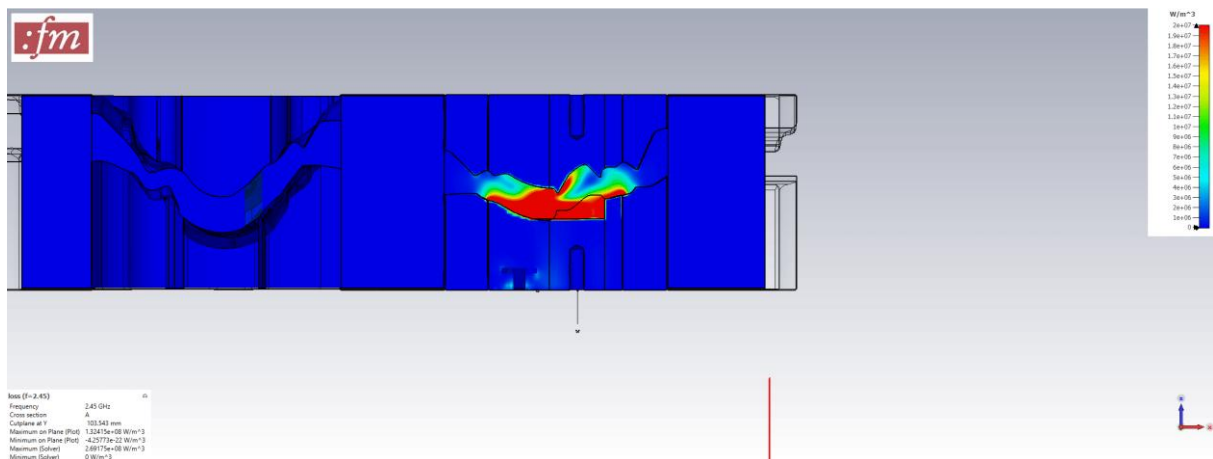


Abbildung 46: Verteilung der Verlustleistungsdichte (X-Z Ebene)

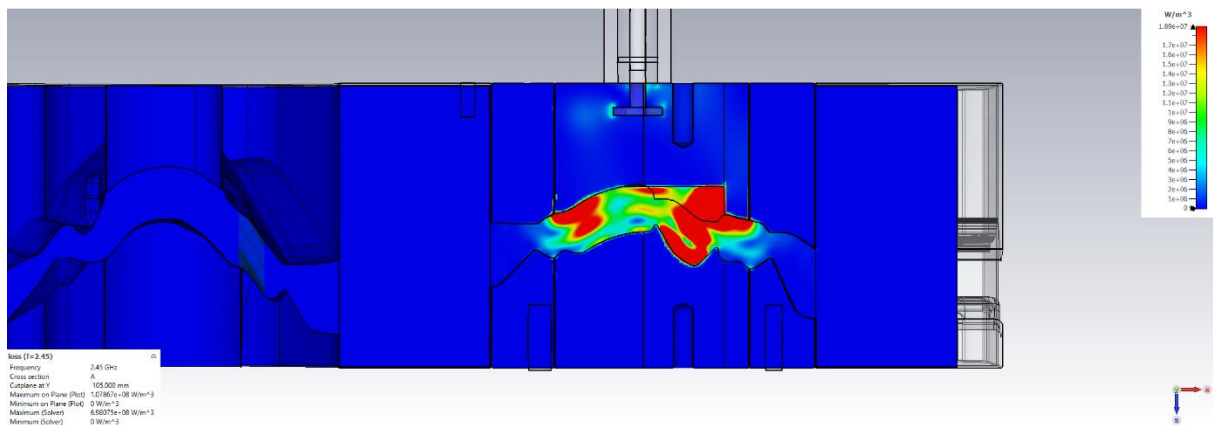


Abbildung 47: Verteilung der Verlustleistungsdichte (Y-Z Ebene)

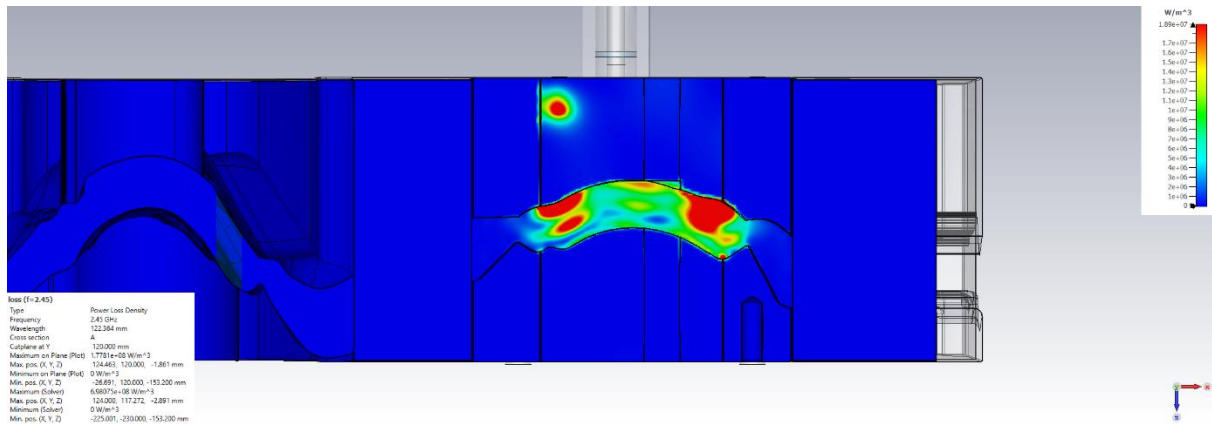


Abbildung 48: Verlustleistungsdichteverteilung Lokalisiert in PEEK-Material

Bauteil 2:

In **Abbildung 49** werden die S-Parameter bei einer Frequenz von 2450 MHz veranschaulicht. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass der Binder eine bemerkenswerte Absorption von etwa 21 dB aufweist, was in relativen Prozentzahlen ungefähr 99,21 % entspricht. Dies bedeutet, dass lediglich weniger als 1 % der eingebrachten Leistung reflektiert werden.

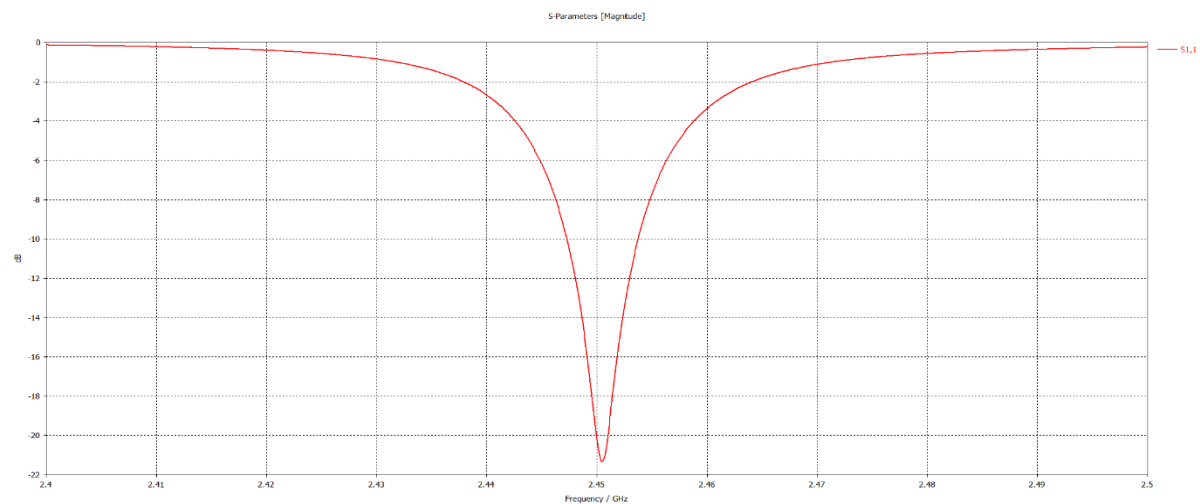


Abbildung 49: Parameter Bauteil 2

Abbildung 50 und Abbildung 51 stellen die Verteilung der Verlustleistungsdichte im Bauteil 2 dar.

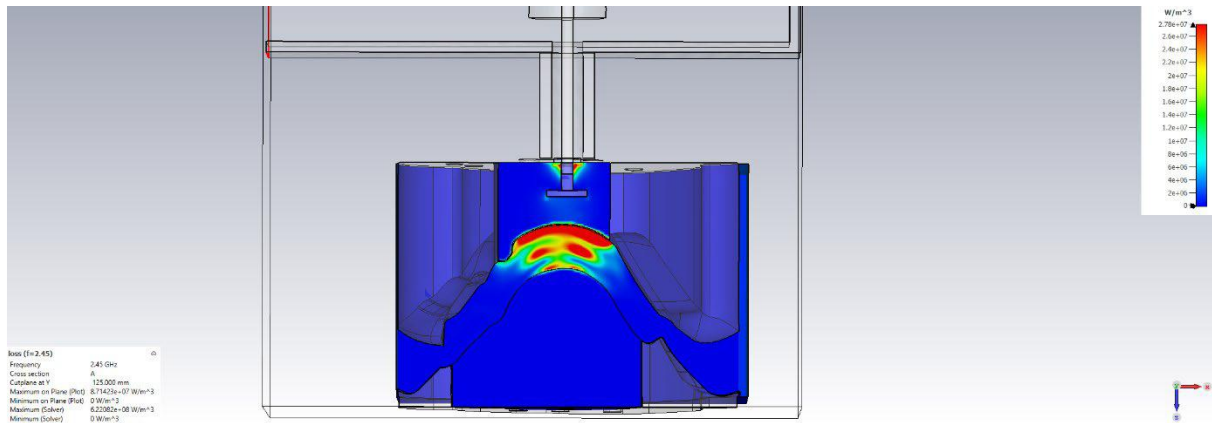


Abbildung 50: Verteilung der Verlustleistungsdichte (X-Z Ebene)

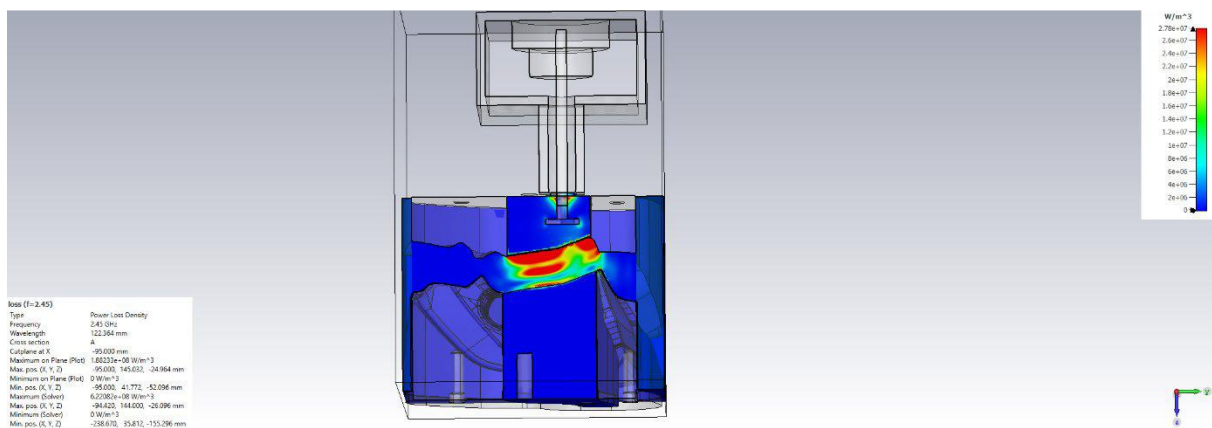


Abbildung 51: Verteilung der Verlustleistungsdichte (Y-Z Ebene)

Bauteil 3:

Die nachstehende **Abbildung 52** illustriert die S-Parameter bei einer Frequenz von 2450 MHz. Hierbei ist von besonderem Interesse, dass der Binder eine Absorption von etwa 17 dB aufweist, was in relativen Prozentzahlen ungefähr 97,75 % entspricht. Diese Absorptionsrate deutet darauf hin, dass lediglich weniger als 3 % der eingebrachten Leistung reflektiert werden.

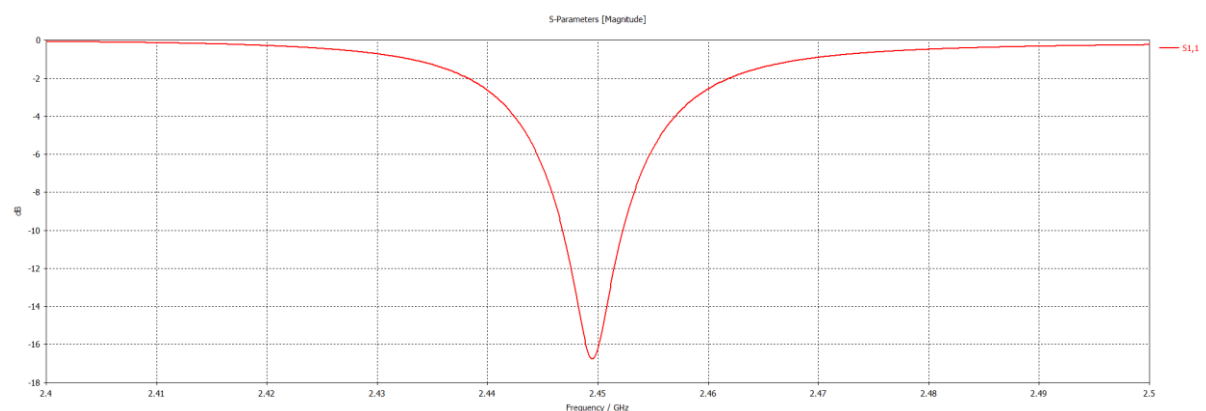


Abbildung 52: S Parameter Bauteil 3

Abbildung 53 bis **Abbildung 55** stellen die Verteilung der Verlustleistungsdichte im Bauteil dar.

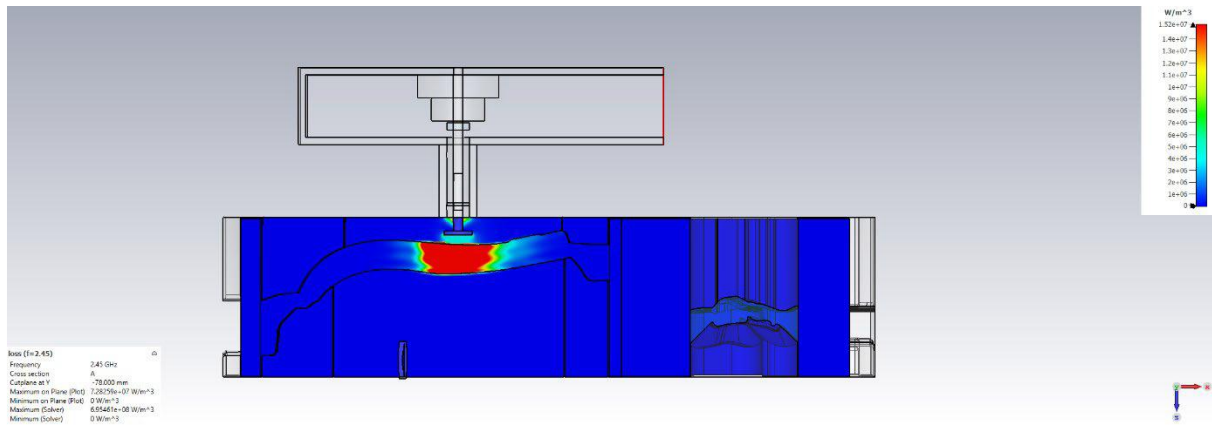


Abbildung 53: Verteilung der Verlustleistungsdichte (X-Z Ebene)

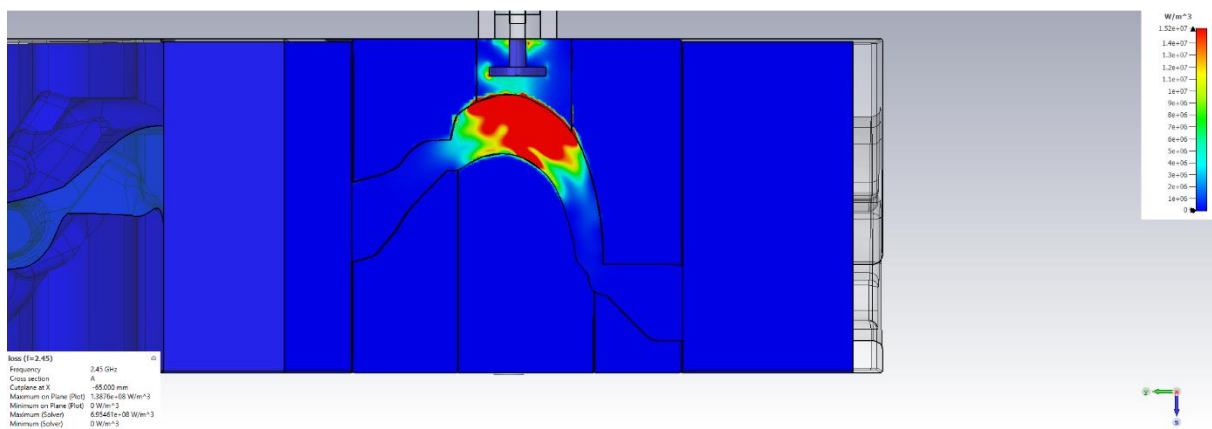


Abbildung 54: Verteilung der Verlustleistungsdichte (Y-Z Ebene)

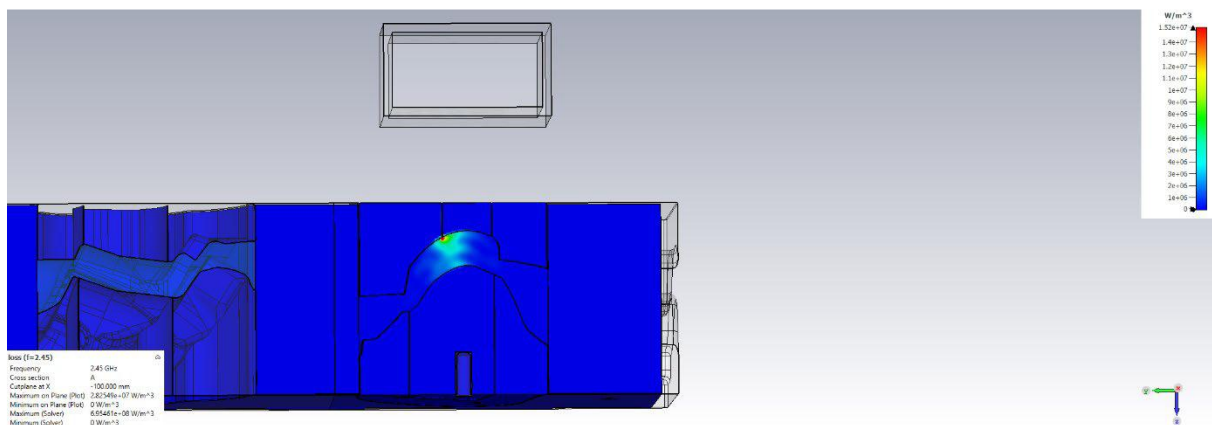


Abbildung 55: Verlustleistungsdichteverteilung Lokalisiert in PEEK-Material

B4: Entwicklung Pressenwerkzeug: Wasserdurchlässige Werkzeugoberfläche + Rückstoß, Vorsehen der Mikrowellenheizung (Grunewald GmbH & Co. KG)

Nach ersten Versuchen durch Fricke und Mallah mit der Modellkonstruktion, wurde für weitere Simulationen ein Gesamtmodell des Werkzeuges durch die Fa. Grunewald entwickelt, welches in den nachfolgenden **Abbildung 56** und

Abbildung 57 dargestellt ist.

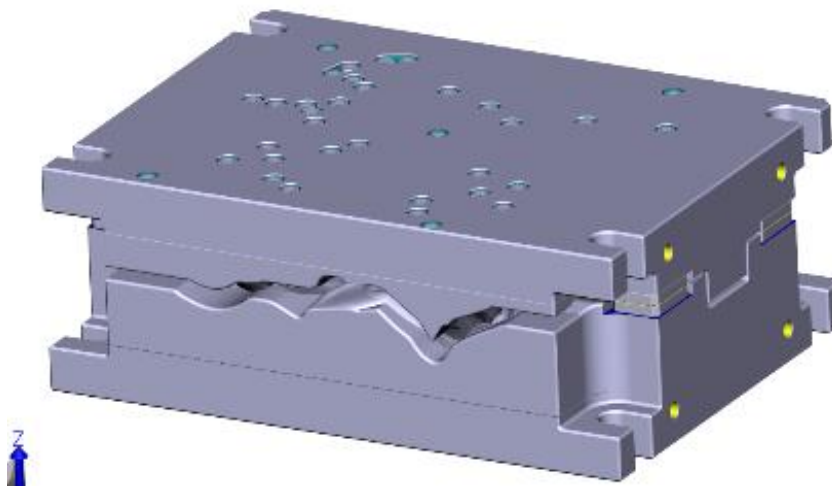


Abbildung 56: Gesamtmodell des Presswerkzeugs

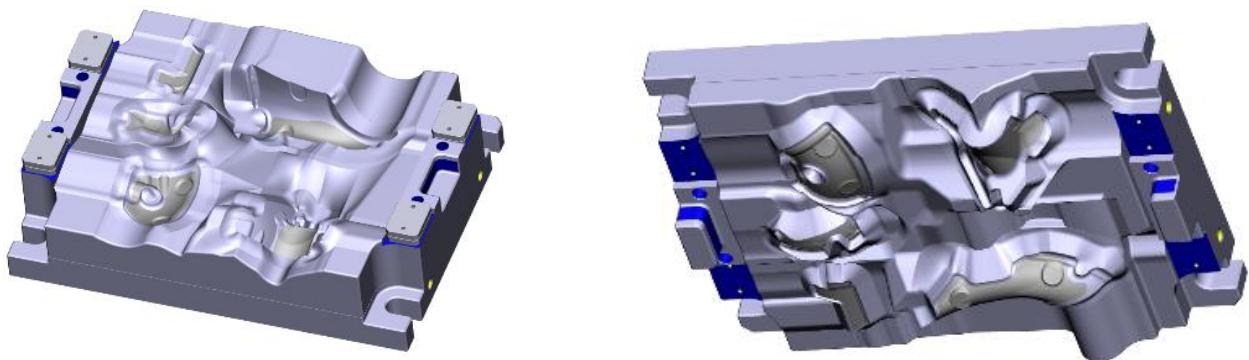


Abbildung 57: Werkzeugmodell, Matrize, Stempel

Entlüftung und Ausstoß:

Hierbei wurde bereits im Hinblick auf die konstruktive Umsetzung der Entlüftungs- und Ausstoßbohrungen, Konstruktionsansätze entwickelt, die in **Abbildung 58** dargestellt sind. Die Entlüftung bzw. der Ausstoß soll über die Bauteiloberfläche erfolgen, ohne die Funktion des Bauteiles zu beeinträchtigen. Bei dem Stempel wird eine Kanalstruktur unterhalb der Werkzeugkontur geschaffen, welche komplett abgedichtet ist. Eine zentrale Ankopplungsmöglichkeit erlaubt den Anschluss für eine Absaugung bzw. für die Druckbeaufschlagung. Die Bohrungen müssen über die Bauteiloberfläche so verteilt werden,

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem BauteilAuswurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

dass eine gleichmäßige Kraft für den BauteilAuswurf erfolgt. Der Einsatz eines wasserdurchlässigen Materials für die Werkzeugeinsätze wurde nicht umgesetzt, da ein poröses Material sich aufgrund der Partikel im Wasserdampf zusetzen wird und daher dauerhaft nicht prozesssicher ist. Die Ableitung des Wassers und der Rückstoß über Druckluft kann nur im Stempel abgebildet werden. Im Bereich der Bauteile kann über Bohrungen zum einen der Wasserdampf abgeführt werden und zum anderen können mittels eines Luftstoßes die Bauteile gelöst werden. Hierfür wird ein zentraler Anschluss am Werkzeug vorgesehen. Durch die Einkopplung der Mikrowellenantennen und die Hohlleiter ist der Bauraum in der Matrice ausgereizt, dass hier keine Entlüftung bzw. Druckstoß eingebracht werden kann.

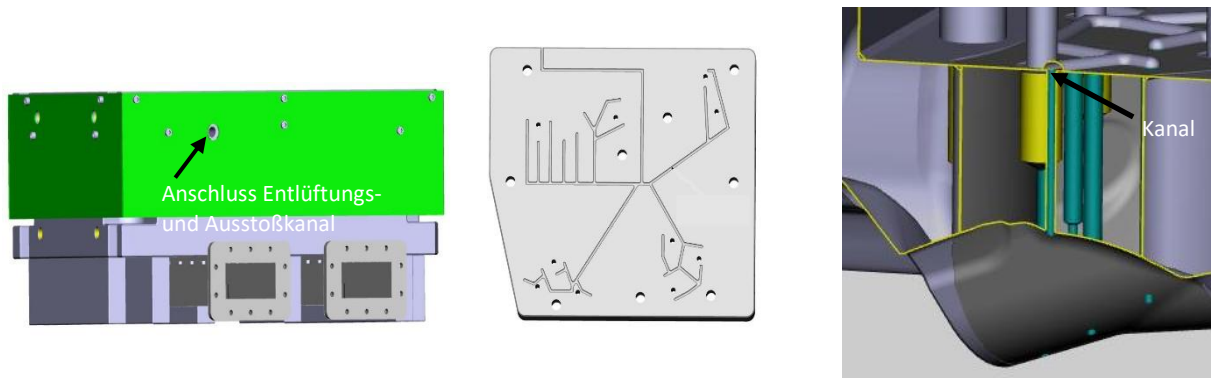


Abbildung 58: Werkzeugmodell, Entlüftungs- und Ausstoßkanäle

Abschirmung Mikrowelle:

Für die Abschirmung der Mikrowellen nach außen im Bereich der Werkzeughälften Matrice und Stempel wurden Bleche aufgesetzt siehe **Abbildung 59**. Bei dem Zusammenfahren des Werkzeuges schließen diese den Werkzeugspalt ab, so dass die Mikrowellen innerhalb des Werkzeuges verbleiben.

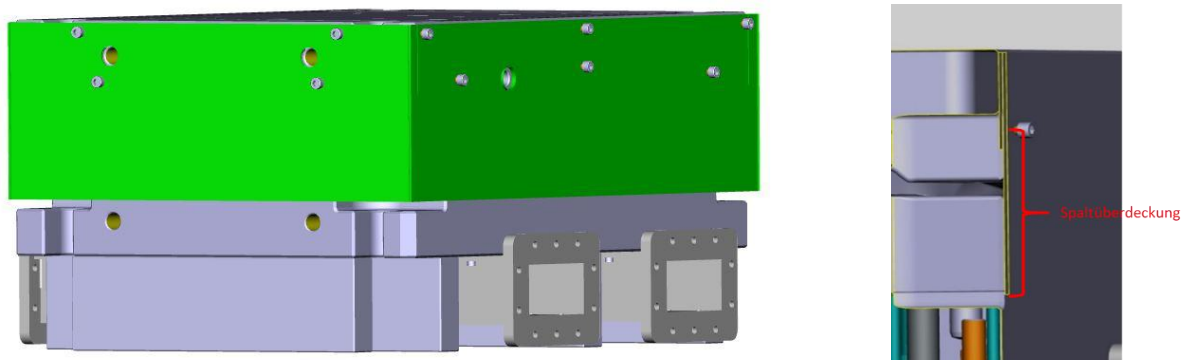


Abbildung 59: Spaltüberdeckung Matrice Stempel

Durch die Konstruktionsabteilung der Fa. Grunewald GmbH & Co. KG wird nach Erhalt der finalen Positionen der Mikrowellenantennen und Hohlleiter, die Werkzeugkonstruktion erstellt. Zusätzlich muss unterhalb der Matrice noch eine Abstützung konstruiert werden, die die Pressenkräfte aufnimmt, so dass die Hohlleiter keiner Druckkraft ausgesetzt sind.

Mikrowellenantennen und Hohlleiter:

Durch die Konstruktionsabteilung der Fa. Grunewald GmbH & Co. KG wurde, nach Erhalt der finalen Positionen der Mikrowellenantennen und Hohlleiter, die Werkzeugkonstruktion erstellt.

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilauwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Aufgrund der Montage der Hohlleiter unterhalb der Matrize wurden noch Distanzen konstruiert. Diese haben die Aufgabe die Pressenkräfte auf zu nehmen, so dass die Hohlleiter keine Druckkräfte aufnehmen müssen.

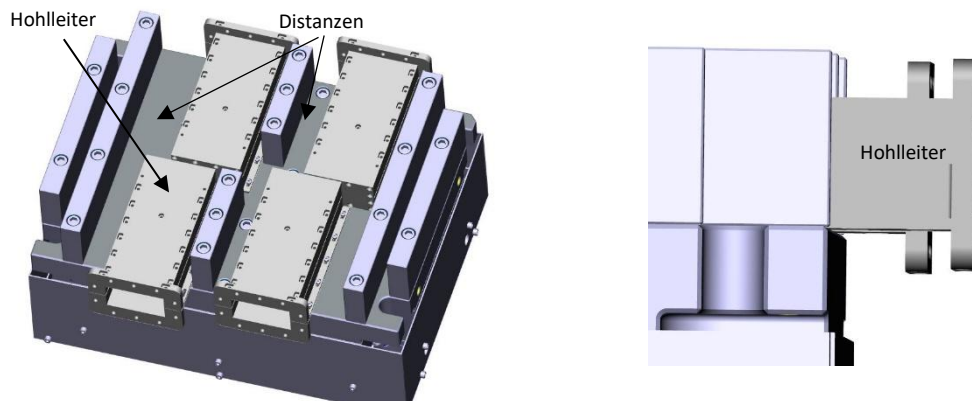


Abbildung 60: Matrize Distanzen

B5: Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Heiz- und Trocknungsverhaltens (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Zur Beschreibung der Mikrowellenheizleistung in den unterschiedlichen Anwendungsfällen wurde ein Berechnungstool entwickelt. Dieses berechnet bisher sowohl die Energiemenge für die erste Phase der Erwärmung als auch die Energiemenge der Phase 2 der Verdampfung. Je nach Restfeuchtigkeit im Bauteil kann ein 3. Phasen Tuner hier noch ergänzt werden. Die drei Phasen der Trocknung können wie folgt beschrieben werden:

1. **Erwärmungsphase:** Die Temperatur und der Wasserverlust steigen deutlich an.
2. **Verdampfungsphase:** Das Wasser in den Dämmschalen wechselt aufgrund der erhöhten Temperatur den Aggregatzustand von flüssig zu gasförmig. Das meiste Wasser kann in Form von Wasserdampf austreten und die Trocknungstemperatur erreicht den Höhepunkt.
3. **Trocknungsphase:** Die Trocknungsgeschwindigkeit verlangsamt sich und die Oberflächentemperatur steigt an.

Zur Berechnung der Energiemenge wurden folgende Parameter festgelegt:

Feststoffanteil	[Massen-%]	0,1
Binderanteil	[Massen-%]	0,9
Solltemperatur	[°C]	100
Eingangstemperatur	[°C]	20
Wärmekapazität Silicidfaser	[kJ/kg·K]	0,8
Wärmekapazität der gesamten Dispersion auf Tonmineralbasis	[kJ/kg·K]	4
Wärmekapazität Ton	[kJ/kg·K]	2,29
Wärmekapazität Wasser	[kJ/kg·K]	4,19

Hierbei ist vor allem die Wärmekapazität von der Temperatur abhängig. Bei 300 °C beträgt die spezifische Wärmekapazität der Silicidfaser bereits 0,885 kJ/kg·K.

Bei einer angenommenen Prozesszeit von 3 min sollte die Mikrowellenleistung folgenden Bereich abdecken:

Phase 1: Erwärmung		
Energiemenge	[kJ/min]	331,95
	[kW]	5,53

Phase 2: Verdampfung (nur Wasser)		
Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 100°C	[kJ/mol]	40,66
benötigte Energie zum Verdampfen	[kJ/min]	1897,33
	[kW]	31,62

Neben einem einfachen Excel-Berechnungsmodell und den Simulationen wird der Pressprozess am ITA über die dort entwickelte Zeta-Methode (Timm Holtermann) analysiert. Diese besteht aus sechs Stufen welche in der **Abbildung 61** dargestellt und zusammengefasst sind. Die Methode dient der Bewertung und Erhöhung der Energieeffizienz von Produktionsmaschinen. Es wird schrittweise eine Energiebilanz aufgestellt und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung werden erarbeitet.

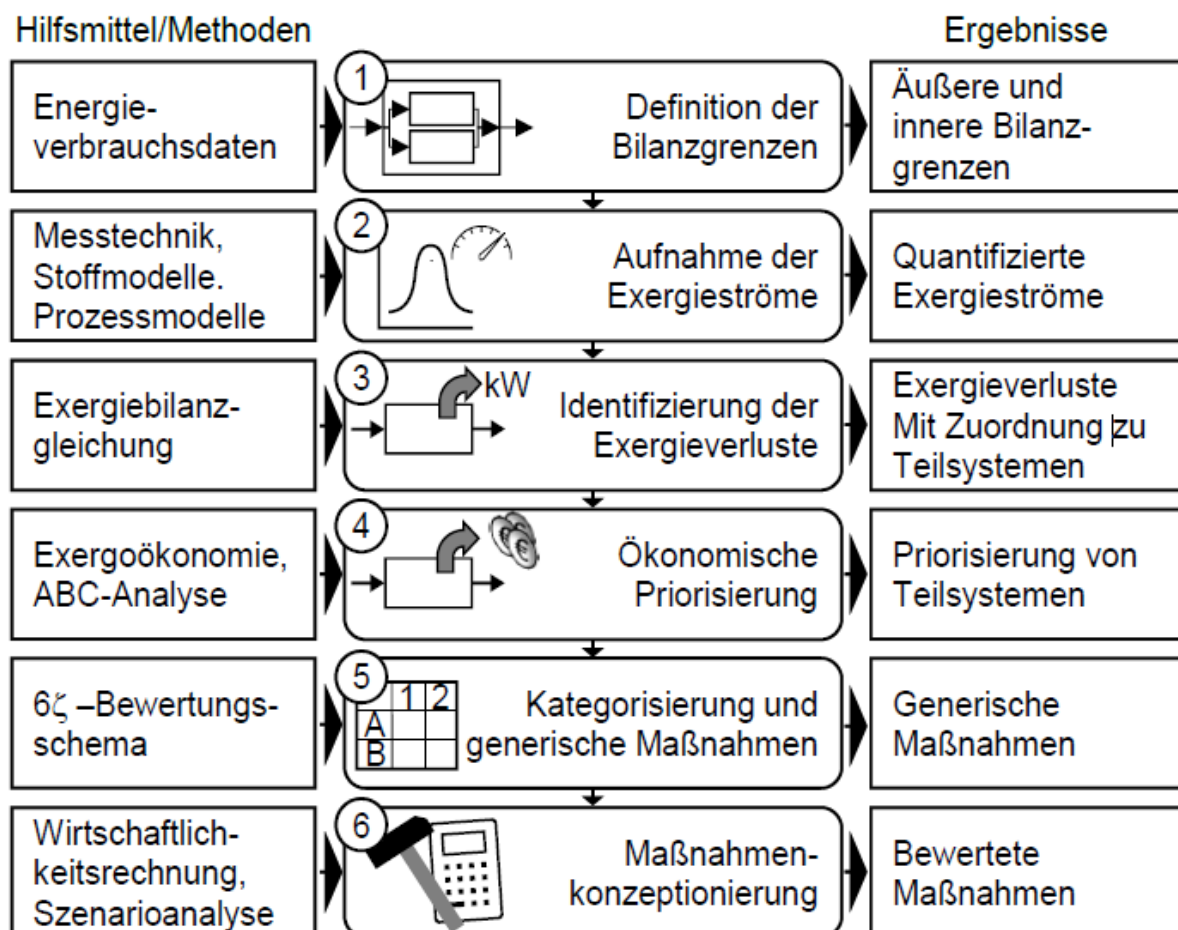


Abbildung 61 Zeta-Methode nach Timm Holtermann

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem BauteilAuswurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

In der ersten Stufe wird das Gesamtsystem auf Grundlage der verfügbaren Informationen in Untersysteme unterteilt. Die Untersysteme werden nach hohem vermuteten Exergieverlust gebildet. Der Fokus auf die besonders ineffizienten Teilsysteme erfolgt nach Zuordnung der Exergieverluste.

Die zweite Stufe beinhaltet das Zusammentragen aller Energie- und Stoffströme über die inneren und äußeren Systemgrenzen. Es wird für jedes Teilsystem eine Exergiebilanzgleichung wie folgt aufgestellt:

$$\frac{dE_m}{d\tau} = \sum_i \dot{m}_i \cdot \left(e_i + g \cdot z_i + \frac{1}{2} \cdot c_i^2 \right) + \sum_j \left(1 - \frac{T_U}{T_{m,j}} \right) \cdot \dot{Q}_j + \sum_k P_{t,k} - T_U \cdot \Delta \dot{S}^{irr} \quad \text{Gl. 1}$$

E_m	Exergie der im System enthaltenen Stoffmenge
$\dot{m}_i \cdot e_i$	stoffgebundener Exergiestrom
T_U	Umgebungstemperatur
$T_{m,j}$	Mittlere Temperatur des Wärmeübergangs
$\dot{Q}_j$	Wärmestrom
$P_{t,k}$	Leistung
$T_U \cdot \Delta \dot{S}^{irr}$	Exergieverlust
$\Delta \dot{S}^{irr}$	Irreversible Entropieproduktion
$\dot{m}_i \cdot g \cdot z_i$	Potentielle Energieströme
$\dot{m}_i \cdot \frac{1}{2} \cdot c_i^2$	Kinetische Energieströme

Eintretende Ströme erhalten ein positives Vorzeichen und austretende ein negatives. Die Bilanzgleichung kann je nach Systemeigenschaften und Prozessführung oftmals vereinfacht werden. Durch direkte Messungen oder aus Tabellenwerken werden die übrig gebliebenen Terme quantifiziert.

Im dritten Methodenschritt werden die Exergieverluste der jeweiligen Teilsysteme berechnet. Damit werden die exergetischen Ineffizienzen der Teilsysteme deutlich und können dem entsprechenden Verursacher zugeordnet werden.

In Stufe vier werden für die einzelnen Systeme die Kosten mit den jeweiligen Energieträgern bestimmt und sortiert. Für die Systeme mit den höchsten Energiekosten werden in den nächsten Schritten Verbesserungen entwickelt.

In der fünften Stufe werden die ausgewählten Teilsysteme in Kategorien geordnet. Unterschieden wird dabei zwischen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Teilsystemen, sowie prinzipbedingten dissipativen und nicht prinzipbedingten dissipativen Teilsystemen. Für jede Kategorie werden zunächst unspezifische, abstrakte Maßnahmen formuliert.

Das Ziel der sechsten Stufe ist es, die abstrakten Maßnahmen in technische Lösungsansätze umzusetzen und die möglichen Energieeinsparungen zu bestimmen. Für jeden Lösungsansatz wird eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt.

Zur Beschreibung der energetischen Einsparpotentialen der Mikrowellentechnologie im Dämmschalenprozess wird ein Vergleich der aktuell verwendeten Technik (Kontaktwärme) zur Mikrowellentechnologie aufgestellt. Die Methode folgt der 6-Zeta-Methode.

Zunächst werden die notwendigen Grundlagen aufgestellt. Anschließend wird die Adaption der 6-Zeta-Methode erörtert. Im Anschluss wird der betrachtete Prozess beschrieben. Aus dieser Beschreibung folgen die Mängel des Prozesses. Bei der Herstellung von Dämmschalen kommt eine durch eine Presse eingeführte Kontakt Trocknung zum Einsatz. Da die

Dämmschale die Wärmeleitung hemmt, ist dieser Produktionsschritt ineffizient. Die Mikrowellentechnologie substituiert die Kontakttrocknung und bietet so einen Lösungsansatz.

Die 6-Zeta-Methode sieht vor den Prozess in Bilanzräume zu unterteilen. Der Pressprozess wird in drei Teile geteilt. Die Bilanzräume lauten:

1. Pressvorgang
2. Trocknungsvorgang
3. Entformungs-/Einlegevorgang (offenes Werkzeug)

Den Bilanzen werden Energieströme zugeteilt. Da der Prozess vor allem im Trocknungsvorgang und im offenen Werkzeug geänderte Parameter hat, machen diese den Hauptteil des Energievergleiches aus. Beim offenen Werkzeug ist die Werkzeugtemperatur ein wichtiger Parameter. Beim Trocknungsvorgang spielt vor allem die Zeit und die eingebrachte Energie eine große Rolle.

Durch Vergleich der Verfahren mit konventioneller Herstellungsmethode und der Mikrowellentechnologie sind Unterschiede erkennbar. Der Vergleich beider Verfahren zeigt die Unterschiede zwischen den notwendigen Energien. In folgender **Abbildung 62** sind diese dargestellt.

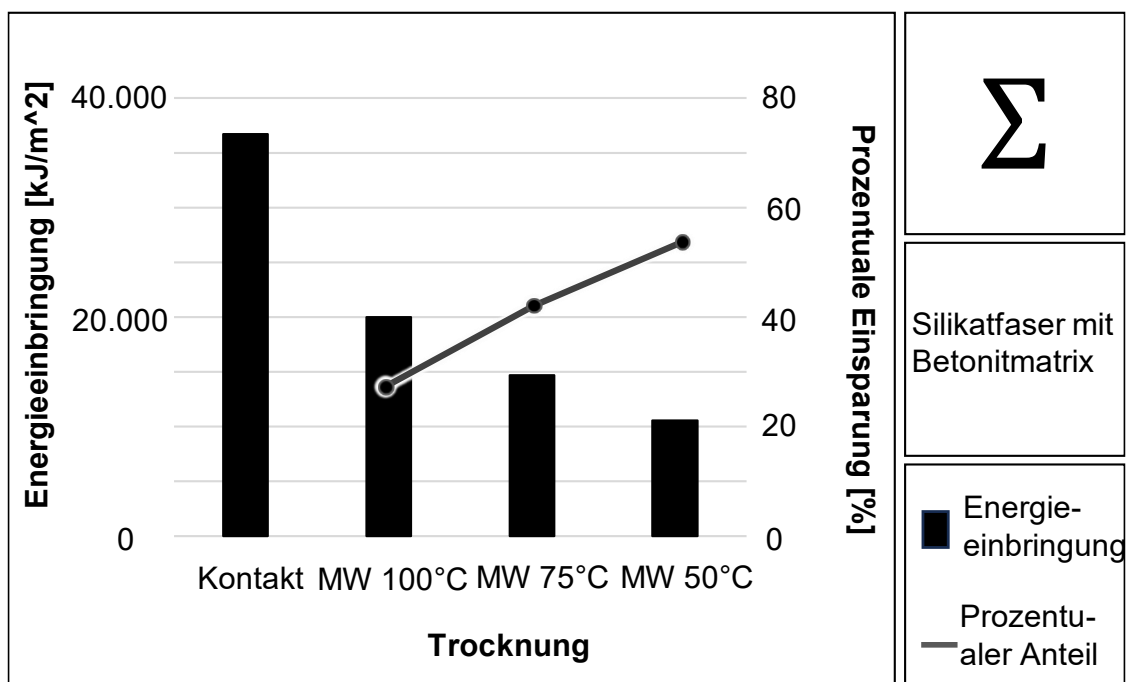


Abbildung 62: Energieeinsparung bei verschiedenen Werkzeugtemperaturen

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Mikrowellenverfahren weniger Energie benötigen als das herkömmliche Verfahren. Je weniger das Werkzeug bei der Mikrowellentrocknung mit aufgeheizt wird, desto größer ist die eingesparte Energie.

Aus simulativen und hypothetischen Betrachtungen ergibt sich eine gute Energieeffizienz bei der Nutzung von Mikrowellen zur Trocknung. Durch eine effizientere Nutzung der Energie kann der CO₂ Ausstoß im Gegensatz zu konventionellen Methoden reduziert werden. Durch die direkte Einbringung der Energie in das zu trocknende Gut fallen die Temperaturen geringer aus als bei konventionellen Methoden. Es handelt sich somit insgesamt um niedrigere Arbeitstemperaturen. Neben vielen möglichen Vorteilen ist die Achtsamkeit der

Arbeitssicherheit bezüglich der möglichen Belastung durch austretende Mikrowellenstrahlung nicht außer Acht zu lassen. Es besteht die Notwendigkeit ein sicheres Arbeitsfeld zu gewährleisten und somit sind regelmäßige Überprüfungen nötig. Insgesamt kann die Nutzung von Mikrowellenstrahlung zur Gutstrocknung als ökologisch vorteilhaft angenommen werden.

Durch die erwartete Energiereduktion stellt sich die Anwendung von Mikrowellen zur Gutstrocknung auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft dar. Durch stark steigende Energiekosten ist eine Reduktion der Stromkosten in der Produktion positiv zu bewerten. Weiterhin können hypothetisch die Zykluszeiten durch den unmittelbaren Energieeintrag, im Vergleich zur Kontaktstrocknung, reduziert werden.

B6: Konstruktion, Ableiten von Bauteilzeichnungen, Fertigung, Assemblieren (Isolite GmbH, Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Im folgenden Kapitel wird der Konstruktionsprozess auf Basis der erlangten Simulationsergebnisse durchgeführt. Diese Simulationsergebnisse dienen als Leitfaden für die Gestaltung und Platzierung der einzelnen Komponenten des Mikrowellenwerkzeugs. Dabei werden die spezifischen Anforderungen und Einschränkungen berücksichtigt, die sich aus den Simulationen ergeben haben, um ein optimales Design zu erreichen. Des Weiteren wird im Rahmen dieses Kapitels die Anordnung des Werkzeugs gemäß den vorgegebenen Parametern der Presse erläutert. Hierbei werden verschiedene Faktoren wie die Struktur des Werkstücks, die Leistung der Mikrowellenquelle und die erforderliche Präzision berücksichtigt, um eine effiziente Nutzung des Werkzeugs zu ermöglichen.

In folgender **Abbildung 63** werden die vorgesehenen Einkopplungen dargestellt. Hierbei wurde Wert auf Gleichstücke gelegt, um die Weiterverwendbarkeit zu ermöglichen. Lediglich die Antennen unterscheiden sich bei den einzelnen Bauteilen.

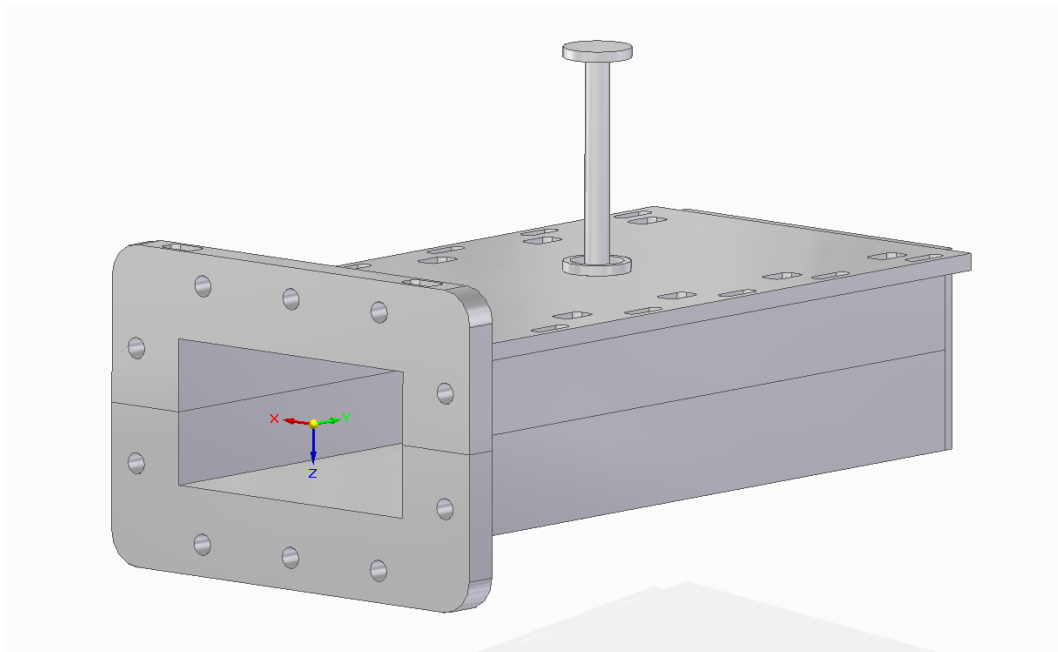


Abbildung 63: Darstellung Einkopplung mit Koaxial-Übergang

In der folgenden **Abbildung 64** lässt sich dieser Aufbau mit Hilfe eines Schnittes leichter erkennen. Die Antenne wird lediglich über eine Schraube von Außerhalb der Einkopplung befestigt.

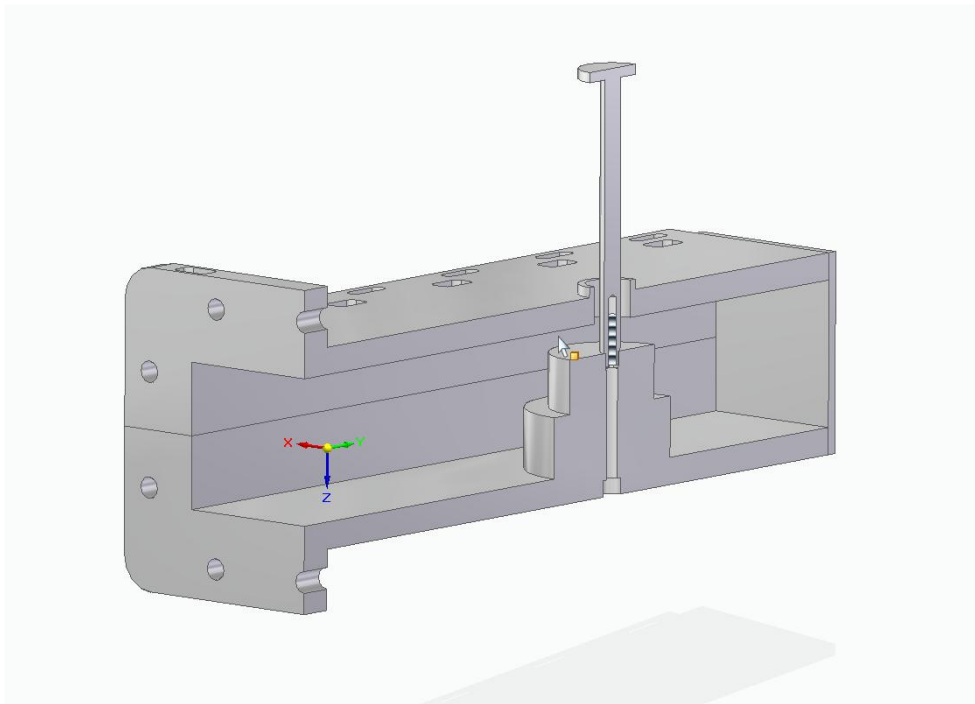


Abbildung 64: Schnittansicht Einkopplung

Aufgrund der Verfügbarkeit der Generatoren wurde die Variante mit zweimal 6 kW Solid State Generatoren ausgewählt. Um sicherzustellen, dass alle Muster gleichmäßig mit Mikrowellen bestrahlt werden, war die Entwicklung eines entsprechenden Splitters erforderlich, der die Energie gleichmäßig aufteilt (50/50). Die Abbildungen 18 bis 20 illustrieren diesen Splitter beispielhaft. Die Gestaltung dieses Splitters war entscheidend, um eine gleichmäßige Verteilung der Mikrowellenenergie auf alle Proben zu gewährleisten. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf eine präzise Aufteilung der Energie gelegt, um sicherzustellen, dass keine der Proben benachteiligt wird. Die Entwicklung eines effektiven Splitters ermöglichte es, den Bestrahlungsprozess zu optimieren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Es ist zu erwähnen, dass die zweite Variante des Splitters auf der anderen Seite nur minimale Unterschiede in den Abmessungen aufweist. Dies unterstreicht die Flexibilität des Designs und die Fähigkeit, auf spezifische Anforderungen und Gegebenheiten einzugehen, ohne die grundlegende Funktionalität des Splitters zu beeinträchtigen.

Die präsentierten **Abbildung 65** bis **Abbildung 69** und die Beschreibung des Splitters bieten einen Einblick in den Entwicklungsprozess und die technischen Herausforderungen, die bei der Realisierung einer effizienten Mikrowellenbestrahlungslösung zu bewältigen waren.

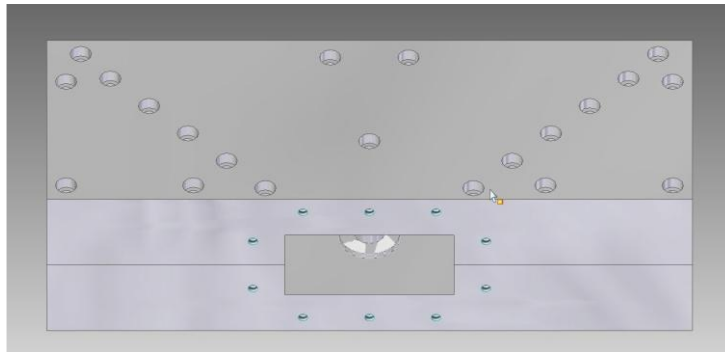


Abbildung 65: Splitter Eingangsseite

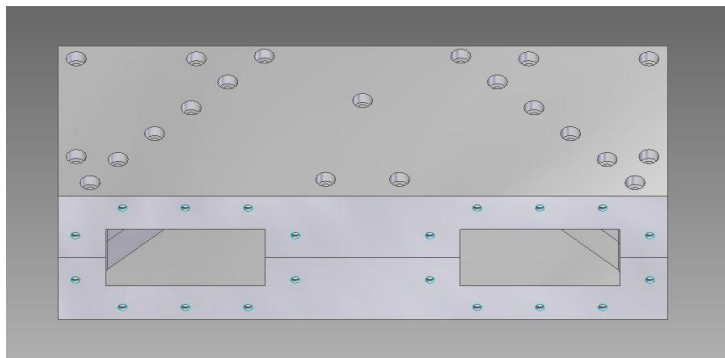


Abbildung 66: Splitter Ausgangsseite

Die im Inneren verbaute und fest verschraubte "Antenne" wurde speziell entworfen, um die Mikrowellenenergie gleichmäßig aufzuteilen. Diese Antenne, die fest im Inneren des Systems verbaut und sicher verschraubt ist, fungiert als zentrales Element zur effektiven Verteilung der Mikrowellenenergie.

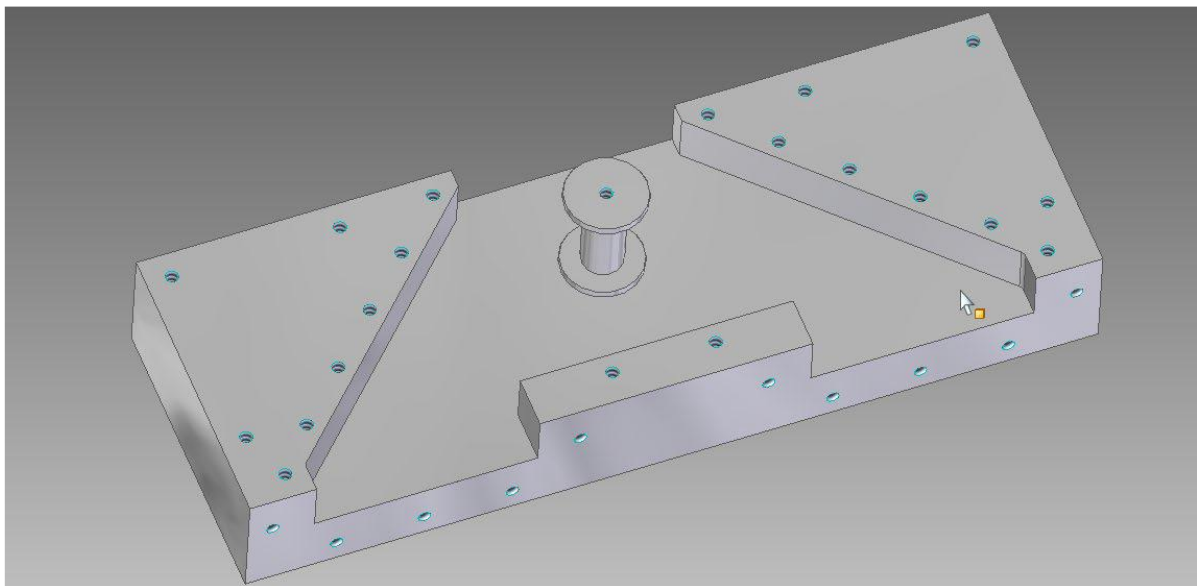


Abbildung 67: Splitter Halbiert, mit Antennenansicht

Die nachfolgende **Abbildung 68** bietet eine Draufsicht auf das Werkzeug, insbesondere auf das Unterteil, auf dem die Splitter montiert sind. Die Splitter sind entlang der Längsseiten des

Werkzeugs angebracht und spielen eine wesentliche Rolle bei der gleichmäßigen Verteilung der Mikrowellenenergie auf die Proben.

Die Anbringung der Splitter entlang der Längsseiten des Werkzeugs wurde gezielt gewählt, um eine optimale Ausrichtung und Positionierung sicherzustellen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Mikrowellenenergie effektiv und gleichmäßig über die gesamte Fläche der Proben verteilt wird. Diese Anordnung ermöglicht eine effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Energie und trägt dazu bei, eine konsistente und zuverlässige Bestrahlung der Proben zu gewährleisten.

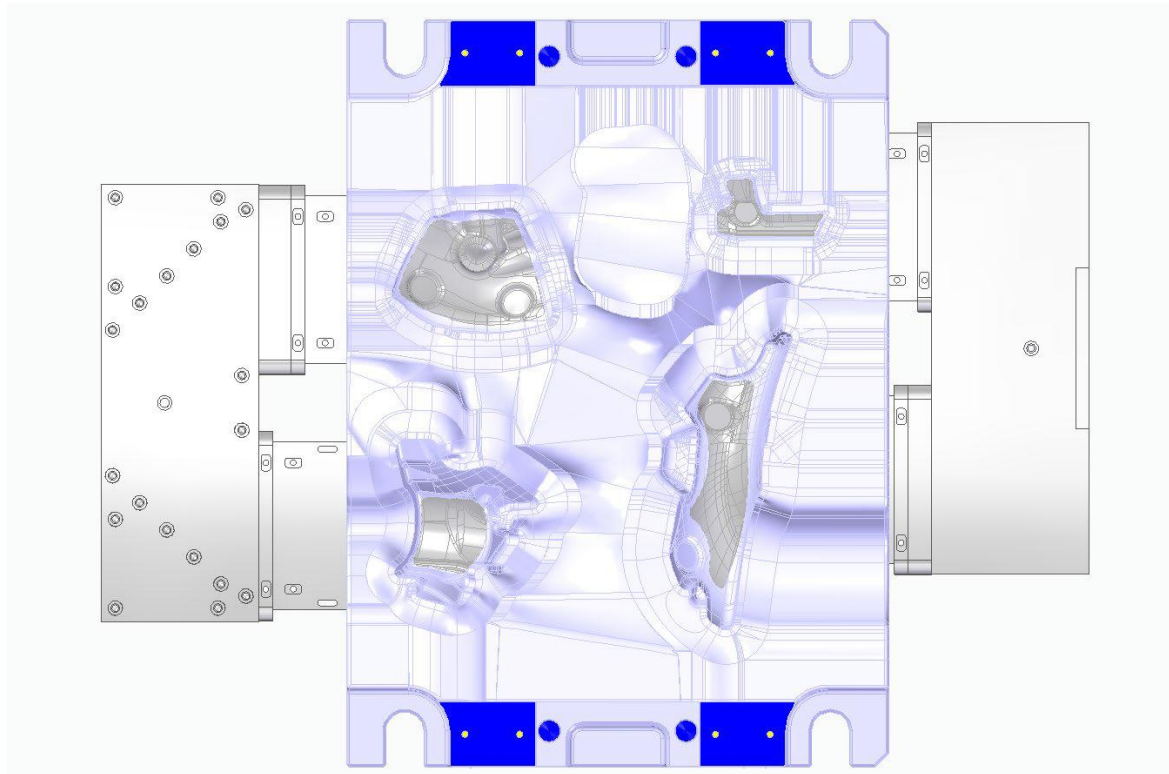


Abbildung 68: Draufsicht Werkzeug Unterteil

Die nun folgende **Abbildung 69** vereinfacht die Vorstellung über die Montage der Antenne im Werkzeug. Zudem lässt sich in Abbildung 70 die Anordnung der Einkopplungen unterhalb des Werkzeuges erkennen.

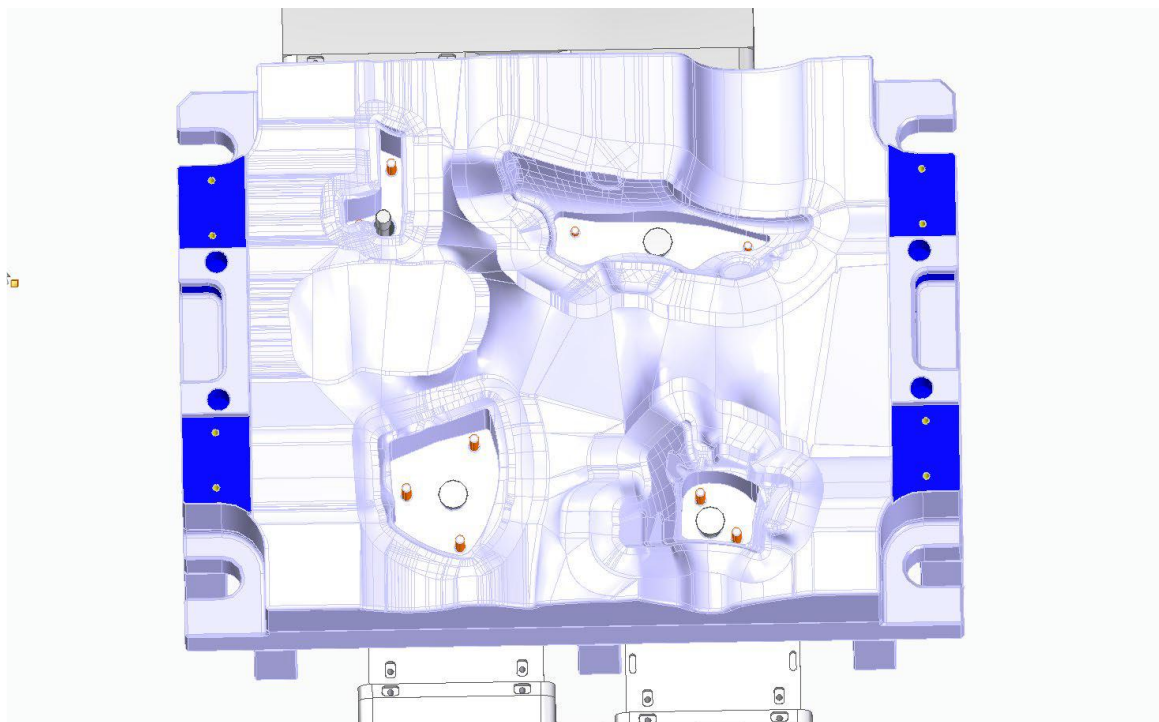


Abbildung 69: Draufsicht Unterteil mit ausgeblendeten Peek Einsätzen

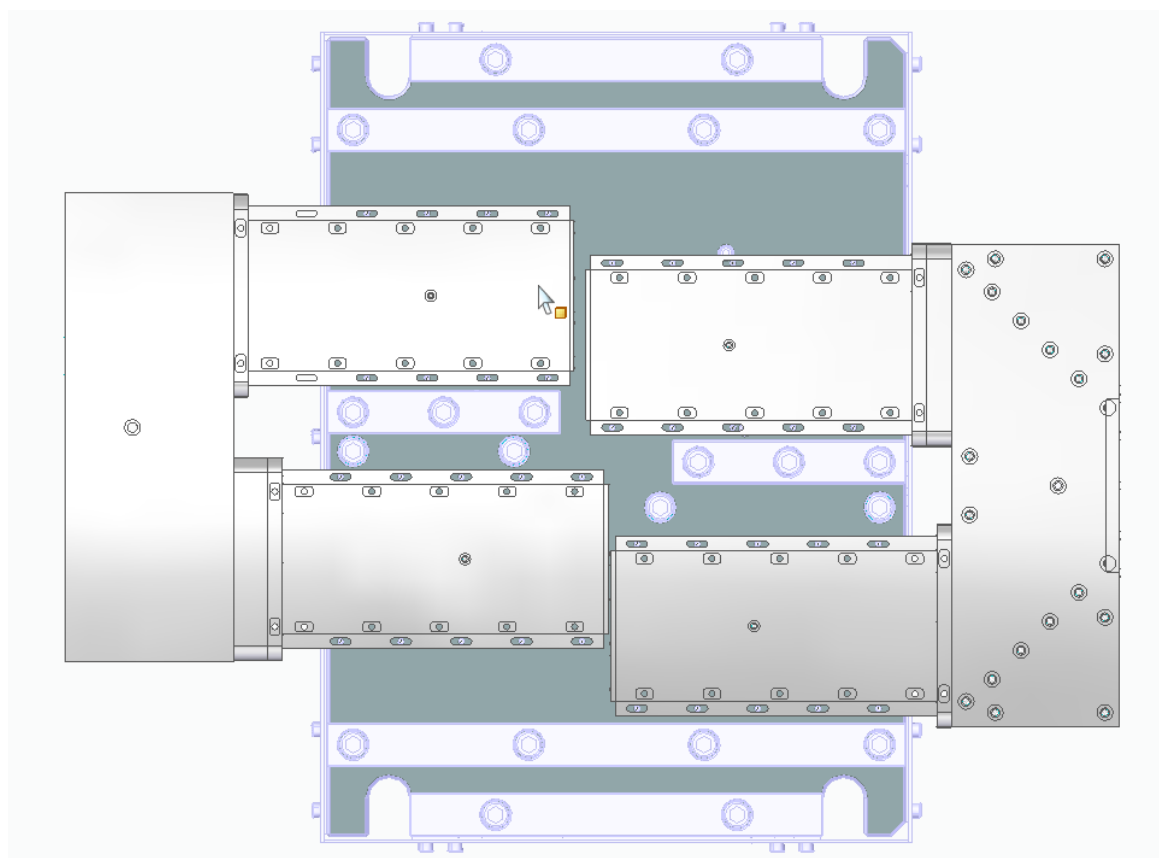


Abbildung 70: Untere Ansicht - mit montierten Einkopplungen

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilaustritt für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Das Arbeitspaket C befasste sich mit der Prozessentwicklung zur Herstellung der Glasfaserdämmkörper. Die Ergebnisse der einzelnen Unterarbeitspakete werden im Folgenden detailliert dargestellt.

C1: Entwicklung Dispergiertechnologie für die Mehrkomponentensysteme (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bauhaus-Universität Weimar)

Im Rahmen der durchgeführten Entwicklung bezüglich der Dispergiertechnologie ist in erster Instanz eine Untersuchung der rheologischen Eigenschaften erfolgt. Hierbei standen zwei verschiedene Bindersysteme im Fokus. Zum einen der bisher von der Firma Isolite GmbH verwendete bentonitbasierte Binder, zum anderen ein neu entwickelter metakaolinbasierter Binder (siehe Arbeitspaket A). Der Bentonitbinder dient dem Vergleich der ermittelten Ergebnisse bei den rheologischen Untersuchungen.

Für den Auftrag auf das Glasfaserdämmmaterial wurden unterschiedliche Methoden getestet: Einerseits besteht die Möglichkeit das Glasfasergewebe mittels Drucksprühtechnik mit dem Binder zu benetzen. Die Drucksprühtechnik wird von der Firma Isolite bisher zum Aufbringen des Binders erfolgreich verwendet. Somit sollten die in den Untersuchungen festgestellten Eigenschaften der Binder für das Drucksprühen geeignet sein.

Eine weitere am ITA der RWTH Aachen University innerhalb der Vorversuchsreihen erprobte Methode ist die Beschichtung mittels Foulard. Hierbei wird das Textil durch eine mit Beschichtung gefüllte Wanne gezogen. Quetschwalzen erzeugen einen Schwammeffekt, um eine Durchdringung des Glasfaservlieses mittels Binder zu ermöglichen. Der Abzug des Textils wird durch die Aufwicklung der Maschine so gesteuert, dass die eingestellte Spannung konstant gehalten wird.

In **Abbildung 71** zu sehen ist der automatische Binderauftrag mittels Quetschwalzwerk. Als problematisch bei Verwendung dieser Technik stellt sich der Parameter der Zugfestigkeit des unbehandelten Glasfaserdämmmaterials dar. Durch die aufgebrachten Kräfte im Quetschwalzwerk und die Spannung durch den Abzug der Maschine reißt das Vlies auseinander. Dieser Effekt ist in **Abbildung 72** zu sehen.

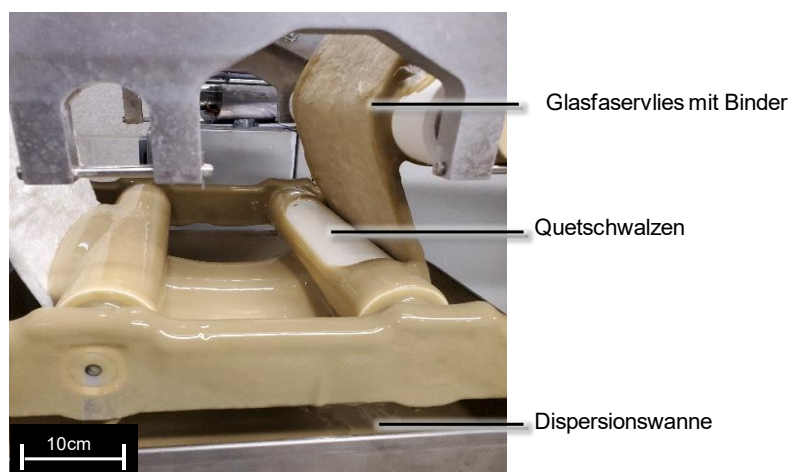


Abbildung 71: Beschichtung der Glasfaserdämmmatte mit dem Bentonit-Binder



Abbildung 72: Gerissene Glasfaserdämmmatte

Die Abzugsspannung der Maschine kann nicht soweit reduziert werden, dass ein kontinuierlicher Prozessdurchlauf gewährleistet wird. Ein Umbau der Anlage war im ursprünglichen Projektplan nicht vorgesehen und hätte den Projektrahmen deutlich überschritten. Daher wurde diese Prozessroute nicht weiterführend untersucht. Im Verlauf der Vorversuche erfolgten jedoch weitere Untersuchungen zu alternativen Beschichtungsmethoden. Hierbei wurde u.a. die Transferbeschichtung erprobt. Dieses Beschichtungsverfahren ermöglicht die kontinuierliche Beschichtung mit viskoserem Bindern. Hierdurch kann ein kontrollierter und reproduzierbarer Prozessablauf gewährleistet werden. Die kontinuierlichen Transferbeschichtung beruht auf der Verwendung eines Kiss-Coaters, siehe **Abbildung 73**.

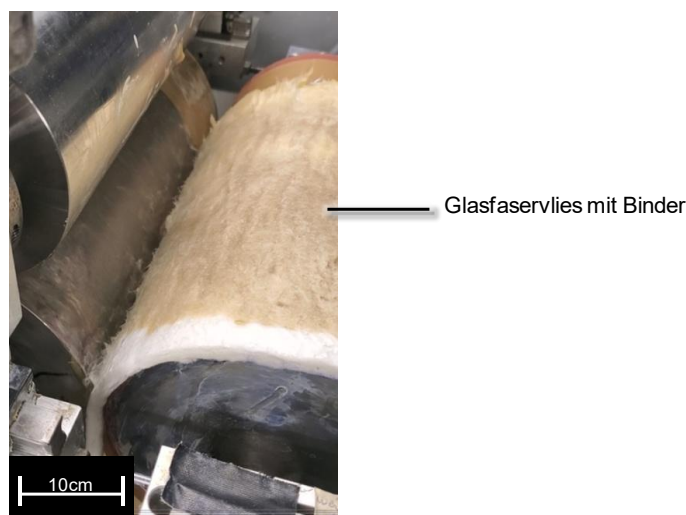


Abbildung 73: Kiss-Coater-Rakel-Beschichtung der Glasfaserdämmmatten

Dieser ermöglicht die Erzeugung einer gleichmäßigen Beschichtung mittels Bindersystem. Durch die nur einseitig mögliche Beschichtung je Durchgang ergibt sich jedoch ein erheblicher Mehraufwand durch die Notwendigkeit des Umspannens des Textils innerhalb des Beschichtungsprozesses. Dieser Nachteil ergibt sich direkt aus der Funktionsweise des Kiss-Coaters zum Auftrag des Binders. Weiterhin konnte bei der Beschichtung mittels Kiss-Coater-Rakel nicht die durch Isolite definierte benötigte Eindringtiefe des Binders in das Vlies erreicht werden. Somit wurde die Verwendung einer diskontinuierlichen Transferbeschichtung als Alternative hinzugezogen um einen stabileren Prozessablauf zu ermöglichen und den Beschichtungsprozess dennoch mit der am ITA vorhandenen Anlagentechnik durchzuführen.

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilaustritt für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Weiterhin hat die diskontinuierliche Transferbeschichtung den Vorteil, dass die auftretenden Kräfte niedrig genug sind, um das Glasfaserdämmmaterial innerhalb des Beschichtungsprozesses nicht zu beschädigen. Darüber hinaus kann eine höhere Eindringtiefe des flüssigen Binders erreicht werden, da der Transferfilm in einer Wanne statt auf dem Rakel erzeugt wird und somit die Viskosität des Binders keine Begrenzung des Beschichtungsprozesses mehr darstellt.

Bei der diskontinuierlich Transferbeschichtung wird das Vlies manuell in einen vorgefertigten Transferfilm getaucht. Dieser Transferfilm wird auf Basis des berechneten Flächengewichts und der gewünschten Auftragsmenge je Seite in einer Wanne vorbereitet. Dieser Beschichtungsprozess hat sich innerhalb der Vorversuchsreihen als geeignet herausgestellt. Der Binder kann gleichmäßig verteilt auf- und eingetragen werden. Die geforderte Eindringtiefe wurde erzielt. Somit wurde die Transferbeschichtung auch für das weitere Vorgehen am ITA ausgewählt.

Für die bei der Firma Isolite verwendete Beschichtungsmethode des Drucksprühens sind insbesondere eine geeignete Viskosität und Partikelgröße des Binders von großer Bedeutung, um zu gewährleisten, dass der Binder sprühbar ist und der Anfahrprozess des Sprühens zuverlässig funktioniert. Weiterhin muss eine gleichmäßige Benetzung bzw. Durchdringung des Glasfaserdämmmaterials möglich sein. Der Binder sollte weiterhin nicht sedimentieren, um eine gleichmäßige Benetzung zu ermöglichen, sowie die Düsen beim Drucksprühvorgang nicht zu verstopfen. Weiterhin ist eine mögliche Sedimentation auch zur Verwendung eines Transferfilms als Beschichtung ungeeignet. Auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen zur Viskosität und rheologischen Eigenschaften wurde die Eignung des Drucksprühens sowie des Transferfilms mit beiden Bindern als möglich eingestuft.

Bei den Untersuchungen und Berechnungen wurden Fließ- und Viskositätskurven der beiden Bindersysteme in Arbeitspaket A4 erstellt. Der metakaolinbasierte Binder weist eine niedrigere Fließkurve auf als der Bentonitbinder. Weiterhin liegt die Fließgrenze des Bentonitbinders bei 21 N/m^2 und im Vergleich dazu die des Metakaolinbinders bei lediglich $3,37 \text{ N/m}^2$. Der Fließindex des Bentonitbinders liegt bei 1,75, der des Metakaolinbinders bei 0,99. Aus den Ergebnissen der berechneten Größen des Metakaolinbinders lässt sich daher eine voraussichtlich gute Sprühbarkeit bei der Verarbeitung ableiten.

Daraus folgt, dass die von der Firma Isolite GmbH bisher verwendete Technik zur Benetzung des Glasfaserdämmmaterials weiterhin genutzt werden kann. Außerdem eignet sich beide Materialien zur Transferbeschichtung des Glasfasergewebes am ITA.

C2: Prozessentwicklung: Wirkzusammenhänge Bauteileigenschaften und Prozess (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Im Folgenden erfolgt die Darstellung des Versuchsaufbaus zur Prozessentwicklung. Dieser Aufbau ist konzipiert, um in ähnlicher Weise sowohl auf der Presse am ITA als auch auf den Pressen bei Isolite durchgeführt zu werden.

Der Versuchsaufbau ist darauf ausgelegt, die Mikrowellenkomponenten des Werkzeugs in den Arbeitsprozess der Presse am ITA zu integrieren. Hierbei werden die Proben, die sich auf dem Werkzeug befinden, unter Verwendung der Mikrowellenenergie behandelt. Dieser Prozess ermöglicht es, die gewünschten Material- oder Produktmerkmale gezielt zu beeinflussen oder zu verbessern.

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Die Presse am ITA bietet die notwendige Infrastruktur und technische Möglichkeiten, um den Versuchsaufbau umzusetzen. Dabei werden alle Sicherheitsstandards und Vorschriften eingehalten, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Der Einsatz eines 3-Stab-Tuners ist erforderlich, um die Leistungsfähigkeit des Systems weiter zu optimieren und sicherzustellen, dass die gewünschten Ergebnisse erzielt werden.

Im Gegensatz zum ursprünglich im Antrag beschriebenen Ansatz, die Mikrowellen durch Bohrungen oder Schlitze an mehreren Stellen ins Werkzeug einzukoppeln, wurde die Einkopplung der Mikrowellenstrahlung mit mikrowellentransparenten Materialien als zielführender bewertet. Dies verursachte einen erheblichen Mehraufwand aufgrund der in B3 dargestellten notwendigen Änderungen in der Werkzeugauslegung. Ursächlich waren hierfür insbesondere die wesentlich zeitaufwendigeren Simulationen zur Implementierung der Mikrowellenantennen in das Presswerkzeug. Darüber hinaus zeigte sich, dass das ursprünglich vorgesehene K-Therm-Material, welches als Abstandhalter dienen sollte, nicht für das feingliedrige Fräsen geeignet ist, wodurch zunächst ein alternatives Material ermittelt werden musste. Darüber hinaus benötigte die Herstellung des Presswerkzeug aufgrund von Lieferengpässen bei den Zulieferern ebenfalls mehr Zeit als ursprünglich angenommen. Entsprechend des Zwischenberichtes vom 07.08.2023 und dem Antrag zur Laufzeitverlängerung vom 15.11.2023 wurde daher eine Laufzeitverlängerung beantragt und genehmigt.

Um die übergeordneten Projektziele nicht zu gefährden, wurde durch das Konsortium entschieden, die Versuche beim Projektpartner F&M statt am ITA durchzuführen. Hierdurch ergab sich jedoch ein deutlicher personeller und zeitlicher Mehraufwand bei den Projektpartnern ITA und Grunewald, welcher insbesondere auf die Abwandlung des ursprünglich geplanten Versuchsaufbaus, die Adaptionen im Beschichtungsprozess, zahlreiche und aufwendige Einstellungen und Messungen vor Ort bei F&M sowie die damit verbundenen Reisen zurückging. Diese Änderungen im Projektplan waren jedoch zwingend erforderlich, um das Projekt fristgerecht und erfolgreich abzuschließen.

Nach der erfolgreichen Umsetzung sämtlicher Komponenten und die Implementierung der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen, erfolgte die Integration des Werkzeugs bei F&M. Dies beinhaltete weitere Abstimmungen hinsichtlich der Verwendung des 3-Punkt-Tuners. Der Versuchsaufbau wird in **Abbildung 74** und **Abbildung 75** veranschaulicht. Diese Bilder bieten einen detaillierten visuellen Einblick in den Versuchsaufbau und zeigen die Positionierung des Werkzeugs.

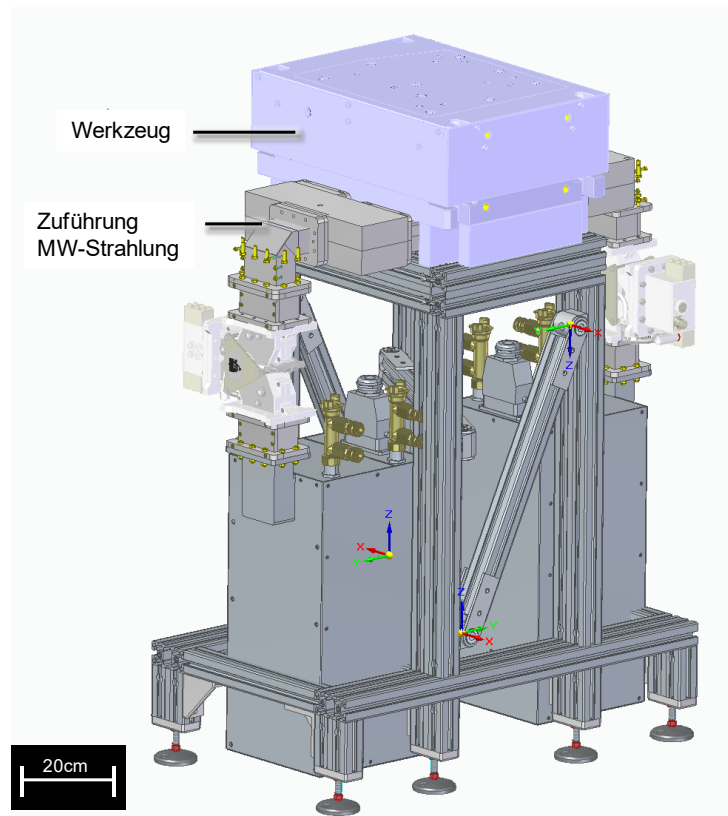


Abbildung 74: Anordnung für Pressenaufbau

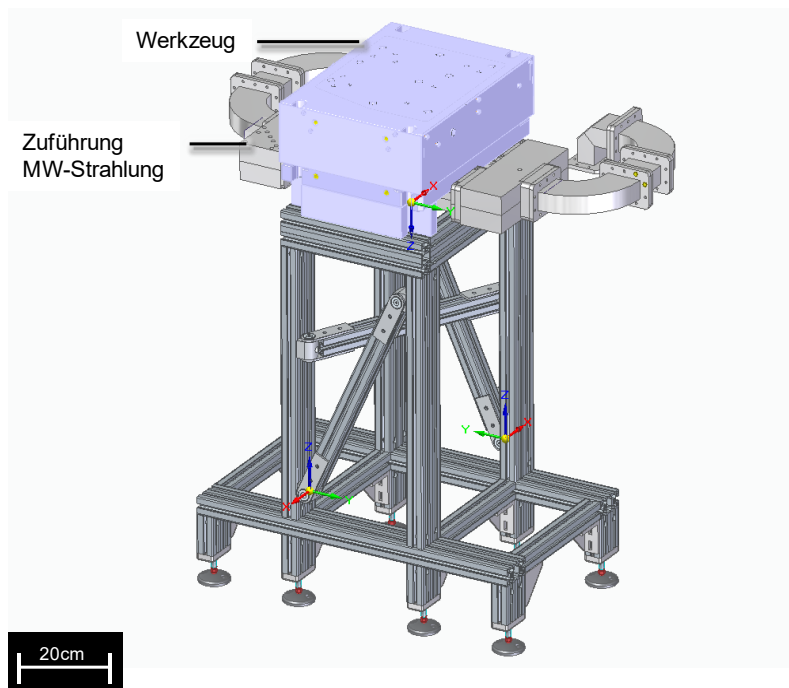


Abbildung 75: Versuchsaufbau

Bei der Auswahl der Ausführung der Mikrowelleneinkopplung wurden PEEK-Schrauben zur Befestigung der Abdeckung verwendet. So kann eine ungewollte Erhitzung der Schrauben vermieden werden. Durch die sonst erfolgenden lokalen Erhitzungen kommt es ansonsten zu lokalen Verbrennungen (siehe **Abbildung 78**) und einer instabilen Anpassung der

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Mikrowellengeneratoren, dies führt wiederum zu Leistungsschwankungen. Die Abdeckungen und die Schrauben sind in **Abbildung 76** und **Abbildung 77** zu sehen.

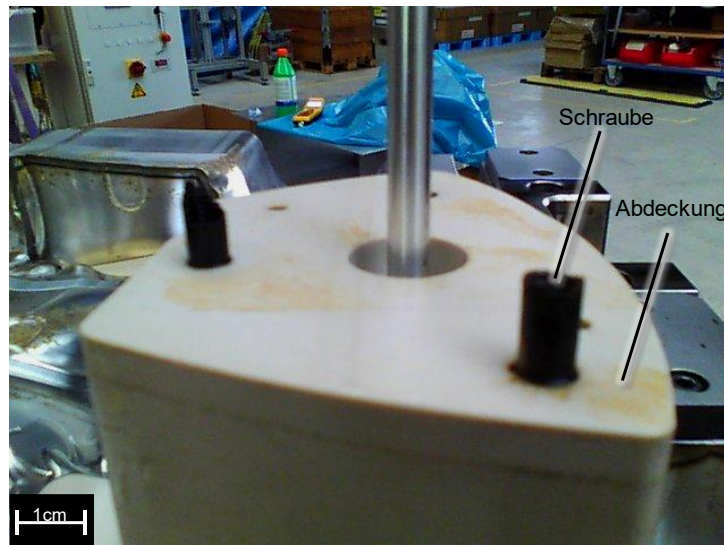


Abbildung 76: Abdeckung mit PEEK Schrauben

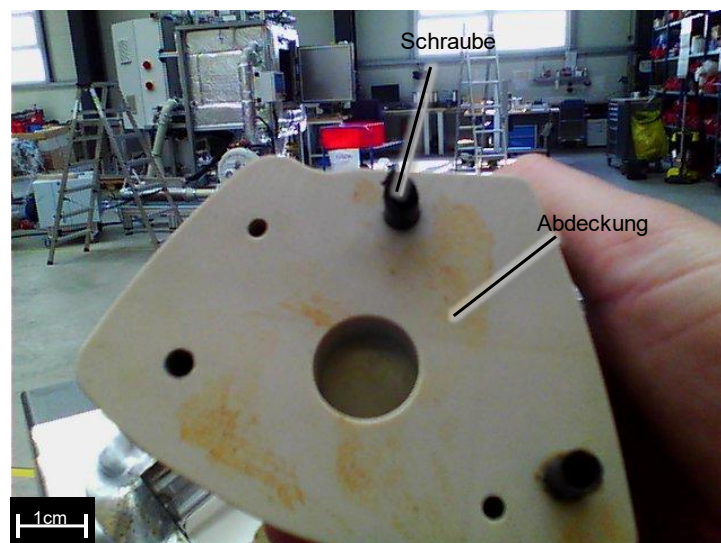


Abbildung 77: Abdeckung mit PEEK Schrauben, Draufsicht

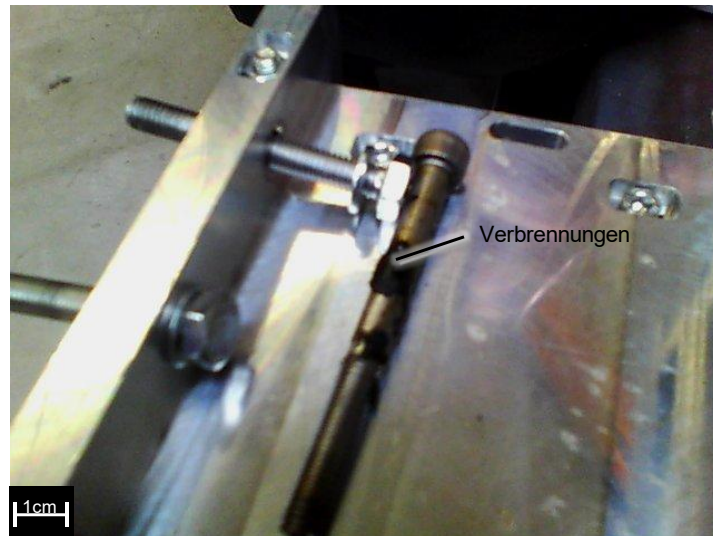


Abbildung 78: lokale Verbrennungen

Unter der Verwendung der PEEK Schrauben zur Befestigung war ein stabiler Betrieb der Generatoren am Werkzeug gegeben.

In einem ersten Schritt wurde mit Wasser getränktes Dummy-Material verwendet und eine Abstimmung mit Hilfe manueller 3-Stab-Tuner umgesetzt. Innerhalb der Versuchsreihe mit dem Originalmaterial zeigte sich, dass sich mit zunehmender Trocknung die notwendige Anpassung zwischen Generator und Werkzeug änderte. Um dies zu kompensieren wurde auf einen vollautomatischen 3-Stab-Tuner zurückgegriffen. Dies ermöglichte einen gleichbleibenden Leistungseintrag



Abbildung 79: Aufbau der Mikrowellenkomponenten und dem Presswerkzeug

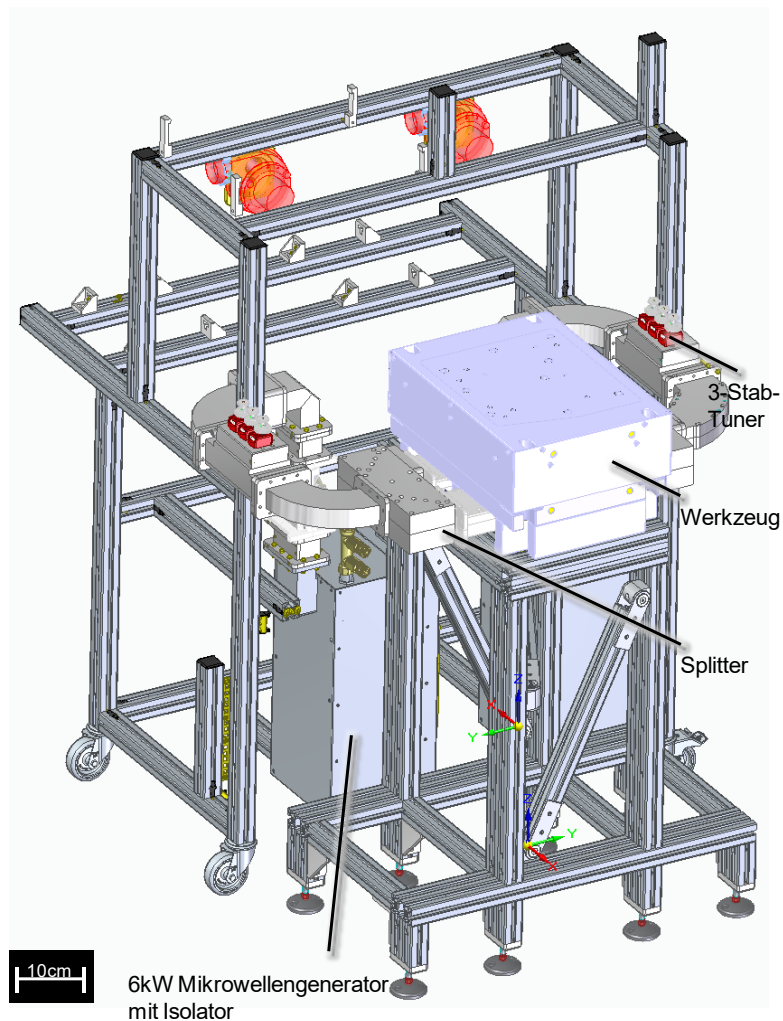


Abbildung 80: CAD Modell Aufbau der Mikrowellenkomponenten und des Presswerkzeugs

Zur verbesserten Übersichtlichkeit sind die relevanten Komponenten anhand der **Abbildung 80** und **Abbildung 81** beschrieben. Zur Vollständigkeit ist die Fotografie in **Abbildung 79** dargestellt.

Um die Kühlung während der Versuchsreihe sicher zu stellen verfügen die Generatoren über eine Sensorik, welche selbstschaltend ist sollte die Grenztemperatur überschritten werden. Zu beachten ist, dass der Isolator über keine eigene Sensorik verfügt und somit ist sicher zu stellen, dass genügend Kühlwasser fließt. Weiterhin verfügt die Gesamtanlage über eine Kühlwasserüberwachung.

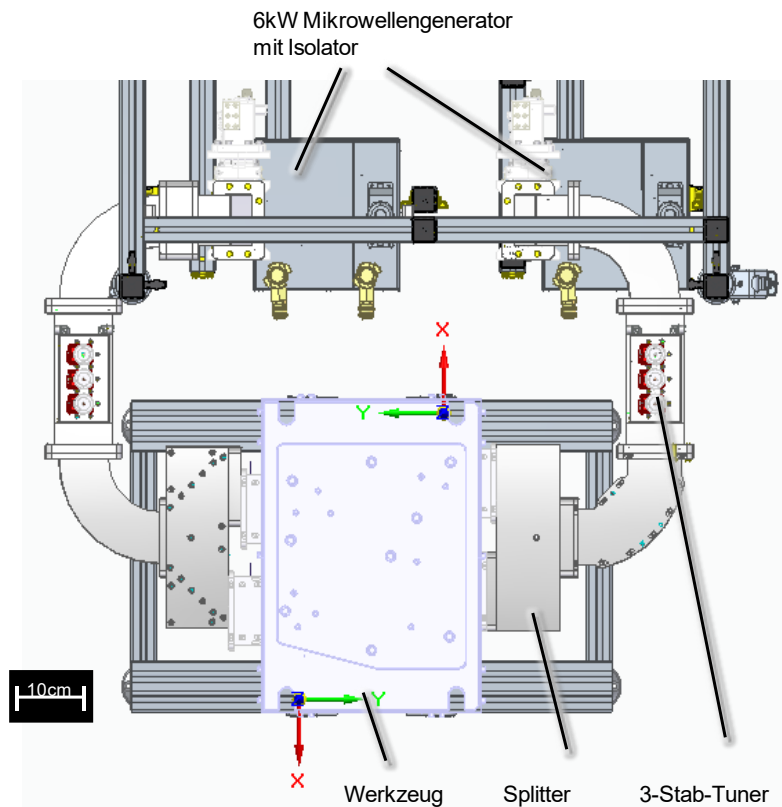


Abbildung 81: Draufsicht CAD Modell Aufbau der Mikrowellenkomponenten und des Presswerkzeugs

Zur Erhöhung des Energieeintrags wurde je Pfad noch ein 3-Stab-Tuner verbaut. Diese Prozessverbesserung wurde auf Grundlage der Simulationsergebnisse vorgenommen.

Zur automatischen Prozessanpassung wird die rücklaufende Mikrowellenleistung unter dem Prozess bemessen. Dies wird via eines auf Halbleitertechnik basierten Mikrowellengenerators sichergestellt. Unter Verwendung dieser Technik können beide Generatoren unabhängig voneinander und permanent die rücklaufende Leistung erheben. Um dies zu ermöglichen wird die Wasserlast des Isolators ausgekoppelt und vom Generator gemessen. Die rücklaufende Leistung kann über eine Bediensoftware ausgelesen werden, welche nachfolgend beschrieben wird (**Abbildung 82**).

Durch Einstellen des 3-Stab-Tuners kann die rücklaufende Leistung reduziert werden. Es wird immer mit dem mittleren Stub begonnen. Anschließend wird der Stub, welcher näher zum Generator oder am Werkzeug gelegen ist, eingestellt. In der Regel werden nur 2 Stubs zur Einstellung benötigt. Durch die Limitierungen der technischen Möglichkeiten bedingt (komplexe Anpassungen sind nur mittels HF-Technik möglich, welche wiederum nicht auf einer Mikrowellenanlage integrierbar ist) lassen sich über den 3-Stab-Tuner die Anpassungen im Bereich von 10 dB bis 20 dB optimieren.

Bei Verwendung von Magnetrontechnologie ist die Verwendung eines automatischen 3-Stab-Tuners nötig, da sich unter Umständen die Resonanzfrequenz während der Trocknung- bzw. Erwärmung verschieben kann. In Kombination mit einem halbleiterbasierten Mikrowellengenerator ist ein automatischer 3-Stab-Tuner nicht notwendig, da die Frequenz über ein ISM-Band verändert werden kann. Durch eine zusätzlich implementierte Funktion folgt der Mikrowellengenerator automatisch der besten Anpassung.

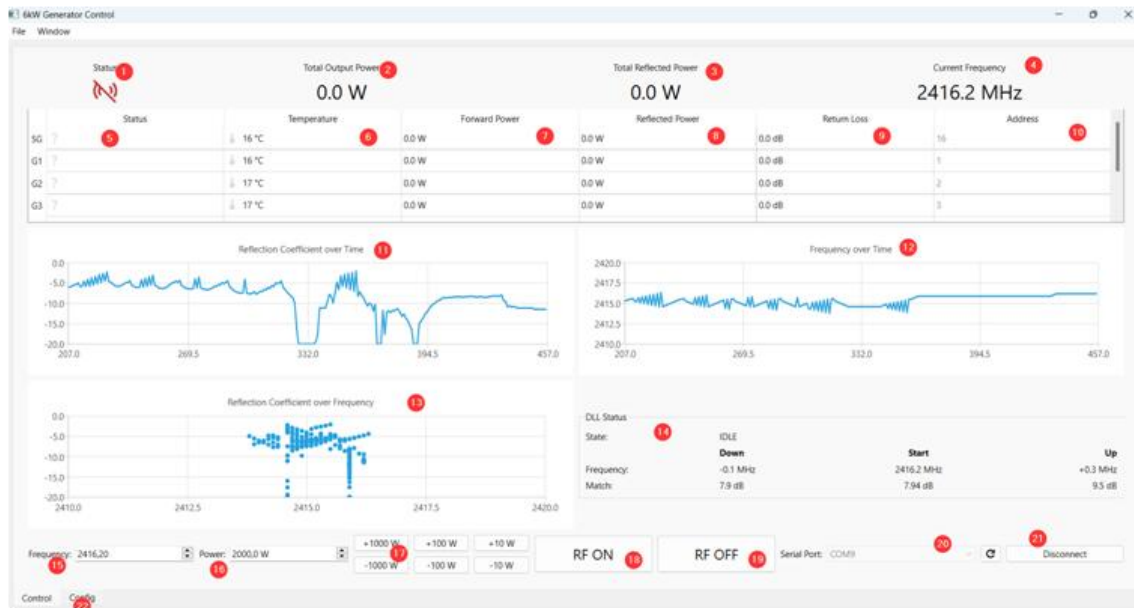


Abbildung 82: Steuersoftware

1. Gibt den Status des Systems an, ob Mikrowellenleistung abgegeben wird oder nicht
2. Es wird die gesamte erzeugte Mikrowellenleistung angezeigt
3. Hier wird die Mikrowellenleistung angezeigt, welche an der Wasserlast gemessen wird
4. Aktuelle Frequenz, auf welche sich der Generator befindet. Dieser Wert kann abweichen von dem Eingabefeld 15
5. Zeigt den Status der einzelnen Verstärker als auch dem SG-Board an
6. Die aktuelle Temperatur der Komponenten
7. Die von den einzelnen Komponenten erzeugte Mikrowellenleistung. Dabei ist zu beachten, dass der Generator, also das SG-Board und die Verstärker, in Abhängigkeit von der Frequenz Unterschiede in der Mikrowellenleistung aufzeigen. Dies ist auf Grund der Komplexität der einzelnen Regelschleifen als auch der gesamten Regelschleife der gesamten Mikrowellenleistung nicht anders möglich. Die Summe aller einzelnen Mikrowellenleistung der Verstärker, kann größer ausfallen, als die angezeigt gesamte Mikrowellenleistung, was auf die Verluste im Combining-Netzwerk des Generators zu begründen ist
8. Die rücklaufende Mikrowellenleistung an den Verstärker. Diese Leistung ist nicht dieselbe wie die unter 3. Angezeigte Leistung! Die Verstärker sind durch den Isolator geschützt, wodurch keine rücklaufende Leistung an den einzelnen Verstärkern nach dem Combining-Netzwerk ankommen darf. Allerdings ist eine rücklaufende Leistung von bis zu 10% der vorlaufenden Leistung des einzelnen Generators akzeptable, da es zu Verlusten in Abhängigkeit der Frequenz an den Steckern und dem Combining-Netzwerk kommen kann
9. Hier wird das Verhältnis aus vor- zur rücklaufenden Mikrowellenleistung in dB umgerechnet
10. Die Software-Adresse für die Komponenten, welche bei der initialen Inbetriebnahme vergeben wird
11. Der Return Loss (die Anpassung) über der Zeit, welche aus den gesamten Größen der vorlaufenden und rücklaufenden Mikrowellenleistung berechnet wird
12. Die Frequenzänderung graphisch dargestellt
13. Die Anpassung über der Frequenz dargestellt

14. Hier sind Infos zur DLL-Funktion zu finden. In dieser Software-Version startet die DLL-Funktion automatisch. Es ist nur ein Betrieb in dieser Funktion möglich, da es aufgrund der Messungen und der Simulation für einen effizienten und schnellen Prozess keine andere Option gibt
15. Hier kann die Start Frequenz der DLL-Funktion festgelegt werden
16. Hier lässt sich die Leistung des Generators einstellen, diese kann permanent geändert werden durch den Bediener, dazu stehen einem die Felder unter 17. Zur Verfügung, aber auch eine Eingabe über das Feld 16. Ist möglich
17. Ändert die Mikrowellenleistung um den entsprechenden Wert
18. Aktivieren der Mikrowellenleistung
19. Abschalten der Mikrowellenleistung
20. COM-Port des USB-RS485 Adapters
21. Verbindung zu Adapter aktivieren oder deaktivieren
22. Im Vorfeld wird von FM eine Kalibrierung des Systems vorgenommen, welche in der Config hinterlegt ist

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Das Arbeitspaket D befasste sich mit der Skalierung des Herstellungsprozesses der Glasfaserdämmkörper im Reallabor. Die Ergebnisse der einzelnen Unterarbeitspakete werden im Folgenden detailliert dargestellt.

D1: Variation der Werkzeuggeometrie auf Schikanenwerkzeug (Grunewald GmbH & Co. KG)

Durch intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern wurde schon früh im Projekt entschieden, das geplante Versuchswerkzeug zunächst für die Presse am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) zu entwickeln und anzufertigen. Ursächlich sind hierbei die entstehenden hohen Kosten für die parallele Entwicklung des Werkszeugs und der Mikrowellenimplementierung. Dementsprechend sieht der Arbeitsplan abweichend vor, ein Mikrowellenwerkzeug für die Presse am ITA zu entwickeln, welches durch entsprechende Adaption, auch für die Presse der Firma Isolite GmbH genutzt werden kann.

In diesem Zuge wurde von Grunewald eine Adapterplatte entwickelt, so dass das Werkzeug auch auf dem Pressentisch bei Isolite aufgenommen werden kann.

Bei der Konstruktion der Adapterplatte wurde darauf geachtet diese möglichst bedarfs- und fertigungsgerecht umzusetzen. Das Werkzeug wird in der Grundauführung so ausgeführt, dass es beim ITA in Aachen auf der Technikumpresse aufgenommen werden kann. Für die Adaption auf der Serienpresse bei Isolite wurde eine Grundplatte entwickelt auf der das Werkzeug aufgenommen wird. Im Anschluss kann somit das Werkzeug auf die Isolite Presse montiert werden. Dazu wurde das Spannkonzert von Isolite übernommen um den Rüstprozess nicht zu verändern siehe **Abbildung 83**.

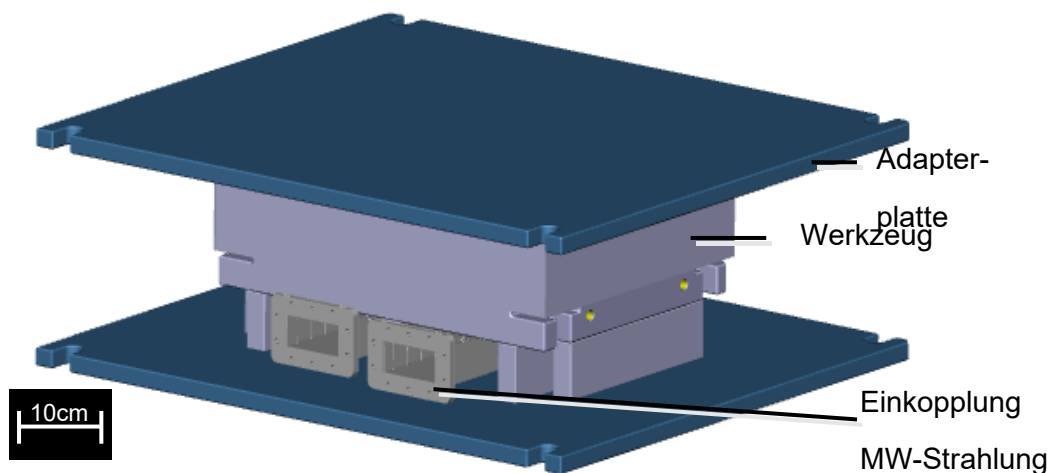


Abbildung 83: Adapterplatte

Die ursprünglich höher geplanten Kapazitäten von Grunewald innerhalb dieses Arbeitspaketes sind aufgrund der Planänderung zur Problemlösung des Arbeitspaketes C2 verwendet worden. Dies wurde mit dem Konsortium so vereinbart um die Projektziele nicht zu gefährden.

Dennoch wurde ein grundlegendes Konzept zur Adaption des Serienwerkzeugs von Grunewald erstellt, welches mithilfe der Rückschlüsse der Technikumsversuche am ITA die schnelle Entwicklung eines Serienwerkzeugs für Isolite ermöglicht.

Grundsätzlich wäre bei dieser Entwicklung eines Serienwerkzeuges folgendes zu adaptieren:

- Die Hohlleiter und Mikrowellenantennen müssen jeweils bauteil- und werkzeugspezifisch ausgelegt werden. Die Leistungsfähigkeit und Effizienz des späteren Bauteils ist stark durch die Lage und Art der Antennen beeinflusst und spielt somit eine maßgebliche Rolle innerhalb der Konstruktionphase. Daraus resultiert, dass die Werkzeugkonstruktion erst nach Festlegung der Hohlleiter und Antennen final abgeschlossen werden kann. Bezugnehmend auf die Dimension und Geometrie der Hohlleiter kann erst nach Vorliegen der Daten die Distanzkonstruktion erfolgen. Auch die Ausführung der Antennen in Form, Durchmesser und Länge kann variieren und kann daher erst eingepflegt werden, wenn diese durch F&M bestimmt wurden. Nach Festlegung dieser Daten kann die Konstruktionsseite der Werkzeugauslegung effizient erfolgen.
- Die Dimensionen und Geometrie der Hohlleiter bestimmen die Verteilung der Mikrowellenenergie und deren Einkopplung innerhalb des Halbzeuges. Dies ist auch aus thermischer Betrachtung prozessentscheidend. Ziel ist eine möglichst homogene Verteilung der eingebrachten Leistung und Wärme. Die Hohlleiter dienen der Leitung hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung. Aus diesem Grunde müssen auch sie ausgewählt/verteilt werden.
- Zur Dimensionierung des Werkzeuges wird weiterhin betrachtet, welche Werkzeuggrößen üblich sind bzw. bereits verwendet werden. Zur Herstellung des Prototyps wird weiterhin die am ITA mögliche Verwendung berücksichtigt. Hier sind die Dimensionen durch vorhandenes Maschinenmaterial eingeschränkt. Dies ist bei der Auswahl ebenso zu betrachten.
- Bei Isolite werden zurzeit zwei Werkzeuggrößen eingesetzt. Diese sind das 1/3 Werkzeug mit den Abmessungen 750 x 400 x 200 mm und das 2/3 Werkzeug mit den Abmessungen 880 x 750 x 200 mm. Bedingt durch die unterschiedlichen Abmessungen der Serienwerkzeuge ist eine Anpassung der Absaug- und Rückstoßkanäle sowie eine erweiterte Verteilung der Kräfte auf die deutlich erhöhte Stückzahl notwendig.
- Bei der Dimensionierung ist zu betrachten, dass die Einkopplung der Energie der Mikrowellenstrahlung gleichmäßig erfolgen kann, sowie auch die Möglichkeiten zum Bauteilwurf. Beides muss präzise auf die gewünschten Bauteildimensionen angepasst berücksichtigt werden und eine Beeinträchtigung der Bauteilqualität zu verhindern und den Prozess zuverlässig und automatisiert ablaufen lassen zu können.

D2: Auslegung, Konstruktion, Simulation und Fertigung des Serienwerkzeugs (Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Nach Absprache mit den Projektpartnern und dem ersten Projekttreffen wurde beschlossen, den Prototyp passend für die Technikumsphase des ITA zu entwickeln. Dieses Werkzeug dient als Demonstrator und Prototyp und wurde entsprechend des im Arbeitspaket B beschriebenen Konzeptes entwickelt. Das entwickelte Werkzeug dient als Konzept für die Umsetzung des Prozesses bei Isolite, welches in Arbeitspaket D1 beschrieben wurde. Das detaillierte Hergehen ist dem Zwischenbericht von 07.08.2023 zu entnehmen. Eine Laufzeitverlängerung wurde parallel angestoßen und durchgeführt.

Nach erfolgreichem Abschluss der Modellierungsphase konnte die Fertigung eingeleitet werden. Ein entscheidender Schritt innerhalb dieses Prozessabschnittes war die Anlieferung der erforderlichen Materialien und Ressourcen an den Standort von F&M in Peine. Dieser Standort wurde gezielt auf Basis der notwendigen Fachkompetenz vor Ort, sowie aufgrund der vorhandenen technischen Ausstattung gewählt. In Peine konnten so alle erforderlichen

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem Bauteilwurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Einstellungen und Anpassungen gemäß den zuvor definierten Spezifikationen eingestellt werden.

Durch die Vorbereitungen von F&M konnte vor Ort die gründliche Überprüfung und Feinabstimmung durchgeführt werden. Der Anspruch an hohe Qualitätsstandards konnte so gehalten werden und auf potentielle Herausforderungen konnte umfassend reagiert werden. Korrekturmaßnahmen wurden entsprechend eingeleitet und die weiteren Produktionsschritte mit allen Projektpartner zusammen feinabgestimmt.

Als zentraler Erfolgsfaktor lässt sich in dieser Planungs- und Produktionsphase die enge und effiziente Kommunikation aller beteiligter Parteien festhalten. So gelang ein reibungsloser Ablauf und es konnten alle relevanten Aspekte nach und nach sichergestellt werden. Dies war insbesondere in Bezug auf die Prozessoptimierungen und technischen Anpassungen von großem Wert. Die koordinierte Zusammenarbeit legte die Basis für die anschließende Werkzeugfertigung und die daraus folgende Produktqualität.

Zusätzlich wurden vor Ort in Peine Versuche durchgeführt, deren Aufbau der **Abbildung 84** und **Abbildung 85** zu entnehmen ist. Diese Versuche dienen dazu, das finale Fertigungsverfahren weiter zu verfeinern und das Risiko unerwarteter Prozessabweichungen zu minimieren. Insgesamt kann der Erfolg der Fertigungsphase und die gelungene Kommunikation aller Parteien als Grundlage für die nachfolgenden Prozessschritte verwendet werden.



Abbildung 84: Werkzeug Aufbau Vorversuche

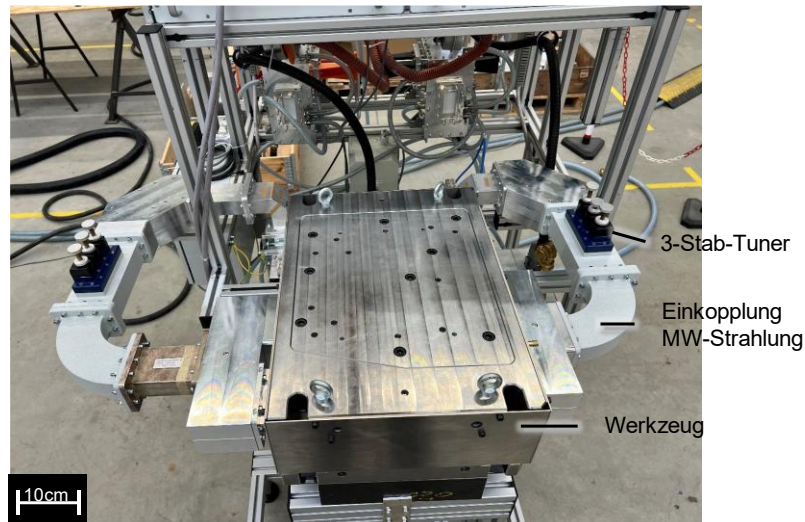


Abbildung 85: Aufbau Vorversuche - zusätzliche Ansicht

D3: Verheiraten Mikrowelle, Werkzeug und Presse: Kommunikation: Steuerung, Sicherheitskonzept, automatisches Öffnen nach Beendigung Produktionszyklus (Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Das Integrieren des Werkzeuges in die Presse erfolgt mittels Verschraubung mit dem Pressentisch. Die Werkzeuginformationen bzgl. der ermittelten Werte, welche immer beim Einfahren des Serienprozesses final bestimmt werden sind in der Pressensteuerung hinterlegt. Die Information welches Werkzeug gerüstet wird kann über einen Codierstecker der Presse übermittelt werden. Die Presse zieht dann aus dem Datenspeicher das zugehörige Programm. In diesem Programm sind die Fertigungsparameter, wie Pressendruck, Schließzeit, Mikrowellenleistung etc. hinterlegt. Das Werkzeug befindet sich nach dem Einbau in der Presse im Sicherheitsbereich der Anlage und ist somit durch die Anlage abgesichert. Für das Einbinden in der Presse ist der Pressenanlagenhersteller verantwortlich. Das Eingreifen in die Maschinensteuerung darf aus Haftungs- und Gewährleistungsgründen nur durch den Pressenhersteller erfolgen. Es wurden bereits im Vorfeld auf der JEC 2023 in Paris Pressenhersteller angesprochen, leider hat sich jedoch niemand dem Projekt angeschlossen.

D4: Validierung und Benchmarking Prozess- Bauteil (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

In Abstimmung mit den Projektpartnern und dem Projektträger (u.a. vor Ort in Peine) wurde es als zielführend erachtet, die Einkopplung und Verteilung der Energiedichte vor einer abschließenden Validierung an Bauteilen tiefergehend zu untersuchen, um eine möglichst hohe Trocknungsrate zu erzielen. Unter Einsatz des neu entwickelten Werkzeugs wurden daher weiterführende Versuche durchgeführt, um die Wirkmechanismen und Zusammenhänge der Technologie tiefergehender zu ergründen. Diese Versuche sind dem Arbeitspaket C2 zuzuordnen. Die ursprünglich für das Arbeitspaket D4 vorgesehenen Ressourcen der Projektpartner wurden daher in das Arbeitspaket C2 verlagert. Das Ziel der zusätzlichen Untersuchungen war die Umsetzung einer möglichst homogenen Verteilung der Mikrowellenstrahlung im Werkzeug. Diese Untersuchungen haben sich als deutlich umfangreicher als ursprünglich angenommen herausgestellt. Die angestrebte nahezu vollständige Trocknung konnte bis Projektende nicht umgesetzt werden. Die abschließende

FuE-Projekt: „Entwicklung eines halbleiterbasierten und geregelten Mikrowellenheizwerkzeugs mit automatischem BauteilAuswurf für die Herstellung von Glasfaserdämmmaterial – ISOWAVE“

Validierung der Bauteile in diesem AP konnte daher nicht wie ursprünglich geplant erfolgen. Die abschließende Validierung der Technologie in Produktionsversuchen an Bauteilen ist durch das ITA und Isolite als treibenden Industriepartner weiterhin vorgesehen und erfolgt als Transfermaßnahme nach Projektende. Diese Untersuchungen sind zudem Teil eines laufenden Promotionsvorhabens am ITA, im Rahmen dessen die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Projekt weiter vertieft und praxisnah validiert werden. Dabei soll unter anderem die Mikrowellentechnologie mit der ursprünglichen Heizmethode kombiniert werden, um die Praxisrelevanz zu erhöhen. Die Publikation der Dissertation ist für Q2/2025 vorgesehen. Die Reichweite des Projektes wird hierdurch deutlich erhöht. Darüber hinaus soll ein Nachfolgeprojekt zu diesem Thema initiiert werden, im Rahmen dessen die ausstehende Übertragung in den Serienprozess erfolgen soll.

D5: Dokumentation, Veröffentlichungen (Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Bauhaus-Universität Weimar, Grunewald GmbH & Co. KG und Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH)

Es wurden Maßnahmen zum Technologietransfer und Veröffentlichungen getätigt, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

Technologietransfer:

- 11/2022 Vorstellung der Projektergebnisse bei der SAMPE Europe 2022 in Hamburg

Veröffentlichungen:

- 02/2022 AZL Newsletter 2022, “Microwave drying technology during the shaping process for insulating elements”
- 04/2023 Industrieanzeiger Themenheft Mobility „Energieeffiziente Herstellung von Glasfaserdämmkörpern - Nicht so leicht wie gedacht“
- 04/2023 AVK Composites Report 07: MIKROWELLENTROCKNUNG IN DER FASERVERBUNDHERSTELLUNG
- 09/2023 Energy-efficient heating and drying with microwave radiation; Proceedings SAMPE Europe Conference & Exhibition 2023: El Escorial Madrid, Spain, 3 – 5 October 2023. - Oranjewoud, Netherlands: SAMPE Europe Administration, 2023, DOI/ISBN: 978-90-829101-9-3
- 01/2024 Journal Publikation: Aschoff, J.; Partschefeld, St.; Schneider, J.; Osburg, A.: Effect of Microwaves on the Rapid Curing of Metakaolin- and Aluminum Orthophosphate-Based Geopolymers. Materials 2024, 17, 463. <https://doi.org/10.3390/ma17020463>