

# Schlussbericht vom 30.6.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21387 N

## Thema

Millimeterwellen Radarsensor auf Basis von 3D Film-Assisted Transfer Molding Technologie (RAFAM)

## Berichtszeitraum

01.01.2021 – 31.12.2023

## Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard für angewandte Forschung e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Hahn-Schickard, Allmandring 9b, 70569 Stuttgart

Universität Ulm, Institut für Mikrowellentechnik, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung des Berichts .....	1
2. Einleitung und Zielsetzung .....	2
3. Lastenhefterstellung und Entwicklung von Systemkonzepten.....	5
4. Charakterisierung von Substraten und Metallisierungen.....	9
5. Entwicklung von HF-Strukturen.....	17
5.1 Untersuchung von Antennentypen auf EMC .....	17
5.2 Entwurf der Ankontaktierungen von Chip auf EMC.....	19
5.3 Entwicklung der Antenne auf Chip und EMC .....	21
6. Charakterisierung und Bewertung von HF-Strukturen.....	25
6.1 Layoutentwurf, Charakterisierung und Bewertung der Ankontaktierungen .....	25
6.2 Layoutentwurf, Charakterisierung und Bewertung der Antennenstruktur .....	26
7. Erarbeitung und Optimierung des FAM-Werkzeug .....	28
8. Erarbeitung des Packagingprozesses und Aufbau von Funktionsmustern .....	31
8.1 Aufbau von Substraten mit Kalibrationstrukturen .....	31
8.2 Strukturierung von Antennenstrukturen.....	33
8.3 Teststrukturen auf 200 µm Moldplatten.....	35
8.4 Teststrukturen für den Übergang ASIC-Moldmetallisierung .....	37
8.5 Funktionsmuster.....	48
7. Systemintegration und -demonstration.....	49
8. Verwendung der Zuwendung .....	50
9. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse	51
10. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	53
11. Danksagung.....	55

## **1. Kurzfassung des Berichts**

Das Ziel des Forschungsvorhabens RAFAM war, auf Basis 3D-strukturierter und metallisierter Epoxy Molding Compound (EMC) Packages mit einer optimierten Aufbau- und Verbindungstechnik hocheffiziente Antennenstrukturen für den Frequenzbereich über 100 GHz zu integrieren und zu ermöglichen.

Zu Beginn wurden unter Berücksichtigung der technologischen Anforderungen an Materialien, Prozesse und Toleranzen Systemkonzepte und mögliche Prozessketten ausgearbeitet. Für das Packaging der MMIC wurden laserdirektstrukturierbare EMC ausgewählt und umfassend im Hinblick auf die HF-Eigenschaften charakterisiert. Der Prozess zur Realisierung der Leiterbahnstrukturen mit der erforderlichen Performance auf der Packageoberfläche mittels Laserstrukturierung und selektiver Metallisierung wurde optimiert. In Ergänzung zur LDS-Technologie wurden auch Versuche zum Aerosol Jetten von Silbertinten durchgeführt, wobei diese Variante nicht weiterverfolgt wurde.

Verschiedene Antennentypen auf dem Package sowie die Ankontaktierung von MMIC auf EMC wurden konzipiert und simuliert. Auf Basis der Simulation wurde ein breitbandiges MMIC Fan-Out und zwei unabhängige integrierte 3D-Breitbandantennen für Radaranwendungen entwickelt sowie die Fusion des Fan-Outs und der Antennen zu je einem neuartigen Millimeterwellensystem.

Zur experimentellen Verifikation wurden Testsubstrate mit Kalibrations- und Antennenstrukturen konzipiert, hergestellt und charakterisiert. Dabei wurde der Film Assisted Molding (FAM)- sowie Laserstrukturierungs- und Metallisierungsprozess optimiert. Für den FAM-Prozess wurde ein Werkzeugkonzept mit minimierten Toleranzketten basierend auf einem Stammwerkzeug und verschiedenen Einsätzen entworfen. Das Werkzeug wurde aufgebaut und mit den ausgewählten EMC abgemustert. Um den HF-Übergang zwischen den chipseitigen Pads und der CPW-Leitungsstruktur auf der Moldoberfläche zu charakterisieren, wurden zuerst passive Chips mit Kalibrationsstrukturen, welche vor dem Moldingprozess auf PCB bestückt wurden, eingesetzt. Damit konnte die Prozesskette zum Aufbau von kompletten Systemen mit Chips und passiven Strukturen auf dem ummoldeten Package untersucht und optimiert werden.

Mit diesen Erkenntnissen sollte final ein Demonstrator aufgebaut werden. Aufgrund von technologischen Schwierigkeiten beim Packaging und den damit verbundenen Mehraufwänden war dies zum Zeitpunkt der Berichtlegung noch nicht abgeschlossen.

Die Projektziele wurden größtenteils erreicht.

## 2. Einleitung und Zielsetzung

Durch den enormen Fortschritt in der Entwicklung der Silizium-basierten Halbleitertechnologien ist es heute möglich Schaltungen mit hochintegrierten Radarsensoren bis in den oberen Millimeterwellenbereich (größer 100 GHz) auf einen einzelnen Chip zu integrieren. Hierdurch entsteht ein enormes Kostensenkungspotential gegenüber dem Einsatz diskreter Schaltungskomponenten. Herausfordernd ist dabei allerdings, dass auch die Antenne und die Aufbau- und Verbindungstechnik für diesen hohen Frequenzbereich angepasst sein müssen. Standard-Technologien auf der Basis von Printed Circuit Boards (PCB) können aufgrund der großen Toleranzen bei Frequenzen über 100 GHz nicht mehr eingesetzt werden. Darüber hinaus scheiden viele für diesen Frequenzbereich geeignete Leitungssysteme wie z.B. Hohlleiter aus Kostengründen für industrielle Sensoren aus. An dieser Stelle setzt dieses Forschungsvorhaben an. Basierend auf HF-Radar-ASICs mit einer Arbeitsfrequenz über 100 GHz soll eine kostengünstige Aufbau- und Verbindungstechnik zur Realisierung von Millimeterwellen-Radarsensoren mit besonders effizienter und gerichteter Abstrahlung entwickelt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wird die Arbeitshypothese verfolgt, dass mit dem angestrebten Ansatz auf Basis 3D-strukturierter und metallisierter EMC Packages mit einer optimierten Aufbau- und Verbindungstechnik völlig neue und hocheffiziente Antennenstrukturen für den Frequenzbereich über 100 GHz ermöglicht werden. Der Vorteil gegenüber dem Stand der Technik ist eine deutlich bessere Abstrahlcharakteristik und -effizienz bei gleichzeitig vereinfachtem Aufbau (Abbildung 1).

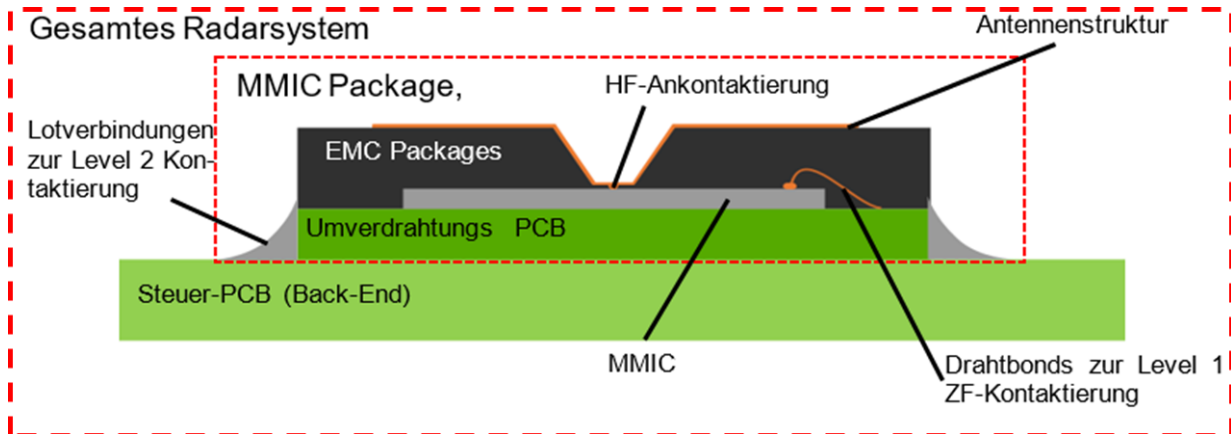
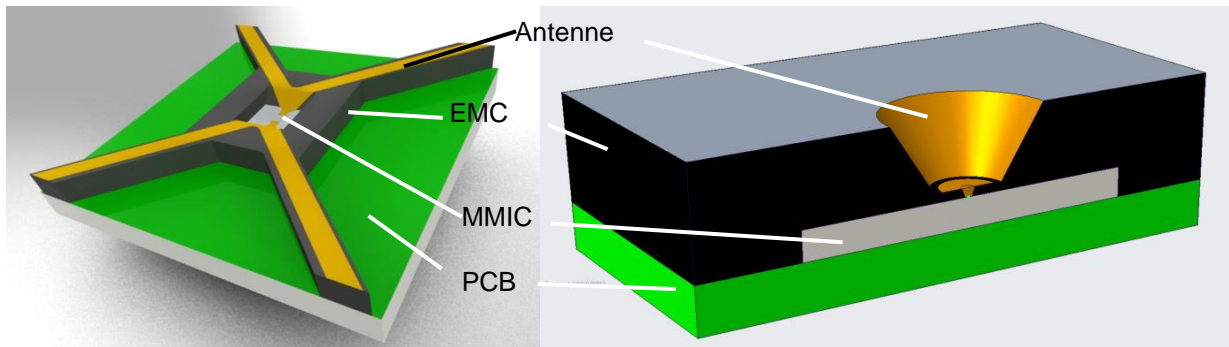


Abbildung 1: Konzeptvisualisierungen: oben links: Bow-Tie Antenne, oben rechts: Hornantenne, unten Querschnitt.

Um dieses Potential zu heben, müssen zum einen die zentralen und peripheren Prozessschritte der AVT- und Packaging-Technologie betrachtet werden. Die zentralen Prozessschritte umfassen die Auslegung von Antennenstrukturen, den Molding-Prozess, den LDS-Prozess mit Laserstrukturierung und selektiver Metallisierung sowie Montage von elektronischen Komponenten. Als periphere Prozessschritte kann man Temperprozesse, Reinigungsprozesse und Prozesse zum Aufbringen von Schutzlacken nennen. Um zum anderen diese Optimierungspotentiale dann auch umsetzen zu können ist vertieftes Wissen in den Materialeigenschaften, insbesondere der dielektrischen Eigenschaften, und auch in designtechnischen Möglichkeiten notwendig, um diese dann bei der Umsetzung von technologiespezifischen Leiterstrukturen und Antennen nutzen zu können.

Im Vorhaben bündeln die Forschungseinrichtungen Hahn-Schickard und das Institut für Mikrowellentechnik (MWT) der Universität Ulm ihre Kompetenzen und nutzen die in Abbildung 2 dargestellten Synergien.

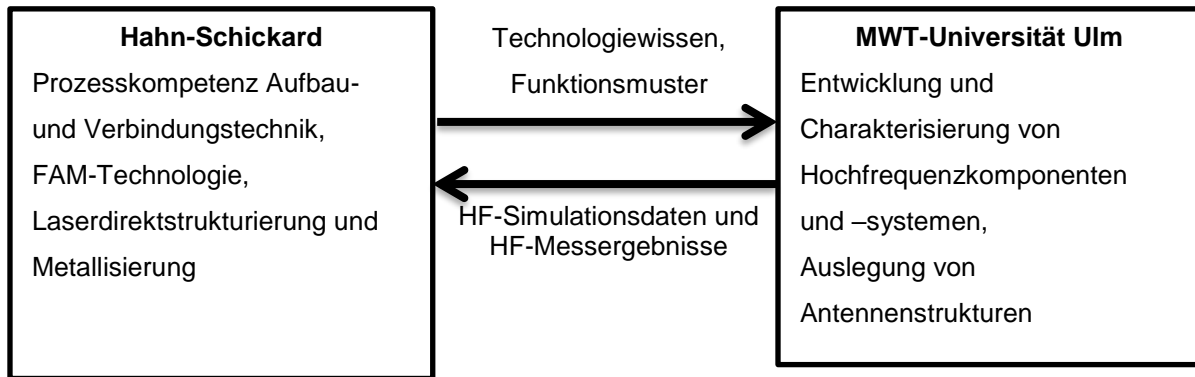


Abbildung 2: Interaktion der Forschungseinrichtungen Hahn-Schickard und MWT-Universität Ulm.

### **3. Lastenhefterstellung und Entwicklung von Systemkonzepten**

Die Universität Ulm erarbeitete ein Grundlegendokument, um die Anforderungen der Hochfrequenztechnik mit den technologischen Möglichkeiten durch Hahn-Schickard zu verbinden. Hierbei hat die Universität Ulm einen Entwicklungsleitfaden entworfen, der als fortlaufendes Dokument um die technologischen neuen Erkenntnisse erweitert wird. In diesem Rahmen wurde ein Lastenheft sowie Pflichtenheft durch die Universität Ulm erstellt und gemeinsam mit Hahn-Schickard verabschiedet. Darüber hinaus erarbeitete die Universität Ulm Systemkonzepte zur weiteren Bewertung und Entwicklung der erwünschten Aufbauten.

Mithilfe der Technologieerfahrung aus Projekten mit ähnlichen Vergussmassen konnten erste Systemkonzepte erarbeitet werden. Dazu zählt der hochfrequente Übergang zwischen Chip und der metallisierten Vergussmasse und die daran angebundene Antenne. Um die breitgefächerten Möglichkeiten der Technologie aufzuzeigen, wurde entschieden, dass bestehende Siliciumgermanium (SG13) Radar-Chips mit 160 und 180 GHz verwendet werden. Dabei soll der breitbandige HF-Übergang zwischen Chip und der Oberfläche des Packages an den Probing-Pads des Chips erfolgen. Das hat den Vorteil, dass in Zukunft keine zwei verschiedenen Chip-Varianten realisiert werden müssen, da die Pads sowohl für den Übergang als auch für die Charakterisierung verwendet werden können. Zudem wird ein schmalbandiger Bonddraht am HF-Tor des Chips vermieden und so die Bandbreite des Systems verbessert. An den Übergang wird mittels einer Koplanarleitung, welche auf der Oberseite des Packages verläuft, die Antenne angebunden. Interessante und zukunftsweisende Antennenkonzepte bieten die Helixantenne und der Magneto-Elektrische Dipol. Die Helixantenne stellt eine dreidimensionale zirkular polarisierte Antenne dar, welche vergleichsweise einfach gespeist werden kann. Der Magneto-Elektrische Dipol ist eine Antenne, welche durch die Kombination aus einem elektrischen und einem magnetischen Dipol ein in E- und H-Ebene gleichförmiges und gleichzeitig breitbandiges Verhalten aufweist.

Zu Beginn des Projektes wurden die Anforderungen an den Radar-Demonstrator in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) definiert. Die Anforderungen dieses Chips wurden bei der Entwicklung der Packages beachtet. Dabei wurden folgende Parameter (Tabelle 1) definiert und gewichtet: Arbeitsfrequenz, Bandbreite, Antennengewinn und Abstrahleffizienz.

Tabelle 1: Parameter und deren Gewichtung.

Parameter	Wert	Gewichtung
Arbeitsfrequenz	180 GHz	Wichtig
Bandbreite	40 GHz	Wichtig
Antennengewinn	5 dBi	Mittelwichtig
Abstrahleffizienz	Nicht definiert	Stark beeinflusst durch Fertigungsverfahren

Die Mittenfrequenz liegt in der Mitte des G-Bands (140 GHz – 220 GHz), so dass sowohl unter als auch über dem Radar-Arbeitsbereich Antennenmessungen im selben Band stattfinden können. Die Abstrahleffizienz wird durch die Fertigungsverfahren maßgeblich beeinflusst, weshalb zu diesem Zeitpunkt kein konkreter Wert festgelegt wird. Die geometrischen Dimensionen der Antenne sollen im Bereich der halben Wellenlänge liegen, dürfen diesen, um den Antennengewinn zu erhöhen, auch überschreiten. Dies ist möglich, da als Projektziel kein Antennenarray geplant ist.

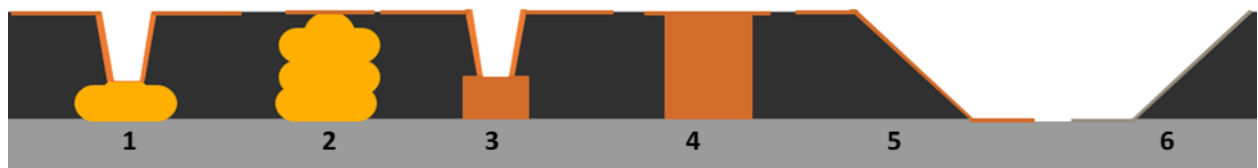
Bei Hahn-Schickard wurden zunächst die technologischen Anforderungen an Materialien, Prozesse und Toleranzen erarbeitet. Darauf aufbauend wurden dann erste Kontaktierungskonzepte und mögliche Prozessketten ausgearbeitet.

Insgesamt wurden sechs verschiedene Ankontaktierungsmethoden konzipiert. Die erste basiert auf einem Blindvia, welches auf einem Gold-Stud Bump landet. Das zweite Konzept basiert auf einem Stapel aus Gold-Stud Bumps, welcher ungefähr 50µm bis 60µm hoch sein soll und sich während des Moldingprozesses in der PTFE Folie des FAM-Werkzeuges abdrückt. Dadurch lässt sich die Ankontaktierung des Chips ohne Via realisieren und auch die Positionierung des Lasers würde kein Problem darstellen. Konzept drei basiert auf einem galvanisch abgeschiedenen Copper Pillar und einem Laservia. Dieses Konzept hat gegenüber dem Stud-Bumping den Vorteil, dass die Strukturen im Vergleich kleiner und reproduzierbarer herstellbar sind. Nachteilig an diesem Konzept ist allerdings, dass sich dieser Prozess primär für komplette Wafer eignet und bei Einzel-Chips extrem kostspielig ist. Dieses Konzept lässt sich durch höhere Copper Pillars modifizieren (Konzept vier), wodurch es Konzept zwei ähnelt. Die Konzepte fünf und sechs basieren auf der Erzeugung einer Freistellung auf dem Mikro-Chip und im Konzept fünf auf der direkten Ankontaktierung mittels Laser und außenstromloser Metallisierung. Jedoch stellt dieses Konzept



hinsichtlich dem Schutz des Chips während der Laserstrukturierungs- und Metallisierungsprozesse ein Problem dar. Der Laser kann, genau wie die aggressiven Chemikalien in den Metallisierungsbädern, den Chip beschädigen. Im Konzept sechs wird die Kontaktierung mittels Aerosol Jet hergestellt. Im Vergleich zum LDS-Prozess resultiert beim Aerosol Jet aber eine deutlich dünnere Metallisierung und benötigt daher einen weiteren Prozessschritt. Für die weitere Entwicklung wurde entschieden die Kontaktierungsvarianten 1-3 zu untersuchen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gegenüberstellung möglicher Ankontaktierungsmethoden.



	Au-Stud Bump+Laservia	Au-Stud-Bump Stapel	Copper Pillar+ Laservia	Hohes Copper Pillar	Cu-Leiterbahn + direktes Anfahren von freigestelltem Pad	Aerosoljet + direktes Anfahren von freigestelltem Pad
+	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kleiner Pitch möglich</li> <li>Unabhängig von Stückzahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kleiner Pitch möglich</li> <li>Toleranzkette unkritischer</li> <li>Unabhängig von Stückzahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr kleine Strukturen möglich (30µm)</li> <li>Sehr genaue Geometrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sehr kleine Strukturen möglich (30µm)</li> <li>Sehr genaue Geometrie</li> <li>Toleranzkette unkritischer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coplanare Leitungsführung direct vom Pad möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coplanare Leitungsführung direct vom Pad möglich</li> </ul>
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tolerierung von Laser zu Stud-Bump</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessführung Bumping+FAM-Molding</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tolerierung von Laser zu Pillar</li> <li>Extrem aufwändig bei Einzelchips</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extrem aufwändig bei Einzelchips</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baut sehr groß</li> <li>MMIC in diesem Bereich ungeschützt</li> <li>Bisher nie getestet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baut sehr groß</li> <li>MMIC in diesem Bereich ungeschützt</li> </ul>

Die angestrebte Prozesskette umfasst lediglich fünf Prozessschritte (Abbildung 3). Zunächst wird der MMIC auf dem Substrat aufgebracht. Dies kann ein PCB oder eventuell auch ein Leadframe sein. Dann werden alle DC Kontakte mittels Drahtbonden kontaktiert und auch evtl. die Studs für die HF-Kontaktierung gesetzt. Nach dem Übermolden der Baugruppe erfolgt die Laserstrukturierung, Metallisierung und dann das Sägen des Nutzens.

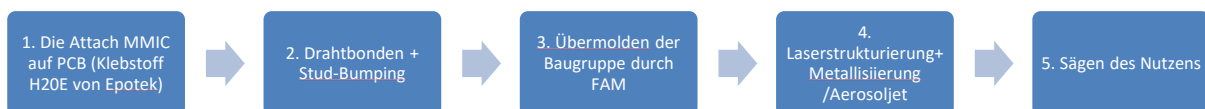


Abbildung 3: Angestrebte Prozesskette.

In enger Zusammenarbeit beider Forschungseinrichtungen wurden die Fertigungsverfahren, deren Eigenschaften, die erreichbaren Strukturgrößen und Strukturierungsgenauigkeiten in einer Technologiematrix zusammengestellt.

Durch stark vereinfachte Vollwellensimulationen wurden unter Annahme von Material- und Metallisierungsparametern einfache Modelle eines Chip-zu-Package-Übergangs erstellt und erste Antennenanalysen durchgeführt. Dabei wurden die exakten Dimensionen des Packages und des Radarchips vernachlässigt.

#### 4. Charakterisierung von Substraten und Metallisierungen

Nach Rücksprache mit den Materialherstellern und den dielektrischen Messungen der Universität Ulm wurden die EMC (Epoxy Molding Compound) Materialien KMC 9220 von Shin-Etsu und XMS444 von Sumitomo Bakelite für die Evaluierung der Metallisierungen ausgewählt. Diese Materialien sind mit Additiven für die Laserdirektstrukturierung (LDS) modifiziert und erlauben die selektive Metallisierung mittels LDS-Technologie. Bedingt durch Lieferkettenschwierigkeiten konnten in der Projektstartphase keine EMC für eigene Moldingversuche bezogen werden. Die Metallisierungsversuche fanden deshalb auf von den Herstellern gestellten Proben statt.

Zur Evaluierung der LDS-Prozessfähigkeit der Substratmaterialien wurden auf zwei unterschiedlichen Lasersystemen Screeningversuche durchgeführt, zum einen auf einem beschränkt 2,5D fähigen UV Laser und zum anderen auf einem 3D fähigen IR Laser (Abbildung 4).

	IR Laser	UV Laser
Hersteller	LPKF	LPKF
Spotsize	60µm	20µm
	3D fähig	Beschränkt 2,5D fähig
Positioniergenauigkeit	+/-25µm	+/-25µm
Wiederholgenauigkeit		+/-2µm

Abbildung 4: Verwendete Laser zur Laserstrukturierung von EMC im Vergleich.

Im Rahmen der weiteren Arbeiten wurde entschieden, die Laserstrukturierung mit dem UV-Laser durchzuführen. Hintergrund für diese Entscheidung ist der deutlich kleinere Fokusbereich des UV Lasers von ca. 20µm. Im Vergleich dazu weist der IR Laser einen Fokusbereich von 60µm auf. Nach der Strukturierung und Kupferabscheidung werden die Proben mit einem konfokalen Laserscanning-Mikroskop optisch charakterisiert und die Rauheit und Leiterbahnbreite idealer Strukturierungsparameter untersucht. Bei den ersten Vorversuchen zeigte sich, dass beide Materialien ein sehr breites Prozessfenster haben. Allerdings führt der

Laserdebris zu Fremd- und Übermetallisierung. Diese Fremdmetallisierung wird bei höherer Leistung und bei Vias verstärkt (Abbildung 5). Erwähnenswert an dieser Stelle ist, dass die Rauheiten und Leiterbahngeometrien gut sind. Da Fremdmetallisierungen auf den Substraten zu sehen sind, wurde nach einer Recherche entschieden, den Versuch unter Nutzung eines Laserschutzlackes zu wiederholen.

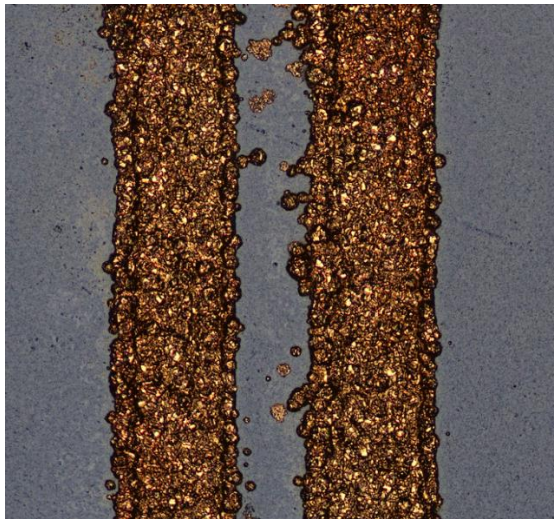


Abbildung 5: Fremdmetallisierung auf EMC.

Beide untersuchte Materialien KMC 9220 und XMS 444 weisen ein sehr breites Prozessfenster im Hinblick auf die Laserstrukturierung und Metallisierung auf. Der IR Laser erzeugt insgesamt besser definierte Leiterbahnen (Abbildung 6). Beim UV-Laser wird eine erhöhte Bildung von Laserdebris beobachtet. Diese Debris schlägt sich um die strukturierten Bereiche nieder, verschmilzt teilweise wieder mit der Oberfläche der Substrate und führt zu Fremdmetallisierungen. Neben der Wahl der Laserquelle führt erhöhte Laserleistung zu deutlich gesteigerter Laserdebris. Einzelne Laserparameter erzeugen jedoch trotzdem Strukturen, deren optische Analyse gute Ergebnisse zeigt. Der IR Laser erzeugt auf KMC 9220 eine minimale Rauheit des abgeschiedenen Kupfers von  $R_q = 1,1\mu\text{m}$  und eine Leiterbahnbreite von  $157,6\mu\text{m}$ , bei einer 3Sigma-Abweichung von  $10,6\mu\text{m}$ . Auf XMS 444 erzeugt derselbe Laser eine Rauheit der Kupferschicht von  $R_q = 0,8\mu\text{m}$  und eine Leiterbahnbreite von  $154,6\mu\text{m}$ , bei einer 3Sigma-Abweichung von  $16\mu\text{m}$ , welche primär auf erhöhte Fremdmetallisierung zurückzuführen ist.

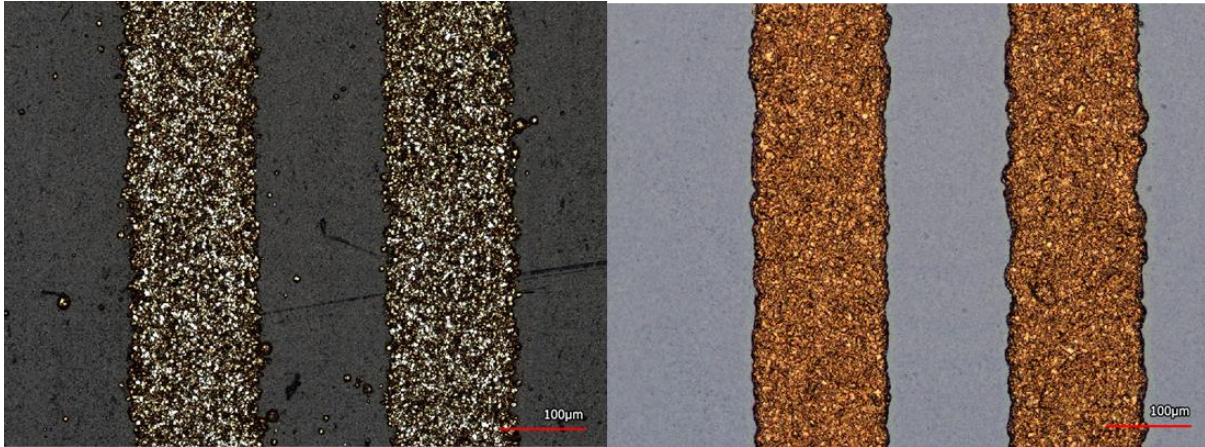


Abbildung 6: Metallisierung auf XMS 444 (links) und Metallisierung auf KMC 9220 (rechts) (Strukturierung jeweils mit IR-Laser).

Die Strukturierung mittels UV Laser erzeugte auf KMC 9220 bei fast allen Laserparametern starke Fremd- und Übermetallisierungen (Abbildung 7). Die besten Parameter erzeugten eine Leiterbahnbreite von  $131,62\mu\text{m}$ , bei einer 3Sigma-Abweichung von  $15,38\mu\text{m}$  und einer Rauheit von  $R_q = 1,245\mu\text{m}$ . Der selbe Laser erzeugte bei XMS444 eine minimale Rauheit von  $R_q = 1,285\mu\text{m}$  und eine Leiterbahnbreite von  $122,9\mu\text{m}$  bei einer 3Sigma-Abweichung von  $5,3\mu\text{m}$ .

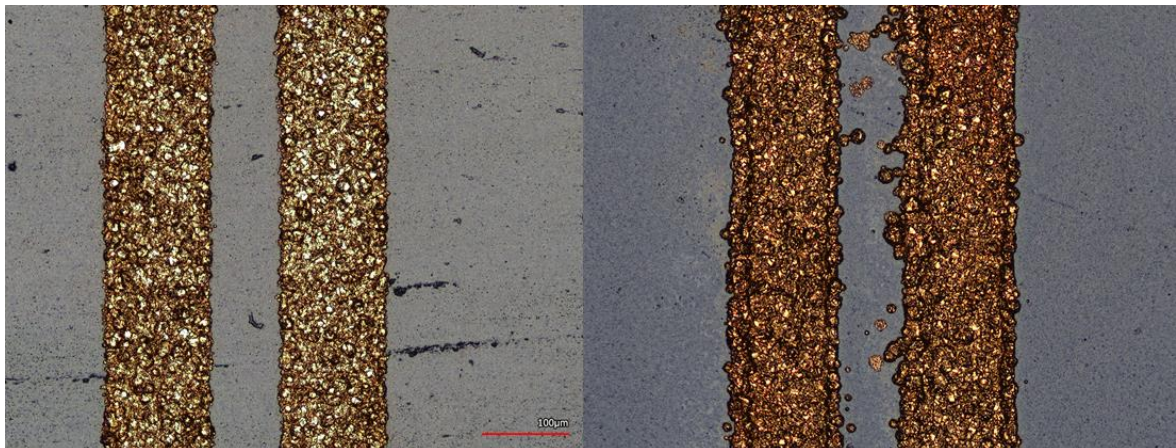


Abbildung 7: Metallisierung auf XMS 444 (links) und Metallisierung auf KMC 9220 mit starker Fremdmetallisierung (rechts) (Strukturierung jeweils mit UV-Laser).

Um die Fremdmetallisierung zu verhindern, wurde ein Laserschutzlack eingesetzt. Dieser wird vor der Laserstrukturierung aufgebracht und danach wieder entfernt und soll die Laserdebris davon abhalten, auf der Substratoberfläche während der Laserstrukturierung zu haften (Abbildung 8).

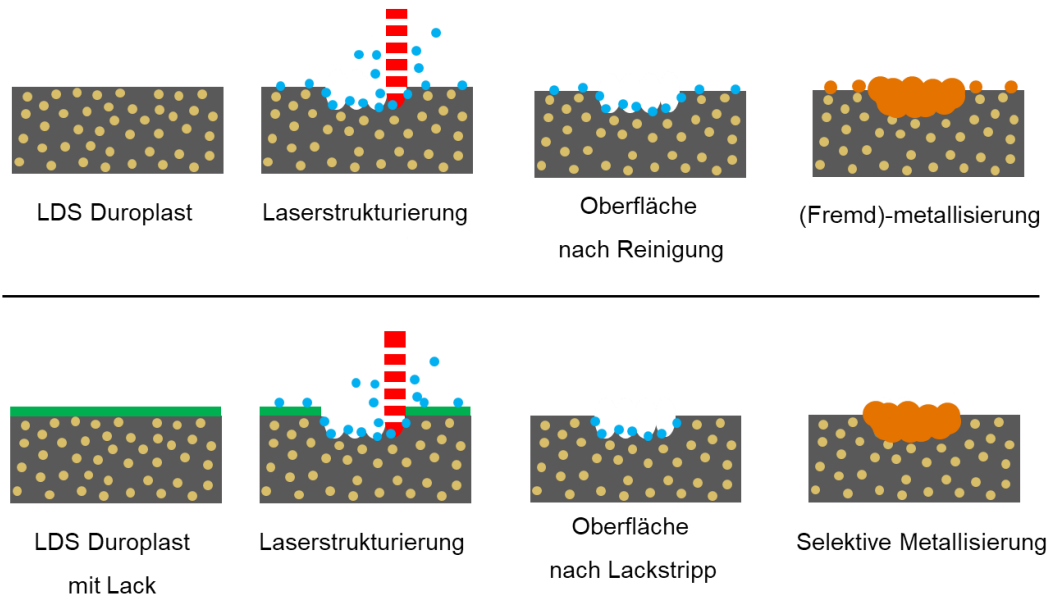


Abbildung 8: Prozessablauf mit (unten) und ohne (oben) Laserschutzlack.

Der Prozess zum Auftrag von Laserschutzlack wurde optimiert. Es wurden weitere Parameterscreenings mit UV- und IR-Lasern durchgeführt und die Ergebnisse evaluiert. Da die ersten Versuche mit dem unverdünnten Lack keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten, wurde der Lack in einem 50/50 Verhältnis mit Wasser verdünnt und per Tauchverfahren aufgetragen. Weitere Untersuchungen wurden mit einem dünnflüssigeren Lack durchgeführt. Mit diesem Lack wurden Substrate aus KMC 9220 und XMS 444 beschichtet, einem Parameterscreening mit einem IR- und UV-Laser unterzogen und anschließend außenstromlos mit Kupfer metallisiert. Für beide Materialien lassen sich mit dem UV-Laser Isolationsbreiten von unter 20 µm erreichen. Auffällig ist allerdings, dass jeweils eine Kante einer Übertragungsleitung deutlich schärfer definiert ist als die andere. Dies kann mit einem Wärmeeintrag während der Strukturierung erklärt werden. Somit lässt sich die Empfehlung treffen, bei feinen CPW Leitungen immer von den Isolationsgräben zwischen Signal- und Groundfläche weg zu strukturieren (Abbildung 9).

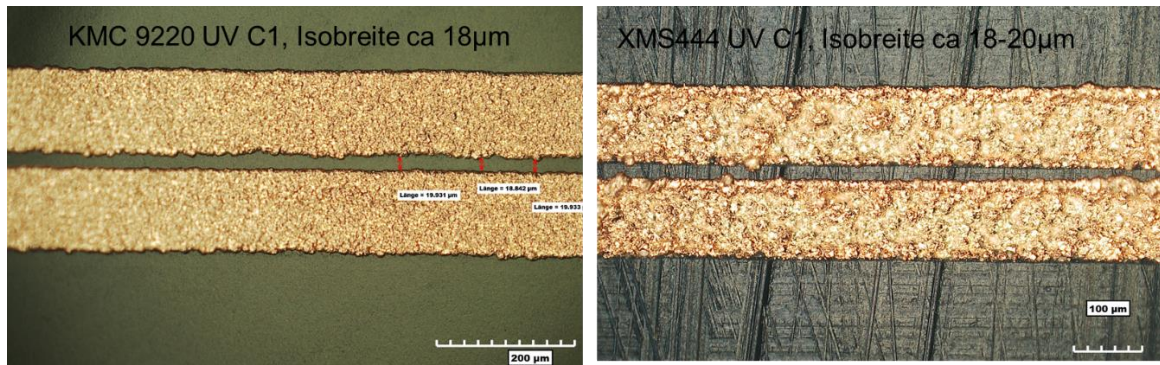


Abbildung 9: Metallisierte Leitungen mit minimalen Isolationsabständen auf unterschiedlichen Substratmaterialien.

Der Einfluss einer Ultraschallreinigung von Substraten aus KMC9220, welche nach einer O<sub>2</sub>-Plasmavorbehandlung mit verdünntem Lack beschichtet und anschließend laserstrukturiert wurden, ist in Abbildung 10 dargestellt.

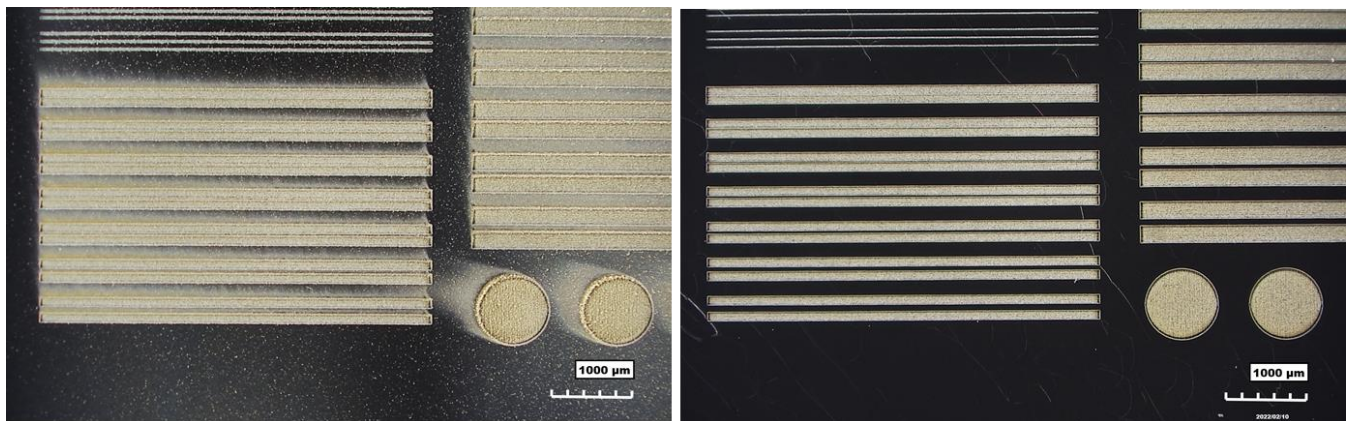


Abbildung 10: Laserstrukturierung auf KMC9220 mit optimierter Belackung, links vor und rechts nach Ultraschallreinigung.

In Ergänzung zur LDS-Technologie wurden Versuche zum Drucken von Silbertinten auf beiden Materialien mittels Aerosol Jet durchgeführt. Auf beiden Materialien wurde der Aerosol Jet Prozess hinsichtlich idealer Druckparameter eingerichtet. Die wichtigsten Parameter für den Druckerfolg sind hierbei das Hüllgas/Atomizer-Verhältnis sowie die Aerosol-Temperatur. Der Vorschub sowie die Sinterbedingungen wurden konstant gehalten. Die Haftfestigkeit wurde mittels Tape-Test geprüft. Diese Versuche lieferten für beide Materialien gute Ergebnisse. Das Material XMS 444 wies mit einer Strukturbreite von 20µm im Gegensatz zu KMC 9220 mit 17µm geringfügig breitere Metallisierungsbahnen auf. Die Schichtdicke beider Leiterbahnen liegt mit ~2,5-3µm für XMS 444 und ~3µm für KMC 9220 in einem ähnlichen Bereich. Die

Rauheit der Schichten liegt in beiden Fällen bei deutlich unter  $R_q = 1\mu\text{m}$  und rührt primär von der Oberflächenstruktur der Substrate her. In WLI Aufnahmen (Abbildung 11) ist jedoch zu sehen, dass XMS 444 einen deutlich kleineren Overspray aufweist und die Struktur insgesamt deutlich homogener ist.

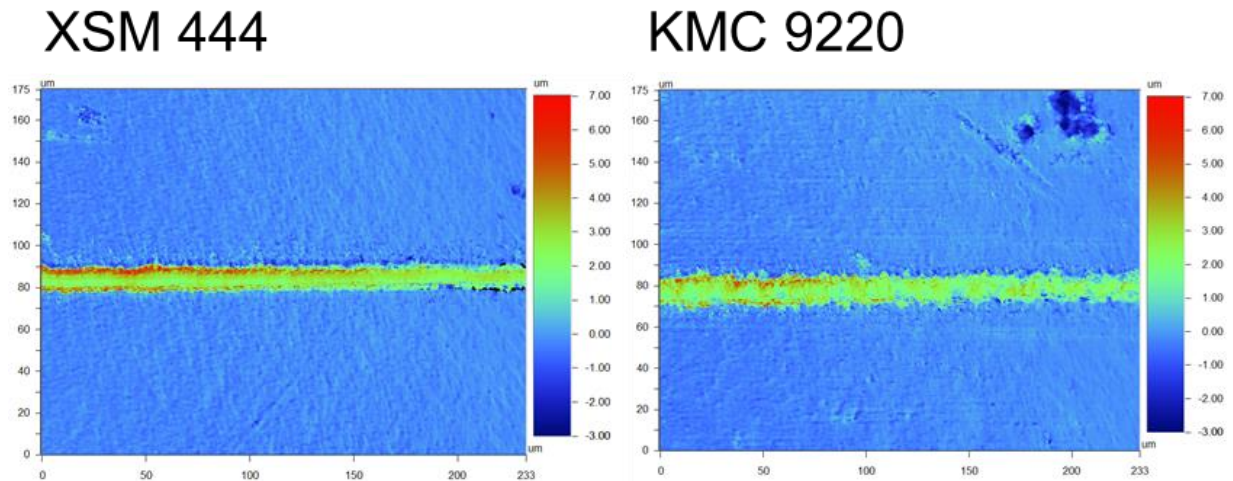


Abbildung 11: WLI Aufnahmen von gedruckten Leiterbahnen.

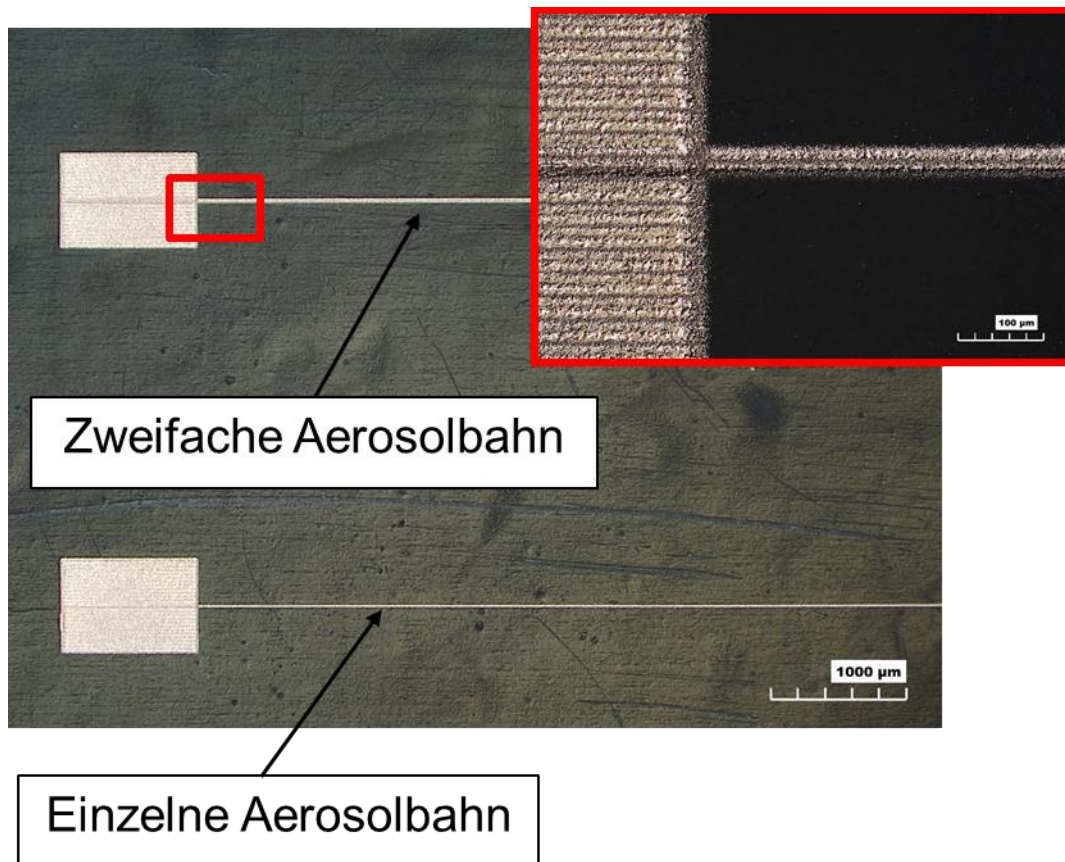


Abbildung 12: Gedruckte Leiterbahnen auf EMC.



Die für das Projekt ausgewählten EMC KMC 9220 und XMS 444 wurden an der Universität Ulm in einem Hohlleitersaufbau mit Hilfe eines VNAs charakterisiert. Der Hohlleitersaufbau besteht aus einem vektoriiellen Netzwerkanalysator (VNA), G-Band-Konvertern und den mit dem Substrat gefüllten Hohlleiterproben. Der Messaufbau und die Proben sind in Abbildung 13 dargestellt.

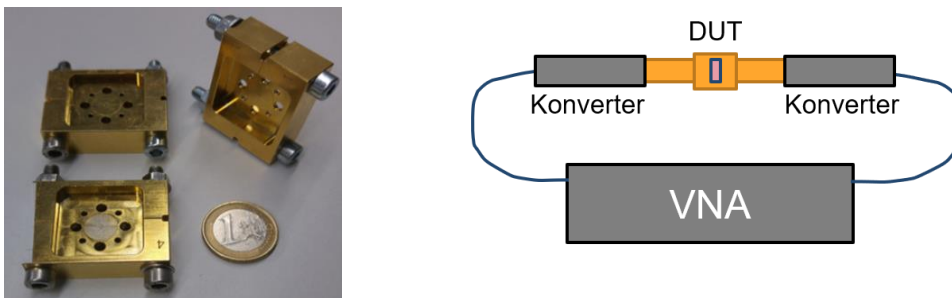


Abbildung 13: Foto der Materialproben in Hohlleiterschalen und Messaufbau zur Charakterisierung der Materialproben (DUT).

Der VNA wird vor der Messung mit einem Hohlleiterkalibrationskit, bestehend aus den Thru, Reflect und Line (TRL) Kalibrationsstandards, kalibriert. In Abbildung 14 und Abbildung 15 sind die gemessenen Materialparameter dargestellt. Die negativen Messwerte und die Schwankungen des Verlustfaktors lassen sich durch Lufteneinschlüsse in der Materialprobe erklären (Lunker).

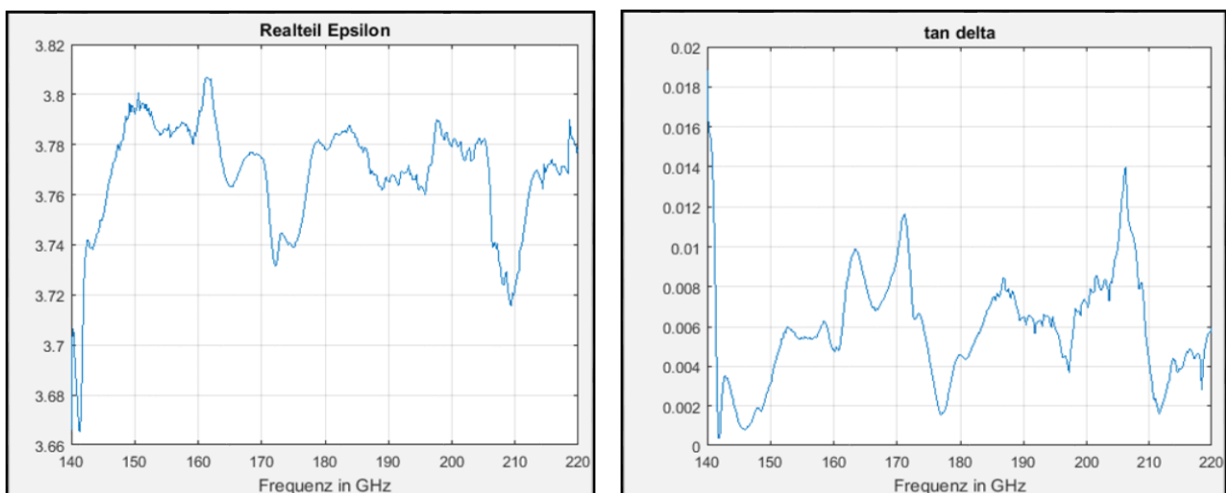


Abbildung 14: Messwerte der Permittivität und des Verlustfaktors von XMS 444.

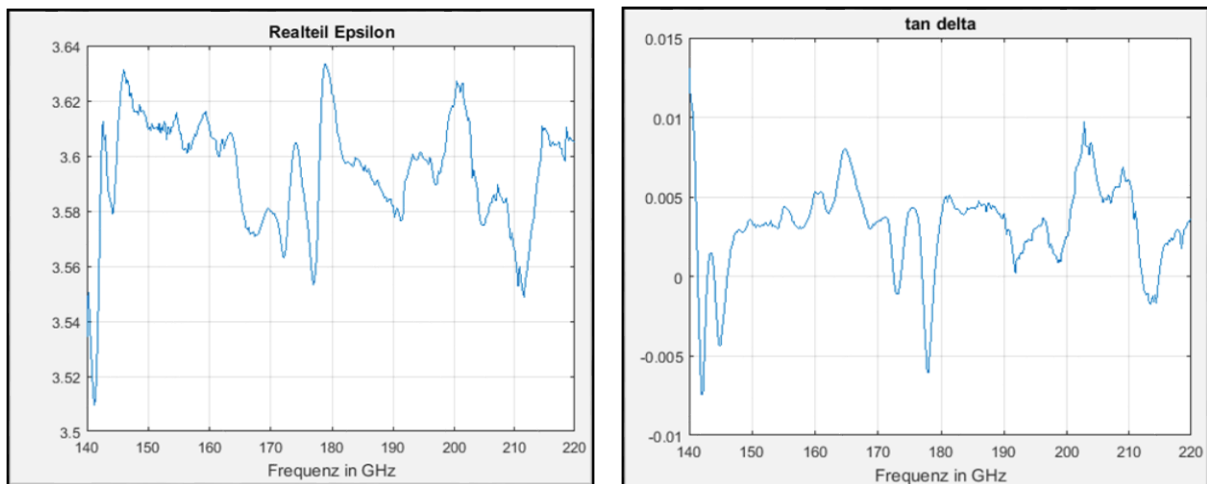


Abbildung 15: Messwerte der Permittivität und des Verlustfaktors von KMC 9220.

Die Leitfähigkeit der mittels LDS-Prozess aufgebauten Metallisierung wird mit einem Erfahrungswert von 60 % gegenüber der Leitfähigkeit von reinem Kupfer angenommen und in den folgenden Vollwellensimulationen genutzt. Da die Permittivität und die zu erwartenden Verluste für beide Materialien sehr ähnlich sind, kann mit beiden Materialien in diesem Projekt gearbeitet werden. Von daher erfolgten die weiteren Arbeiten in diesem Projekt mit dem Material KMC9220.

## 5. Entwicklung von HF-Strukturen

### 5.1 Untersuchung von Antennentypen auf EMC

Der Aufbau des Packages bestimmt die Ausgestaltung der Antenne, deshalb wird der grundlegende Aufbau bereits zu diesem Zeitpunkt definiert. Das Package soll sich an einem QFN-Package orientieren und ist im Querschnitt in Abbildung 16 dargestellt. Für die Anbindung des Radarchips im späteren Package wird anstatt einem Leadframe eine strukturierte Leiterplatte (PCB) verwendet. Diese dient zugleich als Unterseite des Moldwerkzeugs.

Die Signalführung zwischen Chip und Antenne auf dem Package erfolgt auf der Oberseite der Moldmasse. Die Antenne wird ebenfalls auf der Oberseite des Packages platziert. Der Chip wird vergossen und sitzt innerhalb der Moldmasse mit den Pads in Richtung Packageoberseite.

Die Oberseite der PCB kann in diesem Aufbau als Massefläche für eine Antenne verwendet werden. Die PCB kann auf der Unterseite freigestellt werden um die Moldunterseite separat strukturieren zu können. Das ermöglicht die Speisung der Antenne von der Unterseite. Die strukturierte Unterseite ist über lasergebohrte Durchgangsvias mit der metallisierten Oberseite elektrisch verbunden.

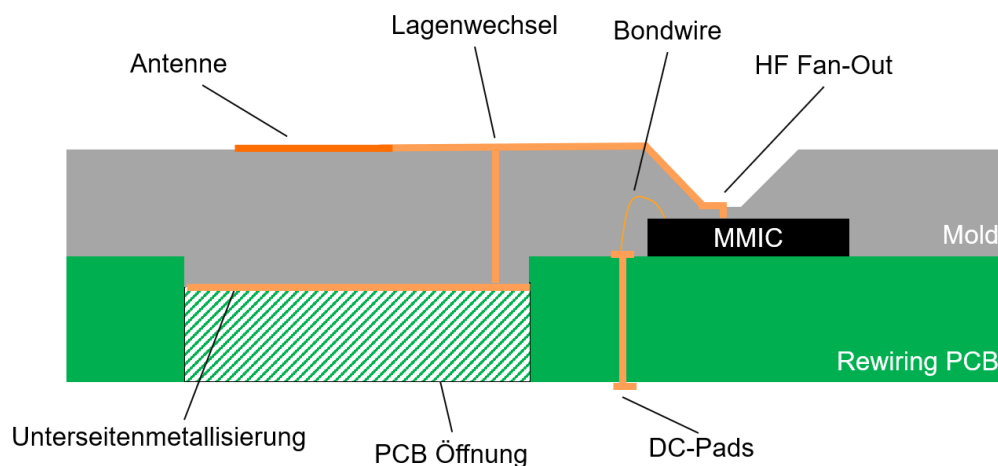


Abbildung 16: Querschnitt des Packageaufbaus.

Die Antenne soll als 3D-Struktur realisiert werden und Signale breitbandig und gerichtet abstrahlen. Durch Literaturrecherche und Analyse durch kleine Vollwellensimulationen mit den Informationen aus der Technologiatrix und den Messwerten aus dem „Arbeitspaket Charakterisierung von Substraten und Metallisierungen“ wurden zwei passende Antennentypen ausgearbeitet:

- a) Die Helixantenne besteht aus einem Leiter, der sich entlang eines Zylinders wendet, welcher über einer durchgängigen Metallfläche platziert ist. Die Abstrahlung erfolgt in Richtung des Zylinders, weg von der Metallfläche. Der moderate Antennengewinn wird über eine große Bandbreite erreicht und die Abstrahlung erfolgt zirkular polarisiert. Mit der eingesetzten Technologie ist es nicht möglich, eine Zylinderwand zu metallisieren, weshalb die Helixantenne auf einen Moldkegel strukturiert wird (Conical Helix Antenna).

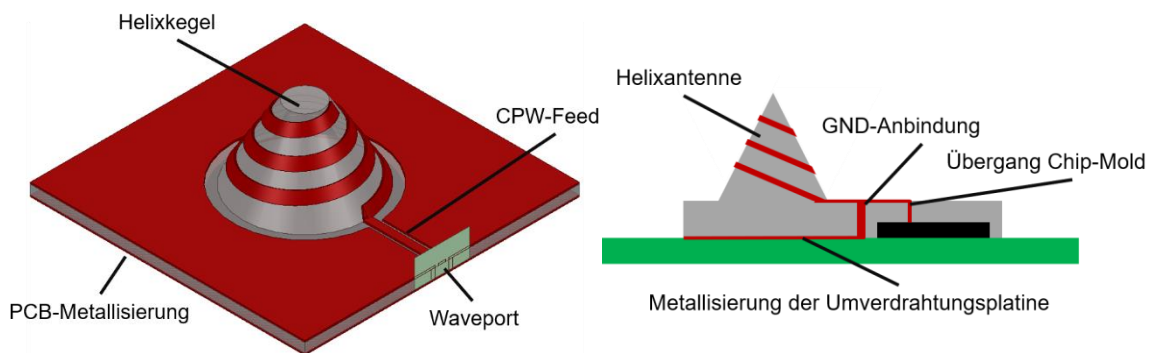


Abbildung 17: Vereinfachtes Simulationsmodell der Helixantenne und Querschnitt des geplanten Packages.

- b) Der Magneto-Elektrische (ME)-Dipol besteht aus einem elektrischen und einem magnetischen Dipol, welche ineinander verschachtelt aufgebaut werden. Durch die Verschachtelung und die zwei daraus resultierenden Resonanzen, wird eine große Bandbreite abgedeckt. Der elektrische Dipol wird durch zwei Flügel auf der Oberseite des Packages realisiert. Der magnetische Dipol bildet sich aus den zwei Via-Reihen. Im Fernfeld stellt sich eine gerichtete, unipolare, linear polarisierte Abstrahlung ein. Für die Antennenspeisung ist es notwendig im Bereich der Antenne die Moldunterseite zu strukturieren.

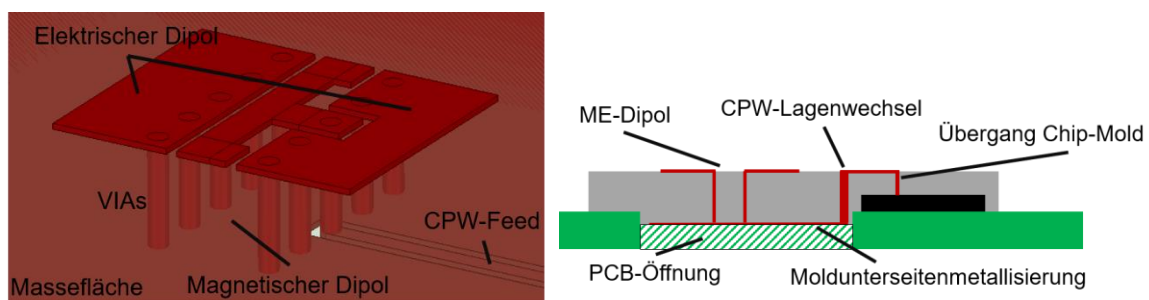


Abbildung 18: Vereinfachtes Simulationsmodell der ME-Dipol-Antenne und Querschnitt des geplanten Packages.

## 5.2 Entwurf der Ankontaktierungen von Chip auf EMC

Da eine HF-Signalverteilung auf der PCB (Flip-Chip) wegen der hohen Substratverluste in diesem Frequenzbereich nicht möglich ist, ist der Chip mit dem Back End of Line (BEOL) in Richtung der Packageoberfläche platziert. Die HF-Signalverteilung erfolgt auf der Packageoberfläche. Der in diesem Projekt genutzte Chip ist mit zwei verschiedenen Fan-Out Lösungen erhältlich. Eine Variante ist die EM-Kopplung der Signale zwischen Chip und Moldoberfläche. Diese Variante kann in diesem Projekt nicht eingesetzt werden, da der Ansatz ein schmalbandiges Kopplungsverhalten zeigt und die Einkopplung auf der Moldoberseite nicht effektiv ist, da hier nur eine Metalllage zur Verfügung steht. Stattdessen wird die Chip-Variante mit GSG-Pads gewählt und die Packageoberseite galvanisch, mittels lasergebohrten Blindvias, ankontaktiert. Die Aluminiumpads auf dem Chip müssen durch eine dünne Metallschicht vor der Laserbohrung geschützt werden. Die meisten Prozesse, die genutzt werden um zusätzliches Metall auf die Chip-Pads aufzutragen, sind Waferprozesse. Diese können bei den bereits vereinzelt aktiven Radarchips nicht mehr durchgeführt werden. In diesem Projekt werden die Pads durch Stud Bumps geschützt. Diese können sowohl auf einem einzelnen Chip als auch auf einem Wafer platziert werden und schützen die Pads des Chips vor der Laserbohrung.

Durch die elektrische Kapazität des Signalpads und der niedrigen Induktivität des Vias stellt sich ein Tiefpassverhalten für den Übergang zwischen Chip und Packageoberseite ein. Das Verhalten wird durch eine geeignete Struktur (radial stub) auf der Packageoberseite kompensiert. Chipseitig kann keine Layoutanpassungen erfolgen, da die aktiven Chips bereits zu Projektbeginn vorliegen und die passiven Chips im Hinblick auf den Radardemonstrator das Verhalten der aktiven Chips widerspiegeln müssen. Die Signalverteilung erfolgt mittels einer Koplanarleitung (CPW) mit der geraden Leitungsmoden auf der Packageoberseite. In Abbildung 19 ist eine 3D-Ansicht des Übergangs und eine Draufsicht der GSG-Pads der Radarchips zu sehen.

Durch die Designvorgaben aus der Technologiematrix werden die üblichen 50 Ohm für die Koplanarleitung nicht erreicht, die entwickelte CPW Leitung besitzt eine Impedanz von 60 Ohm. Der Impedanzsprung zwischen den ca. 50 Ohm der Mikrostreifenleitung auf dem Chip und der Koplanarleitung werden ebenfalls durch den Übergang kompensiert.

Für die Signalverteilung und die Ankontaktierung wird mittels Vollwellensimulationen eine Toleranzanalyse durchgeführt. Der Übergang ist gegenüber kleinen Fertigungstoleranzen (ca. 10 %) sehr robust, die Performance ändert sich dabei nur wenig. Die simulierten Streuparameter des Übergangs sind in Abbildung 20 dargestellt. Für die Eingangsanpassung im Bereich von 140 GHz bis über 200 GHz wird ein Wert von besser als -15 dB erreicht. Für die Einfügedämpfung ergibt sich ein Wert von ca. 1,3 dB. Simuliert werden die Werte mit dem Verlustfaktor  $\tan D = 0,006$ .

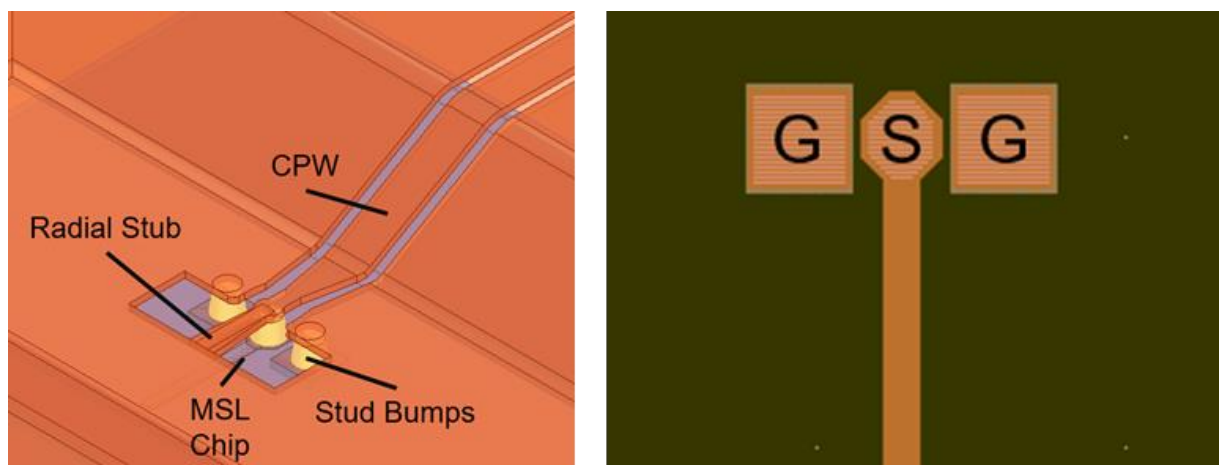


Abbildung 19: 3D-Ansicht des Übergangs zwischen Chip und Packageoberfläche (links). GSG-Padstruktur mit Mikrostreifenleitung des Radarchips (rechts).

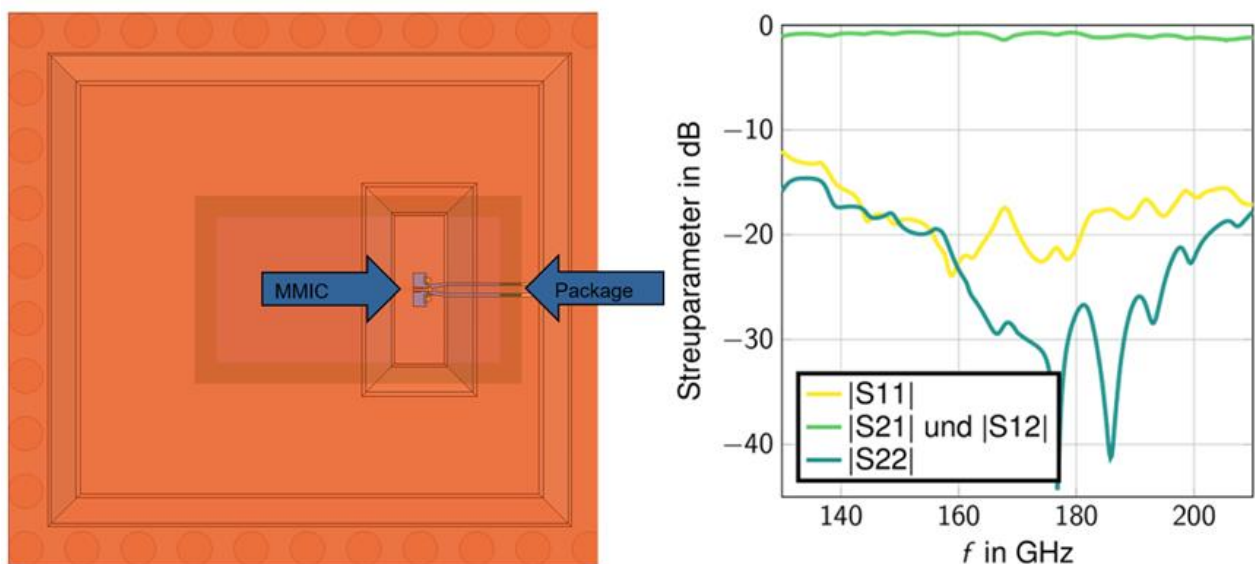


Abbildung 20: Simulationsbereich (links) und simulierte Streuparameter (rechts). Port 1 stellt den Waveport auf dem Chip dar, Port 2 den Waveport auf der Packageoberfläche.

### 5.3 Entwicklung der Antenne auf Chip und EMC

Da beide Antennenstrukturen über eine Koplanarleitung mit derselben Konfiguration gespeist werden können, werden beide Antennen für dieses Projekt entwickelt und eingesetzt. Zudem kann derselbe Übergang für beide Antennen genutzt werden. Die Antenne sitzt in beiden Fällen im Package neben dem Chip. Die Helixantenne wird über die Oberfläche des Packages ankontaktiert, der ME-Dipol muss von der Packageunterseite gespeist werden. Um das Signal auf die Unterseite zu führen, wird ein CPW-Lagenwechsel entwickelt.

In diesem Arbeitspaket werden Vollwellensimulationen sowohl für den Übergang als auch für die beiden Antennen in der QFN-Packagekonfiguration aufgebaut. Durch die Höhe der Moldmasse sind im Package im Bereich um den Chip Oberflächenwellen bzw. Parallelplattenmoden ausbreitungsfähig. Diese führen zu einer unkontrollierten Abstrahlung am Rand des Packages. Die parasitären Moden mindern die Antennenperformance und werden deshalb durch Optimierung der Strukturen vermieden und durch Platzierung von Vias innerhalb des Packages und am Rand unterdrückt (Abbildung 21 und Abbildung 22).

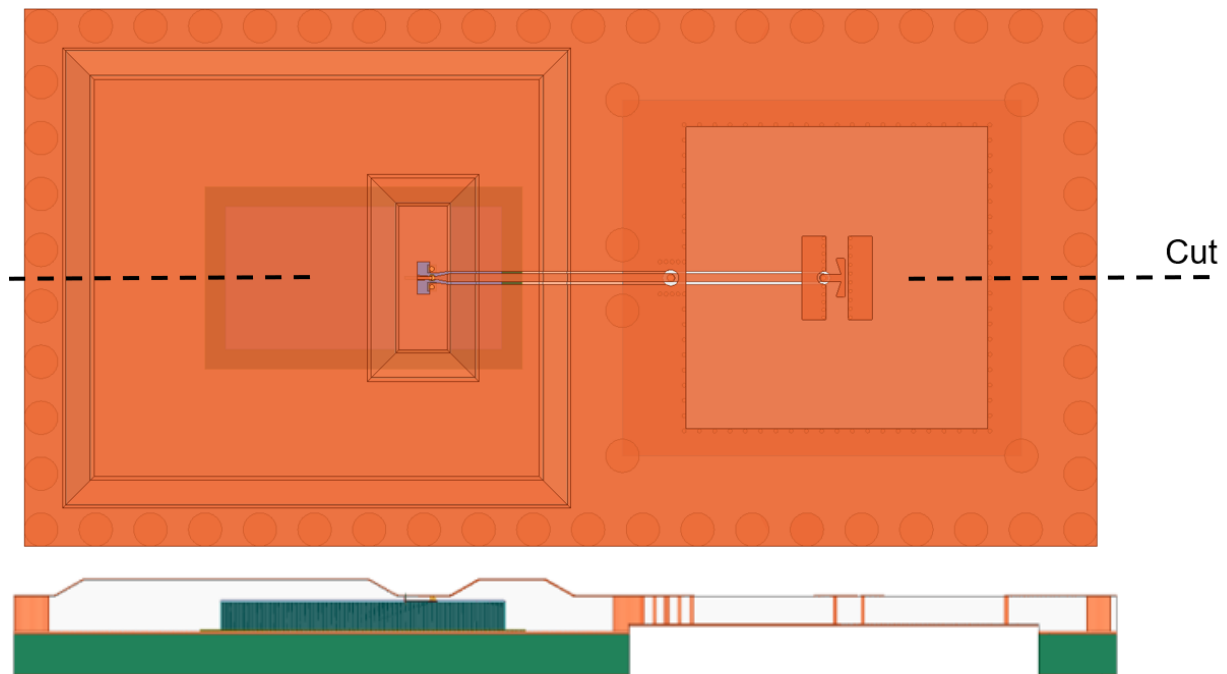


Abbildung 21: Draufsicht (oben) und Querschnitt (unten) der Vollwellensimulation des Packages mit der ME-Dipolantenne.

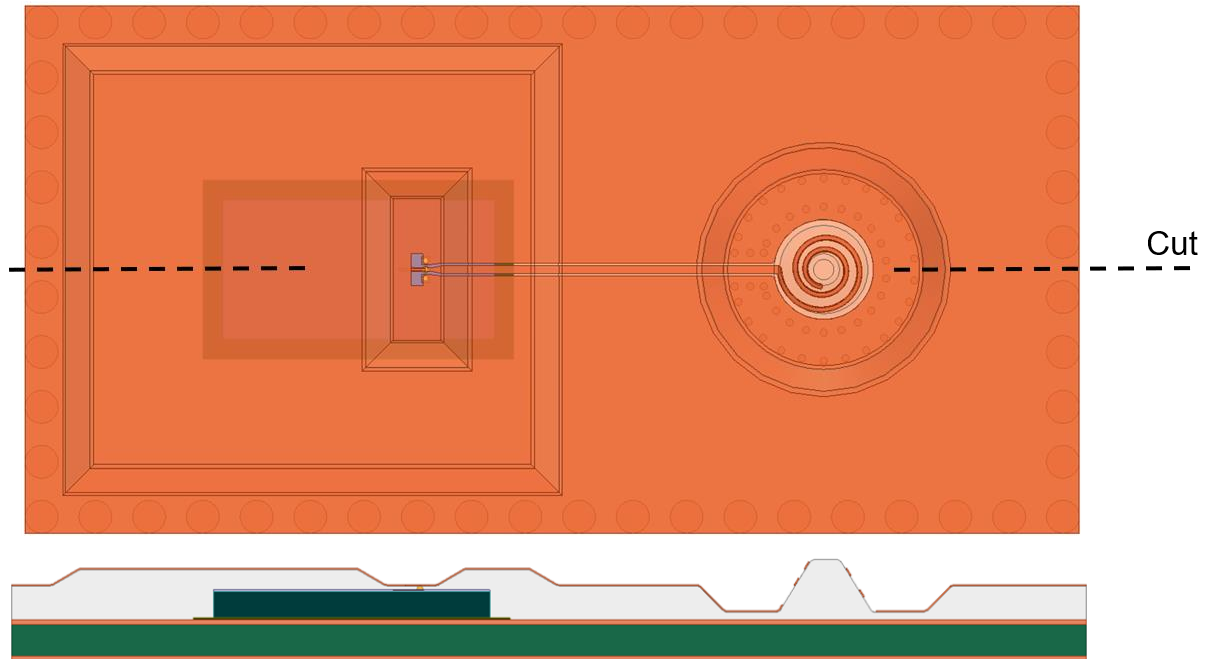


Abbildung 22: Draufsicht (oben) und Querschnitt (unten) der Vollwellensimulation des Packages mit der Helixantenne.

Die Vias am Rand des Packages führen zu einem definierten Potential in allen Bereichen des Packages, was zu weniger Schwankungen in den Antennenpattern führt. Zusätzlich ist sowohl der Bereich um die Helixantenne als auch der Bereich um den ME-Dipol vom Package durch Vias abgetrennt, so dass eine parasitäre Beeinflussung vermieden wird. Die Draufsicht und der Querschnitt der Packages als Vollwellensimulationsmodell mit den beiden Antennen sind in den Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Die Simulationsergebnisse der Antennencharakteristik des ME-Dipols und der Helixantenne in der Packagekonfiguration sind in den Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt. Für die Helixantenne ergibt sich für eine zirkuläre Polarisierung im Bereich von 150 GHz bis über 200 GHz mit einem Axialverhältnis von  $<1,9$ , bei der Mittenfrequenz des Radarchips beträgt das Axialverhältnis 1,5. Der Eingangsreflexionsfaktor beider Antennen beträgt, simuliert ab dem Waveport auf dem Chip, für den Bereich von 140 GHz bis 200 GHz weniger als -10 dB.



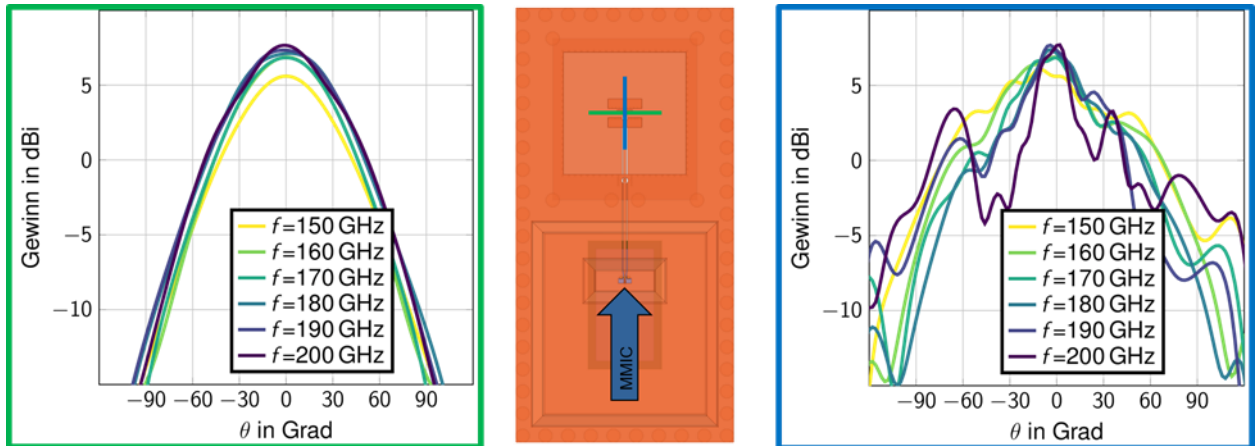


Abbildung 23: Simulierte Antennenpattern für das Radarpackage mit der ME-Dipolantenne. Die Rahmen der Darstellungen sind farblich den Schnitten durch die Antenne zugeordnet. Auf der linken Seite ist die H-Ebene dargestellt, auf der rechten Seite die E-Ebene.

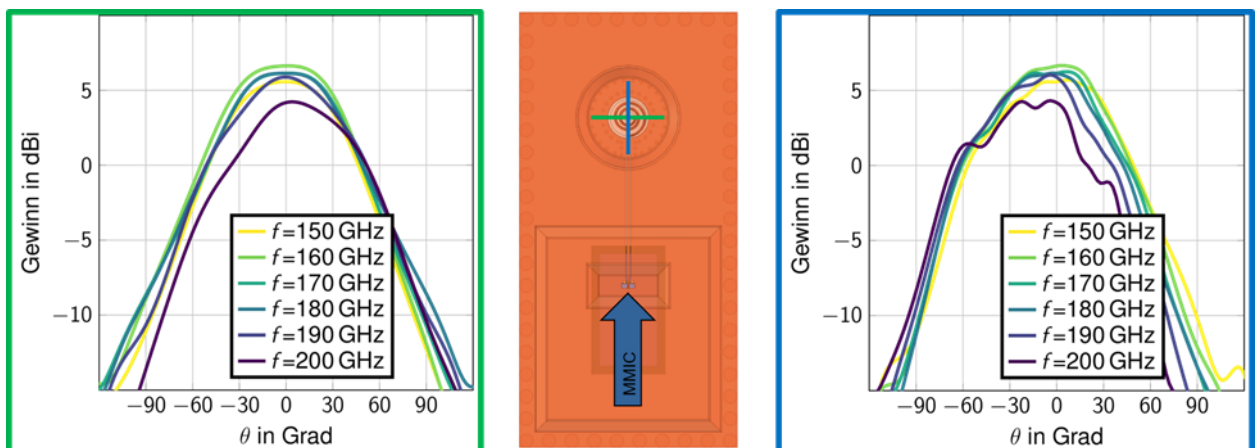


Abbildung 24: Simulierte Antennenpattern für das Radarpackage mit der Helixantenne. Die Rahmen der Darstellungen sind farblich den Schnitten durch die Antenne zugeordnet.

Eine Darstellung der Vollwellensimulation des Übergangs im aktiven Package mit dem Betrag des E-Felds und ist in Abbildung 25 zu sehen.

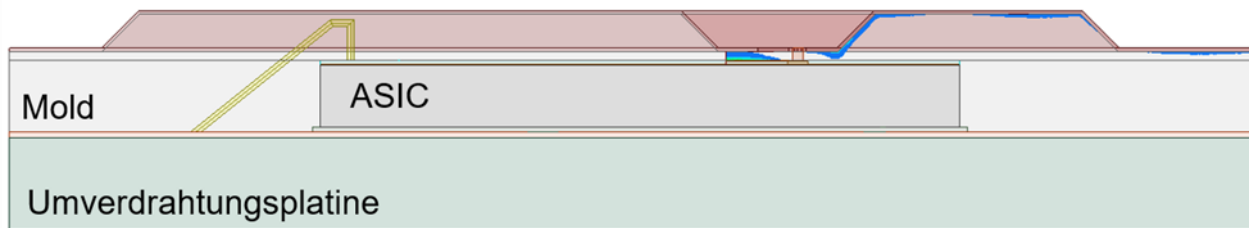


Abbildung 25: Schnitt durch das Package im Bereich des Chips (ASIC). Darstellung des Betrags des E-Feldverlaufs am Übergang zwischen Chip und Moldmetallisierung (blau).

## 6. Charakterisierung und Bewertung von HF-Strukturen

Um den entwickelten Übergang und die Antennen auf den eingesetzten Substraten charakterisieren zu können muss der VNA kalibriert werden. Dies erfolgt durch das in Abbildung 26 entworfene TRL-Kalibrationskit.

Um Übergänge zwischen zwei Substraten mit allen Streuparametern charakterisieren zu können, sind sogenannte Back-to-Back (B2B)-Strukturen nötig. Dafür werden die Übergänge zweimal symmetrisch aufgebaut und verbunden, so dass beide Ankontaktierungspunkte auf demselben Substrat liegen. In diesem Fall sind die Konfigurationen Mold-Chip-Mold und Chip-Mold-Chip möglich.

Um die Ankontaktierung des Chips in der Konfiguration Chip-Mold-Chip zu ermöglichen, ist während des Moldprozesses ein Teil des Chips abgedeckt und wird nicht übermoldet. Dieses Verfahren wird später auch für die Antennenmessung verwendet.

### 6.1 Layoutentwurf, Charakterisierung und Bewertung der Ankontaktierungen

Es wird sowohl für das Ankontaktieren der metallisierten Moldmasse, als auch für das Ankontaktieren des Chips, ein TRL-Kalibrationskit entwickelt. Das TRL-Kalibrationskit für die Moldmasse muss dieselbe Koplanarleitungskonfiguration besitzen, wie die CPW, die auf der Packageoberfläche zur Signalverteilung genutzt wird. Dafür werden CPW-Pads für die Messprobe entwickelt.

Das TRL-Kalibrationskit auf dem Chip besitzt eine Mikrostreifenleitungskonfiguration mit denselben Leitungsparametern wie die Mikrostreifenleitung auf den passiven und aktiven Chips. Da ausgehend vom Chip in allen Fällen die Übergangsstruktur auf die Moldmasse gemessen wird, ist das TRL-Kalibrationskit so ausgelegt, dass die Kalibrationsebene unterhalb der Moldmasse liegt. Der Übergang zwischen freigestelltem Chip und übermoldetem Chip wird dabei in der Kalibration berücksichtigt und ist somit nicht in der Messung enthalten. In Abbildung 26 sind die beiden TRL-Kalibrationskits dargestellt.

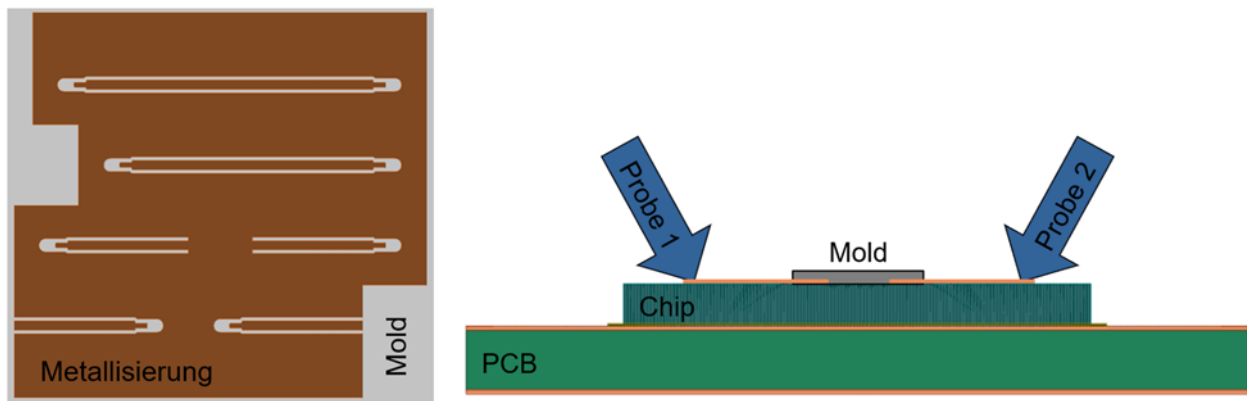


Abbildung 26: Draufsicht des TRL Kalibrationskits auf der Moldmasse (links) und Querschnitt des TRL-Kalibrationskits auf dem Chip mit Kalibrationsebene innerhalb der Moldmasse (rechts).

Um den Übergang zwischen Chip und Packageoberfläche charakterisieren zu können, kommen die eingangs beschriebenen B2B-Strukturen zum Einsatz. Dabei werden die beiden Konfigurationen Chip-Mold-Chip und Mold-Chip-Mold aufgebaut und vermessen. Daraus ergeben sich zwei Messszenarien. Im ersten Szenario wird mit beiden Probes auf dem Chip ankontaktiert, der Signalpfad zwischen den Probes beinhaltet die Moldmetallisierung und zwei symmetrische Übergänge. Der Querschnitt dieses Aufbaus ist in Abbildung 27 dargestellt. Die Konfiguration Mold-Chip-Mold stellt einen dazu komplementären Aufbau dar, in diesem Fall wird auf der metallisierten Moldmasse ankontaktiert.

Die B2B-Strukturen sind mit verschiedenen Leitungslängen aufgebaut, mithilfe von Streuparameterrechnung können alle Streuparameter eines einzelnen Übergangs berechnet werden.

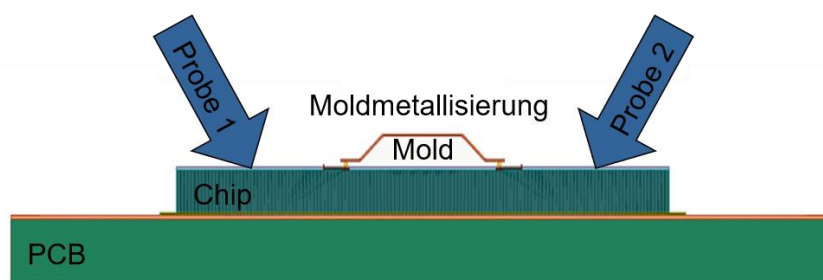


Abbildung 27: Querschnitt der B2B-Struktur in der Konfiguration Chip-Mold-Chip.

## 6.2 Layoutentwurf, Charakterisierung und Bewertung der Antennenstruktur

Für die Charakterisierung der Antennenstruktur bleibt ebenfalls eine Hälfte des Chips von der Moldmasse freigestellt, an dieser Stelle wird der Chip mit der Probe

ankontaktiert. Um die Eingangsanpassung der Kombination aus Übergang und Antenne messen zu können, wird das bereits in AP4.1 vorgestellte TRL-Kalibrationskit verwendet. Da in AP4.1 bereits der Übergang charakterisiert wurde, kann dieser aus den Messergebnissen herausgerechnet werden. So kann die eigentliche Eingangsanpassung der Antenne bestimmt werden. Für die Antennenmessung wird die in Abbildung 28 dargestellte Konfiguration verwendet.

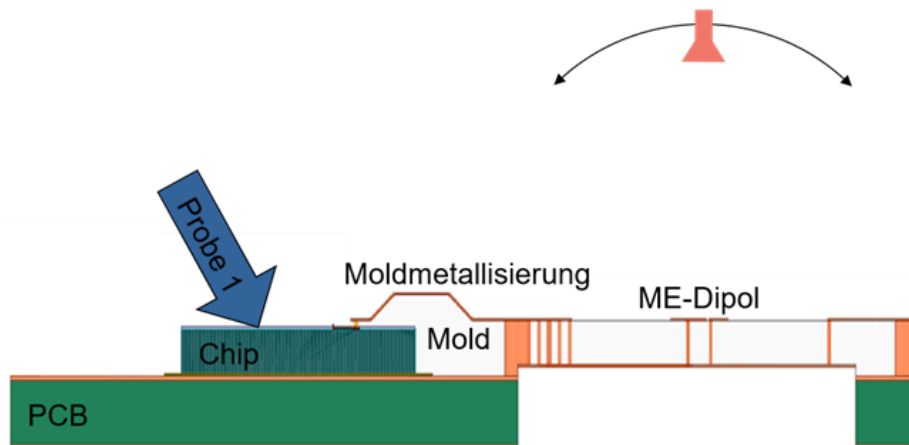


Abbildung 28: Ankontaktierung der Probe für die Antennenmessung. Schematische Darstellung der am Roboter befestigten Hornantenne.

Die Antennenmessung erfolgt am Robotermessplatz des Instituts für Mikrowellentechnik. Dazu werden die Messsignale mit der in Abbildung 28 zu sehenden Probe 1 eingespeist. Der Roboter tastet mithilfe einer Hornantenne das Fernfeld auf Halbkreisbahnen über der Antenne ab. Mithilfe verschiedener Messmethoden lässt sich der absolute Antennengewinn und die Abstrahlcharakteristik der Gesamtstruktur charakterisieren. Der dazu verwendete Robotermessplatz ist in Abbildung 29 dargestellt.

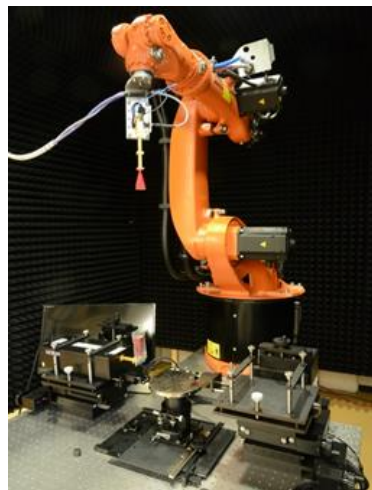


Abbildung 29: Robotermessplatz des Instituts für Mikrowellentechnik.

## 7. Erarbeitung und Optimierung des FAM-Werkzeug

Da die Toleranzen bei den im Projekt angestrebten Frequenzen erfolgsbestimmend sind, wird in diesem Arbeitspaket ein Konzept zur Minimierung der Toleranzketten erarbeitet. Darüber hinaus wird das Werkzeugkonzept ausgearbeitet und auf die Anforderungen der zu fertigenden Strukturen hin optimiert.

Ursachen für Toleranzabweichungen können in der angestrebten Prozesskette der Werkzeugbau sein. Außerdem stellen die Toleranzen der verwendeten PCBs, die Positioniergenauigkeit der Chips und die Genauigkeit der Laserstrukturierung eine Herausforderung dar.

Um die Toleranzketten möglichst kurz zu halten werden die Zentrierbohrungen der PCBs genutzt. Auf dieses Koordinatensystem ist die Positionsausrichtung der einzelnen Strukturen in den Werkzeugeinsätzen ausgerichtet. Außerdem werden diese Positionen genutzt um die Positionsmarken für die Chipbestückung in der Montagefläche zu tolerieren und das Koordinatensystem des Bestückautomaten auszurichten (Abbildung 30). Außerdem werden diese Bohrungen als Referenz beim Laserstrukturieren genutzt. Für die möglichst genaue Ausrichtung des Laserlayouts werden drei Ansätze in Betracht gezogen. Beim ersten Ansatz lässt sich die Position des Chips und der Ankontaktierung im ungemoldeten Zustand bestimmen. Dies erfordert jedoch die manuelle Eingabe der Koordinaten und lässt keine Kontrolle zu. Ein weiterer Ansatz, der insbesondere für Teststrukturen angewendet werden kann, ist den gemoldeten Chip teilweise offen zu lassen und somit als Referenzmarke zu nutzen. Der dritte Ansatz nutzt die Stud-Bumps, welche so ausgeführt werden, dass diese während dem Molding-Prozess die Oberfläche des EMC durchstoßen und somit sichtbar sind.

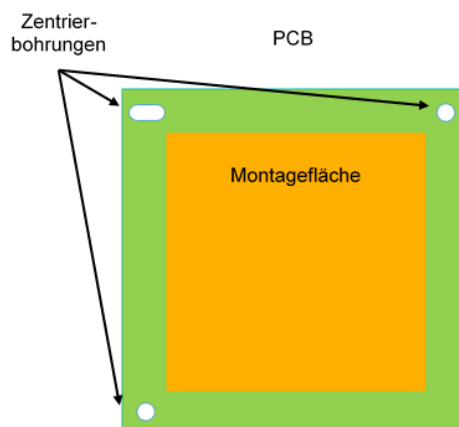


Abbildung 30: PCB mit Zentrierbohrungen.

Die typischen Toleranzen zur Herstellung der PCB sind in Tabelle 3 aufgeführt. Positionier- und Wiederholgenauigkeiten von jeweils  $\pm 20\mu\text{m}$  und  $\pm 2\mu\text{m}$  werden erreicht.

Tabelle 3: Typische Toleranzen der PCB.

Verfahren	Toleranzen	$\pm$ Wert
Leiterplattenherstellung	Leiterbild zur Kontur	0,3 mm
	Leiterbild zur Bohrung	0,1 mm
	Leiterplattendicke	10 %
	Bohrung zur Bohrung	0,05 mm
	Bohrungsdurchmesser	0,05 mm
	Sonderfertigung Leiterbild zur Bohrung	0,05 mm

Die Leiterplatte hat eine Grundfläche von  $55 \times 55 \text{mm}^2$  und eine Dicke von ca.  $300\mu\text{m}$ . Die Positionstoleranzen der Aufnahmebohrungen zeigt Abbildung 31. Diese sind für die Herstellung der FAM-Werkzeugeinsätze relevant.

	Diameter 1 [mm]	Diameter 2 [mm]	Diameter 3 [mm]	X-Abstand [mm]	Z-Abstand [mm]	Winkel [°]
Nom. Wert	1,5	1,5	1,5	47,5	30	90
Mittel-wert	1,498	1,506	1,498	47,507	30,003	90,002
Std.Abw	0,002	0,006	0,003	0,004	0,006	0,013
Max-Min	0,007	0,019	0,009	0,016	0,024	0,045

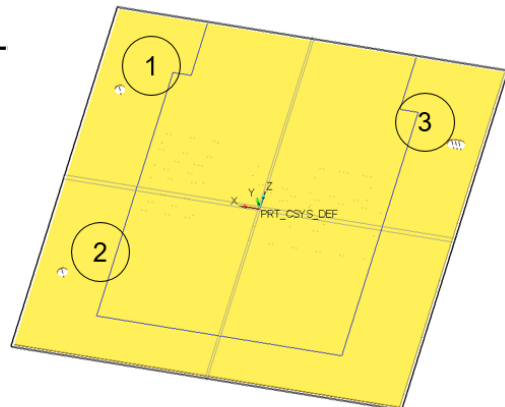


Abbildung 31: Positionstoleranzen der Aufnahmebohrungen.

Das Werkzeugkonzept für den FAM-Prozess basiert auf einem Stammwerkzeug, das für alle abzumusternden Teile gleichbleibt, und eine Reihe von Einsätzen, die in dieses Stammwerkzeug integriert werden. In dem Konzept werden die PCBs von unten angespritzt. Dadurch können die Werkzeugeinsätze in das Stammwerkzeug eingelegt werden, ohne dass sie gegen ein Herausfallen gesichert werden müssen (Abbildung 32).

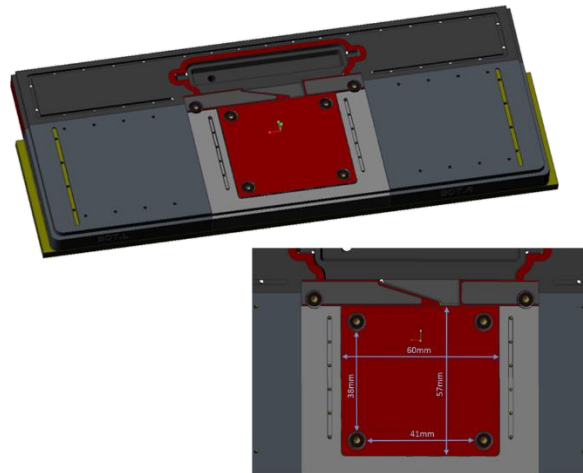


Abbildung 32: Konzeption FAM-Werkzeug.

Um zu überprüfen, ob die notwendigen minimalen Wandstärken von 30-50µm mit dem gewählten Material fertigbar sind, wurden Testsubstrate mit gemoldeten Wandstärken von 300µm, 100µm und 50µm angefertigt. Die Versuche zeigten, dass das EMC KMC 9220 über die gesamte zur Verfügung stehende Fläche von 45x45mm<sup>2</sup> mit einer Wandstärke von 50µm gemoldet werden kann (Abbildung 33).

Nom. Wert	300 µm EMC	100 µm EMC	50 µm EMC
Mittel-wert	311	94	40
Std.Abw	3	3	5
Max-Min	10	11	17

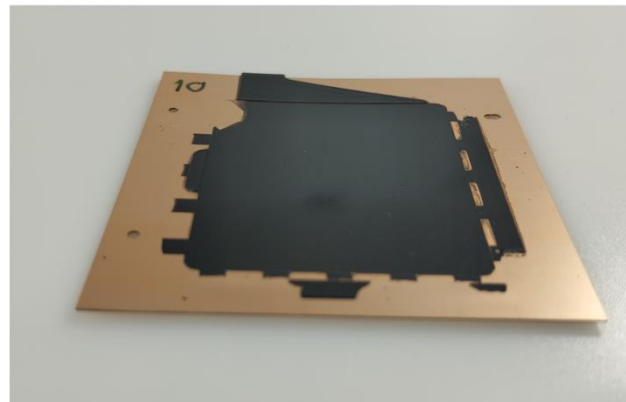


Abbildung 33: Messergebnisse von Wandstärkenmessungen (links). Gemoldetes Tests substrat (rechts).

Bei dickeren Wandstärken wird ein leichte Verbiegung der Leiterplatte festgestellt. Für erste Untersuchungen wurden 200µm dicke Moldplatten hergestellt. Auf diese werden verschiedene Kalibrationsstrukturen aufgebracht und vermessen.



## 8. Erarbeitung des Packagingprozesses und Aufbau von Funktionsmustern

### 8.1 Aufbau von Substraten mit Kalibrationstrukturen

Die Herstellung von Moldplatten mit einer Dicke von 200  $\mu\text{m}$  KMC9220 auf PCBs wurde mit dem Film Assisted Molding (FAM) Prozess durchgeführt. Dabei wird das Material als Pellet während des FAM Prozesses als flüssige Masse unter Druck und Temperatur in die gewünschte Form und durch den Werkzeugeinsatz auf die PCBs gebracht. Zwischen den beiden Klemmbanken dient eine spezielle Folie als Trennschicht, die verhindert, dass die EMC an der Form oder an den Klemmbanken der FAM-Anlage haftet. Nach der Herstellung der Moldplatten erfolgt die Planarisierung und Nachhärtung der Aufbauten bei 180°C für vier Stunden. Nach Reinigung und Auftrages des Schutzlackes wurden die gemoldeten Aufbauten (Abbildung 34) mithilfe eines UV-Laser strukturiert und metallisiert. Abbildung 35 zeigt die Prozesskette.

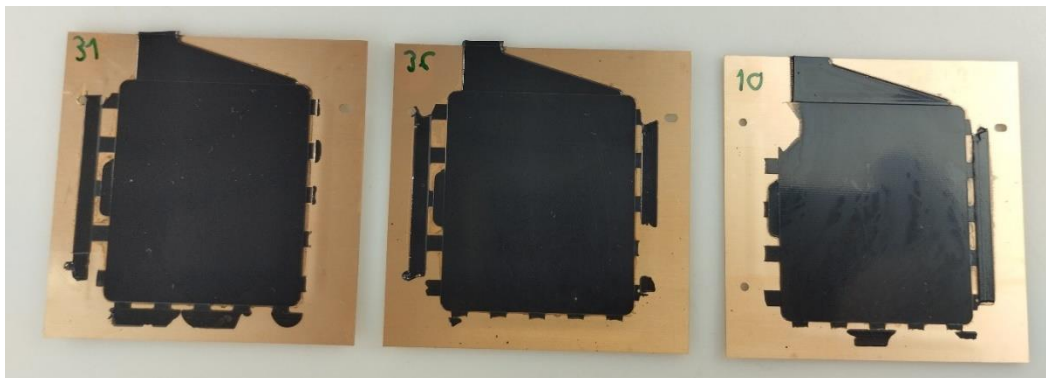


Abbildung 34: Gemoldete EMC auf Leiterplatten.

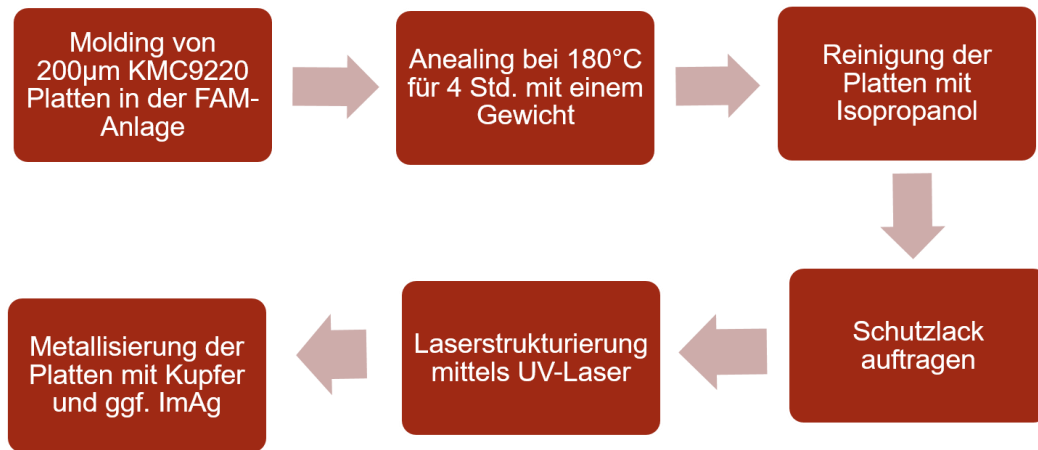


Abbildung 35: Prozesskette zur Herstellung der Moldplatten mit Kalibrationsstrukturen.

Es wurden verschiedene Parametersätze zur Laserstrukturierung erprobt (Abbildung 36 und Tabelle 4). Zur Laserstrukturierung der nachfolgenden Substrate wurden Parameter A1 ohne große Anpassung verwendet.

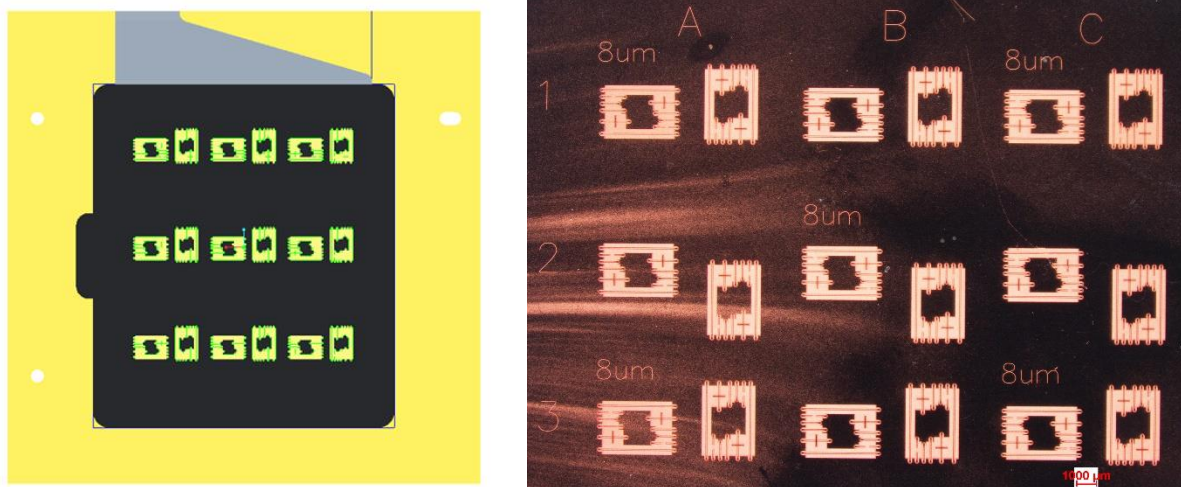


Abbildung 36: Kalibrationsstrukturen auf gemoldeten PCB, links: Design, rechts: mit Kupfer metallisierte Aufbauten.

Tabelle 4: Laserparameter zur Laserstrukturierung der EMC. Dabei sind  $t_{\text{Puls}}$  = Pulsdauer, P = mittlere Leistung, f = Pulsfrequenz, Q = Pulsenergie, LP/QP = Längs- /Querpitch

Feld	Spot-Ø [µm]	$t_{\text{Puls}}$ [ns]	P [W]	f [kHz]	v [mm/s]	Q [µJ]	LP [µm]	QP [µm]
A1	20	15	0,6	200	665	3,0	3,33	3,3
A2	20		0,75	200	665	3,8	3,33	3,3
A3	20		0,9	200	665	4,5	3,33	3,3
A4	20		1,1	200	665	5,5	3,33	3,3
B1	20	15	0,6	200	1330	3,0	6,65	6,7
B2	20		0,75	200	1330	3,8	6,65	6,7
B3	20		0,9	200	1330	4,5	6,65	6,7
B4	20		1,1	200	1330	5,5	6,65	6,7
C1	20	15	0,6	100	333	6,0	3,33	3,3
C2	20		0,75	100	333	7,5	3,33	3,3
C3	20		0,9	100	333	9,0	3,33	3,3
C4	20		1,1	100	333	11,0	3,33	3,3

## 8.2 Strukturierung von Antennenstrukturen

Um den Nachweis zu schaffen, die geforderten Strukturen realisieren zu können, wurden Untersuchungen zum Laserbohren von Vias und erste Strukturierungen von Antennenstrukturen durchgeführt und die Substrate optisch analysiert. Darüber hinaus wurden für die spätere Charakterisierung HF-Strukturen auf 200 µm dicke Moldplatten aufgebracht.

Die Untersuchungen zum Laserbohren von Vias zeigten, dass die notwendigen minimalen Durchmesser und Aspektverhältnisse realisierbar sind. Minimale Viadurchmesser von ca. 30 µm sind möglich. Der Widerstand der Vias ist aufgrund der kleinen Durchmesser vergleichsweise hoch (Abbildung 37 und Abbildung 38).

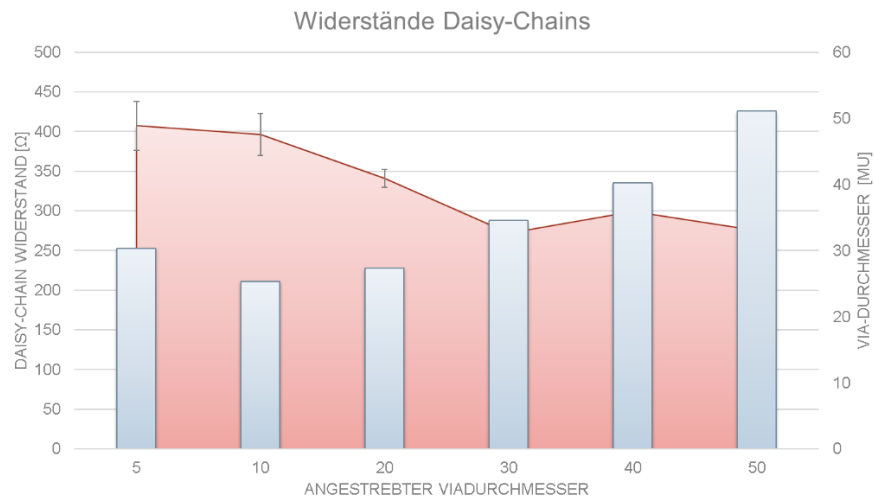


Abbildung 37: Angestrebte und gemessene Viadurchmesser und dazugehörige Widerstände.

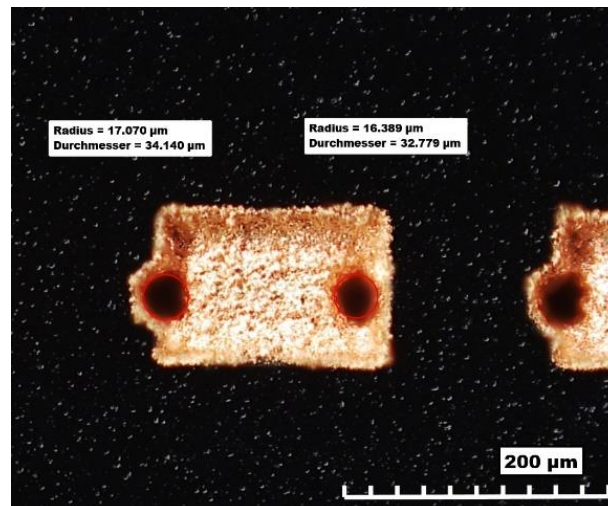


Abbildung 38: Ausschnitt aus Via Daisy Chain nach Metallisierung.

Die Auswertung erster Antennenstrukturen und ME-Dipol zeigte, dass die geforderten Strukturgrößen bei entsprechendem Offset erzielt werden können (Abbildung 39).

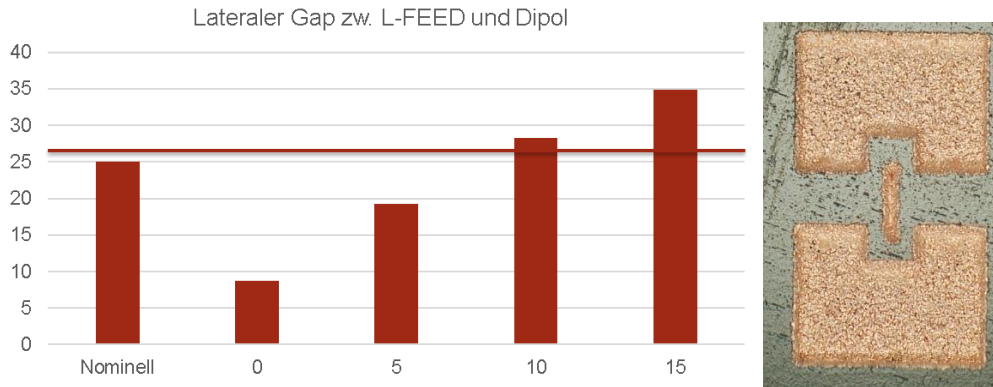


Abbildung 39: Abweichungen von der nominellen Breite eines Isolationsabstandes in  $\mu\text{m}$  (links) bei verschiedenen Laserrückstellungen. Mikroskopbild der dazugehörigen Antenne (rechts).

### 8.3 Teststrukturen auf 200 $\mu\text{m}$ Moldplatten

Um vorab HF-Messungen durchführen zu können, wurden 200  $\mu\text{m}$  dicke Moldplatten hergestellt. Auf diese wurden folgende Strukturen aufgebracht und im späteren Verlauf des Projekts vermessen (Abbildung 40 bis Abbildung 42):

- Probingpads zur Ankontaktierung
- TRL Kalibrationskit
- Übergang CPW-Oberseite zu CPW-Unterseite als B2B-Struktur
- ME-Dipol

Die Probingpads ermöglichen eine Ankontaktierung des ME-Dipols auch ohne den passiven ASIC und beschleunigen somit die Antennenmessung. Da die Speisung des ME-Dipols auf der Unterseite erfolgt, ist ein Übergang von der Oberseite auf die Unterseite der Moldmetallisierung nötig, dieser kann mit der entwickelten B2B-Struktur charakterisiert werden. Sind die Parameter des Übergangs vermessen und die Effekte der Ankontaktierung mittels der TRL-Kalibrationsstrukturen bekannt, kann auf die Parameter des ME-Dipols geschlossen werden.

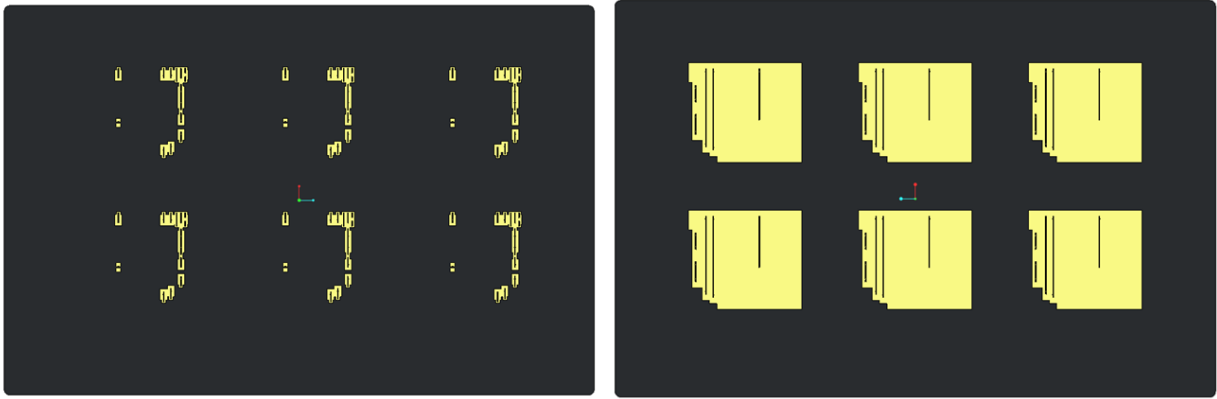


Abbildung 40: Design der Vorder- und Rückseite der Kalibrationsstrukturen und Antennen auf 200 µm Moldplatten ohne PCB.

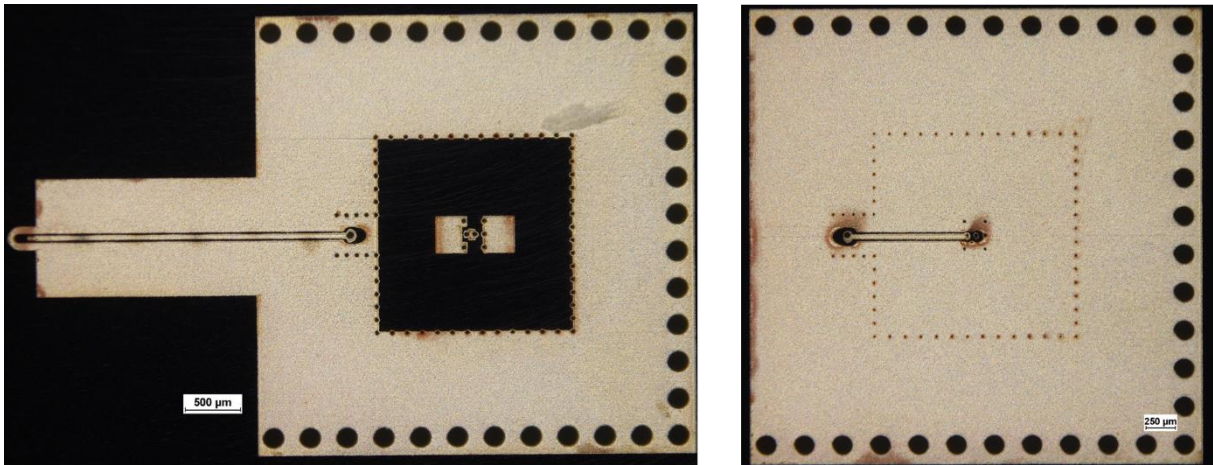


Abbildung 41: Vorder- und Rückseite der Antennenstrukturen auf Moldplatten nach der Laserstrukturierung und Metallisierung mit Cu/Ag.

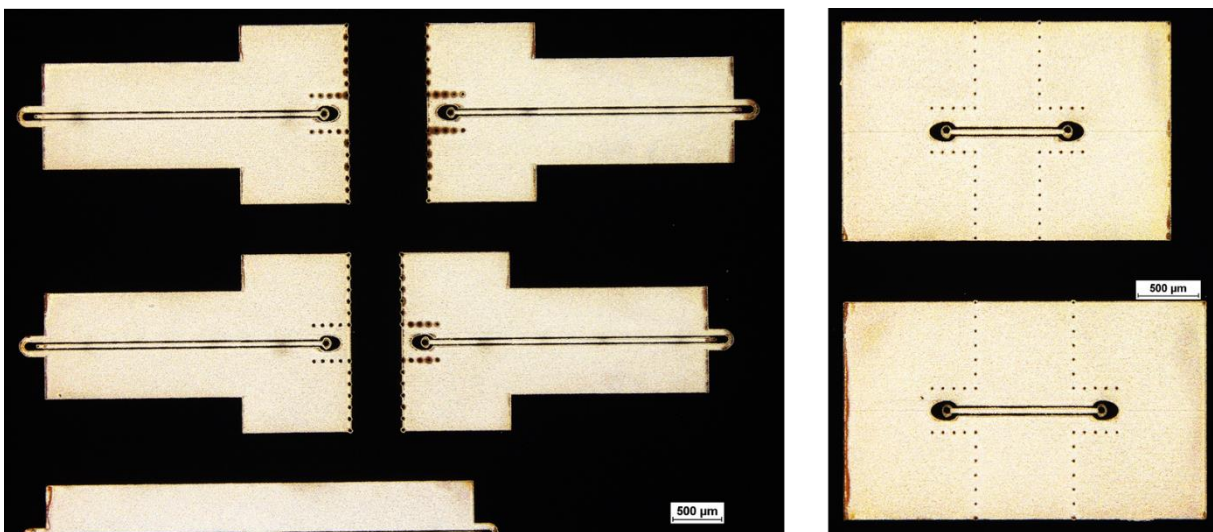


Abbildung 42: Vorder- und Rückseite der Antennenstrukturen auf Moldplatten nach der Laserstrukturierung und Metallisierung mit Cu/Ag.

#### 8.4 Teststrukturen für den Übergang ASIC-Moldmetallisierung

Um den HF-Übergang zwischen den GSG-Pads auf dem Radar-ASIC und der CPW-Leitungsstruktur auf der Moldoberfläche zu charakterisieren, wurden ebenfalls B2B-Strukturen erstellt. Dabei sind die Kalibrationsstrukturen auf dem passiven Chip. Diese passiven Testchips wurden im Rahmen eines Unterauftrags von Fraunhofer IZM beschafft. Bei der Herstellung dieser B2B-Strukturen wird die Rampe aus dem angepassten RF-Übergang von ASIC auf Mold bereits berücksichtigt.

Der Aufbau erfolgte mit der in Abbildung 43 beschriebenen Prozesskette. Die PCBs werden zunächst gründlich mit Isopropanol gereinigt, um jegliche Verunreinigungen zu entfernen und eine optimale Haftung zu gewährleisten. Anschließend wird ein leitfähiger Klebstoff (H20E von Epotek) mittels Pin-Transfer-Verfahren präzise auf die PCB aufgetragen. Im nächsten Schritt werden die Dummy Chips mithilfe eines Pick&Place-Prozesses an einem Bestückungsautomaten (Häcker Automation) mit einer Bestückgenauigkeit von ca. 10 µm exakt positioniert. Nach der Platzierung der Chips werden diese im Ofen bei 150°C für eine Stunde ausgehärtet, wodurch der Klebstoff vollständig aushärtet und eine stabile Verbindung sicherstellt. Nach dem Aushärten erfolgt eine gründliche Analyse unter dem Mikroskop, bei der die Bestückpositionen der Chips überprüft werden. Dabei wird insbesondere der Versatz (Offset) der Chips gemessen und dokumentiert, um die Genauigkeit des Bestückungsprozesses zu gewährleisten und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Anschließend erfolgen der Moldingprozess sowie die Laserstrukturierung und Metallisierung.

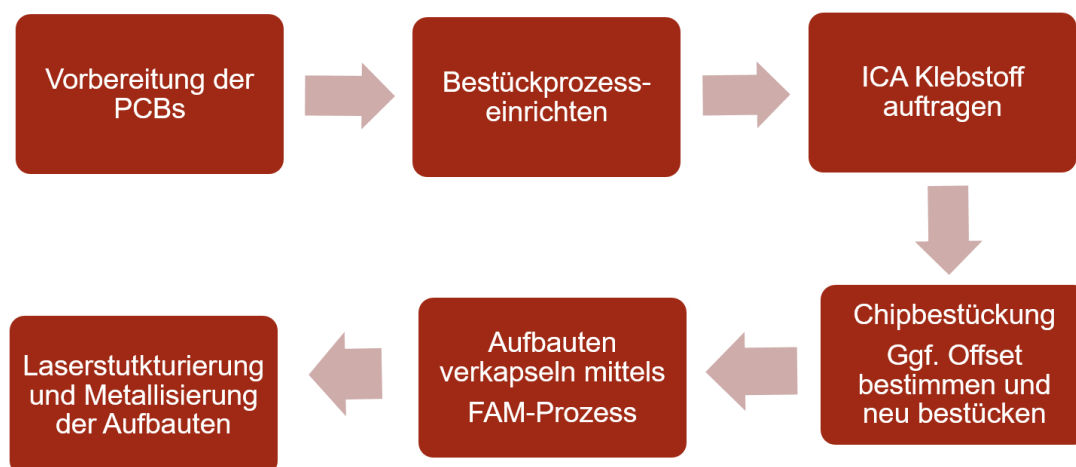


Abbildung 43: Prozesskette zur Chipbestückung und Molding der PCB.

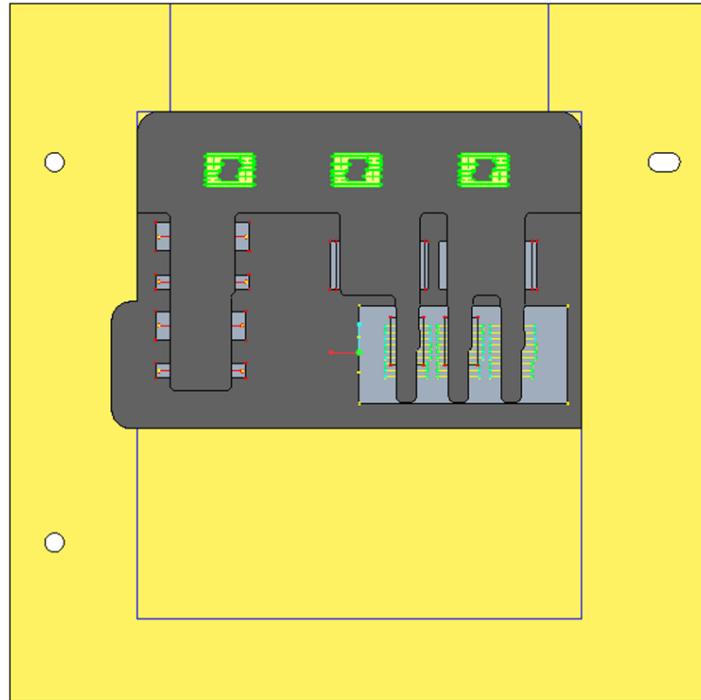


Abbildung 44: Design der B2B Kalibrationsstrukturen auf EMC und PCB mit Testchips.

Bei der Konstruktion einer Halterung zur Fixierung der Leiterplatten wurde darauf geachtet, dass die Aufnahmebohrungen durch die Halterung sichtbar sind, so dass diese Bohrungen als Referenz für die Bestückung dienen können (Abbildung 45).

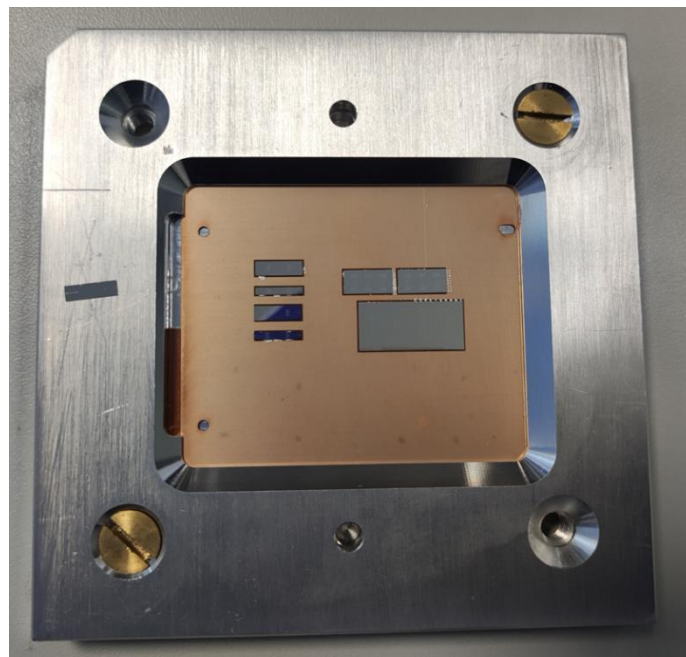


Abbildung 45: Halterung für die Bestückung der Chips auf PCB.



Nachdem die Testchips bestückt worden sind, wurden die Aufbauten übermoldet, sodass Teilbereiche vom Chip sichtbar sind, andere dafür komplett übermoldet. Dafür wurde ein 2,5D Werkzeugeinsatz konzipiert und angefertigt. Erste Moldversuche an der FAM-Anlage haben gezeigt, dass die Schließkraft und der Anpressdruck zu hoch war (Tabelle 5), was teilweise Chipbrüche zur Folge hatte (Abbildung 46). Nach Optimierung der Moldparameter konnten bestückte PCBs ohne Chipbrüche übermoldet werden. Bei der Parameteroptimierung hat sich gezeigt, dass die Schließkraft den größten Einfluss auf den Moldingprozess hat. Durch die Reduzierung der Schließkraft auf 25 kN wurden sehr gute Ergebnisse erzielt (Abbildung 47).

Tabelle 5: Wichtige Parameter beim Moldingprozess.

Parameter	
Moldingtemperatur	175°C
Aushärtezeit	180 s
Anpressdruck	20 bar
Schließkraft	50 kN

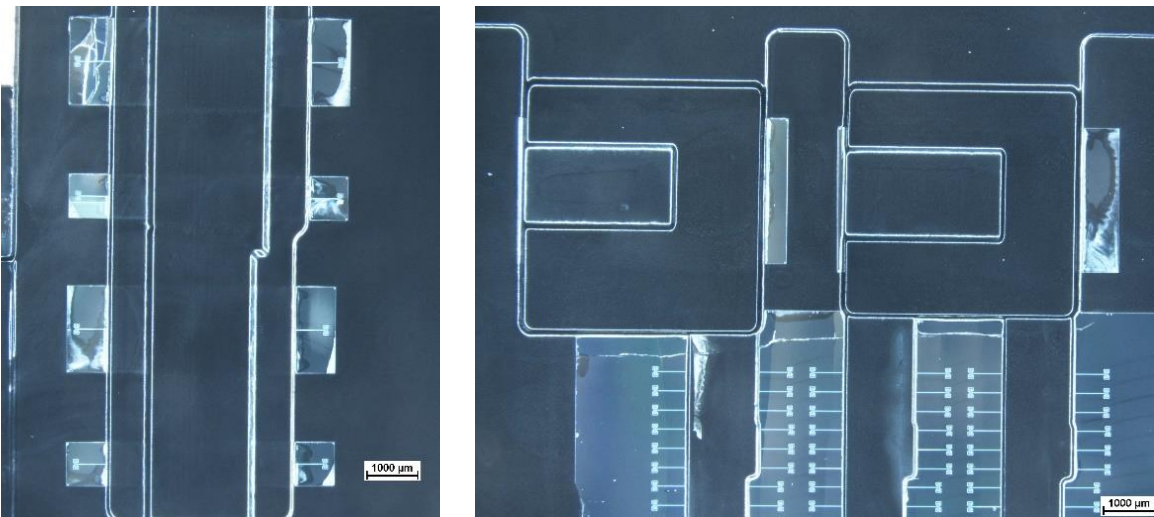


Abbildung 46: Erste Moldingversuche der B2B Strukturen mit teilweise übermoldeten Testchips mit Chipbrüchen.

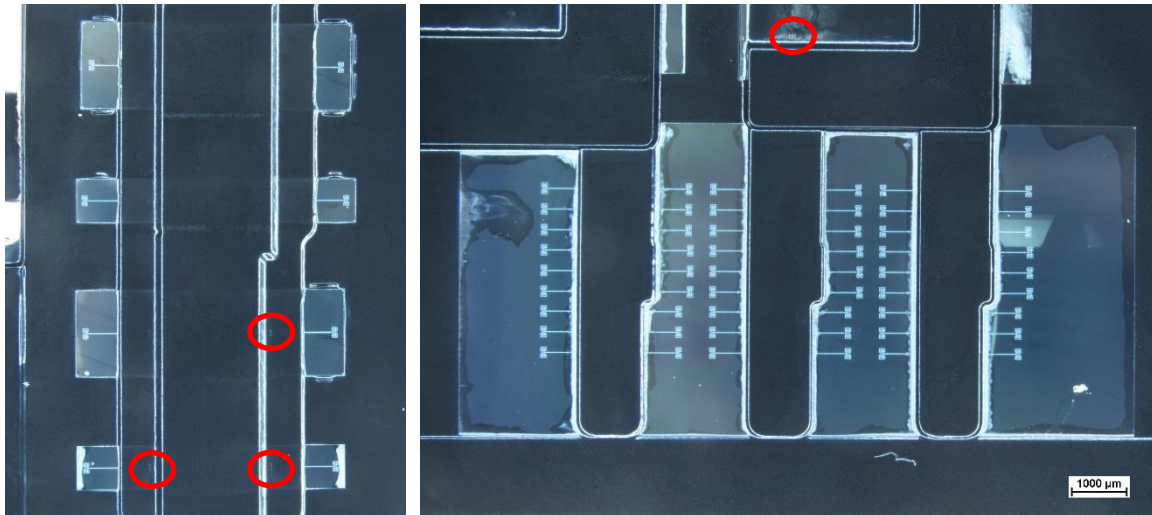


Abbildung 47: B2B Strukturen mit teilweise übermoldeten Testchips mit aus der Moldmasse herausragenden Stud-Bumps (roter Kreis) nach Optimierung des Moldprozesses.

Basierend auf den Erkenntnissen zum Aufbau von Substraten mit Kalibrations- und Antennenstrukturen wurden die in Abbildung 44 dargestellten Designs laserstrukturiert.

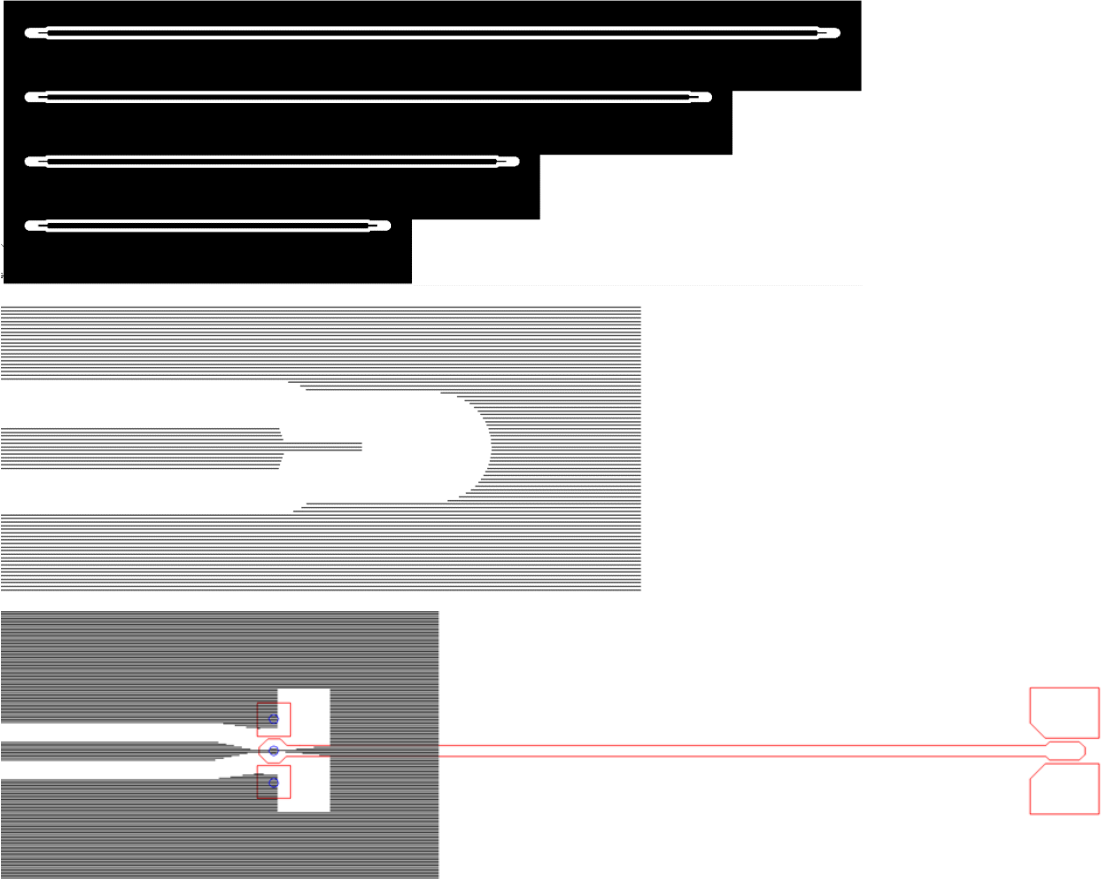
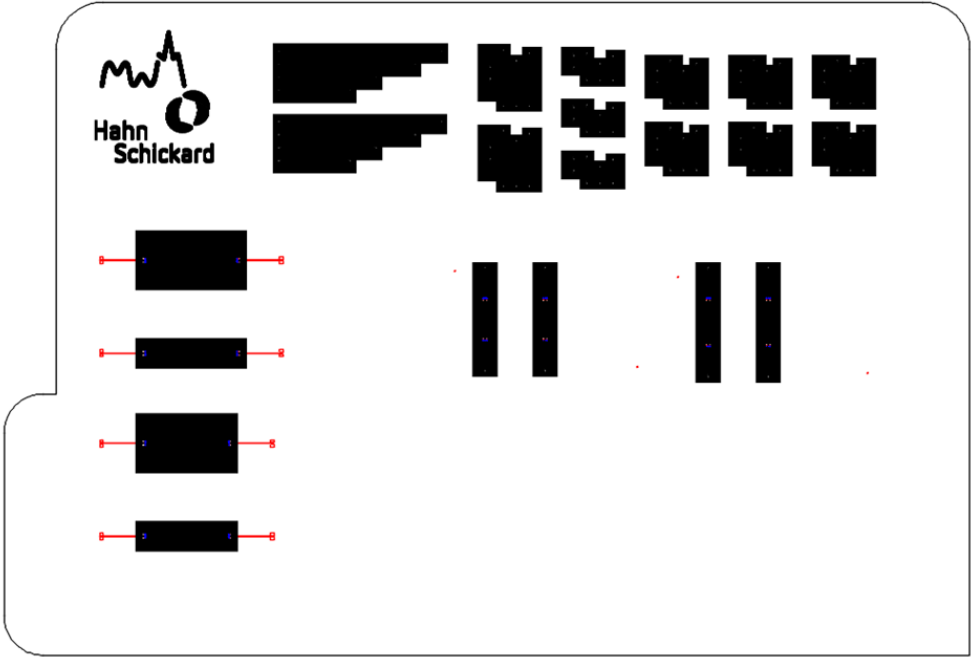


Abbildung 48: Layout für B2B Kalibrationsstrukturen mit Detailaufnahmen. Die Farben schwarz, rot und blau stehen jeweils für Laserhatch, Chipmetallisierung und Vias.

Da die Chips nur teilweise übermoldet sind liegen bestimmte Chipbereiche frei. Diese Bereiche werden durch die später folgende Metallisierung angegriffen, so dass diese Bereiche vor der Laserstrukturierung verkapselt werden müssen. Nach der Metallisierung muss diese Verkapselung wieder komplett entfernt werden. Zwei Ansätze wurden hierfür erprobt. Zum einem die Verkapselung mithilfe von einem Acrylatklebstoff, der sich anschließend wieder mit Aceton entfernen lässt (Abbildung 49). Der andere Ansatz basiert auf einem speziellen Klebeband, welches bei der Prozessierung von Wafern eingesetzt wird und gegenüber Basen und Säuren beständig ist (Abbildung 50).

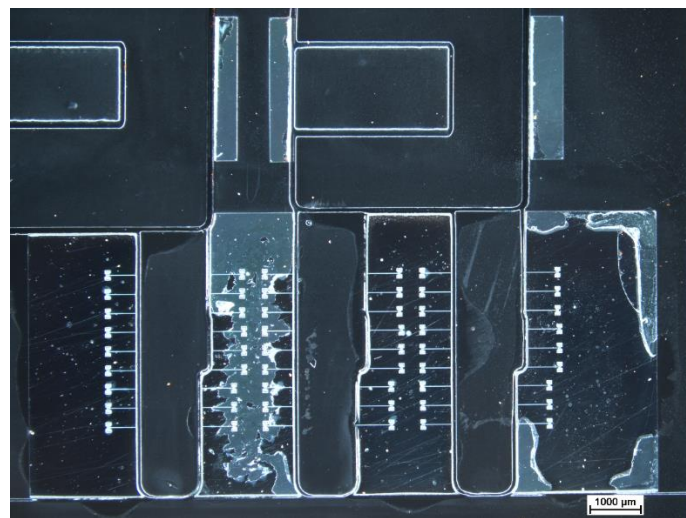


Abbildung 49: Mit Acrylatklebstoff maskierte Chips nach der Metallisierung. Die Bereiche um die Pads werden angegriffen.



Abbildung 50: Mit Klebeband maskierte Chips nach der Metallisierung (links) und nach der Entfernung des Klebebandes (rechts).

Die Ergebnisse mit Klebeband waren vielversprechend, so dass dieser Ansatz für die weitere Prozessierung des in Abbildung 48 gezeigten Designs weiterverfolgt wurde. Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen die lasterstrukturierten und metallisierten Aufbauten.

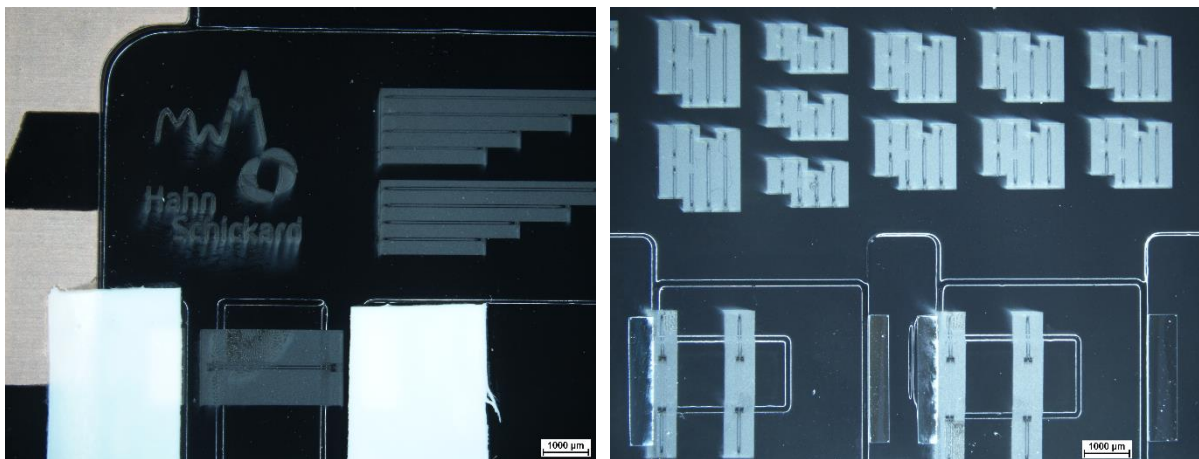


Abbildung 51: Laserstrukturierung und Verkapselung der offenen Chipbereiche als Vorbereitung auf der Metallisierung.

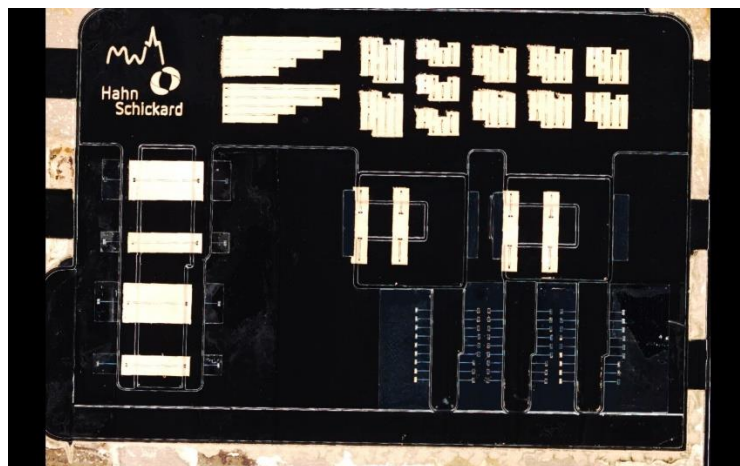


Abbildung 52: Metallisierte B2B Strukturen mit Testchips.

Die gleichen Prozesse wie zur Herstellung der B2B Strukturen werden für die Antennenstrukturen auf PCBs und Testchips (Abbildung 53) eingesetzt. Dabei werden sechs Testchips bestückt und zur Antennenstruktur verdrahtet. Die anderen zwei werden mit der Helixantenne verbunden (Abbildung 54 und Abbildung 55).

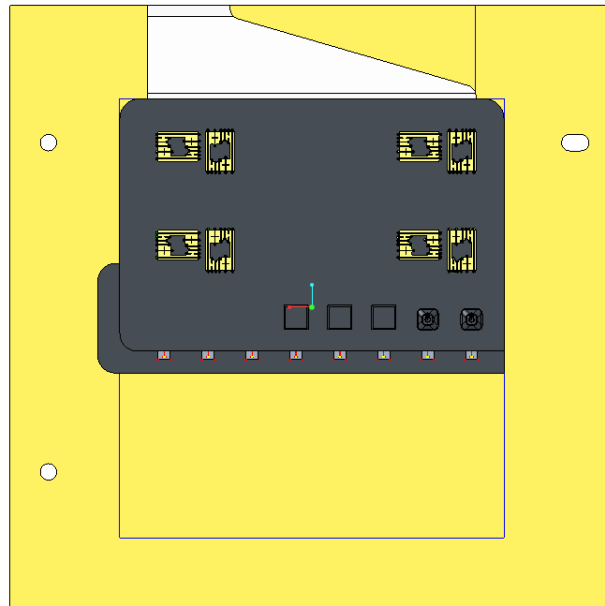


Abbildung 53: Design zur Antennencharakterisierung auf EMC und PCB mit Testchips.

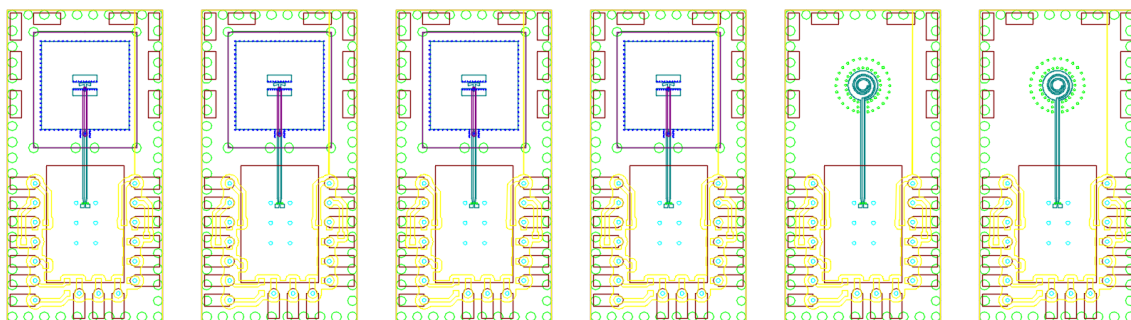


Abbildung 54: Antennenstrukturen mit Testchips und Laserlayout.

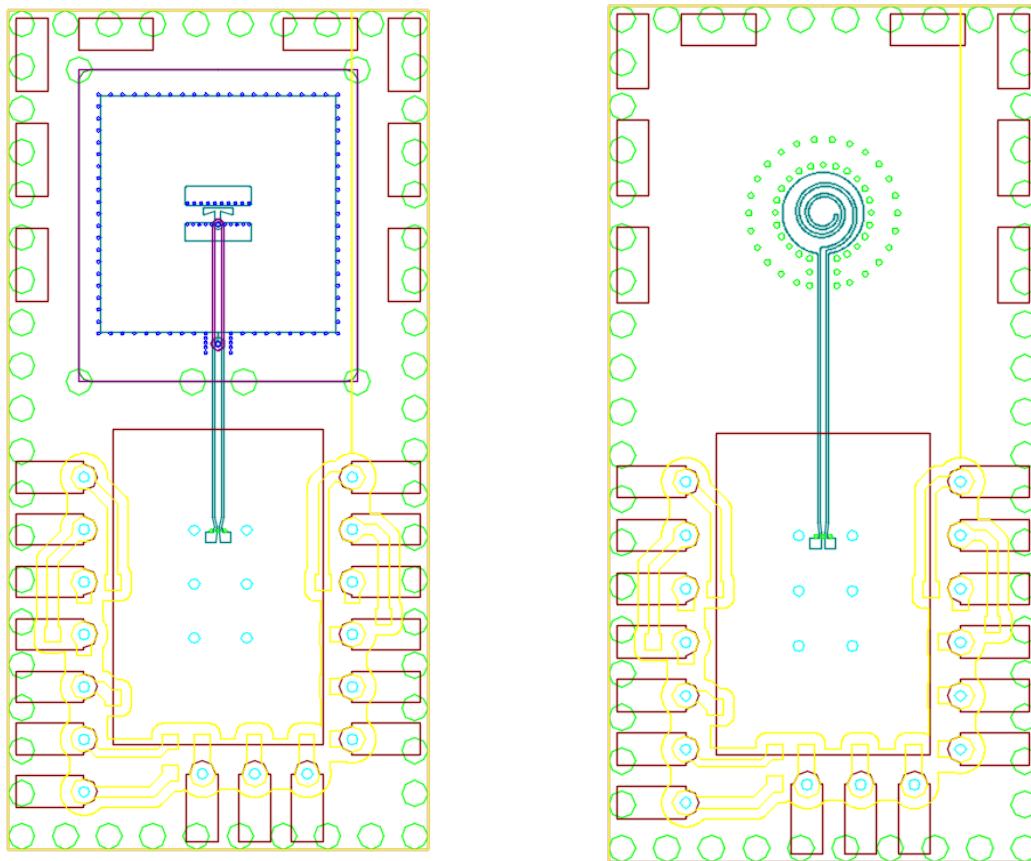


Abbildung 55: Antennenstrukturen mit Testchips und Laserlayout im Detail.

Die Testchips werden auf der Leiterplatte platziert und an der FAM-Anlage übermoldet. Der entsprechende Werkzeugeinsatz hat sowohl 2,5D als auch 3D Strukturen, so dass beim Moldingprozess zum Einen die Testchips übermoldet werden und gleichzeitig die Antennenform ausgeformt wird (Abbildung 56).

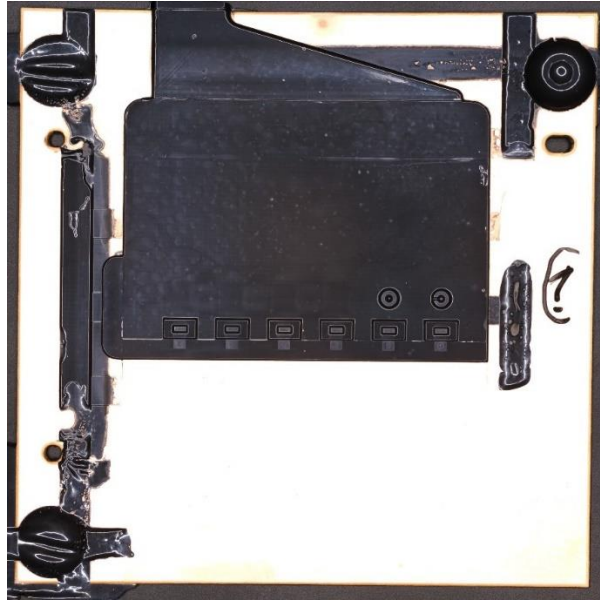


Abbildung 56: Bestückte und übermoldete Testchips auf der Leiterplatte mit zwei Antennenvarianten.

Die verwendeten Testchips haben exakt die gleichen Dimensionen wie die Radarchips für den Demonstrator. Daher ist der Werkzeugeinsatz der gleiche wie für den Demonstrator. Die einzige Ausnahme ist, dass die Chips in dieser Ausführung am unteren Rand aus der Moldmasse rausragen müssen, was für die spätere Charakterisierung relevant ist. Die Chips in diesem Fall sind komplett verkapselt, so dass die Chippads geöffnet werden müssen (Abbildung 57).

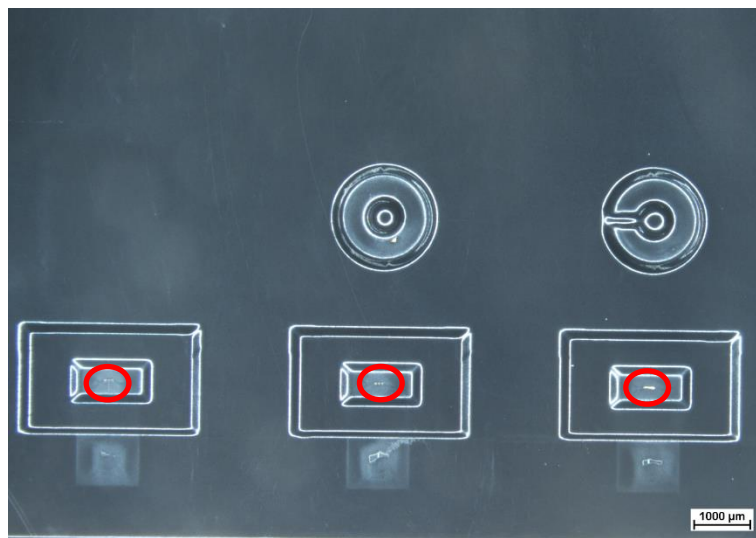


Abbildung 57: Ausschnitt aus dem Bereich um die übermoldeten Chips und Antennenformen, wobei die Studbumps aus der Moldoberfläche herausragen (roter Kreis).



Nach Öffnung der Chippads mit dem Laser kann ein elektrischer Kontakt zwischen beiden distalen Chipenden gemessen werden (Abbildung 58).

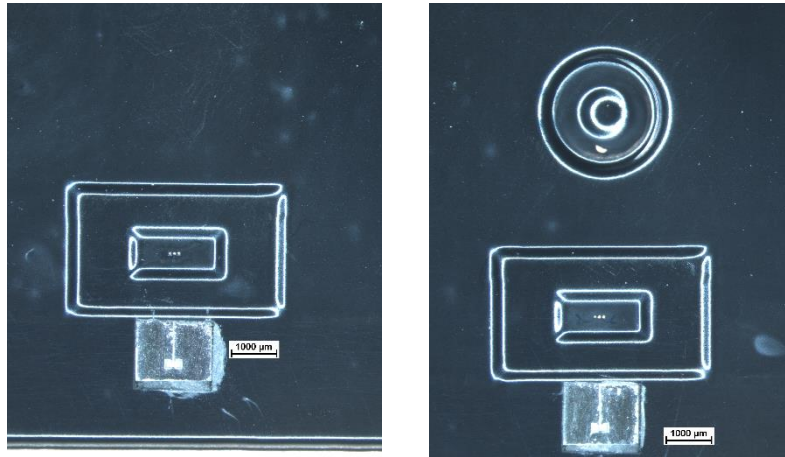


Abbildung 58: Öffnung der Chippads.

Diese Aufbauten wurden laserstrukturiert und metallisiert. Dafür wurden die geöffneten Chipbereiche wiederum mit Klebeband verkapselt (Abbildung 59).



Abbildung 59: Verkapselung der geöffneten Chipbereiche mit Klebeband.

Bei der Laserstrukturierung ergibt sich die Herausforderung, neben der Oberflächenstrukturierung die Stud-Bumps freizulegen. Die Tiefe des Abtrags zur Freilegung der Stud-Bumps muss über die Anzahl an Überfahrten beim Viabohren ermittelt werden. Ziel ist die prozesssichere Freilegung ohne Schädigung der Stud-Bumps. Wenn die Studbumps aus der Moldmasse herausragen wird der Prozess erleichtert.

## 8.5 Funktionsmuster

Um die aktiven Radarchips mit den nötigen Signalen zu versorgen und um die dazu nötigen Drahtbonds zu schützen werden diese komplett übermoldet (vgl. Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 25). Für die Signalverteilung innerhalb des Packages muss die Oberseite der Umverdrahtungs-PCB in der Nähe des Chips strukturiert werden um an diesen Stellen die Drahtbonds platzieren zu können. Durch Verwendung einer zweilagigen PCB für das Package, welches auf der Unterseite direkt auf das Radarfrontend gelötet wird, werden die Signalkreuzungen mittels Drahtbonds durchgeführt. Die PCB ist in Abbildung 60 dargestellt. Auf der Unterseite des aktiven Packages ist ein Exposed Pad platziert, um die Wärme des Radarchips auf das Frontend ableiten zu können.

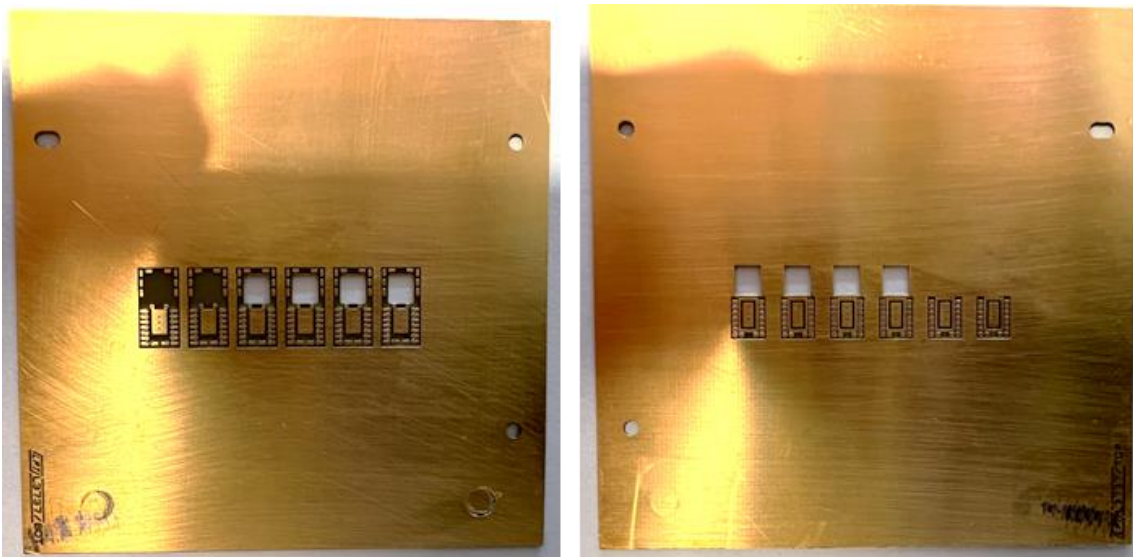


Abbildung 60: Unterseite (links) und Oberseite (rechts) der PCBs für die Speisung des Radarchips im aktiven Package.

Durch die kleinen Strukturen des Radarchips und die charakteristischen Größen von QFN-Packages ergeben sich sehr kleine Löt- bzw. Bondpads. Die Größenanforderungen liegen an der technischen Machbarkeitsgrenze des Standard PCB-Prozesses (Abbildung 61). Die Verschiebung des Vias zum Pad resultiert durch das Spindelmaß der Fertigungsmaschinen. Da keine Gefahr für einen Kurzschluss besteht und über die Löt pads des Packages keine HF-Signale geführt werden, können die Toleranzen akzeptiert werden.



Abbildung 61: Pads der Package-PCB. Viaverschiebung durch fertigungsbedingte Toleranzen.

## 7. Systemintegration und -demonstration

Aufgrund von technologischen Schwierigkeiten beim Packaging, Produktabkündigungen bei essentiellen und nur unter großem Aufwand zu ersetzenden Chemikalien für den zentralen Prozess und den damit verbundenen Mehraufwänden und zeitlichen Verzögerungen war der Aufbau der Funktionsmuster mit aktiven Radarchips zum Zeitpunkt des finalisierten Berichts noch nicht abgeschlossen. Die Forschungseinrichtungen haben jedoch großes Interesse an den Ergebnissen, so dass die Arbeiten weitergeführt werden. Dies betrifft auch den Aufbau eines Radardemonstrators bestehend aus aktivem Radarchip und PCB. Damit sollen verschiedene Szenarien betrachtet werden, wie beispielsweise die aktive Patternmessung der Antennen und die monostatische Radarmessung.

## 8. Verwendung der Zuwendung

### Durchführende Forschungseinrichtungen

#### *Forschungseinrichtung 1 (federführend):*

Hahn-Schickard

Allmandring 9b

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. André Zimmermann

#### *Forschungseinrichtung 2:*

Institut für Mikrowellentechnik

Universität Ulm

Albert-Einstein-Allee 41

89081 Ulm

Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. Christian Waldschmidt

### Personaleinsatz

#### *Forschungseinrichtung 1:*

Wissenschaftlich-technisches Personal: 21,25 Personenmonate

Technisches Fachpersonal: 16,41 Personenmonate

#### *Forschungseinrichtung 2:*

Wissenschaftlich-technisches Personal: 27 Personenmonate

Studentische Hilfskraft: 0 Personenmonate

### Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Forschungsziele notwendig und angemessen.

## **9. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse**

### **Innovativer Beitrag**

Die Kombination von kostengünstigen PCB-Technologien und Packaging mittels Film Assisted Molding (FAM) sowie selektiver laserbasierter Metallisierung des Packages für Antennen für den mmWellenbereich über 100 GHz bietet eine Vielzahl von Vorteilen. PCB-Technologien sind ebenso wie FAM kostengünstig und großserientauglich. Das FAM Packaging ermöglicht zusätzlich eine verbesserte mechanische Stabilität und Schutz für die integrierten Radarchips und Aufbauten, was die Zuverlässigkeit der Aufbauten erhöht. Durch FAM können zudem kleinere und kompaktere Designs realisiert werden. Die Realisierbarkeit von Antennenstrukturen auf der Packageoberfläche eröffnet neue Möglichkeiten für Radaraufbauten im mmWellenbereich, welche z. B. in der 5G- und sogar zukünftigen 6G-Kommunikation eingesetzt werden können. Antennenstrukturen direkt auf dem Package sparen außerdem Platz und ermöglichen eine höhere Integrationsdichte. Durch die mögliche Präzision bei der Erzeugung von feinen metallisierten Strukturen kann darüber hinaus die Leistung und Effizienz der Antennen optimiert werden. Die LDS-Technologie zur Erzeugung von feinen Leiterbahnstrukturen ist auf thermoplastischen Werkstoffen bereits etabliert, so dass die Anwendung der Technologie auf duroplastischen EMC die konsequente technologische Weiterentwicklung darstellt.

Die im Projekt erarbeitete Prozesskette kann somit zur Entwicklung von innovativen Millimeterwellen-Radarsensoren mit besonders effizienter und gerichteter Abstrahlung beitragen.

### **Voraussichtliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse**

Um die Praxisrelevanz sicherzustellen erfolgte die Bearbeitung des Projektes in enger Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses. Die Forschungseinrichtungen stehen auch nach Projektabschluss in engem Kontakt zu den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses. Die involvierten Unternehmen decken dabei die gesamte Prozesskette ab, wobei auch Hersteller von HF-Modulen und Anwender involviert sind. Dadurch konnten unterschiedliche Einsatzkonzepte und prozess- und materialübergreifende Einflussfaktoren betrachtet werden. Das im

Projekt erarbeitete Wissen kann unmittelbar von interessierten Firmen genutzt werden. Längerfristig können KMU mit dem erarbeiteten Wissen ihren Vorsprung im Bereich der Hochfrequenzanwendungen und Antennenintegration weiter ausbauen. Zudem können die umfassenden Charakterisierungsergebnisse der LDS-fähigen EMC dazu beitragen, dass diese Materialklasse zur Entwicklung neuer Produkte im Bereich HF-Technik beiträgt. Insbesondere konnte durch die aufeinander abgestimmten Prozesse das große Potenzial der LDS- und AMP-Technologie im Feld der Millimeterwellen-Antennenintegration aufgezeigt werden, was die PCB-Technologie erweitert und neue Möglichkeiten bietet. Weiterhin können die Ergebnisse dazu beitragen, für KMU die Schwelle zu senken um in die Produktentwicklung von hochintegrierten Radar- und Kommunikationssysteme im Millimeterwellenbereich einzusteigen.

## 10. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit:

Kat.	Maßnahme	Ziel und Rahmen	Datum/ Zeitraum
A	Beratung des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	A1: Vorstellung des geplanten Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	16.02.2022
		A2: Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und Diskussion weiteres Vorgehen	06.12.2022
		A3: Abschlusspräsentation und Diskussion der erzielten Ergebnisse	18.12.2023
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Präsentation der bisherigen Ergebnisse auf einer Messe: Electronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V.	2022
		B2: Vorstellung der bisherigen Ergebnisse: Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	2022
		B3: Präsentation erster Ergebnisse auf internationalen, einschlägigen ingenieurwissenschaftlichen Veranstaltungen: Industrieausstellung Internationaler MID Kongress	2023
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten über den aktuellen Stand: Homepage	Jährlich
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre bzw. Durchführung von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten	D1: Ausbildung der Studenten verschiedener Studienrichtungen	jährlich

## Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit:

Kat.	Maßnahme	Ziel und Rahmen	Datum/ Zeitraum
A	Beratung und Akquisition von Firmen	A1: Abschlussbericht und alle Projektergebnisse werden dem PA zur Verfügung gestellt.	2024
		A2: Akquisition von Firmen aus dem Mitgliederkreis von Hahn-Schickard, insbesondere KMU, für geeignete Kooperationen in Form von Direktaufträgen, Verbundprojekten etc.	Nach Abschluss des Projektes
		A3: Übernahme der erzielten Ergebnisse in die Fertigungslinie TransferFab bei Hahn-Schickard und Integration in das BMWK-geförderte Schaufenster „Smarte Sensorsysteme für die Produktion im branchenübergreifenden Einsatz“ bei Hahn-Schickard	Nach Abschluss des Projektes
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse: Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	Nach Abschluss des Projektes
		B2: Vorstellung der im Projekt erzielten Ergebnisse auf einer Messe, z.B. Electronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V.	2024
		B3: Präsentation der Ergebnisse: MID Summit & MID Workshop	2024
		B5: Vorstellung der erzielten Ergebnisse: Jahresbericht Hahn-Schickard	2024
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten: Homepage	2024
		C2: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse in einer Fachzeitschrift, z.B. Microwave Journal	Nach Abschluss des Projektes
		C3: Präsentation auf einer Tagung, z. B. EMW-Tagung	Nach Abschluss des Projektes
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre, Aus- und Weiterbildung bzw. Durchführung von studentischen Arbeiten	D1: Ausbildung der Studenten verschiedener Studienrichtungen	Nach Abschluss des Projektes



## **11. Danksagung**

Das IGF-Vorhaben Nr. 21387 N der Forschungsvereinigung Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. wurde über die AiF / den DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Dem projektbegleitenden Ausschuss sei für die Unterstützung, Bereitstellung von Materialien und die wertvollen Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen gedankt.

Abschließend wollen wir noch allen Kolleginnen und Kollegen der Forschungseinrichtungen danken, die sowohl bei der Durchführung der Versuche als auch beim Projektmanagement involviert waren.