

Schlussbericht vom 28.02.2025

zu IGF-Vorhaben Nr. 21978 N

Thema

Entwicklung eines konformen Millimeterwellen-Antennen-Arrays in LDS-MID-Technologie (KOM-MID)

Berichtszeitraum

01.09.2021 – 31.8.2024

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Forschungseinrichtungen

Hahn-Schickard

Universität Stuttgart - Institut für Hochfrequenztechnik

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung des Berichts	3
2	Einleitung und Zielsetzung	4
3	Spezifikation, Design und Simulation	8
3.1	Konzept 3D-Gesamtsystem.....	8
3.2	Schaltungskonzept	8
3.3	Detaillkonzept Antennenarray	8
3.4	Konzept Basisleiterplatte	12
3.5	Ankontaktierung der Sektorelemente an das PCB	13
3.6	Ankontaktierung der Antennenstrahler an Sektorelemente	14
3.7	Konzept zum Wärmemanagement	15
4	Materialcharakterisierung.....	17
5	Kontaktierung BGA auf MID	19
6	Herstellung HF-Teststrukturen und Demonstrator.....	27
6.1	Spritzprägewerkzeug und Simulation des Spritzprägeprozesses	27
6.2	HF-Teststrukturen.....	28
6.3	Verbindung Antennenstrahler	31
6.4	Sektorelemente für Demonstrator.....	32
7	Verwendung der Zuwendung	33
8	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse 34	
9	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	35
10	Danksagung.....	37

1 Kurzfassung des Berichts

Im Vorhaben wurde ein Konzept für ein Funksystem mit hemisphärischer Abdeckung mittels einem Antennenarray aus 8 Sektoren mit insgesamt 64 Kanälen bei einer Arbeitsfrequenz von 28-30 GHz erarbeitet. Die Auslegung des Systems umfasst Aspekte der 3D-Anordnung der Antennen im Raum, des Frequenzgangs der Antennenarrays, der Kontaktierung der notwendigen Hochfrequenz-Bauelemente, thermische Aspekte des Funksystems, Übergänge zwischen Schaltungsträgern und deren Hochfrequenzeigenschaften sowie das Design einer Leiterplatte zur mechanischen und elektrischen Verbindung der 8 Sektoren. Das System basiert auf LDS-MID (Laserdirektstrukturierte Molded Interconnect Devices oder Mechatronic Integrated Devices). Die 3D-Designfreiheit von LDS-MID erlaubt dabei 3D-Leiterstrukturen und neuartige Antennenkonzepte, welche auf planaren Schaltungsträgern nicht realisierbar sind

Die umfassende Charakterisierung von Permittivität und Verlustfaktor des eingesetzten Thermoplasten PEEK LDS war die Basis für eine genaue Auslegung der HF-Strukturen auf die relevanten Arbeitsfrequenzen.

Zur Kontaktierung der notwendigen HF-Bauelemente in einem BGA Package mittels Lötten wurde eine Prozesskette auf LDS-MID entwickelt, die es ermöglicht auf nicht-planaren Schaltungsträgern Lötstopplack zu applizieren und zu strukturieren. Die Prozesskette wurde anhand von Daisy-Chain-Aufbauten mittels Schertests, Röntgenbildern, Widerstandsmessungen und Schlifffbildern verifiziert.

Zur Herstellung von Grundkörpern für planare Testsubstrate, 3D-Sektorelemente und Antennenstrahler wurde ein Spritzprägeprozess erarbeitet und optimiert. Anschließend wurde das Layout für die jeweiligen Schaltungsträger mittels LDS-MID Prozess auf die Schaltungsträger übertragen. Die Laserdirektstrukturierung ermöglicht dabei die Realisierung von HF-tauglichen 3D-Leiterstrukturen, allerdings ist die Realisierung einer Vielzahl von lasergebohrten Vias in geringem Abstand zueinander in unmittelbarer Nähe zu Leiterstrukturen mit geringem Abstand herausfordernd.

2 Einleitung und Zielsetzung

Für verschiedene Anwendungen der drahtlosen Kommunikation besteht ein Trend hin zu immer höheren Datenraten. Das führt zur Verwendung immer höherer Übertragungsfrequenzen, hin zu den sog. Millimeterwellen (mm-Wellen) bei Frequenzen größer als ca. 30 GHz. Ein ähnlicher Trend hin zu mm-Wellen ist im Radarbereich zu verzeichnen, wo durch steigende Frequenzen deutlich höhere räumliche Auflösungen ermöglicht werden. Diese extrem hohen Frequenzen stellen für die Aufbau- und Verbindungstechnik der mm-Wellen-Systeme große Herausforderungen dar, was zu beachtlichen Kosten führt. Dem gegenüber steht die stark wachsende Anzahl benötigter mm-Wellen-Systeme für Mobilfunk, Industrial-IoT, Smart-City und KFZ-Radarsensorik. Um künftige mm-Wellen-Systeme wirtschaftlich herstellen zu können, werden neue Systemkonzepte und Technologien benötigt.

Im mm-Wellen-Bereich ist die Wellenausbreitung durch eine hohe Freiraumdämpfung zwischen Sender und Empfänger gekennzeichnet, welche mit dem Quadrat der Frequenz wächst. Zur (zumindest teilweisen) Kompensation der hohen Freiraumdämpfung können Antennen mit hohem Richtfaktor beim Sender und/oder Empfänger verwendet werden. Antennen mit hohem Richtfaktor weisen eine räumlich selektive, schmale Strahlungskeule auf. Um den abgedeckten Bereich zu erhöhen, ist es vorteilhaft, wenn die Antenne die Strahlungskeule adaptiv schwenken kann, was durch adaptive Antennen-Arrays erreicht werden kann.

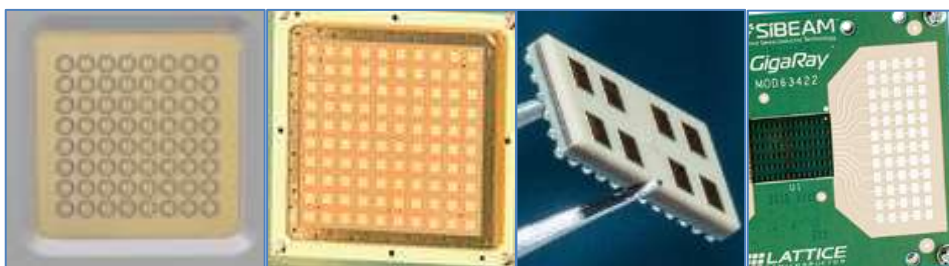


Abbildung 1: Varianten von mehrlagigen planaren Antennen für mm-Wellen verschiedener Hersteller (v.l.n.r.: Anokiwave/Ball, IBM, Intel, SiBeam)

Solche adaptiven Antennen-Arrays bestehen heute aus einer dichten planaren Anordnung einer Vielzahl von Einzelstrahlern, welche von der Elektronik geeignet angesteuert werden. Bislang typische Antennenelemente für Antennen-Arrays im Bereich der mm-Wellen sind sogenannte „*stacked patch*“ Antennen. Abbildung 1 zeigt Antennenarrays verschiedener Hersteller, welche beispielsweise als Mehrlagenleiterplatten (Abbildung 2) implementiert sind.

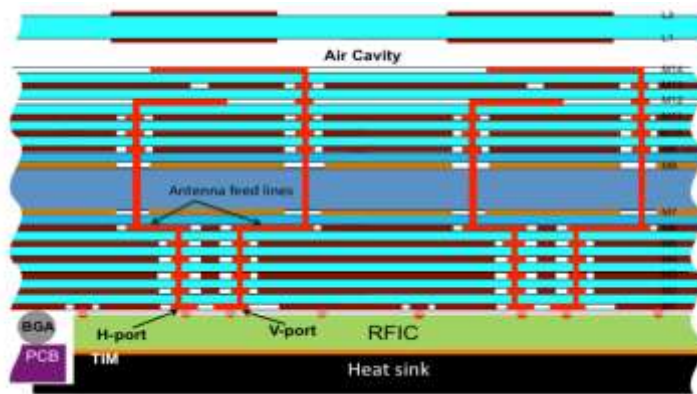


Abbildung 2: Typischer Schichtstapel eines planaren Antennen-Arrays im Bereich der mm-Wellen: Dual-linear polarisierte stacked patch Antenne für 28 GHz von IBM

Diese Antennen basieren auf etablierten Entwurfsverfahren und breit verfügbaren Herstellungstechnologien, weisen aber eine geringe Effizienz (große Signalverluste) auf. Zudem müssen die zu verwendenden Leiterplattenmaterialien (meist basierend auf PTFE) für die hohen Frequenzen tauglich sein und sind daher teuer.

Ein weiterer Kostentreiber solcher Mehrlagenstrahler ist die Vielzahl der, die einzelnen Strahler zaunförmig umschließenden, metallischen Durchkontaktierungen (Vias). Diese Vias sind zur Unterdrückung der sog. Oberflächenwellen zwingend notwendig. Darüber hinaus führen auch die benötigten Fertigungstoleranzen zu weiteren Kosten. Bedingt durch die planare Leiterplattentechnologie ist die Konstruktion von bauraumkonformen Antennenarrays nicht möglich. Zusätzlich ist das Schwenken der Strahlungskeule durch die planare Anordnung beschränkt. Eine 360° Abstrahlung kann daher nur durch eine aufwändige Montage mehrerer Antennenarrays erreicht werden.

Weiterhin ist das Wärmemanagement bei mm-Wellen-Systemen besonders aufwändig, da Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMIC) für mm-Wellen sehr ineffizient arbeiten und viel Wärme erzeugen. Ein einzelner MMIC kann dabei Verlustleistungen von bis zu 2 Watt erzeugen. Insbesondere bei MIMO-Antennenarrays entsteht viel Verlustwärme die abgeführt werden muss. In planarer Aufbautechnik stellt dies ein signifikantes Problem dar, da im Allgemeinen die Vorderseite des MIMO-Antennenarrays von den Patchantennen bedeckt ist und auf der Rückseite die MMICs platziert werden. Dadurch sind die geometrischen Möglichkeiten für die Anbringung externer Kühlkörper stark limitiert.

Die MID-Technologie (Molded Interconnect Devices oder Mechatronic Integrated Devices), insbesondere die Laserdirektstrukturierung (LDS), ermöglicht die Realisierung von 3D-Leiterbahnstrukturen auf spritzgegossenen Kunststoffbauteilen und bietet durch die Funktionsintegration in drei Dimensionen viele Möglichkeiten bei der 3D-Gestaltung und Miniaturisierung von neuen Produkten und hat daher ein großes Potential zum Aufbau von mm-Wellen-Systemen. Für konventionelle mechatronische Systeme hat die Technologie ihr Potential zur wirtschaftlichen Realisierung von räumlichen Schaltungsträgern aus unterschiedlichen Materialien schon oft unter Beweis gestellt. Ein typisches Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt.

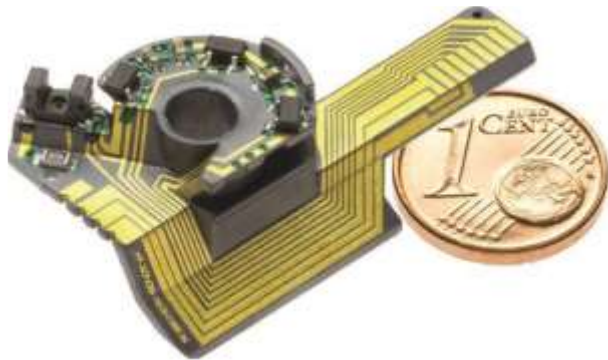


Abbildung 3: Positionssensor für adaptive Geschwindigkeitsregelung in LDS-MID-Technologie

Im Vergleich zu PCB ist jedoch bei LDS-MID die Anzahl der Schaltungslagen begrenzt. LDS-MID sind auf zwei Lagen begrenzt, die Vorder- und die Rückseite des Teils, die mit Durchkontaktierungen verbunden sind. Hybride Ansätze, die die Vorteile beider Technologien nutzen, können aber zusätzliche Vorteile bieten.

Die Prozesskette zur Herstellung von LDS-MID ist in Abbildung 4 dargestellt. Das 3D-Bauteil wird aus einem Thermoplasten, welcher ein laseraktivierbares Additiv enthält, spritzgegossen. Die Erzeugung der 3D-Leiterbahnstruktur erfolgt mit einem 3D-Laserstrukturierungsprozess, bei dem die Oberfläche des Bauteils mikraufgeraut und für den nachfolgenden außenstromlosen chemischen Metallisierungsprozess selektiv aktiviert wird. Nach einem in der Regel nasschemischen Reinigungsschritt erfolgt zuerst die außenstromlose Metallisierung mit Kupfer. Aufbauend darauf können verschiedenen Oberflächenfinishes wie z.B. Nickel/Gold (ENIG) abgeschieden werden.



Abbildung 4: Prozesskette zur Herstellung von LDS-MID

Übergeordnetes Ziel von KOM-MID ist die Entwicklung eines Moduls für 5G Anwendungen bei Millimeterwellenfrequenzen (ca. 30-40 GHz) mit omnidirektional-schwenkbarer („360 Scan“) Strahlungscharakteristik auf der Basis eines LDS-MID. Die 3D-Designfreiheit von LDS-MID erlaubt dabei 3D-Leiterstrukturen und neuartige Antennenkonzepte, welche auf planaren Schaltungsträgern nicht realisierbar sind und eine verbesserte Funkleistung bei gleicher elektrischer Leistungsaufnahme versprechen.

3 Spezifikation, Design und Simulation

3.1 Konzept 3D-Gesamtsystem

Das Ziel eines Funksystems mit hemisphärischer Abdeckung der fokussierten Antennenstrahlungskeulen soll mit einem kuppelförmigen Aufbau erreicht werden, der sich aus 8 Sektoren zusammensetzt, die unter einem Winkel von 45 Grad angeordnet sind. Jeder Sektor weist ein dual-polarisiertes 2x2-Antennenarray auf. Während sich die Antennen-Strahlerelemente auf der Außenseite der kuppelförmigen Struktur befinden, ist die Ansteuerelektronik auf der Innenseite platziert (Abbildung 5).

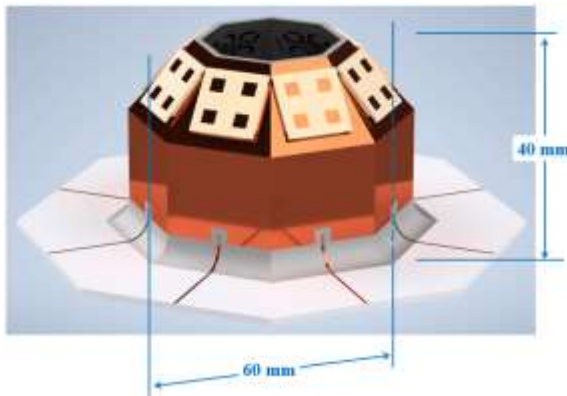


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Gesamtsystems

3.2 Schaltungskonzept

Zur Ansteuerung eines dual-polarisierten 2x2-Antennenarrays (d.h. 8 Kanäle) soll ein Chip vom Typ AWMF-0198 des Herstellers Anokiwave dienen. Alternative Chips und Hersteller wurden evaluiert. Damit ist die Arbeitsfrequenz auf den Bereich 28 – 30 GHz festgelegt. Der Chip wird auf dem Sektorelement mit einem Signalfrequenz-Verachtfaucher (bestehend aus HMC370 und HMC942 der Firma Analog Devices) angesteuert. Damit wird der Übergang vom Board der planaren Testumgebung auf die Sektoren des kuppelförmigen Aufbaus bei 3.50 – 3.75 GHz arbeiten.

3.3 Detailkonzept Antennenarray

Der kuppelförmige Aufbau mit 8 Sektoren und mit je einem gekippten 2x2-Antennenarray pro Sektor ermöglicht in der gewählten Größe eine hemisphärische Strahlenschwenkung über einen großen Bereich (360 Grad Azimut, 80 Grad Elevation) mit geringer Intensitätsvariation. Für das Antennen-Strahlerelement wird eine direkt gespeiste Patch-Struktur verwendet. Diese erreicht die gewünschte Bandbreite bei gleichzeitiger Einhaltung der Limitierungen der Herstelltechnologie. Als Material für

Sektorelement und Antennenstrahler ist TECACOMP PEEK LDS black 1047045 (PEEK LDS) vorgesehen.

Unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen und des Systemkonzeptes wurden Antennen-Strahler und Signalleitungen zwischen Chip und Antenne inklusive Vias entworfen. Für die kritischen Design-Teile wurden experimentell testbare Teststrukturen entworfen.



Abbildung 6: Konzept und Design Sektorelement mit Antennenstrahler

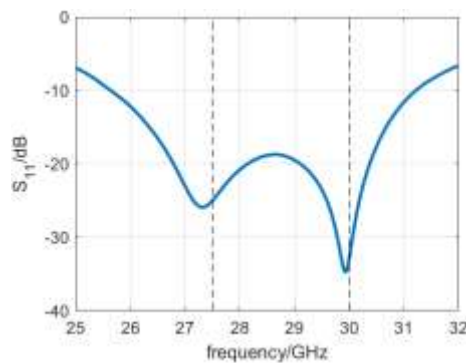
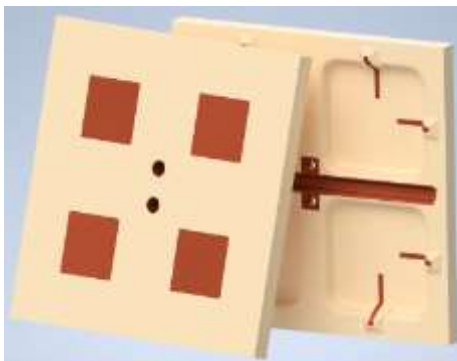


Abbildung 7: Links: Design Antennenstrahler. Rechts: Anpassungsfrequenzgang

Das 3D-Sektorelement mit Antenne, Versorgungs- und Signalleitungen sowie den benötigten integrierten Schaltungen (Transmitter, Frequenzvervielfacher) wurde unter Berücksichtigung hochfrequenztechnischer und fertigungstechnologischer Randbedingungen entworfen. Es wurde ein Design-Flow für den Datentransfer zwischen den verschiedenen CAD-Tools implementiert. Die per elektromagnetischer Feld-Simulation ermittelten Abstrahlungseigenschaften der Antenne, insbesondere im Hinblick auf Frequenzbandbreite, sind hervorragend. Besonderes Augenmerk wurde auf den hochperformanten, innovativen, millimeterwellentauglichen Übergang der Signalleitung vom Transmitter-IC zum Antennenelementen gelegt. Abbildung 6 und 7 zeigen exemplarisch die entworfenen Strukturen.

In einer zweiten Iteration wurden Details der Antennenstruktur und der Ankopplung der Antenne an den BGA-Chip (Millimeterwellenschaltung) im Wechselspiel von fertigungstechnischen Gesichtspunkten und Anforderungen der Hochfrequenztechnik optimiert. Abbildung 8 zeigt die finale, optimierte Struktur mit funktionalen Details.

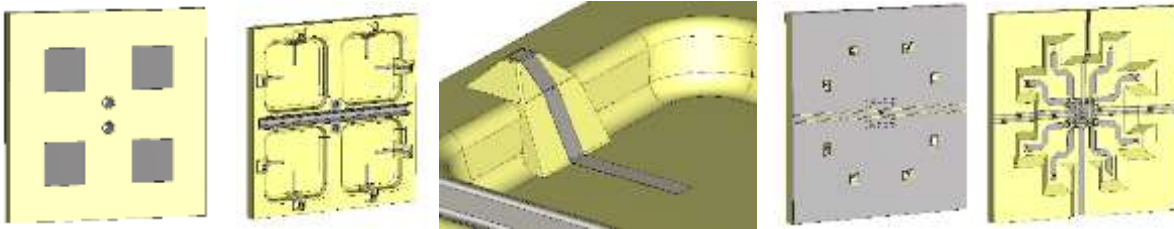


Abbildung 8: Finale Struktur. Links, Mitte: Antennenelement. Rechts: Sektorelement

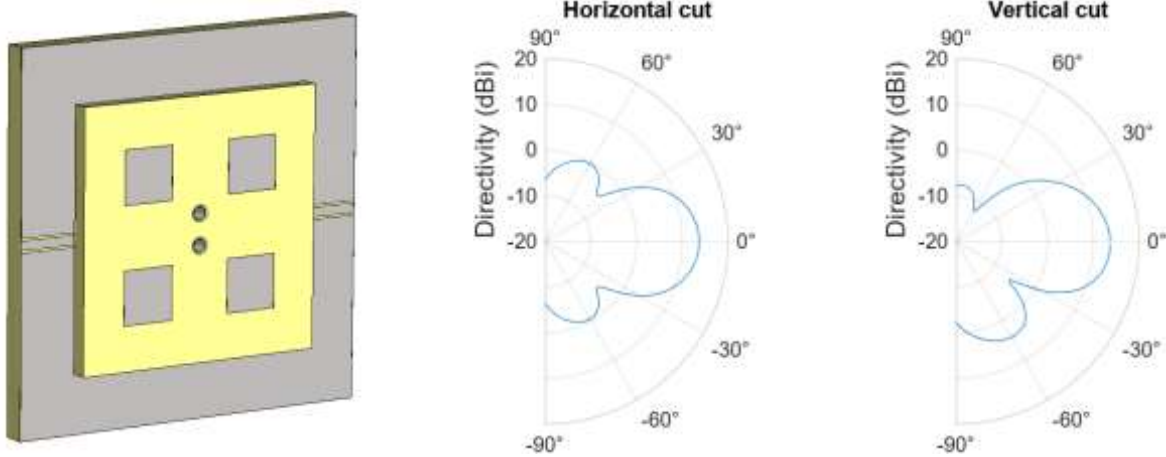


Abbildung 9: Links: 2x2 Patchantennen-Arrays auf einem Sektorelement montiert. Mitte, rechts: Strahlungsdiagramm

Die aus der finalen Struktur resultierenden Antennenstrahlungsdiagramme wurden mittels elektromagnetischer Feldsimulation bestimmt. Für den Beispielfall der gleichen Ansteuerung aller vier dual-polarisierten Patchantennen eines Sektorelementes ergibt sich das in Abbildung 9 gezeigte Strahlungsdiagramm (Frequenz 28.5 GHz, Richtfaktor 13.7 dBi).

Besonders kritisch und zugleich technologisch anspruchsvoll ist das Design der Durchkontaktierungen am BGA-Chip mit den in der unmittelbaren Nähe liegenden Hochfrequenzleitungen vom Chip zur Antenne. Im Abgleich mit Hochfrequenzsimulationen wurde ein technologisch machbares Design definiert. Abbildung 10 zeigt das Detail am BGA mit Durchkontaktierungen zur Masse und einem BGA-Pin mit Anschlussleitung zur Antenne sowie die simulierte optimierte Antennenanpassung aus Sicht des BGA-Pins.

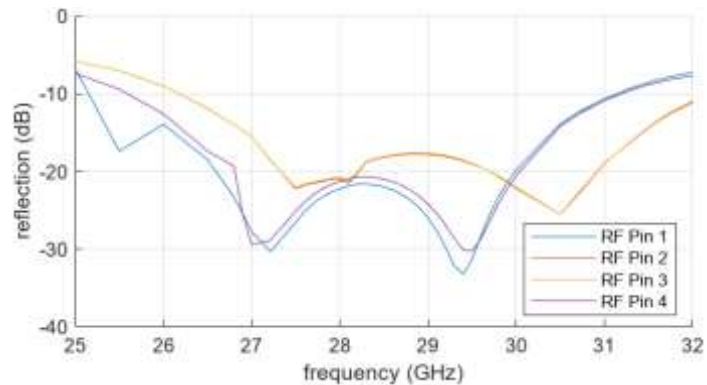
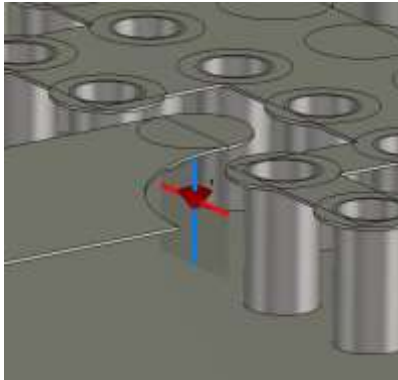


Abbildung 10: Hochfrequenz-Simulationsmodell (Dielektrikum transparent zur besseren Sichtbarkeit). Links: Durchkontaktierungen am BGA mit einem BGA-Pin zur Antennenspeiseleitung. Rechts: Antennenanpassung aus Sicht der BGA-Pins

Für erste Untersuchungen wurden Schaltungen, Leiterplatten und kritische Detailstrukturen für die Frequenzvervielfachung und die Ansteuerung/Programmierung des BGA-Chips entworfen. Abbildung 11 zeigt exemplarisch die entsprechenden Komponenten.

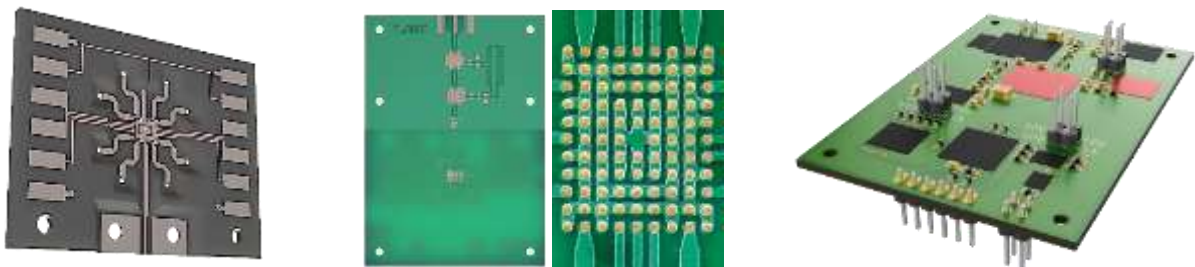


Abbildung 11: Links: Vereinfachte 3D-Teststruktur für Transmitter und Antenne. Mitte: Mikrowellenstruktur mit Frequenzvervielfacher, BGA-Chip und mit einfacher Antenne auf planarem Board (Detailansicht: BGA-Pattern). Rechts: Digitale Ansteuer-/Programmierschaltung für den BGA-Transmitter-IC

Die integrierten Schaltungen für den Frequenzvervielfacher wurden erarbeitet und im Hinblick auf ihr Funktionsverhalten messtechnisch analysiert.

Die Schaltung zur digitalen Ansteuerung/Programmierung des BGA-Transmitter-IC wurde aufgebaut und getestet. Die zur Ansteuerung/Programmierung des BGA-Transmitter-IC benötigten Daten wurden analysiert und die dazugehörige Software wurde in Betrieb genommen.

3.4 Konzept Basisleiterplatte

Zur nachfolgenden Montage und Inbetriebnahme der Sektorelemente wurde eine Basisleiterplatte erarbeitet. Die mehrlagige Basisleiterplatte wird in herkömmlicher Leiterplattentechnologie gefertigt. Auf sie werden die 8 Sektorelemente mit jeweils 45 Grad montiert, welche dann eine Halbkugel-Struktur ergeben. Dazu weist die Basisleiterplatte entsprechende mechanische Features (Nuten) auf. Der hochfrequente Übergang von der Basisleiterplatte auf das Sektorelement erfolgt bei 3.4375 - 3.75 GHz. Auf dem Sektorelement erfolgt die Frequenzvervielfachung mit Faktor 8, so dass der BGA-Transmitter-IC mit 27.5 - 30 GHz angesteuert wird. Dieser Übergang weist einen Winkel von knapp 90 Grad auf und wird auf Seite der Basisleiterplatte impedanzangepasst. Die Basisleiterplatte enthält die Hochfrequenzleitungen zur Ansteuerung an alle 8 Sektorelemente, einschließlich eines 1:8 Leitungsteilers und eines SMA-Anschlusses für einen externen Frequenzgenerator. Die Basisleiterplatte enthält funktional zudem die SPI-Schnittstelle für die Ansteuerung/Programmierung der BGA-Transmitter-IC sowie die Spannungsversorgung.

Die Basisleiterplatte wird als 3-Lagen-Leiterplatte (4 Metall-Lagen, 3 dielektrische Lagen) ausgeführt (Abbildung 12 links). Das ermöglicht definierte Hochfrequenzleitungen mit 50 Ohm Impedanz mit „eigener“ Massefläche und zugleich zwei Leitungslagen für Spannungsversorgung und Steuerung. Die Basisleiterplatte weist eine zentrale, große, runde Öffnung unter der halbkugelförmigen 8-Sektor-Struktur auf, um die effiziente thermische Belüftung zu ermöglichen (Abbildung 12 Mitte).

Der BGA-Transmitter-IC weist zur Steuerung und Programmierung eine SPI-Schnittstelle auf. Die SPI-Taktrate ist maximal 50 MHz. Damit können Amplitude und Phase der Ansteuerung von 4 dual-polarisierten Antennenelementen eingestellt werden. Der BGA-Transmitter-IC benötigt zudem ein passend geschaltetes enable Signal („RF_EN“) am Pin F1.

Die Sektorelemente benötigen 1.2 V Versorgungsspannung für den BGA-Transmitter-IC und 4.5 V Versorgungsspannung für die Frequenzmultiplizierer. Der Leistungsverbrauch von 0.69 W des BGA-Transmitter-IC entspricht 575 mA, hinzu kommen zusammen 313 mA der beiden Frequenzmultiplizierer. Die 8 Sektorelemente zusammen benötigen dementsprechend den achtfachen Strom. Die Spannungsversorgung der Basisleiterplatte muss also (bei 20% Marge) 5.5 A bei 1.2 V und 3 A bei 4.5 V bereitstellen. Der Leistungsbedarf eines Prozessors für Steuerung und SPI-Schnittstelle kommt hinzu.

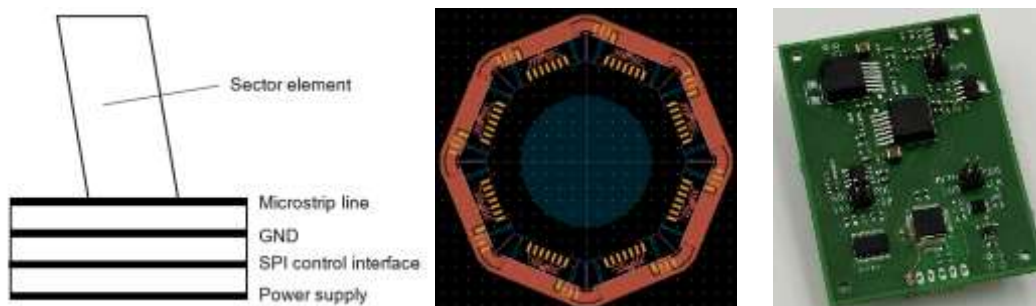


Abbildung 12: Basisleiterplatte. Links: Lagenstruktur. Mitte: ADS-Layout (ohne Spannungsversorgung und ohne Prozessor). Rechts: separate Leiterplatte für Spannungsversorgung und Prozessor

Aus Gründen der Praktikabilität wurden Spannungsversorgung und Prozessor auf einer von der Basisleiterplatte getrennten Leiterplatte aufgebaut (Abbildung 12 rechts). Diese Spannungsversorgung bietet genügend Kapazität für zunächst 1-2 Sektorelemente.

3.5 Ankontaktierung der Sektorelemente an das PCB

Die einfachste Möglichkeit zur Ankontaktierung des Sektorelements ist eine einfache Kantenmetallisierung ähnlich einem QFN Package. Dies hat aber durch den relativ langen senkrechten Signalpfad höheres Störpotential auf die transportieren HF-Signale. Eine Variante dieses Konzeptes wäre ein Castellated Via, welches eine halbrunde Vertiefung im Sektorelement vorsieht, in der sich beim Lötvorgang ein Lotminiskus ausbildet. Um den Signalübergang zwischen PCB und LDS-MID jedoch möglichst störungsarm bewerkstelligen zu können, ist eine möglichst kontinuierliche Signalleiterführung auf dem Übergang zwischen beiden Komponenten hilfreich. Dies ließe sich über eine Rampe im Sektorelement, welche auf dem PCB abgesetzt wird, bewerkstel-

ligen. Diese Rampe würde jedoch zu einer besonders dünnen Lötstelle führen, an deren Zuverlässigkeit Zweifel angebracht sind. Daher wurde eine Kombination beider Konzepte für die weitere Konzipierung und Simulation ausgewählt.

Die Kontaktierung des Antennenstrahlers ist aufgrund der notwendigen Genauigkeit bei der Montage kritischer zu sehen. Ein Versatz der Montageposition oder eine Variation in der Montagehöhe hätte direkte negative Auswirkungen auf die Performance des Antennenarrays. Daher muss das Konzept zu seiner Montage eine Zentrierung und eine Fixierung der Montagehöhe erlauben und mit den Gegebenheiten des Spritzgießwerkzeuges auskommen.

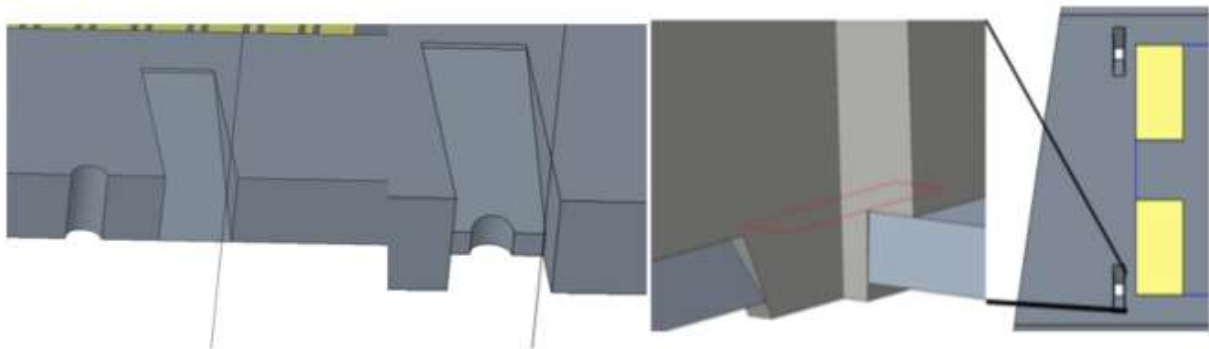


Abbildung 13: Kontaktierungskonzepte

Daher wurde eine Kombination aus Durchsteckmontage und elektrischer Verbindung durch Löten ausgewählt (Abbildung 13). Die Durchsteckmontage positioniert und zentriert hierbei den Antennenstrahler bis zur Lötung an den Seitenflächen. Zusätzlich können die Durchsteckstifte zum Beispiel noch mittels Klebstoff oder durch eine Heißverstemmung rückseitig fixiert werden.

3.6 Ankontaktierung der Antennenstrahler an Sektorelemente

Für die HF-taugliche Kontaktierung der Antennenstrahler an das Sektorelement wurde eine Geometrie entworfen, die auf einem Pyramidenstumpf basiert. Diese Geometrie findet sich in den beiden zu verbindenden Teilen als Ausformung bzw. Aussparung (Schlüssel/Schloss). Die Form ermöglicht eine Zentrierung der Antennenstrahler und den elektrischen Durchgang durch das Sektorelement. Dadurch kann an dieser Stelle auf lasergebohrte Vias verzichtet werden und gleichzeitig ein aus HF-Sicht möglichst wenig störender Übergang erzeugt werden.

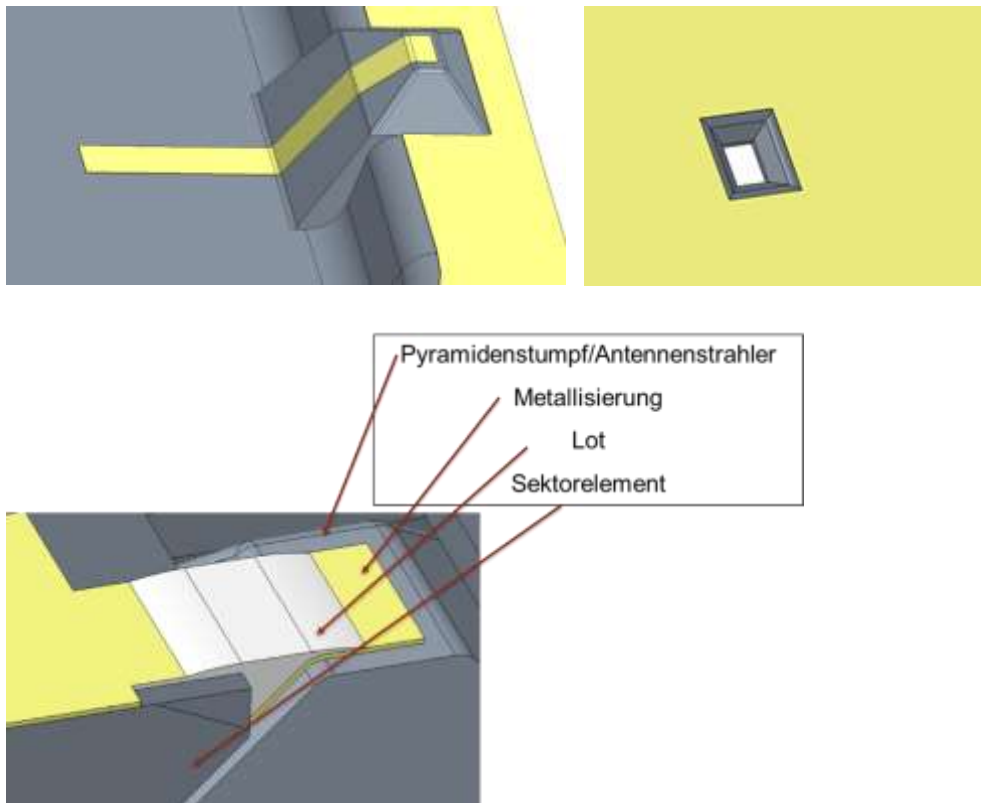


Abbildung 14: Kontaktierung Antennenstrahler zu Sektorelement (Lötverbindung in grau dargestellt)

3.7 Konzept zum Wärmemanagement

Aufgrund der hohen Verluste in der Hochfrequenztechnik muss insbesondere bei der Miniaturisierung besonderes Augenmerk auf das Wärmemanagement gelegt werden. Hierzu wurden verschiedene aktive und passive Kühlkonzepte erarbeitet, aus welchen abhängig von der späteren Verlustleistung eine geeignete Variante ausgewählt werden kann. Grundsätzlich sind passive Lösungen zu bevorzugen, da ihr Aufbau meist einfacher sowie günstiger ist. Zudem enthalten sie keine bewegten Teile, was sie weniger Anfällig für Ausfälle macht und kein zusätzliche Geräuschbelastung für das Umfeld bedeutet.

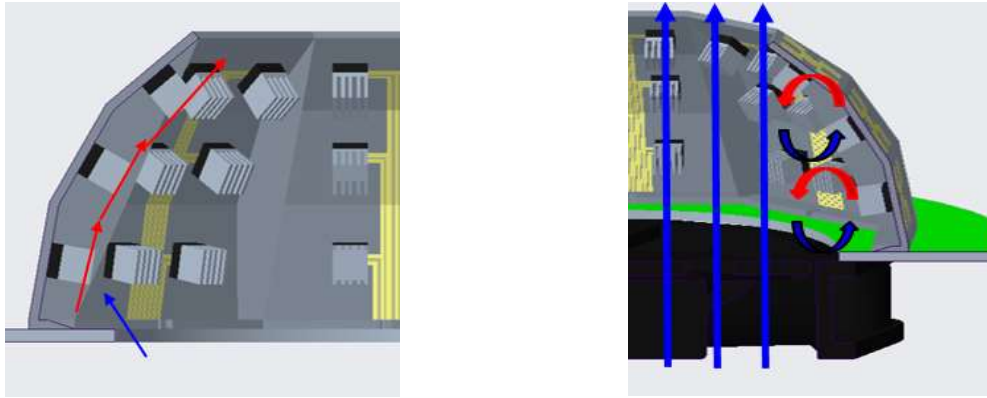


Abbildung 15: Kühlkonzept mit Kühlrippen: passiv (links) und aktiv (rechts)

Das einfachste und kostengünstigste Kühlkonzept sieht vor, Aluminium- oder Kupferkühlkörper direkt auf die innerhalb des Aufbaus befindlichen ICs zu kleben. Die Wärmeabfuhr erfolgt dann durch natürliche Konvektion an den Kühlrippen. Um einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten werden selbstklebende Wärmeleitpads verwendet. Diese weisen typischerweise Wärmewiderstände in der Größenordnung von $R_{th} = 2,7 \frac{K}{W}$ auf. Sollten Simulationen zeigen, dass hierdurch keine ausreichende Entwärmung des Aufbaus erzielt werden kann, besteht die Möglichkeit, durch das Anbringen eines Lüfters die Strömungsgeschwindigkeit und damit den Wärmeübergang an den Kühlrippen zu erhöhen. Beide Varianten bergen jedoch den Nachteil, dass die Kühlleistung vergleichsweise gering ist. Zudem kann durch die Form des Aufbaus wie in Abbildung 15 rechts dargestellt ein Bereich stagnierender Luft entstehen, welcher zu einer ungleichmäßigen Entwärmung der einzelnen ICs führt.

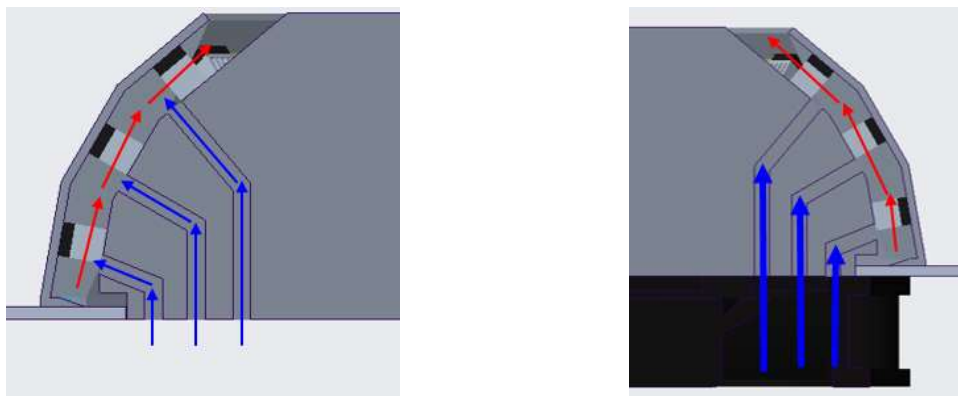


Abbildung 16: Kühlkonzept mit Kühlrippen und Strömungsführung

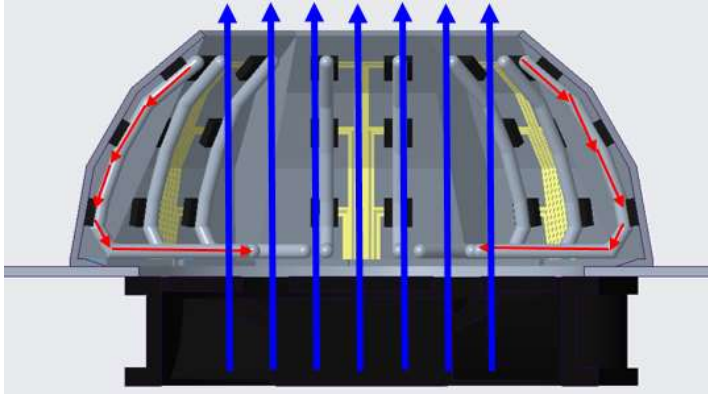


Abbildung 17: Kühlkonzept mit Heatpipes

Zuletzt wurde ein Konzept mit Heatpipes betrachtet (Abbildung 17). Innerhalb der Heatpipes wird die Wärme durch einen Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig und Dichteunterschiede von der Wärmequelle zur Wärmesenke transportiert. Dieses Kühlkonzept sieht die Verwendung von Heatpipes im Inneren des Aufbaus vor, um so die Abwärme der ICs weg vom Substrat in die Mitte des Aufbaus zu leiten. Dort erfolgt die Entwärmung zentral über ein noch zu definierendes aktives System. Dieses Kühlkonzept hat potentiell eine sehr hohe Kühlleistung. Dem gegenüber stehen allerdings der Aufwand spezielle Heatpipes anfertigen zu müssen und die Schwierigkeit einen guten thermischen Kontakt zwischen IC und Heatpipe sicherzustellen.

4 Materialcharakterisierung

Um die notwendigen Daten für die thermischen Simulationen bereitzustellen, wurden Zugprüfungen, CTE-Messungen und Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt. Die E-Modulmessungen zeigen eine Anisotropie der Zugfestigkeit des Materials Tecacomp PEEK LDS black 1047045 von 9404 MPa senkrecht (\perp flow) und 7617 MPa parallel (\parallel flow) zur Fließrichtung. Beim CTE ist diese Anisotropie lediglich bei den Werten über der Glasübergangstemperatur sichtbar (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ergebnisse der CTE Messung

		CTE	T<T _g CTE	T>T _g		
		[ppm/K]	[ppm/K]	T _g		T _m
	z	55,9	180,7			
PEEK LDS	 flow	19,0	60,2	~145°C		343°C
	⊥ flow	19,8	52,7			

Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde senkrecht zur Substratebene durchgeführt und zeigte eine Wärmeleitfähigkeit von 0,667 W/(m*K). Damit liegt das Material im Bereich der Wärmeleitfähigkeiten von angepassten und mineralisch gefüllten HF-Leiterplattenmaterialien.

Messverfahren zur Charakterisierung der dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Kunststoffe bei Frequenzen im Mikrowellenbereich wurde etabliert und entsprechende Messungen durchgeführt.

Testsubstrate wurden mittels Spritzgießen und Spritzprägen hergestellt und in einer Messfassung bei Frequenzen um 10 GHz in einer Transmissionsmessung charakterisiert. Diese Messung wurde in einer hochauflösenden Simulation der elektromagnetischen Felder modelliert. Die Materialeigenschaften des Messobjektes sind die angepassten Parameter Dielektrizitätszahl und Verlusttangens.

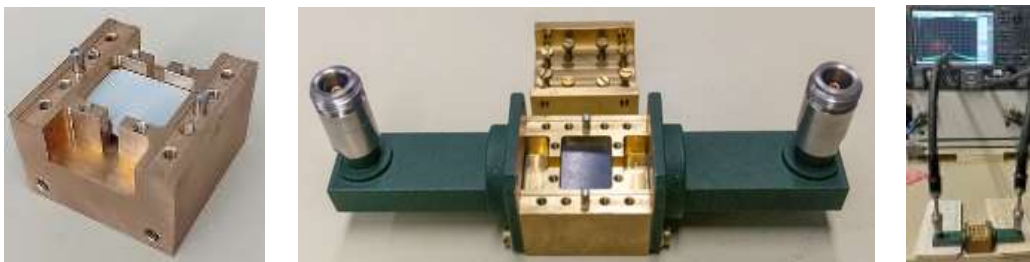


Abbildung 18: Materialprobe (Platte) im Messresonator. Links: Platte im geöffneten Resonator. Mitte: Resonator mit Hohlleiteranschlüssen. Rechts: Transmissionsmessung mit Netzwerkanalysator

Im Ergebnis weist PEEK LDS bei 10 GHz eine Permittivität von ca. 3.40 ... 3.43 und einen Verlusttangens von 0.005 auf. Für die dielektrische Charakterisierung wurden Messobjekte aus PEEK LDS spritzgegossen und für die Nutzung in einer Messfassung (Abbildung 18) mechanisch präpariert und bei Frequenzen um 10 GHz in einer Trans-

missionsmessung charakterisiert. Diese Messung wurde in einer hochauflösenden Simulation der elektromagnetischen Felder nachgestellt. Durch Vergleich der gemessenen Transmissionsergebnisse mit den Simulationsdaten wurden dann die Materialeigenschaften des Messobjektes Dielektrizitätszahl und Verlusttangens bestimmt. Durch die Durchführung dieser ersten Messungen konnte die Größe der Messobjekte als nutzbar verifiziert werden. Das Messergebnis weist für das Material bei 10 GHz ein $\epsilon_{\text{rel}} = 3.40 \dots 3.43$ und $\tan\delta = 0.005$ auf.

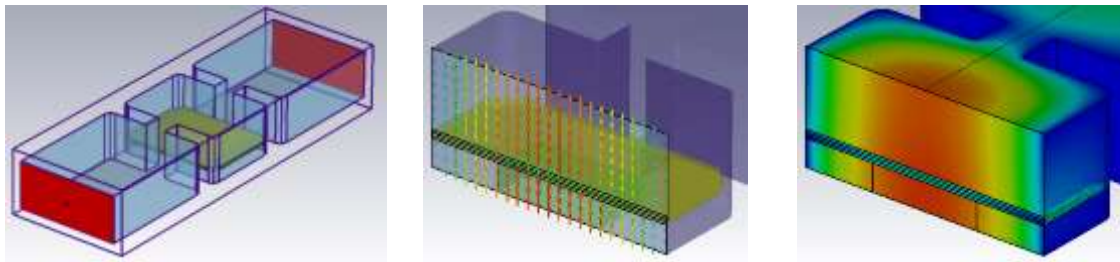


Abbildung 19: Modellierung des Messresonators mit Messobjekt (Platte) im CAD-Frontend der Feldsimulationssoftware. Links: Geometrie. Mitte: E-Feld vektoriell. Rechts: E-Feld Amplitude

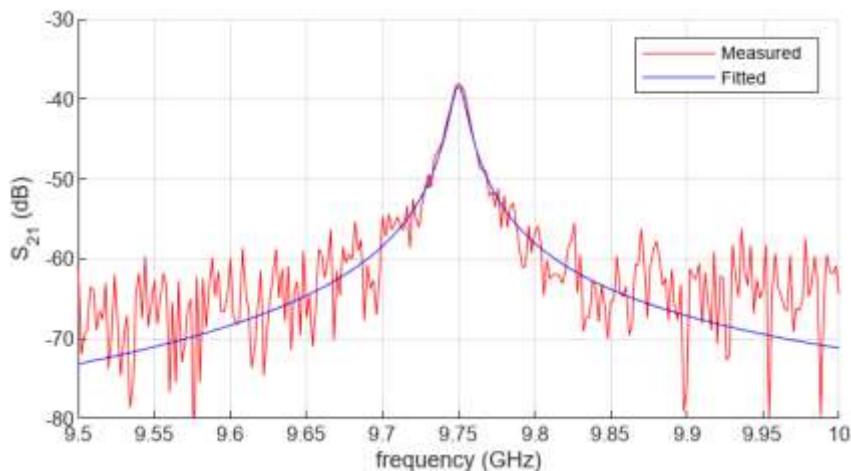


Abbildung 8: Gemessene Transmissionsamplitude (rot) und angepasste Modellierung (blau)

5 Kontaktierung BGA auf MID

MMIC sind überwiegend in BGA Packages mit einem Pitch von 0.5 mm und kleiner erhältlich. Nach dem Stand der Technik erfordert die Montage von solchen BGAs auf PCB spezielle Technologien wie z.B. Microvias und Vias in Pad.

In Entflechtungsstudien konnte gezeigt werden, dass für Pitches von 0.5 und 0.4 mm unter Berücksichtigung der Designregeln für LDS-MID pro Signallage 2 Ball-Reihen aus dem BGA herausgeführt werden können. Hierbei wurden die Vias zwischen den Pads vorgesehen (Dog-Bone Konfiguration), um prozesstechnisch kritische Vias in

Pads zu vermeiden. Zusätzlich zu den 2 Ball-Reihen können im Zentrum des BGAs auf beiden Seiten noch zusätzliche Flächen für Spannungsversorgung und Ground hinausgeführt werden (Abbildung 21).

Um die Prozessfähigkeit des BGA Lötens zu untersuchen, wurden verschiedene BGAs auf LDS-MID-Testsubstrate gelötet und die entsprechenden Lotverbindungen qualitativ und quantitativ bewertet. Für das Lötens von BGA ist zwingend Lötstopplack notwendig. Daher wurde dieser mittels Vorhanggießen und Direktbelichtung auf die LDS-MID aufgebracht. Abbildung 22 zeigt ein Foto eines LDS-MID mit Lötstopplack und einer NSMD-Öffnungsform. Die Vorteile von NSMD bestehen darin, dass der Durchmesser der Kupferpads leichter zu kontrollieren ist als die Größe der Lötstopmmaske.

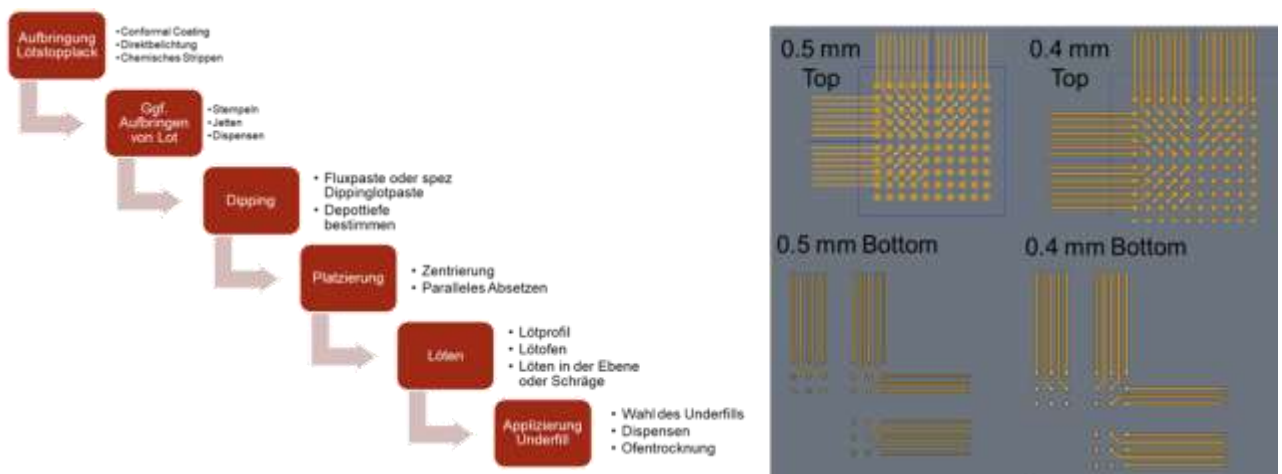


Abbildung 21: Links: optimierte Prozesskette zur Montage von BGAs auf LDS-MID. Rechts: Entflechtungsstudien



Abbildung 22: LDS-MID-Testsubstrat mit Lötstopplack (NSMD)

Die Lötversuche wurden mit LDS-MID-Testsubstraten und Dummy-BGA mit Daisy-Chain Strukturen durchgeführt. Diese ermöglichen die schnelle Erfassung des elektrischen Widerstandes zur Analyse der Kontaktierung. Wie in Abbildung 23 gezeigt, müssen beim Entwurf des LDS-MID-Testsubstratlayouts die Leiterbahnen entsprechend der Daisy-Chain der jeweiligen BGA-Dummybauteile erstellt werden.

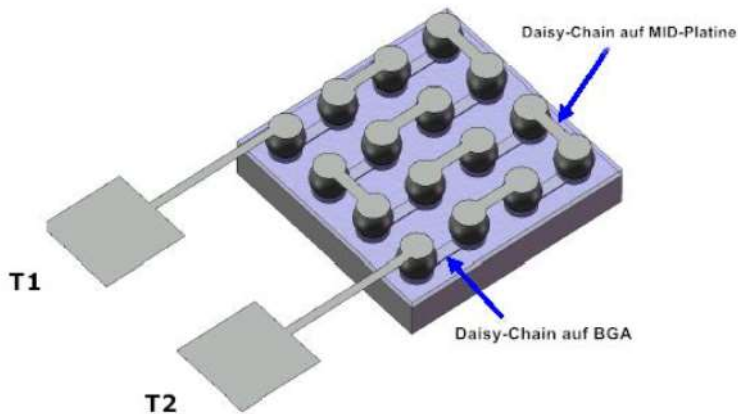


Abbildung 23: Daisy-Chain-Verbindung Testsubstrat - BGA

Zur Auswertung der elektrischen Verbindung wird nach Abschluss des Lötvorgangs der Widerstand zwischen T1 und T2 gemessen. Wenn alle Lotkugeln erfolgreich verlötet sind, besitzt die Daisy-Chain zwischen BGA und LDS-MID-Substrat einen Widerstandswert zwischen T1 und T2 von nahe 0Ω . Wenn eine Verbindung fehlt, liegt ein offener Stromkreis zwischen T1 und T2 vor und der Widerstand wird hochohmig. Zusätzlich zur Bewertung mittels Widerstandsmessung wurden Schertests durchgeführt um die Verbindungen qualitativ mikroskopisch zu bewerten. Diese Messungen wurden mittels eines Dage 4000 Plus Bondtester durchgeführt.

In der Versuchsreihe wurden zwei Layouts verwendet. Abbildung 24 links zeigt ein Testsubstrat mit vier BGAs mit einem Pitch von 0.8 mm und 100 Lotkugeln (A-CABGA100-.8-10x10). Abbildung 24 rechts zeigt ein Testsubstrat mit vier BGAs mit einem Pitch von 0.5 mm und 84 Lotkugeln (A-CTBGA84-.5-6x6).

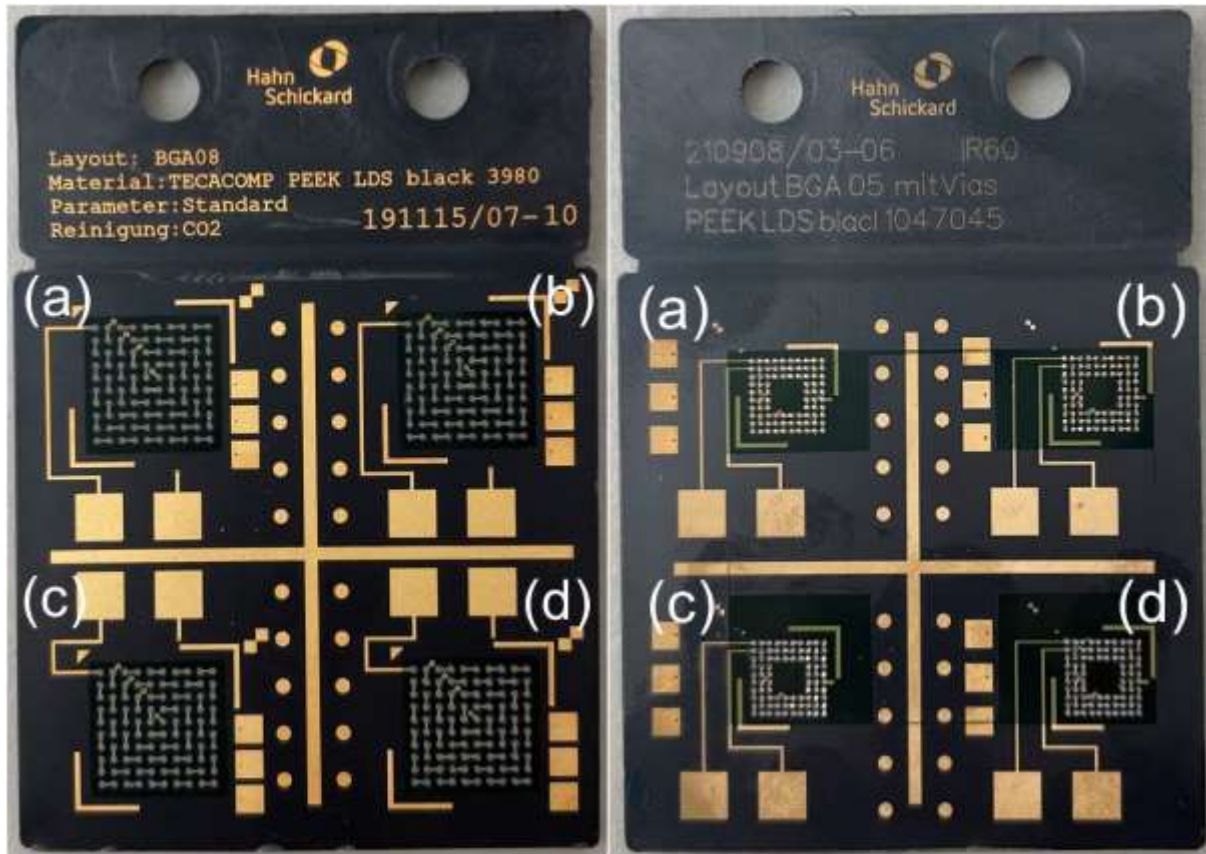


Abbildung 24: Links: LDS-MID-Testsubstrate mit 4*BGA_0.8_100. Rechts: 4*BGA_0.5_84

Tabelle 2: BGA in Versuchsreihe

BGA	Höhe (mm)	Kugelhöhe (mm)	Anzahl(N)
A-CABGA100-.8-10x10	1.40 ± 0.10	0.36 ± 0.05	40
A-CTBGA84-.5-6x6	1.00 ± 0.10	0.20 ± 0.05	40

Tabelle 3 zeigt die Charakterisierungsergebnisse der LDS-MID-Testsubstrate mit BGA_0.5_84. Der Zustand wurde durch Hirox- oder XRay-Messungen bestimmt. Die Höhe der Hälfte der gelöteten BGA-Packages wurde durch eine Messuhr und der Widerstand durch eine 4-Punkt-Messung bestimmt. Da es sich bei einem Schertest und Querschliff um zerstörende Prüfungen handelt, konnte entweder die eine oder andere Prüfung durchgeführt werden. Bei der Auswertung der Schertests wurde zwischen verschiedenen Bruchbildern unterschieden. Insgesamt wurden drei verschiedene Bruchbilder beobachtet:

- Typ 4: Riss im Lot
- Typ 5: Ablösung Pad
- Typ 6: Mischbruch

Abbildung 25 (a) zeigt Typ 5, bei dem das Metallpad nach dem Abscheren auf dem LDS-MID-Substrat zusammen mit den Lotkugeln auf dem BGA abgezogen wird. Abbildung 25 (b) zeigt einen Mischbruch (Typ 6).

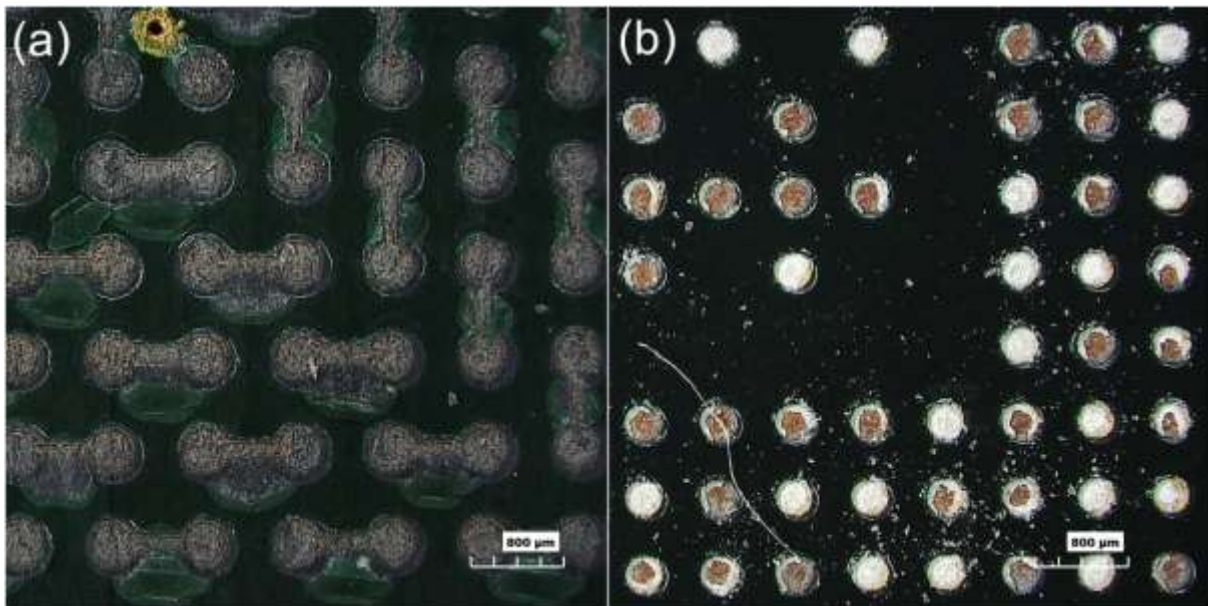


Abbildung 25: Bruchbild Typ 5 (a) und Typ 6 (b)

Tabelle 3: Charakterisierungsergebnisse von BGA_0.5_84

Reflow- profil	Parameter der MID- Substrate	Einstellung der Dippaste	Scher- kraft (N)	Ausfall- art	Zustand	Höhe (mm)	Wider- stand (Ω)	
BLEIFRE +5GRAD. PRO	LCP Standard CuNiAu	100 μ m Flux	146.85	Typ 5	Alle gelötet		00.69	
		150 μ m Flux	174.83	Typ 5	Alle gelötet		00.64	
		150 μ m μ -dIFE 7	178.34	Typ 5	Alle gelötet		00.66	
			100 μ m Flux	78.286	Typ 6	Viele nicht gelötet	0.9754	02.42
			150 μ m Flux	137.93	Typ 6	Viele fast nicht gelötet	0.9892	-02.2
			100 μ m μ -dIFE 7	123.4	Typ 5	1 Ball fast nicht gelötet	0.977	00.2
			100 μ m μ -dIFE 7	134.02	Typ 5	Alle gelötet		-01.14
		LCP Bond CuNiAu	100 μ m Flux	127.73	Typ 5	Alle gelötet		00.74
			150 μ m Flux	160.31	Typ 5	Alle gelötet		00.68
			100 μ m μ -dIFE 7	139.16	Typ 5	1 Ball nicht gelötet		00.75
			150 μ m μ -dIFE 7	128.28	Typ 5	Alle gelötet		00.74
			100 μ m Flux	141.86	Typ 5	Alle gelötet	0.9574	00.40
			150 μ m Flux	97.304	Typ 5	Alle gelötet	0.9606	00.72
			100 μ m μ -dIFE 7	105.52	Typ 5	Alle gelötet	0.9974	00.76
		150 μ m μ -dIFE 7	107.86	Typ 5	Alle gelötet	0.9618	00.75	
	PEEK Standard CuNiAu	100 μ m Flux	253.99	Typ 5	Alle gelötet		00.95	
		150 μ m Flux	178.18	Typ 5	Alle gelötet		00.88	
		100 μ m μ -dIFE 7	226.21	Typ 5	Alle gelötet		01.00	
		150 μ m Flux	211.05	Typ 5	Alle gelötet	0.9038	00.85	
		100 μ m Flux	202.98	Typ 5	Alle gelötet	0.9196	-01.1	
		100 μ m μ -dIFE 7	168.4	Typ 6	Alle gelötet	0.9408	00.7	
		150 μ m μ -dIFE 7	140.03	Typ 6	Alle gelötet	0.9594	03.8	
	PEEK	100 μ m Flux	187.71	Typ 5	Alle gelötet		01.0	

Fortsetzung

	Bond	150µm Flux	200.76	Typ 5	Alle gelötet		00.99
	CuNiAu	100µm µ-dlFE 7	194.49	Typ 5	Alle gelötet		01.10
		100µm Flux	164.45	Typ 5	Alle gelötet	0.972	-00.24
		150µm Flux	Querschleife				00.4
		100µm µ-dlFE 7				1.0122	02.6
		150µm µ-dlFE 7	Querschleife			0.9852	00.7
	PEEK	100µm Flux	61.811	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	0.9946	-04.5
	Bond	150µm Flux	78.962	Typ 6	1 Ball fast nicht gelötet, Zentrierung nicht gut	0.9976	-04.7
	CuPdAu	100µm µ-dlFE 7	134.2	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	0.981	-05.2
		150µm µ-dlFE 7	124.54	Typ 5	Alle gelötet, Zentrierung nicht sehr gut	0.9988	-04.35
BLEIFRE +10GRAD .PRO	PEEK	100µm Flux	41.686	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	1.0208	-02.8
	Bond	150µm Flux	43.809	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	1.0062	-03.9
	CuPdAu	100µm µ-dlFE 7	65.556	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	1.0046	-01.2
		150µm µ-dlFE 7	113.33	Typ 6	Alle gelötet, Zentrierung nicht gut	1.0156	-01.7

Aus der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass für den BGA mit 0.5 mm Pitch auf LDS-MID-Substraten aus PEEK mit einer Cu/Ni/Au-Metallisierung sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Bei einigen LDS-MID-Substraten aus LCP wurden teilweise fehlende Lötstellen beobachtet. Bei der Ausfallart handelte es sich hauptsächlich um Typ 5 und einen kleinen Anteil Typ 6. Tabelle 3 zeigt, dass das Standard-Reflow-Profil bei LDS-MID-Substraten mit einer Cu/Pd/Au-Metallisierung zu einer schlechten Zentrierung der Lötstellen geführt hat. Die Ausfallart war hauptsächlich Typ 6. Die Scherkraft war vergleichsweise klein. Eine höhere Löttemperatur führte zu keiner Verbesserung. Die Verwendung von Dip-Lötpaste µ-dlFe-7 ist vorteilhaft um die Zentrierung der Lötstellen zu verbessern.

Die Analyse der Scherkräfte wie in Abbildung 26 dargestellt zeigt, dass die durchschnittliche Scherfestigkeit bei variierender Dippaste und Tiefe im BGA_0.5_84-Layout bei LDS-MID-Substraten mit einer Cu/Ni/Au-Metallisierung höher war als mit einer Cu/Pd/Au-Metallisierung, während die Scherfestigkeit bei der Verwendung der Dip-

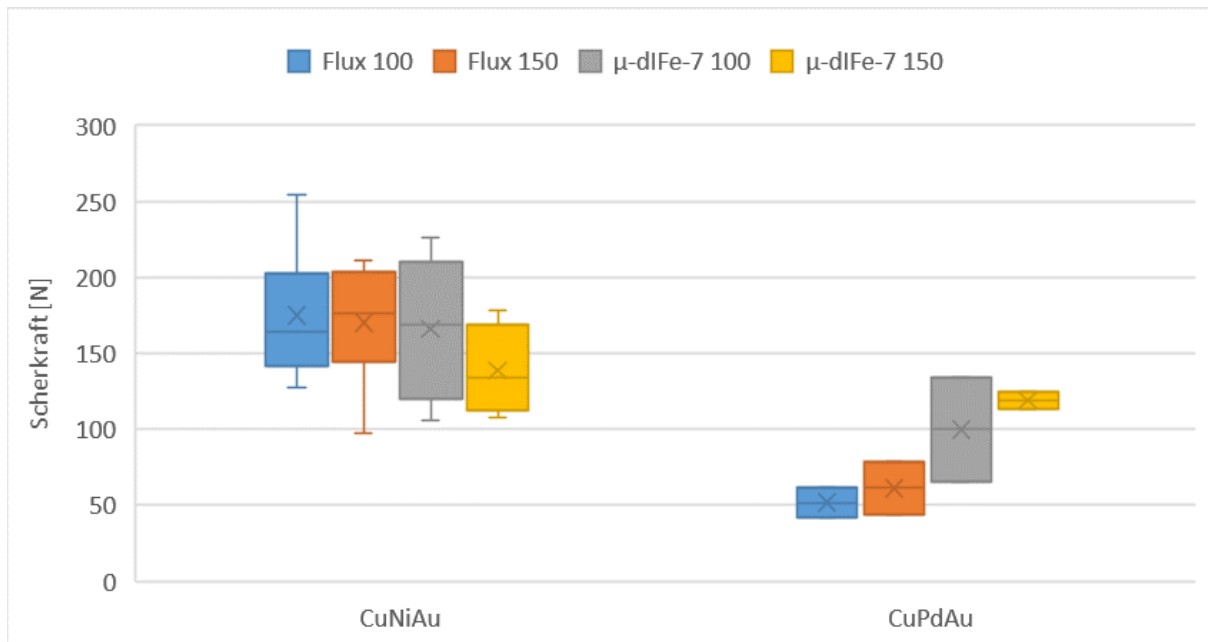


Abbildung 26: Scherkraft der BGA_0.5_84 auf verschiedenen Metallisierungen

Lötpaste μ-dlFe-7 unterschiedlich war. Bei einer Cu/Pd/Au-Metallisierung können mit der Dip-Paste μ-dlFe-7 höhere Scherfestigkeit erzielt werden.

Von LDS-MID-Testsubstraten aus PEEK mit Cu/Ni/Au-Metallisierung und gelöteten BGAs wurde Querschliffe angefertigt. Abbildung 27 stellt Querschliffe der Lotverbindungen von BGA mit einem Pitch von (a) 0.8 mm und (b) 0.5 mm. Es ist zu erkennen, dass die Lotkugeln bei guter Zentrierung vollständig ausgebildet sind.

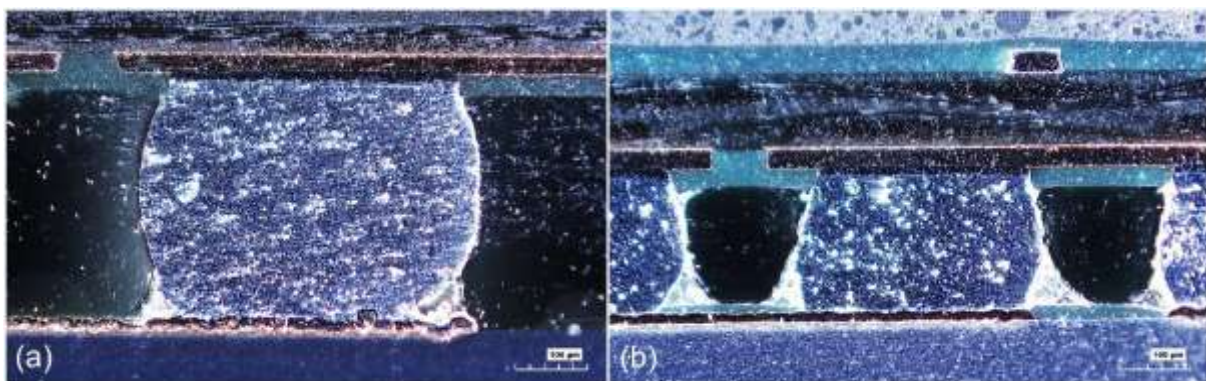


Abbildung 27: Querschliffe der gelöteten BGA auf LDS-MID-Testsubstraten aus PEEK mit Cu/Ni/Au-Metallisierung: (a) BGA_0.8_100_100μm μ-dlFE 7 und (b) BGA_0.5_84_150μm μ-dlFE 7

6 Herstellung HF-Teststrukturen und Demonstrator

6.1 Spritzprägewerkzeug und Simulation des Spritzprägeprozesses

Beim Spritzprägen handelt es sich um ein mit dem Spritzguss verwandtes Verfahren zur Herstellung von Kunststoffteilen. Vorteile gegenüber dem Spritzguss sind insbesondere die bessere Kontrolle über die Oberflächenqualität und auch ein besser beherrschbares und einheitlicheres Schwindungsverhalten bei flächigen Bauteilen. Es ist dadurch einfacher möglich Bauteile mit erhöhten Anforderungen an die Planarität und Oberflächenqualität herzustellen. Ein Nachteil des Verfahrens ist die höhere Komplexität des Werkzeugbaus und dadurch zusätzliche geometrische Randbedingungen für Werkzeuge und Bauteildesigns. Abbildung 28 zeigt eine Zeichnung des im Projekt aufgebauten Werkzeugs im Schnitt.

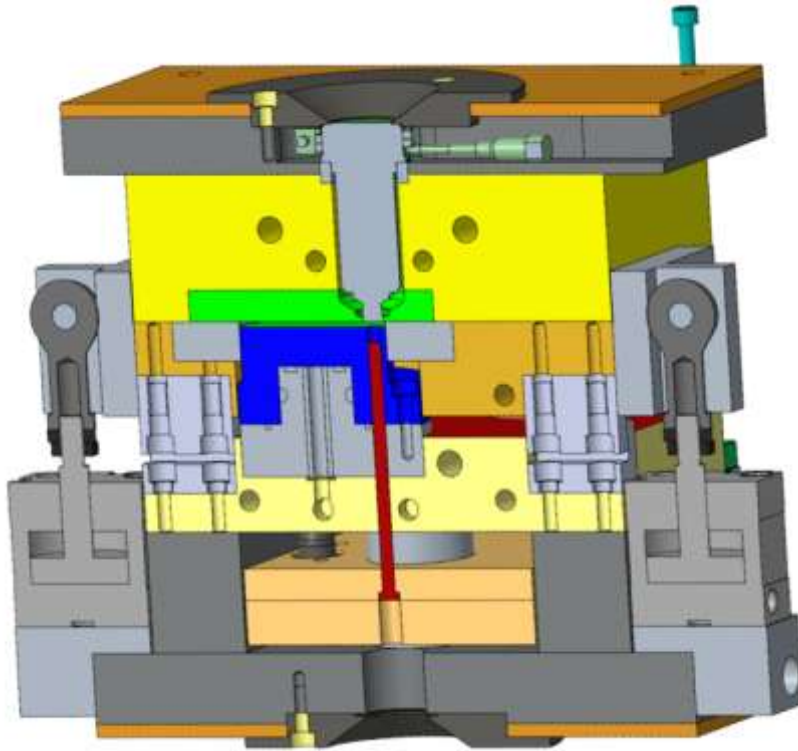


Abbildung 28: Spritzprägewerkzeug für LDS-MID

Um die Qualität der hergestellten Spritzgussteile abzusichern wurde der Füllvorgang simuliert und im Hinblick auf mögliche Probleme wie Bindenähte oder Materialverfestigung vor dem Prägeprozess analysiert. Zusätzlich wurde der zu erwartende Verzug bei Abkühlung des Teils auf Raumtemperatur berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt.

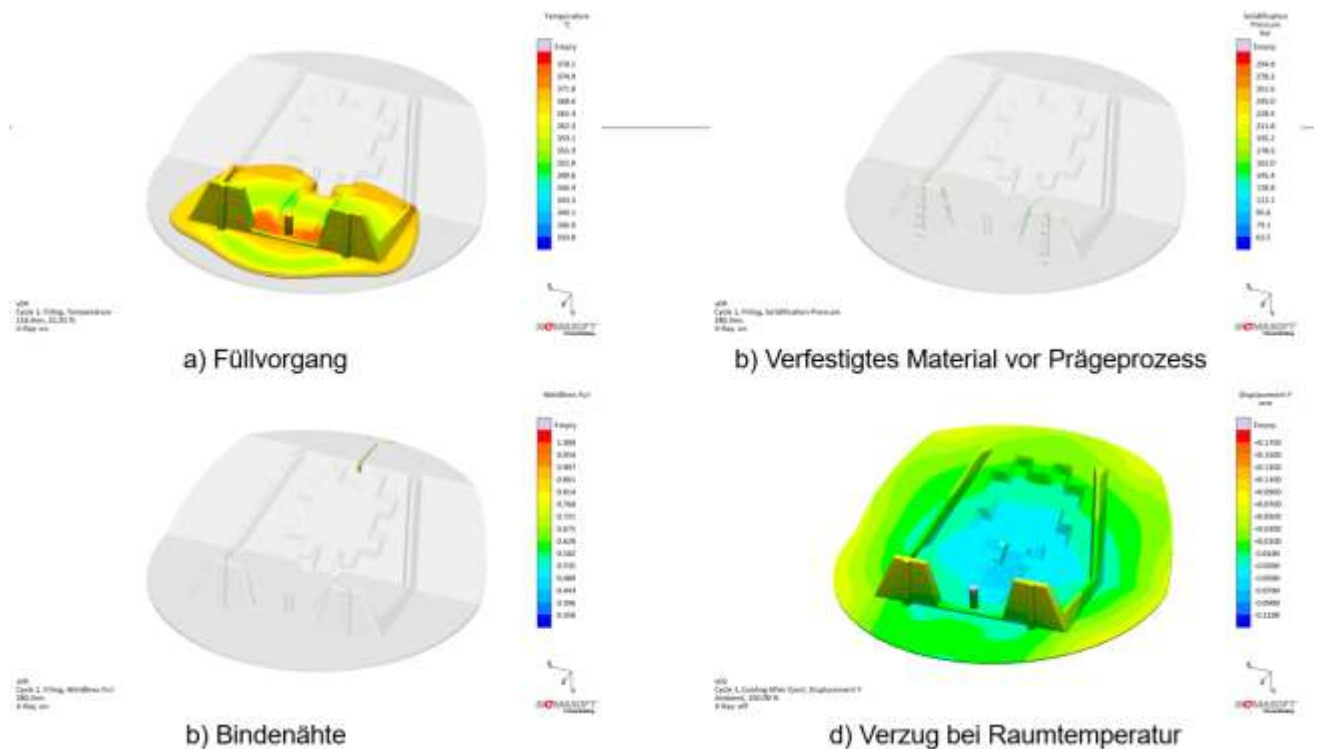


Abbildung 29: Simulation Spritzprägeprozess

6.2 HF-Teststrukturen

Um die HF-Eigenschaften der entworfenen Konzepte zu untersuchen, wurden HF-Teststrukturen designt und hergestellt, die anhand von 2,5D-Strukturen auf planaren Versuchsteilen aus PEEK LDS die grundsätzliche Machbarkeit der für den Demonstrator nötigen Verbindungstechniken und HF-Übergänge zeigen sollen (Abbildung 30). Bei der Herstellung der Teststrukturen zeigten sich eine Reihe von komplexen Herausforderungen, deren Lösung Teil andauernder Aktivitäten ist.

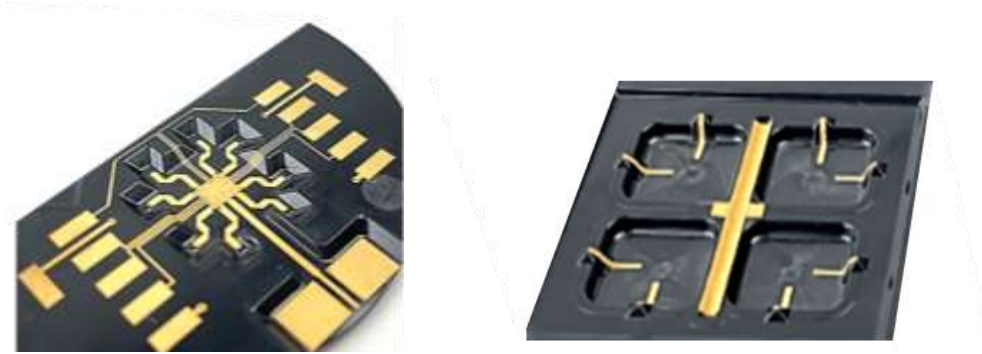


Abbildung 30: Ausschnitt 2,5D HF-Teststrukturen nach LDS-Prozess



Abbildung 31: Thermische Überlastung des Substratmaterials durch lasergebohrte Vias

Eine besondere Herausforderung ist die hohe räumliche Dichte an lasergebohrten Durchkontaktierungen, die an die Prozessführung spezielle Anforderungen stellt um das Basismaterial nicht durch thermische Überbeanspruchung (Abbildung 31) zu beschädigen und andererseits in der unmittelbaren Nähe der Bohrungen feine Strukturen zur Kontaktierung der SMD zu erzeugen. Um die thermische Belastung zu begrenzen muss die Laserleistung im Bereich der Bohrungen reduziert werden. Im einfachsten Fall kann dies durch eine langsamere Prozessierung durch das Einfügen von Pausen erreicht werden. Dies ist allerdings nicht wirtschaftlich. Übliche Strategien zielen deshalb darauf ab, die eingebrachte Laserleistung über mehrere Bauteile oder größere Flächen innerhalb eines Bauteils zu verteilen, z.B. indem schnell zwischen mehreren Bearbeitungsbereichen gewechselt wird.

Eine weitere Herausforderung stellt die Isolation zwischen benachbarten Flächen im Bereich der lasergebohrten Vias dar. Durch das Bohren entsteht im Vergleich zur Strukturierung von Leiterbahnen auf der Oberfläche ein Vielfaches an Debris. Dieser

erhöht das Potenzial für Fremdabscheidungen im nachfolgenden außenstromlosen Metallisierungsprozess. Als Fremdabscheidung werden unerwünschte metallisierte Bereiche auf dem Schaltungsträger bezeichnet. Abbildung 32 links zeigt das Problem der Fremdabscheidungen deutlich. Masseflächen mit thermischen Vias sind nach der Metallisierung an den Stellen mit geringem Abstand zu benachbarten Signalleitungen verbunden, d.h. es sind Kurzschlüsse vorhanden.

Verschiedene Ansätze zur Reduzierung der Fremdabscheidungen wurden untersucht:

- CO₂ Schneestrahlsreinigung nach der Laserstrukturierung
- Auftrag eines Schutzlack vor der Laserstrukturierung

Insbesondere die Verwendung eines wasserlöslichen Schutzlackes, der vor der Laserstrukturierung auf das spritzgeprägte Bauteil aufgebracht wird, führte zu einer Verringerung von Fremdabscheidungen (Abbildung 32 rechts). Der Schutzlack löst sich in dem vor der außenstromlosen Metallisierung standardmäßig durchgeführten Reinigungsprozess auf und reduziert das Anhaften von Partikeln auf dem Bauteil im Bereich der lasergebohrten Vias. Trotz deutlicher Verbesserung in diesem Bereich sind die realisierten Metallisierungen noch Gegenstand laufender Prozessoptimierungen, da die Abstände zwischen den Metallflächen geringer sind als ursprünglich im Layout vorgesehen und dadurch die Prozesssicherheit beim Löten der vorgesehenen SMD Bauteile nicht immer gewährleistet ist.

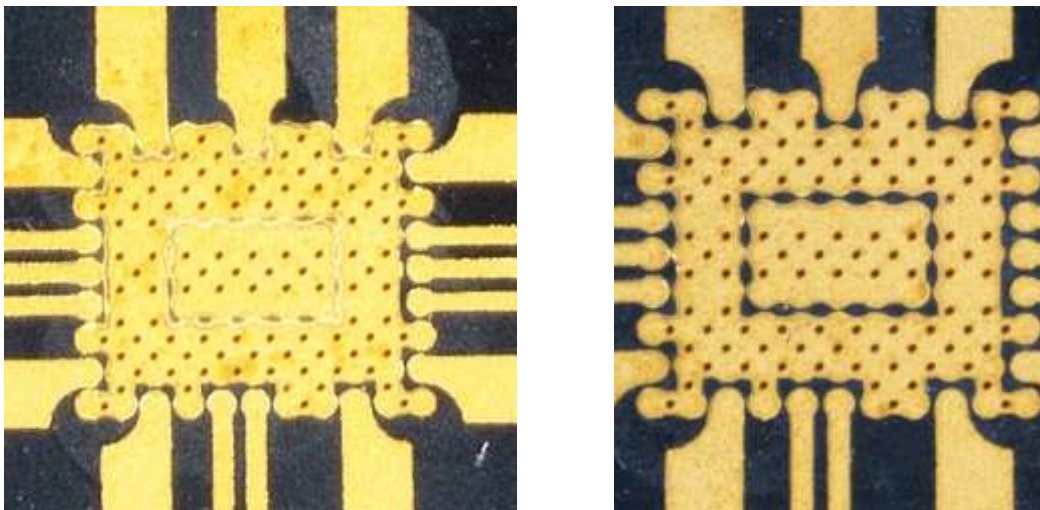


Abbildung 32: Links: Kurzschlüsse durch Fremdabscheidungen im Bereich der lasergebohrten Vias. Rechts: Reduzierung der Fremdabscheidungen durch Prozessierung mit Schutzlack

6.3 Verbindung Antennenstrahler

Die Verbindung zwischen Antennenstrahler und Schaltungsträger wurde anhand der planaren Versuchsteile untersucht. Abbildung 33 zeigt den Aufbau mit den 4 Patchantennen auf dem Antennenstrahler und das flächig metallisierte planare Versuchsteil.

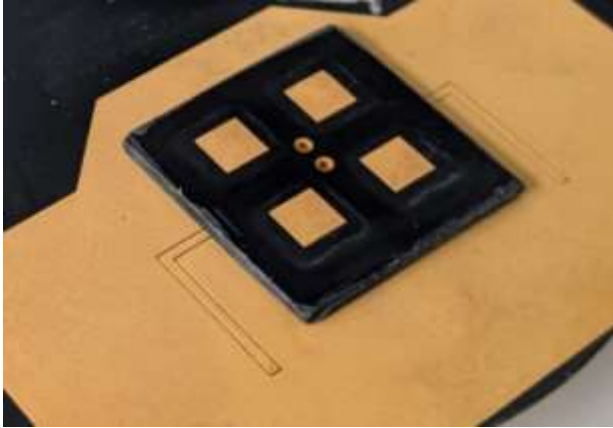


Abbildung 33: Antennenstrahler auf planarem Versuchsteil montiert

Bei der Verbindung zwischen Versuchsteil und Antennenstrahler war der durch das Lot zu überbrückende Spalt in vielen Fällen zu groß, was deshalb zu keiner elektrisch leitfähigen Verbindung führte (Abbildung 34). Aktuelle Untersuchungen zur Anpassung des Designs an dieser Stelle zielen auf eine Reduzierung des zu überbrückenden Spaltes ab.



Abbildung 34: Elektrische Verbindung zwischen Antennenstrahler und Schaltungsträger noch unzureichend

6.4 Sektorelemente für Demonstrator

Die Sektorelemente für den Demonstrator wurden mit dem in Abbildung 28 gezeigten Spritzprägewerkzeug aus PEEK LDS hergestellt. Das anhand von HF-Simulationen entworfene Layout wurde mittels Laserstrukturierung auf die spritzgeprägten Teile abgebildet und mittels außenstromloser Metallisierung ein Schichtsystem aus Cu/Ag aufgebracht (Abbildung 35).



Abbildung 35: Sektorelement: Spritzprägeteil vor (links) und nach (rechts) Laserstrukturierung und Metallisierung mit Cu/Ag

Anschließend wurde das Sektorelement aus dem Spritzling vereinzelt, indem die planare, dünne Struktur des Spritzling um den Sektor abgetrennt wurde (Abbildung 36).

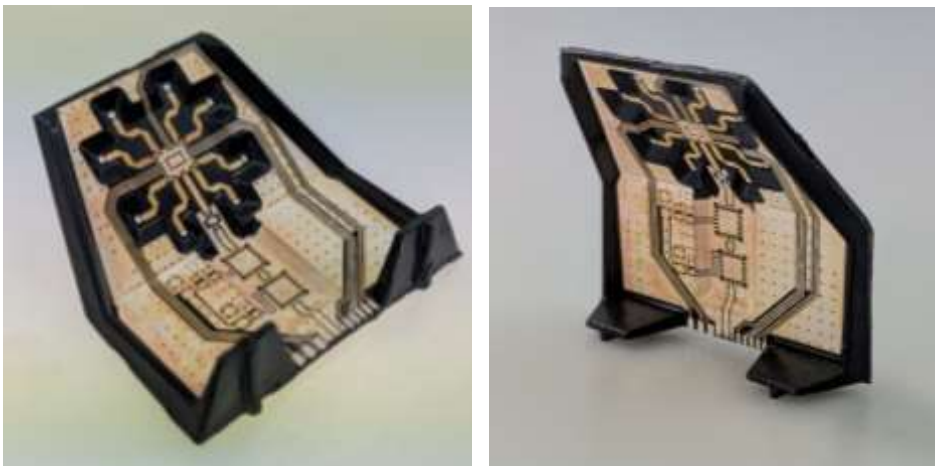


Abbildung 36: Sektorelement vereinzelt

Aufgrund von technologischen Schwierigkeiten und großem Mehraufwand bei der Herstellung der HF-Teststrukturen konnte der Demonstrator im Berichtszeitraum nicht mehr fertiggestellt werden.

7 Verwendung der Zuwendung

Durchführende Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1 (federführend):

Hahn-Schickard

Allmandring 9 b

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungseinrichtung:

Prof. Dr. André Zimmermann

Dr. Karl-Peter Fritz

Forschungseinrichtung 2:

Universität Stuttgart - Institut für Hochfrequenztechnik

Pfaffenwaldring 47

70569 Stuttgart

Leiter der Forschungseinrichtung:

Prof. Dr. Jan Hesselbarth

Personaleinsatz

Forschungseinrichtung 1:

Wissenschaftlich-technisches Personal:

23,5 Personenmonate

Technisches Fachpersonal:

14,5 Personenmonate

Forschungseinrichtung 2:

Wissenschaftlich-technisches Personal:

24 Personenmonate

Technisches Fachpersonal:

0 Personenmonate

Ausgaben für Geräte: /

Ausgaben für Leistungen Dritter: /

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

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

8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

Innovativer Beitrag:

Die Kombination von LDS-MID- und PCB-Technologie erlaubt neuartige Antennenkonzepte, welche auf planaren Schaltungsträgern nicht realisierbar sind, und hat großes Potential zum Aufbau von Millimeterwellen-Funksystemen. Die 3D-Designfreiheit der LDS-MID-Technologie ermöglicht die Realisierung von HF-technisch relevanten 3D-Leiterstrukturen und somit die Herstellung von 3D-Antennenarrays mit oberflächenmontierbaren Antennenstrahlern. Die erarbeitete Prozesskette zum Löten von BGA auf LDS-MID zeigt Wege auf, wie BGA mit entsprechend kleinen Pitches auf 3D-Schaltungsträgern platziert werden können. Dies ist insbesondere bei MMIC essentiell, da diese nur als solche Packages verfügbar sind. Die im Projekt erarbeitete Prozesskette kann somit zur Entwicklung von innovativen Millimeterwellen-Funksystemen mit besonders effizienter und gerichteter Abstrahlung beitragen.

Voraussichtliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse:

Die Forschungseinrichtungen stehen auch nach Projektabschluss in engem Kontakt zu den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses. Die involvierten Unternehmen decken dabei die gesamte Prozesskette ab, welche Materialhersteller, Anlagenhersteller, Rapid Manufacturing und Spritzguss, Metallisierungsdienstleister, MID-Hersteller und Endanwender aus Industrie 4.0, Sensor- und Radarsystemen in Automotive, Industrietechnik und Mobilfunkausrüstung umfasst. Die Ergebnisse zeigen das große Potenzial der LDS-Technologie für Millimeterwellen-Funksysteme, was die PCB-Technologie erweitert und neue Möglichkeiten bietet. Zudem können die Charakterisierungsergebnisse von PEEK LDS dazu beitragen, dass diese Materialklasse zur Entwicklung neuer Produkte im Bereich HF-Technik beiträgt.

Mittels der bei Hahn-Schickard installierten TransferFab, zertifiziert nach ISO 9001:2015, können in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der Universität Stuttgart bei industriellen Anfragen aus dem Bereich Millimeterwellen-Funksysteme mit relativ geringem Initialaufwand erste Musterteile, Prototypen oder Kleinserien angefertigt werden, was die Einstiegsschwelle für interessierte Anwenderfirmen senkt. Bei entsprechender Etablierung kann dann der Herstellungsprozess an entsprechende industrielle Stellen und Dienstleister transferiert werden.

9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Projektergebnisse wurden laufend den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses mitgeteilt. Hierfür wurden während der Projektlaufzeit vier Sitzungen durchgeführt. Eine Auflistung aller während der Projektlaufzeit durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist in Tabelle 3 zusammengefasst. Zusätzlich sind die in Tabelle 4 aufgeführten Maßnahmen nach Projektende geplant.

Tabelle 3: Durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit.

Kat.	Maßnahme	Ziel und Rahmen	Datum / Zeitraum
A	Beratung des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	A1: Vorstellung des geplanten Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	1.02.2022
		A2: Vorstellung der weiteren Ergebnisse und Diskussion weiteres Vorgehen	12.12.2022
		A3: Abschlusspräsentation und Diskussion der erzielten Ergebnisse	30.08.2024
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Präsentation auf der Fachmesse electronica am Gemeinschaftsstand 3-D MID e.V.	15.-18.11.2022
		B2: Präsentation auf der Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	2022
		B3: Präsentation im Rahmen der Industrierausstellung 15. Internationaler MID Kongress, Amberg	21.-22.6.2023
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten: Homepage Hahn-Schickard	gesamte Projektlaufzeit
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre	D1: Ausbildung der Studenten verschiedener Studienrichtungen (Studentische Arbeiten)	gesamte Projektlaufzeit

Tabelle 4: 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: Übernahme der erzielten Ergebnisse in die Transfer-Fab Fertigungslinie bei Hahn-Schickard	nach Projektende
		A3: Akquisition von Firmen aus dem Mitgliederkreis von Hahn-Schickard, insbesondere KMU, für geeignete Kooperationen in Form von Direktaufträgen, Verbundprojekten etc.	fortlaufend nach Projektende

		A4: Erarbeitung von Marketingmitteln: Verweis auf das Projekt in Flyer „Mikrosystem Technologies for Space“	nach Projektende
		A5: Erarbeitung von Marketingmitteln: Aufnahme der Ergebnisse in die laufende Ausstellung bei Hahn-Schickard	nach Projektende
B	Transfer der Projektergebnisse	B1: Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung Hahn-Schickard	nach Projektende
		B2: Vorstellung der Ergebnisse auf der Fachmesse electronica am Gemeinschaftsstand mit Ensinger GmbH	12.- 15.11.2024
		B3: Präsentation der Ergebnisse auf Printed Electronics Forum-powered by OE-A and LOPEC @ electronica 2024	14.11.2024
		B4: Vorstellung der Ergebnisse: Jahresbericht Hahn-Schickard	nach Projektende
		B5: Vorstellung der Ergebnisse an interessierte Kunden: MID Workshop & MID Summit 2024, Stuttgart	23.- 24.10.2024
C	Veröffentlichung der Projektergebnisse	C1: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten über die Projektergebnisse: Homepage	nach Projektende
		C2: Information der Mitglieder bzw. Kunden und Interessenten über die Projektergebnisse: Newsletter Hahn-Schickard	nach Projektende
		C3: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse in einer Fachzeitschrift z.B. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing,	nach Projektende
D	Aufnahme der Ergebnisse in die Lehre	D1: Lehrveranstaltung „Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik“ des Instituts für Mikrointegration	nach Projektende

10 Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 21978 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.

Ein weiterer herzlicher Dank geht an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses für die Bereitstellung von Materialien, Analyse von Proben, sowie für die wertvollen Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen.

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