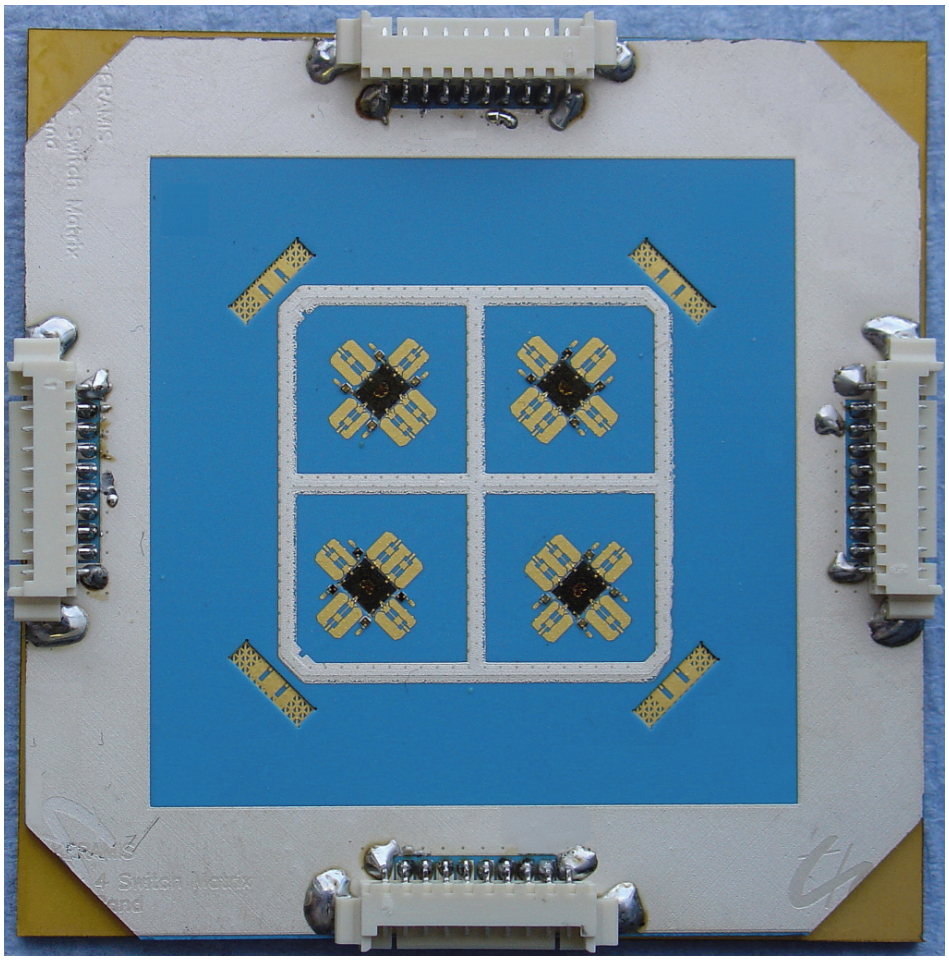
Projekt KERAMIS

KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik

Förderkennzeichen: 50 YB 0313 (Projektträger: Raumfahrtagentur im DLR)

Laufzeit des Vorhabens: 01.10. 2003 – 30.09. 2006

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Ilmenau



Abschlussbericht gemäß Nr.3.2 BNBest-BMBF 98

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 50 YB 0313 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: J.F. Trabert, Chr. Kutscher, Dr. R. Stephan, Prof. Dr. M.A. Hein (FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik), Dr. K.–H. Drüe, E. Morillas, Prof. Dr. H. Thust (Fachgebiet Elektroniktechnologie, ehem. Mikroperipherik), Dr. J. Müller, R.A. Perrone, S. Rentsch (Nachwuchsforschungsgruppe Funktionalisierte Peripherik), am Institut für Mikro- und Nanoelektronik der Technischen Universität Ilmenau

Stand: März 2007

Prof. Dr.–Ing. habil. H. Thust / Dr.–Ing. K.–H. Drüe
– Projektleiter –

Prof. Dr. rer. nat. habil. M. Hein
– Teilprojekt –

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung, Durchführung und Kurzfassung der Ergebnisse **1**

1.1 Einordnung der Förderung des Vorhabens 1
1.2 Projektdurchführung 1
1.3 Stand der Technik und Zusammenfassung der Ergebnisse 2
1.4 Bemerkung zur ausführlichen Darstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse 2

2 Systemdesign und Halbleiter-Komponenten (AP 1) **3**

2.1 Systemanforderungen für Technologiedemonstrator *Rekonfigurierbare* 4×4 *Schaltmatrix* 3
2.2 Bauelemente und Modulkonzeption 3

3 Verbesserungen der Technologie/Fertigungsprozesse und erweiterte Designregeln (AP 2) **4**

3.1 *Fine-line*-Strukturierung mit Standard-Dickschicht-Technologie 4
3.2 *Fine-line*-Strukturierung mit Hilfe fotostrukturierbarer Pasten 5
3.3 Tape- und Keramikstrukturierung (3D) 7
3.4 Allgemeine Designregeln 11

4 Design und Analyse der HF-Eigenschaften von LTCC-Systemen (AP 3) **13**

4.1 Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung und Analysefähigkeit 13
4.2 Technologievergleich der *Fine-line*-Strukturierungsverfahren 15
4.3 Mikrowellentaugliche Leitungen und Übergänge 20
4.4 Realisierung hermetischer mikrowellentauglicher Gehäuse 21

5 Entwicklung, Aufbau und Test einer *Rekonfigurierbaren* 4×4 *Schaltmatrix* (AP 6) **24**

5.1 Systemarchitektur des Demonstrators 24
5.2 LTCC-Modulkonzept und Hermetisierung 25
5.3 Untersuchung der Materialparameter für optimale Entwürfe 27
5.4 Impedanzanpassung des Einzelschalters und Optimierung der entsprechenden *First-level-Interconnections* für gute Systemeigenschaften 27
5.5 Ergebnis: Gute Eigenschaften der realisierten Prototypen 31

6 Ergebnisverwertung **34**

6.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende 34
6.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten 34
6.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 34

7 Literatur **35**

7.1 Liste der Publikationen 35
7.2 In Anspruch genommene Erfindungen bzw. eigene Schutzrechtsanmeldungen 36

Abbildungsverzeichnis

1 Zieldimensionierung: 50 μm Leitungen mit 50 μm Abstand. 4
2 Lineare Streckung um 15 % (entspricht einer Schrumpfungsrate von ca. 13 %). 5
3 Maske (Sieb): Berücksichtigung des nichtlinearen Schrumpfens der Leitbahnen durch konstante Zugabe (im Beispiel 7 μm) an allen Seiten. 5
4 Fine-line Siebdruck (Standard-Dickschichtprozess). 6
5 FODEL®-Prozess mit fotostrukturierbaren Dickschichtpasten. 6
6 Empirisch gefundene Beziehungen für die Dimensionierung von FODEL®-Strukturen in den inneren Substratlagen. 6
7 REM-Aufnahme einer im postfiring strukturierten Leitung auf gesintertem LTCC DP-951-Substrat (rechts: 5fach vergrößert). 7
8 REM-Aufnahme einer im postfiring strukturierten Leitung auf gesintertem LTCC DP-943-Substrat (rechts: 5fach vergrößert). 7
9 Kombinationen der Laminationsverfahren. 8
10 Übersicht der untersuchten Laminationsarten. 9
11 Rissbildung beim freien isostatischen Laminieren ohne Setter. 10
12 Beeinflussung der Goldschicht durch die Karbon-Inserts. 10
13 Uniaxiale Vorlamination: ϑ = 70 °C, t = 120 sec., p = 2.7 N/mm^2. 11
14 Isostatische Lamination: ϑ = 70 °C, t = 600 sec., p = 20.4 N/mm^2. 11
15 Erreichbare Strukturierungsauflösung und Kantengenauigkeiten (gesinterte Abmessungen, schwarz: sicher erreichbar, rot: im Labor in Einzelfällen erreicht). 11
16 Designregeln (minimale Strukturabmessungen) und Erläuterungen. Der Abstand zwischen Leiterbahn und Strukturkante (E) gilt für nach der Leiterbahnstrukturierung erzeugte Kavitäten und Substratdurchbrüche. Der Abstand Via-Kante zu Substratkante (F) gilt auch für Substratdurchbrüche und Aussparungen. 12
17 Durchführung der Hochfrequenzmessungen mit Ground-Signal-Ground-Messspitzen (Pitch-Weite 200 – 650 μm). 13
18 Optische Analyse und statistische Auswertung der mechanischen Struktureigenschaften und der entsprechenden Auswirkungen auf das HF-Reflexionsverhalten am Beispiel FODEL®. 14
19 Hochauflösendes Sieb mit 30 μm Strukturen. Die gelben Quadrate sind die nach der Siebstrukturierung verbleibenden Öffnungen. 15
20 Typische Schichtstärken der Dünnschichtsysteme. 16
21 Teststruktur I des Technologievergleichs (Elemente *i:* innen- bzw. *a*: außenliegend). 17
22 $|S_{ji}|$ von Mikrostreifenleitungen mit unterschiedlicher Pad- und Massekonfiguration. 17
23 Unterschiede zwischen Teststrukturdesigns. 18
24 Layout der Technologievergleichsstruktur (Version II). 18
25 Prozentuale Abweichung der gemittelten Leiterbreite für 100 μm Leitungen sowie die Standardabweichung der Prozesse. 19
26 Fächenwiderstände der Metallisierungen auf DP-951. 19
27 Vergleich der Leitungsdämpfungen ($|S_{ji}|$) von Mikrostreifenleitungen auf unterschiedlichen LTCC-Materialien und Schichttechnologien. 20
28 Bandpassfilter mit einer Mittenfrequenz von ca. 40 GHz, gefertigt in den verschiedenen Schichttechnologien. 21
29 Draufsicht auf das HF-Gehäusesubstrat (ohne Deckelung) und schematische Darstellung der verwendeten Übergänge (a) Viafreier Übergang ohne Lagenwechsel b) Lagenwechsel über Vias). 22
30 Vergrößerte Darstellung des Signalübergangs in das Gehäuseinnere (vgl. Abbildung 29). 22
31 Gemessene Reflexionseigenschaften $|S_{ii}|$ der Gehäusedurchführungen. 23
32 Vergleich der gemessenen und simulierten Reflexionsfaktoren $|S_{ii}|$ für den Typ a). 23

33 Architektur der Signalverteilung einer 4×4 Schaltmatrix mit SP4T-Schalter-ICs als Einzelschalt-Elemente. 24
34 Ansichten des ersten Musters einer 4×4 rekonfigurierbaren Schaltmatrix („Proof-of-Concept“). 25
35 Konzeption der beidseitigen Bestückung und LTCC-Flächenminimierung mit Lagenaufbau des Demonstrators „Rekonfigurierbare Schaltmatrix“ (oben: Draufsicht des Gesamtmoduls mit den Schalter-Dies (gelb) und den entsprechenden Kompensationsnetzwerken (rot), unten: Querschnitt eines Quadranten mit zweiseitiger Bestückung). 26
36 Jeweils gemittelte Permittivität der Substrate DP-951 (grün und blau) und DP-943 (rot). Die Strukturierung des Ringresonators erfolgte mit Gold- bzw. Silberpasten. 27
37 Simulierte und gemessene Streuparameter zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens eines einzelnen Schalter-IC (ohne die und mit der entwickelten Kompensationsschaltung (vgl. Abbildung 39). 29
38 Abschätzung des Verlustbeitrags verschiedener Bondverbindungen bei idealisierter Anpassung. 30
39 Konzept zur breitbandigen Impedanzanpassung eines Einzelschalter-IC's (individuell für Eingang und Ausgang). 31
40 Gemessene Streuparameter$|S_{ji}|$ und $|S_{ii}|$ eines kompletten Pfads durch die Schaltmatrix, stellvertretend für die anderen Signalpfade der Schaltmatrix mit vergleichbaren Eigenschaften. Die mechanische Weglänge beträgt ca. 45 mm (symmetrischer Aufbau). 32
41 Fertig bestückter KERAMIS-Demonstrator. Im Spiegel ist die auch rückseitige Hybridintegration zu erkennen. 33

1 Aufgabenstellung, Durchführung und Kurzfassung der Ergebnisse

Das Ziel des KERAMIS-Konsortiums, das auch vier Industriepartner umfasste, bestand darin, eine kommerziell anwendbare Technologie für Multilagenkeramik-Schaltungen zur Realisierung innovativer und preisgünstiger Komponenten für Multimedia-Satellitenanwendungen zu entwickeln.

Durch die erhöhte Funktionalität im Trägermaterial LTCC (*Low Temperature Co–Fired Ceramics*) kann auf den Einsatz teurer kundenspezifischer Halbleiter verzichtet werden. Stattdessen können „Standardschaltkreise“ zur Realisierung der elektrischen Funktion verwendet werden. Zudem bietet die Aufbautechnik in Mehrlagenkeramiksystemen die Möglichkeit, Gehäusefunktionen für eine hermetische Kapselung der Module zu übernehmen. Bei hermetischer Häusung von Einzelmodulen kann auf ein großes hermetisches Gehäuse zum Verschluss aller Komponenten verzichtet werden. Die kleinen Sub-Module sind als System-in-Package (SiP) variabel und rekonfigurierbar einsetzbar. Darüber hinaus bieten sie erhebliche Vorteile hinsichtlich ihrer Testbarkeit und können entwicklungsseitig als Komponente eingestuft werden. Mit dem Einsatz der LTCC-Technik ist es möglich, auch mittlere und kleine Stückzahlen kostengünstig herzustellen.

1.1 Einordnung der Förderung des Vorhabens

Das Projekt KERAMIS ist eingegliedert in das „Nationale Raumfahrtprogramm“ des DLR. Die in KERAMIS entwickelte Technologie findet Anwendung in satellitengestützten Multimedia- und Kommunikationssystemen. Als Aufbautechnologie wird LTCC-Mehrlagenkeramik verwendet, mit der preisgünstige und zuverlässige Module aufgebaut werden können. Diese Aufgabenschwerpunkte decken sich mit den Zielen der ESA, die das „Dossier on Microwave Technologies for Satellite Systems“ im Oktober 2002 veröffentlicht hat. Die Partner versprechen sich von deren Bearbeitung einen Technologievorsprung für die deutsche Industrie und damit eine Stärkung der nationalen Organisationen im internationalen Wettbewerb. Darüber hinaus tragen die Entwicklungen zu einer größeren Unabhängigkeit von außereuropäischen Technologien bei und stärken somit die europäischen Raumfahrtaktivitäten.

Für die TU Ilmenau direkt wird das Vorhaben aufgrund der Neuartigkeit des Forschungsansatzes und des wechselseitigen Leistungsaustauschs zwischen Partnern mit individueller Expertise zu einem erheblichen wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisgewinn führen. Dieser wird sich positiv auf die Publikationstätigkeit, Öffentlichkeitsarbeit und Einwerbung von Folgeprojekten niederschlagen, die moderne und zeitgemäße Ausbildung in den jungen Bachelor- und Master-Studiengängen der Technischen Universität Ilmenau fördern, die internationale Profilierung erleichtern und damit insgesamt die Attraktivität des Studienlandes Deutschland erhöhen.

1.2 Projektdurchführung

- Das Vorhaben wurde entsprechend dem im Antrag zum Projekt KERAMIS vorgesehenen Arbeitsprogramm bearbeitet und verlief im Vergleich zur aktuellen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung erwartungsgemäß.

- Die Ziele des Vorhabens wurden innerhalb des angegebenen Kostenrahmens planungsgemäß erreicht. Es waren keine Änderungen in der Zielsetzung des Projekts notwendig.

- Die Zusammenarbeit innerhalb des Projektes fokussierte sich weitgehend auf die Kooperation der beteiligten Partner sowie auf den Austausch mit den assoziierten Partnern.

- Die Ergebnisse des Verbundforschungsprojekts konnten einem umfangreichem nationalen und internationalen Publikum durch einen Workshop im Rahmen des *1st MacroNano-Colloquium on LTCC RF- and Microsystem Interconnect* in Ilmenau sowie durch weitere Konferenzbeiträge, Zeitschriftenartikel und eine Patentanmeldung präsentiert werden (siehe Publikationsliste am Ende dieses Dokuments).

Aktuelle Präsentationen sind im Anschlussvorhaben KERAMIS II vorgesehen, insbesondere im Zusammenhang mit der On-Orbit-Verifikation. Weiter führendes Illustrationsmaterial ist auf Anfrage erhältlich.

1.3 Stand der Technik und Zusammenfassung der Ergebnisse

Der wissenschaftlich-technische Fokus des F&E-Vorhabens liegt auf der in Kommunikationssatelliten verwendeten Hochfrequenz-Schaltungstechnik. Bisher wird in solchen Systemen eine Schaltungstechnik angewendet, die sich aus einer großen Anzahl von diskreten Elementen zusammensetzt. Durch die Anwendung einer Mehrlagenkeramik-Technologie und die damit verbundene Möglichkeit einer kompakten Hybrid-Integration aktiver und passiver Bauelemente und Baugruppen können Schaltungsmodule erhöhter Komplexität und Packungsdichte verwirklicht werden. Leistungsmerkmale und Zuverlässigkeitsaspekte der LTCC-Technologie im Mikrowellen-Frequenzbereich wurden anhand von Schlüsselkomponenten der Sendeeinheiten eines Ka-Band-Kommunikationssatelliten (*downlink*) untersucht und optimiert.

Die Technische Universität Ilmenau leitete das dreijährige interdisziplinäre Verbundvorhaben und erweiterte dabei ihren Erfahrungsschatz in Technologietransfer, Organisation, Administration und wissenschaftlicher Zusammenarbeit. Die wissenschaftlich-technischen Beiträge der Technischen Universität Ilmenau entstammten zwei Arbeitsbereichen, die sich mit der Entwicklung der LTCC-Technologie einerseits sowie darauf basierender Hochfrequenz–Module andererseits beschäftigten. Kerngegenstand der Arbeiten war die Demonstration einer für die Signalverteilung an Bord eines Satelliten erforderlichen rekonfigurierbaren Schaltmatrix. Die in der ausführlichen Vorhabensbeschreibung dargelegten Arbeitsziele wurden vollständig und umfänglich erreicht. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass mit der LTCC-Technologie satellitentaugliche hybrid-integrierte Ka-Band-Komponenten mit für reale Anwendungen viel versprechenden Leistungsmerkmalen hergestellt werden können. Auf diese Weise hat das F&E-Vorhaben KERAMIS dazu beigetragen, Technologie-spezifische Entwurfsregeln zusammen zu stellen und zu erweitern, und für diese Fertigungstechnologie neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

1.4 Bemerkung zur ausführlichen Darstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse

Die nachfolgende ausführliche Darstellung (Gegenstand von Arbeitspaket (AP) 7) der erreichten Ergebnisse behandelt in separaten Abschnitten die in Ilmenau bearbeiteten Teilthemen des Projektes. Für das AP 4: *Entwicklung, Aufbau und Test eines Leistungsverstärkers* und das AP 5: *Entwicklung, Aufbau und Test eines Signalgenerators* wird auf die Abschlussberichte der Projektpartner IMST GmbH bzw. Technische Universität Hamburg-Harburg verwiesen.

Die ausführliche Darstellung wurde so angelegt, dass die wesentlichen Aspekte herausgearbeitet und zusammengefasst werden. Die am Ende dieses Schlussberichts aufgelisteten Veröffentlichungen detaillieren ausführlich die gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse.

2 Systemdesign und Halbleiter-Komponenten (AP 1)

2.1 Systemanforderungen für Technologiedemonstrator *Rekonfigurierbare* 4×4 *Schaltmatrix*

Gemäß der Planung für dieses Arbeitspaket wurden anhand von Vorgaben des Projektpartners $TESAT$ die Anforderungen an den Schaltmatrix-Demonstrator definiert. Die zum Zeitpunkt der Antragstellung angepeilten Leistungsmerkmale wurden übernommen, deren Erreichung einerseits den Idealfall repräsentiert und andererseits die Optimierungsrichtungen für die technischen und technologischen Entwürfe vorgibt (vgl. [1], [4]). Die Ausrichtung für das Vorhaben bestand folgerichtigerweise darin, die vorgegebenen Leistungsmerkmale möglichst gut zu erreichen bzw. Erfahrungen und Erkenntnisse bzgl. nicht-erreichbarer Merkmale zu sammeln und zu dokumentieren.

2.2 Bauelemente und Modulkonzeption

Die TUI-Arbeitsgruppe HMT hat sich an diesem Arbeitspaket insofern beteiligt, als die für die Schaltmatrix erforderlichen Schaltelemtente hinsichtlich der erreichbaren Leistungsmerkmale einer ausgiebigen Nachforschung bedurften. Zur Recherche möglicher Schalter sind primär halbleiterbasierte Schaltelemente betrachtet worden, da noch keine kommerziell erhältlichen MEMS-Bauelemente für den betreffenden Frequenzbereich um 20 GHz erhältlich sind. Die recherchierten Schalter-IC unterscheiden sich nach Feldeffekt-Transitor-Typen und PIN-Dioden. bei PIN-Dioden ist zwar die Leistungsaufnahme bzw. der Schaltstrom mit einigen mA vergleichsweise hoch (FET: $\approx$ 100..300 nA), die Einfügedämpfung mit $\approx$ 1..1.5 dB jedoch deutlich geringer, als bei FET-Schaltern mit $\approx$ 3..4 dB. Die Schaltgeschwindigkeit hat bei der Applikation *Rekonfigurierbare Schaltmatrix* eine eher untergeordnete Rolle. Leider hatte der Hersteller der relevanten FET-Schalter kurz nach Projektbeginn die Produktion der Bausteine eingestellt. Substitute waren nicht erhältlich, so dass der ursprünglich angestrebte Vergleich beider Schalttechnologien in diesem Frequenzbereich nicht durchführbar war.

Die Untersuchungen und Schaltungsentwicklungen wurden daher mit PIN-Dioden-basierten Schalterversionen mit Gleichstromeinkopplung auf dem Chip durchgeführt. Diese Variante ist auch aus Gründen der geringeren Komplexität im HF-Design verbunden mit einer kleineren LTCC-Substratgröße und geringeren Einfügedämpfung bevorzugt.

Nach Wichtung der bekannten Randbedingungen ergab sich frühzeitig ein sinnvolles Modulkonzept, das die Integration aller aktiven und passiven Bauelemente der Schaltmatrix in einem einzigen hermetisch gehäusten und beidseitig bestückten LTCC-Modul vorsieht. Zur Minimierung der erforderlichen LTCC-Modulfläche und Verringerung der HF-signalführenden Ebenen sowie zur Symmetrierung der Einzelpfade von Eingängen zu Ausgängen wurde im Berichtszeitraum ein Entwurf erarbeitet, der eine zweiseitige Montage der Halbleiterschalter-Chips vorsieht. Die dafür erforderlichen zusätzlichen technologischen Herausforderungen sind handhabbar und bei der praktischen Realisierung in einem günstigen *Aufwand-Nutzen*-Verhältnis erfüllt worden.

3 Verbesserungen der Technologie/Fertigungsprozesse und erweiterte Designregeln (AP 2)

Die Untersuchungen zur Strukturierung in Ilmenau (vgl. [3], [5]) umfassten Drucke mit Sieben hoher Maschenzahl (*mesh* 400 bzw. 500) und geringer Fadenstärke (18 μm), mit sog. Trampolinsieben (ebenfalls 500 μm / 18 μm) und photostrukturierbaren Pasten (FODEL®-Verfahren). Alle Verfahren gestatten Drucke mit 50 μm Auflösung (Leiterbreiten und -lücken). Leiterzüge können auch bis zu einer Breite von 30 μm herab gedruckt werden. Strukturen unterhalb von 30 μm sollten grundsätzlich in Dünnschichttechnologie ausgeführt werden.

3.1 *Fine-line*-Strukturierung mit Standard-Dickschicht-Technologie

Das Standard-Siebdruckverfahren wurde durch die Verwendung von Tramplinsieben erweitert und dadurch im Druckbild verbessert. Sie haben eine hohe Standzeit und geringere Verzerrungen über das gesamte Substrat, sind jedoch wesentlich teurer gegenüber Standardsieben. Ihr Haupteinsatzgebiet liegt bei Drucken, wo sowohl feinere als auch gröbere Strukturen gleichzeitig realisiert werden müssen. Dabei muss wegen der großflächigeren Strukturen mit großem Absprung gedruckt werden, was bei Standardsieben eine starke Verdehnung des Drucksiebes hervorruft. Derartige Drucke sind häufig überhaupt nur mit Trampolinsieben und ihren elastischen Randbereichen durchführbar. Direktemulsionen zur Siebbeschichtung wurden untersucht, brachten aber keine wesentlichen Verbesserungen gegenüber Polymerfilmen. Die Herstellung von Leitungslücken unterhalb von 50 μm erwies sich als nicht zuverlässig realisierbar. Einige Erläuterungen zur Dimensionierung beim Cofiring: Abbildung 1 zeigt das gewünschte Layout, zwei Leiterzüge von 50 μm Breite mit einem Abstand von 50 μm. Abbildung 2 entstand durch lineare Streckung um 15 %. Dies entspricht der notwendigen Streckung für das Tapesystem DP-951, welches beim Sintern um ca. 13 % schrumpft. Abbildung 3 zeigt das endgültige Design für das Drucksieb. Dabei wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass Tape und Druck beim Sintern nicht nur um die o.g. 13 % schrumpfen, sondern dass sich die gedruckten Leitbahnen darüber hinaus an den Kanten um einen weitgehend festen (aber materialabhängigen) Betrag zurückziehen. Im vorliegenden Beispiel wurden hier 7 μm angenommen. Dieser Wert korrespondiert gut mit den Untersuchungsergebnissen. Die Tatsache, dass sich schmale Leitungen leichter realisieren lassen als schmale Leiterabstände, lässt sich unmittelbar ableiten: Um eine Lücke von 30 μm drucken zu können, muss im Sieb ein Polymerstreifen von ca. 20 μm Breite über eine längere Strecke stabil stehen bleiben (Drahtstärke 18 μm, Filmdicke 15 μm).

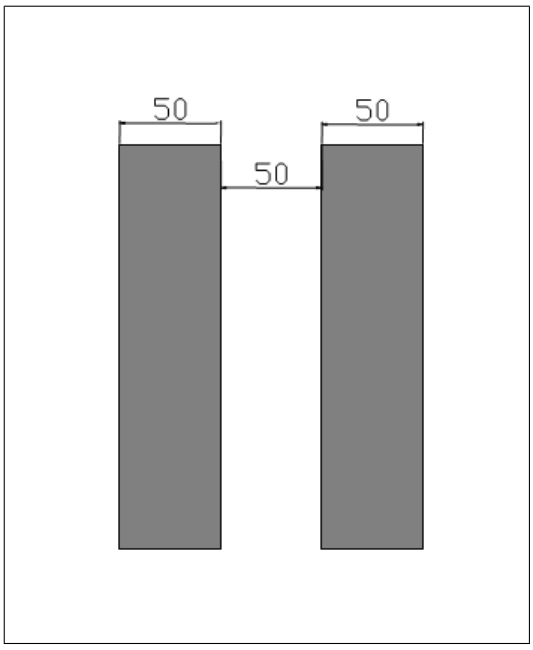


Abbildung 1: Zieldimensionierung: 50 μm Leitungen mit 50 μm Abstand.

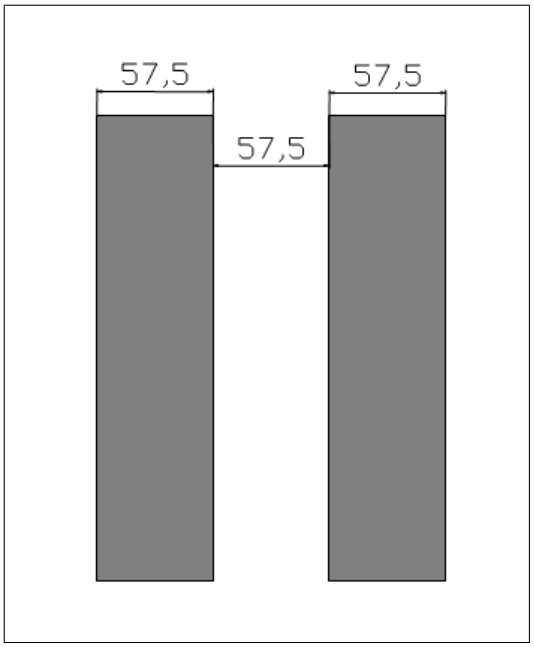


Abbildung 2: Lineare Streckung um 15 % (entspricht einer Schrumpfungsrate von ca. 13 %).

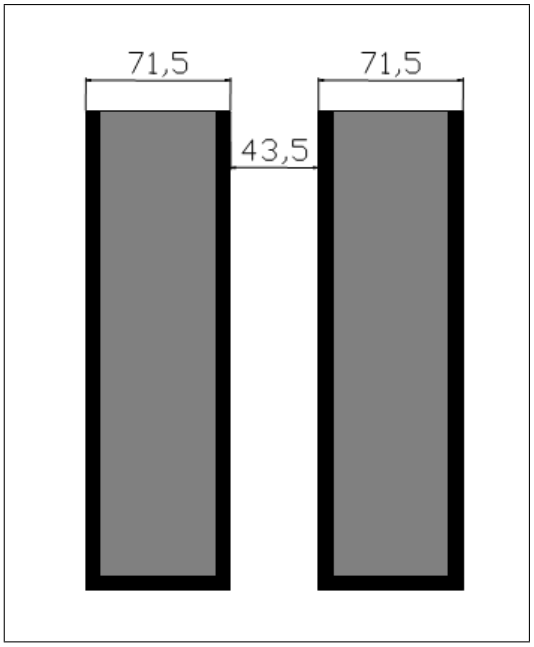


Abbildung 3: Maske (Sieb): Berücksichtigung des nichtlinearen Schrumpfens der Leitbahnen durch konstante Zugabe (im Beispiel 7 μm) an allen Seiten.

3.2 *Fine-line*-Strukturierung mit Hilfe fotostrukturierbarer Pasten

Beim FODEL®-Prozess (die Fotostrukturierungstechnologie von DuPont ist unter dem Markennamen FODEL®-eingeführt) wird die Dickschichttechnik (vgl. Abbildung 4) mit einem fotolithografischen Prozess kombiniert (vgl. Abbildung 5, [10]). Nach dem Druckvorgang wird ein Belichtungs- und ein Entwicklungsschritt eingefügt. Ziel ist die Verbesserung der erzielbaren Auflösung. Durch den vollflächigen Druck der fotostrukturierbaren Pasten wird eine gleichmäßigere gesinterte Schichtdicke über die Substratfläche erreicht. Der klassische Siebdruck kann dies nicht gewährleisten, besonders bei schmalen Leitungsbreiten und -abständen auf großer Substratfläche. Dies ist ein wichtiger Vorteil der fotostrukturierbaren Dickschichtpasten, womit dieses Strukturierungsverfahren eine interessante Alternative zum Siebdruck darstellt. FODEL-Leitpasten basieren auf

Silber bzw. Gold als Leitmaterial, im Rahmen des Projekts wurde aus Gründen der Zuverlässigkeit nur Gold eingesetzt. Die Prozessierung muss im Gelbraum erfolgen.

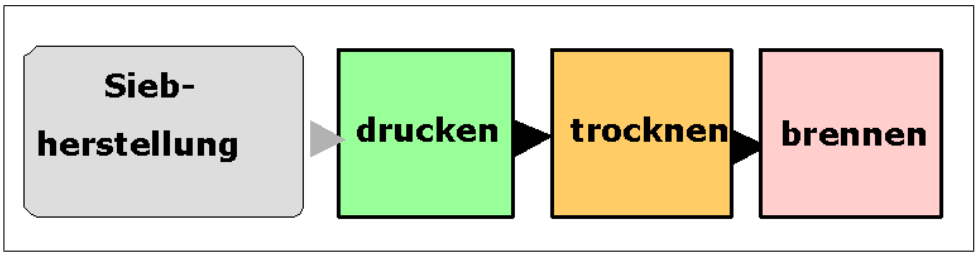


Abbildung 4: Fine-line Siebdruck (Standard-Dickschichtprozess).

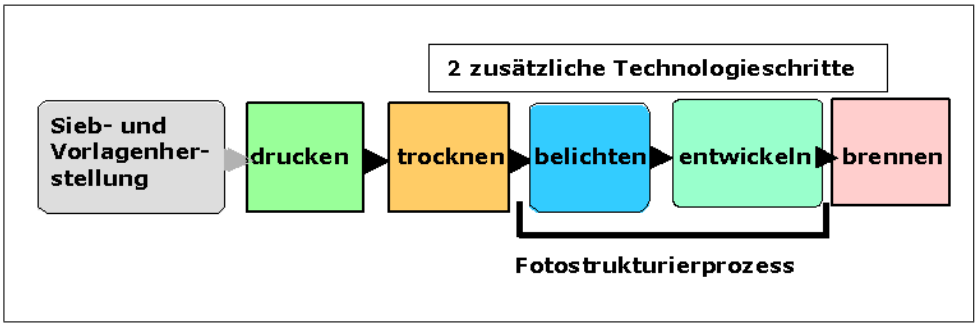


Abbildung 5: FODEL®-Prozess mit fotostrukturierbaren Dickschichtpasten.

Während des Cofire-Sinterns schrumpfen sowohl die LTCC Substrate als auch die FODEL®-Strukturen. Vergrabene Strukturen schrumpfen im gleichen Maße wie die Substrate. Im Unterschied dazu erleiden äußere Strukturen eine stärkere Schrumpfung als das LTCC Substrat selbst (vgl. [6], [12]). Bei der Layouterstellung muss daher das unterschiedliche Verhalten innerer und äußerer Schichten beachtet werden. Postfire-FODEL®-Gold Strukturen (DP 5956) auf gesinterten LTCC Substraten (sowohl DP-951 als auch auf DP-943) werden 30 μm breiter als ihre Zielabmessungen (gesintert) dimensioniert. Mit vergrabenen Cofire-Strukturen wurden teilweise bessere Ergebnisse erreicht als im postfiring.

Dimensionierung von FODEL®-Strukturen

Postfire-FODEL®-Gold Strukturen (DP 5956) auf gesinterten LTCC Substraten (sowohl DP-951 als auch auf DP-943) werden 30 μm breiter als ihre Zielabmessungen (gesintert) dimensioniert (vgl. [15]). Mit vergrabenen Cofire-Strukturen wurden teilweise bessere Ergebnisse erreicht als im postfiring. Für die Dimensionierung von FODEL®-Strukturen in inneren Lagen wurden empirisch die folgenden Beziehungen gefunden:

$$L_F[\mu m] = 5 + \frac{L_S}{\left(1 - \frac{S_T}{100}\right)}$$

$$G_F[\mu m] = \frac{G_S}{\left(1 - \frac{S_T}{100}\right)} - 5$$

L_F: Breite eine Leiterzuges auf dem Film

L_S: gewünschte gebrannte Leiterbreite

G_F Breite einer Lücke auf dem Film

G_S: gewünschte gebrannte Spaltbreite

S_T: Schrumpfrate des Tapes in %

Abbildung 6: Empirisch gefundene Beziehungen für die Dimensionierung von FODEL®-Strukturen in den inneren Substratlagen.

Probleme beim Einsatz fotostrukturierbarer Pasten auf LTCC

Im Rahmen des Projektes wurde der Einsatz der Postfire FODEL®-Gold Paste DP 5956 auf gesinterten LTCC-Substraten der Tape-Systeme DP-951 und DP-943 untersucht. Bei der Strukturierung von FODEL®-Materialien auf LTCC-Substraten können Verwerfungen an den Rändern, das sogenannte *edge curling auftreten* (vgl. Abbildung 7). Dies ist besonders beim Tapesystem DP-951 der Fall. Bei Tapes vom Type DP-943 ist dieser Effekt beim Aufbringen von FODEL®-Goldpasten im postfiring nicht zu beobachten. Hier findet allerdings eine starke Interaktion zwischen Tape und Paste in Form von Glasdiffusion (Wanderung von Glas vom Tape in die Leitbahnen) statt (vgl. Abbildung 8), die jedoch die elektrischen Eigenschaften der Leitbahnen kaum verändert (vgl. Abbildungen 26 and 27). Leiterbahnen mit der FODEL®-Gold-Paste DP 5956 an der Oberfläche des Substrats sind prinzipiell auch im co-firing realisierbar. Während der Untersuchungen zeigte sich aber eine große Chargenabhängigkeit, so dass von dieser Herstellungsvariante abgeraten werden muss.

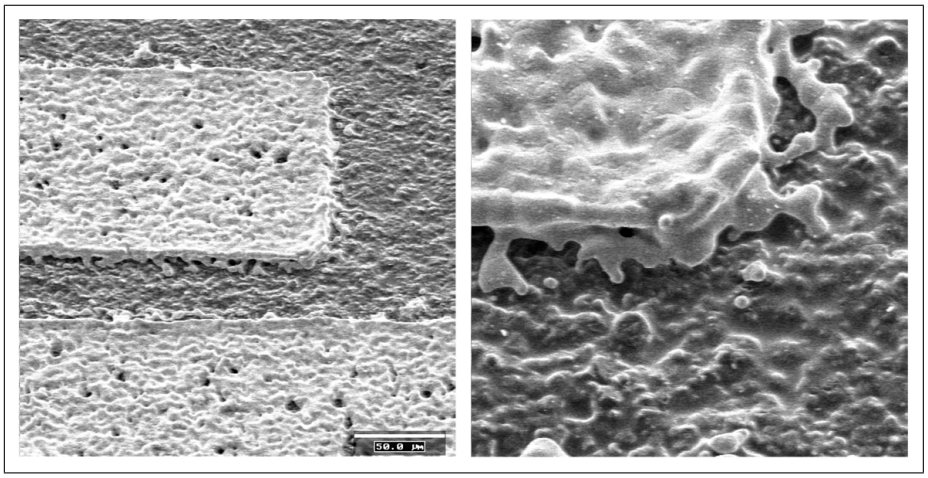


Abbildung 7: REM-Aufnahme einer im postfiring strukturierten Leitung auf gesintertem LTCC DP-951-Substrat (rechts: 5fach vergrößert).

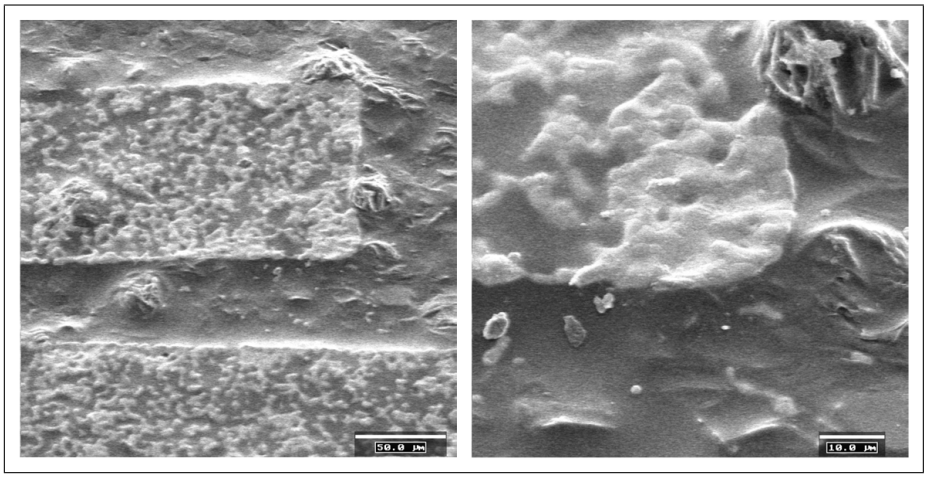


Abbildung 8: REM-Aufnahme einer im postfiring strukturierten Leitung auf gesintertem LTCC DP-943-Substrat (rechts: 5fach vergrößert).

3.3 Tape- und Keramikstrukturierung (3D)

Im Projektzeitraum erfolgten umfangreiche Tests zur Realisierung doppelseitiger Kavitäten. Die Schwierigkeiten bestehen im Wesentlichen in der Vermeidung des Durchhängens des verbleibenden Bodens (zwei Lagen) während der Sinterung sowie der stressarmen Lamination zur Vermeidung von Vorschädigungen am Mehrlagenaufbau. Zur Brennoptimierung wurde das Sinterprofil angepasst. Insgesamt fünf Varianten der Lamination

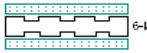
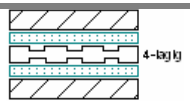
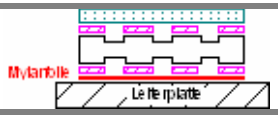
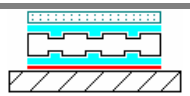
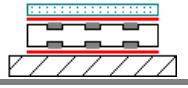
sowie drei Strukturierungsverfahren zur Erzeugung von Öffnungen in Einzelfolien wurden in einer Testmatrix untersucht. Dabei wurden mit unterschiedlichen Technologien Kavitäten (Zielabmaße 2.89 × 2.37 mm^2 gebrannt) erzeugt und vor und nach dem Einbrand vermessen. Für die ungebrannten Tapes hatten die Kavitäten Abmessungen von 3.38 × 2.78 mm^2. Einige der Ergebnisse sind in der Abbildung 10 dargestellt. Ermittelt wurde hierbei die Abweichung von den Zielwerten, Mittelwert und Standardabweichung bei einer größeren Anzahl von Messwerten sowie die größten Abweichungen nach unten und oben. (Abkürzungen: SrW: Stanzen mit rundem Werkzeug, SqW: Stanzen mit quadratischem Werkzeug). Einige der Kombinationen aus Strukturier- und Laminierverfahren führten zu zerstörten Substraten, die entsprechenden Messwerte fehlen daher in der Tabelle. Abbildung 11 zeigt beispielsweise ein mit einem quadratischen Werkzeug gestanztes Substrat nach dem isostatischen Laminieren ohne Setter (Setter: stabile vorübergehende Auffüllung der Kavität zur Verringerung von Verformung bzw. Durchbiegung während des Laminierens). Die Evaluierung der Prozesstauglichkeit erfolgte anhand der messtechnischen Bewertung nach den einzelnen Verarbeitungsschritten. Sowohl laserstrukturierte als auch gestanzte Folien (quadratisches Werkzeug) zeigten geringe Toleranzen. Die Verwendung quadratischer Werkzeuge bedingt allerdings eine Drehung des Komplettdesigns um 45 °. Im Hinblick auf den Transfer der Schaltmatrix in die industrielle Fertigung bei der MSE GmbH bietet das Stanzverfahren die besten Erfolgschancen. Als einzig zuverlässig einsetzbare Laminationsart wurde ein quasiisostatisches Verfahren mit einem Lagenaufbau bestehend aus zwei Settern und Silikonfolien ermittelt. Karbontape-Inserts brannten nicht rückstandsfrei aus und reagierten mit der Leiterbahn in der Kavität (vgl. Abbildung 12). Beim Vorlaminieren (vgl. Abbildung 13) wurde ober- und unterhalb eine Mylarfolie eingefügt, welche lasergeschnittenen Ausschnitte in Form der Kavitäten erhielt. Der nachfolgende Laminierprozess (vgl. Abbildung 14) entsprach vom Temperatur-Druck-Profil dem Standardprozess für das Materialsystem DP-951.

Prozess	Schneiden	Lamination	Sintern
Variante	• NdYAG-Laser • Stanzen • NdYAG-Laser nach Siebdruck	• Uniaxiale Vorlamination (ca. 14 Bar/70°C) • gegossene Silikonfolie • Silikonmatte • Silikonmatte + Metallfolie • Karbontape-Inserts • Isostatische Lamination	Sinterprofile: • TU Ilmenau • MSE MM
Vortest	• Laserschneiden und Stanzen mit rundem Werkzeug für 45° Cavity • Stempel für 0° Cavity	• Silikonmatte beidseitig ohne Setter • Silikonmatte beidseitig mit einseitigem Setter • Silikonmatte+ Metallfolie	Profile: • TU Ilmenau • MSE MM

Abbildung 9: Kombinationen der Laminationsverfahren.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass bei der Realisierung von Designs mit größeren Kavitäten und Aufbauten mit sehr unterschiedlichem Metallisierungsgrad in den einzelnen Ebenen gegenwärtig noch nicht auf experimentelle Voruntersuchungen auf der Grundlage des konkreten Designs verzichtet werden kann, da das Schrumpfverhalten der LTCC-Stapel von einer großen Anzahl von Faktoren abhängt. Die Realisierung von Kanälen und Kavitäten erfordert Abweichungen von den von den Herstellern empfohlenen Standardprozeduren. Hier haben sich insbesondere Vor- und Teillaminationen bei stark verringertem Druck bewährt.

LAMINATIONSART

	Silikon beidseitig ohne Setter	Silikon beidseitig mit Setter	Edelstahlmaske	Silikon gegossen	Karboninsert
Stapelaufbau					

LAMINIERT

	Axis	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
LASER	Diff	x	x							102	121
	Mitt+-StAb	x	x							3,4741+-0,064	2,8957+-0,039
	Tol mit Max-Min	x nicht möglich	x zu messen							-0,15 +0,12	-0,10 +0,04
SrW	Diff	-68	-27			-44	-43	-59	-96	-43	-35
	Mitt+-StAb	3,3037+-0,012	2,7479+-0,0141			3,3277+-,077	2,7321+-0,0325	3,3126+-,045	2,6789+-,0414	3,3291+-0,047	2,7401+-0,0452
	Tol mit Max-Min	-0,03 +0,03	-0,03 +0,04			-0,31 +0,10	-0,04 +0,09	-0,18 +0,08	-0,17 +0,07	-0,19 +0,08	-0,20 +0,09
SqW	Diff			x	x					1	-9
	Mitt+-StAb			x	x					3,3731+-0,014	2,7661+-0,0663
	Tol mit Max-Min			x nicht	x gemessen					-0,06 +0,09	-0,11 +0,15

GESINTERT

		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
LASER	Diff	-21	-44							13	-50
	Mitt+-StAb	2,9132+-0,0124	2,3695+-0,0196							2,9469+-0,0157	2,3635+-0,0161
	Tol mit Max-Min	-0,02 +0,06	-0,04 +0,12							-0,05 +0,08	-0,04 +0,09
SrW	Diff	-158	114			-57	-79	-67	-107	-53	-89
	Mitt+-StAb	2,7761+-0,1103	2,5280+-0,0505			2,8774+-0,0295	2,3347+-0,0149	2,8665+-0,0196	2,3066+-0,0117	2,8814+-0,0279	2,3253+-0,0255
	Tol mit Max-Min	-0,20 +0,16	-0,25 +0,22			-0,14 +0,06	-0,03 +0,09	-0,12 +0,05	-0,02 +0,03	-0,08 +0,10	-0,06 +0,09
SqW	Diff			-14	-62					-13	-48
	Mitt+-StAb			2,9203+-0,053	2,3520+-0,026					2,9212+-0,0216	2,3662+-0,0217
	Tol mit Max-Min			-0,03 +0,02	-0,04 +0,05					-0,04 +0,03	-0,05 +0,05

Abbildung 10: Übersicht der untersuchten Laminationsarten.

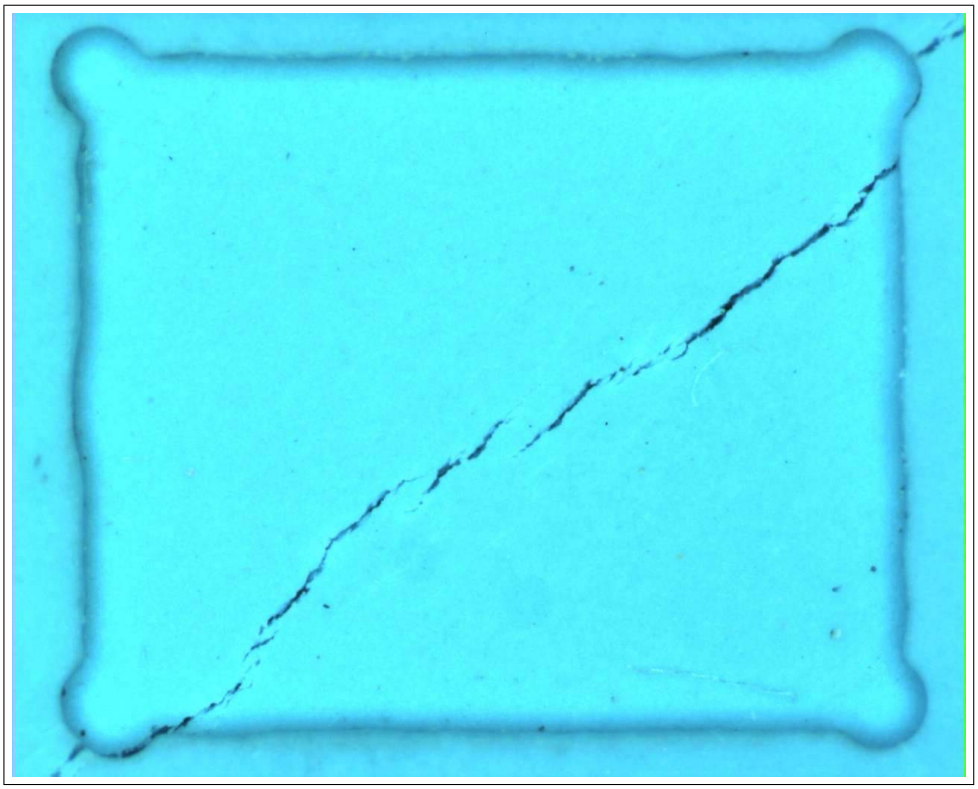


Abbildung 11: Rissbildung beim freien isostatischen Laminieren ohne Setter.

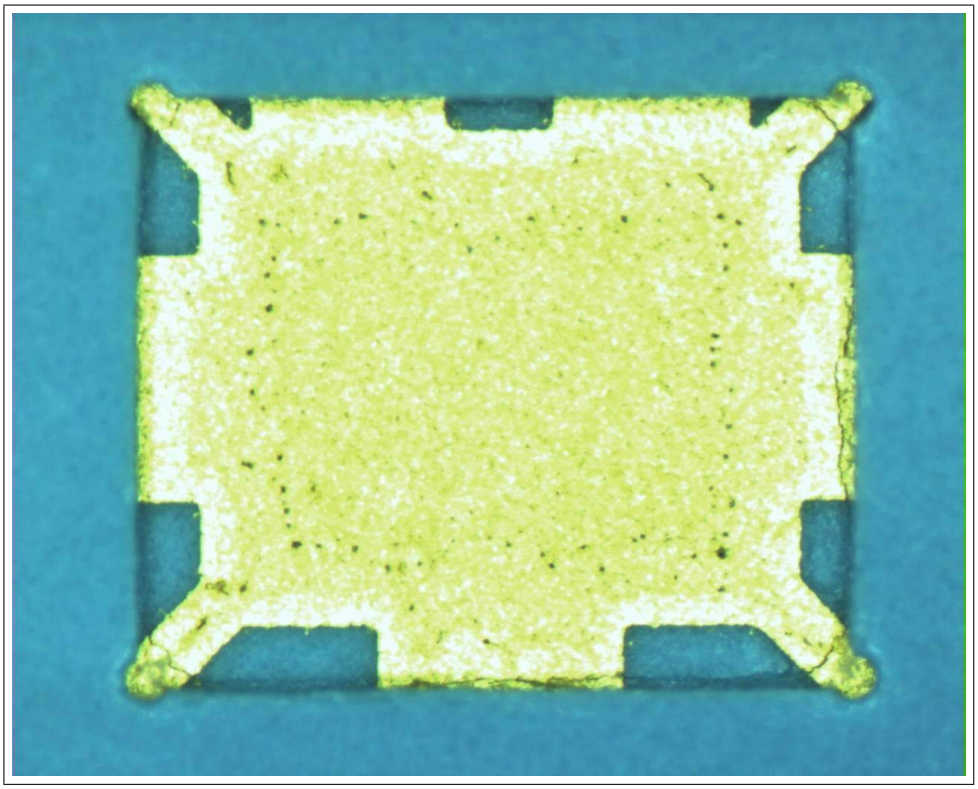


Abbildung 12: Beeinflussung der Goldschicht durch die Karbon-Inserts.

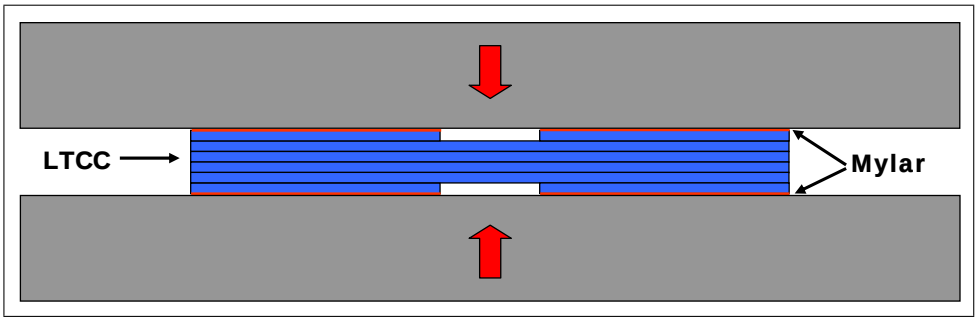


Abbildung 13: Uniaxiale Vorlamination: ϑ = 70 °C, t = 120 sec., p = 2.7 N/mm^2.

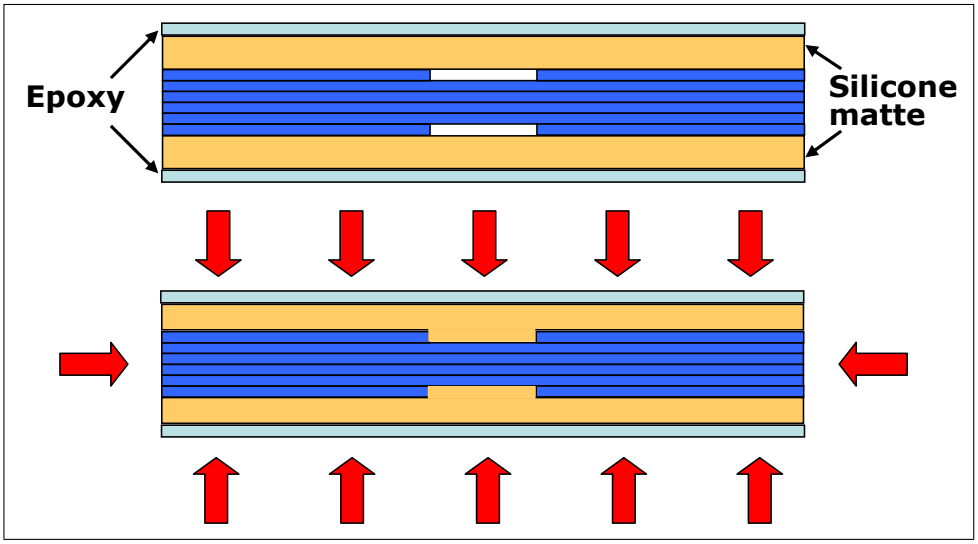


Abbildung 14: Isostatische Lamination: ϑ = 70 °C, t = 600 sec., p = 20.4 N/mm^2.

3.4 Allgemeine Designregeln

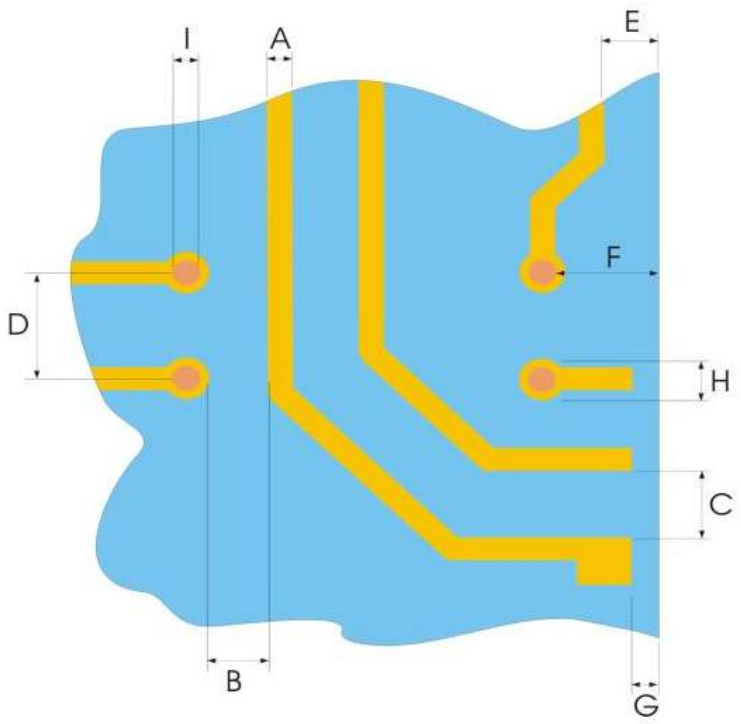
Die Abbildungen 15 und 16 fassen die Erkenntnisse bezüglich minimaler Strukturabmessungen zusammen und geben entsprechende Designempfehlungen.

Erreichbare Auflösung	DP 5956	DP 5956
	Cofire	Postfire
	Innere Strukturen	
Leiterbreite w [µm]	50/35	X
Leiterabstand g [µm]	40/25	X
	Äußere Strukturen	
Leiterbreite w [µm]	X	50/18
Leiterabstand g [µm]	X	50/40

Kantengenauigkeit (gesintert)		
	DP 5956	DP 5956
	Cofire	Postfire
	Innere Strukturen	
Std.-Abweichung [µm]	2	X
	Äußere Strukturen	
Std.-Abweichung [µm]	X	3,2

Abbildung 15: Erreichbare Strukturierungsauflösung und Kantengenauigkeiten (gesinterte Abmessungen, schwarz: sicher erreichbar, rot: im Labor in Einzelfällen erreicht).

Aufgrund der geringen Positionierungstoleranzen beim Belichten bzw. Stapeln (kleiner als 30 μm) und der zufriedenstellenden Via-Füllqualität (vgl. [11]) sind Via-Fangpads bei Cofire-Prozessen nicht unbedingt erforderlich. Im Gegensatz dazu sind diese in Postfire Strukturierungsprozessen aufgrund der relativ höheren Tapeschrumpfungstoleranzen empfehlenswert. Dies gilt insbesondere bei den Verbindungen von Leiterbahnen und Durchkontaktierungen mit Breiten bzw. Durchmessern unter 75 μm.



Tapesystem			DP-951
Lagenstärke			Typ PX,P2 und PT
Layout-Parameter	**Index**	**Maßeinheit**	**Abmessungen**
Leiterbahnbreite	A	µm	w[1]
Abstand - Leiterbahn - Via	B	µm	100
Leiterbahnabstand	C	µm	g[1]
Via Pitch	D	µm	2.5xI
Abstand - Leiterbahn – Strukturkante	E	µm	75 [2]
Abstand - Via – Strukturkante	F	µm	150 [3]
Abstand - Pad – Strukturkante	G	µm	75µm
Via-Fangpad	H	µm	I+50 [4]
Via Durchmesser (grün)	I	µm	75µm

[1] abhängig von Material und Prozess (Cofire oder Postfire)

[2] Cofire: geschnitten nach der Leiterbahnstrukturierung; Postfire: gesägt

[3] Gesägt

[4] Nur bei Postfire Strukturen nötig

Abbildung 16: Designregeln (minimale Strukturabmessungen) und Erläuterungen. Der Abstand zwischen Leiterbahn und Strukturkante (E) gilt für nach der Leiterbahnstrukturierung erzeugte Kavitäten und Substratdurchbrüche. Der Abstand Via-Kante zu Substratkante (F) gilt auch für Substratdurchbrüche und Aussparungen.

4 Design und Analyse der HF-Eigenschaften von LTCC-Systemen (AP 3)

4.1 Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung und Analysefähigkeit

Wegen starkem, rauigkeitsbedingtem Verschleiß und mechanischen Instabilitäten, die bis zum Totalausfall von Messspitzen führten, wurden Tastspitzen eines anderen Herstellers in Betrieb genommen (vgl. [7]): Die Z-Probes (vgl. Fotografie in Abbildung 17) von Süss MicroTec GmbH passen deutlich besser zu den LTCC-eigenen Randbedingungen (Höhenunterschiede in der Kontaktierungsebene und Rauigkeiten). Zur Kalibrierung der verwendeten Messanordnung wurden allgemein gültige, d.h. für alle Substrate in gleicher Weise angewendete sorgfältige SOLT-Kalibrierungen mit einem kommerziellen Kalibriersubstrat (Dünnschichttechnologie) verwendet. Vergleichsmessungen bestätigten eine deutlich höhere Wiederholgenauigkeit der Messungen und eine reproduzierbar hohe Reflexionsdämpfung beim Kalibrieren (vgl. [13], [16]). Diese Vorteile führten zu einer höheren Genauigkeit und größeren Messdynamik unserer Messanordnung: Messunsicherheiten von besser als –35 dB sorgten für eine hinreichend große Präzision des Messaufbaus bis 50 GHz, um die Einflüsse und Unterschiede der Technologien an sich und Abweichungen innerhalb einer Technologie akkurat zu bewerten. Untersuchungen der Messanordnung und Messungen mit bekannten Strukturen (kommerzielle Kalibrierelemente in Dünnschichttechnologie) haben ergeben, dass der sinnvoll nutzbare Charakterisierungsfrequenzbereich bei ziemlich genau 50 GHz endet.

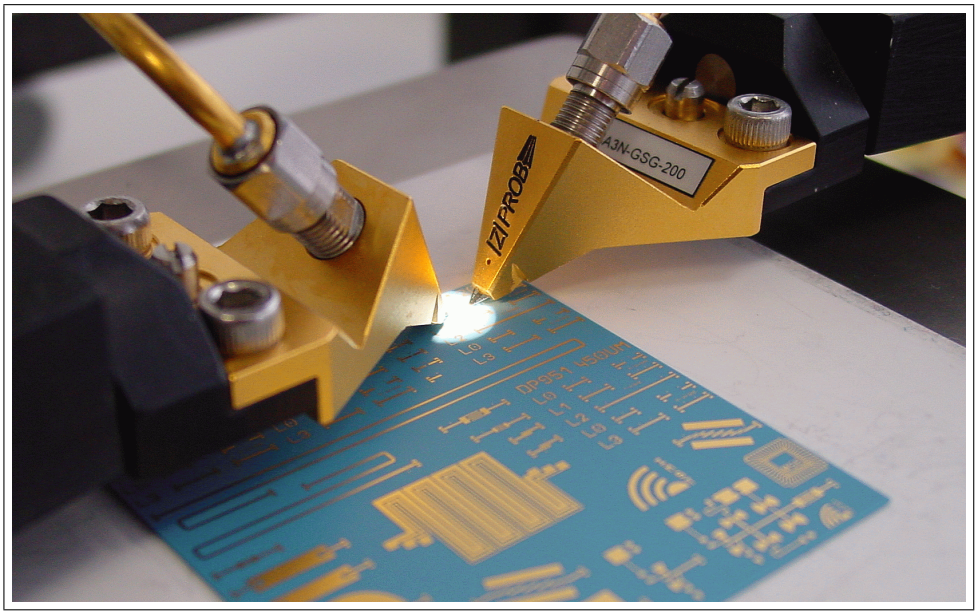
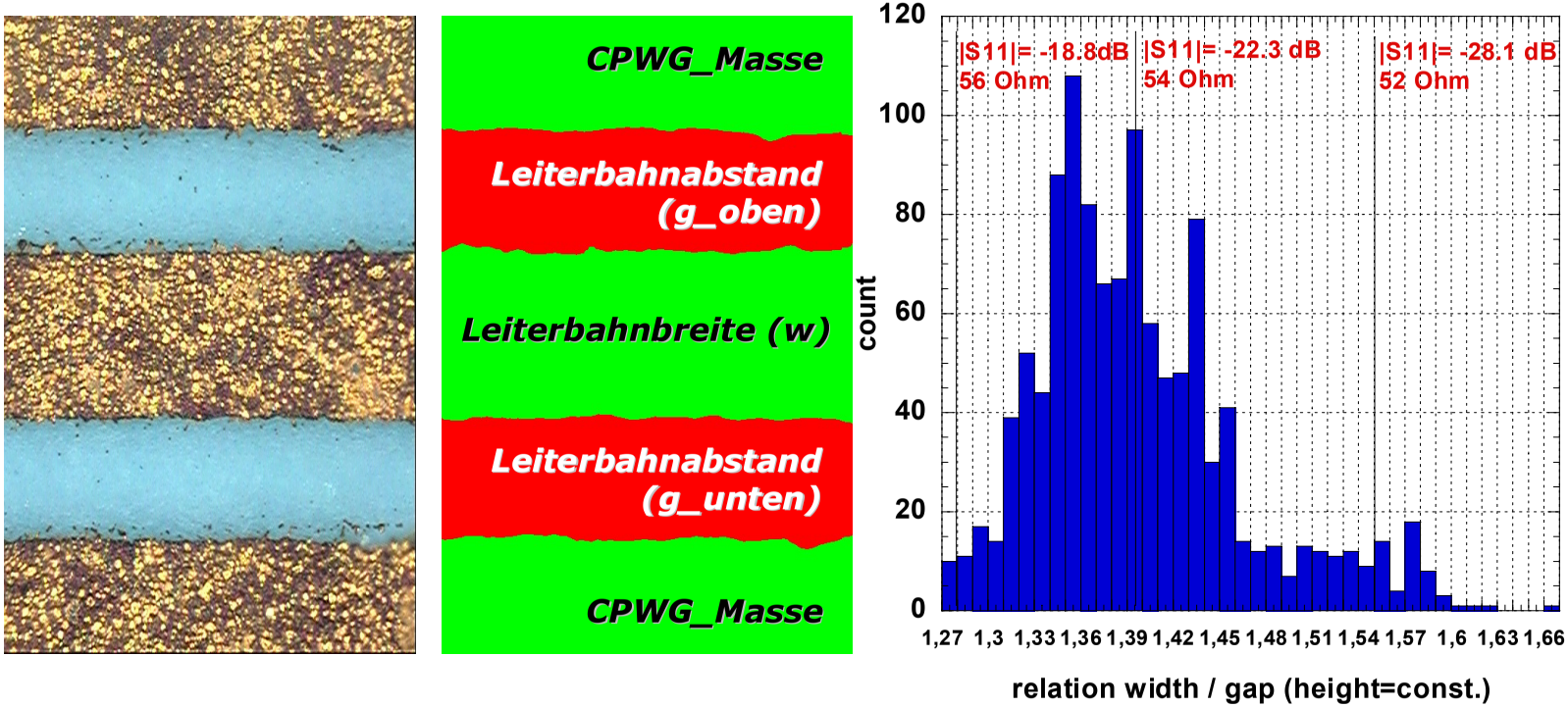


Abbildung 17: Durchführung der Hochfrequenzmessungen mit Ground-Signal-Ground-Messspitzen (Pitch-Weite 200 – 650 μm).

Für die optische Untersuchung und entsprechende statistische Auswertungen der Leitungsdimensionen wurde ein für Vermessungen kalibriertes Mikroskop verwendet. Klassifiziert wurde das mit ca. 500,000 bzw. 3,000,000 Punkten digitalisierte Abbild nach Metallisierung bzw. Leitungselementen und Dielektrika. Exemplarisch ist in der Abbildung 18 eine derartige Analyse eines Ausschnitts einer koplanaren Mikrowellenleitung dargestellt. Mit Hilfe dieser statistischen Auswertung sind nun zuverlässige quantitative Aussagen über Kantengenauigkeiten bzw. Kantenrauigkeiten, Leiterbahnbreiten und die entsprechenden Leiterbahnabstände möglich. Dadurch können auch mögliche Asymmetrien bei der FODEL®-Prozessierung analysiert werden. Die sorgfältigen Charakterisierungen von Oberflachenstrukturen waren erforderlich, um möglichst genau lokale Schrumpfungsraten für verbesserte Prozessparameter zu ermitteln, die auch vom lokalen Metallisierungsgrad abhängen. Ergänzend werden damit auch verbesserte Verifikationen der Entwürfe durch präzisere Rückkopplungen der realen Abmessungen in die EM-Feldsimulation durchführbar.



Koplanarer Wellenleiter (Bsp. FODEL®):

- Leiterbahnabstand (oben) : 101.17 µm (VAR: 13.2 µm²)
- Leiterbahnbreite (mitte) : 142.04 µm (VAR: 7.5 µm²)
- Leiterbahnabstand (unten) : 102.54 µm (VAR: 9.2 µm²)
- Verhältnis w/g : 1.40023 (VAR: 0.00486)

- **Resultiert in 54.05 Ω mittlerer Leitungsimpedanz: $|S_{11}| = -22.3$ dB**

Abbildung 18: Optische Analyse und statistische Auswertung der mechanischen Struktureigenschaften und der entsprechenden Auswirkungen auf das HF-Reflexionsverhalten am Beispiel FODEL®.

4.2 Technologievergleich der *Fine-line*-Strukturierungsverfahren

Mehrere Projektpartner waren beim Entwurf, der Herstellung sowie der Charakterisierung von Feinlinienstrukturen beteiligt. Ziele der Untersuchung waren Technologieparameter, Einsatzgrenzen (Reproduzierbarkeit) und Designregeln für die Strukturierungsmethoden:

- Feinliniensiebdruck,
- Ätzstrukturierung von Dickschichtleiterbahnen,
- Fotolithografische Pastenstrukturierung (FODEL®) und
- Dünnschicht auf gesinterter LTCC

für zwei Foliensysteme (DP-951, DP-943) zu ermitteln (vgl. [7], [9], [13], [16], [19], [20] und [22]).

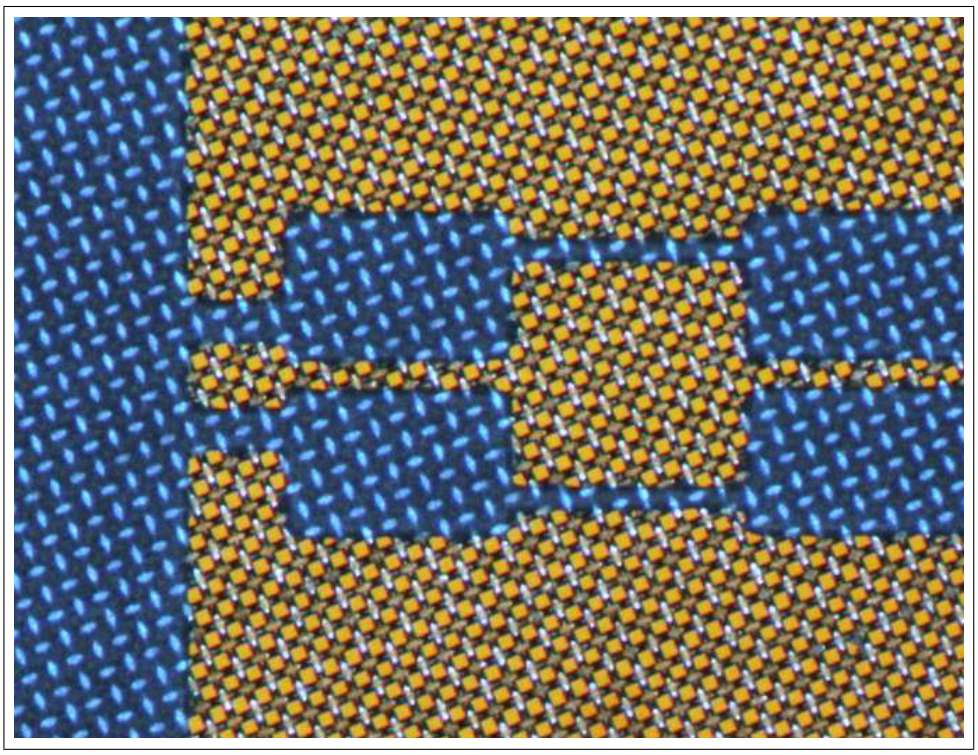


Abbildung 19: Hochauflösendes Sieb mit 30 μm Strukturen. Die gelben Quadrate sind die nach der Siebstrukturierung verbleibenden Öffnungen.

Technologiebeschreibung:

Durch den Einsatz von speziellen Siebgeweben der Fa. Koenen (Lizenzproduktion Topro/Japan) mit geringer Fadenstärke sowie kleiner Gittergröße konnten mit den cofire Goldpasten DP 5743 und HF602 Auflösungen von ca. 30 μm Leitungen und Abständen gedruckt werden (vgl. Abbildung 19). Bei der Sinterung kommt es zu einer verstärkten Schrumpfung im Leitungskantenbereich, der zu größeren Abständen führt. Die Auflösung von Lücken zwischen Leiterbahnen ist damit durch die minimale Stegbreite, die auf dem Sieb stabil erhalten bleibt, bestimmt. Im Postfire-Prozess sind derartige Strukturauflösungen nicht erreichbar, da auf dem gesinterten Substrat ein stärkeres Verfließen der gedruckten Pasten zu beobachten ist. Auf grünen Folien wird dieser Effekt minimiert, da Lösungsmittel von der porösen Unterlage aufgesaugt werden. Geätzte Dickschichtstrukturen werden im gesinterten Zustand erzeugt. Die Pasten wurden vollflächig auf die ungesinterten Tapes (cofire) bzw. auf die gesinterten LTCC-Substrate (postfire) aufgebracht. Die Ätzstrukturierung erfolgte beim Projektpartner RHe Microsystems GmbH in Radeberg. Das FODEL®-System der Fa. DuPont kann im Allgemeinen sowohl auf grünen Folien als auch auf gesinterten Substraten angewendet werden. Da im Projekt ein

reines Goldsystem spezifiziert wurde, zu dem keine geeignete FODEL-cofire-Paste zur Verfügung steht, konnte die Fodelstruktur nur auf gesinterten Substraten hergestellt werden. Dünnschichttechnologien lassen sich nur auf der Oberfläche der gesinterten LTCC anwenden. Der Projektpartner RHe Microsystems setzte zwei Materialsysteme in Verbindung mit galvanischer Verstärkung ein. Die Tabelle in Abbildung 20 zeigt typische Schichtstärken der beiden Systeme, die eine Leiterbahnauflösung von 10 μm erlaubte.

Processing steps	CrNi/Cu/Ni/Au		TiW/Au	
	Patterning Method	Thickness	Patterning Method	Thickness
Step 1	CrNi Sputtering	60 nm	TiW Sputtering	50 nm
Step 2	Cu Sputtering	1 µm	Au Sputtering	100 nm
Step 3	Cu Electroplating	3 µm	Au Electroplating	3 µm
Step 4	Ni Electroplating	2 µm		
Step 5	Au Electroplating	1 µm		

Abbildung 20: Typische Schichtstärken der Dünnschichtsysteme.

Teststruktur I:

Abbildung 21 zeigt die Teststruktur, die von IMST GmbH entworfen wurde. Sie enthält:

- Leitungskalibrierelemente (Elemente L0 – L3),
- Leitungen (Elemente L2, L3 und 2, 3),
- Mäanderstrukturen zur Widerstandsmessung (Elemente 1a – 1c),
- Filterelemente (Elemente 4 – 10 und 14, 15),
- Resonatoren zur Materialcharakterisierung (Elemente 10 – 13) und
- Lämgs- und stirnseitengekoppelte Kondensatoren (Elemente 14 – 20).

Bei der Auswertung des Technologievergleichs (Vorstellung beim Projekttreffen in Hamburg-Harburg) zeigten sich Diskrepanzen zwischen theoretischen und gemessenen Dämpfungsbelägen. Ein Vergleich zu einer ähnlichen Leitungsteststruktur eines früheren Projektes ergab signifikante Unterschiede im Verhalten des KERAMIS-Designs. Als grundlegende Unterschiede wurden das Pad-Design für die Koplanarantastung sowie die Masseführung in den inneren Lagen identifiziert. Zur Bewertung der Einflüsse wurden Teststrukturen entworfen, auf der die Pad- und Massestrukturen in verschiedenen Kombinationen untersucht werden konnten (vgl. Abbildung 23).

Abbildung 22 zeigt die Messergebnisse der Einfügedämpfung für 9 mm lange Mikrostreifenleitung mit allen Designoptionen. Die Kurven demonstrieren den signifikanten Kombinationseinfluss Masseführung/Paddesign. Die Leitung mit schmaler lokaler Bezugsmassefläche sowie den Probepads mit zwei Durchkontaktierungen hatte die größte Einfügedämpfung. Beste Ergebnisse ergaben sich bei der Kombination Paddesign mit acht Durchkontaktierungen und global vernetzter Massefläche mit breiterer Vollmasse unter der Leitung. Auf Basis dieser Erkenntnisse entstand ein angepasstes Technologievergleichslayout (Version 2, Abbildung 24). Bei diesem Design entfielen die Strukturen, die bereits beim ersten Vergleich nicht ausgewertet wurden. Zusätzlich hinzu kamen Mikrostreifenleitungen mit dünnem Dielektrikum (eine Lagenstärke). Dazu wurden der Lagenaufbau für das Material DP-951 von vier auf sechs Lagen erhöht und die Lagenstärke von 210 μm auf 96 μm reduziert. Die Herstellung aller Substrate erfolgte aus Zeitgründen an der Technischen Universität Ilmenau in Zusammenarbeit mit der RHe Microsystems GmbH (Ätzstrukturierung und Dünnschichtvarianten).

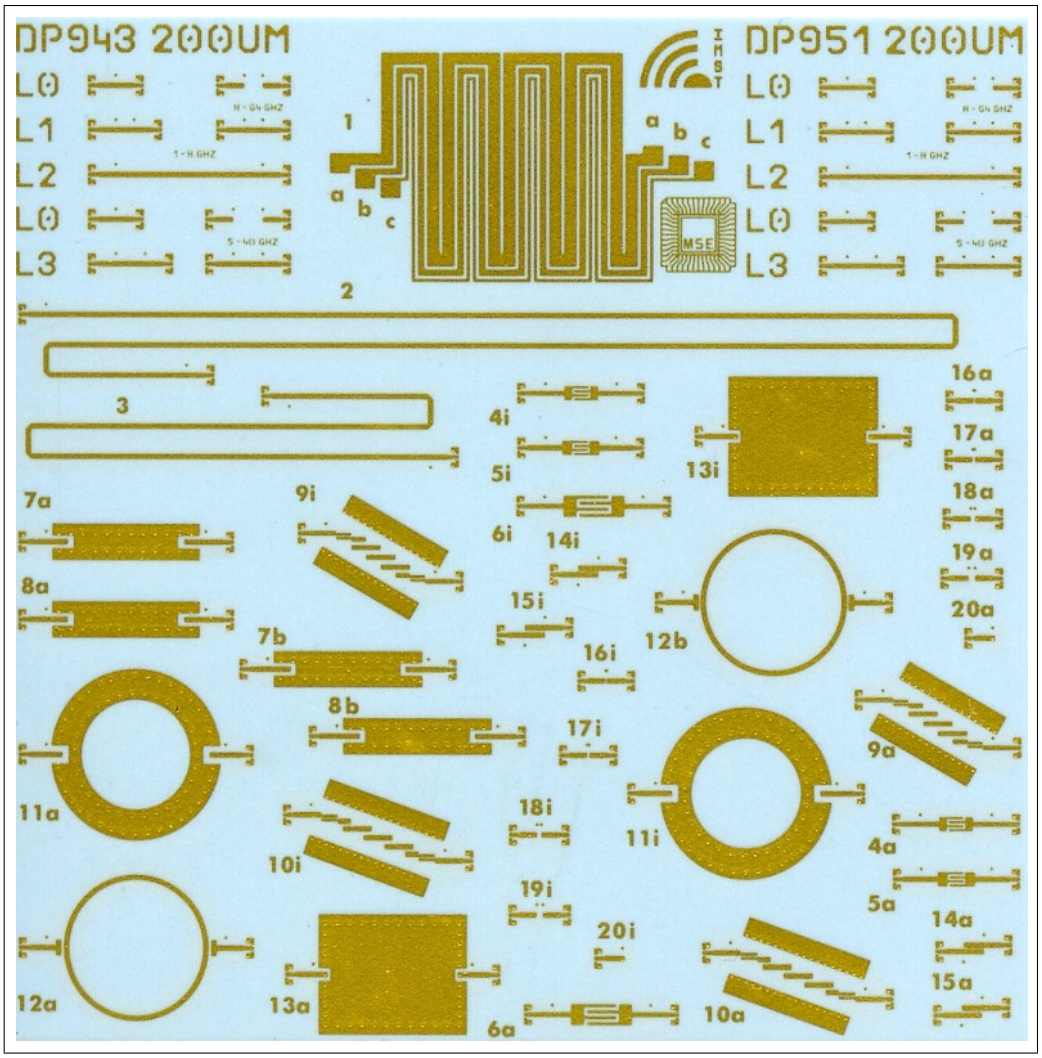


Abbildung 21: Teststruktur I des Technologievergleichs (Elemente *i:* innen- bzw. *a*: außenliegend).

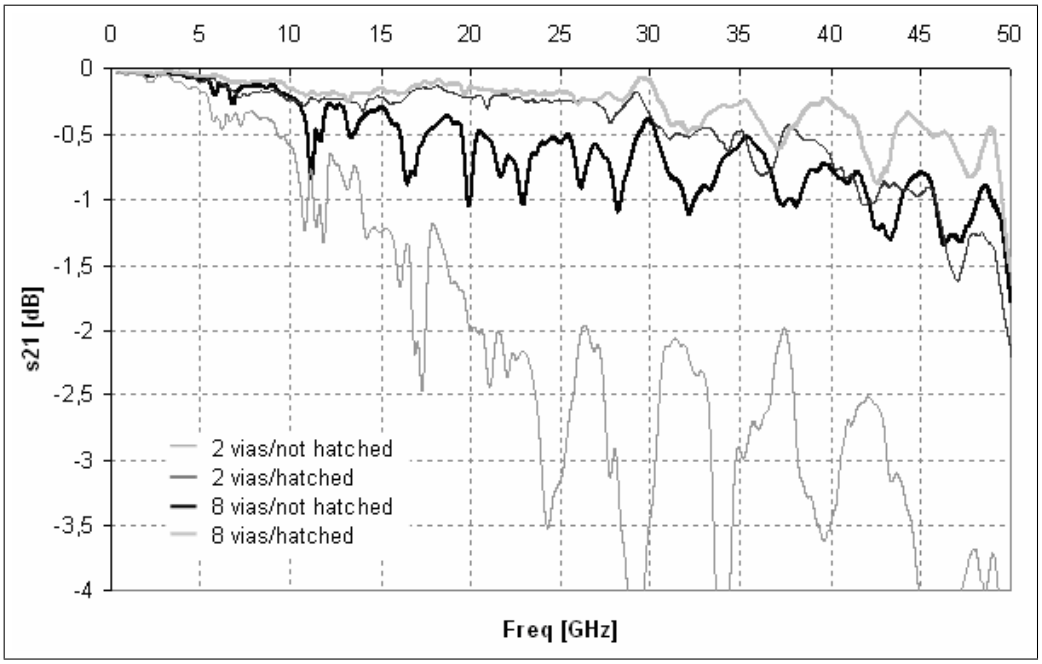


Abbildung 22: $|S_{ji}|$ von Mikrostreifenleitungen mit unterschiedlicher Pad- und Massekonfiguration.

Struktur	Teststruktur Technologievergleich I	Frühere Teststruktur
Koplanarprobe Pads (ports)	-2 Vias zur Masse	-8 Vias zur Masse
Massefläche	-Massestreifen in 5-facher Leitungsbreite -Keine leitende Verbindung zwischen einzelnenTeststrukturen	-Massestreifen in 5-facher Leitungsbreite -Alle Teststrukturen sind über ein Gitter miteinander verbunden

Abbildung 23: Unterschiede zwischen Teststrukturdesigns.

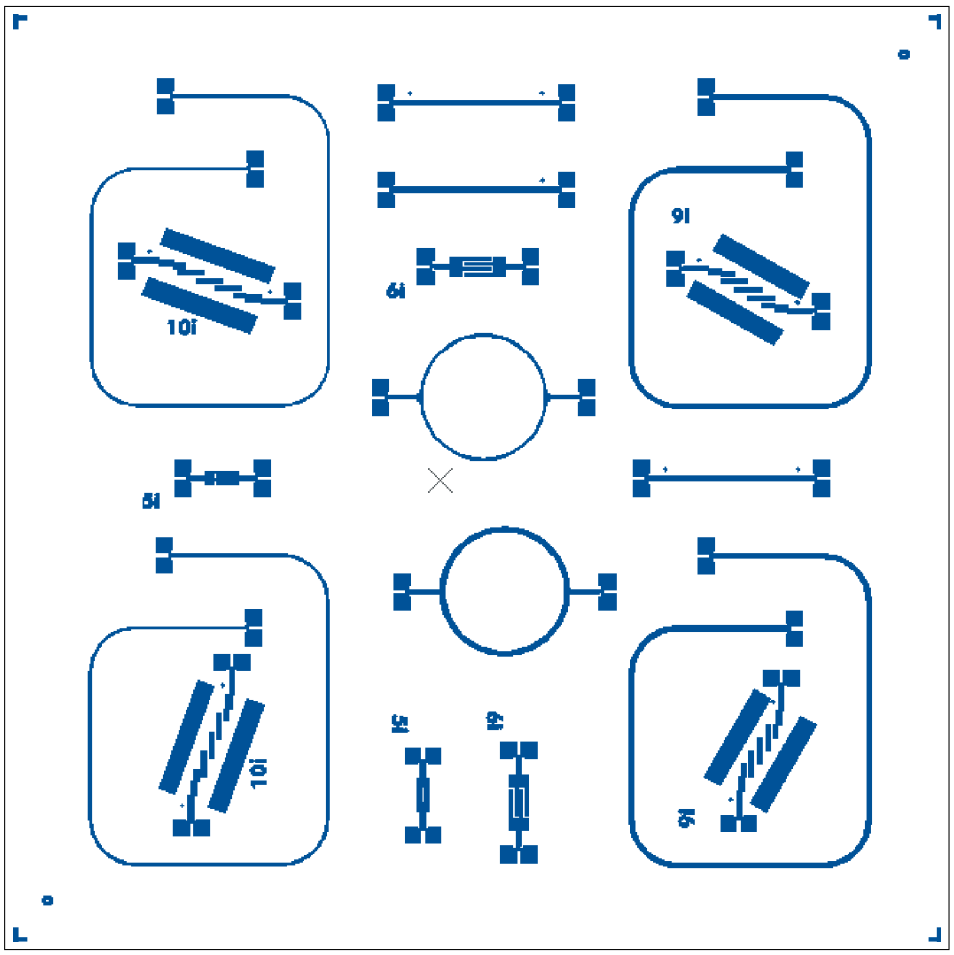


Abbildung 24: Layout der Technologievergleichsstruktur (Version II).

Strukturgenauigkeit

Die Strukturtreue der untersuchten Technologien wurde anhand der Technologievergleichsstruktur I ermittelt. Abbildung 25 zeigt die prozentuale Abweichung der erreichten Leiterbreite (gemittelt) für 100 μm breite Leitungen sowie die Standardabweichung der Mittelwerte für das Foliensystem DP-951. Die Ergebnisse zeigen, dass die jeweiligen Abweichungen der Leiterbreite viel größer sind als die Prozess-spezfische Standardabweichung und daher zusätzliche individuelle Skalierungsmaßnahmen (z.B. Masken-Offset) erforderlich sind, um die Zielwerte besser zu erreichen. Die Ursachen für die Abweichungen sind technologiebedingt. Bei der Ätzstrukturierung wurden erhebliche Unterätzungen ermittelt. Bei den gedruckten Dickschichtleiterbahnen gibt es eine zusätzliche kantenbezogene Schrumpfung bis zu 5 μm/Kante. Diese Schrumpfung ist pasten- und schichtdickenabhängig. Abweichungen in der Leiterbahnbreite führen in gleichem Maße zu Abweichungen in den Lücken zwischen benachbarten Leiterbahnen. Die Standardabweichung zu den Mittelwerten drückt die Reproduzierbarkeit des Verfahrens aus. Die siebgedruckten Feinlinienstrukturen zeigten ähnliche Wiederholgenauigkeiten wie fotostrukturierte Systeme.

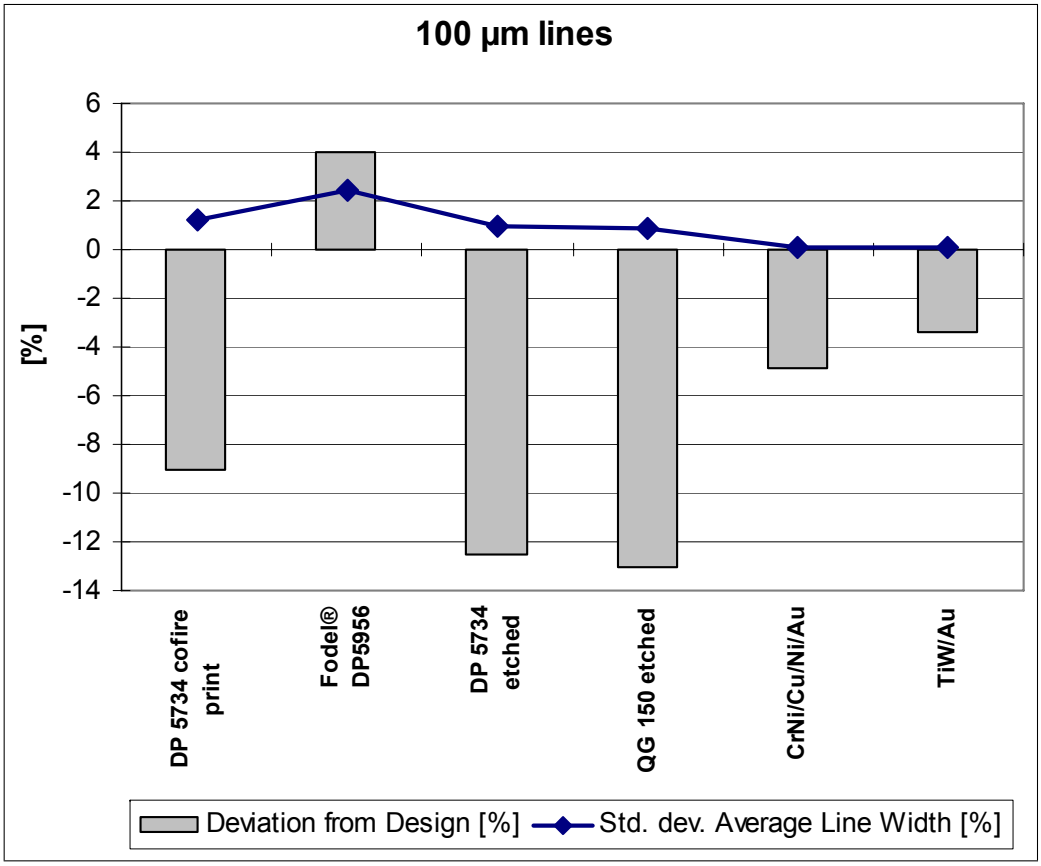


Abbildung 25: Prozentuale Abweichung der gemittelten Leiterbreite für 100 μm Leitungen sowie die Standardabweichung der Prozesse.

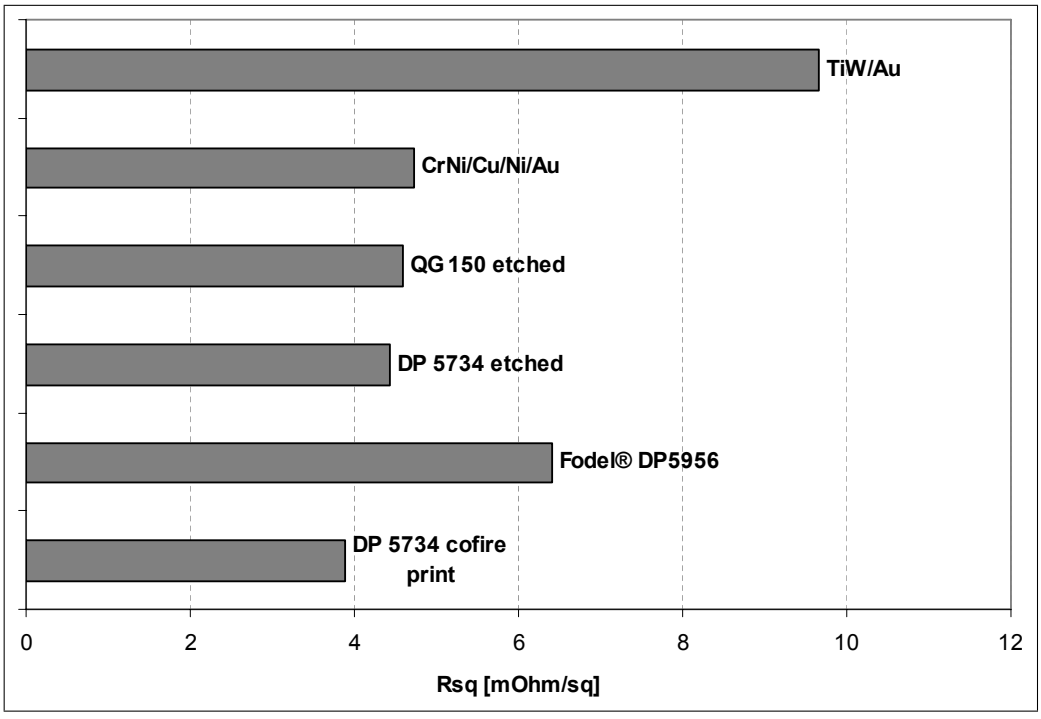


Abbildung 26: Fächenwiderstände der Metallisierungen auf DP-951.

Flächenwiderstände

Die Mäanderstrukturen wurden zur Bestimmung der Flächenwiderstände verwendet. Die gemittelten Ergebnisse der Messungen an den drei unterschiedlich breiten Mäandern zeigt Abbildung 26. Die gedruckte Goldpaste DP 5734 wies den geringsten Flächenwiderstand von $\approx 3.9 m\Omega/sq$ auf. Aufgrund der geringen Schichtstärke des TiW/Au-Dünnschichtsystems (ca. 3 μm) war der Flächenwiderstand mehr als doppelt so hoch, verglichen mit der cofire Leiterbahnstruktur. Vergleichbare Ergebnisse wurden für das HF-Tapesystem DP-943 ermittelt.

Hochfrequenz-Eigenschaften

Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse aus dem zweiten Teil des Technologievergleichs zur Messung einer 50 Ω Leitungsstruktur. Markant sind die Unterschiede zwischen den beiden Materialien DP-943 (obere Gruppe von Kurven) und DP-951 (untere Gruppe von Kurven), die durch Unterschiede der dielektrischen Verlustfaktoren bedingt sind.

Signifikant ist ebenfalls die höhere Dämpfung der Dünnschichtvariante CrNi/Cu/Ni/Au, obwohl dieser Schichtaufbau einen geringeren Flächenwiderstand als die TiW/Au hat. Durch die Konzentration der Stromdichte am Interface zwischen Leiterbahn und LTCC mit wachsender Frequenz (Skineffekt), hat dieser Schichtaufbau mit CrNi als Haftschicht schlechtere Leitungseigenschaften.

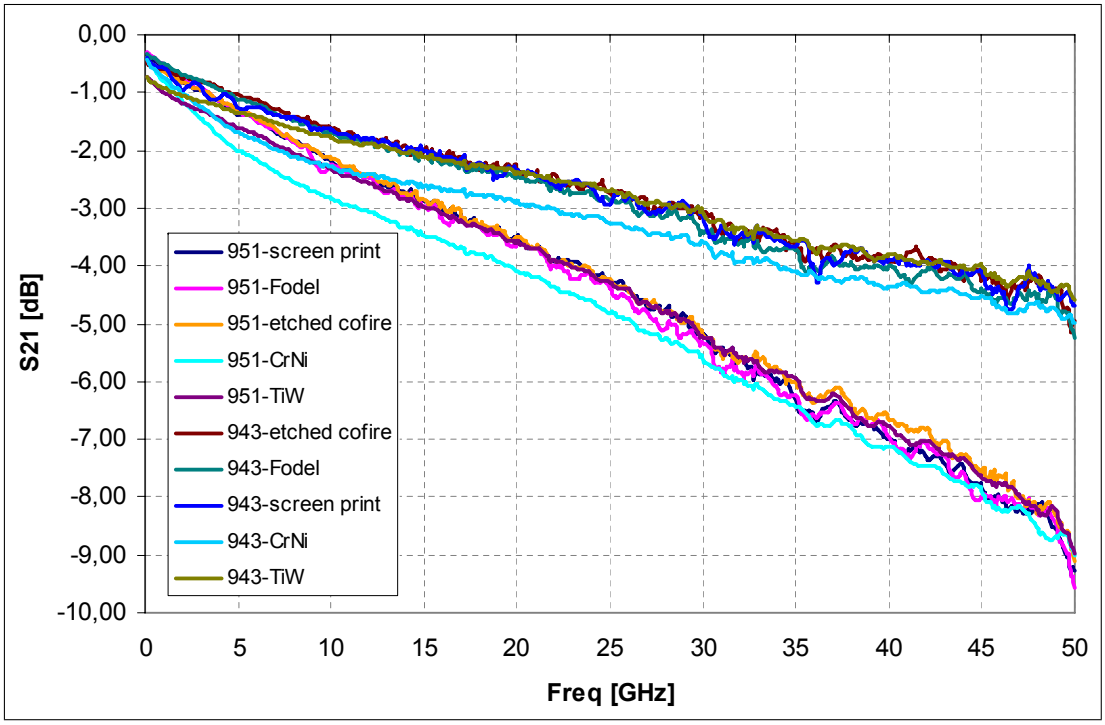


Abbildung 27: Vergleich der Leitungsdämpfungen ($|S_{ji}|$) von Mikrostreifenleitungen auf unterschiedlichen LTCC-Materialien und Schichttechnologien.

Alle Bandpassfilter zeigten unabhängig von der verwendeten Technologie ein gleiches Verhalten in Bezug auf die Einfügedämpfung S_{ji} und die Filtersteilheit. Unterschiede zeigten sich in der Mittenfrequenz. Eine mögliche Erklärung dafür kann in der technologiebedingten Abweichung der Strukturen (Leitungsbreite, Koppelspalte) liegen. Abbildung 28 demonstriert die gute Übereinstimmung der Mittenfrequenz innerhalb einer Strukturierungsmethode.

4.3 Mikrowellentaugliche Leitungen und Übergänge

Mit verschiedenen Testaufbauten wurden Untersuchungen an koplanaren Strukturen, Mikrostreifen und vergrabenen Streifenleitungen (suspended striplines, SL bzw. triplates) durchgeführt um eine Verifikation der Simu-

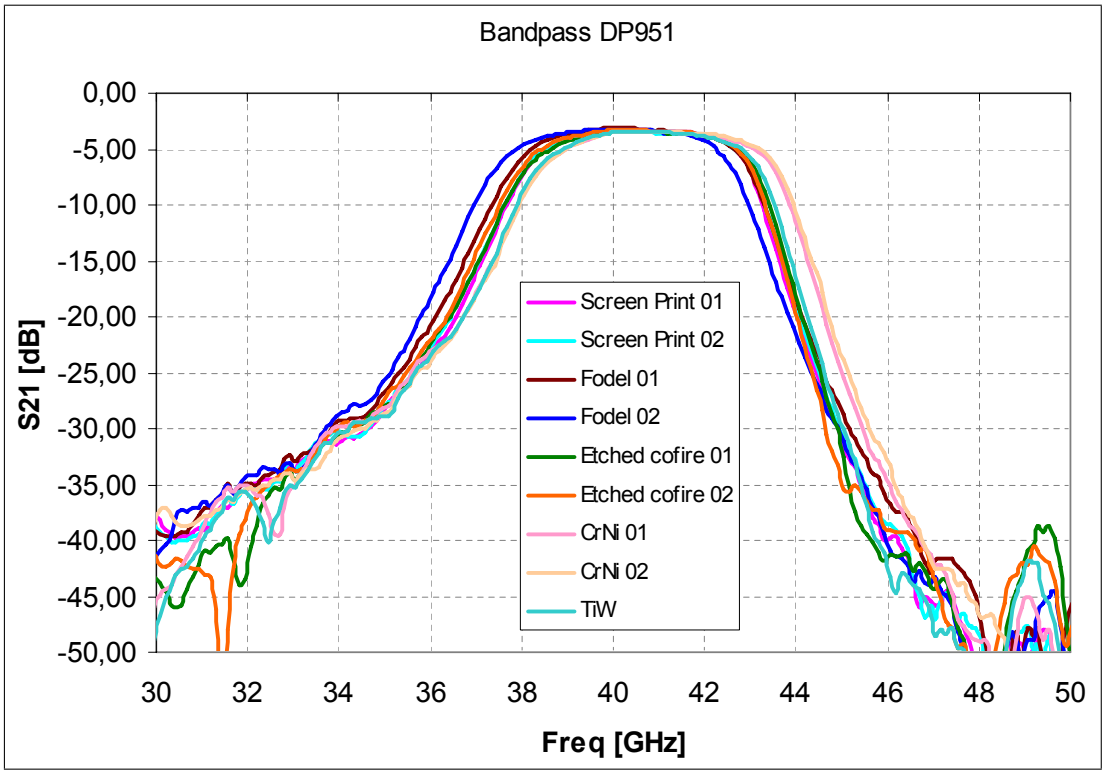


Abbildung 28: Bandpassfilter mit einer Mittenfrequenz von ca. 40 GHz, gefertigt in den verschiedenen Schichttechnologien.

lationsergebnisse bezüglich der Leitungsabmessungen und der Schrumpfungsraten insbesondere von FODEL® Silberpaste durchführen zu können (vgl. [7], [17]). Weiterhin wurden Leitungsübergänge zur Verifizierung der Simulationsergebnisse zwischen verschieden Lagen, vergrabenen Wellenleitern sowie auf der Oberfläche angeordneten Leitungen hergestellt und untersucht. Die Durchkontaktierungen im Substrat DP-951 sind Mikrovias, die teilweise mit Hilfe eines Lasers eingebracht wurden (vgl. [11]).

Die entwickelten und mehrfach verbesserten Wellenleiter und Übergänge sind bei verschiedenen im Projekt realisierten Subsystemen und Komponenten wie beispielsweise beim Demonstrator *Rekonfigurierbaren* 4 × 4 *Schaltmatrix* (AP 6), bei einm universellen hermetische Gehäuse (vgl. nächster Abschnitt) und bei den Resonatoren zur Materialcharakterisierung (Technologievergleich) zweckmäßig eingesetzt worden (vgl. [16], [21] und [23]).

4.4 Realisierung hermetischer mikrowellentauglicher Gehäuse

Es wurden Gehäuse mit zwei verschiedenen Übergangsanordnungen entworfen und bei der MSE GmbH mit Standard-Technologie gefertigt (vgl. [4], [7] und [8]). Die Gehäuse verfügen zur Signalübertragung über zwei Koplanartestports (*GSG*), sowie jeweils einem Leitungsübergang, welcher das Signal von den Mess-Ports in die innere Kavität des Gehäuses führt. Für Transmissionsmessungen sind die Übergänge innen mittels Koplanarleitung verbunden.

Zwei verschiedene Übergangsanordnungen wurden untersucht und verglichen. Sie unterscheiden sich durch die Signalleiterführung (ohne/mit Via bzw. Lagenwechsel). Die Querschnitts-Darstellungen beider Übergangsanordnungen sind in der Abbildung 29 a) bzw. b) dargestellt. In Abbildung 30 ist die innere Struktur beider Anordnungen deutlicher hervorgehoben. Die Platzierung und der Abstand benachbarter Masse–Durchkontaktierungen wurden mittels 3D-EM Feldsimulationen (CST) optimiert, um eine gute Impedanzanpassung über einen großen Frequenzbereich zu erreichen.

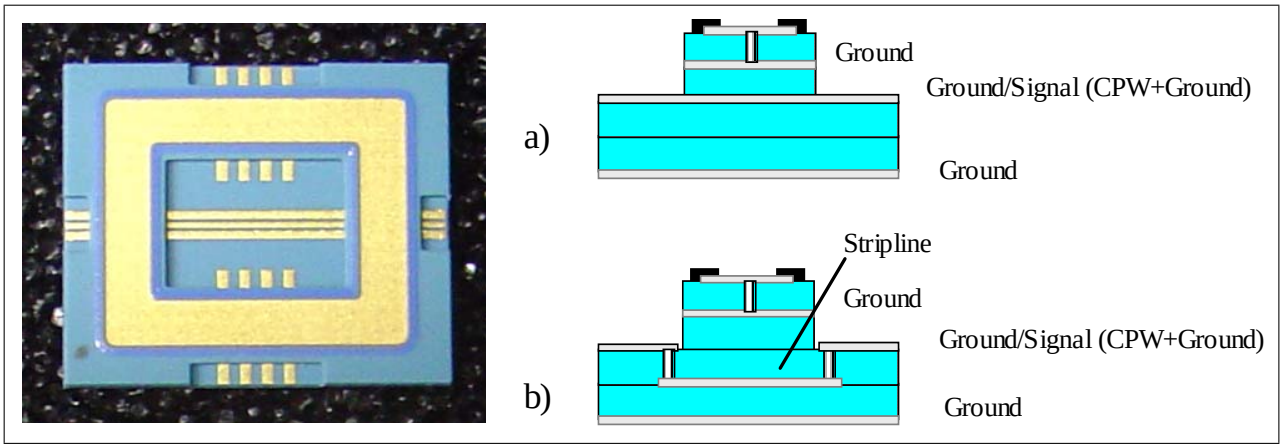


Abbildung 29: Draufsicht auf das HF-Gehäusesubstrat (ohne Deckelung) und schematische Darstellung der verwendeten Übergänge (a) Viafreier Übergang ohne Lagenwechsel b) Lagenwechsel über Vias).

Die HF-Eigenschaften der Gehäuseanordnungen wurden zwischen den außen liegenden HF-Anschlüssen des Moduls in Abbildung 29 gemessen. Abbildung 31 zeigt die Eingangsreflexionsfaktoren der Gesamtanordnungen. Die Übergangsanordnung Typ a) beinhaltet $CPGW$ – *vergrabene* $CPWG$ – $CPWG$ Leitungsteilstücke ($CPGW$ = *coplanar waveguide with ground* bzw. koplanerer Wellenleiter über leitender Masse). Diese Anordnung weist einen guten Eingang-Reflexionsfaktor von $|S_{ii}| < -15\ dB$ bis 50 GHz auf. Die Anordnung Typ b) zeigt gute HF Eigenschaften bis ca. 18 GHz. Über 18 GHz sind die Reflexionen vergleichsweise hoch. In Abbildung 32 werden die simulierten und gemessenen $|S_{ii}|$ Parameter der Übergangsanordnung Typ a) verglichen. Die Simulationswerte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten bis über 35 GHz.

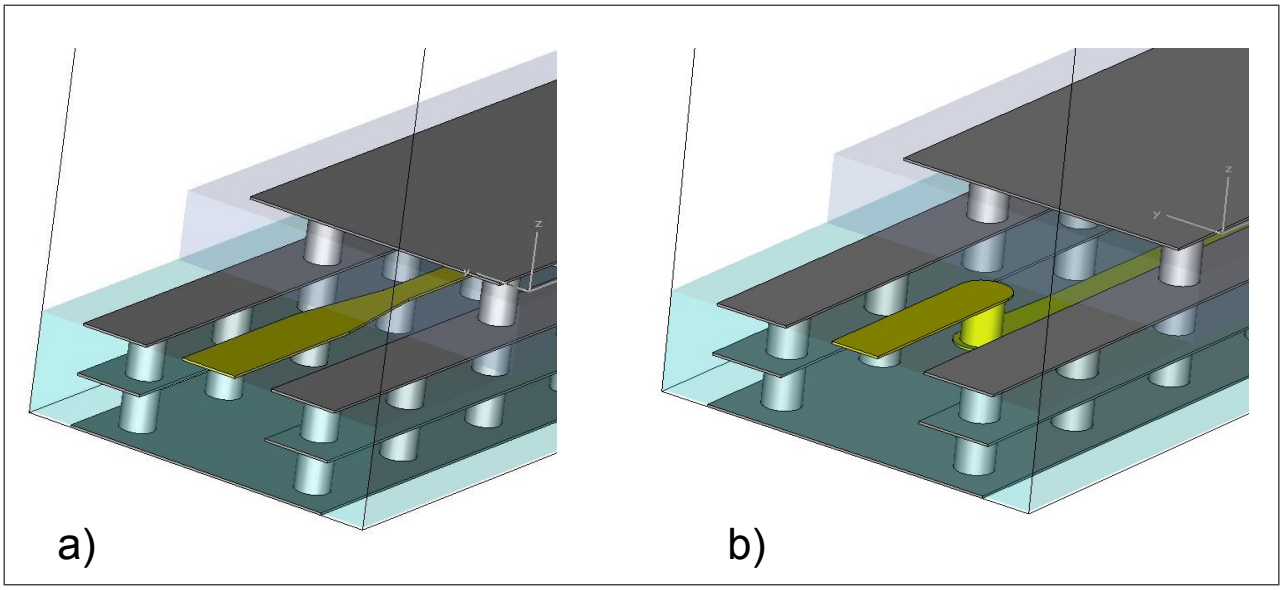


Abbildung 30: Vergrößerte Darstellung des Signalübergangs in das Gehäuseinnere (vgl. Abbildung 29).

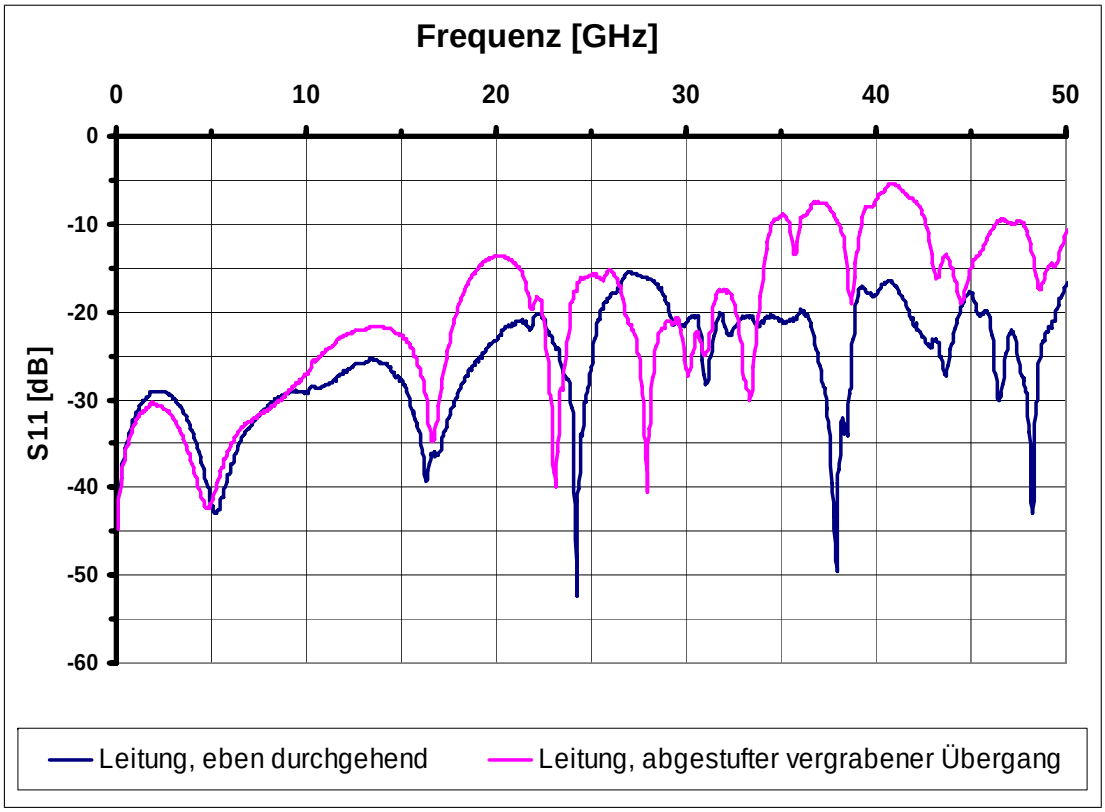


Abbildung 31: Gemessene Reflexionseigenschaften $|S_{ii}|$ der Gehäusedurchführungen.

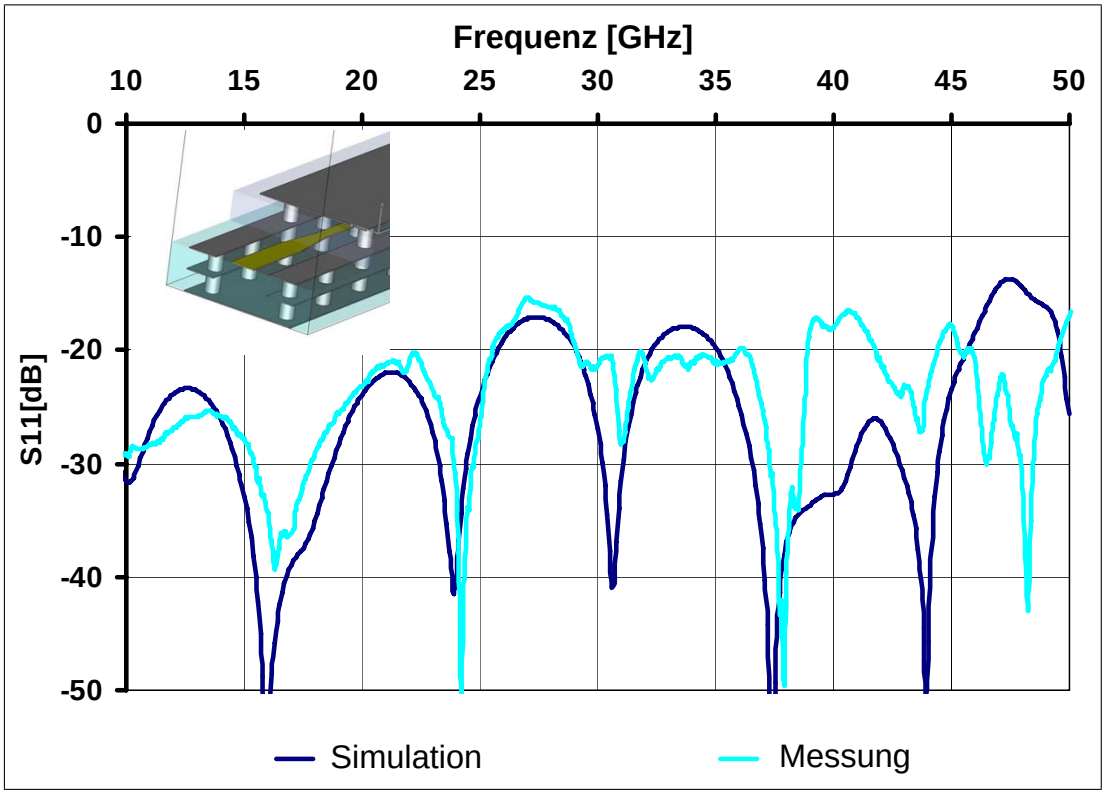


Abbildung 32: Vergleich der gemessenen und simulierten Reflexionsfaktoren $|S_{ii}|$ für den Typ a).

5 Entwicklung, Aufbau und Test einer *Rekonfigurierbaren* 4×4 *Schaltmatrix* (AP 6)

5.1 Systemarchitektur des Demonstrators

Mit der vergleichenden Analyse der Vor- und Nachteile verschiedener für rekonfigurierbare Schaltmatrizen geeigneter Topologien und nach der Recherche kommerziell erhältlicher Schaltelemente wurde als Systemarchitektur eine Signalverteilung nach dem „Single-Pole Multi-Throw"-Prinzip festgelegt (vgl. [1], [4]). Die Einzelschalter haben einen Eingang, der die HF-Signale auf je eines von vier Ausgangstoren überträgt. Der entsprechend verbundene gegenüberliegende Schalter konzentriert das zu schaltende Signal dann auf je einen Matrixausgang. Durch dieses Prinzip wird die HF-Energie direkt auf genau einem Pfad über zwei Schalterübergänge übertragen, ohne durch Signalauftrennung durch Teilung bzw. Anpassungsnetzwerke und Abschlusswiderstände zusätzliche Dämpfung einzufügen. Die Schaltmatrix ist ein- und ausgangsseitig symmetrisch aufgebaut. Durch eine Adaption der aktuellen Matrixarchitektur durch serielle und parallele Kaskadierung der Schaltelemente kann eine Erhöhung der Gesamtkomplexität oder Anpassung an asymmetrische Bedingungen ($N \times M$) für unterschiedliche Anforderungen erreicht werden.

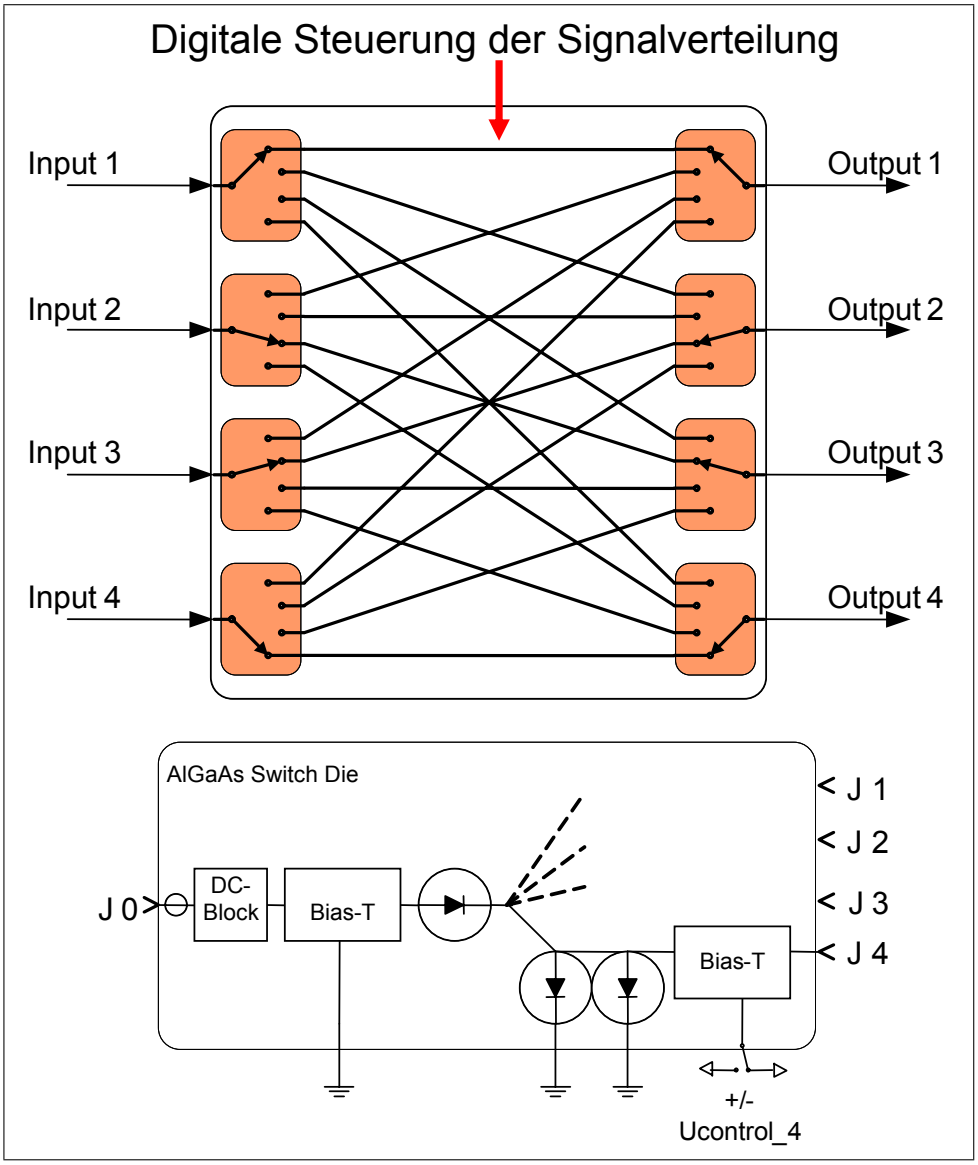


Abbildung 33: Architektur der Signalverteilung einer 4×4 Schaltmatrix mit SP4T-Schalter-ICs als Einzelschalt-Elemente.

Zur elektrischen Charakterisierung der entwickelten Multichip-Module wurden koplanare Waferprober in Ground-Signal-Ground-Struktur mit einer Pitchweite von 200 bzw. 250 μm verwendet. Für die *2nd-level*-Schnittstelle der Prototypen wurde eine Geometrie angestrebt, die sowohl Messungen mit den bisher verwendeten Waferprobern zulässt, als auch die mit den Partnern abgesprochene Verbindungstechnik (Drahtbonden auf vergleichbarer Substrathöhe zum Nachbarmodul) ermöglicht.

Mit einem ersten Testmodul aus elf Lagen DuPont DP-951 AX-Material und vier FODEL®-prozessierten HF-signalführenden Ebenen konnte das Funktionsprinzip der in Abbildung 33 dargestellten Matrixarchitektur experimentell verifiziert werden (vgl. [2], [4], [7]). Durch Analyse der realisierten Strukturgeometrien und elektrische Charakterisierung des Aufbaus wurden viele Verbesserungen im HF-Design und in den technologischen Prozessen bzgl. der Strukturbreiten, Maßhaltigkeit, Bauelementdichte, sowie der Entwurfsmaßnahmen zur Erreichung der angestrebten Bandbreite und Anpassung abgeleitet.

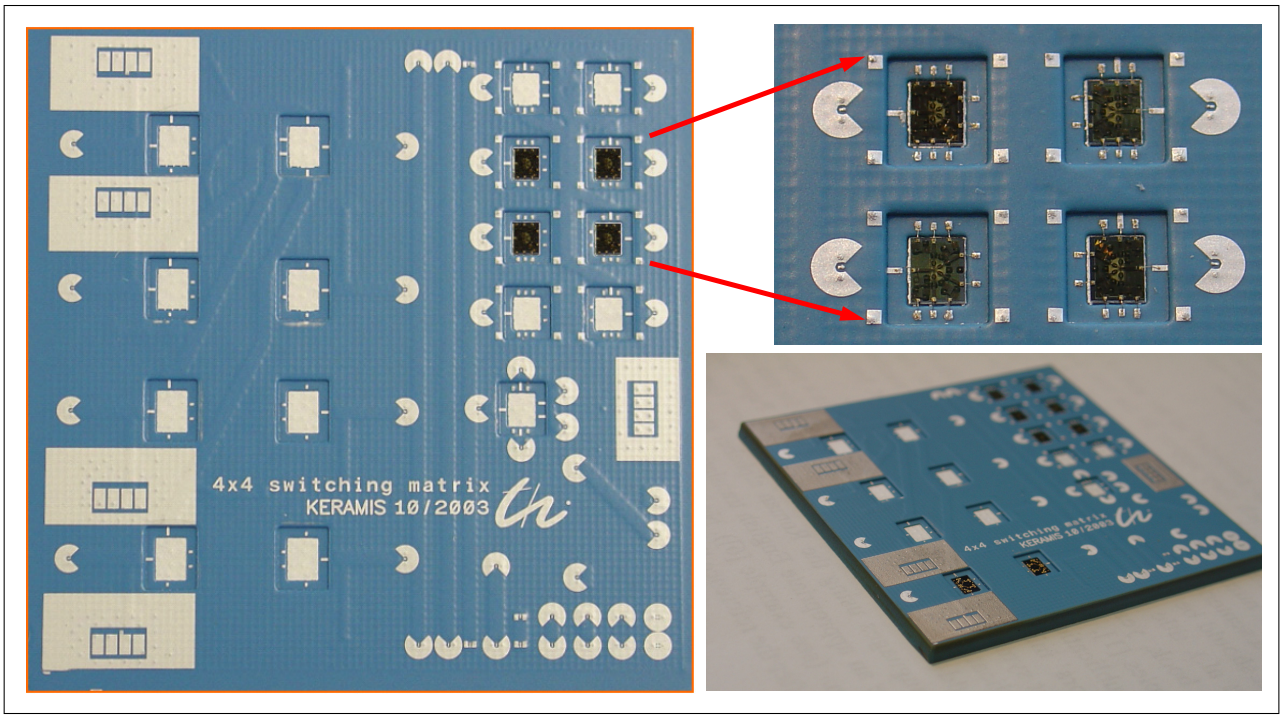


Abbildung 34: Ansichten des ersten Musters einer 4×4 rekonfigurierbaren Schaltmatrix („Proof-of-Concept“).

5.2 LTCC-Modulkonzept und Hermetisierung

Der Demonstrator ist beidseitig mit gestuften Kavitäten aufgebaut, damit die HF–Signalverteilung möglichst kurz und mit wenig zu überbrückenden Substratlagen realisiert werden konnte (vgl. [23]). Diesem Ziel dient auch das um 45 ° gedrehte Positionieren der Schalter–ICs (vgl. Abbildung 35, gelb).

Die Signalverteilung erfolgt demgemäß auf kurzem Weg zwischen den Metallisierungsebenen der Chip-Kavitäten. Dafür sind vier funktionale Metallisierungsebenen und die nötigen innen liegenden Masseflächen (vgl. Abbildung 35 unten, gestrichelt) vorgesehen. Dieser Aufbau ergibt sieben Metallisierungsebenen (ohne Deckelung), die dann je nach Häusungsvariante und deren mechanischen Befestigungsvorgaben noch durch passende Lagen und Metallisierungsflächen ergänzt ist (LTCC oder später Kovar-Rahmen/Deckel).

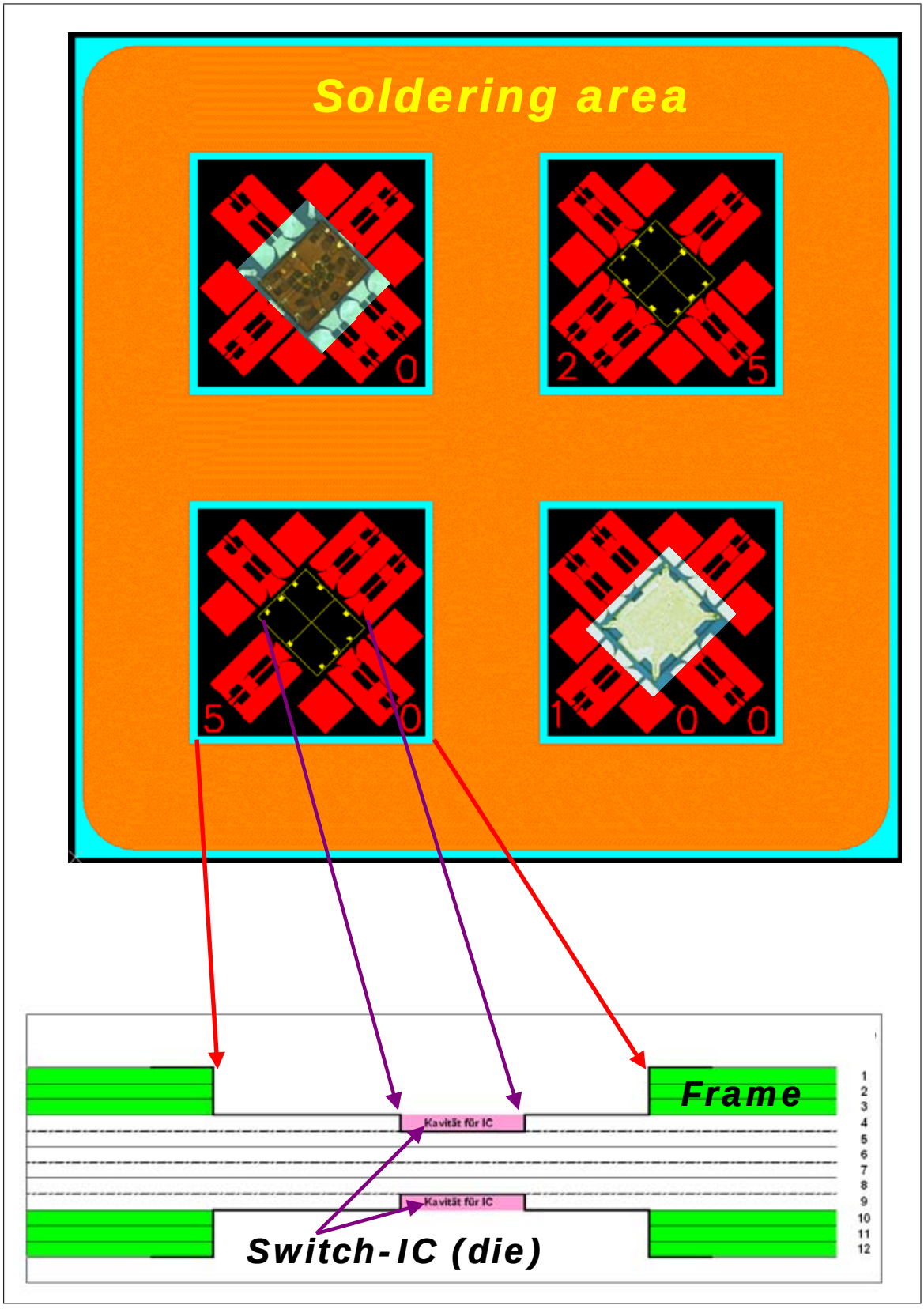


Abbildung 35: Konzeption der beidseitigen Bestückung und LTCC-Flächenminimierung mit Lagenaufbau des Demonstrators „Rekonfigurierbare Schaltmatrix“ (oben: Draufsicht des Gesamtmoduls mit den Schalter-Dies (gelb) und den entsprechenden Kompensationsnetzwerken (rot), unten: Querschnitt eines Quadranten mit zweiseitiger Bestückung).

5.3 Untersuchung der Materialparameter für optimale Entwürfe

Um einen möglichst guten Entwurf der Anpassungsnetzwerke der Einzelschalter zu erzielen, wurden die realen Materialparameter umfangreich analysiert. Hierfür sind in das Substrat eingebettete Ringresonatoren im Frequenzbereich bis 50 GHz charakterisiert worden. Außerdem sind mit sorgfältig erstellten Röntgenaufnahmen (vgl. Abbildung 36, rechts unten) die Abmessungen aller Ringresonatoren unter Berücksichtigung von Verzerrungen aufgrund inhomogener Schrumpfungsraten bestimmt worden. Die individuellen mittleren Umfänge wurden dann mit den zugehörigen HF–Messungen kombiniert und die jeweils zugehörige Dielektrizitätskonstante an den Resonanzstellen (etwa $f_0 = n \cdot 5\ GHz$, n = 1, 2, 3..) bestimmt. Dieses Analyseverfahren wurde für alle Resonatoren in gleicher Weise angewendet. Abbildung 36 zeigt die frequenzabhängigen Permittivitätszahlen für DuPont-951-Substrate der Testmodule für die Einzelschalterkompensation (in Ilmenau verarbeitet, grün), für DP–951-Substrate aus dem Technologievergleich (MSE, blau) und für DuPont-943-Substrate (MSE, rot) aus dem Technologievergleich. Die breit hervorgehobenen Graphen repräsentieren den zum Kurvenbündel zugehörigen Mittelwert. Auffallend sind deutlich getrennte Gruppen: Die grünen und blauen Kurvenbündel weisen auf Abweichungen der Materialeigenschaften zwischen den Chargen und/oder Unterschiede in den technologischen Prozessierungsparametern hin und sind aus diesem Grunde ggf. noch detaillierter zu untersuchen.

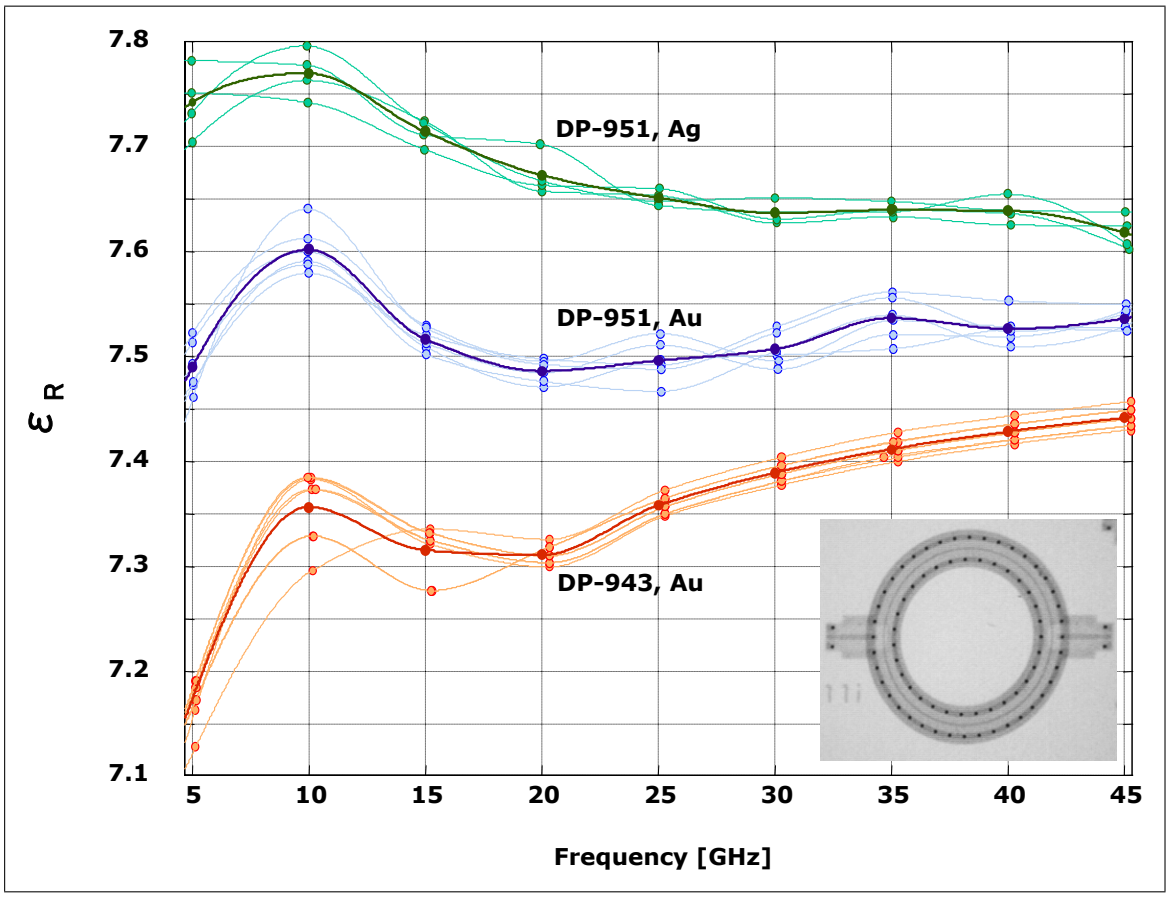


Abbildung 36: Jeweils gemittelte Permittivität der Substrate DP-951 (grün und blau) und DP-943 (rot). Die Strukturierung des Ringresonators erfolgte mit Gold- bzw. Silberpasten.

5.4 Impedanzanpassung des Einzelschalters und Optimierung der entsprechenden *First-level-Interconnections* für gute Systemeigenschaften

Die Messergebnisse der ersten Aufbauten in Abbildung 37 zeigen deutlich, dass eine unkompensierte Anordnung der Schalter–IC (Einzelschalter, der mit jeweils einer einzelnen Bonddrahtverbindung am Eingang und am Ausgang kontaktiert wurde) keine zufrieden stellenden HF-Eigenschaften im gewünschten Frequenzbereich um

20 GHz aufweist. Der hybrid-integrierte Einzelschalter hat mit $|S_{ji}| \approx -5.5\ dB$ eine vergleichsweise hohe Einfügedämpfung und eine ebenso unbefriedigende Reflexionsdämpfung von $|S_{ii}| \approx -6\ dB$.

In der Betrachtung der Effekte an einem einzelnen gebondeten Übergang fällt auf, dass trotz schlechterer Reflexionsdämpfung mit vier parallelen Bonddrähten die Transmission um etwa 0.25 dB besser ist gegenüber dem ursprünglichen Design mit einem Bonddraht (vgl. Abbildung 38). Zwei so genannte Bond-Bändchen (hier: 60 $\mu m \times 20\ \mu m$) haben etwa gleiche HF-Eigenschaften, wie vier parallele Bonddrähte (Durchmesser jeweils 25 μm) haben, so dass dieser *1st-level*–Übergang nun mit zwei Bond-Bändchen gefertigt wird, die entscheidende Verbesserungen hinsichtlich Einfügedämpfung und reflexionsarmer Bandbreite realisieren.

Weiterhin sind verschiedene Varianten der Realisierung von Kompensationsnetzwerken und deren Implementierung simuliert und optimiert worden (vgl. [14], [16] und [21]). Eine sehr gute Variante ist in Abbildung 39 illustriert. Die ein– und ausgangsseitigen Kompensationen sind in ihrer Struktur sehr ähnlich und bestehen hauptsächlich aus Filterstrukturen mit kaskadierten koplanaren Leitungsstücken die sich auf der Top-Lage in unmittelbarer Nähe zum Schalter-IC befinden. Dieser äußere Aufbau ermöglichte die Realisierung der erforderlichen Leitungsimpedanzen, hier etwa zwischen 25 Ω und 80 Ω (anspruchsvolle Dynamik), mit praktikablen Technologie-Parametern. Auf diese Weise lassen sich insgesamt kleinere Strukturen mit kurzen HF-Weglängen und geringeren (vornhemlich dielektrischen) Verlusten realisieren, welche dann zu einer niedrigeren Gesamtdämpfung führen. Auch aus technologischer Sicht sind die Abmessungen der äußeren Strukturen besser beherrschbar und insbesondere nach dem Sintern besser kontrollierbar als vergrabene Leitungselemente. Darüber hinaus wird es entsprechend weniger störende Einflüsse durch Positionierungsungenauigkeiten geben, da die Anpassungsschaltungen nicht auf verschiedenen Lagen verteilt sind. Die vergrabenen HF-Leitungen sind für 50 Ω Wellenwiderstand dimensioniert.

Die Simulation mit optimierten Anpassungsnetzwerken für den Eingang und optimierten Netzwerken für den Ausgang ließen Reflexionsdämpfungen im interessierenden Frequenzbereich mit $|S_{ii}| < -30\ dB$ erwarten (vgl. Abbildung 37, dünne hellblaue Kurven). Die Einfügedämpfung reduziert sich dabei auf $|S_{ji}| \approx -2\ dB$ (vgl. [23]). Im interessierenden Frequenzbereich beziffert sich die gemessene Reflexionsdämpfung auf $|S_{ii}| \approx -16\ dB$ (bei 20.5 GHz) oder besser. Die Einfügedämpfung beträgt im ungünstigsten Fall (20.5 GHz) knapp $-3\ dB$.

Die entworfenen Kompensationsstrukturen zeigten in der Simulation sehr gute Ergebnisse, insbesondere die gewünschte kleine Reflexionsdämpfung $|S_{ii}| \leq -20\ dB$. Die Messungen an einem einzelnen Schalter zeigten auch gute Eigenschaften, obgleich beim ersten Technologie-Durchlauf eine Frequenzverschiebung deutlich wurde (vgl. Abbildung 37, [16]). Ursache für die resultierende Fehlanpassung im relevanten Frequenzbereich sind primär Leitungslücken innerhalb der Kompensationsstrukturen, die breiter als im entsprechendem Design geworden sind. Zwischenzeitlich haben mehrere Experimente stattgefunden, um die Strukturierung dieser erforderlichen kleinen Leitungslücken zuverlässig zu realisieren. Um eine für die Schaltmatrix relevante Ausbeute zu erzielen, sind allerdings gegenwärtig die Leitungslücken mit einer Breite von mindestens 50 μm (Versuch zuvor: 35 μm) herzustellen. Es erfolgte daher eine Anpassung des Designs, verbunden mit zeitaufwändigen Optimierungsiterationen. In einem weiteren Technologie-Durchlauf konnte der endgültige Demonstrator komplett realisiert werden.

Die gegenwärtige Strukturierungstechnologie der Protoypen ist ein Feinlinien-Siebdruckverfahren, das sowohl mit DP-951 als auch DP-943 Substraten kompatibel ist. Nach bisherigen Erkenntnissen liegen die Dielektrizitätskonstanten hinreichend nahe beieinander (vgl. Abbildung 36), so dass eine vergleichsweise einfache Anpassung des bisherigen Designs an das Substratmaterial DP-943 möglich ist. Insbesondere die zu erwartende geringere Einfügedämpfung (vgl. Abbildung 27) wegen niedrigerer dielektrischer Verluste des DP-943 kann die Qualität des Demonstrators weiter steigern und empfiehlt daher, später derartige Module ggf. auch mit DP-943 als Substratmaterial zu fertigen.

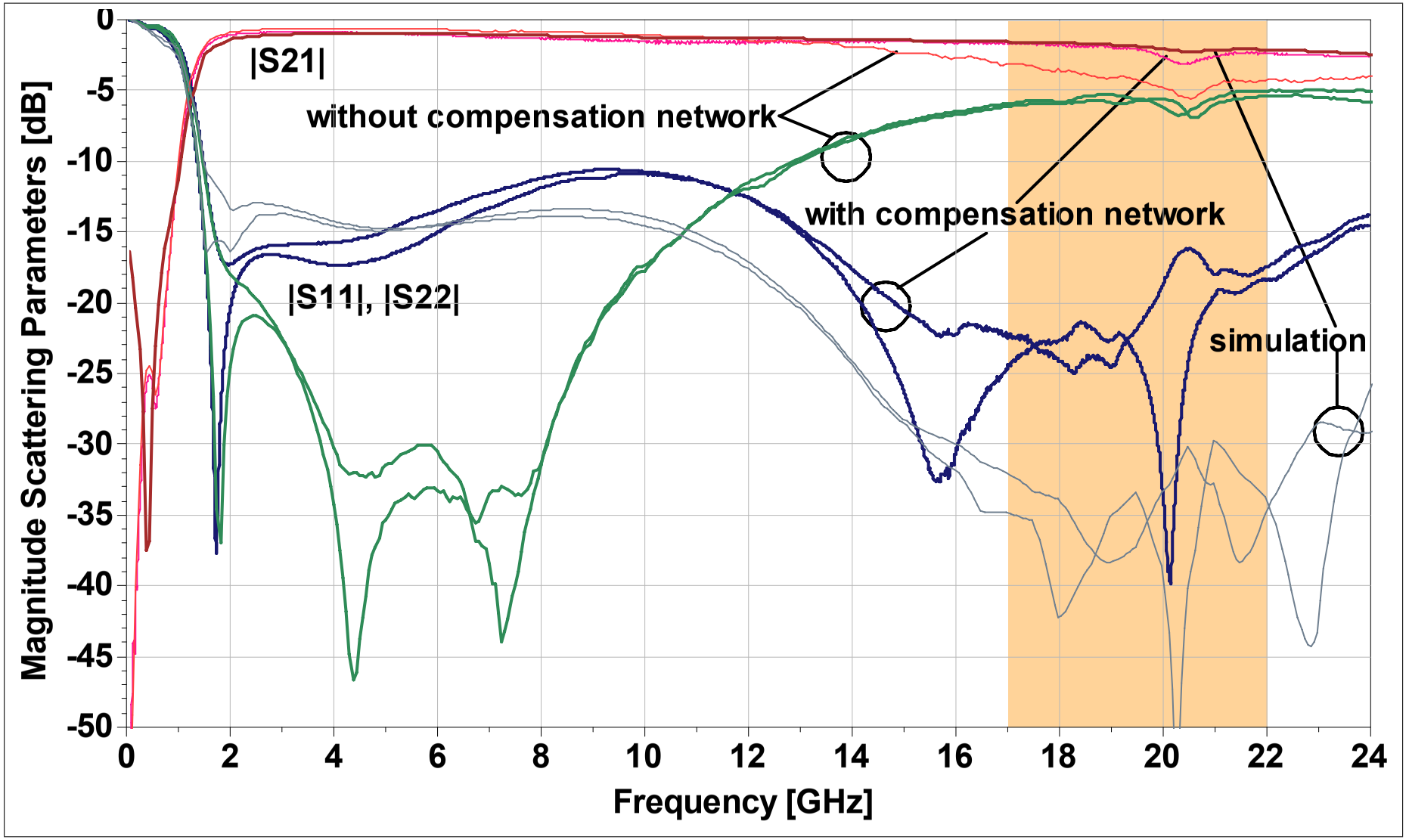


Abbildung 37: Simulierte und gemessene Streuparameter zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens eines einzelnen Schalter-IC (ohne die und mit der entwickelten Kompensationsschaltung (vgl. Abbildung 39).

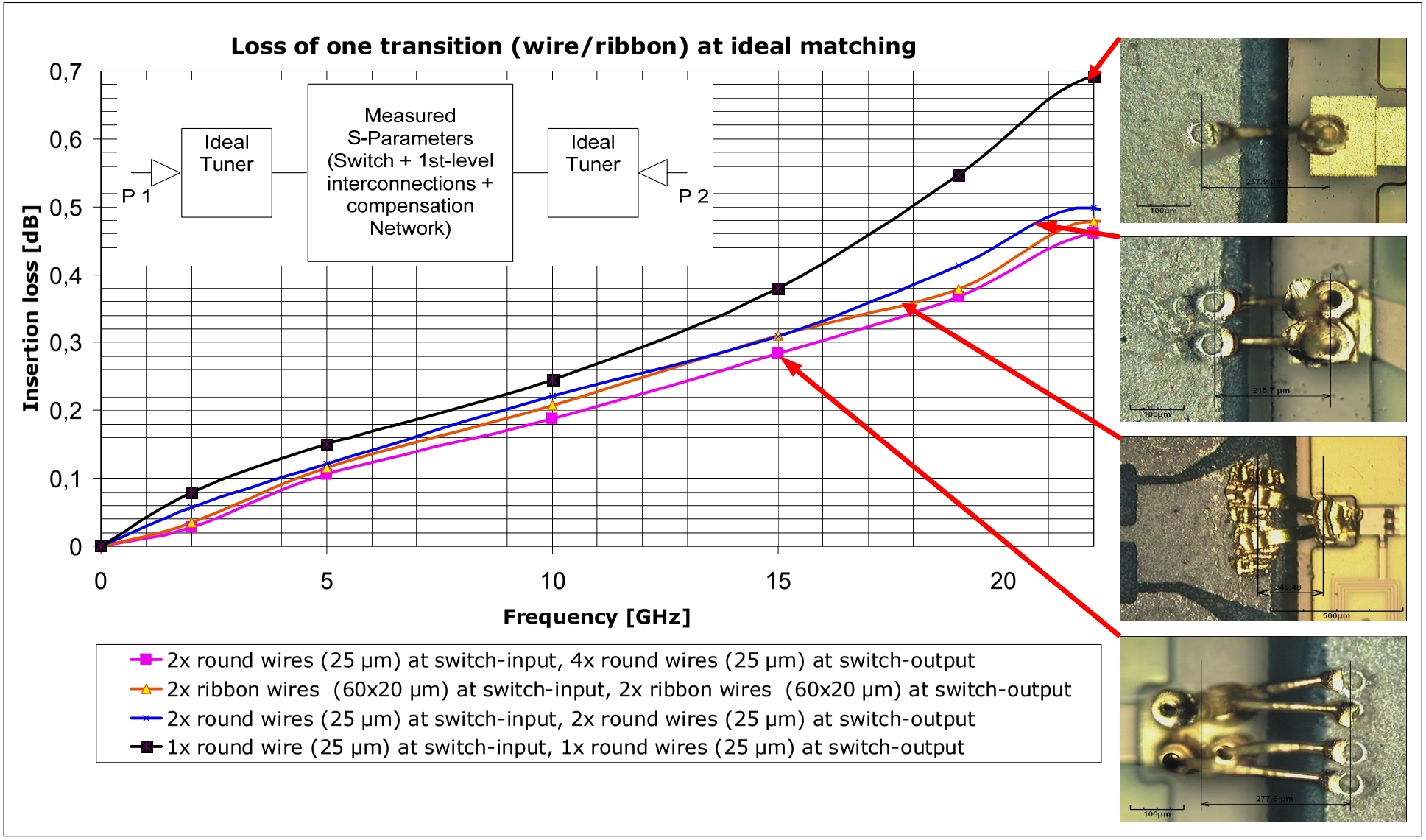


Abbildung 38: Abschätzung des Verlustbeitrags verschiedener Bondverbindungen bei idealisierter Anpassung.

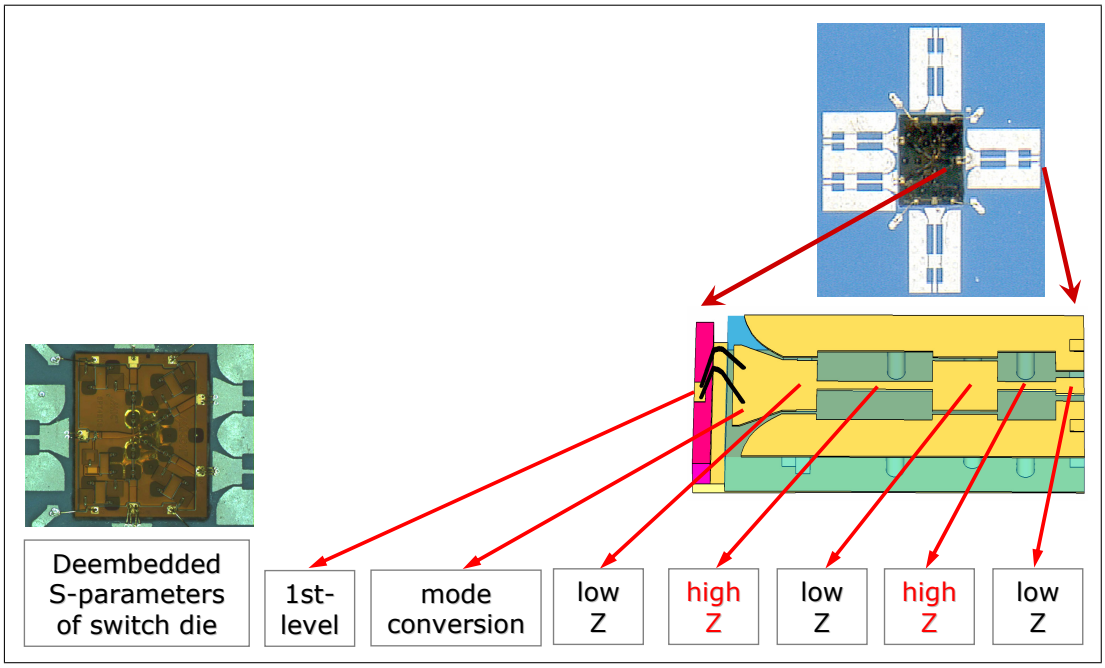


Abbildung 39: Konzept zur breitbandigen Impedanzanpassung eines Einzelschalter-IC's (individuell für Eingang und Ausgang).

5.5 Ergebnis: Gute Eigenschaften der realisierten Prototypen

Für den Demonstrator *Rekonfigurierbare* 4×4 *Schaltmatrix* sind mehrere Substrate bzw. Module hergestellt und davon fünf Prototypen vollständig bestückt und charakterisiert worden. Jede Matrix beinhaltet 16 verschiedene HF-Pfade zur Signalverteilung, die über die SP4T-Einzelschalter definiert gespeist werden. Es gab zwar technologiebedingte Exemplarvariationen zwischen den Versuchsaufbauten und Parameterstreuungen einzelner Pfade auf einer Matrix, aber bei etwa zwei Drittel aller 80 vermessenen Pfaden konnte eine gleichmäßig gute Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden (vgl. [23], [21]). Einige Pfade mit Totalausfall hatten Kurzschlüsse, deren Ursache derzeit geklärt wird, um anschließend die Ausbeute der Herstellung für zweckmäßige Verwendbarkeit weiter zu steigern.

Repräsentativ für alle funktionierenden Pfade sind in Abbildung 40 die HF-Eigenschaften eines vollständigen Signalpfads (inkl. aller Übergänge und zweier Schalter-IC) eines realisierten Prototyps dargestellt (vgl. Abbildung 41). Die Messungen demonstrieren die gute Leistungsfähigkeit der Lösung: Von 18 bis 27 GHz ist breitbandig mit $|S_{ii}| \approx -20\ dB$ eine sehr niedrige Reflexionsdämpfung bei kleiner Einfügedämpfung von $|S_{ii}| \approx -6\ dB$ (Bandmitte) erzielt worden, verglichen mit herkömmlichen bidirektionalen Schaltmatrizen. Die Isolationsdämpfung benachbarter Pfade ist besser als 50 dB (Messgrenze).

Die Außenabmessungen betragen etwa 25 mm×5 mm×25 mm (B×H×T) inklusive der äußeren *GSG*–Kontaktierung. Darin enthalten sind schon mögliche LTCC-basierte Deckelaufbauten mit entsprechenden Unterkonstruktionen. Das Gesamtgewicht beträgt ca. 20 g. Die Gewichts- und auch die Volumenreduktion betragen etwa 99 %, bezogen auf herkömmliche Lösungen (Hohlleitertechnik bzw. einlagige Mikrostreifentechnik) für den gleichen Frequenzbereich. Die abschließende und nochmals in Volumen, Gewicht und Funktion verbesserte Designvariante wird unter den gängigen kommerziellen Produktionsbedingungen bei MSE GmbH im Rahmen von KERAMIS II hergestellt.

Das Arbeitspaket 6 wurde erfolgreich absolviert und bildet eine wertvolle Grundlage für das Anschlussprojekt KERAMIS II in welchem bereits drei Prototypen des Demonstrators *Rekonfigurierbare* 4×4 *Schaltmatrix* in ersten Untersuchungen zur Raumfahrttauglichkeit analysiert worden sind.

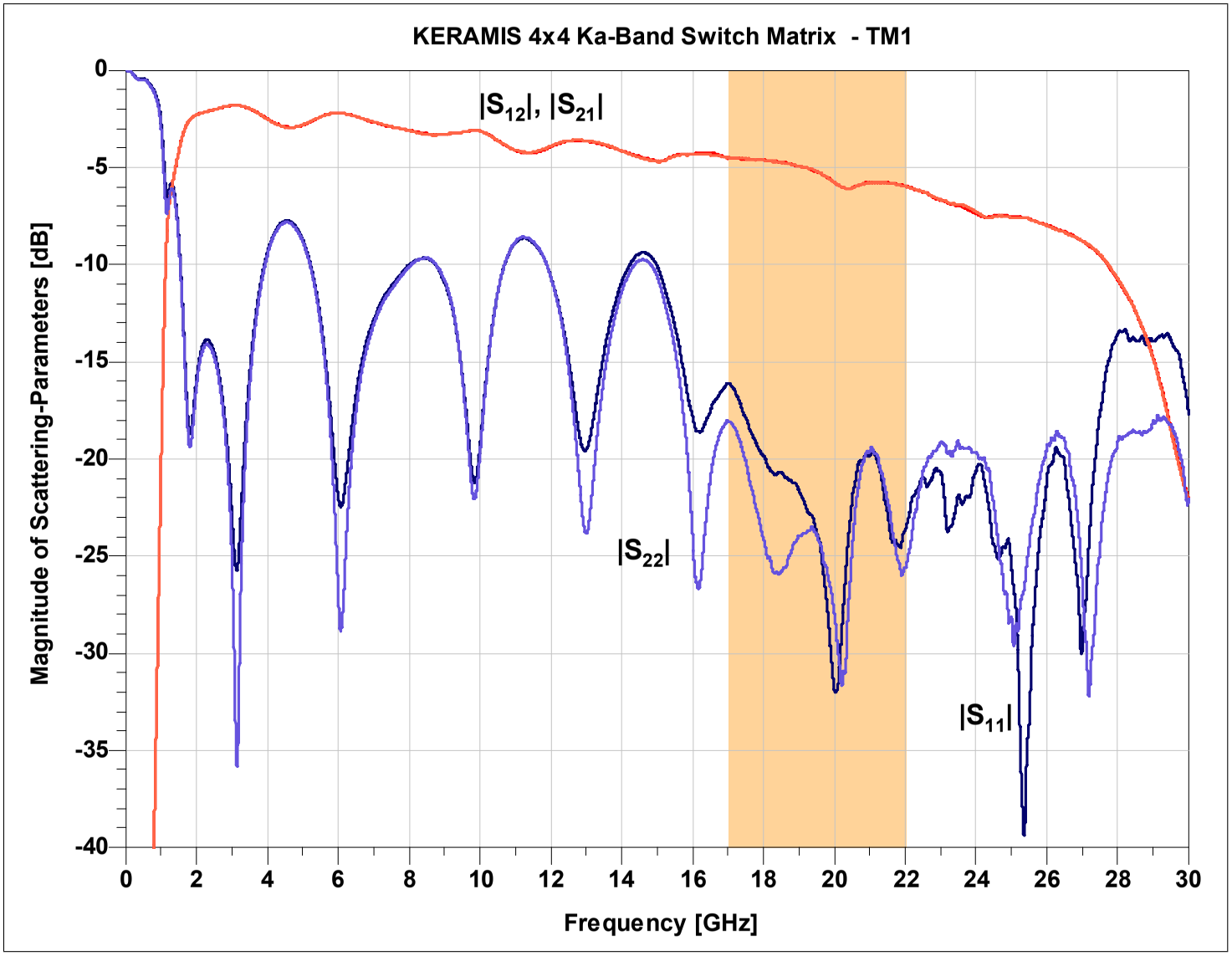


Abbildung 40: Gemessene Streuparameter$|S_{ji}|$ und $|S_{ii}|$ eines kompletten Pfads durch die Schaltmatrix, stellvertretend für die anderen Signalpfade der Schaltmatrix mit vergleichbaren Eigenschaften. Die mechanische Weglänge beträgt ca. 45 mm (symmetrischer Aufbau).

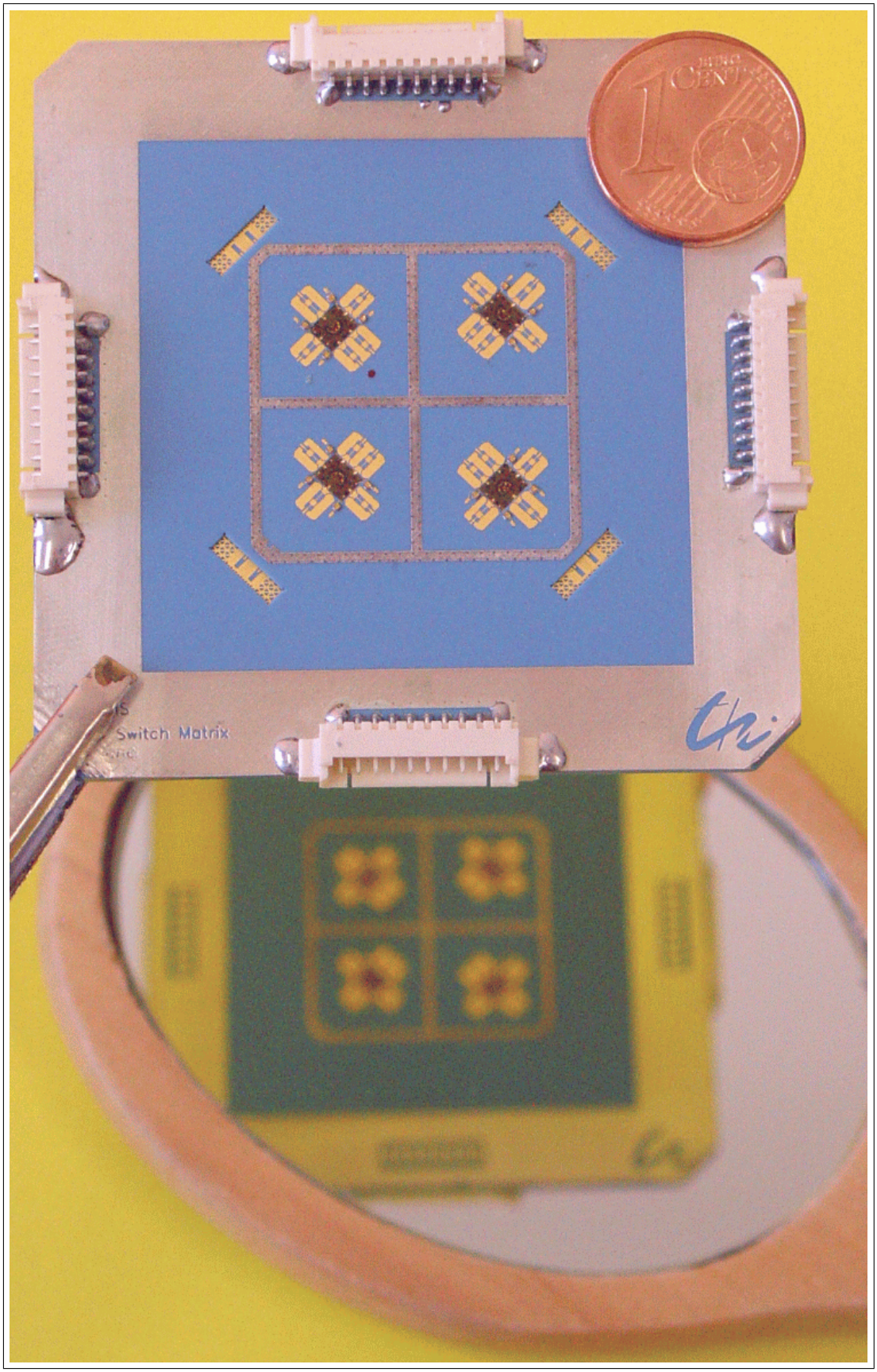


Abbildung 41: Fertig bestückter KERAMIS-Demonstrator. Im Spiegel ist die auch rückseitige Hybridintegration zu erkennen.

6 Ergebnisverwertung

6.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Der Bereich der Satellitenkommunikation zeigt ein grundsätzlich hohes Marktpotential (vgl. beispielsweise Start des Galileo-Projektes). Zukünftige Satellitensysteme für Multimedia-Anwendungen basieren häufig auf flexibel konfigurierbaren Einzelmodulen. Allein die hohe Anzahl dieser Module erfordert Konzepte für kostengünstige und attraktive Lösungen. In Kombination mit der LTCC-Technologie rücken solche Lösungsansätze in den Bereich der technischen Realisierbarkeit. Im Projekt wurden daher vorrangig folgende Ziele verfolgt:

1. Für LTCC-Anwendungen mit kurzen Entwicklungswegen bzw. Entwicklungszeiten wurden Design- und Prozessvorschriften für Entwurf und Herstellung von LTCC-Modulen für HF-Anwendungen erarbeitet. Diese sollen insbesondere die Industriepartner in die Lage versetzen, ausgehend vom derzeitigen Stand der Technik und der zuverlässig beherrschbaren Technologiegrenzen, marktorientierte Demonstratoren herzustellen.

2. Neue Technologievarianten sind erarbeitet worden. Ausgehend von Simulationen wurde das Design optimiert, die zukünftig erreichbaren Grenzwerte ermittelt und durch Laboruntersuchungen verifiziert.

3. Mit dem Demonstrator *Rekonfigurierbare Schaltmatrix* (Arbeitspaket 6) sind die Einsatzfähigkeit und die damit erreichbaren Verbesserungen bezüglich Integrationsdichte und Leistungsparameter der LTCC-Technologie (Design- und Technologievarianten, Montage und Packaging) für die Satellitentechnik an einem konkreten Modul vorgestellt worden.

6.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Für das Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik ergaben sich Kompetenzzuwächse beim Design von HF-Komponenten und der zugehörigen Messtechnik. Die Ergebnisse des Projekts führten außerdem zum Erfahrungszuwachs auf dem Gebiet der Herstellung feinstrukturierter LTCC-Komponenten beim Fachgebiet Elektroniktechnologie sowie der Nachwuchsforschergruppe Funktionalisierte Mikroperipherik und bilden damit die Grundlage für weiterführende Forschungstätigkeiten.

Hinsichtlich der Erfolgsaussichten nach Projektende wird weiter auf die angestrebte Zusammenführung der Erkenntnisse und Ergebnisse der F&E Vorhaben SANTANA I/II und KERAMIS bzw. deren Fortführung in neuen Projekten SANTANA III und KERAMIS II hingewiesen.

6.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Es erscheint sinnvoll, die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf komplexere Schaltungen in LTCC-Technologie, die mehr aktive oder passive Bauelemente wie z.B. Antennen enthalten oder für höhere Frequenzen geeignet sind, weiterzuentwickeln. Auch die Realisierung anderer HF-Komponenten durch die Überführung der Funktion in LTCC-Module erscheint möglich. Durch Ausnutzung des dreidimensionalen Designs sind weitere Masse- und Volumenersparnisse realisierbar und durch die Verwendung und Kombination der einzelnen Module eine Erhöhung der Flexibilität. Der Projektpartner TESAT GmBH hätte bereits Interessenten für den käuflichen Erwerb einer kompakten Schaltmatrix, Satellitentauglichkeit vorausgesetzt (vgl. Gespräch mit H. Spinnler im November 2006 in Backnang).

Die Fortsetzung der Bestrebungen (z.B. in Anschlussprojekten Projekten wie KERAMIS II) die Einsatzfähigkeiten und Vorteile der LTCC im Raumfahrtbereich zu demonstrieren und die Leistungsfähigkeit auszubauen, ergibt sich durch Zielstellungen für Entwicklungen komplexerer Systeme. In Kombination mit den nun verfügbaren Komponenten kann der Ausbau des modularen Gedankens zu Systemen mit einfach kombinierbaren Submodulen vorangetrieben werden. Wenn deren zuverlässiger Einsatz in Satelliten erfolgreich demonstriert ist, kann über eine ESA-Qualifizierung deutscher Technologiepartner beraten werden, so dass es in Zukunft auch Europäischen Firmen möglich sein würde, diese Technologie im All einzusetzen.

Allgemein sind auch die Trends künftiger Systeme der Mobilkommunikation (höhere Trägerfrequenzen, rekonfigurierbare Architekturen, modularer Aufbau, Miniaturisierung) oder Höchstfrequenz-Sensorik wie „Radar"-Sensoren in Umwelt und Medizintechnik sind zu berücksichtigen.

7 Literatur

Nachfolgend sind Veröffentlichungen aufgeführt, die im Rahmen des Projekts KERAMIS erarbeitet wurden:

Liste der Publikationen

[1] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, and H. Thust: *1. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS" – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, Februar 2004.

[2] J. F. Trabert, R. A. Perrone, R. Münnich, R. Stephan, M.A. Hein, and H. Thust: *20 GHz LTCC applications for satellite communications – challenges for design and technology*. In: *Proc. of International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena*, St. Petersburg, Russia, June 07–09, 2004.

[3] H. Thust, R. A. Perrone, K.-H. Drüe and A. Albrecht: *Feinstrukturierung durch photodefinierbare Materialien –Übersicht und Anwendung*. DKG-Symposium zu Verfahren der keramischen Mehrlagentechnik: Stand und Zukunftsperspektiven, Erlangen 30.Nov/1.Dez.2004. In: *Verfahrenstechnik, Band 18*, Heft1, ISS 0173-9913, S. 122-131, 2004.

[4] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, R. A. Perrone, and H. Thust: *2. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS" – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, August 2004.

[5] H. Thust, R. A. Perrone, K.–H. Drüe and M. Hintz: *LTCC Technologies for advanced RF/Microwave Applications*. In: *Proc. of the 28th IMAPS-Poland Conference*, September 26–29, 2004.

[6] R. A. Perrone, H. Thust and K.–H. Drüe: *Progress in the Integration of planar and 3D Coils on LTCC by using photoimageable Inks*. In: *Proc. of the 37th International Symposium on Microelectronics*, Long Beach, USA, November 14-18, 2004.

[7] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, R. A. Perrone, and H. Thust: *3. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS" – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, Februar 2005.

[8] J. Müller, J. Pohlner, G. Reppe, H. Thust and R. Perrone: *Development and Evaluation of Hermetic Ceramic Microwave-Packages for Space-Applications*. In: *Proc. of the International Conference on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies*, Baltimore, USA, April 10- 13, 2005.

[9] M.Hintz: *Bulk Materials in LTCC Multilayers*. In: *Proc. of the International Conference on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies*, Baltimore, USA, April 10- 13, 2005.

[10] R. A. Perrone, K.–H. Drüe, H. Thust, J. Trabert and M. Hein: *Development and Evaluation of photodefined Elements for Microwave-Modules in LTCC for Space-Applications*. EMPC IMAPS, Brügge, Belgium, June 12-15, 2005.

[11] K.–H. Drüe: *Precise Drilling and Structuring of LTCC materials using a 355 nm YAG-Laser*. EMPC IMAPS, Brügge, Belgium, June 12-15, 2005.

[12] R. A. Perrone, H. Thust, K.–H. Drüe: *Progress in the Integration of planar and 3D Coils on LTCC by using photoimageable Inks*. In: *J. of Microelectronics and Electronic Packaging*, Vol 2, No.2, Second Quarter, pp 155-161, 2005.

[13] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, R. A. Perrone, and H. Thust: *4. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS“ – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, August 2005.

[14] J. F. Trabert, M. A. Hein, J. Müller, R. A. Perrone, R. Stephan and H. Thust: *High functional density low temperature co-fired ceramic module for satellite communications*. In: *, Proc. of the 35th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 03-07 October 2005.

[15] H. Thust, R. A. Perrone, M. Hintz, D. Förster: *Optimale Gestaltung von Mikrowellen LTCC Anwendungen mit FODEL®und Vollmetallfeinstrukturen*. Deutsche IMAPS Konferenz, München, 10.-11. Oktober 2005.

[16] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, J. Müller, R. A. Perrone, and K.–H. Drüe: *5. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS“ – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, Februar 2006.

[17] R. A. Perrone, J. Müller, H. Thust and J. F. Trabert: *3D Interconnection Technology for LTCC RF Modules up to 60 GHz*, IMAPS Conference Denver, April 2006.

[18] J. F. Trabert, M. A. Hein, J. Müller, R. A. Perrone, R. Stephan and H. Thust: *Compact low-temperature co–fired ceramic microwave switch matrix for satellite communications*. In: *Proc. of Microwave Materials and their Applications Conference (MMA)*, Oulu, Finland, June 12-15, 2006.

[19] H. Thust, R. A. Perrone, J. Müller, M. A. Hein, J. F. Trabert, Chr. Kutscher, R. Stephan, D. Schwanke, J. Pohlner, G. Reppe, R. Kulke, P. Uhlig, A. Jacob and T. Barras: *Technology Benchmarking of High-Resolution Structures on LTCC for Microwave Circuits*. In: *Proc. of the IEEE Electronics System Integration Technology Conference (ESTC)*, Dresden, Germany, 5.-7. September 2006.

[20] M. Hintz, R. A. Perrone, H. Thust and M. A. Hein: *Electrical properties of low-temperature cofired ceramics with integrated bulk metals*. In: *Proc. of the 29th. International Spring Meeting on Electronics Technology*, ISSE2006.

[21] J. F. Trabert, R. Stephan, M. A. Hein, R. A. Perrone, and K.–H. Drüe: *6. Zwischenbericht zum Projekt „KERAMIS“ – KERAmische MIkrowellenschaltkreise für die Satellitentechnik*. Technische Universität Ilmenau, August 2006.

[22] J. Müller, R. A. Perrone, H. Thust, J. F. Trabert, Chr. Kutscher, R. Stephan, M. Hein, D. Schwanke, J. Pohlner, G. Reppe, R. Kulke, P. Uhlig, A. Jacob and T. Barras: *Impact of Patterning Technologies on the Microwave Performance of LTCC. KERAMIS Final Status Seminar* and the *1st MacroNano-Colloquium on LTCC RF and Microsystem Interconnect*, Technische Universität Ilmenau, November 29-30, 2006.

[23] J. F. Trabert and K.–H. Drüe: *Double-sided hybrid integrated LTCC Switch Matrix for Ka-band Satellite Communications.KERAMIS Final Status Seminar* and the *1st MacroNano-Colloquium on LTCC RF and Microsystem Interconnect*, Technische Universität Ilmenau, November 29-30, 2006.

Eigene bzw. in Anspruch genommene Erfindungen und Schutzrechte

Schutzrechte oder Erfindungen Dritter wurden nicht in Anspruch genommen oder genutzt. Es wurde im Projektzeitraum ein Patent von am Vorhaben Beteiligten angemeldet:

K.–H. Drüe, M. Hintz, A. Albrecht: *Verfahren zur Mikrostrukturierung von Mehrstoffverbundsystemen, insbesondere ungebrannten Keramikfolien mit einem fokussierten Laser*, Anmeldung am Patentamt: 23.03. 2005, Aktenzeichen: 10 2005 013 407.6.