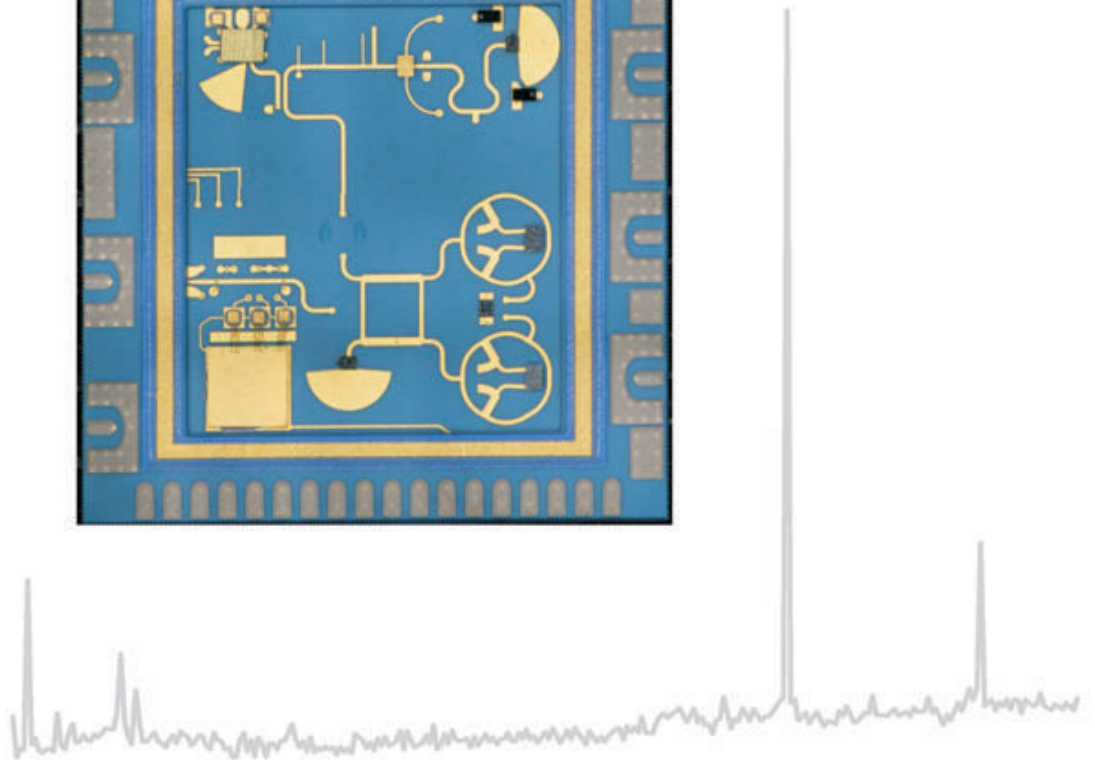
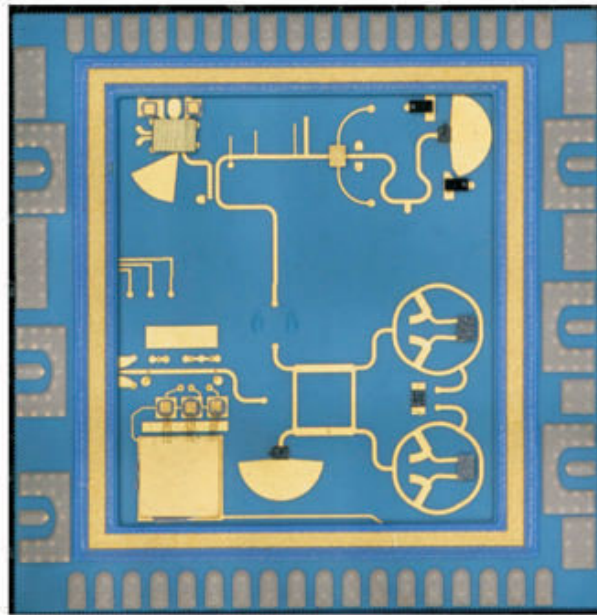


## Systematische Mehrlagen-Integration hybrider Hochfrequenzschaltungen



# **Systematische Mehrlagen-Integration hybrider Hochfrequenzschaltungen**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Torben Baras

aus Lübeck

2009

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. i Göttingen: Cuvillier, i 2010

Zugl.: i (TU) i Hamburg-Harburg (Univ.), i Diss., i 2009

978-3-86955-233-0

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Arne F. Jacob
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2009

© CUVILLIER VERLAG, i Göttingen i 2010

Nonnenstiege 8, i 37075 Göttingen

Telefon: i 0551-54724-0

Telefax: i 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, i 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-233-0

## Vorwort

Das vorliegende Manuskript entstand aus meiner Zeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Braunschweig im Jahre 2003 - 2004 sowie am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg in den Jahren 2004 - 2008. Für die Möglichkeit, diese Tätigkeit aufzunehmen, möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Arne F. Jacob ganz besonders und herzlich danken. Er hat als Freund und Förderer meiner Arbeit hervorragende Randbedingungen gegeben. An die gemeinsame konstruktive und kreative Zeit am Institut blicke ich mit Freude zurück.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt für die freundliche Übernahme des Koreferats und die damit verbundene Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Jan Luiken ter Haseborg für die Ausübung des Prüfungsvorsitzes. Allen Prüfern danke ich für den reibungslosen und angenehmen Ablauf der Prüfung.

Dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, namentlich Herrn Dr. rer. nat. Siegfried Voigt, spreche ich meinen herzlichen Dank für die kontinuierliche Förderung und das Interesse an den Forschungsprojekten aus, die diese Ausarbeitung möglich machten. Erwähnen möchte ich auch meine ehemaligen Studierenden Philip Birtel, Faisal Muhammad, Maria Corrales Hernandez, Johannes Müller, Lambok Opussunggu, Mohsen Sazegar, Bernd Bösch, Konstantinos Koumaras und Sascha Brosius. Ihr Engagement und die Ergebnisse ihrer Arbeiten haben mich nicht nur in der Durchführung der Projekte unterstützt, sondern auch die begleitenden Zusatzaktivitäten mit zum Erfolg geführt.

Für ein besonderes Arbeitsklima möchte ich auch gerne den freundlichen und kollegialen Umgang im Institut herausstreichen, hierfür ein herzliches Danke an alle ehemaligen Kolleginnen und Kollegen. Herrn Alexander Molke bin ich für die konstruktive Zusammenarbeit im Projekt und für die angenehme Zeit im gemeinsamen Büro sehr verbunden. Ihm sowie meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Thorsten Sokoll und Dr.-Ing. Christian Meiners möchte ich auch besonders herzlich für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und die Verbesserungsvorschläge danken. Für die einzigartige Hilfestellung in Labor und feinmechanischer Werkstatt richte ich meinen Dank an Frau Carmen Hajunga, Herrn Daniel Fischer und Herrn Werner Thun.

In ganz besonderem Maße hat mich meine Familie auf beiden Kontinenten Europa und Südamerika stets uneingeschränkt unterstützt. Über alles schätze ich die Förderung meiner lieben Eltern Hans und Renate, die mir das Studium der Elektrotechnik ermöglicht haben und damit den Grundstein für diese Promotion gelegt haben. Ein Ehrenplatz in dieser Danksagung gebührt zwei Menschen, die sich in ganz einzigartiger Weise verdient gemacht haben: Meine liebe Frau Paola und mein lieber Sohn Hendrik. Ich bin sehr froh und glücklich, dass wir uns haben.

Ulm, Dezember 2009

Torben Baras



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>1 Elementare passive Strukturen</b>	<b>10</b>
1.1 Material-Parameter und Simulationswerkzeuge . . . . .	10
1.2 Elementare Strukturen . . . . .	12
1.2.1 Vergrabenes Filter zur galvanischen Entkopplung . . . . .	12
1.2.2 Vertikales Filter zur Gleichspannungsversorgung . . . . .	15
1.2.3 Gedruckte Leitungsabschlüsse . . . . .	22
<b>2 Fertigungstoleranzen im Herstellungsprozess</b>	<b>26</b>
2.1 Analysemethoden . . . . .	26
2.1.1 Monte-Carlo-Analyse mit Feldsimulationen . . . . .	26
2.1.2 Referenzmethode zur messtechnischen Bestimmung der Auflösung	30
2.2 Wiederholgenauigkeit innerhalb eines Prozesses . . . . .	31
2.2.1 Planare Schaltung . . . . .	31
2.2.2 Vergrabene Schaltung mit Materialeinschluss . . . . .	36
2.2.3 Vertikale Schaltung . . . . .	38
2.3 Wiederholgenauigkeit zwischen Prozessen . . . . .	43
2.4 Fazit . . . . .	44
<b>3 Gehäuse und Schnittstellen</b>	<b>46</b>
3.1 Gehäusetechnik . . . . .	46
3.1.1 Bekannte Konzepte . . . . .	46
3.1.2 Modulaufbau mit verbesserter Wärmeabfuhr . . . . .	48
3.2 Schnittstelle zwischen Modul und Trägersubstrat . . . . .	50
3.2.1 Land-Grid-Array (LGA) mit hoher Bandbreite . . . . .	53
3.2.2 Ball-Grid-Array (BGA) . . . . .	57
3.2.3 Thermomechanische Simulation . . . . .	60
3.2.4 Messtechnische Verifikation des LGA . . . . .	66
<b>4 Integration von Komponenten</b>	<b>70</b>
4.1 Mischer . . . . .	70
4.1.1 Schaltungskonzept und Integrationsansatz . . . . .	70
4.1.2 Ergebnisse . . . . .	72
4.2 Verdreifacher . . . . .	74
4.2.1 Schaltungskonzept und Integrationsansatz . . . . .	75
4.2.2 Ergebnisse . . . . .	77
4.3 Oszillator . . . . .	80
4.3.1 Schaltungskonzept und Integrationsansatz . . . . .	80

4.3.2	Vertikal integrierter Resonator . . . . .	81
4.3.3	Temperaturkompensation . . . . .	85
4.3.4	Ergebnisse . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Integration von Subsystemen und Systemen</b>	<b>94</b>
5.1	Subsystem Frequenz-Synthesizer . . . . .	94
5.1.1	Schaltungskonzept und Integrations-Ansatz . . . . .	94
5.1.2	Ergebnisse . . . . .	96
5.2	Systeme . . . . .	97
5.2.1	Zwei-Seitenband-Konverter . . . . .	97
5.2.2	Ein-Seitenband-Konverter . . . . .	100
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>104</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>

## Einleitung und Zielsetzung

Kommunikation ist eine Sozialhandlung zwischen Lebewesen. Die Übersetzung des lateinischen Ausdrucks *communicare* bedeutet soviel wie "mitteilen" oder "teilnehmen lassen". Seit Teslas Erfindung der drahtlosen Telegraphie und Marconis erstem erfolgreichen Übertragungsexperiment über den Ärmelkanal gegen Ende des 19. Jahrhunderts hat die drahtlose Nachrichtenvermittlung dem Begriff der Kommunikation zwischen Menschen zunehmend eine neue, technische Prägung verliehen. Der Transport von an elektromagnetische Wellen gebundenen Informationen, der zunächst in der Übertragung einer einfachen Zeichenkette begann, liefert auch heutzutage noch die Grundlage für eine Vielzahl von komplexen Anwendungen, Systemen und Diensten.

Seit dem Einzug digitaler Systeme zur Datenverarbeitung und -speicherung ist das Aufkommen an zu übertragenden Informationen stark gestiegen, wobei in jüngster Zeit Bild- und Videodaten einen erheblichen Anteil ausmachen [1]. Die Erschließung höherer Trägerfrequenzen für drahtlose Kommunikationssysteme ist eine Konsequenz aus den für die Übertragung notwendig gewordenen Bandbreiten. Existierende Technologien müssen skaliert und weiterentwickelt oder es müssen gar neue entwickelt werden, um den steigenden Anforderungen an Baugruppen in Empfangs- und Sendesystemen gerecht zu werden. Davon sind auch die Gehäuse-, Aufbau- und Verbindungstechnik im unteren Millimeterwellenbereich betroffen.

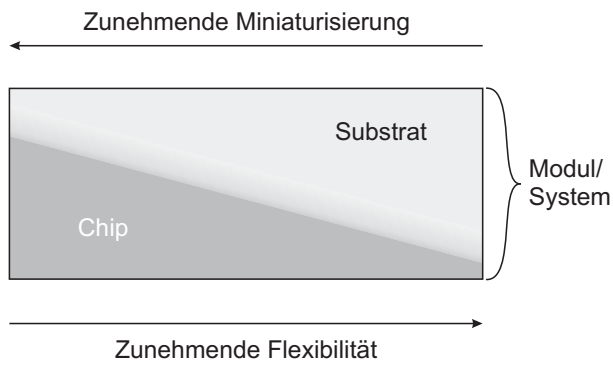
Ein weiterer Trend ist der vermehrte Einsatz von mobilen Applikationen, welche den Empfang und das Versenden von Informationen an nahezu jedem Ort ermöglichen sollen. Die Eignung einer Komponente für den mobilen Einsatz verbessert sich durch deren Miniaturisierung, da nicht nur eine Reduzierung der Abmessungen und des Gewichts, sondern vor allem auch der Leistungsaufnahme erfolgt.

## Integration

Um Funksysteme herzustellen, werden aktive Schaltungsteile häufig auf passiven Substratmaterialien aufgebracht. Für den aktiven Teil ist die monolithische Integration in Siliziumtechnik oder besonders bei hochfrequenten Anwendungen in der Verbundhalbleitertechnik Gallium-Arsenid weit verbreitet. Je nach Anwendung ist abzuwägen, wie viel Funktionalität bereits im Chip vorhanden ist oder erst im Substratmaterial realisiert wird. Bedingt durch die hohe Strukturauflösung können besonders kompakte Schaltungen auf dem Chip realisiert werden, die dann allerdings in ihrer Funktion festgelegt sind (siehe dazu Abbildung A).

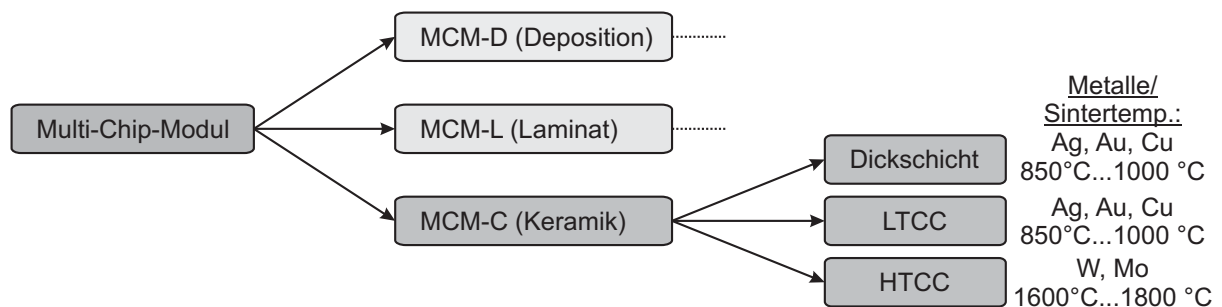
Für Schaltungen, die in großen Mengen hergestellt werden, ist der Ansatz der hohen Integrationsdichte im Halbleiter nicht nur aus technischer Sicht sinnvoll, da die so gewonnenen Blöcke mit hoher Funktionalität die Synthese des Systems vereinfachen. Auch aus





**Abbildung A** – Zusammenhang zwischen Flexibilität und Dichte im Integrationsprozess.

ökonomischer Sicht gibt es Vorteile durch die schnelle Amortisation der Entwicklungskosten. Bedingt durch die hohen Initialkosten der Halbleiterprozesse finden bei kleinen bis mittleren Stückzahlen jedoch auch hybride Ansätze Anwendung. Diese sind dadurch charakterisiert, dass zum Teil diskrete Halbleiter auf einem Trägermaterial aufgebracht werden, das passive Schaltungselemente beherbergt. Das Trägermaterial kann durch niedrigere Initialkosten leichter und kostengünstiger an wechselnde Anforderungen angepasst werden. Hybride Baugruppen dieser Art werden auch als Modul bezeichnet. Je nach Komplexität können auch mehrere Chips auf einem gemeinsamen Träger untergebracht sein. Aus dem englischen Sprachraum ist für diese Anordnung der Begriff Multi-Chip-Module (MCM) bekannt. Als Trägermaterial stehen für diesen Zweck verschiedene Technologien zur Verfügung, die in drei Klassen unterteilt werden [2] (siehe Abbildung B). Bei



**Abbildung B** – Hierarchie der Multi-Chip-Modul Integrationstechniken nach [2].

der *MCM-Deposition* Technologie werden Schichten aus Isolatoren und Leitern in mehreren Ebenen aufgebracht bzw. abgeschieden, um komplexe Verbindungsstrukturen zu erzeugen. Die *MCM-Laminate* Technologie wird als erweiterte Leiterplattentechnologie angesehen, bei der mehrere Lagen aus strukturierten Platten verpresst werden. Die dritte Technologieklasse umfasst die Keramiken, *MCM-Ceramics*. Sie basiert auf organischen Folien, die mit keramischen Materialien gefüllt sind und durch Strukturieren, Laminieren und Sintern zu komplexen Trägern gefügt werden.

Diese letzte Klasse untergliedert sich in drei weitere Kategorien, die unter den Bezeichnungen Dickschichttechnologie, Niedrigtemperatur-sinternde Keramiken (engl. *LTCC-low temperature co-fired ceramics*) und Hochtemperatur-sinternde Keramiken (engl. *HTCC-high temperature co-fired ceramics*) bekannt sind. Die LTCC-Technologie vereint die Vorteile der Dickschichttechnik, d.h. den Einsatz von Metallen mit hoher Leitfähigkeit, mit

den Vorzügen der HTCC-Technologie. Letztere zeichnet sich unter anderem durch hohe Auflösungen, gestanzte Durchkontaktierungen sowie geringe Oberflächenrauigkeit in einem einzigen Brennvorgang aus [2].

## LTCC - low temperature co-fired ceramics

Durch Anwendung der LTCC-Technologie, welche Anfang der 1980er Jahre entwickelt wurde [3, 4], sind elektronische Schaltungen in den vergangenen zwei Jahrzehnten erheblich miniaturisiert worden. Derzeit werden viele verschiedene Substratsysteme kommerziell vermarktet. Eine Übersicht gängiger Produkte findet sich in Tabelle A.

Parameter	DuPont 951	DuPont 943	Heraeus CT2000	Ferro A6S	ESL 41020-70C
<b>Elektrisch</b>					
$\epsilon'_r$	7,85	7,5	9,1	5,9	7-8
$\tan\delta$	0,0045	0,001	<0,002	<0,002	0,005
bei Frequenz	3 GHz	3 GHz	2,5 GHz	1-2 GHz	1 MHz
<b>Mechanisch</b>					
Substrathöhe [ $\mu\text{m}$ ]	43(50)	46(51)	20(25)	94(129)	43(52)
gebrannt	97(114)	114(127)	40(50)	188(257)	
(ungebrannt)	140(165)	228(254)	77(102)		
	216(254)		102(127)		
			200(250)		
Schrumpfung X,Y [%]	12,7 $\pm$ 0,3	9,5 $\pm$ 0,3	11,5	14,8 $\pm$ 0,2	15,0 $\pm$ 0,5
Schrumpfung Z [%]	15,0 $\pm$ 0,5	10,3 $\pm$ 0,3	14,0	27,0 $\pm$ 0,5	17,0
<b>Thermisch</b>					
Leitfähigkeit [W/m·K]	3,0	4,4	4,3	2,0	2,5
Ausd. Koeff.[ppm/K]	5,8	4,5	8,5	9,0	7,4
<b>Integration</b>					
R oberfl./vergraben	✓/✓			✓	✓/✓
C vergraben	✓			✓	✓
Fotostrukt.	✓		✓(Silber)		✓
Ätzen	✓		✓(Gold)		

**Tabelle A** – Übersicht kommerzieller LTCC Systeme nach [2, 5–8].

Die relative Permittivität der Materialien liegt im Bereich zwischen  $\epsilon'_r = 5,9$  und  $9,1$  und ist damit zwei- bis dreimal höher als bei organischen Leiterplattenmaterialien. Zugleich wird ein geringer Verlustwinkel erreicht. Für die unterschiedlichen Anwendungen ist eine hohe Anzahl verschiedener Substrathöhen verfügbar, die im gebrannten Zustand typischerweise zwischen  $43 \mu\text{m}$  und  $228 \mu\text{m}$  betragen.

Das Grundmaterial des Systems *DuPont 951*, welches im Rahmen dieser Arbeit durchweg Anwendung finden wird, besteht im ungebrannten Zustand aus einem organischen Binder sowie Glas-keramischen Verbindungen, wie zum Beispiel Aluminiumoxyd ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), rekristallisiertem Glas ( $\text{SiO}_2$ ), Boroxyd ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) und Bleioxyd ( $\text{PbO}$ ) mit einem geringfügigen

---

Anteil weiterer Verbindungen [9, 10]. Beim Ausbrennen des Binders bei etwa 500°C und Verdichten der Keramik bei etwa 900°C tritt bei kommerziellen LTCC-Prozessen in wenigstens einer Achse eine ausgeprägte Schrumpfung auf, die bei der Herstellung durch Skalierung der Entwurfsdaten berücksichtigt werden muss.

Eine Einschränkung für Leistungsapplikationen stellt die moderate thermische Leitfähigkeit dar. Sie ist etwa um den Faktor 8-10 geringer als bei reinem Aluminiumoxyd, jedoch wenigstens 10 mal höher als bei organischen Leiterplatten. Der Koeffizient der thermischen Ausdehnung ist dem von Gallium-Arsenid und Silizium ähnlich. Aus diesem Grund bieten keramische Materialien günstige Voraussetzungen für mechanisch zuverlässige Aufbauten.

Eine Besonderheit der LTCC-Herstellung ist die Strukturierung der metallischen Schichten. Im Gegensatz zur Leiterkartenherstellung mit Ätz-Galvanik werden bei der Prozessierung der Mehrlagen-Keramik Pasten verarbeitet. Diese können zum Beispiel mit Metallpartikeln gefüllt sein, um im Siebdruckverfahren die Leiterbahnen auf die Oberfläche der ungebrannten Folie aufzubringen. Zudem können sehr feine Leiterbreiten mit Hilfe der Fotostrukturierung und anschließendem Ätzprozess realisiert werden. Das Materialsystem 951 der Firma *DuPont* ist nicht nur durch diese Möglichkeiten, sondern auch durch eine Vielzahl von verfügbaren Pasten charakterisiert. Dadurch können erst wichtige Komponenten zur Miniaturisierung wie gedruckte Widerstände und integrierte Kondensatoren mit Dielektrika hoher Permittivität implementiert werden. Bedingt durch Rauigkeiten der keramischen Folien und der gedruckten Metallisierung ist die LTCC durch höhere Leiterverluste charakterisiert, als eine Dünnschicht-Keramik mit polierter Oberfläche. Diese Eigenschaft kann sich für Anwendungen ins besondere im Millimeterwellen-Bereich einschränkend auswirken.

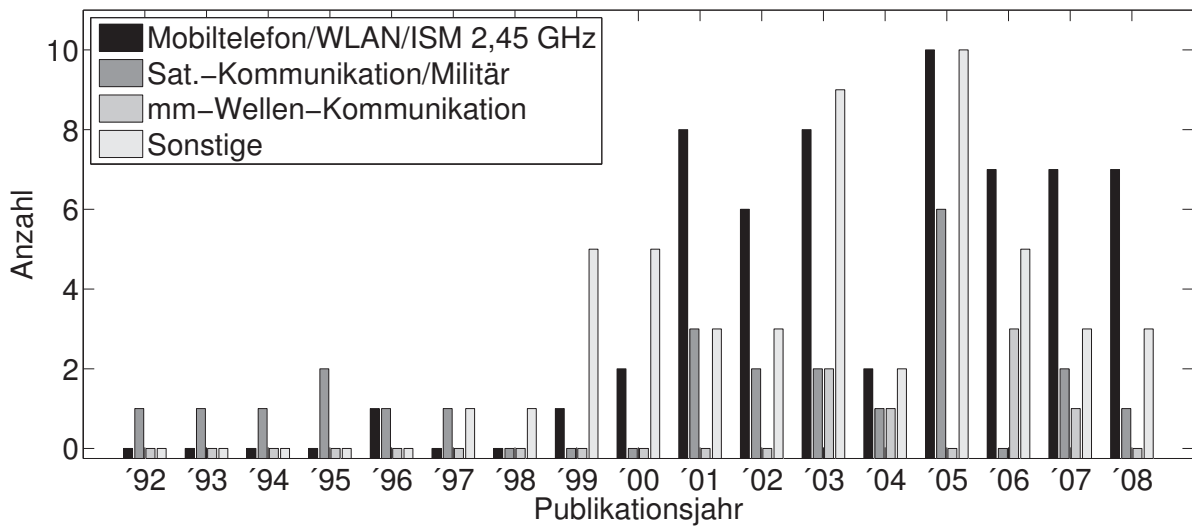
## Die LTCC-Technologie in der Mikrowellentechnik

Die LTCC-Technologie fand neben dem Einsatz im Automobil-Sektor und der Medizintechnik ihre ersten Anwendungen in der militärischen Mikrowellentechnik [11] und Satellitenkommunikation der 1990er Jahre, wie in Abbildung C gezeigt ist <sup>1</sup>. Dazu zählen *MCM-C*-integrierte Sende- und Empfängerschaltungen im *X*- und *Ka*-Band [12–15] sowie die Entwicklung der dazugehörigen passiven Strukturen wie Koppler [16, 17] und Filter [18]. In diesem Marktsegment ist über die erfassten Jahre eine Konstanz festzustellen, die für ein stetiges Interesse am Einsatz der LTCC in kostenintensiven Applikationen mit geringen Stückzahlen spricht.

Seit Ende der 1990er Jahre ist ein sprunghafter Anstieg im Bereich der zivilen Mobiltelekommunikation zu verzeichnen. Damit verbunden sind anfangs noch hybrid integrierte Komponenten wie Verstärker [19–21], im weiteren Verlauf dann hoch-integrierte Module, die die Kommunikation mit multiplen Kommunikationsstandards und -frequenzen

---

<sup>1</sup>Die Informationen hierzu sind aus über 150 Publikationen internationaler Konferenzen sowie Journalen des amerikanischen Ingenieursverbandes *IEEE* erstellt worden. Die Statistik erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, spiegelt jedoch aufgrund der Kontinuität der verfügbaren Datensätze die Entwicklung in den Grundzügen wider.



**Abbildung C** – Publikationsstatistik zum Thema LTCC für Mikrowellenanwendungen im Zeitraum 1992 - 2008 nach Anwendungsgebieten.

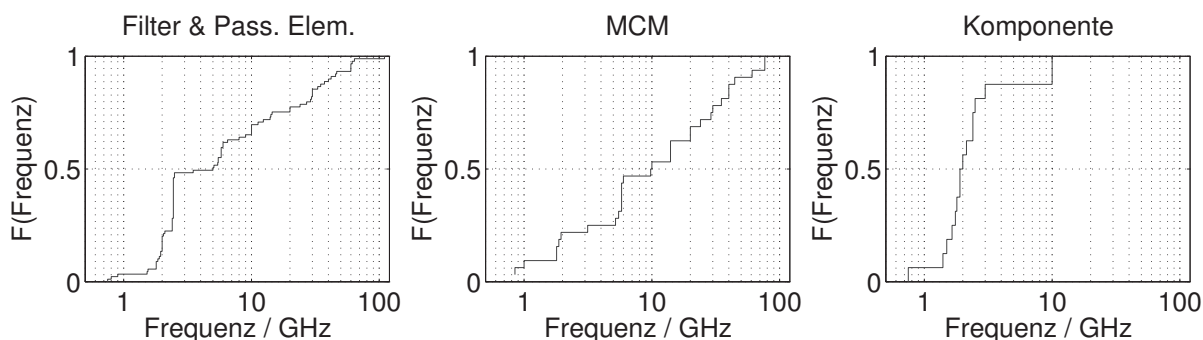
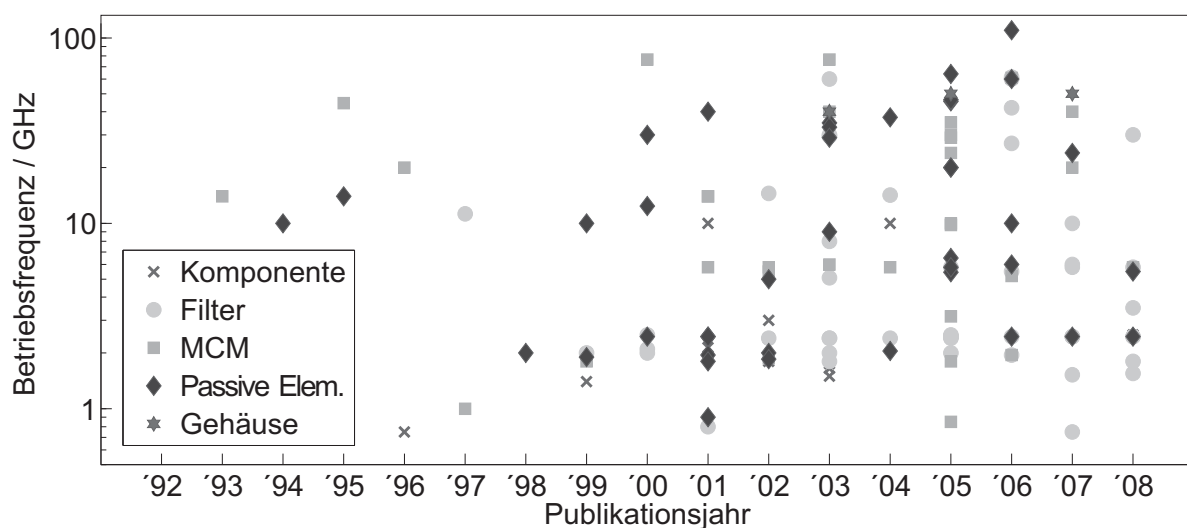
ermöglichen [22–24]. Der gleichen Gruppe in der Statistik sind auch Anwendungen der drahtlosen Computernetzwerke wie etwa WLAN (engl. *Wireless Local Area Network*) oder Funkverbindungen im lizenzfreien Frequenzband bei 2,45 GHz zugeordnet, da diese Endgeräte und Terminals bei ähnlichen Frequenzen wie die der Mobiltelefonie arbeiten. Auch hier fällt die Wahl aufgrund der Möglichkeiten zur Miniaturisierung von Sende- und Empfangsschaltungen auf die *MCM-C/LTCC*-Technologie (zum Beispiel [25–29]).

Ein neuer Entwicklungstrend ist im Zeitraum der letzten fünf Jahre deutlich erkennbar. So geben einige Autoren in ihren Forschungsarbeiten explizit die Millimeterwellenkommunikation bei 40 GHz [30] und bei 60 GHz [31–34] als Applikation an. Insbesondere das 60 GHz-Band ist aufgrund der hohen atmosphärischen Dämpfung von 14,9 dB/km [35] und der damit verbundenen Möglichkeit einer hohen räumlichen Dichte von Funkstrecken interessant. Weitere Anwendungen im Millimeterwellen-Bereich sind Module für faseroptische Übertragungssysteme bei Datenraten von bis zu 40Gb/s [36].

Um den Stand der Technik genau zu erfassen, ist nicht nur die Darstellung nach Anwendungsgebieten und Branchen, sondern auch nach den involvierten Betriebsfrequenzen wie in Abbildung D notwendig. Jedes Symbol bezeichnet hier die höchste, sinnvoll nutzbare Frequenz der Schaltung und repräsentiert eine Publikation. Es wird in fünf Kategorien unterschieden, die im Folgenden mit Beispielen erläutert werden.

## Komponenten

Die hier zusammengefassten Publikationen behandeln die Entwicklung passiv integrierter Komponenten wie Verstärker, Mischer und Oszillatoren. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass in der Schaltung nach Möglichkeit ausschließlich diskrete aktive Elemente verwendet werden. Sämtliche passiven Funktionen wie Anpass- und Speisernetzwerke



**Abbildung D** – Publikationsstatistik zum Thema LTCC für Mikrowellenanwendungen im Zeitraum 1992 - 2008 nach höchsten Betriebsfrequenzen mit kumulativen Verteilungsdichtefunktionen  $F(\text{Frequenz})$ .

sind in der Keramik realisiert. Bei Frequenzen von weniger als 3 GHz wurde unter anderem von einer Reihe passiv integrierter Verstärker berichtet [21, 37–40]. Als weitere Schlüsselkomponenten finden sich auch passiv integrierte Mischer [41, 42] sowie Oszillatoren [43–45]. Darüber hinaus sind Mischer bis 14 GHz [46] und Verstärker bis 11 GHz [47] veröffentlicht worden.

## Filter

Diese Gruppe umfasst alle Formen der elektronischen Filter aus konzentrierten Elementen, verteilten Strukturen und Substrat-integrierten Wellenleitern. Der Entwurf von Filtern im LTCC-Substrat findet bei Frequenzen unterhalb von 10 GHz fast ausschließlich auf Basis von konzentrierten Elementen statt, wie zum Beispiel in [48–53] geschildert. Die hierzu notwendigen Kapazitäten und Induktivitäten werden in der Mehrlagen-Keramik effizient durch parallele Plattenanordnungen bzw. spiralförmige Leiter imple-

---

mentiert. Oberhalb von 10 GHz sind parasitäre Kopplungen schwerer beherrschbar, weshalb hier Filter aus planaren Resonatoren bis 60 GHz [54, 55] oder vergrabenen, zum Teil geschirmten Resonatoren bei Mittenfrequenzen von 25 GHz - 60 GHz [56–61] entworfen werden. Durch den Einsatz vergrabener Durchkontaktierungen (Vias) können Filter bei Millimeterwellen-Frequenzen auch aus Substrat-integrierten Wellenleitern [62, 63] aufgebaut werden.

## **Modul/MCM**

Diese Gruppe enthält Publikationen, in denen Lösungen mit LTCC als Trägersubstrat für ein oder mehrere integrierte Halbleiterschaltungen eingesetzt wird. In dieser Kategorie finden sich neben integrierten Modulen unterhalb von 6 GHz, wie sie unter anderem in [64, 65] präsentiert werden, auch Lösungen für höhere Frequenzen. So wurden Module in [66] bei 14 GHz, in [67] bis 40 GHz und in [68, 69] bis 60 GHz erörtert, die auf monolithisch integrierte Halbleiterschaltungen zurückgreifen.

## **Passive Elemente**

Sämtliche passive Strukturen, die nicht explizit eine Filterfunktion innehaben, sind in dieser Gruppe aufgeführt. Hier existiert unterhalb von 10 GHz eine Reihe von Lösungen für Symmetrieübertrager [70–73], Koppler und Teiler [74–76] sowie Antennen [77–79]. Oberhalb von 10 GHz finden sich dagegen zunehmend Arbeiten an Übergängen zwischen LTCC-Substrat und Halbleitern [80] bzw. Hohlleitern [81] und auch Übergänge innerhalb der keramischen Mehrlagenstruktur [80, 82–84]. Weiterhin sind Abhandlungen über Integrationstechniken von LTCC-basierten Resonatoren zu finden [85, 86].

## **Gehäuse**

In dieser Kategorie sind Gehäusekonzepte zusammengefasst. Es sind auf diesem Gebiet vergleichsweise wenige Publikationen vorzufinden, die jedoch allesamt Frequenzen bis in den Millimeterwellenbereich bis 40 GHz [87, 88] bzw. 50 GHz [89] betrachten.

## **Ziel der Arbeit**

Aus der Auswertung der verfügbaren Literatur wird ersichtlich, dass Lösungen für Multi-Chip-Module und passive Strukturen wie Filter und Übergänge bis hin zu Millimeterwellen-Frequenzen existieren. Hingegen sind Komponenten, die aus diskreten aktiven Elementen bestehen und deren passive Strukturen ausschließlich in der Mehrlagenkeramik realisiert werden, bislang vornehmlich bis zu Frequenzen von 3 GHz aufgezeigt worden. Es sind einige Ansätze vorhanden, die die Möglichkeiten der vollständigen passiven Integration bis etwa 11 GHz aufzeigen. Bislang fehlt jedoch eine geschlossene Ausarbeitung mit einer Umsetzung von der elementaren passiven Struktur bis hin zu einem komplexen Kommunikationssystem im Bereich oberhalb von 10 GHz.