

Neue Technologien für mm-Wellen: Chancen für 5G und die nächsten RADAR-Generationen

Thomas Gottwald, Dr. Manuel Martina, Schweizer Electronic AG, Schramberg, Germany

Seit einigen Jahren haben Hochfrequenz-Anwendungen die Automobilindustrie erreicht und durchdringen diese immer weiter. Funktionen wie adaptiver Tempomat (Adaptive Cruise Control, ACC), Totwinkelerkennung (Blind Spot Detection), Notbremsassistent (Collision Avoidance System) und verschiedene andere Fahrerassistenzsysteme sorgen für einen wachsenden Bedarf an Leiterplatten mit integrierten Hochfrequenz-Antennen, vorwiegend sog. Patch-Antennen. Um die optimale Leistung dieser Systeme zu erreichen, müssen die Basismaterialeigenschaften, die Abbildungsgenauigkeit der geometrischen Antennenstrukturen wie Zuleitungen und Patches, die Dickenkontrolle der verwendeten Dielektrika sowie unsymmetrische Leiterplattenkonstruktionen beherrscht werden. Der Betrieb dieser Systeme im Automotive-Umfeld stellt dabei hohe Anforderungen an das Gesamtsystem, das nicht nur zuverlässig bei allen klimatischen Anforderungen funktionieren, sondern auch eine hohe Robustheit aufweisen muss, um eine hohe Lebensdauer zu erreichen.

For a number of years now RF applications have entered the automotive industry and they are penetrating it ever deeper. Functionalities such as adaptive cruise control (ACC, 'Tempomat'), blind spot detection ('Totwinkelerkennung'), collision avoidance ('Notbremsassistent') and several other categories of driver assistance systems are causing a growing demand for printed circuit boards equipped with integrated RF antennas, primarily for so called patch antennas. To achieve the optimal power level of these systems, the properties of their basic materials, the imaging accuracy of their geometrical antenna structures, such as feed lines and patches, the thickness of the various dielectrics, as well as asymmetric PCB constructions must be controlled. The operation of these systems in the automotive context places high demands on the overall system. It has to function properly under all climatic conditions and it must show a high robustness to reach a high life span.

Die vorgestellte μ^2 Pack-Technologie bietet die Chance, die Leistungsfähigkeit von Radarsystemen deutlich zu erhöhen.

Patch-Antennen für mm-Wellen

In den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts haben Patch-Antennen im Bereich der Luftfahrt und militärischer Anwendungen Einzug gehalten, da sie gegenüber Parabolantennen flach aufgebaut werden können, leichter sind und dennoch über eine klare Abstrahlcharakteristik verfügen. Diese Eigenschaften wurden auch in Massenmärkten benutzt, wie im Bereich der GPS-Receiver und anderer Wireless-Produkte. Die Antennen konnten durch die Verwendung von Materialien mit hoher Dielektrizitätskonstante sehr klein gebaut werden, was ihnen zum Durchbruch verhalf [1].

Als besonders geeignet haben sich PTFE-basierte Basislaminare erwiesen, die in heutigen mm-Wellen-Systemen eine dominierende Stellung einnehmen. Reine PTFE-Systeme zeigen einen hohen Temperaturkoeffizienten der Dielektrizitätskonstante ϵ_r von -125 ppm/K, gemessen in einem Bereich von Raumtemperatur bis 65 °C. Im Vergleich dazu zeigen keramisch gefüllte PTFE Laminare einen Temperaturkoeffizienten von nur -3 ppm/K unter sonst gleichen Bedingungen [2]. Ein geringer Temperaturkoeffizient ist wichtig, um die Eigenschaften der Antennen über den definierten Temperaturbereich konstant zu halten.

Als nachteilig werden die hohen Kosten dieser Laminare bewertet, die diese Materialien sowohl im Einkauf, als auch bei der Verarbeitung verursachen. Daher wird intensiv an Alternativen zu diesen Mate-

rialien gearbeitet und die Zahl der neu auf den Markt eingeführten HF-Materialien wächst stetig.

Hybride Leiterplatten

Mischaufbauten aus PTFE-Laminaten und ‚Standard FR-4‘-Laminaten, sog. ‚Hybride‘, haben sich im Bereich der mm-Wellen Anwendung im Automotive-Umfeld durchgesetzt. Dies liegt zum einen daran, dass aus Kostengründen die sehr teuren Materialien auf die Lagen eines Multilayers beschränkt werden sollen, die tatsächlich auch hochfrequenztauglich sein müssen. Zum anderen würden reine PTFE-Multilayer sehr spezielle Prozesse benötigen – z. B. Hochtemperatur-Verpressen – worauf die wenigsten Leiterplatten-Hersteller eingerichtet sind.

Somit finden sich in den meisten Volumen Anwendungen, z. B. Radaranwendungen, Mischaufbauten – Hybride – wie beispielhaft in *Abbildung 1* dargestellt. Die Oberseite der Schaltung ist z. B. aus einem PTFE-basierten Laminat hergestellt, während die übrigen Lagen aus FR-4 aufgebaut wurden.

Die Hochfrequenz erzeugenden und empfangenden ICs werden i. d. R. auf der Antennenseite bestückt und sind oft als sog. FOWLIP-Gehäuseformen (FOWLIP: Fan-out Wafer Level Packages) ausgeführt. Das Ausenden erfolgt dabei über die Sendeantennen (Tx), der Empfang der reflektierten Signale über die Empfangsantennen (Rx). Je mehr Sende- und Empfangsantennen die Panelantenne beinhaltet, umso höher können die empfangenen Signale aufgelöst werden.

Einflussparameter auf den Antennengewinn

Eine Patch-Antenne kann in drei Teilbereiche unterteilt werden, das Antennenpatch selbst, dessen Zuleitung (feed line) und die Referenzebene (ground), (siehe *Abb. 2*).

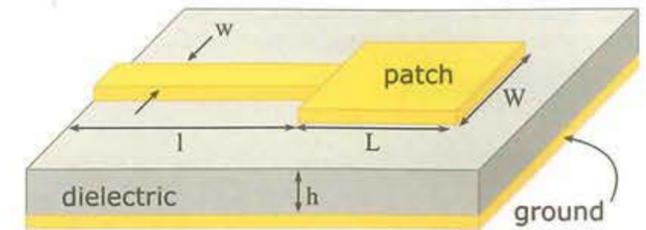


Abb. 2: Patch-Antenne mit Zuleitung und Referenzebene (ground)

Zumindest ein Maß des Antennen-Patches wird von seiner Länge bzw. Breite an die Zielfrequenz angepasst. Zur Berechnung der Dimensionen ist es erforderlich, möglichst genau die effektive Dielektrizitätskonstante des verwendeten Aufbaus zu kennen. Da sich die Oberseite und die Kanten der Zuleitungen und der Patches in Luft ($\epsilon_r \approx 1$) befinden, ist die effektive Dielektrizitätskonstante verschieden von dem reinen Basismaterialwert.

Für die Bedingung $\frac{w}{h} \geq 1$ gilt nach Bahl und Trivedi [3]:

$$\epsilon_r^{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot (h/w)}} \right) \quad <Gl. 1>$$

Setzt man nun für ϵ_r den Wert 3,0 des Basismaterials, für w den Wert 0,2 mm sowie für h den Wert 0,127 mm ein, erhält man ein effektives ϵ_r von 2,56. Für eine Frequenz von 76,5 GHz ergibt sich nach:

$$\lambda^{eff} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r^{eff}}} \quad <Gl. 2>$$

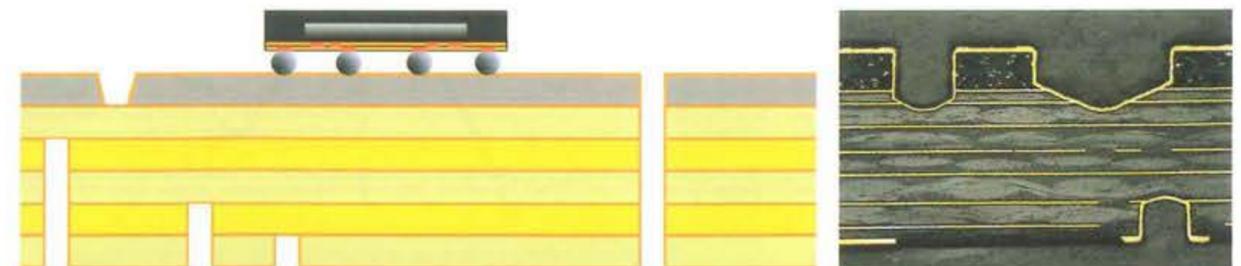


Abb. 1: Hybride Leiterplatte mit auf der Hochfrequenz-Seite aufgebautem eWLB Package schematisch (links) und als Querschliff (rechts)

eine effektive Wellenlänge von 2,45 mm und daraus eine Strukturgröße von $\lambda_{eff}/2 \approx 1,23$ mm für ein Antennen-Patch.

Für die Antennen-Patches ist es einerseits wichtig, die Mittenfrequenz optimal abbilden zu können und andererseits genügend Bandbreite zur Verfügung zu stellen, um die gewünschte Frequenzmodulation durchzuführen. Für Radarapplikationen bei 77 GHz wie ACC (Adaptive Cruise Control) ist eine Modulationsbreite von ca. 200 MHz üblich, während im 79 GHz-Band 2 bis 3 GHz zur Modulation verwendet werden. Je höher die Modulationsbandbreite, desto kleinere Objekte können aufgelöst werden.

Für die Reichweite der Antennen ist die Signaldämpfung entscheidend. Da die Empfangsantennen reflektierte Signale empfangen, deren Intensität mit der Entfernung quadratisch abnimmt, hängt die Reichweite stark davon ab, wie gering die Dämpfung des Signals vom Antennenpatch zum Empfänger-Chip ausfällt und wie stark das Signal durch Störungen wie Cross Talk oder Reflektionen überlagert wird und somit noch eindeutig ausgewertet werden kann. Um möglichst geringe Signaldämpfung und Störungen zu erhalten, erfolgt eine Impedanzanpassung der Zuleitungen unter Verwendung von Basismaterialien mit möglichst geringer Signaldämpfung. Diese wird meist als Verlustwinkel δ ausgewiesen und beschreibt die Winkelabweichung von der idealen Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung von 90° . Gemessen wird die Signaldämpfung z. B. als Transmissionsverlust eines Leiters als Df (dissipation factor) in dB/Leitungslänge.

Einflussfaktoren auf die Antennengüte

A. Ippich / H. Kröner [4] zeigten mit einer Monte Carlo Simulation die wesentlichen Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit von Patch-Antennen. In der Simulation wurden die Faktoren Dielektrizitätskonstante ϵ_r , die Dicke des Dielektrikums zwischen Antenne und Referenzebene h sowie die geometrischen Antennen-

Strukturen von Leiterbahnen und Antennen-Patches, beschrieben durch Länge, Breite und Kupferdicke variiert und deren Einfluss auf die Zuleitungsimpedanz und die Anpassung an die Mittenfrequenz simuliert.

Ein Ergebnis der Simulation war, dass für die Antennen-Patches, die wichtig sind um die Mittenfrequenz optimal zu treffen, andere Faktoren entscheidend waren, als für die Impedanz-kontrollierten Zuleitungen, die Feed Lines.

Einflussgrößen auf die Anpassung der Leitungsimpedanz

Wie *Abbildung 3* verdeutlicht, wirken sich Schwankungen der Dielektrizitätskonstante demnach nur geringfügig auf die Impedanz aus. Die Leiterdicke zeigt keinen erkennbaren Einfluss. Ausgeprägten Einfluss haben jedoch die Dicke des Dielektrikums und die Leiterbreite. Mit steigender Dicke des Dielektrikums nimmt auch die Leitungsimpedanz zu, während steigende Leiterbreite zu einem Absinken der Impedanz führt, was im Wesentlichen auf den mit wachsender Leiterbreite geringer werdenden ohmschen Anteil zurückzuführen ist.

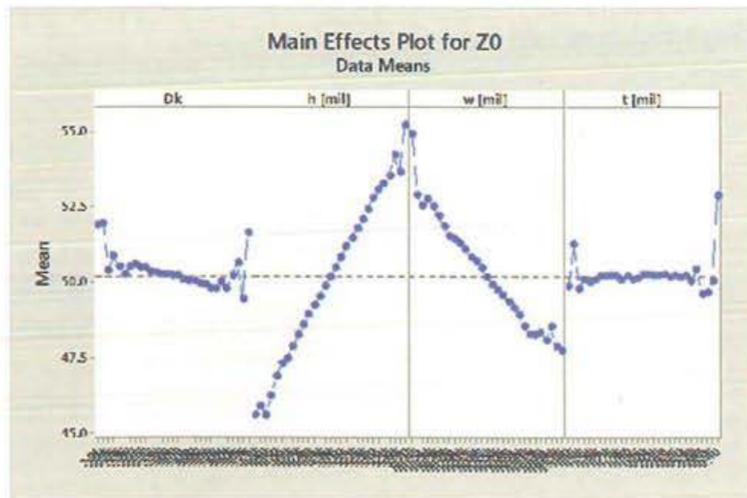
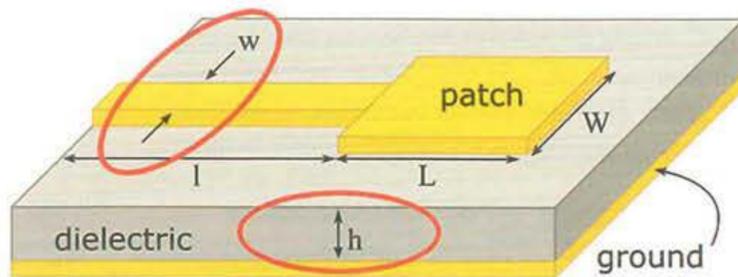


Abb. 3: Wesentliche Einflussgrößen auf die Zuleitungsimpedanz [5]

Anders sehen die Verhältnisse bei den Antennen-Patches aus

Wie aus der Simulation [5] entnommen werden kann, spielt für das Erreichen der gewünschten Mittenfrequenz die Dielektrizitätskonstante eine signifikante Rolle, während die Dielektrikum-Dicke nicht so einen ausgeprägten Einfluss hat, wie bei der Leitungsimpedanz. Während auch beim Antennenpatch die Dicke der Metallisierung unerheblich ist, ist die Dimensionstreuung in Länge und Breite des Antennen-Patches der bestimmende Faktor. Die *Abbildung 4* zeigt, dass geringfügige Abweichungen vom Soll-Maß zu erheblichen Verschiebungen der Resonanzfrequenz der Antenne führen.

Daher ist der Wunsch eines jeden HF-Designers nachvollziehbar, dass seine, aus Simulationsdaten gewonnen Layout-Geometrien idealerweise ohne Toleranzen abgebildet werden. Die Antennen in der Außenlage werden jedoch heute ätztechnisch hergestellt. Die verwendeten Ätzmedien arbeiten isotrop, ätzen also nicht nur in die Tiefe, sondern auch in die Breite. Durch Dickenschwankungen des zu ätzenden Kupfers und unvermeidbare Prozessschwankungen im Ätzprozess sind in der Praxis Toleranzen von $\pm 15 \mu\text{m}$ für die geätzten Strukturen in HF-Designs üblich. Die Isotropie des Ätzens führt zusätzlich noch zu Abweichungen von der Idealform des HF-Leiters. Eine geätzte Leiterbahn ist am ‚Kopf‘ gemessen üblicherweise schmaler, als am ‚Fuß‘, siehe *Abbildung 5*. Diese Unterschiede lassen sich durch Design-Anpassungen zu einem gewissen Maß kompensieren, jedoch nicht gänzlich vermeiden.

Aus *Abbildung 5* wird auch deutlich, dass Leiterbahnen auf ihrer Unterseite oft eine hohe Rauigkeit aufweisen, die vom Haftvermittler der Kupferfolien stammt, dem sog. ‚Treatment‘. Höhere Rauigkeiten führen aufgrund der physikalischen Verzahnung und der Zunahme an Oberfläche zu höherer Kupferhaf-

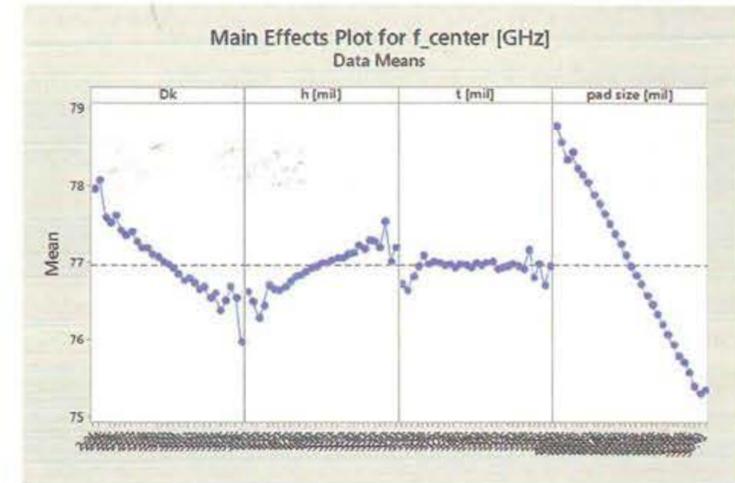
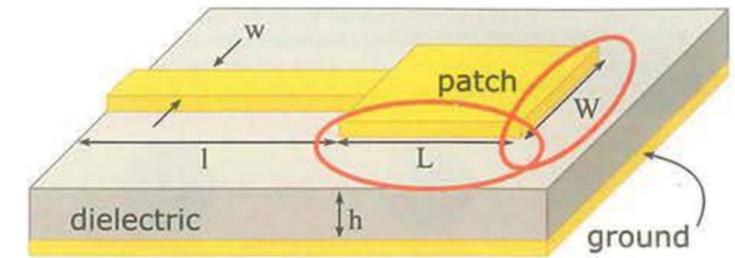


Abb. 4: Wesentliche Einflussgrößen auf die Mittenfrequenz [5]

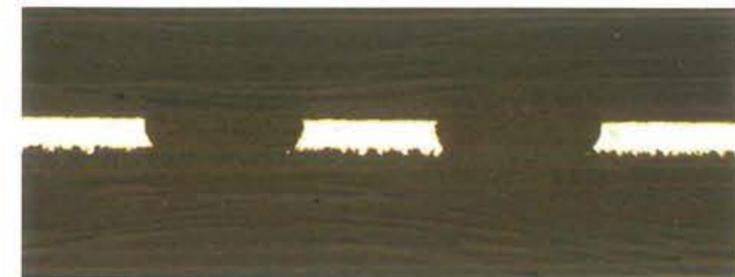


Abb. 5: Geätzte Leiterstrukturen auf Innenlagen, Fußbreite > Kopfbreite

tung auf dem Dielektrikum. Die Leiterflanken und die Oberseite des Leiters werden bei Innenlagen mit einem Haftvermittler versehen, der ebenfalls die Oberfläche aufräut, wodurch eine verbesserte Haftung der Leiterbahnen im Harzverbund erreicht wird. Für Hochfrequenzanwendungen sind Rauigkeiten von Leitern jedoch unerwünscht, weil auch diese zur Signaldämpfung beitragen, siehe *Abbildung 5*. Durch den Skin-Effekt liegt die Eindringtiefe der Ströme bei Frequenzen > 50 GHz bei unter 300 nm [5]. Damit verlaufen die Signale von z. B. 77GHz-Radar-Anwendungen nur noch im Bereich der aufgerauten

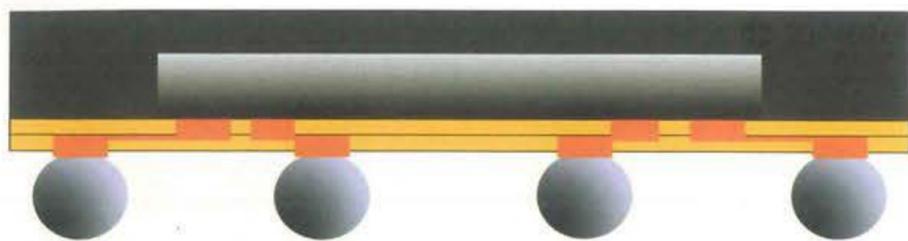


Abb. 6: eWLB Package schematisch

Strukturen, bzw. im Oberflächen-Finish von außenliegenden Leitern. Auf eine Beschichtung mit Lötstopplack wird bei diesen Anwendungen verzichtet, da dieser ebenfalls zu hohen dielektrischen Verlusten beitragen würde.

Eine weitere Quelle für Signalverluste sind die Übergänge von den Signalleitungen zu den Signalverarbeitenden Chips, die von der Aufbau- und Verbindungstechnologie und von den Übergängen im Gehäuse-Innern verursacht werden.

Eine gängige Gehäuseform für Radar-Chips sind die eWLB Packages (embedded Wafer Level Ball Grid Arrays), die eine Bauform der FOWLP (Fan-out Wafer Level Packages) darstellt, siehe *Abbildung 6*.

Das Bauelement wird auf die Leiterplatte gelötet. Das Antennensignal muss also beim Senden vom Chip über die package-interne Leitungsführung (gelb) und die Lotverbindungen auf die Antennen-Zuleitungen übertragen werden. Im Empfangsfall erfolgt die Übertragung in der umgekehrten Richtung. Dabei treten an den sich ändernden Querschnitten jeweils Impedanzsprünge auf, was zu Signalreflexionen und damit zu Transmissionsverlusten führt. Die Verluste allein an dieser Übergangsstelle werden von HF-Entwicklern mit ca. 1,5 dB angegeben. Konstruktionsbedingt weisen diese Gehäuse hohe thermische Widerstände zwischen Chip und Umgebung auf, wodurch sich die Komponenten im Betrieb erwärmen. Wird die Temperatur zu hoch, muss der sog. Duty cycle, also die Abtastrate des Radarsystems reduziert werden.

Ein optimiertes Radarsystem kann gebaut werden, wenn eine oder mehrere Quellen der beschriebenen Signalverluste oder Frequenzabweichungen optimiert werden.

Ein neuer Ansatz: Die μ^2 Pack-Technologie

Ein neuer technologischer Ansatz verspricht genau die Optimierung vieler der beschriebenen Störquellen. Durch die μ^2 Pack-Technologie können Toleranzen der Leiterdimensionen signifikant reduziert werden. Die Leiterquerschnitte kommen der idealen Form nahe. Rauigkeiten von Leitern werden minimiert. Chipgehäuse werden durch die Einbettung von Nackt-Chips in die Leiterplatte eliminiert, wodurch die Signaldämpfung am Übergang von Zuleitung zu Chip ebenfalls minimiert wird.

Das Verfahren

Die Technologie unterscheidet sich dadurch von der konventionellen Technologie, dass die Antennen nicht negativ geätzt werden, sondern auf galvanischem Weg auf einer dünnen Kupferfolie erzeugt werden. Danach werden die so hergestellten Antennen mit Radar-Frontend Chips bestückt, so dass eine direkte Verbindung von Antenne zum Chip führt, (siehe *Abb. 7*).

In einem nächsten Schritt wird die bestückte Antenne in ein hochfrequenztaugliches Basismaterial einlaminiert. Durch das Entfernen der Kupferfolie wird die Antennenstruktur freigelegt. Da die Antennen eingebettet sind, werden diese nicht durch ein Ätzmedium angegriffen und behalten ihre orthogonale Form. Die Genauigkeit der Antennenstrukturen wird ebenfalls nicht mehr durch den Ätzprozess beeinflusst, daher lassen sich wesentlich geringere Toleranzen von ca. $\pm 2 \mu\text{m}$ erreichen. Zugleich lassen sich sehr feine Strukturen erzeugen, die die Entflechtung von komplexen Anschlussstrukturen in einer Entflechtungsebene unterstützen, (siehe *Abb. 9*).



Abb. 7: Galvanisch erzeugte Antennenstruktur mit bestücktem Chip

Die Vorteile der Technologie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch das Einbetten von Radar-Chips in die Leiterplatte kann die Zuverlässigkeit während Temperaturwechselbeanspruchung erhöht werden
- Die Signale zwischen Antenne und Chip werden an der Kontaktstelle weniger gedämpft als in einer gehäusten Komponente
- Die Verlustleistung des Chips kann durch Embedding leichter abgeführt werden
- Die Toleranzen der Antennengeometrien werden minimiert, was sich positiv auf die Zuleitungsimpedanz sowie das Einhalten der Mittenfrequenz auswirkt
- Rauigkeiten von Treatments werden eliminiert. Die Rauigkeit für die Haftvermittlung der Leiter ist deutlich geringer, dadurch werden Signale weniger gedämpft

Das Einbetten von Antennen und Chips setzt die Verwendung von hochfrequenztauglichen Prepregs voraus. PTFE-basierte Materialien können hierfür nicht verwendet werden. Die besten heute verfügbaren Materialien können noch nicht vollständig mit PTFE-basierten Systemen gleich ziehen, meist sind die dielektrischen Verluste der Materialien noch höher, als die von PTFE-basierten Systemen. Es wird allerdings erwartet, dass die genannten Systemvorteile diesen Nachteil überkompensieren können und die auftretenden Gesamtverluste deutlich geringer sind als in den konventionell hergestellten und bestückten Systemen des Stands der Technik.

Die Technologie wird derzeit im Rahmen eines öffentlich geförderten Projektes untersucht und bewertet. Mit einem Einsatz in Produkten kann ab 2020 gerechnet werden.

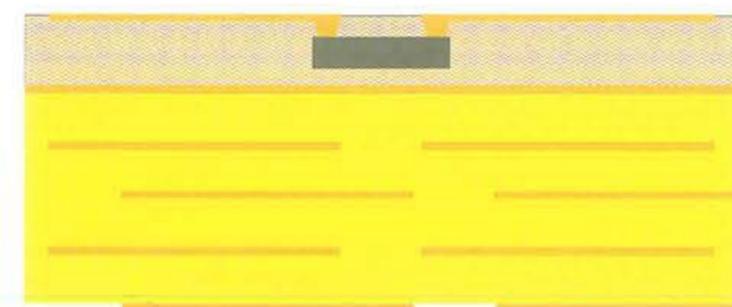


Abb. 8: μ^2 Pack-Antenne mit bestücktem Chip in HF-taugliches Material einlaminiert und zur Hybrid-Schaltung verbaut

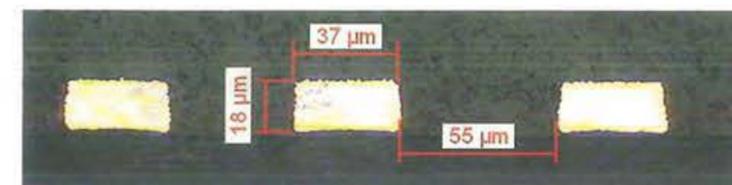


Abb. 9: μ^2 Pack-Antenne im Querschliff mit definierten Leitergeometrien

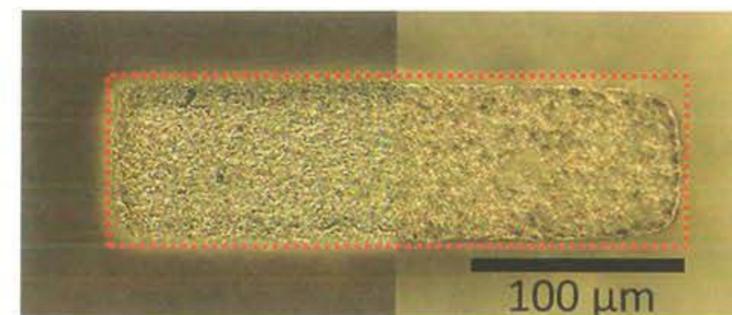


Abb. 10: Aufsicht auf eine Leiterstruktur mit geätzter Geometrie (rechts) und nach Herstellung in μ^2 Pack-Technologie (links)

Literatur

- [1] Gary Breed, High Frequency Electronics: The Fundamentals of Patch Antenna Design and Performance, High Frequency Electronics, March 2009
- [2] John Coonrod, Rogers Corporation: Understanding Circuit Material Performance Concerns for PCBs at Millimeter Wave Frequencies, Proceedings IPC APEX San Diego, 2017
- [3] I.J. Bahl; D.K. Trivedi: A designer's guide to microstrip line, Microwave 16-5, 1977
- [4] Helmut Kröner; Alexander Ippich, Isola AG: Influences of laminate and PCB Manufacturing tolerances on patch antenna and feed network characteristics, Proceedings EIPC Winter Conference Salzburg, 2017
- [5] John Coonrod, Rogers Corporation: Choosing Circuit Materials for Millimeter Wave Applications, High Frequency Electronics, July 2013