3D-Druck für hochfrequenztechnische Anwendungen

Der 3D-Druck wurde mittlerweile zur Schlüsseltechnologie für moderne Fertigungsverfahren entwickelt, welche die zukünftige industrielle Fertigung revolutionieren sollte.

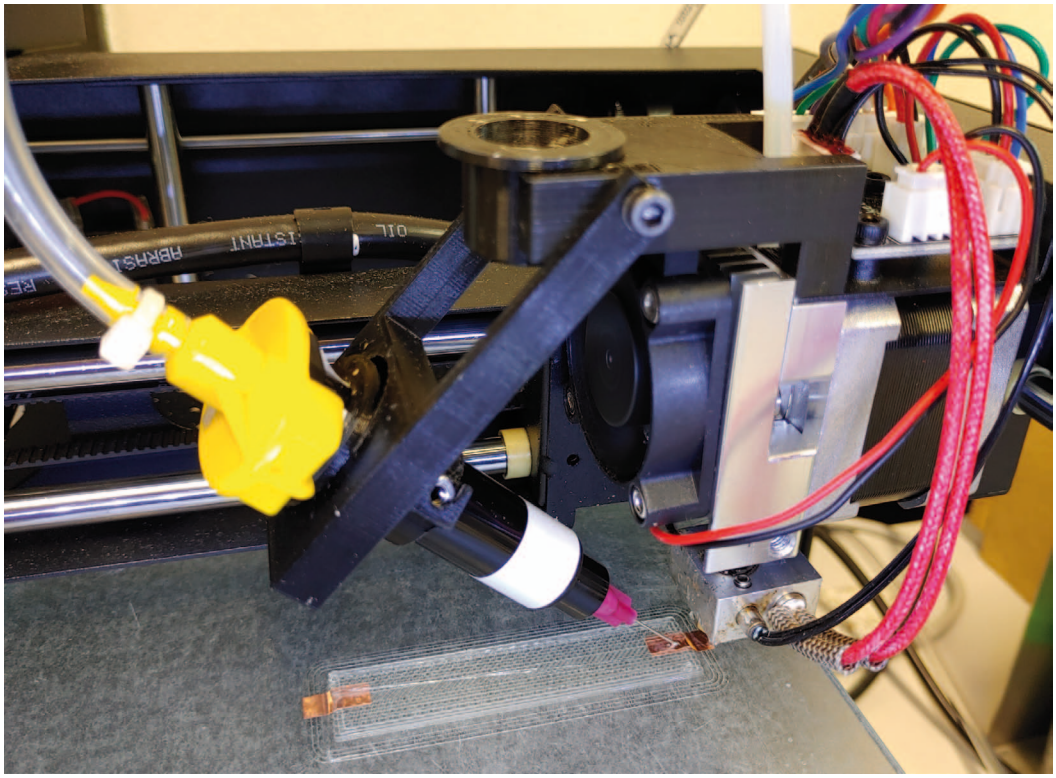


Bild 1: Versuchsaufbau des neuen Druckverfahrens

Autoren:
Prof. Rainer Kronberger, Prof. Stefan Grünwald, Volker Wienstroer, Andre Büter, Vincent Tsatsos, alle Technische Hochschule Köln,
Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. Rainer Kronberger,
Labor für Hochfrequenztechnik/Institut für Nachrichtentechnik,
www.hf-lab-koeln.de/
www.th-koeln.de

Die Herstellung von planaren Leitungsstrukturen oder Antennen für Hochfrequenz- und Mikrowellenanwendungen erfolgt üblicherweise mit gängiger Leiterplattentechnologie. Dies ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Fertigung, gleichzeitig verbunden mit einer angemessenen Flexibilität bei Strukturänderungen. Moderne Rapid-Prototype-Systeme ermöglichen mittlerweile die rasche Herstellung solcher Platinen für Entwicklungszwecke und sind deshalb sehr beliebt bei Entwicklungsabteilungen und Forschungseinrichtungen.

Vorteile mit 3D

Insbesondere für Antennen besteht oft die Notwendigkeit, auch dreidimensionale Strukturen einfach und schnell herzustellen. Für rein mechanische Anwendungen und daraus abgeleitet auch für viele andere Technologie- und Lebensbereiche hat sich zur Lösung vielfältiger Probleme hieraus der 3D-Druck (Additive Fertigung oder auch Additive Manufacturing), mittlerweile zur Schlüsseltechnologie für moderne Fertigungsverfahren entwickelt, welche die zukünftige industrielle Fertigung revolutionieren wird.

Damit ist es naheliegend, derartige Methoden auch für die Entwicklung elektronischer Produkte und Baugruppen (printed electronics) einzusetzen. Dies wird getrieben durch Industrie 4.0, das Internet of Things (IoT) und die neuen 5G-Mobilfunktechnologie, verbunden mit der permanent steigenden Nachfrage nach immer kleineren, smarten Produkten.

Wissenschaft und Industrie arbeitet deshalb weltweit an innovativen Lösungen neuartiger additiver Fertigungsverfahren zur Integration elektronischer Bauteile, Antennen, Leiterbahnen und Anschlüsse in elektrisch nichtleitende Trägerstrukturen oder Gehäuseteile, s. z.B. [1] bis [3].

Der Druck elektrisch leitender Strukturen auf oder in diese Gehäuseteile ist momentan aber noch sehr aufwändig und kompliziert (z.B. Materialkosten, Sinterprozess zur thermischen Nachbehandlung etc.). Somit besteht ein hohes Interesse der Industrie, verbunden mit viel Entwicklungspotenzial, zur Realisierung eines einfachen, schnellen und kostengünstigen Verfahrens für die additive Fertigung mit synchroner Herstellung leitender Strukturen auf sowie in nichtleitenden Trägermaterialien zur Anbindung an Elektronikmodule.

Vereinfachen und reduzieren

Bei der Betrachtung aktueller Verfahren stehen vor allem die

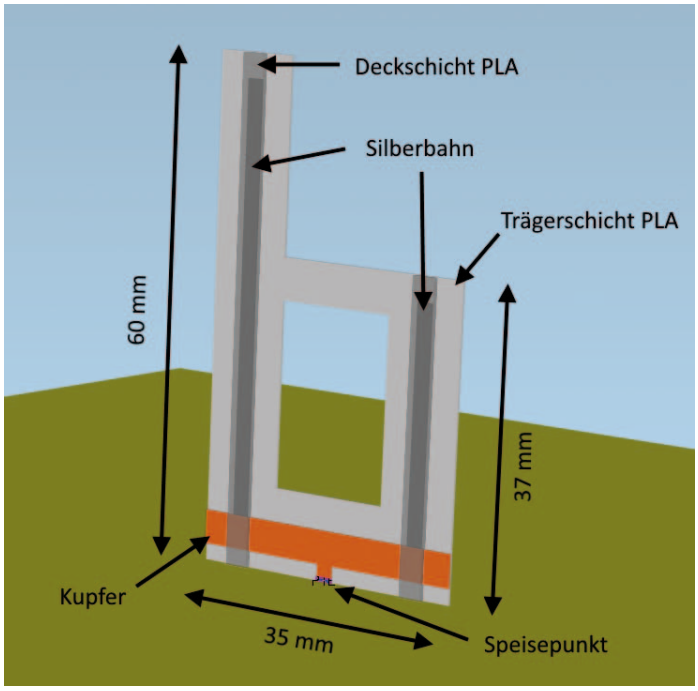


Bild 2: Simulationsmodell der planaren Antenne, auf PLA gedruckt

Vereinfachung des Gesamtprozesses und die Reduzierung der Prozessdauer im Vordergrund. Diese Herausforderung ist durch die thermische Nachbehandlung, die bei leitfähigen Strukturen oftmals erforderlich ist, und den damit in Verbindung stehenden Prozessschritten jedoch nur schwer zu realisieren. In Anbetracht dessen hat ein Team der Technischen Hochschule Köln eine Lösung entwickelt, die thermische Nachbehandlung und die additive Fertigung zu vereinen. Mit einem handelsüblichen 3D-Drucker wird in zunächst gewohnter Weise das nichtleitende Trägermaterial aufgebracht und dabei nahezu gleichzeitig auch an gezielten Stellen des Druckteils eine leitfähige Paste ein- bzw. aufgebracht, welche normalerweise thermisch nachbehandelt werden müsste.

Thermische Nachbehandlung

Übliche Herangehensweisen zur thermischen Nachbehandlung basieren bislang auf Heiz- und UV-Strahlern, Infrarot-Systemen, Öfen oder anderen externen Wärmequellen. Im hier vorgestellten Prozess besteht bei der Verwendung der FDM-Technologie als additives Fertigungsverfahren nun die Möglichkeit, gleichzeitig die vorhandene Wärmeenergie des verdruckten Materials, d.h. Filaments zur Nachbehandlung zu verwenden. Dabei muss gewährleistet werden, dass die leitfähige Tinte oder Paste direkt im Bereich der Extruderdüse zugeführt wird. Die thermische Nachbehandlung erfolgt demnach unverzüglich durch die Wärmeübertragung durch das heiße Filament, wodurch die leitfähige Klebepaste unmittelbar ausgehärtet wird.

Leiterstrukturen können damit integrativ in den schichtartigen Aufbau eines Gehäuses oder einer Trägerstruktur eingebracht werden. Irreversible Verformungen sowie Strukturschäden durch einen überhöhten nachträglichen externen Wärmeeintrag können somit vermieden werden. Darüber hinaus entfällt weiterhin die Entnahme des gedruckten Bauteils während des Aufbauprozesses, wodurch die Fehleranfälligkeit hinsichtlich der geforderten Geometrie signifikant reduziert wird.

Der mechanische Aufbau umfasst als Hauptkomponente einen FDM-Drucker, an dem der Nadeldispenser im direkten Umfeld der auf ca. 200 °C temperierten Extruderdüse angebracht ist (Bild 1). Weiterhin verfügt der Aufbau eine separat angebundene Druckluft-Kühleinheit, wodurch die vorzeitige Sinterung der leitfähigen Flüssigkeit im Nadeldispenser vermieden wird

Diese Erweiterung der klassischen FDM-Technologie durch ein separates Dosiersystem eröffnet damit Möglichkeit, auch innenliegende leitfähige Strukturen in jeder Schicht des Bauteils zu erstellen. Komplexe Bauteilgeometrien mit zusätzlichen elektronischen Funktionen, beispielsweise in Form von Antennen, Leiterbahnen, Abschirmungen oder anderweitigen Sensorstrukturen können somit in einem Schritt multifunktional hergestellt werden.

Anwendungsbeispiele

Vorteilhafte Anwendungen des Verfahrens findet man z.B. in der Hochfrequenztechnik zur Herstellung von integrierten Antennen. Aufgrund der permanent ansteigenden Forderung nach Vernetzung und Kommunikation in nahezu unbegrenzte Weise und täglich neuen Anwendungsfällen, steigt damit gleichzeitig der Bedarf an Elektronik und Kommunikationsmodulen, verbunden mit der Notwendigkeit von integrierten Antennen und Leiterstrukturen. Derartige Antennen sind bereits jetzt oftmals kostengünstig als gedruckte Leiterstrukturen auf der vorhandenen Leiterplatte ausgeführt. Immer öfters erfordern die technischen Anforderungen allerdings Antennen, die randnah oder dreidimensional ausgeführt werden müssen. Stand der Technik sind hierbei durch Galvanisieren oder Gasphasenabscheidung (vapor deposition) auf Kunststoffkörpern aufge-

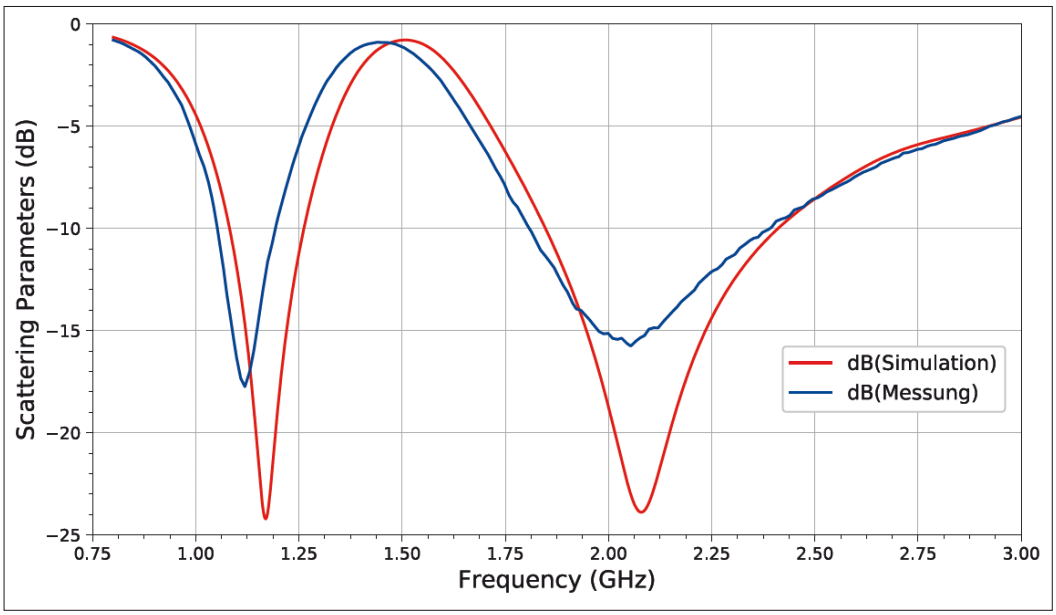
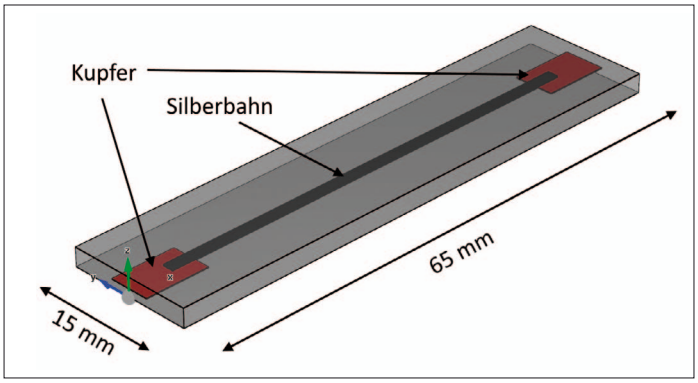


Bild 3: Messung und Simulation der gedruckten Antenne



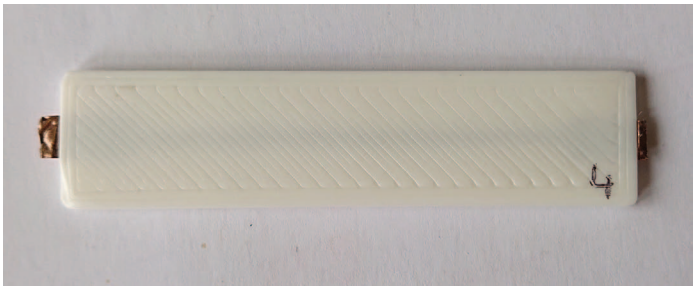


Bild 4: In PLA integrierte Leiterbahn

brachte, metallisierte Antennenleiter oder -flächen, was fertigungstechnisch natürlich erst für Großserien rentabel ist [3].

Der Weg zum endgültigen Produkt ist aufgrund ihrer komplizierten Wirkungsweise allerdings meist sehr aufwändig und vergleichsweise teuer. EM-Simulationen unterstützen mittlerweile hierbei deutlich, es führt aber oft kein Weg an handgefertigten Metall- oder Drahtstrukturen vorbei. Der Antennenentwickler würde sich deshalb gleichermaßen wie sein Kollege aus der mechanischen Entwicklungsabteilung eine geeignete FDM-Technologie zur Herstellung von Antennenprototypen wünschen, was insbesondere die erste Entwicklungsphase einer Antenne erheblich beschleunigen würde.

Mit dem oben genannten Verfahren wurde deshalb erstmalig beispielhaft eine einfache Antennenstruktur für zwei Frequenzbänder realisiert.

Für eine Multibandantenne bei 1,15 und 2,1 GHz wurden zwei elektrische leitende Antennenelemente mit jeweils 51 und 28 mm Länge im Abstand von 25 mm planar auf eine PLA-Schicht mit 0,3 mm Höhe aufgedruckt (Bild 2). Fertigungstechnisch erfolgte dies mit einem sehr kostengünstigen 3D-Drucker (Preisklasse <200 Euro), welcher um die oben aufgeführte Nadeldispenser-Einheit erweitert wurde. Zunächst erfolgte die teilweise Herstellung der PLA-Trägerstruktur im konventionellen Druckverfahren mit schnellem Vorschub. Die Erzeugung der leitfähigen Antennenelemente geschah dann durch quasigleichzeitiges Auftragen der PLA-Schicht aus der Druckerdüse und der leitfähigen Kleberpaste über die Dispensereinheit, allerdings mit deutlich reduzierter Druckgeschwindigkeit. Die Breite der Antennenbahnen beträgt ca. 2 mm, die Höhe ca. 0.7 mm. Zur späteren Kontaktierung der Antennenelemente wurde zwischen den beiden Prozessschritten noch manuell Kupferfolie eingelegt, auf welche die Strahler 5 mm überlappend gedruckt wurden.

Die Kleberpaste wurde während des Druckvorgangs durch die anfallende Prozesswärme automatisch und nahezu vollständig gesintert, so dass eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit (ca. 105 S/m) bei den Strukturen erzielt werden konnte. Ein niedriger Leitungswiderstand ist wichtig, da dieser wesentlich den Antennenwirkungsgrad (Effizienz) bestimmt.

Anschließend wurde die so realisierte Antenne messtechnisch hinsichtlich ihrer Strahlungseigenschaften untersucht und mit einer elektromagnetischen Simulation verglichen. EM-Simulationen erfordern ähnlich wie bei mechanischen Simulationen zunächst eine feine Diskretisierung des Antennenmodells, um hierfür anschließend mithilfe numerischer Verfahren die Lösungen der elektromagnetischen Randbedingungen (Maxwelsche Gleichungen) zu finden. In dem speziellen Fall des 3D-Druckverfahrens sind die Anforderungen an die Modellierung nochmals höher: Die Materialeigenschaften sowie die Schichtübergänge müssen sehr fein aufgelöst werden, um die elektrotechnischen Eigenschaften exakt zu modellieren. Die EM-Simulationen wurden daher mit dem hierfür speziell geeigneten, leistungsfähigen Programm Empire XPU der IMST-GmbH in Kamp-Lintfort durchgeführt.

Ergebnis

Unter Berücksichtigung der relevanten Materialparameter von Trägerstruktur und Kleber konnte damit im Frequenzbereich bis 3 GHz eine ausgezeichnete Übereinstimmung bei den Impedanzen zwischen Simulation und Messung erzielt werden, verdeutlicht durch die Werte der jeweiligen Rückflussdämpfungen in Bild 3. Erfreulicherweise wiesen die Leiterstrukturen nur geringe Verluste auf. Effizienzmessungen lieferten bei beiden Resonanzfrequenzen eine nahezu 90%-ige Abstrahleffizienz, was für eine gedruckte Antenne einen ausgezeichneten Wert darstellt [4].

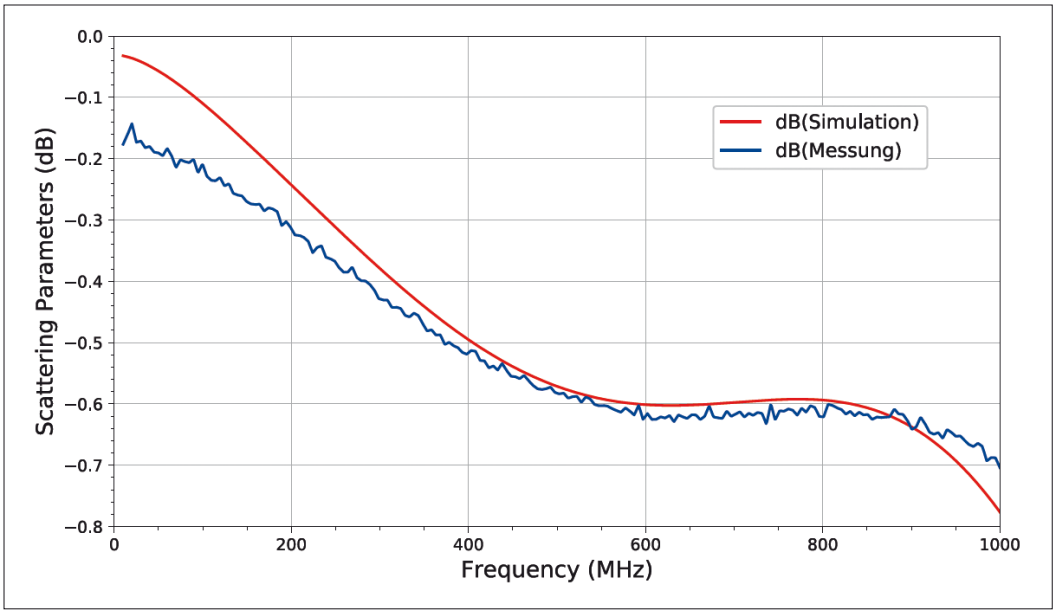


Bild 5: Vergleich Simulation und Messung der Leitung

Die in allen Bereichen guten Übereinstimmungen zwischen der Simulation und der Messung sind hierbei von wesentlicher Bedeutung, da hierdurch eine Antennenentwicklung im ersten Schritt nur Mittels Simulation durchgeführt werden kann, mit der Aussicht auf eine zuverlässige Umsetzung in die Wirklichkeit mit Hilfe des neuen Druckverfahrens. Dies eröffnet neue Wege für die Realisierung hochkomplexer, dreidimensionaler Antennen auf oder in Gehäuseteilen.

Ein weiteres Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der neuen Drucktechnologie ist eine Hochfrequenzleitung auf oder in Isolationsmaterial.

Derartige Strukturen dienen als Standardübertragungsleitungen in Hochfrequenzschaltungen und werden vielfältig bis in den hohen GHz-Bereich eingesetzt. Man unterscheidet hierbei zwischen der Micostrip-Technologie, bei der die Leitung einseitig auf einem Isolationsmaterial (Substrat) aufgebracht ist und der Stripline-Technologie, bei der die Leiterbahn vollständig im Substrat eingebettet ist. Insbesondere eine Stripline-Struktur, die herstellungstechnisch als nicht einfach gilt, lässt sich mit dem neuen Druckverfahren problemlos realisieren.

Hierzu wurde eine ca. 50 mm lange Leitung mit definierter Breite von 1,2 und 0,3 mm Höhe symmetrisch in PLA-Substrat eingedruckt (Bild 4). Vorteilhaft für den Sinterprozess der leitfähigen Kleberpaste ist hierbei die Tatsache, dass durch den strukturbedingten PLA-Druck über die Leiterbahn deren Leitereigenschaften nochmals verbessert wurde, mit einer gemessenen Leitfähigkeit von ca. 3 x 10^5 S/m. Anschließend wurden die Ober- und Unterseite der Trägerstruktur noch mit leitfähiger Folie versehen. Zukünftig soll natürlich auch dies durch einen Druckvorgang erzeugt werden.

Ebenso wie die Antenne wurden auch für diese Struktur eine EM-Simulation mit dem Programm Empire XPU sowie eine Messung durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Der Dämpfungsverlauf der Leitung im Frequenzbereich bis 1 GHz ist in Bild 5 dargestellt. Die hierbei gemessenen Leitungsverluste von 0,6 dB stellen einen akzeptablen Wert dar.

Fazit

Das hier vorgestellte neue FDM-Verfahren ermöglicht die integrierte Herstellung gedruckter Leitungsstrukturen auf Gehäuse- und Trägerteilen. Erste Versuche mit einem einfachen 3D-Drucker mit erweiterter Dosiereinheit verliefen sehr erfolgsversprechend und ermutigen das Team an der TH Köln zur weiteren Ausgestaltung und Verbesserung ihrer neuen Drucktechnologie. Präziseres Drucken feinerer Strukturen, die Realisierung dreidimensionaler Leiterbahnen und der Einsatz eines Roboterarms mit Druckeinheit sind die nächsten Forschungsaufgaben. Insbesondere für Antennen in oder auf Gehäuseteilen eröffnen sich damit neue Wege beim schnellen Prototyping. Auch Abschirmungen und elektrische Verbindungen aller Art (für kleine Ströme) sind damit möglich.

Referenzen

[1] www.allaboutcircuits.com/news/engineers-create-first-double-sided-10-layer-pcb-using-3d-printing

[2] Fraunhofer: www.go-beyond-four-point-zero.de/

[3] M. Liang, et al: “3D printing technology for RF and THz”, in Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2016, Okinawa, Japan, pp. 536 - 537

[4] Kashif N. Paracha et al: Low-Cost Printed Flexible Antenna by Using an Office Printer for Conformal Applications (Article ID 3241581) in Special Issue of International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2018, www.hindawi.com ◄

Fachbücher für die Praxis

Hochfrequenz-Transistorpraxis

Schaltungstechnik, Einsatzprinzipien, Typen und Applikationen

Frank Sichla, 17,5 x 25,5 cm, 278 Seiten, zahlr. Abb. und Tabellen ISBN 978-3-88976-153-8, beam-Verlag 2008, 24,- €
Art.-Nr.:118070

Obwohl heute integrierte Schaltungen die Elektronik dominieren, haben diskrete Transistoren besonders im HF-Bereich noch immer hohe Bedeutung, denn es gibt einfach zu viele Problemstellungen, für die einzig und allein sie die optimale Lösung darstellen.

Diskrete Transistoren sind keineswegs „out“, sondern machen nach wie vor Fortschritte. Mit neusten Technologien werden immer höhere Frequenzen erschlossen sowie erstaunlich geringe Rauschfaktoren erzielt.

Dieses Buch beschreibt die Anwendung der Bipolar- und Feldeffekttransistoren im HF-Bereich, indem es die Schaltungstechnik praxisorientiert erläutert und mit einer Fülle von ausgewählten Applikationsschaltungen für Einsteiger als auch erfahrene Praktiker illustriert.

Aus dem Inhalt:

- Bipolartransistoren
- Die „Bipo“-Grundschaltungen
- Die beliebtesten Schaltungstricks
- „Bipo“-Leistungsverstärker
- FETs im Überblick
- FET-Grundschaltungen
- SFETs, MESFETs und Dualgate-MOSFETs
- Die Welt der Power-MOSFETs
- Rund um die Kühlung
- Transistorschaltungen richtig aufbauen
- Kleinsignal-Verstärkerschaltungen
- HF-Leistungsverstärker
- Oszillatorschaltungen
- Senderschaltungen
- Mess- und Prüftechnik

Unser gesamtes Buchprogramm finden Sie unter www.beam-verlag.de
oder bestellen Sie über info@beam-verlag.de