

Herstellung von EMV-Messantennen mittels 3D-Druck

Prof. Dr.-Ing. Harm-Friedrich Harms, Hochschule Emden-Leer, FBT-E+I

B.Sc. Javad Heidari, University of Tehran

Gabriel Ott, Hochschule Emden Leer, FBT-E+I

Prof. Dr.-Ing. Gavin Kane, Hochschule Emden-Leer, FBT-E+I

1 Einleitung

3D-Drucker finden immer stärker Eingang in die Arbeitswelt. Insbesondere 3D-Drucker für Kunststoffe sind, aufgrund des geringen Preises, heute bereits in vielen Laboratorien und sogar in Büros vorhanden. Zur Erstellung der 3D-Objekte ist eine 3D-CAD-Software notwendig. Für deren Nutzung mussten vor kurzem noch spezielle Workstations beschafft werden. Heute reicht ein guter Desktop-PC aus. Einfache 3D-Modelle lassen sich sogar auf einem Notebook erstellen, wobei ein großes Display bzw. ein großer externer Monitor hilfreich sind. Das 3D-Drucken von optimal angepassten Kunststoffgehäusen, die keinen Standards entsprechen, oder speziellen Befestigungselementen aus Kunststoff ist daher heute Stand der Technik.

Für die Herstellung von 3D-Metallkomponenten werden weiterhin CNC-Fräsmaschinen genutzt, zudem werden vermehrt auch 3D-Metalldrucker eingesetzt. Diese sind wesentlich teurer als 3D-Kunststoffdrucker und daher nur in größeren Firmen der Metallverarbeitung üblich.

Für die Messtechnik im Bereich der Hochfrequenz und EMV werden weitgehend metallische Antennenstrukturen benötigt. Aufgrund des Skin-Effekts ist die Eindringtiefe der Ströme in die Oberfläche des Materials allerdings sehr gering. Bereits bei 1 MHz liegt diese bei Kupfer unter 0,1 mm. Insofern ist es vorstellbar, die benötigten Antennenstrukturen mittels 3D-Druck in Kunststoff zu fertigen und die Oberfläche anschließend zu metallisieren. Dieser Ansatz wurde empirisch verfolgt.

2 Aktuelle Untersuchungen

Es sind vielfältige 3D-Programme verfügbar. Für die Ausbildung der Studierenden der Elektrotechnik an der Hochschule Emden-Leer fiel die Entscheidung zugunsten der Software FreeCAD [1]. Diese Software weist insbesondere den Vorteil auf, dass sie frei verfügbar ist. FreeCAD in der Version 0.17 ist mächtig genug, um den Studierenden die Bewältigung ihrer Aufgaben z.B. im Rahmen von Abschlussarbeiten zu ermöglichen. Dazu gehören üblicherweise die Konstruktion und die Fertigung von speziellen Gehäusen und Fundamenten bzw. Halterungen. Diese Software wurde daher auch genutzt, um die benötigten Antennenmodelle zu konstruieren. Die Einarbeitung der an dem Projekt beteiligten Studierenden verlief erstaunlich schnell.

Neben der Erarbeitung der Software mussten Erfahrungen im Umgang mit 3D-Druckern gesammelt werden. Die ersten Antennenmodelle wurden zunächst zu dünnwandig gedruckt. Aufgrund der mechanischen Belastung und einiger Ungeschicklichkeiten bei der Montage wurden dann einige Modelle beschädigt. Zudem zeigte sich auch teilweise ein leichtes Verziehen der Antennenform durch das Abkühlen. Um weitgehend glatte

Oberflächenstrukturen zu erzeugen, wurde der Druckvorgang mit einer sehr geringen Schrittweite ausgeführt. Auch die Druckgeschwindigkeit galt es zu optimieren, um eine möglichst gute Haftung zwischen den einzelnen Schichten des Drucks zu realisieren. Trotzdem verbleibt eine gewisse Rauigkeit der Oberfläche. Die Metallisierung der Antennen wurde mit einem Metallspray durchgeführt. Nach Fertigstellung des Drucks wurde die jeweilige Antenne zunächst gereinigt und mit Haftgrund beschichtet. Erst dann wurde in mehreren Lagen das Metallspray aufgetragen. Genutzt wurde ein Spray, welches versilberte Kupferpartikel enthält und vom Hersteller für den Auftrag von schirmenden Schichten vertrieben wird.

2.1 Messaufbau



Bild 1: a) Wobbelsender und b) Skalärer Netzwerkanalysator in der EMV-Kabine.

Die Untersuchungen wurden im X-Band, also mit Hohlleitern des Typs R100 durchgeführt. An der Hochschule Emden-Leer wurden zunächst orientierende Messungen in einem vorhandenen Messaufbau durchgeführt. Diese Messanordnung befindet sich in einem normalen Labor der Nachrichtentechnik. Zwei Hornstrahler sind aufeinander ausgerichtet und weisen eine Distanz von ca. 0,7 m auf. Das Sendesignal wurde mit einem Wobbelsender (Bild 1a) auf die Sendeantenne gegeben. Dieser Signalgenerator arbeitet bei einer Frequenz von 8 GHz bis 13 GHz (genau 12,99 GHz). Das Empfangssignal an der 2. Antenne wurde mit einem Skalaren Netzwerkanalysator (Bild 1b) detektiert. Ein metallischer exponentieller Hornstrahler wurde durch unterschiedliche metallisierte Kunststoffantennen nachgebildet und im Messaufbau ersetzt. Es ergaben sich nur geringe Abweichungen zwischen den Vermessungsergebnissen dieser Antennen.

Aufgrund dieser vielversprechenden ersten Tests wurde der Messaufbau optimiert. Die Anordnung wurde in die EMV-Kabine der Hochschule verlegt und die Sende- und Empfangsantenne auf Stativen montiert (Bild 2). Die Distanz für die Messungen wurde auf 2 m erhöht, um sicher im Fernfeld der Antennen zu messen. Die Vollmetallantenne (Bild 2a) wurde als Sendeantenne genutzt und durch unterschiedliche Modellantennen ersetzt. Die Messung des Empfangspegels bei Sendebetrieb mit der Vollmetallantenne wurde als Referenz im Netzwerkanalysator hinterlegt. Alle dargestellten Diagramme stellen somit die Abweichungen zur Referenzantenne dar.

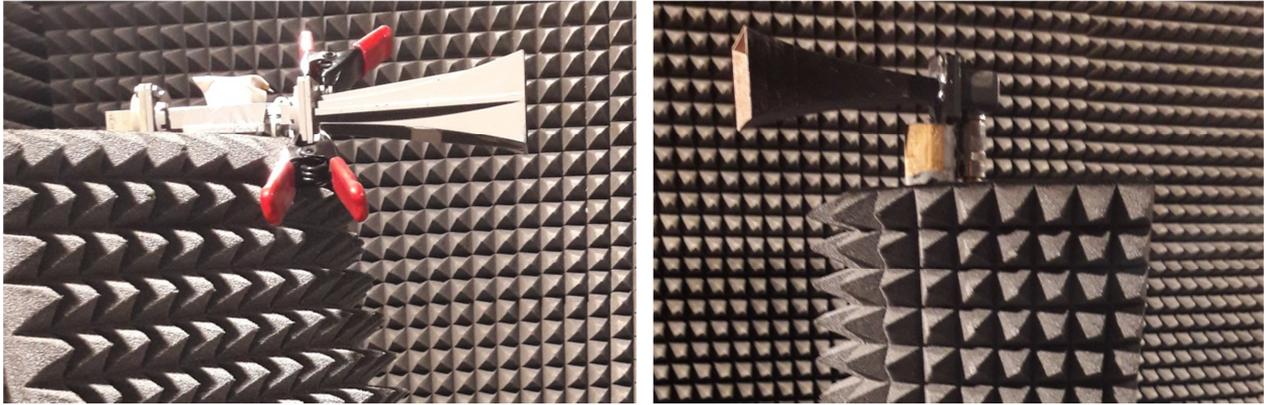


Bild 2: a) Sendeantenne, hier metallische Referenzantenne, und b) Empfangsantenne in der EMV-Kabine.

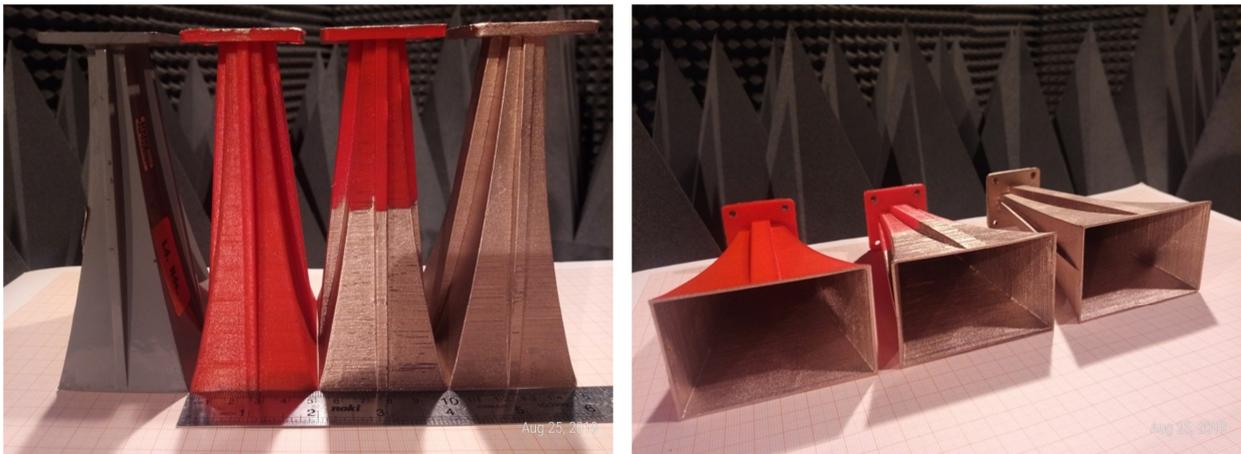


Bild 3: Original Hornstrahler und drei Nachbildungen: a) innenmetallisiert, b) innen- plus außenhalbmetallisiert, c) vollmetallisiert.

2.2 Ergebnisse 1. Antennengeneration

Die ersten Kunststoffreproduktionen erwiesen sich zum Teil als mechanisch nicht ausreichend stabil. Daher wurden im weiteren Verlauf der Untersuchungen auch an den Kunststoffantennen außen ähnliche stabilisierende Rippen angebracht wie an der Originalantenne (Bild 3). In Bild 3 sind drei unterschiedliche Kopien des metallenen Hornstrahlers (grau, Referenzantenne) mit einer Länge von rund 140 mm zu sehen. Es werden im Folgenden lediglich die Messergebnisse an gelungenen Modellen dargestellt.

Die erste Variante der Antenne ist lediglich innen beschichtet (a). Dies sollte für eine Funktion als Antenne ausreichen. Um definierte Kanten am Übergang zum Freiraum zu erzeugen, wurde die zweite zusätzlich außen im Bereich des Randes bis zu einer Länge von rund 2 Wellenlängen metallisiert (b). Die dritte Variante wurde auch außen vollständig metallisiert (c). Bild 4 zeigt den Verlauf des Frequenzgangs der drei Antennenvarianten. Die innenmetallisierte Antenne scheint generell den gleichen Frequenzgang aufzuweisen wie die Originalantenne, sie ist maximal ca. 1 dB schlechter, ist aber bei einigen Frequenzen, wie z.B. 8,2 GHz, 10 GHz oder 11,7 GHz praktisch genauso gut. Interessanterweise weisen die außerteil- und außervollmetallisierten Antennen einen ungünstigeren Verlauf von maximal 1,5 dB unter der Referenzlinie auf.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse für diese auf Kunststoff basierenden Antennen nur unwesentlich schlechter als die der Vollmetallantenne.

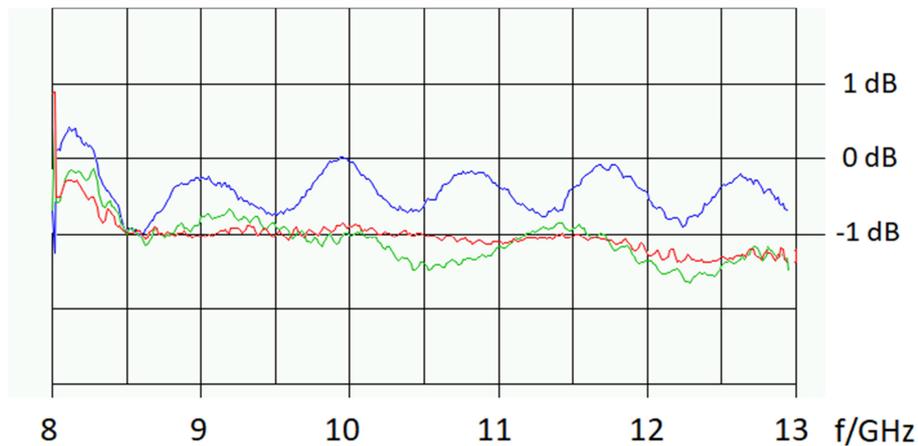


Bild 4: Ergebnisse: Frequenzgang im Vergleich zur Referenzantenne (0 dB-Linie):
a) innenmetallisiert blau, b) innen- plus außenhalb-metallisiert grün, c) vollmetallisiert rot.

Es tauchte die Frage nach Messgenauigkeiten und Reproduktion der Ergebnisse auf. Konkret: Wie groß ist der Einfluss von Abweichungen während der Montage der jeweils zu untersuchenden Antennen. Daher wurde nach jedem Prüfling wiederum die Referenzantenne montiert und de facto mit sich selbst verglichen. Idealerweise dürfte das Diagramm gemäß Bild 5 lediglich eine Linie bei 0 dB zeigen. Dies ist mit guter Näherung erfüllt, die maximale Abweichung liegt bei ca. 0,3 dB.

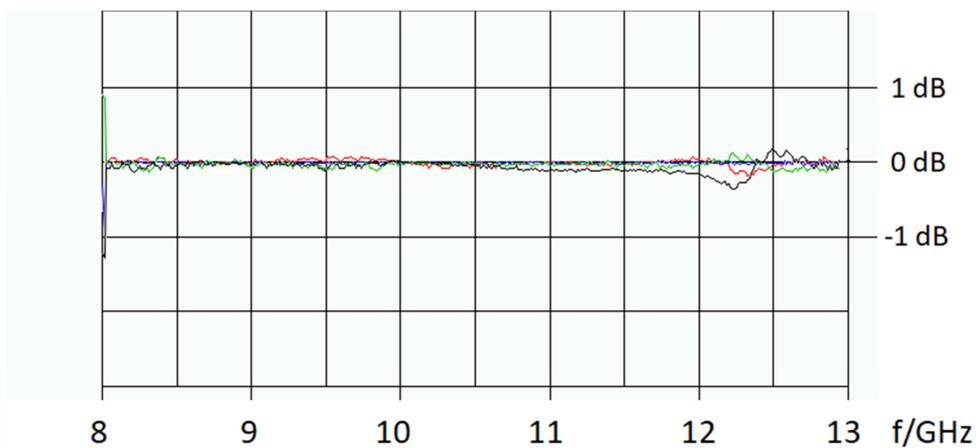


Bild 5: Vergleich des Frequenzganges der metallischen Referenzantenne mit der gespeicherten Referenzkurve zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der 1. Messkampagne.

2.3 Ergebnisse 2. Antennengeneration

Es wurden weitere Schritte zur Optimierung unternommen. Der exponentielle Verlauf der Aufweitung des Hohlleiters zum Horn wird über Stützstellen realisiert. Die Annäherung an die Exponentialfunktion erfolgt über Geradenstücke. Für die 1. Generation von Antennen wurden die Stützstellen in 10 mm Abstand gewählt. Um eine bessere Annäherung an die Exponentialfunktion zu erzielen, wurde für die

2. Generation ein Abstand von 1 mm gewählt (Bild 6a). Zudem wurde darauf geachtet, dass der Flanschbereich möglichst stabil ausgeführt und glatt gedruckt wird (Bild 6b).

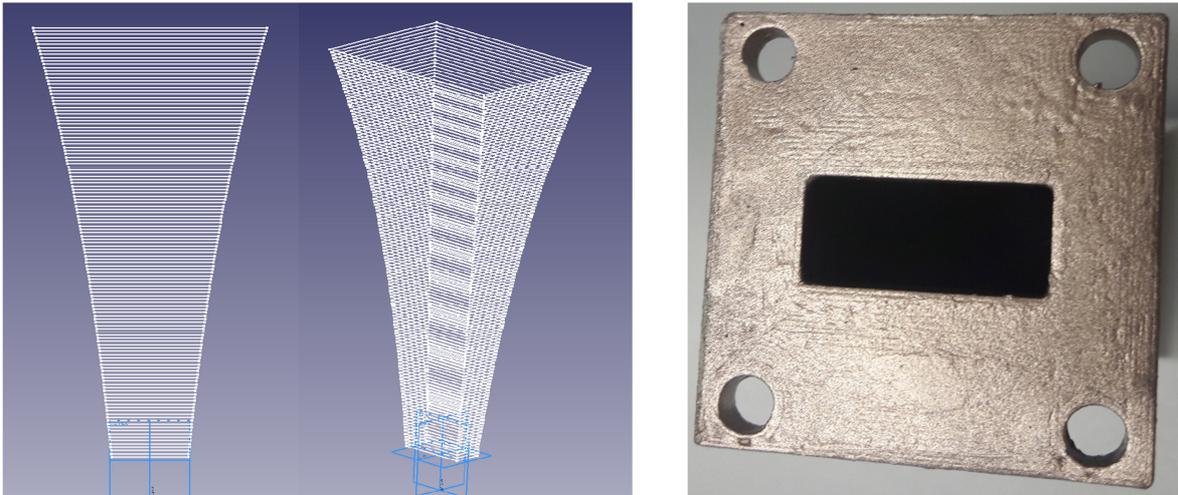


Bild 6: a) Grid-Modell des verfeinerten exponentiellen Trichtermodells in FreeCAD, b) Flanschbereich einer metallisierten Antenne.

Zur mechanischen Stabilisierung der Antennenform wurde die Außenseite des Hornstrahlers nunmehr kegelförmig ausgeführt. Daraus resultiert, dass die Wandstärke im Bereich des Flansches am größten ist. Zur Öffnung hin wird sie immer geringer. Bild 7a zeigt die Außenansicht des FreeCAD-Modells. Bild 7b zeigt ein Modell, welches aufgrund der Vorlage nach 7a gedruckt wurde.

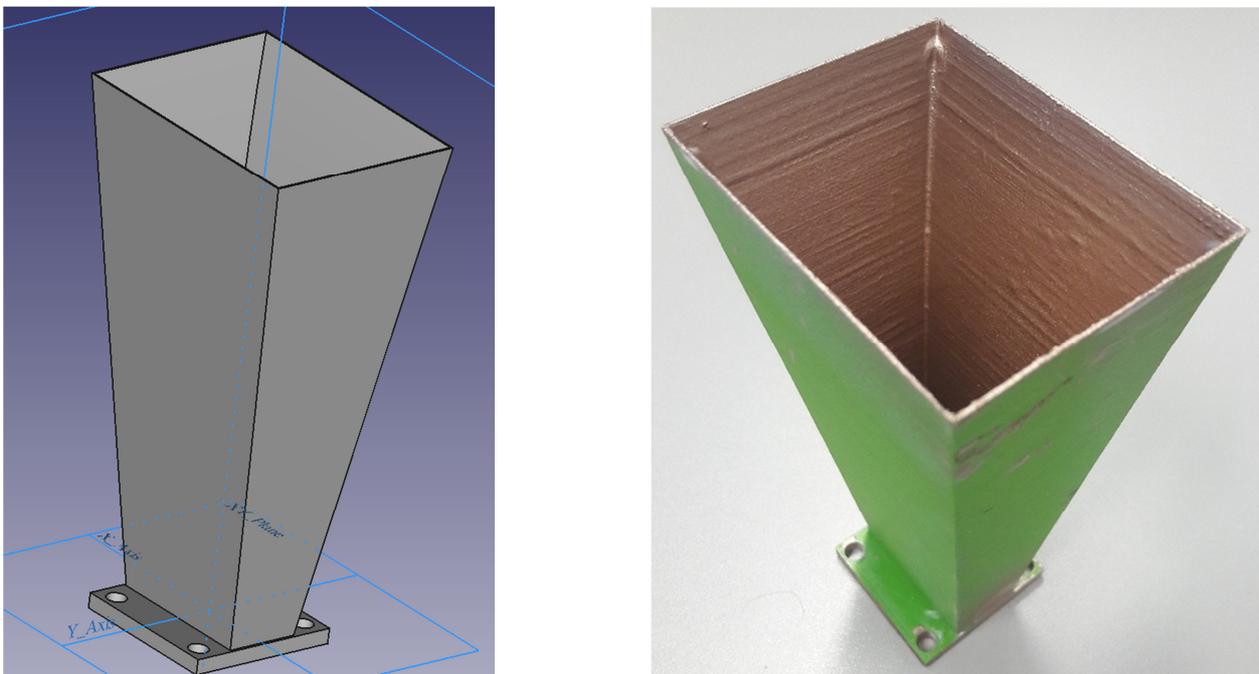


Bild 7: a) Außenansicht des Modells des verfeinerten exponentiellen Trichtermodells in FreeCAD, b) Außenansicht des besten gedruckten Modells gemäß 7a).

Aufgrund der höheren Auflösung des exponentiellen Innenverlaufs wurde eine bessere Annäherung der Messergebnisse an die der originalen Antenne erwartet. Erste Resultate konnten dies jedoch nicht belegen. Die Ergebnisse waren zunächst schlechter als mit dem besten Antennenexemplar der 1. Generation. Es zeigte sich, dass die Art der Bearbeitung und die Qualität der Beschichtung für die späteren Messergebnisse die entscheidende Rolle spielt.

Bild 8 zeigt die Messergebnisse der 2. Generation von Antennen. Zum Vergleich repräsentiert die schwarze Linie die besten Messergebnisse der 1. Generation.

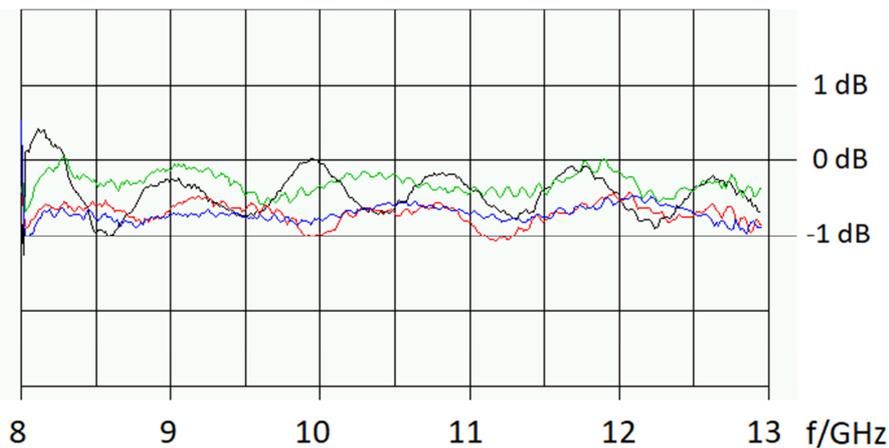


Bild 8: Ergebnisse: innenmetallisiert (a) schwarz, weitere formoptimierte Antennen in rot, blau und grün

Die blaue, die rote und die grüne Linie stehen für unterschiedliche Modelle. Die blaue Kurve wurde für eine innen und außen beschichtete Antenne gemessen, die rote Kurve steht für ein Antennenmodell das nur innen beschichtet wurde. Die besten Messergebnisse, grüne Linie, ergaben sich für die Antenne gemäß Bild 7b. Diese Antenne wurde ebenfalls ausschließlich innen beschichtet, die Metallisierung wurde zweimal aufgetragen. Auch für diese Untersuchungen wurde die Referenzantenne zwischenzeitlich immer wieder montiert, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu verifizieren (Bild 9).

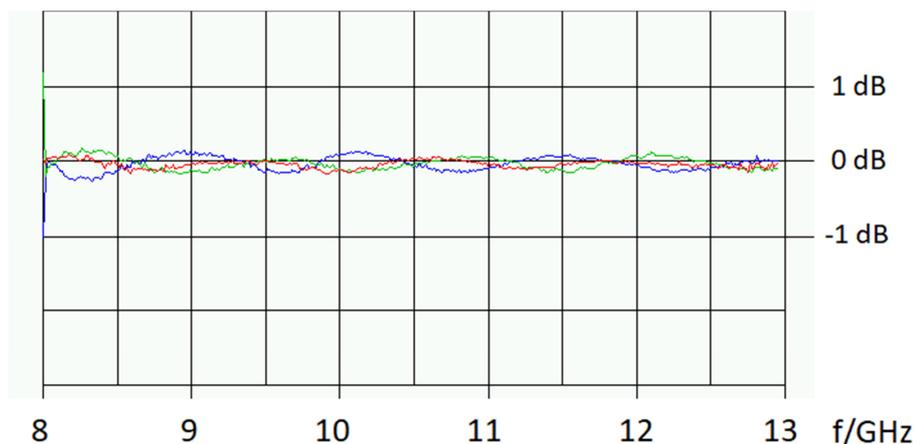


Bild 9: Vergleich des Frequenzganges der metallischen Referenzantenne mit der gespeicherten Referenzkurve zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Messkampagne 2.

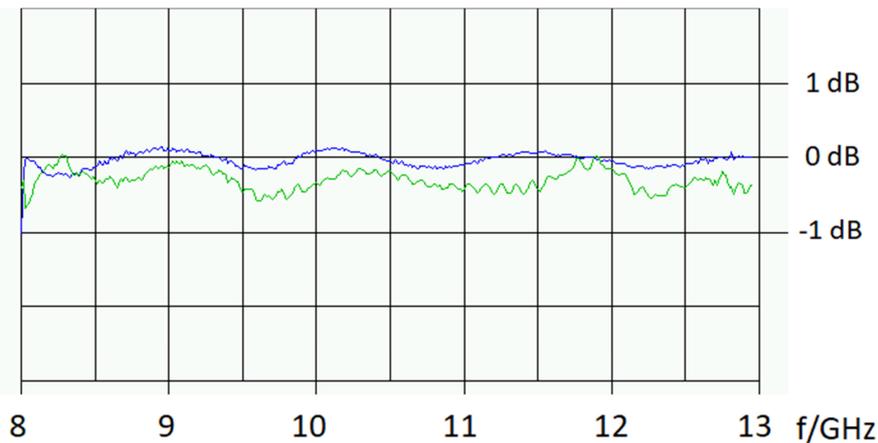


Bild 10: Beste optimierte Antenne (grün), größte Abweichung der Messung der Referenzantenne (blau).

Die Zusammenfassung der entscheidenden Messergebnisse findet sich in Bild 10. Die blaue Kurve zeigt die größte Abweichung der Messungen der Referenzantenne mit sich selbst während der 2. Messkampagne. Diese repräsentieren die Reproduzierbarkeit der Messungen. Die grüne Linie gibt die Messergebnisse des besten Nachbaus der Metallantenne an. Es handelt sich dabei um die Antenne gemäß Bild 7a. Bezüglich der Referenzlinie 0 dB kann man davon ausgehen, dass diese Antenne maximal um 0,5 dB schlechter ist als die Metallantenne.

3 Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war es zu ergründen, ob mittels Metallspray metallisierte Hornantennen in ihren Eigenschaften denen aus Metall gleichwertig sind. Als Vorbild wurde eine metallische Antenne als Referenz genutzt. Es konnte gezeigt werden, dass zumindest im Bereich der Zentimeterwellen die Herstellung von Hornantennen mittels 3D-Kunststoffdrucks möglich ist. Die Metallisierung erfolgte mittels eines Sprays, welches versilberte Kupferpartikel enthält. Die so hergestellten Antennen zeigen vergleichbare Eigenschaften wie Antennen, die aus Metall gefertigt wurden. Als Maß für die Qualität der erstellten Antennen wurde der Antennengewinn herangezogen. Der gemessene Gewinn der metallisierten Kunststoffantennen wurde im ungünstigsten Fall mit ca. 0.5 dB geringer als der des vollmetallischen Originals ermittelt. Dabei kann von einer Messgenauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit von ca. 0,2 dB ausgegangen werden. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, dass die Qualität der Beschichtung den größten Einfluss auf den Gewinn der Antennen hat. Im Innern des schlanken Hornes ist das Metallisieren schwierig. Insofern sollten weitere Verfahren, wie z.B. ein galvanisieren der Oberfläche zur Beschichtung untersucht werden. Da die meisten Modelle mit ihren Messergebnissen weniger als ein Dezibel vom Original abweichen, sind dabei Aufwand und Nutzen gegeneinander abzuwägen

Das dargestellte Vorgehen eröffnet nicht nur die Möglichkeit spezielle Antennen direkt zu fertigen. Es kann insbesondere auch im Entwicklungsprozess für professionelle Antennen eingesetzt werden. Als erstes werden die theoretische Überlegungen für einen neuen Antennentyp mittels adäquater Simulationssoftware hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Eigenschaften geprüft und optimiert. Um diese Simulationsergebnisse zu verifizieren, lässt sich in einem zweiten Schritt mittels 3D-Kunststoffdruck sehr schnell und preiswert ein erstes Versuchsmuster erstellen. Danach

kann dann die Serienfertigung aus Metall oder weiterhin mit beschichtetem Kunststoff erfolgen.

Für den dauerhaften Einsatz solcher Antennen ist die langfristige Verbindung zwischen den Materialien und ggf. die Korrosionsbeständigkeit zu prüfen. Offen bleibt insbesondere die Frage der Kalibrierung der so erzeugten Antennen. Dies wäre aber bei metallischen Antennen aus eigener Fertigung ebenfalls der Fall. Richtdiagramme konnten derzeit noch nicht gemessen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Diagramme der Nachbauten zumindest für die Hauptkeule dem Original entsprechen. Im Bereich der Nebenkeulen könnten sich ggf. die abweichenden Ausführungen der vorderen Kanten des Hornstrahlers und auch die Weite des beschichteten Bereiches auswirken.

Es ist geplant, in weiteren Projekten auch andere Antennenstrukturen als nur einfache Hornstrahler und Hohlleiterkomponenten mittels 3D-Kunststoffdruck zu erstellen.

Literatur

[1] <https://www.freecadweb.org/index.php>, Version 0.17