

# **Transferdämpfung eines Flugzeughangars und Einflüsse auf Nachweis von Störfestigkeit und Störaussendung**

Dipl.-Ing. Jens Schüür, TU Braunschweig, Institut für EMV,  
Dipl.-Ing. Alexander Küllmer, TU Braunschweig, Institut für EMV,  
M. Sc. Rafael Rennó Nunes, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Flugsystemtechnik, Braunschweig

## **1. Einleitung**

Elektromagnetische Untersuchungen an vollständigen Flugzeugen lassen sich aufgrund des hohen Platzbedarfs moderner Flugzeugtypen wie Airbus A380 oder Boeing 747-8 nicht in Absorberhallen durchführen und müssen deshalb in der Regel im Freien oder in einem Flugzeughangar erfolgen. Dabei ist insbesondere bei Messungen im Freien keine Entkopplung zur elektromagnetischen Umgebung vorhanden. Dies führt bei dem Nachweis der Störfestigkeit des Flugzeugs nach Modifikationen zu Schwierigkeiten. Es ist davon auszugehen, dass die für die Zertifizierung in den Normen geforderten hohen Prüffeldstärken bzw. die hierfür benötigten hohen Sendeleistungen nicht von der zuständigen Regulierungsbehörde genehmigt werden, da eine Beeinflussung der umgebenden Funkdienste nicht ausgeschlossen werden kann. Umgekehrt sind von dieser Problematik auch Störaussendungsmessungen an einem Flughafen betroffen, an welchem sehr viele aktive Funk- und Navigationsdienste zu finden sind. Weiterhin werden zivile Funkdienste im Spektrum gemessen, wie beispielsweise GSM, UMTS und WLAN. Diesen und nicht dem zu untersuchenden Flugzeug werden viele Spitzenwerte des gemessenen Spektrums zugeordnet werden müssen.

Eine mögliche Alternative ist, die Messung in einem Flugzeughangar durchzuführen. Insbesondere bei dem Nachweis der Störfestigkeit wird dieses als vorteilhaft angenommen, da bei der Zuteilung der Testfrequenzen die genehmigten Leistungen aufgrund der zusätzlichen Dämpfung des Hangars höher sein können. Bei Störaussendungsmessungen innerhalb eines Hangars wird der Vorteil der Entkopplung von der Außenwelt durch Beeinflussung der Messung erkaufte: Zum einen können elektrische Installationen und Geräte innerhalb des Hangars ebenfalls Hochfrequenz abstrahlen. Aus diesem Grund sollte, wenn möglich zeitgleich zur Störaussendungsmessung im Flugzeug, eine Messung des Grundrauschens im Hangar durchgeführt werden. Zum anderen können die innerhalb des Hangars reflektierten Wellen die Messungen beeinflussen.

## **2. Bestimmung der Schirmdämpfung des Hangars**

Die Messung der Schirmdämpfung ist eine etablierte Messaufgabe in der EMV, jedoch wird die Messung bei großen Objekten oder bei großen Entfernungen (zwischen denen die Dämpfung erfasst werden soll) anspruchsvoll, wenn eine hohe Genauigkeit und eine kurze Messzeit angestrebt werden. Die Dämpfung beispielsweise von einer Antenne im

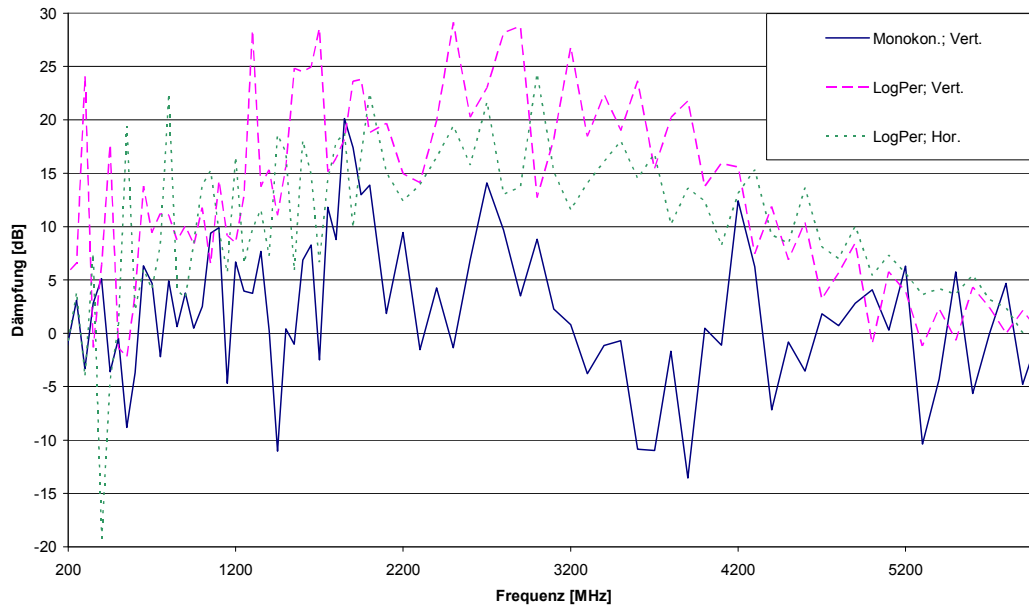
Flugzeuginneren zu Antennen der Flugzeugsysteme ist noch relativ einfach mithilfe eines Vektor-Netzwerk-Analysators (VNA) zu messen [1]. Bei sehr hohen Dämpfungswerten muss dies beim Messaufbau berücksichtigt werden [2], beispielsweise durch Wahl besonders gut schirmender Kabel und Steckverbindungen. Grundsätzlich ist auch diese Messung mit einem VNA möglich. Bei größeren Entfernungen zwischen Sender und Empfänger, wie beispielsweise bei Messung der Dämpfung der Flugzeughülle [3], muss zwischen Signalerzeuger und Messempfänger ein Abstand von knapp 50 m eingehalten werden. Ein VNA kann hier nicht zum Einsatz kommen, da das Koaxial-Kabel die Schirmung der Flugzeughülle durchbricht und gleichzeitig die Kabelstrecken zu lang werden: Die Kabelschirmung ist nicht ausreichend und die Dämpfung im Kabel zu groß bei Frequenzen im GHz-Bereich. Das bislang genutzte Verfahren, in dem die Haltezeit des Messsenders ( $> 10$  s pro Frequenz) auf die Durchlaufzeit des Messempfängers ( $< 10$  s pro Durchlauf) abgestimmt ist, wird in [3] ausführlich beschrieben. Das dort genutzte Verfahren hat aber den Nachteil, dass der zeitliche Aufwand groß ist. Eine direkte Ansteuerung von Sender und Empfänger verkürzt die Messzeit auf ca. 2 s pro Frequenzpunkt. Dafür wurde der Messempfänger über Netzwerk (rotes Kabel in Bild 1) parametrisiert und ausgelesen. Dieses schnellere Verfahren wird für die folgenden Messungen genutzt. Die Dämpfung des Flugzeughangars wird zum einen mit rund strahlenden monokonischen Antennen, zum anderen mit gerichteten Log-Per Antennen gemessen. Damit lässt sich der Einfluss von Reflexionen des Hangars bestimmen. Gleichzeitig müssen jeweils Referenzmessungen an gleicher Position oder mit äquivalenter Entfernung aufgenommen werden, um die reine Dämpfung des Hangars entfernungsunabhängig bestimmen zu können. Für die Messungen stand der A320 Hangar des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt in Braunschweig zur Verfügung.



**Bild 1:** Antennenposition „geöffnetes Tor“ mit monokonischen Prüfantennen, Vertikal

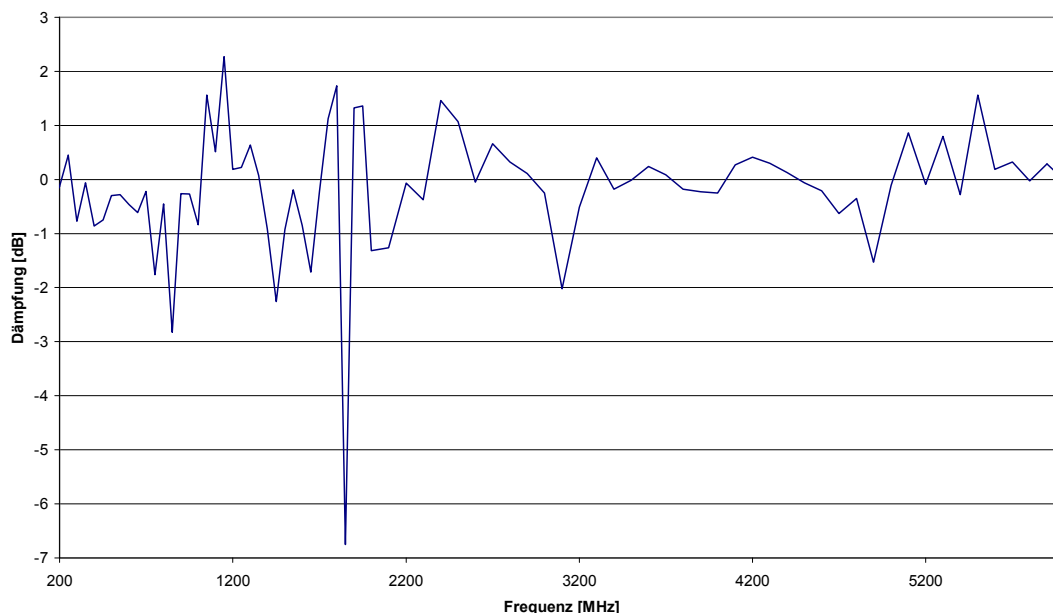
Im Frequenzbereich von 200-6000 MHz wurden 77 Frequenzpunkte in beiden Polarisationen (Horizontal/Vertikal) vermessen. Bild 2 zeigt die resultierende Dämpfung des großen Hangar-Tores. Dies besteht im Wesentlichen aus Glas-Fensterflächen mit einem tragenden Stahlgerüst. Es ist zu erkennen, dass die Polarisation nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat und die Wahl der Antenne der bestimmende Faktor für die resultierende Dämpfung ist. Die Dämpfung kann bis zu 29 dB betragen. In eini-

gen Frequenzbereichen ist die Dämpfung bei Messung mit der monokonischen Antenne allerdings negativ, was einer verstärkenden Wirkung entspricht. Rückreflexionen aus dem Inneren des Hangars können hierfür die Ursache sein.



**Bild 2:** Dämpfung des großen Hangar-Tores

In dem Hangar-Tor ist eine Schiebetür („Traktortor“) verbaut, durch die ein PKW in den Hangar fahren kann. Bild 3 zeigt die Differenz der Dämpfung, wenn die kleine Schiebetür geöffnet wird. Die Änderung ist minimal, auffällig ist allenfalls der Peak bei 1850 MHz.



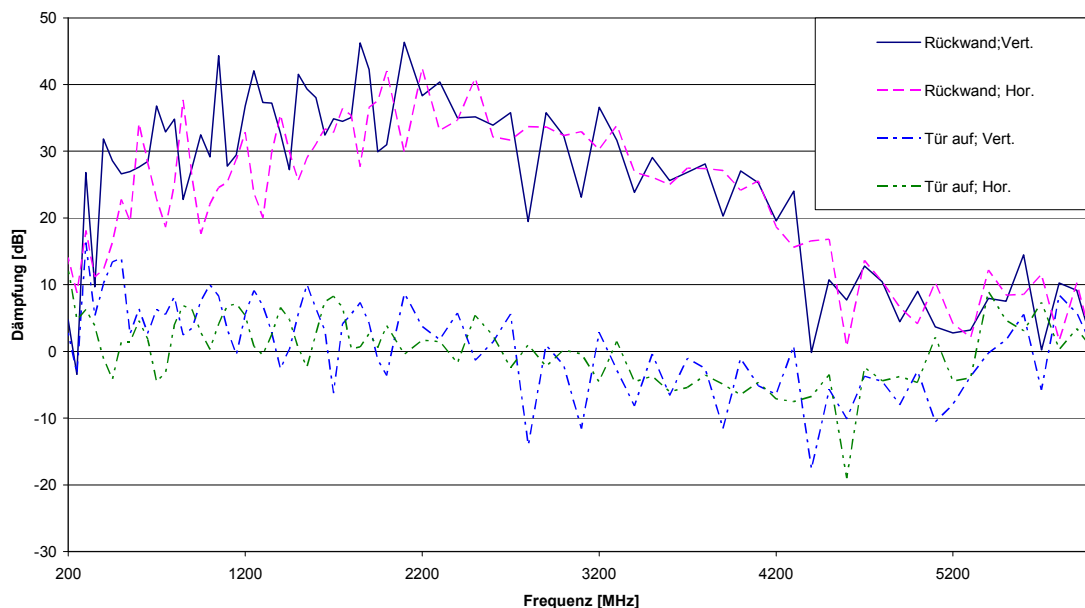
**Bild 3:** Einfluss der geöffneten Schiebetür auf das geschlossene Hangar-Tor (Monokon., Vertikal)

Messungen an der Rückwand des Hangars durch eine geöffnete und geschlossene Notausgangstür (siehe Bild 4) zeigen in Bild 5, dass die offene Tür die sonst vorhandene Dämpfung der Wand (aus Aluminium bestehenden) fast komplett aufhebt.



**Bild 4:** Antennenposition „Hinterausgang“ mit gerichteten LogPer Prüfantennen, Horizontal

Oberhalb von 2700 MHz ist eine leichte Verstärkung erkennbar. Die Dämpfung bei geschlossener Tür beträgt bis zu 45 dB und ist relativ unabhängig von der Antennenpolarisation. Eine Messung an einer anderen Position vor der Wand mit großer Entfernung zur Notausgangstür hat die Ergebnisse bei geschlossener Tür bestätigt. Ähnliche Werte für die Dämpfung von Wänden sind in [4] und [5] zu finden. Insgesamt ist die Dämpfung bei geschlossener Tür größer als die Dämpfung durch das große Hangar-Tor.



**Bild 5:** Dämpfung der Rückwand in unterschiedlichen Polarisierungsebenen

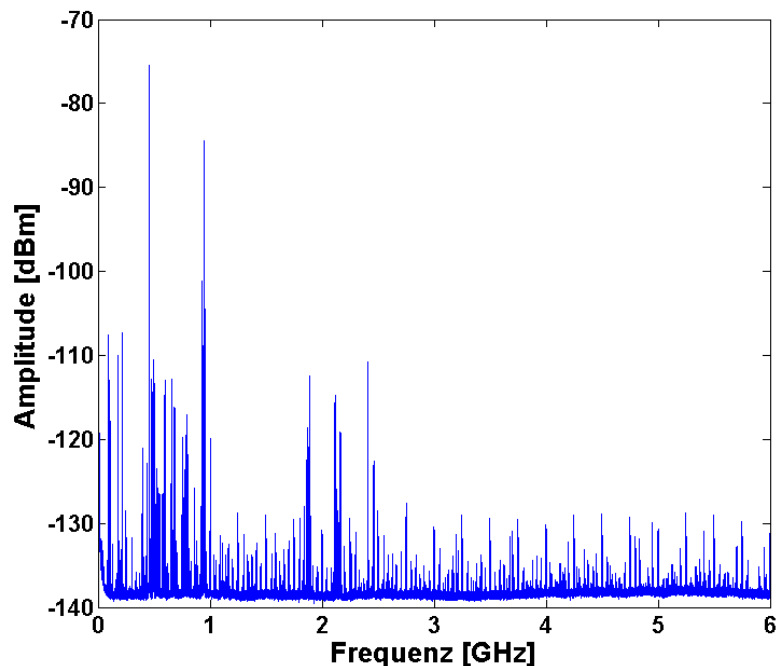
Um den gleichen Schutz wie im Flugzeughangar zu erreichen, muss der Abstand vom Flugzeug zum Ende des Grundstücks (ausgehend von einer Entfernung im Hangar von 5 m) so vergrößert werden, dass sich durch den größeren Abstand die Dämpfung soweit erhöht, wie der Hangar dämpfen würde. Tabelle 1 zeigt die drei wesentlichen Frequenzbereiche in denen Störfestigkeitstests im Flugzeug gefordert werden. Weiterhin sind die Entfernungen angegeben, die zusätzlich als Schutzabstand nötig sind um die Dämpfung des Hangar-Tores zu erreichen.

Frequenzbereich	Dämpfung (Bild 2)	Zusätzliche Entfernung
400 – 1000 MHz	< 23 dB	ca. 70 m
1700 – 2500 MHz	< 29 dB	ca. 140 m
5100 – 5500 MHz	< 8 dB	ca. 15 m

**Tabelle 1:** Äquivalente zusätzliche Entfernung; Erzeugt gleiche Dämpfung wie bei Pfadmessungen

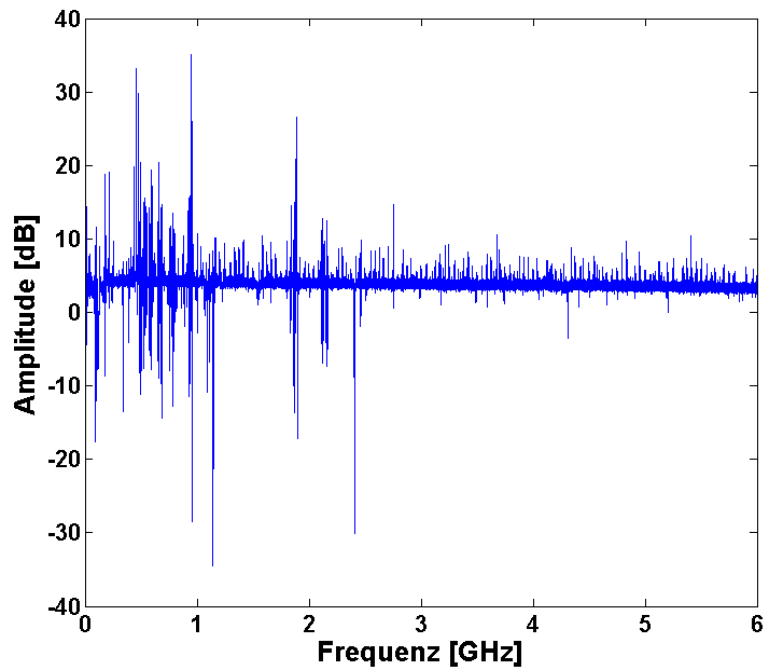
### 3. Einflüsse von externen Signalen auf Messungen

Nicht nur die Dämpfung des Flugzeughangars wird die Wahl der Prüfumgebung beeinflussen, sondern auch die Pegel im elektromagnetischen Spektrum, die Messungen von kleinen Signalen überlagern und teilweise unmöglich machen. Aber genau diese kleinen Signale müssen zuverlässig erkannt werden, da die hochempfindlichen Funkempfänger im Flugzeug nicht gestört werden dürfen. Bild 6 zeigt die außerhalb des Hangars mit einer monokonischen Antenne empfangenen Pegel. Über den kompletten Frequenzbereich sind Spitzenwerte unterschiedlichster Amplitude zu erkennen, die den diversen Funkdiensten zugeordnet werden könnten.



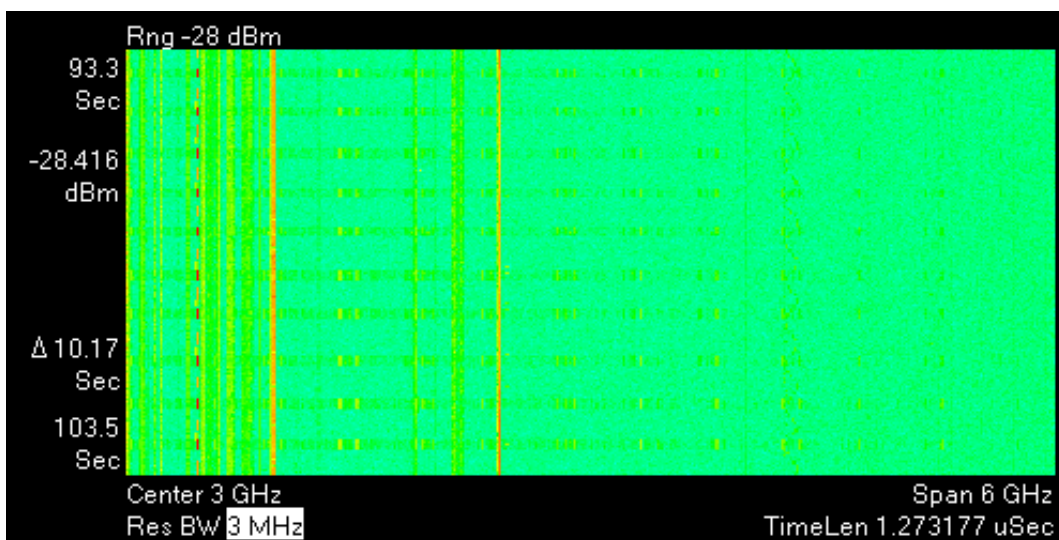
**Bild 6:** Empfangenes Spektrum außerhalb des Flugzeughangars

Die Spektren sind bei der Darstellung in der Punktzahl gegenüber der Messung reduziert. Über 1000 Messpunkten wurde ein Mittelwert gebildet, wodurch sich in den Bildern ein Frequenzraster von ca. 50 kHz ergibt. Zur Beurteilung der Signale ist es wichtig, die mögliche Schwankungsbreite abschätzen zu können. Hierfür zeigt Bild 7 den Vergleich zu einer zweiten, zeitlich späteren Messung ohne Änderungen im Messaufbau. Hier sind Abweichungen in den Spitzen bis zu 35 dB sichtbar, beim Grundrauschen beträgt die Differenz ca. 3 dB.



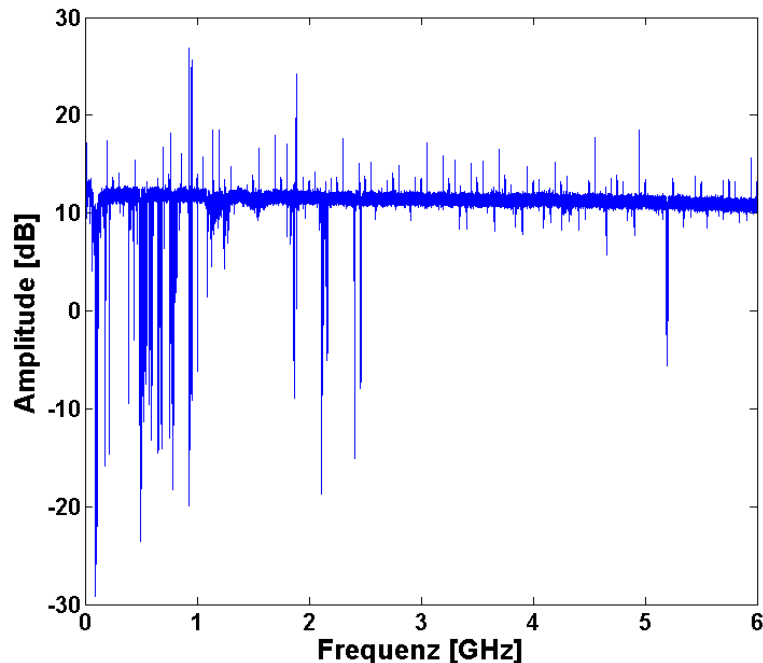
**Bild 7:** Differenz zweier Messungen am selben Außen-Standort – zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Eine Analyse im Wasserfalldiagramm in Bild 8 zeigt, dass einige Signale ausschließlich gepulst abgestrahlt werden. Zu beachten ist, dass in Bild 8 die Auflösungsbandbreite mit 3 MHz wesentlich größer ist, als in den vorhergehenden Bildern.



**Bild 8:** Aufgenommenes Signal außerhalb des Hangars im Wasserfalldiagramm

Aufgrund des pulsformigen Charakters der Signale ist es wichtig, dass für eine Beurteilung der Pegel außen und innen unbedingt im selben Zeitintervall an beiden Standorten gemessen wird. Aus den Messdaten über diesen Zeitbereich berechnet die Fouriertransformation für jeden Kanal das jeweilige Spektrum. Diese Spektren werden voneinander abgezogen. Diese Art der Auswertung ist in Bild 9 gezeigt.



**Bild 9:** Differenz zweier zeitgleicher Messungen innerhalb und außerhalb des Hangars

Zu erkennen ist, dass das Grundrauschen außerhalb des Hangars ca. 10 dB höher als innerhalb ist. Dafür sind die meisten Störer unterhalb von 1,2 GHz außerhalb des Hangars mit weniger Pegel zu empfangen. Einzig die GSM-Bänder bei 900 MHz dominieren außerhalb des Hangars, die Mehrzahl der starken Störquellen befindet sich innerhalb des Hangars.

#### 4. Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung werden Messungen der Dämpfung eines Flugzeughangars präsentiert, welcher für Flugzeuge vom Typ Airbus A320 geeignet ist. Beeinflussende Faktoren wie beispielsweise unterschiedliche Messpositionen, Polarisationen und geöffnete Türen werden gegenübergestellt. Schutzabstände um das Flugzeug sind eine mögliche Lösung um dieselbe Dämpfung wie in dem Hangar zu erreichen. Weiterhin zeigen zeitgleiche Messungen des Grundrauschens außerhalb und innerhalb des Hangars, dass eine Abwägung der erwähnten Vor- und Nachteile bei Störaussendungsmessungen erfolgen muss.

Für das System des Radio Altimeters ist in [1] gezeigt, dass der Hangar die Dämpfung zwischen Messantennen im Flugzeug und den Flugzeugantennen beeinflusst. Den realen Flugzeugbetrieb bildet eine Messung im Freien eher nach, als eine Messung inner-

halb des Hangars – zumal innerhalb des Hangars die Störpegel insbesondere unterhalb von 1,2 GHz höher sind als außerhalb des Hangars.

Die Beeinflussung der Messungen durch Resonanzen und Reflexionen im Hangar sollte vor der Messung bestimmt werden, da diese stark beispielsweise von der Flugzeugposition abhängen. Insbesondere bei Messung der Störaussendung kann sich dieser Einfluss auswirken. Aus Sicht der EMV ist eine Messung außerhalb des Hangars zu bevorzugen, da Flugzeuge in dieser Umgebung betrieben werden.

## **5. Literaturangaben**

**[1]** Rafael Rennó Nunes, Jens Schüür, Statistical Investigation of Electromagnetic Transfer Path in Research Aircraft, EMC Europe 2012, 17-11 September 2012 in Rom, Italien

**[2]** Jens Schüür, Rafael Nunes, Determination of the Path Loss from Passenger Electronic Devices to Radio Altimeter with Additional EMI Test, 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC 21 - 23 May 2012, Venice, Italy

**[3]** I.Schmidt, A.Enders, M.Schwark, J.Schüür, R.Geise, M.Schirmmacher, H.Stoefen, UWB Aircraft Transfer Function Measurements in the Frequency Range from 2 to 8 GHz, IEEE EMC Europe, 8-12 September 2008, Hamburg, Germany, Seiten 1-4

**[4]** Guo Fei, Zhou Bihua, Gao Cheng, Chen Hailin, Analysis of shielding effectiveness of conductive cement-based materials in HEMP environment, Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMMT 2008. International Conference on , vol.3, no., pp.1462,1465, 21-24 April 2008

**[5]** Bayrisches Landesamt für Umwelt, Schirmung elektromagnetischer Wellen im persönlichen Umfeld, ISBN 978-3-940009-27-2, 3. aktualisierte Auflage, 2008