

Einfluss elektromagnetisch absorbierender Folien auf Transferpfade in Luftfahrzeugen

M.Sc. Rafael Nunes, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Flugsystemtechnik

Dipl.-Ing. Jens Schüür, Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit

1. Einleitung

EMV-Aspekte sind in der Luftfahrt wegen der elektromagnetischen Auswirkungen auf sicherheitskritische Systeme von wesentlicher Bedeutung. Von großem Interesse sind die Beeinflussungen, die durch die zunehmende Nutzung elektronischer Geräte innerhalb des Luftfahrzeuges hervorgerufen werden können. Insbesondere die Navigations- und Kommunikationssysteme (NAV/COM-Systeme), die über empfindliche Antennen verfügen, sind durch ungewollt abgestrahlte Emissionen bedroht. Dabei spielt die Kopplung zwischen den sich in der Kabine befindenden Störquellen und außen montierten Antennen – und somit die Rumpfdämpfung – eine wesentliche Rolle.

Bei der Schirmung von Kabinenfenstern mit leitfähigen Folien stellte sich heraus, dass die Kopplung zu NAV/COM-Systemen im GHz-Bereich um 10 dB abnimmt [1]. Ab ca. 400 MHz verhalten sich Kabinenfenster als relevante Öffnungen in dem ansonsten leitfähigen Flugzeugrumpf [2]. Allerdings hat die Fensterschirmung kaum Einwirkung auf die Kopplung zu NAV/COM-Systemen, die unter 400 MHz operieren. Für diesen Bereich sind die Türen wegen ihrer größeren Abmessungen die wichtigsten Auskoppelstellen [2, 3].

Die Bestuhlung eines Luftfahrzeuges einschließlich seiner Passagiere übt einen dämpfenden Einfluss auf die Wellenausbreitung in der Kabine aus. Im Vergleich zu Messungen in einem unbestuhlten Airbus A320 verringerte sich der Transferpfad zu den VHF-Antennen um etwa 15 dB in einem baugleichen, aber komplett eingerichteten Flugzeug [3]. Simulationen und Messungen zeigen, dass Passagiere die elektromagnetische Energie in der Kabine dämpfen [4-7]. Deshalb kann durch die gezielte Verwendung anderer elektromagnetisch absorbierender Materialien eine Reduktion der Kopplung zu den Flugzeugantennen erzielt werden.

Eine mögliche EMV-Maßnahme ist somit die Integration absorbierender Materialien in die thermoakustische Isolierung des Flugzeuges. Dies wirkt auf den Anteil der von der Störquelle abgestrahlten Energie, die eine Mehrwegeausbreitung in der Kabine aufweist. Die absorbierenden Materialien tragen zur Dämpfung der Wellen bei, bevor diese die Kabine verlassen und in die Flugzeugantennen einkoppeln.

Dieser Beitrag stellt Messungen vor, die mit Absorberfolien unterschiedlicher Anordnung im Forschungsflugzeug ATTAS (einem Kurzstreckenflugzeug VFW 614) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt wurden. Es wird gezeigt, wie sich die Transferfunktionen zu Flugzeug- und Referenzantennen in unterschiedlichen Fre-

quenzbereichen verändern. Darüber hinaus tragen diese Messungen zum Verständnis der elektromagnetischen Kopplung in Luftfahrzeugen bei.

2. Messaufbau

Der komplexe Transferpfad (Übertragungsfaktor S_{21}) zwischen einer Sendeantenne und verschiedenen Empfangsantennen wird mit einem Netzwerkanalysator gemessen. Die Sendeantenne, eine breitbandige monokonische Antenne, wird von vorne nach hinten im Abstand von jeweils 1 m entlang dem Flugzeuggang verschoben. Um beide Polarisationen gleichzeitig anzuregen, ist die Sendeantenne schräg montiert (45° in der Ebene Flugzeuglänge/Flugzeughöhe, siehe Bild 1b). Tabelle 1 listet die Empfangsantennen und die gemessenen Frequenzbereiche auf. Neben vier Flugzeugantennen stand auch eine Referenzantenne (baugleich zu der Sendeantenne, aber vertikal polarisiert) innerhalb der Kabine als Empfangsantenne. Ein Hochfrequenzrelais vor dem Eingangsport des Netzwerkanalysators ermöglicht das Vermessen aller Empfangsantennen direkt nacheinander, ohne Umbauarbeiten. Der Messaufbau ist in [8] detailliert beschrieben.

Empfangsantenne	Erklärung	gemessener Frequenzbereich	Anzahl gemessener Frequenzpunkte
VHF 1	Very High Frequency (Kommunikation) - Flugzeugantenne	108-152 MHz	253
DME 1	Distance Measuring Equipment - Flugzeugantenne	960-1213 MHz	397
TCAS	Traffic Collision Avoidance System - Flugzeugantenne	1020-1100 MHz	127
Referenzantenne	monokonische Antenne in der Kabine (vertikal polarisiert)	960-1213 MHz	397

Tabelle 1: Empfangsantennen und gemessene Frequenzbereiche

Um verschiedene Teile der Innenkabine auszukleiden, werden metallbeschichtete Absorberfolien mit einem Flächenwiderstand von $100 \Omega/\square$ verwendet. Bei jeder Anordnung von Absorberfolien werden die elektromagnetischen Transferpfade für verschiedene Positionen der Sendeantenne gemessen. Bild 1 zeigt zwei der Messaufbauten. Die genauen Folienkonfigurationen sind im Folgenden aufgelistet:

1. Kabine ohne Folien;
2. Folien an der Kabinendecke und vor dem Druckschott der Kabine;
3. wie bei Punkt 2, mit Folien zusätzlich an den Seitenwänden (inklusive vor den Kabinenfenstern) und an den hinteren Türen (Notausgänge bei der Position 7 m und eine Tür bei der Position 11,5 m);
4. wie bei Punkt 3, mit Folien zusätzlich an den vorderen Türen (Position 2 m);
5. wie bei Punkt 4, mit Folien zusätzlich an den Cockpitfenstern.

Um die Verlässlichkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, sind zusätzliche Messungen des Rauschens und des Übersprechens im Messaufbau erforderlich [8]. Da keine signifikanten parasitären Effekte in den Messungen auftreten, sind alle Messdaten uneingeschränkt nutzbar. Die gemessene Dämpfung der Messkabel und des Relais sind aus den Messdaten herausgerechnet.



Bild 1: Absorberfolien a) an der Decke und b) vor dem Druckschott und an den Seitenwänden (inkl. hintere Flugzeugtür und Fenster) mit Sendeantenne im Vordergrund

Das Flugzeug ist innerhalb einer großen Flughalle positioniert. Der Einfluss möglicher Hallenreflexionen kann vernachlässigt werden, da die Flugzeugkabine wie aufgelistet unterschiedlich mit Folie ausgekleidet ist. Damit sind Einflüsse der Halle in allen Messungen vergleichbar und heben sich bei der Auswertung auf.

3. Messergebnisse und Analyse

Bild 2 stellt die Kurven des Transferpfades zwischen der Sendeantenne und der Referenzantenne in der Kabine für drei Folienkonfigurationen dar. Für jede Position der Sendeantenne wird der Transferpfad als das Maximum aller 397 gemessenen Werte (S21) im Frequenzbereich von 960 bis 1213 MHz bestimmt und über die Position der Sendeantenne aufgetragen. Die Grafik überlagert das Bild des Flugzeuges mit der Position der

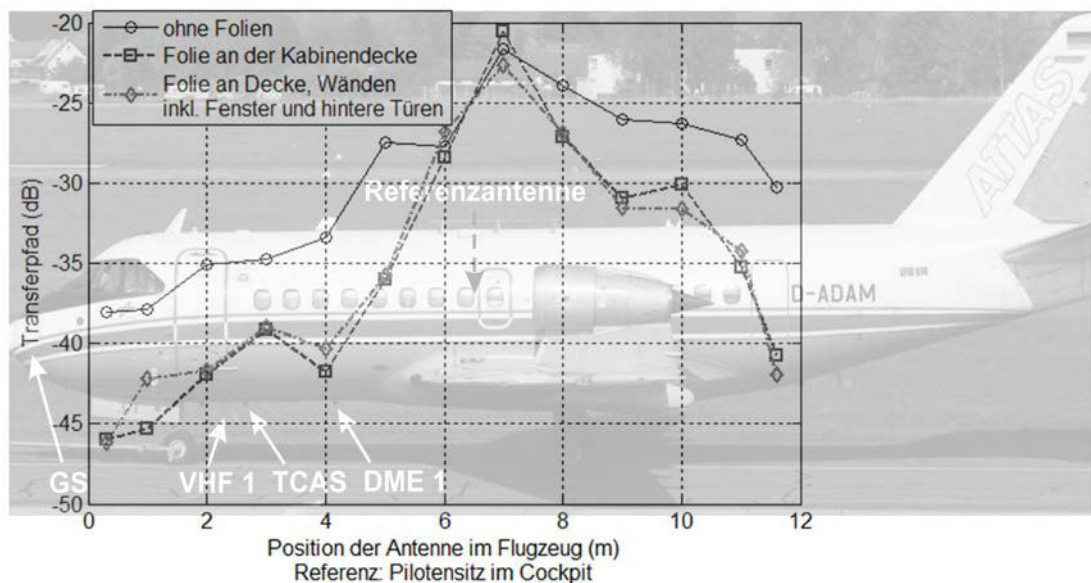


Bild 2: Transferpfad einer Sendeantenne zur Referenzantenne – maximale Werte im Bereich 960-1213 MHz

verschiedenen Antennen. Die Referenzantenne steht an der Position 6,5 m neben dem Mittelgang. Bei nahe beieinander stehender Sende- und Empfangsantenne (Sendeantenne an den Positionen 6 m und 7 m im Mittelgang) ist die Differenz zwischen den Konfigurationen vernachlässigbar. Hier ist der Beitrag der direkten Kopplung zwischen den Antennen dominant und so wirkt die Umgebung wenig auf den gesamten Transferpfad. Erst wenn die Sendeantenne weiter entfernt wird, ist die Mehrwegeausbreitung entscheidend. So bewirken die gedämpften Reflexionen bei den Konfigurationen mit Folien eine Reduktion des Transferpfades. Auffällig ist die Ähnlichkeit der Kurven, die den Konfigurationen mit Folien nur an der Decke und Folien an Decke, Wänden und Fenstern entsprechen. Vermutlich wird die erhöhte Dämpfung bei Reflexionen an ausgekleideten Wänden dadurch kompensiert, dass ein Teil der Energie, der ansonsten die Fenster durchdringen würde, von den Folien in die Kabine zurückreflektiert wird.

Bei der Kopplung zwischen der Sendeantenne und den Flugzeugantennen ist neben der Wellenausbreitung in der Kabine das Entweichen der Energie aus dem Rumpfinnenen wichtig. Bild 3 stellt die Kurven des maximalen Transferpfades zum VHF 1-System des Flugzeuges dar. Die VHF 1-Antenne befindet sich im vorderen Teil des Flugzeuges (ca. bei Position 2,5 m) unter dem Rumpf.

Es ist ersichtlich, dass je dichter die Sendeantenne an dem vorderen Teil der Kabine und dem Cockpit steht, desto weniger die Folien dämpfen. Hierzu gibt es zwei mögliche Erklärungen. Erstens befinden sich insgesamt weniger Absorberfolien in dieser Region im Vergleich zur Mitte und zum hinteren Teil der Kabine. Zweitens steht die Sendeantenne dichter an der VHF 1-Antenne (also wenige Reflexionen in der Kabine bis die Wellen von der VHF 1-Antenne empfangen werden). Bei den anderen Positionen tragen die Folien an der Decke zu einer Reduktion der Kopplung bei (maximale Reduktion von 8 dB bei der Position 6 m). Bei zusätzlich ausgekleideten Türen nimmt der Transferpfad nochmals ab. Das ist insbesondere bei der Position vor den Notausgängen (7 m) zu erkennen.

Im nächsten Schritt werden für alle Messreihen kumulative Verteilungskurven erstellt (Bild 4), wie in [9] gezeigt. Für jede Folienkonfiguration wird eine Kurve dargestellt, der alle gemessenen Frequenzpunkte in allen Positionen der Sendeantenne zu Grunde lie-

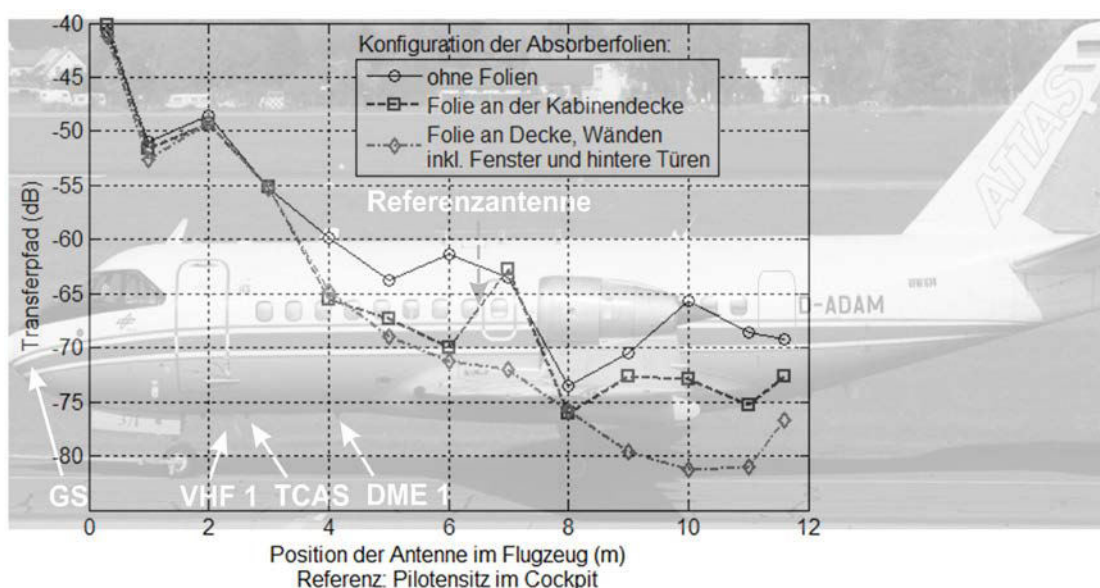


Bild 3: Transferpfad einer Sendeantenne zur VHF 1-Antenne – maximale Werte im Bereich 108-152 MHz

gen. Für die Transferpfadmessungen zum VHF 1-System basiert jede statistische Kurve auf je 253 Frequenzpunkten an 13 Messpositionen (insgesamt 3289 Punkte).

Bild 4 zeigt zwischen 2% und 65% Wahrscheinlichkeit eine Dämpfung von 4 bis zu 6 dB durch die Abdeckung der Decke und von insgesamt 6 bis zu 10 dB mit Folien an Decke, Wänden, Kabinenfenstern und hinteren Türen (die Pfeile in Bild 4 zeigen eine Dämpfung von ca. 5 dB bzw. 9 dB bei 50% kumulativer Wahrscheinlichkeit). Dies ist vor allem mit den Positionen 4 m-11,5 m der Sendeantenne verbunden. Wenn alle gemessenen Werte durch die statistische Bewertung in Betracht gezogen werden, bleiben die Differenzen zwischen den Kurven konstanter im Vergleich zu Bild 3, in dem nur die maximalen Werte dargestellt werden.

Der obere Teil der statistischen Kurven in Bild 4 entspricht der Region mit der höchsten Kopplung zur VHF 1-Antenne, also dem vorderen Teil der Kabine und dem Cockpit. Weil die Folien laut Bild 3 kaum Auswirkung in diesem Flugzeugsbereich haben, liegen die drei Verteilungskurven nahezu gleich für die höheren kumulativen Wahrscheinlichkeiten.

Das Verhalten des Transferpfades zu dem TCAS-System wird in den Bildern 5 und 6 für dieselben Konfigurationen präsentiert. Hier ist der Einfluss der Absorberfolien in einem höheren Frequenzbereich (1020-1100 MHz) zu betrachten.

Für die TCAS-Antenne ist weiterhin festzustellen, dass die Absorberfolien mehr Auswirkung im hinteren Teil des Flugzeuges haben. Während jedoch die Folien im vorderen Teil des Flugzeuges den maximalen Transferpfad zum VHF 1-System kaum beeinflussen, ergibt sich in diesem Bereich eine sichtbare Zusatzdämpfung in der Übertragung zur TCAS-Antenne (Bild 5). Nach der Auskleidung der Kabinenwände ist eine umfassendere Zusatzdämpfung beim TCAS-System als beim VHF 1-System zu erkennen, und zwar für die gesamte Breite von Transferpfadwerten in der statistischen Analyse (Bild 6). Ab ca. 400 MHz [2] nehmen auch die Kabinenfenster die Rolle von Auskoppelstellen ein, und dies sorgt für verteilte Kopplungswege in der Kabine. Mit der dritten Folienkonfiguration werden nicht nur die hinteren Türen als relevante Öffnungen abgedeckt (wie beim VHF 1-System), sondern auch die Kabinenfenster für die Übertragung zur TCAS-Antenne.

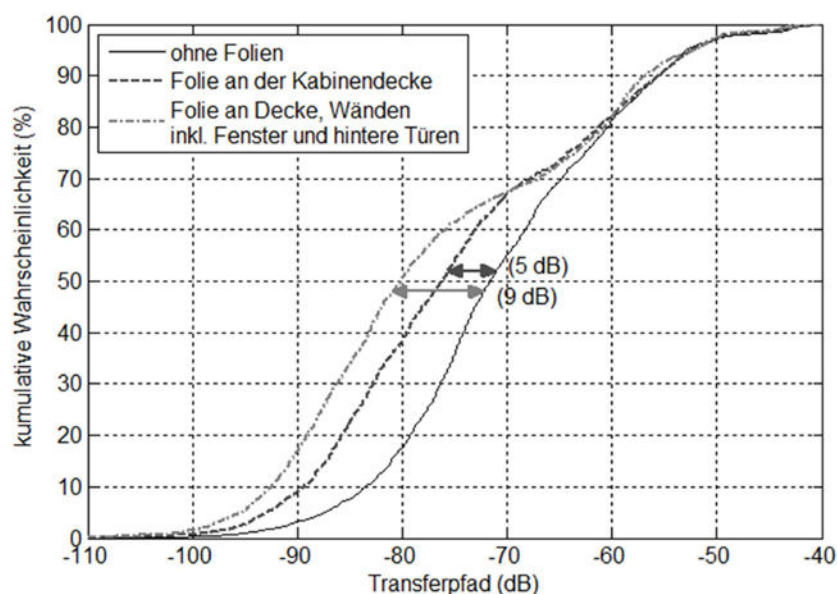


Bild 4: Kumulative Verteilungskurven des Transferpfades zur VHF 1-Antenne (108-152 MHz)

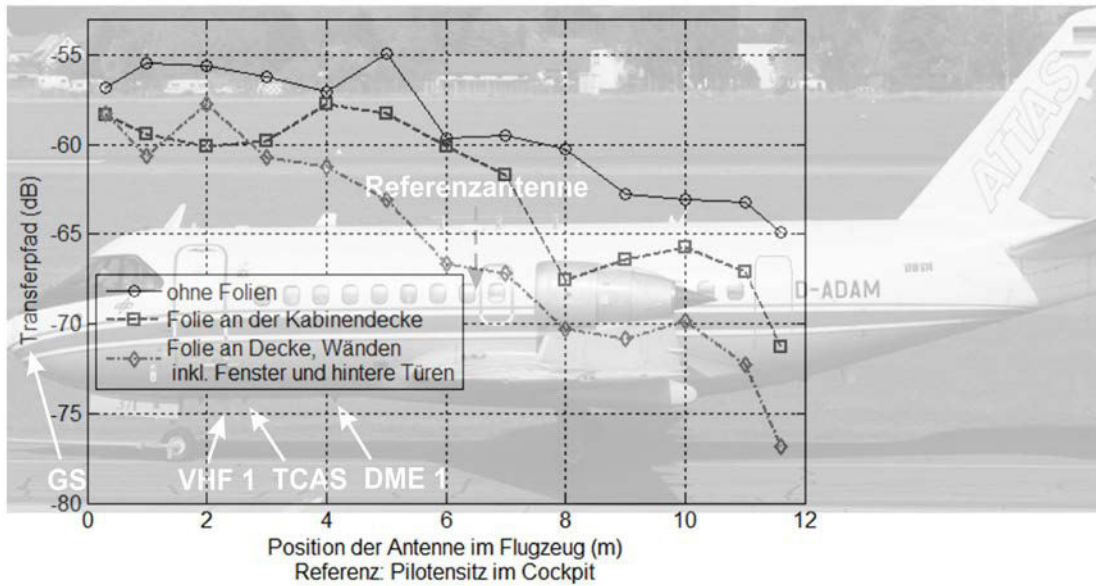


Bild 5: Transferpfad einer Sendeantenne zur TCAS-Antenne – maximale Werte im Bereich 1020-1100 MHz

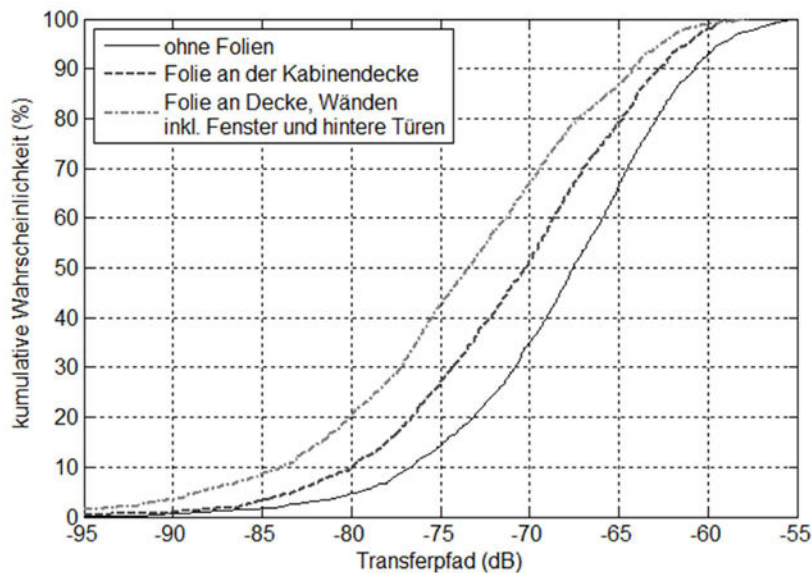


Bild 6: Kumulative Verteilungskurven des Transferpfades zur TCAS-Antenne (1020-1100 MHz)

So ist der Einfluss der Absorberfolien bei dem höheren TCAS-Frequenzbereich (1020-1100 MHz) überall entlang der Flugzeuglänge zu sehen. Trotzdem ist die statistische Reduktion des Transferpfades, die durch die Auskleidung mit Absorberfolien erzielt wird, etwas kleiner bei TCAS als bei VHF 1 (Tabelle 2).

Empfangsantenne	Frequenzbereich	Zusatzdämpfung bei 50% der statistischen Verteilungskurven (im Vergleich mit der Konfiguration ohne Folien)	
		Folien an der Decke	Folien an der Decke und an den Seitenwänden
VHF 1	108-152 MHz	5 dB	9 dB
TCAS	1020-1100 MHz	3 dB	6 dB

Tabelle 2: Zusatzdämpfung bei 50% kumulativer Wahrscheinlichkeit

Im Folgenden wird die Übertragung von dem vorderen Teil des Flugzeuges zur DME 1-Antenne diskutiert. Bild 7 zeigt die Kurven des Transferpfades zur DME 1-Antenne bei weiteren gezielten Versuchen mit den Absorberfolien. Ausgehend von der Konfiguration mit Folien an Decke, Wänden und Fenstern, werden Folien schrittweise an den vorderen Türen und Cockpitfenstern angebracht.

Bei den Positionen in der Passagierkabine (2 m und 3 m) trägt die Auskleidung der Türen wesentlich zur Dämpfung in der Übertragung zur DME1-Antenne bei. Daher wirken die Türen auch bei größeren Frequenzen an der Kopplung nach draußen mit. Die zusätzliche Auskleidung der Cockpitfenster hat an den Positionen 2 m und 3 m kaum Auswirkung. Mit der Sendeantenne im Cockpit hingegen (Positionen 0,3 m und 1 m) koppelt die Energie im Wesentlichen durch die Cockpitfenster in die DME 1-Antenne ein (diese ist ungefähr bei der Position 4 m, unter dem Rumpf).

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie absorbierende Materialien in der Kabine eines Kurzstreckenflugzeuges auf den Transferpfad von einer Sendeantenne zu Navigations- und Kommunikationssystemen sowie zu einer Referenzantenne wirken. Aus dem Vergleich von Übertragungsmessungen zwischen zwei gleichen Antennen innerhalb der Flugzeugkabine lässt sich ein Einfluss der Absorberfolien für Entfernungen größer als 1 m gut erkennen.

Die Reduktion des Transferpfades, die durch Absorberfolien bewirkt wird, hängt stark von der Position der Sendeantenne in der Kabine ab. Bei einer alleinigen Auskleidung der Kabinendecke mit Folien nimmt der maximale Transferpfad um maximal 8 dB ab. Im vorderen Teil des Flugzeuges ist diese Reduktion kleiner. Bei 50% kumulativer Wahrscheinlichkeit beträgt die Zusatzdämpfung, die durch Folien an der Decke erzielt wird, 5 dB bei VHF 1 und 3 dB bei TCAS.

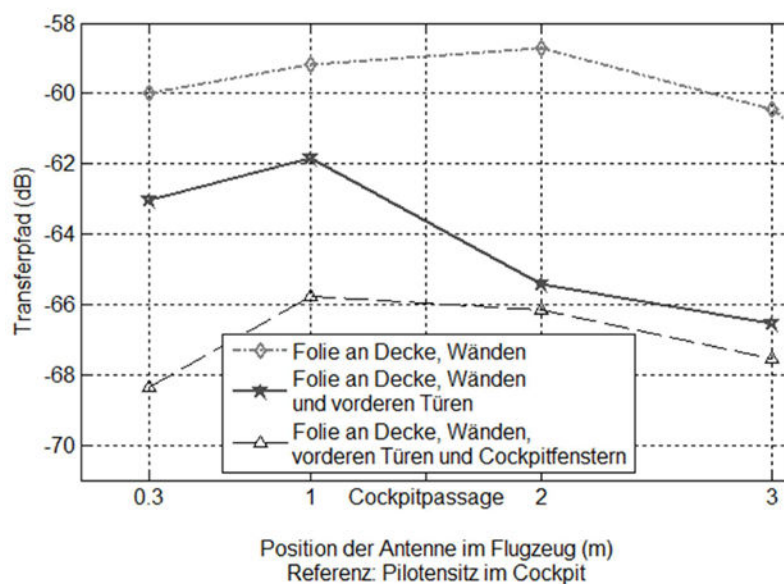


Bild 7: Transferpfad einer Sendeantenne im vorderen Teil des Flugzeuges zur DME 1-Antenne – maximale Werte im Bereich 960-1213 MHz

Bei der zusätzlichen Auskleidung von Auskoppelstellen in der Flugzeughülle (Flugzeugtüren bei tiefen Frequenzen und Kabinenfenstern bei höheren Frequenzen) nimmt der Transferpfad weiter ab. Im Vergleich mit der Konfiguration ohne Folien verringert sich der Transferpfad im mittleren Wahrscheinlichkeitsbereich um 9 dB bei VHF 1 und 6 dB bei TCAS. Die Analyse der Messungen zur DME1-Antenne zeigt, dass die Flugzeugtüren auch im GHz-Bereich bei der Kopplung nach draußen relevant sind. Bei der Ausstrahlung im Cockpit tragen zusätzlich die Cockpitfenster wesentlich zur Kopplung bei.

Die Integration absorbierender Materialien in die Kabinenisolierung wirkt im Wesentlichen auf den Anteil reflektierter Energie in der Kabine. Bei aus Verbundwerkstoffen hergestellten Luftfahrzeugen könnten absorbierende Materialien die Kopplung zu NAV/COM-Systemen noch stärker beeinflussen. Abhängig von der Strukturkomposition des Flugzeugumpfes könnte die grundsätzliche Abschirmung der Kabine mit zusätzlichen Absorberfolien erhöht werden, wobei die Fenster und Türen als Koppelstellen unverändert erhalten bleiben.

5. Literatur

- [1] M. J. Jafri, J. J. Ely, L. L. Vahala, „Graphical analysis of B-737 airplane pathloss data for GPS and evaluation of coupling mitigation techniques“, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, USA, Aug. 2004.
- [2] M. Schwark, „Breitbandige Abstrahlungs- und Transferuntersuchungen an Passagierflugzeugen“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2009.
- [3] S. Pötsch, „PED-Problematik und VHF-Übertragungsfunktionen in Passagierflugzeugen“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2004.
- [4] B. Yang, C. R. Birtcher, C. A. Balanis, „The effects of passengers on mutual coupling in a simplified fuselage: simulations and measurements“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, Nr. 3, Aug. 2008, S. 751-755.
- [5] M. Jacob, K. L. Chee, I. Schmidt, J. Schüür, W. Fischer, M. Schirrmacher, T. Kürner, „Influence of passengers on the UWB propagation channel within a large wide-bodied aircraft“, European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2009, Berlin, Deutschland, Mär. 2009.
- [6] G. C. R. Melia, I. D. Flintoft, M. P. Robinson, „Absorption cross-section of the human body in a reverberant environment“, EMC Europe 2012, Rom, Italien, Sep. 2012.
- [7] G. C. R. Melia, M. P. Robinson, I. D. Flintoft, A. C. Marvin, J. F. Dawson, „Broadband measurement of absorption cross section of the human body in a reverberation chamber“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Early Access), DOI 10.1109/TEMC.2013.2248735.
- [8] R. Nunes, J. Schüür, C.-H. Oertel, A. Enders, „Elektromagnetische Transferpfade in Forschungsflugzeugen – zuverlässige und aussagekräftige Messergebnisse in komplexen Systemen“, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, Deutschland, Feb. 2012.
- [9] R. R. Nunes, J. Schüür, „Statistical investigation of electromagnetic transfer path in research aircraft“, EMC Europe 2012, Rom, Italien, Sep. 2012.