

Unempfindliche Elektronik – Erfahrungen aus 100 Flugzeugtests und neue Ideen zum EMV- Nachweis von Passagier-Funkdiensten.

Dr.-Ing.Thiemo Stadler, Airbus, Abteilung, EMV und Blitzschutz
Dr.-Ing. Robert Keibel, Airbus, EMV und Blitzschutz

1. Einleitung

2007 hat Airbus zum ersten Mal eine GSM-Basisstation ("GSM onBoard") in einer Flugzeugkabine in Betrieb genommen. Wenn solche Systeme aktiv sind, können Passagiere ihre Mobiltelefone und PDAs während des Fluges verwenden. Die EMV wurde u. A. durch im Flugzeug durchgeführte Störfestigkeitstests nach EUROCAE ED-130 [1] nachgewiesen. Der weltweite Stand der Standardisierung und insbesondere der Regulierung bevorzugt zur Zeit Tests für den EMV Nachweis. Das ist verständlich, denn als Standards und Regularien entwickelt wurden, gab es sehr wenig Erfahrungswerte aus Tests. Seit 2007 wurden von Airbus viele GSM und ähnliche Systeme installiert und die EMV entsprechend oft durch Tests nachgewiesen. Airbus hat dadurch einen großen Datenbestand der Störfestigkeit von Flugzeugen gegenüber Passagierfunkdiensten aufgebaut. Das Hauptergebnis der vielen Tests ist, dass Flugzeugelektronik unempfindlich gegenüber vom Passagier mitgebrachten elektronischen Geräten ist.

Normung und Regulierung sollte darauf reagieren und Test- und Prüfvorschriften anpassen. Eine generelle Präferenz von Tests gegenüber Analysen ist nicht mehr sinnvoll. Testempfehlungen [1,2] sollten auf mögliche Vereinfachungen überprüft werden. Ein genereller vereinfachter Nachweis für die Nutzung von Kommunikationsstandards mittlerer Leistung ist zu erwägen.

2. Stand der Technik

Manche Passagiere möchten ihre mitgebrachten Kommunikationsgeräte im Flugzeug betreiben. Dazu werden in modernen Flugzeugen teilweise Wi-Fi und/oder Mobilfunk Basisstationen installiert [8]. Die Störfestigkeit von sicherheitsrelevanten Flugzeugsystemen gegenüber den vom Passagier mitgebrachten elektronischen Geräten mit Sendefunktion (T-PED, Transmitting Portable Electronic Device) ist nachzuweisen. Einschlägige Standards sind EUROCAE ED-130[1], RTCA DO-294 [2] und RTCA DO-307 [3]. ED-130 erlaubt für diesen Nachweis Analysen oder Störfestigkeitstests auf Flugzeugen [6].

Störfestigkeit eines Gerätes wird von der verwendeten Technologie, der Umsetzung und den verwendeten Maßnahmen der EMV bestimmt. Es gibt grundlegende Untersuchungen in denen die Störfestigkeit von elektronischen Systemen untersucht wurde [4,5]. Ganz allgemein werden analoge Signale eher gestört als digitale und niedrige Amplituden eher als hohe. In [4] werden die Störschwellen verschiedener Technologien bei direkter Kopplung untersucht, Bild 1 zeigt das Ergebnis. Da hier nur direkte Kopplung geprüft wurde, sind die Ergebnisse hier nur qualitativ von Bedeutung.

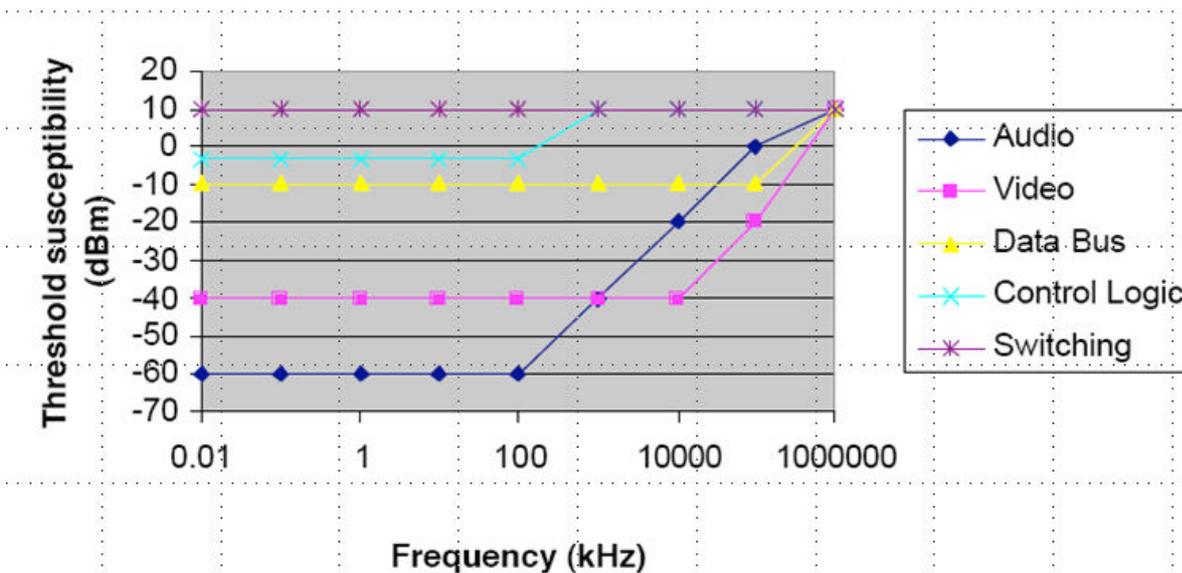


Bild 1: Gemessene Störschwellen von kabelgeführten Signalen in Flugzeugen bei direkter Kopplung (Intel [4])

3. Gegenwärtige Praxis der EMV-Qualifikation von Avionik

Die Gerätequalifikation von Flugzeugelektronik basiert auf dem Standard RTCA DO-160 (EUROCAE ED-14) [9]. Die Störfestigkeitspegel berücksichtigen eine flugzeugexterne HIRF- (high intensity radiated field) Umgebung. Die Signaleigenschaften der HIRF-Qualifikation entsprechen denen von Radaranlagen mit Signalpulsen im Mikrosekundenbereich oder denen von Mittelwellensendern, die mit hoher Leistung arbeiten. Die Wahl des Pegels hängt von der Bedeutung der Gerätefunktion für den Flug und der Einbauposition im Flugzeug ab.

Mit einem definierten flugzeuginternen Transmitterenvironment berücksichtigt Airbus für den A350 XWB deshalb Funkdienste bereits bei der Qualifikation der Avionik. Dieser Abschnitt erläutert die EMV-Eigenschaften der in der Kabine erwarteten Mobilfunksignale (siehe auch [7]).

3.1 EMV-Bewertung der Funksignale von Passagier Funkdiensten

In der Norm EUROCAE ED-130 [1] wurde das Störpotential der Funksignale bewertet. Die Bewertung orientiert sich an einer Darstellung im Zeitbereich. Die EMV-Eigenschaften hängen von den Modulationsverfahren, der Signalfrequenz und der übertragenen Sendeleistung ab. Die Signale werden nach folgenden Kriterien kategorisiert, um daraus Testsignale abzuleiten:

- Änderung der Amplitude
- Signalpegel
- Modulation

3.1.1 Mobilfunksignale mit pulsartiger Modulation, Amplitudenmodulation oder gepulsten Signalen

Zu dieser Kategorie gehören Funkstandards, die den Zugang einzelner mobiler Geräte auf den Funkkanal nach den TDMA (time division multiple access, z.B. GSM, IS-136, PDC, PHS,) oder TDD (time domain duplex, z.B. IEEE 802.11 a,b,g, Bluetooth, ZigBee) Verfahren organisieren, z.B. WLAN. Eine QAM (quadratur amplitude modulation, z.B. i-DEN) führt ebenfalls zu einer Amplitudenänderung.

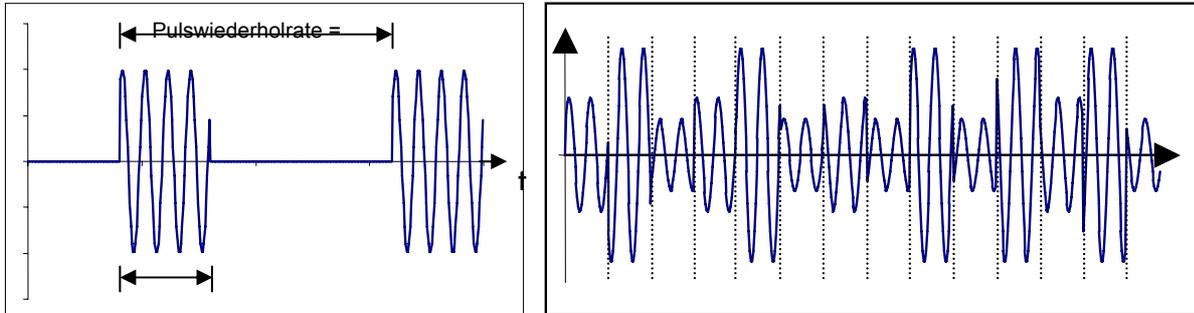


Bild 2: Qualitative Darstellung von Pulsartiger- oder Amplitudenmodulation [1]

3.1.2 Mobilfunksignale mit kontinuierlicher Amplitude

Neben den Funkstandards die eine Pulsmodulation zur Folge haben, gibt es weitere, die den Zugang auf den Sendekanal mit zugewiesenen Codes nach dem CDMA (code division multiple access) Verfahren oder über die Frequenz nach dem FDMA (frequency division multiple access) organisieren. Das Sendeverhalten nach diesen Verfahren ist aus EMV-Sicht kontinuierlich, die Kodierung oder Modulation der Sprache oder der Information erfolgt ohne Änderung der Amplitude. Auch QPSK-Signale zählen zu dieser Kategorie.

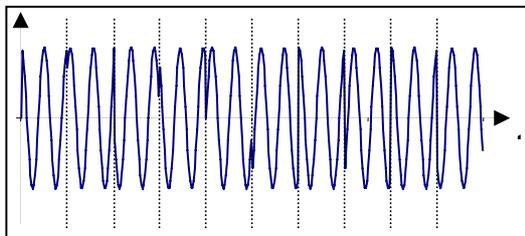


Bild 3: Qualitative Darstellung einer QPSK Modulation [1]

3.2 Resultierende Testsignalformen

3.2.1 Testmodulation

ED-130 leitet aus diesen Überlegungen zwei Testsignalformen (Modulationen) ab. Zum einen deckt ein gepulstes Signal die meisten TDMA-basierten Telefonstandards ab. Auf der anderen Seite kann das Störpotential der phasen- oder frequenzmodulierten Standards durch einen reinen Sinus dargestellt werden. Beide Signale werden als Testsignale zur Störfestigkeitsqualifikation von Avionik gegen Mobilfunksignale empfohlen.

3.2.2 Testpegel

Die zugehörigen Testpegel hängen vom erwarteten Abstand der mobilen Geräte zum Prüfling und ihrer Sendeleistung ab. ED-130 definiert Testpegel in Form von Leistungen, die mit einer Antenne mit niedrigem Gewinn abgestrahlt werden sollen und in deren Nahfeld die Avionik getestet werden soll. Die Testpegel beinhalten eine Marge von 6dB. Die Norm beschreibt auch, wie die Werte in Feldstärken im Fernfeld umgerechnet werden sollen, um einen Test z.B. im EMV Labor durchzuführen. Bild 4 zeigt diese Feldstärken. Es handelt sich um eine Einhüllende, die alle Kommunikationsstandards berücksichtigt.

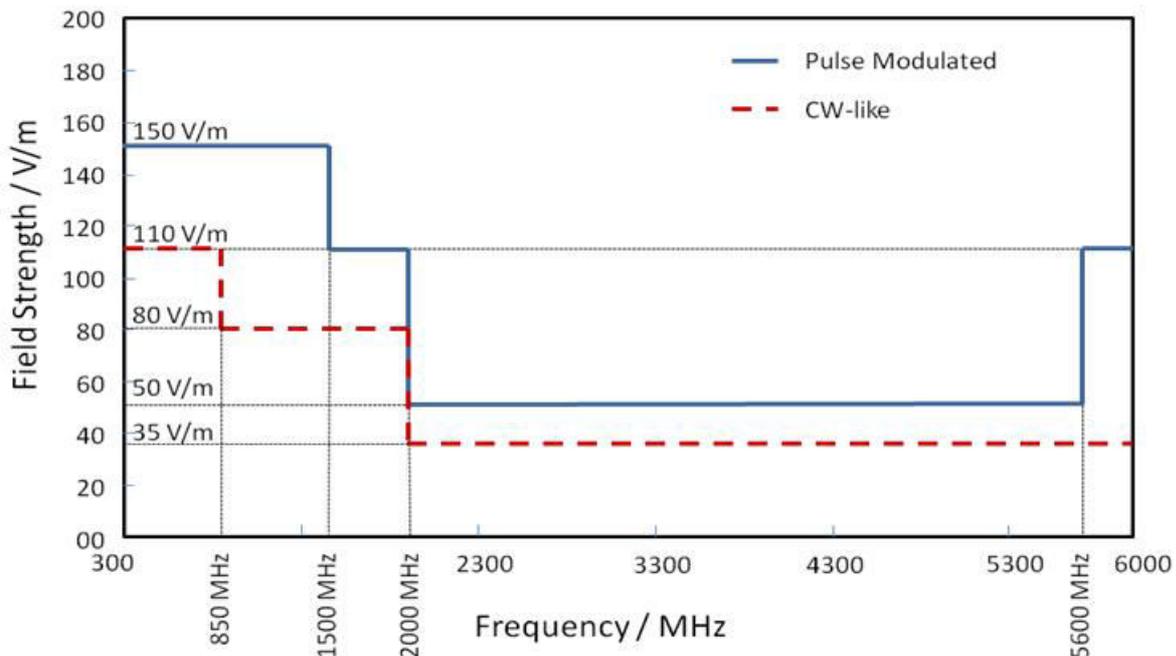


Bild 4: "Internal transmitter environment", umgerechnet in Feldstärken für Labortests, nach [1]

4. Flugzeugtests

Im Flugzeugtest werden grundsätzlich die Leistungspegel im Nahfeld angewendet. Da jedoch ein Flugzeugtest, bei dem alle Geräte einzeln im Nahfeld getestet werden, auf Grund der zu langen Testzeit undurchführbar wäre, definiert die Norm einen Vortest, bei dem an wenigen Testpositionen mit erheblich größerer Leistung getestet wird. Außerdem werden im Flugzeug nur diejenigen Frequenzbereiche getestet, die einem aktuellen Kommunikationsstandard zugeordnet sind. ED-130 [1] nennt die empfohlenen Frequenzbereiche für Flugzeugtests. Bild 5 zeigt die gemessenen Ausgangsleistungen des Verstärkers bei einem Flugzeugtest, die tatsächlich abgestrahlte Leistung ist aber wegen der Kabeldämpfung niedriger.

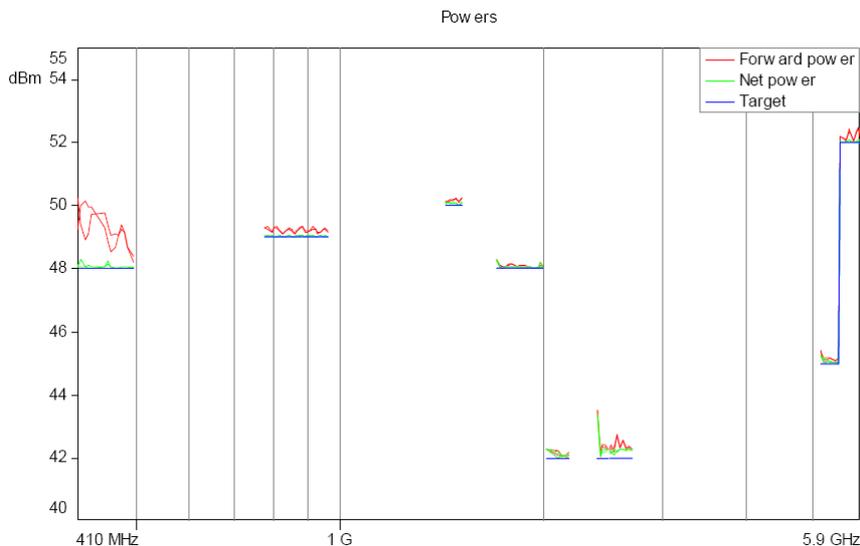


Bild 5: Leistung der Testsignale im Störfestigkeitstest am Verstärkerausgang

Sinn eines Flugzeugtests ist es zu zeigen, dass im Flug keine sicherheitsrelevanten Effekte auftreten, wenn im Flugzeug T-PEDs betrieben werden. Dazu muss zunächst ein flugähnlicher Zustand am Boden hergestellt werden. Das Monitoring des Systems Flugzeug während des Tests ist nicht trivial und muss genau geplant werden. Ein großer Teil des Testaufwands entsteht durch den Herstellung des Testzustands des Flugzeugs und die aufwändige Beobachtung der Systeme. Erfahrungsgemäß dauert der Test zwischen einem und fünf Tage, je nach Größe des Flugzeugs.

Flugtests sind unmöglich, da der Test mit großer Marge, also stark überhöhten Pegeln durchgeführt wird. Um die Sicherheit des Testflugs zu gewährleisten müsste man deshalb vor dem Flugtest einen weiteren Bodentest durchführen, bei dem überhöhter Pegel verwendet werden, die eine hinreichende Marge nachweisen.

5. Ergebnisse der Störfestigkeitstests von Flugzeugen

Für die Zulassung von Mobilfunk Systemen (OMTS, Onboard Mobile Telephony System) hat Airbus viele Flugzeugtests mit Signalen von bis zu 32W in Frequenzbändern zwischen 400MHz und 5,5GHz durchgeführt. Die erzeugten Felder sind weit höher, als sie von Passagiergeräten erzeugt werden können. Für dieses Papier wurden über 80 Tests in der Kabine von Flugzeugen der Airbus Single-Aisle Familie ausgewertet. Es wurden nicht nur Flugzeuge aus aktueller Produktion sondern auch ältere Kundenflugzeuge getestet.

5.1 Effekte

Selbstverständlich ist die Flugsteuerung robust und kann von T-PED Signalen nicht gestört werden.

Unterschiede gibt es in der Störfestigkeit verschiedener getesteter Geräte. In der vorgestellten Untersuchung wird für jede Gerätekategorie eine Ursachenanalyse durchgeführt. Die zu betrachtenden Geräte werden nach Technologie klassifiziert und die Klassen vorgestellt. Hieraus lassen sich grundlegende Erkenntnisse gewinnen.

Es ist zu beachten, dass die Störfestigkeit von Geräten zu allererst durch den Grad der EMV Härtung bestimmt wird. Die hier aufgeführten Effekte sind prinzipielle Betrachtun-

gen, es kann nicht gefolgert werden, dass alle Geräte einer Klasse beeinflusst werden können.

5.1.1 Analoge Audio Übertragung (Mikrophone)

Mikrophone sind prinzipiell die am ehesten beeinflussbaren Geräte sind. Selbstverständlich gibt es Mikrophone, die gut gehärtet sind und deshalb weniger empfindlich sind oder mit den zur Verfügung stehenden Testmitteln gar nicht beeinflusst werden können. Offenbar bilden aber Elektretmikrofone auf Grund ihrer Bauweise eine wahrscheinliche Störquelle: ein sehr kleiner Strom wird von einem Vorverstärker in der Leistung verstärkt. Der Aufwand zur EM-Härtung dieser Mikrophone ist entsprechend hoch. Mikrophone werden in erster Linie durch puls- oder amplitudenmodulierte Signale beeinflusst. Die typische Auswirkung sind Nebengeräusche bei der Audio-Übertragung.

5.1.2 Analog Video

Analoge Videoübertragung findet man in manchen Kameras, in manchen IFE Systemen (in-flight entertainment, Unterhaltungssystem für die Passagiere) und in manchen Röhrenmonitoren. Die mögliche Auswirkung sind Streifen oder ein Flackern des Bildes. Aus der Test Erfahrung heraus kann man feststellen, dass diese Art der Störquellen schon die Ausnahme sind und deutlich überhöhte Störpegel notwendig sind. Die Effekte sind üblicherweise ohne die im Test verwendete Signalüberhöhung nicht mehr nachweisbar.

5.1.3 Analoge Sensoren

Streng genommen kann man passive Sensoren nicht durch HF-Signale stören. Wenn überhaupt kann nur die Auswerteelektronik gestört werden. Im hier dargestellten Zusammenhang ist diese Unterscheidung aber irrelevant. Bei den Tests wurden vereinzelt analoge Sensoren beeinflusst, z.B. ein Piezo Taster, der eine Funktion im IFE System hatte. Aus EMV Sicht dürfte der Effekt ähnlich dem beim Mikrophon sein. Auch die bei analogen Sensoren beobachteten Effekte sind ohne die im Test verwendete Signalüberhöhung nicht mehr nachweisbar.

5.1.4 Ungeschirmte Geräte

In der Flugzeugkabine finden sich an einigen Stellen Leiterplatten in Kunststoffgehäusen oder integriert in Monitore oder Lining. Diese Geräte haben eines gemeinsam: Sie sind niemals sicherheitsrelevant. Sehr vereinzelt wurden Effekte in diesen Geräten beobachtet, aber auch diese sind ohne die im Test verwendete Signalüberhöhung nicht mehr nachweisbar.

5.2 Bewertung

5.2.1 Flugzeugelektronik ist robust

Die Flugsteuerung moderner Flugzeuge wird von T-PED nicht beeinflusst. Die wenigen Effekte, die beobachtet werden, sind oft im Bereich der Unterhaltung oder in Komfortfunktionen zu finden. Die einzigen Effekte, die wiederholbar auch mit einem einfachen Mobiltelefon zu erreichen sind, sind die Störung von Mikrophonen. Dabei muss das Mikrophon sehr nahe an ein Mobiltelefon gehalten werden. Die Störung ist leicht abzustel-

len, es genügt das Mobiltelefon weiter vom Mikrofon entfernt zu halten. In den einschlägigen Standards und Behördenempfehlungen gibt es eine untere Schranke für die äquivalent isotrop abgestrahlte Leistung von Sendern im Flugzeug, unterhalb der elektromagnetische Kompatibilität vorausgesetzt wird. Wird diese Leistung überschritten, muss wieder das ganze Flugzeug analysiert und/oder getestet werden. Die Ergebnisse der vielen bereits durchgeführten Tests zeigen jedoch, dass es unterschiedliche Störfempfindlichkeit unterschiedlicher Geräteklassen gibt. Für Störquellen mittlerer Leistung wäre es also denkbar die Analyse auf Klassen mittlerer Empfindlichkeit (also Mikrophone) zu beschränken.

5.2.2 Es werden immer die gleichen Effekte beobachtet

Obwohl die getesteten Flugzeuge sich in ihrer Konfiguration sehr stark unterschieden, waren die beobachteten Effekte immer gleich. Aus diesem Grund scheint die von Seiten der Aufsichtsbehörden generelle Präferenz von Tests gegenüber analytischen Nachweisen nicht mehr zeitgemäß.

5.2.3 Die Effekte sind leicht zu finden

Wie oben beschrieben, verursacht die komplexe Flugsteuerung einen hohen Testaufwand. Es ist sehr aufwändig, alles auf mögliche versteckte Fehler zu überwachen. Tatsächlich sind die Effekte aber sehr leicht zu entdecken. Sie machen sich durch Flackern, Blinken, Brummen, Piepen oder direkte Anzeigen bemerkbar.

5.2.4 Es gibt eine prinzipielle Übereinstimmung mit der Untersuchung von Intel

Die analogen Audio- und Videosignale wurden von Intel in [4] als besonders empfindlich dargestellt. Die Erfahrungswerte aus unseren Tests scheinen dies zu bestätigen. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass jede Technologie durch Maßnahmen der EMV gegen Störeinflüsse gehärtet werden kann.

6. Empfehlungen

Flugzeugelektronik ist unempfindlich gegenüber vom Passagier mitgebrachten elektronischen Geräten. Flugzeugtests, die in der Industrie mit großem Aufwand durchgeführt werden, haben immer wieder dieses gleiche Ergebnis.

Normung und Regulierung sollte darauf reagieren und Test- und Prüfvorschriften anpassen. Eine generelle Präferenz von Tests gegenüber Analysen ist nicht mehr sinnvoll. Testempfehlungen [1,2] sollten auf mögliche Vereinfachungen überprüft werden. Ein genereller vereinfachter Nachweis für die Nutzung von Kommunikationsstandards mittlerer Leistung ist zu erwägen.

7. Referenzen

- [1] EUROCAE ED-130, Guidance for the Use of Portable Electronic Devices (PEDs) on Board Aircraft, 2006, Malakoff
- [2] RTCA DO-294, Guidance On Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (t-peds) On Aircraft, 2008
- [3] RTCA DO-307 (Change 1), Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance, 2008
- [4] Schiffer, Waltho, Safety Evaluation of Bluetooth Class ISM Band Transmitters on board Commercial Aircraft, Revision 2, Intel Mobile Architecture Lab, Technology & Research Labs, 2000
- [5] Nitsch, Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM Threats, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 46, No.3, 2004
- [6] Kebel, "Mobilfunk im Flugzeug und die Konsequenzen für die Qualifikation der Avionik", EMV 2006, Düsseldorf
- [7] Kebel, "Mobilfunk im Flugzeug und die elektromagnetische Verträglichkeit", DGLR 2010, Hamburg
- [8] Böhring, GSM On-Board - Overview of the mobile telephony system on Airbus single aisle aircraft, DGLR 2010, Hamburg
- [9] RTCA DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, identisch zu EUROCAE ED-14