

MOBILFUNK IM FLUGZEUG UND DIE ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

Dr.-Ing. R. Kebel, Airbus
Kreetslag 10, 21129 Hamburg

Zusammenfassung

Dieser Beitrag fasst die technische Entwicklung zur Beurteilung von Mobilfunk im Flugzeug zusammen. Dazu gehören die Beurteilung des Störpotenzials von Mobilfunksignalen einschließlich deren Modulation, daraus abgeleitete Störpegel und die Entwicklung von Anforderungen an das Flugzeug gegenüber schwachen, ungewollten Hochfrequenzsendungen, die von portablen elektronischen Geräten ausgehen. Der Beitrag zeigt, welche Kriterien erfüllt werden, so dass gegenwärtig in der Entwicklung befindliche Flugzeugmodelle schon durch die Musterzulassung als tolerant gegenüber Mobilfunk gelten. Weiterhin zeigt der Beitrag, nach welchen Standards Flugzeuge gegenüber Funkdiensten und ungewollten, schwachen Rauschsignalen portabler elektronischer Geräte qualifiziert werden und wie die Balance zwischen Empfindlichkeit der Empfänger und dem zu erwartendem elektronischen Rauschen in der Kabine gehalten wird.

1. EINLEITUNG

Hochfrequenzstörfestigkeitsqualifikationen für Flugzeug-elektronik orientieren sich am flugzeugexternen HIRF (High Intensity Radiated Fields) Environment und der flugzeuginternen EMV. Die Qualifikation basiert auf der Annahme sehr hoher Feldstärken außerhalb des Flugzeuges. Der Gebrauch von Funkdiensten innerhalb der Kabine ist bis vor einigen Jahren nicht betrachtet worden; es bestand kein Bedarf solche Systeme einzurüsten. Gegenwärtig integrieren Flugzeughersteller neue Funkstandards in die Flugzeugkabine. Dazu gehören sowohl Datenfunkstandards (z.B. WLAN nach dem IEEE 802.11 a,b,g Standard) und Telefonstandards, z.B. GSM, CDMA, UMTS. Heute ist der Mobilfunk allgegenwärtig. Das hat Auswirkungen auf den Schutz der Kabinenelektronik und die elektromagnetische Trennung extern montierter Antennen von der Kabine. Bisher war diese Trennung operationell geregelt. Inzwischen haben die amerikanischen und europäischen Standardisierungsgremien der RTCA bzw. der EUROCAE Standards erarbeitet, die das Mindestniveau einer inhärenten Trennung zwischen Flugfunksystemen und der Kabine gegenüber schwachen ungewollten Rauschsignalen portabler elektronischer Geräte vorgeben.

Die Standards schaffen sowohl für neu entwickelte als auch für lang bewährte Flugzeugmodelle einen einheitlichen Rahmen für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit.

2. GEGENWÄRTIGE PRAXIS DER EMV QUALIFIKATION VON AVIONIK

Die Gerätequalifikation von Flugzeugelektronik basiert auf dem Standard RTCA DO-160 (EUROCAE ED-14). Die Störfestigkeitspegel berücksichtigen eine flugzeugexterne HIRF- (high intensity radiated field) Umgebung und einen Mindestqualifikationspegel gegen ungewollte Emissionen von Elektronik, die sich im Flugzeug befinden kann. Der Pegel der ungewollten Emissionen ist niedrig und für Flugzeugelektronik ebenfalls durch Anwendung der DO-160 Anforderungen begrenzt. 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. HIRF stellt einen vorübergehenden Einfluss dar, der das Flugzeug großflächig von außen mit hoher Feldstärke erfassen kann. Funkdienste in der Kabine senden bei niedriger Leistung und erzeugen nur lokal begrenzt signifikante Feldstärken. Für die Integration von Funkdiensten in der Kabine erfolgt der EMV-Nachweis bisher oft als Test auf Flugzeugebene. Das ist aufwändig und stört den industriellen Ablauf.

Mit einem definierten flugzeuginternen Transmitterenvironment berücksichtigt Airbus für den A350XWB deshalb Funkdienste bereits bei der Qualifikation der Avionik. Eine Einzelqualifikation von Flugzeugversionen kann dann entfallen. Dieser Abschnitt erläutert die EMV-Eigenschaften der in der Kabine erwarteten Mobilfunksignale.

2.1. EMV-Bewertung der Funksignale

Um das Störpotential eines Funksignals zu bewerten, ist eine Darstellung im Zeitbereich hilfreich. Die folgenden Abschnitte zeigen beispielhaft die EMV-Eigenschaften verschiedener Mobilfunksignale. 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:

- a) Änderung der Amplitude: Das Störpotential hängt von der Amplitudenänderung ab. Je höher die Änderung der Amplitude nach der Zeit ist, desto höher ist das Störpotential. Pulswiederholrate und Pulsdauer eines Testsignals müssen in der Größenordnung den untersuchten Funksignale entsprechen. Hier gelten Pulswiederholrate zwischen 0.5 ms und 50 ms als hinreichend ähnlich.

- b) Signalpegel: Zweitens muss ein Testsignal die nominale Sendeleistung oder die erwartete Feldstärke am Ort des Prüflings wiedergeben
- c) Modulation: Funksignale, deren Modulation nur auf Phasen- oder Frequenzverschiebungen beruht, können mit einem sinusförmigen Signal angemessen dargestellt werden. Modulationsbedingte Frequenzverschiebungen werden durch das Überstreichen des Testfrequenzbereichs abgedeckt.

2.2. Mobilfunksignale mit pulsartiger Modulation

Zu dieser Kategorie gehören Funkstandards, die den Zugang einzelner mobiler Geräte (i.f. auch "transmitting personal electronic device" oder "T-PED") auf den Funkkanal nach dem TDMA (time division multiple access) Verfahren organisieren. Dies trifft z.B. auf den GSM Standard zu, bei dem das eigentliche Sprachsignal nach dem GMSK Verfahren moduliert wird, der Zugriff auf die Sendefrequenz aber durch zeitliche Staffelung von bis zu acht Sendern erreicht wird. Die maximale Sendeleistung eines GSM Telefon liegt abhängig von der Sendefrequenz für den Standard GSM 900 bei zwei Watt, GSM 1800 und GSM 1900 Standards arbeiten bei einer maximalen Sendeleistung von einem Watt. Die tatsächlich zwischen Basisstation und Mobiltelefon eingestellte Sendeleistung liegt meistens darunter und wird entsprechend der lokalen Empfangssituation nach einem vorgegebenen Protokoll festgelegt. Weitere TDMA basierte Telefonstandards, die sehr ähnliche Zeitverhalten aufweisen sind IS-136 (DAMPS), PDC, PHS. Das von Motorola entwickelte i-DEN weist wegen der 16 QAM Modulation zusätzlich zur Phasenmodulation noch eine Amplitudenmodulation auf.

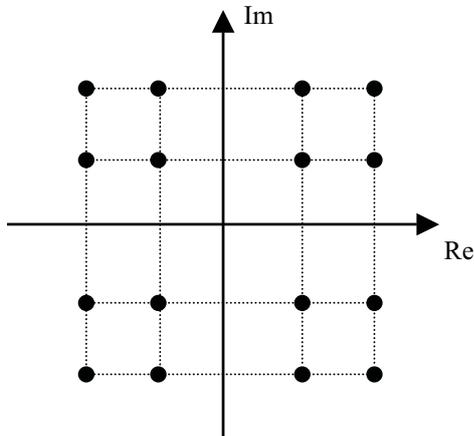


BILD 1. Konstellationsdiagramm einer 16-QAM resultiert in eine Amplitudenschwankung des Signals

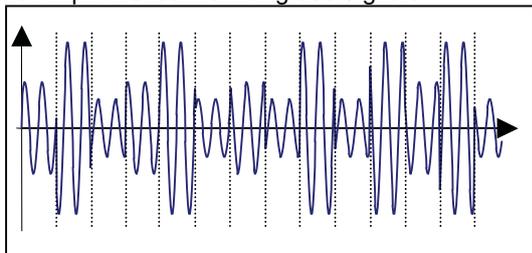


BILD 2. Qualitative Zeitbereichsdarstellung einer 16 QAM - Modulation

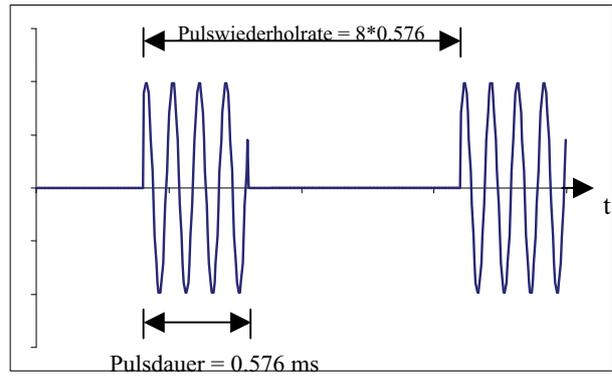


BILD 3. Ein TDMA-Signal (z.B. GSM) zeigt einen starken Amplitudenwechsel, da ein Funkkanal in acht Zeitabschnitte eingeteilt wird.

2.3. Datenkommunikationsstandards mit gepulsten Signalen

Datenkommunikationsstandards arbeiten oft nach dem Carrier Sense Multiple Access (CSMA) Verfahren. Es organisiert den Zugriff mehrerer Geräte auf die Sendefrequenz zeitlich, aber nicht in einem vorgegebenen Zeitraster, sondern nach der Verfügbarkeit. Vor der Signalübertragung wird im Sendegerät nach einem vorgegebenen Verfahren überprüft, ob der Kanal verfügbar ist, bevor die Übertragung beginnt. Auf diese Weise stellt sich auch eine Pulsmodulation ein. Zu dieser Kategorie gehören z.B. die Datenkommunikationsstandards IEEE 802.11 a,b,g, Bluetooth oder ZigBee. Diese Standards arbeiten bei niedrigen Pegeln unterhalb eines Watts. Der Kanalzugriff erfolgt im Zeitduplex und bewirkt gepulste Emissionen mit variabler Pulsdauer und -wiederholrate in der oben nach a) angegebenen Größenordnung.

2.4. 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 (vergl. BILD 4 und 5) zählen zu dieser Kategorie.

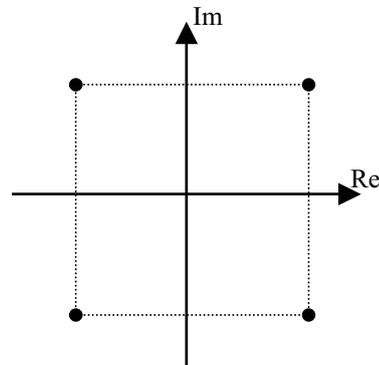


BILD 4. Konstellationsdiagramm einer QPSK-Modulation resultiert in ein sinusförmiges Signal mit Phasensprüngen

Nicht amplitudenmodulierte Signale unterliegen nur den EMV-Kriterien b) und c) nach Abschnitt 2, das heißt ihre Sendeleistung oder ihre Feldstärke am Ort des Prüflings sowie die Sendefrequenz müssen betrachtet werden.

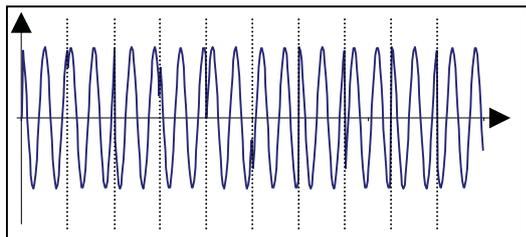


BILD 5. Darstellung einer QPSK über der Zeit

2.5. Resultierende Testsignale

Aus den Tabellen 1 und 2 lassen sich zwei Testsignalformen ableiten, die nach den Kriterien a) und c) den Mobilfunktensignalen mit Blick auf ihr Störpotential gleichen. Zum einen deckt ein gepulstes Signal mit einer Puls wiederholrate von 5 ms die meisten TDMA-basierten Telefonstandards ab. Auf der anderen Seite kann das Störpotential der phasen- oder frequenzmodulierten Standards nach Tabelle 2 durch einen reinen Sinus dargestellt werden. Beide Signale werden von EUROCAE WG58 und RTCA SC202 voraussichtlich als Testsignale zur Störfestigkeitsqualifikation von Avionik gegen Mobilfunktensignale empfohlen werden. Die zugehörigen Testpegel hängen vom erwarteten Abstand der Mobilgeräte zum Prüfling und der Sendeleistung der Mobilgeräte ab. Typische Störmechanismen beruhen entweder auf der zeitlichen Integration einer Leistungsbeaufschlagung oder auf der Differentiation eines amplitudenveränderlichen Signals. Daher fordern gängige Prüfstandards sowohl mit Sinussignalen als auch mit amplitudenmodulierten Signalen zu testen.

2.6. Testpegel

Entsprechend dem nach RTCA DO-160 bekannten feldstärkebasierten Verfahren können Testpegel ermittelt werden. Bild 6 und 7 geben Feldstärkewerte an, und zwar für die Distanzen von 1 m oder 0,1 m zwischen dem betrachteten Gerät und dem angenommenen Mobilfunkgerät oder Telefon. Die nach DO-160 vorgegebene Testdistanz von einem Meter zwischen Prüfling und Sendeantenne führt für Geräte, die sich im Abstand von wenigen cm zum Mobilgerät befinden können, auf einen höheren Testpegel. Daraus ergeben sich unter zusätzlicher Einbeziehung der Standards (IEEE 802.11b,g,a; Bluetooth und ZigBee) die Grenzwertkurven zur Qualifikation von Geräten im Labor für gepulste Signale (vgl. BILD 6 und 7). Die Gerätefunktion beeinflusst den Testpegel über den DAL (design assurance level) aber auch der mögliche Abstand zwischen Mobilgerät und Flugzeugelektronik. Für Geräte, die mehr als einen Meter von der angenommenen Senderposition im Flugzeug entfernt eingebaut werden, genügen 20 V/m Qualifikationspegel über den gesamten Frequenzbereich. Die Grenzwertkurve für sinusähnliche Signale ist in BILD 4 dargestellt. Wie bei gepulsten Signalen genügen für Geräte, die mehr als einen Meter von der angenommenen Senderposition im Flugzeug entfernt eingebaut werden, 20 V/m Qualifikationspegel über den gesamten Frequenzbereich.

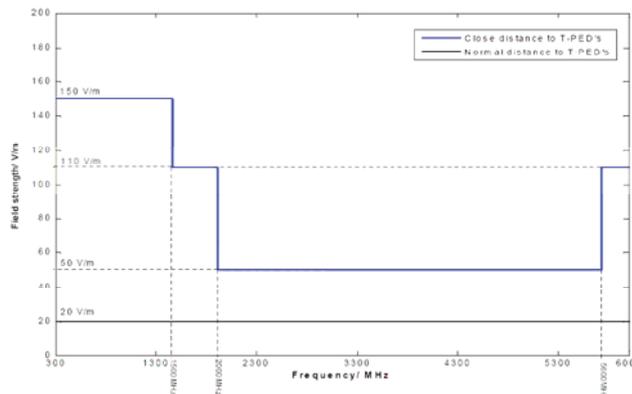


BILD 6. Von EUROCAE erarbeitetes Störpotential zwischen 300 MHz und 6 GHz für Avionik in unmittelbarer Nähe und 1 m Distanz von Mobilfunkgeräten mit gepulsten Signalen. Sechs dB Marge sind im Pegel berücksichtigt

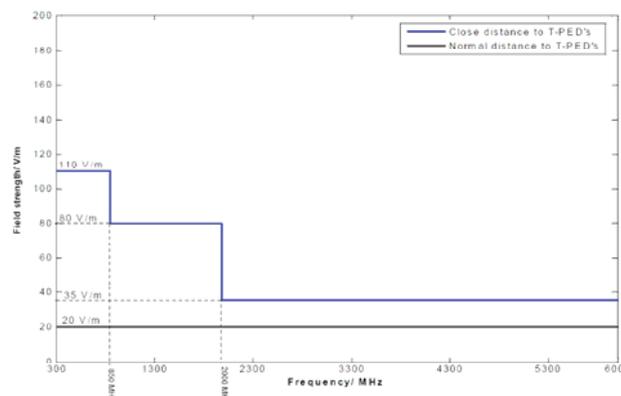


BILD 7. Von EUROCAE erarbeitetes Störpotential zwischen 300 MHz und 6 GHz für Avionik in unmittelbarer Nähe und 1 m Distanz von Mobilfunkgeräten mit amplitudenkonstanten Signalen. Sechs dB Marge sind im Pegel berücksichtigt

Bei der Festlegung des Testpegels werden mögliche Reflexionen an der Flugzeughülle mit einem Aufschlag von 6 dB berücksichtigt, so dass die Feldstärkewerte nach BILD 1 und 2 mit einem Faktor zwei multipliziert werden. Daraus ergeben sich unter zusätzlicher Einbeziehung der Standards (IEEE 802.11b,g,a; Bluetooth und ZigBee) die Grenzwertkurven zur Qualifikation von Geräten im Labor für gepulste Signale (vgl. BILD 2). Außer der Bedeutung der Gerätefunktion, beeinflusst auch der Abstand zwischen Mobilgerät und Flugzeugelektronik den Testpegel. Für Geräte, die mehr als einen Meter von der angenommenen Senderposition im Flugzeug entfernt eingebaut werden genügen 20 V/m Qualifikationspegel über den gesamten Frequenzbereich. Die Grenzwertkurve für sinusähnliche Signale ist in BILD 4 dargestellt. Wie bei gepulsten Signalen genügen für Geräte, die mehr als einen Meter von der angenommenen Senderposition im Flugzeug entfernt eingebaut werden, 20 V/m Qualifikationspegel über den gesamten Frequenzbereich. RTCA empfiehlt auf Basis von [ED130] Testpegel nach Tabelle 1, es ist ebenso möglich das Environment direkt anzuwenden. Wenn Luftfahrtgeräte entsprechend qualifiziert sind, ist eine Störung mit hinreichender Marge ausgeschlossen.

System functional failure condition classification	Distance between T-PED and system LRU ≥ 20 cm	Distance between T-PED and system LRU < 20 cm
Catastrophic	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XW limited to 8 GHz
Hazardous	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR
Major	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR
Required by regulation and not covered above	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR	RTCA DO-160E / EUROCAE ED-14E Section 20 Category XR
Minor and no safety effect and not required by regulation	No requirement	No requirement

TAB 1. Auf Basis vom o.a. Environment empfohlene Qualifikationspegel für Hardware nach RTCA [DO307] entsprechend Cat. R und W nach section 21 der [DO160].

3. PFADVERLUST ZWISCHEN KABINE UND EXTERNEN ANTENNEN

Navigations- und Kommunikationsempfänger und die Überwachungsradare arbeiten in einem Frequenzbereich, der von den Mobilfunkfrequenzen der Kabinenfunkdienste getrennt ist. Die Beeinflussung eines Flugzeugempfangsgeräts durch ein Kabinenfunksignal ist daher nicht zu befürchten. Etwaige Intermodulationsprodukte aus den Funksignalen unterschiedlicher Frequenzbänder sind hinreichend klein und können vernachlässigt werden [DO294]. Eine Trennung zwischen Kabine und Empfängerschnittstelle ist nur wegen der schwachen Rauschsignale erforderlich, die jedes elektronische Gerät einschließlich der Passagiergeräte aussendet. Das Standardisierungskomitee SC-202 der RTCA hat die Richtlinie [DO307] erarbeitet. Auf Basis in den Bändern der NAV/COM-Empfänger gemessener Störemissionen ausgewählter PEDs hat die RTCA Mindestwerte für den Pfadverlust (IPL) zwischen Kabine und Empfängerschnittstelle festgelegt, die mit 95% und 99% Sicherheit von keinem PED überschritten werden.

Flugfunkempfänger	Frequenzband / MHz		Pfadverlust / dB
ADF	0,19	1750	n/a
HF Voice	2	30	n/a
HF Datalink	2	30	n/a
Marker Beacon	75		n/a
ILS Localizer CAT I DH	108	112	40
ILS Localizer (Coverage Limits)	108	112	32
VHF Omnidrange	108	118	30
VHF Voice Communication	118	137	34
ILS Glide Slope (CAT I DH)	329	335	43
ILS Glide Slope Coverage Limits	329	335	38
DME	962	1213	32
TCAS Interrogator Receiver	1090		39
AMS(R)S / SATCOM	1530	1559	47
GNSS L1	1559	1610	58

TAB 2. Auszug aus der [DO307]: erforderlicher Pfadverlust zwischen Flugzeugkabine und Funkempfängerschnittstelle Mit einem Sicherheitsaufschlag für mehrfache Sender

(multiple equipment factor) und unter Berücksichtigung der Empfängerempfindlichkeit ergibt sich daraus der Mindestpfadverlust zwischen Kabine und Empfängerschnittstelle (vgl. Auszugsweise Tabelle IPL), die hier am Beispiel der VHF-Empfänger einer A340-600 [IEEE Boston] deutlich eingehalten werden. Der Zielpfadverlust *IPL* ergibt aus den gemessenen Emissionen *E*, die von 95% für einige Flugfunkempfänger von 99% der gemessenen PED unterschritten werden, einem Multiple-Equipment-Faktor *MEF* der statistische Überlagerungen der von PED ausgesandten Rauschsignale berücksichtigt und der Empfängerempfindlichkeit *S*, vereinfacht zu:

$$(1) \text{ IPL / dB} = (E_{ped} / \text{dB} + \text{MEF} / \text{dB}) - S_{Empf} / \text{dB}$$

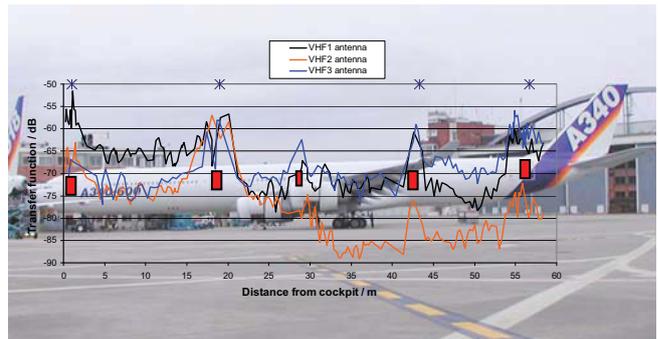


BILD 8. Beispielhaft auf einem Airbus A340-600 gemessene Pfadverluste [BOSTON]. Die Pfadverluste im VHF Band übertreffen die Anforderungen.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag fasst Entwicklungen in EUROCAE und RTCA zur Qualifikation von Flugzeugelektronik gegen Mobilfunksignale zusammen. Zwei Testsignalformen decken eine Vielzahl von Funkstandards ab. Die vorgeschlagenen Testpegel leiten sich aus den Mobilfunkstandards ab. Die Pegel berücksichtigen die Funktion der Avionik und die Distanz zwischen T-PED und Avionik. Airbus hat maßgeblich zur Standardisierung beigetragen und entwickelt folglich mit dem A350XWB ein Flugzeug, für das Funkdienste in der Kabine und Mobiltelefone in den Passagierzonen von vornherein, ohne zusätzliche Nachweise in der Produktion, die Toleranz gegenüber Mobilfunksignalen vorliegt. Die Standardisierungsbeiträge von Airbus haben erheblich zu den Qualifikationsstandards der Avionik und und des Flugzeugs beigetragen, sodass der Betrieb von Funkdiensten an Bord erst möglich und selbstverständlich wird. Wegen der erläuterten Arbeiten und Dokumente der RTCA [DO294],[DO307] und auch der EUROCAE [ED-118],[ED130] räumt die deutsche Luftfahrzeug-Elektronik-Betriebs-Verordnung [LuftEBV] für erwiesenermaßen störfeste Flugzeuge die Möglichkeit, Mobiltelefone und WLAN-Geräte in der Kabine zu benutzen ein. Der A350XWB wird so entwickelt, dass die Toleranz der Avionik gegenüber den Funkdiensten an Bord durch die Musterzulassung abgedeckt wird, und die portablen elektronischen Geräte von den Flugfunkempfängern hinreichend entkoppelt sind.

5. LITERATUR

- [LuftEBV] Luftfahrzeug-Elektronik-Betriebs-Verordnung vom 22. Februar 2008 (BGBl. I 2008 S. 266)
- [DO307] RTCA DO-307, Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance
- [ED130] EUROCAE ED-130, Guidance for the use of Portable Electronic Devices (PEDs) on board Aircraft, Malakoff, 2006
- [DO294] RTCA DO-294, Guidance on Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (T-PEDs) on Aircraft, Washington DC, 2006
- [BOSTON] S. Pötsch, A. Enders, M. Großmann: Reliable Transfer Function Measurements of PED Excitations in Aircrafts, IEEE-EMCS Symposium Boston/Mass., 537-542, 2003
- [EMV2006] R. Keibel: Mobilfunk im Flugzeug und die Konsequenzen für die Qualifikation der Avionik, EMV 2006, 12. internationale Fachmesse und Kongreß für elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf 2004
- [DO160] RTCA DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment

6. ABKÜRZUNGEN

TDMA: Time Division Multiple Access
CDMA: Code Division Multiple Access
CSMA: Carrier Sense Multiple Access
GSM: Global System for Mobile Communication
IPL: Interference Path Loss
MEF: Multiple Equipment Factor
PED: Portable Electronic Device
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
T-PED: Transmitting PED