

# 1 Einleitung

Elektronische Geräte sind aus der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken und spielen im täglichen Leben eine zentrale Rolle. Durch die stetig steigende Anzahl elektronischer Geräte, die wachsende Packungsdichte der einzelnen Komponenten, die sinkenden Spannungslevel und immer hochfrequenten Datenübertragungen steigt die Gefahr einer elektromagnetischen Beeinflussung dieser Geräte untereinander. Es ist daher zwingend erforderlich, die EMV<sup>3</sup> dieser Produkte sicherzustellen. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Geräten nutzt Funktechnologien, um Daten auszutauschen, wobei bewusst elektromagnetische Wellen abgestrahlt werden. Diese Signale werden nicht nur von dem Empfänger einer Funkverbindung empfangen, sondern können auch in andere Systeme einkoppeln. Gerade in einer Flugzeugkabine kann es aufgrund der hohen Anzahl potentieller Störquellen auf engem Raum zu Problemen mit sicherheitskritischen Systemen des Flugzeugs kommen.

Die ständige Verfügbarkeit von Informationen jeglicher Art und die Möglichkeit, durchgehend erreichbar zu sein und im Gegenzug auch andere erreichen zu können, ist für viele Menschen zu einem sehr wichtigen Gut geworden. Durch die ständig fortschreitende Entwicklung im Bereich der mobilen Kommunikation, sprachgebunden oder über das Internet, eröffnen sich dem Nutzer viele Möglichkeiten. Neben leitungsgebundenen Übertragungswegen wie dem (analogen) Telefonanschluss, der ISDN<sup>4</sup>-Leitung oder dem kabelgebunden Breitbandinternet (DSL<sup>5</sup>) gewinnen funkbasierte Übertragungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Sind die ersten Generationen von Mobiltelefonen noch unhandlich und extrem teuer gewesen, genießen die sogenannten Smartphones, Mobiltelefone mit vielfältigen Sonderfunktionen wie dem Zugang zu Internetseiten, E-Mails und automatisch synchronisierten Kalendern, heute eine weite Verbreitung.

Durch die massenhafte Verbreitung mobiler elektronischer Geräte und die ständig sinkenden Kosten zum Zugang von Informationsquellen ist es möglich, an nahezu jedem Ort dieser Erde

---

<sup>3</sup> EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit, beschreibt die oft ungewollte wechselseitige Beeinflussung elektrischer Geräte über elektrische oder elektromagnetische Effekte

<sup>4</sup> ISDN: Integrated Services Digital Network, ein internationaler Standard für ein digitales Telekommunikationsnetz

<sup>5</sup> DSL: Digital Subscriber Line, ein Übertragungsstandard der Bitübertragungsschicht für Datenübertragungen über Kupferleitungen

rund um die Uhr Zugriff auf seine E-Mails, das Internet, Firmendatenbanken, etc. zu erhalten sowie über Telefon und Mobilfunk mit anderen Menschen in Verbindung zu bleiben. Die mobile Kommunikation erfolgt meistens drahtlos über verschiedene Funkdienste, die sich unter anderem in Betriebsfrequenz, Modulationsverfahren, Sendeleistung sowie Reichweite und Datenrate unterscheiden. Auch die Computertechnik unterliegt einem raschen Fortschritt. Note- und Netbooks werden immer kleiner, leistungsfähiger und lassen sich längere Zeit ohne Stromanschluss zu betreiben. Auch hier gibt es den Bedarf, immer und überall Zugang zu den verschiedensten Informationsquellen zu erhalten.

Die gebräuchlichsten Verfahren zur kabellosen Datenübertragung sind WLAN sowie GSM / UMTS<sup>6</sup>. Diese Funkdienste lassen sich auch innerhalb einer Flugzeugkabine realisieren und ermöglichen über eine Satellitenverbindung den Zugriff auf das weltweite Datennetz. Diese Datenübertragungsverfahren beruhen auf Funkverbindungen, es wird bewusst elektromagnetische Energie abgestrahlt und empfangen. Die abgestrahlte Energie koppelt dabei nicht nur in die Empfangsantenne ein, sondern auch in beliebige sich in der Umgebung befindende Systeme. Diese unbeabsichtigt beaufschlagten Systeme dürfen durch die Einkopplung nicht beeinträchtigt werden.

Die vorliegende Arbeit stellt Möglichkeiten dar, wie der störungsfreie Betrieb der Bordelektronik auch während des Betriebes von Mobilfunkgeräten (TPEDs<sup>7</sup>) sichergestellt werden kann.

## 1.1 Problemstellung

Es gibt einen stetig wachsenden Bedarf, jederzeit Zugang zu verschiedenen Kommunikations- und Datendiensten zu haben. Am Boden gibt es eine sehr gute Abdeckung für mobile Endgeräte über die GSM- und UMTS-Netze. Zudem ist es möglich, über sogenannte Hotspots über WLAN-Verbindungen mobile Datenverbindungen aufzubauen. In dicht besiedelten Gebieten kann so der Bedarf an mobiler Kommunikation in der Regel bedient werden.

---

<sup>6</sup> UMTS: Universal Mobile Telecommunications System, ein Mobilfunkstandard mit höheren Datenraten als GSM

<sup>7</sup> TPED: Transmitting Portable Electronic Devices, elektronisches Handgerät mit Sendefunktion

Gerade während eines Langstreckenfluges, etwa von Europa nach Amerika, befindet sich das Flugzeug die meiste Zeit außerhalb der Reichweite von Mobilfunknetzen. Insbesondere während der langen Flugzeit besteht aber ein Bedarf, das Internet zu nutzen, um zum Beispiel E-Mails zu schreiben oder Nachrichten zu lesen. Technisch möglich ist dies beispielsweise über einen WLAN-Accesspoint, der an Bord betrieben wird und über eine Satellitenverbindung, die Daten zu Basisstationen auf der Erde schickt.

Die Nutzung von GSM-basierten Diensten ist zwar theoretisch beim Überfliegen von entsprechend ausgebauten Gebieten möglich, jedoch ist die zu erwartende Verbindungsqualität sehr gering, da die Flugzeuge sich wesentlich schneller über die Mobilfunkmasten bewegen als die in der Spezifikation für GSM vorgesehenen 250 km/h. Zudem sind die Netzbetreiber daran interessiert, Verbindungen zwischen Mobiltelefonen im Flugzeug und terrestrischen Basisstationen zu unterbinden, da diese Mobiltelefone hindernisfreie Sichtverbindungen zu weit entfernten Basisstationen haben und sich so auch mit Basisstationen verbinden können, zu denen auf dem Boden kein Kontakt bestehen würde, was zu Störungen in den terrestrischen Netzen führen kann. Abhilfe kann hier eine in das Flugzeug integrierte Basisstation schaffen, die Verbindungen zu terrestrischen Stationen unterbindet und die Gespräche und Daten über eine Satellitenverbindung weiterleitet.

Die technischen Voraussetzungen für die mobile Kommunikation auch während eines Fluges sind gegeben. Da die Sicherheit gerade in der Luftfahrt einen sehr hohen Stellenwert einnimmt, stellt die Funkkommunikation in der Kabine eine besondere Herausforderung dar. Die EMV der Flugzeugelektronik mit den TPEDs muss gewahrt werden und im Vorwege am Boden durch geeignete Maßnahmen nachgewiesen werden. Um diesen Nachweis erbringen zu können, ist es nötig, standardisierte Prüfvorschriften zu definieren, die das mögliche Bedrohungspotential der sogenannten TPEDs möglichst realitätsnah und reproduzierbar nachstellen. Es existieren bereits mehrere Normen, die in der Avionik Gültigkeit besitzen und Prüfvorschriften zur Zulassung des Betriebes von Mobilfunkgeräten im Flugzeug auch während des Fluges enthalten. Diese Dokumente unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung. Die Prüfung der elektronischen Flugzeugsysteme wird hierbei überwiegend im EMV-Labor durchgeführt, wobei jedes Gerät einzeln getestet wird. Hierbei wird die Störbeaufschlagung der Systeme nachgestellt, so wie sie durch den Betrieb von Mobilfunkgeräten in der Nähe dieser Systeme auftreten kann. Um diese existierenden Prüfvorschriften sowie das eventuell vorhandene Bedrohungspotential für die Flugzeugelektronik beurteilen zu können, werden die in den Normen abgebildeten

Prüfbedingungen in dieser Arbeit unter Laborbedingungen detailliert nachgestellt und unter umfangreicher Variation verschiedener Parameter auf potentielle Probleme bei der Störbeaufschlagung hingewiesen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Störbeaufschlagung des Prüflings im Nahfeld des Senders. Dieses Szenario ergibt sich beispielsweise, wenn ein Passagier in unmittelbarer Nähe zu einem elektronischen Flugzeugsystem sein Handy betreibt. Durch die Wechselwirkung zwischen der Umgebung und der Antenne des Senders wird dessen Charakteristik beeinflusst, die Abstrahleigenschaften ändern sich. Zudem wird der Prüfling lokal einer relativ hohen Feldstärke ausgesetzt, die zu Fehlfunktionen führen kann. In den aktuellen Normen sind Störfestigkeitstests unter Nahfeldbedingungen nur teilweise integriert, deshalb finden diese Tests eine besondere Beachtung.

Ferner stellt die Flugzeugkabine eine äußerst komplexe Umgebung für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen dar. Durch Reflexionen an der elektrisch leitfähigen Außenhülle sowie am Kabinenausbau kommt es zu Mehrwegeausbreitung und zur Überlagerung vieler Wellen. Andere Materialien, wie beispielsweise Kunststoffe oder Materialien mit eher geringer elektrischer Leitfähigkeit wirken sich dämpfend auf das sich ausbreitende Wellenfeld aus. Um die Flugzeugkabine mit ihren elektromagnetischen Eigenschaften zu verstehen, wird die Feldausbreitung innerhalb der Kabine vermessen und in Relation zur Freifeldausbreitung gesetzt.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Darstellung des aktuellen Standes der Technik in Kapitel 2. Hier werden die technischen Möglichkeiten der Funkkommunikation in der Flugzeugkabine dargestellt sowie wichtige rechtliche und normative Regelungen vorgestellt. Kapitel 3 stellt die Grundlagen der für diese Arbeit wichtigen physikalischen Phänomene, die elektromagnetische Feldtheorie, vor. Schwerpunkte bilden die elektromagnetische Wellenausbreitung sowie Resonanzeffekte elektrisch leitfähiger Hohlräume und Antennen. Es folgt in Kapitel 4 eine Einführung in die Schirmung elektromagnetischer Wellen, wobei der Einfluss von Diskontinuitäten im Schirmmaterial dargestellt sowie ein analytisches Modell zur Berechnung von Schirmgehäusen einfacher Geometrie hergeleitet werden. Die elektromagnetischen Ausbreitungsbedingungen in einer Flugzeugkabine werden in Kapitel 5 erstmalig mit hoher lokaler Auflösung (Messraster  $\leq 1/10$  der betrachteten Wellenlänge) bei mobilfunktechnischen Frequenzen messtechnisch erfasst und analysiert. Auf diesen

---

Ergebnissen aufbauend wird eine Schirmkabine derart modifiziert, dass die elektromagnetischen Ausbreitungsbedingungen in der Kabine denen in einer Flugzeugkabine in guter Näherung entsprechen. Anhand von Messungen in der modifizierten Kabine wird ein neues Verfahren vorgestellt, wie anhand von orts aufgelösten Feldstärkemessungen auf den Q-Faktor geschlossen werden kann.

Die Bestimmung der abgestrahlten Leistung einer Antenne bei strahlungsgebundenen Störfestigkeitstests ist sehr komplex, da die Rückwirkung der Strukturen in der Nähe der Antenne diese stark beeinflussen kann. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 6 erörtert und gezeigt, dass eine in der aktuellen Normung vorgeschlagene Testprozedur nicht angewandt werden kann. Eine Empfehlung zur Optimierung dieser Testprozedur wird gegeben.

Kapitel 7 widmet sich der Kopplung elektromagnetischer Wellen durch Aperturen, wobei speziell der Einfluss der Antennenposition und Orientierung auf den Koppelpfad aufgezeigt wird. Darauf aufbauend werden in Kapitel 8 neu entwickelte Messverfahren vorgestellt, um orts aufgelöst im Inneren von Schirmgehäusen die Feldverteilung messtechnisch erfassen zu können. Um die elektromagnetischen Koppelvorgänge in ein komplexes elektronisches System zu bestimmen, wird in Kapitel 9 ein kommerzielles Ethernet-Switch einem elektromagnetischen Wellenfeld unter Nah- und Fernfeldbedingungen ausgesetzt und die Einkopplung messtechnisch aufgenommen. Simulationsdaten verifizieren die Messungen. Mit einer Zusammenfassung schließt diese Arbeit.



## 2 Stand der Technik

An Bord von Flugzeugen wird eine Vielzahl elektronischer Geräte verwendet, um den sicheren Betrieb des Flugzeuges zu gewährleisten. Es muss sichergestellt werden, dass diese Geräte gemäß ihrer Spezifikationen arbeiten, ohne andere Geräte in ihrer Umgebung zu stören und ohne selbst gestört zu werden.

Jedes Land regelt über Gesetze, ob und in welchem Umfang der Betrieb von Mobilfunkgeräten in dem Luftraum des jeweiligen Landes gestattet ist. In Deutschland wird dies über das Luftverkehrsgesetz [1] und die Luftfahrzeug-Elektronik-Betriebsverordnung [2] geregelt.

Zwei große Organisationen entwickeln in enger Zusammenarbeit Standards und Richtlinien zur Sicherstellung der EMV von Flugzeugen. Die RTCA<sup>8</sup> ist eine Vereinigung mit Sitz in den USA und entwirft als föderale Gutachterkommission Empfehlungen, die durch die US-amerikanische Bundesluftfahrtbehörde FAA<sup>9</sup> sowie private Firmen übernommen werden können. In Europa wird diese Aufgabe durch die EUROCAE<sup>10</sup> wahrgenommen. Die EUROCAE veröffentlichte im Dezember 2006 eine Richtlinie für die Benutzung von portablen elektronischen Geräten in Flugzeugen, die „Guidance for the Use of Portable Electronic Devices (PEDs) on Board Aircraft” (EUROCAE ED-130) [6], in welcher zwei unterschiedliche Prüfverfahren zur Sicherstellung der elektromagnetischen Störfestigkeit von elektronischen Geräten, die im Flugzeug installiert und betrieben werden, vorgeschlagen werden. Da wesentliche Aspekte dieser Dissertation auf den Prüfvorschriften der ED-130 basieren, wird dieses Dokument in Kapitel 2.3 detailliert vorgestellt.

Weitere der Dokumente werden in Zusammenarbeit entwickelt. So entspricht die EUROCAE ED-14 [3] der RTCA DO-160 [4]. Die RTCA veröffentlichte im Dezember 2007 Version F der "Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment" [4]. Die DO-160F beschreibt Umgebungsbedingungen und Testverfahren für Luftfahrtsysteme. Abschnitt 20 umfasst die Störfestigkeit gegen feldgebundene Hochfrequenzfelder.

---

<sup>8</sup> RTCA: Radio Technical Commission for Aeronautics

<sup>9</sup> FAA: Federal Aviation Administration

<sup>10</sup> EUROCAE: European Organization for Civil Aviation Equipment