1 Einleitung

Die Übertragung von Informationen ist aus unserer heutigen Gesellschaft nicht mehr fortzudenken. Typische Anwendungen wie Fernsehen, Internet, Radio oder Telefonie gehören zu unserem industrialisierten Lebensstandard im Alltag und werden immer weiter in Heim-, Büro- und Industriebereichen ergänzt sowie ausgeweitet. Dabei bietet die Anwendung von drahtlosen Übertragungssystemen eine hohe Flexibilität sowie Unabhängigkeit beim Zugriff auf Informationen, wodurch inzwischen viele drahtgebundene Übertragungssysteme durch drahtlose Übertragungssysteme ersetzt werden. Besonders gewinnen für einen Wechsel zu drahtlosen Übertragungssystemen die Argumente des steigenden Kostendrucks in der Entwicklung sowie steigende globale Rohstoffpreise immer mehr an Bedeutung. Darüber hinaus wird bei Verkehrssystemen wie Flugzeugen, Bahnen und Schiffen durch den Einsatz drahtloser Übertragungstechniken neben Planungs-, Installations- und Materialkostenreduktion auch eine wichtige Verringerung des Gewichts erreicht. Im modernen deutschen Passagierschiffbau werden momentan pro verlegtem Kabelmeter Kosten in Höhe von 70 bis 80 € geschätzt [1, 2], die durch den Einsatz drahtloser Übertragungssysteme reduziert werden können. Dieses Beispiel lässt sich auch auf andere Bereiche aus Heim-, Büro- und Industrieanwendungen ausweiten und steigert die Notwendigkeit am Einsatz drahtloser Übertragungssysteme. Vom besonderen Interesse sind dabei drahtlose Übertragungssysteme, welche eine global einheitliche Standardisierung aufzeigen, um diese Systeme weltweit ohne Einschränkungen nutzen zu können. Eventuelle nationale Insellösungen werden dadurch vermieden und der hohe Verbreitungsgrad garantiert niedrige Systemkosten. Insbesondere eignen sich dazu drahtlose Übertragungssysteme aus den ISM[1]-Frequenzbändern, wobei primär digitale Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband durch eine weltweit lizenzfreie Nutzung schon Einsatz in der Automatisierungstechnik finden [3, 4, 5, 6].

Durch den Einsatz von drahtlosen Übertragungssystemen nehmen die Anforderungen an die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV[2]) unweigerlich zu. Das Grundgerüst der

[1] ISM - *Industrial, Scientific, Medical*

[2] Die EMV beschreibt im Allgemeinen *„die Fähigkeit eines Apparates, einer Anlage oder eines Systems, in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für alle in dieser Umwelt vorhandenen Apparate, Anlagen oder Systeme unannehmbar wären“* [7].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

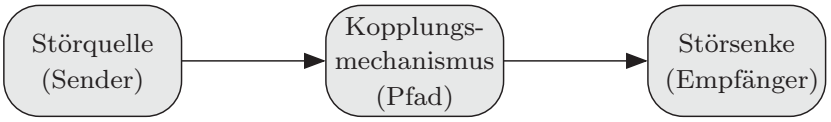

Abbildung 1.1: *Beeinflussungsmodell der EMV*

EMV wird durch das Beeinflussungsmodell der EMV beschrieben und ist als Blockschaltbild in Abbildung 1.1 dargestellt. Dieses Modell stellt abstrakt die Relation zwischen einer Störquelle (Sender) und einer Störsenke (Empfänger) über verschiedene Kopplungsmechanismen dar.

Im Gegensatz zu kabelgebundenen Übertragungssystemen besitzen drahtlose Übertragungssysteme eine Antenne zum bewussten Senden und Empfangen elektromagnetischer Energie im Übertragungsfrequenzbereich. Auch drahtlose digitale Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband stellen daher eine besondere Störquelle und Störsenke dar. Die Behandlung als Störquelle zur möglichen Beeinflussung benachbarter elektronischer Systeme ist für den allgemeinen Schiffbau innerhalb von [1, 8, 9, 10] ausführlich behandelt worden und kann auch auf andere Einsatzbereiche übertragen werden. Darüber hinaus finden sich weitere EMV-Aspekte digitaler Datenübertragungssysteme in [11].

Neben der Beeinflussung anderer elektronischer Systeme in direkter Umgebung von drahtlosen Übertragungssystemen sind die Auswirkungen elektromagnetischer Störungen auf drahtlose Übertragungssysteme von besonderem Interesse und Gegenstand vieler Untersuchungen zur Störempfindlichkeit [12]. Gegenüber der schon viel behandelten Interaktionen durch konkurrierende drahtlose Übertragungssysteme innerhalb des 2,4-GHz-ISM-Frequenzbandes selbst (z.B. [13, 14, 15, 16]) ist auch der Einfluss weiterer elektromagnetischer Störquellen äußerst wichtig für eine zuverlässige Funktion der Übertragung. Je nach Einsatzumgebung können dies unterschiedliche Störquellen darstellen. Beispielsweise ist die im Heimgebrauch benutzte Mikrowelle eine potentielle Störquelle für das 2,4-GHz-ISM-Frequenzband und kann die Datenübertragung bei drahtlosen Übertragungssystemen wie Bluetooth und Wireless LAN beeinflussen [17, 18, 19].

Durch die EMV-Analyse drahtloser Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband bei der Nutzung an Bord von Schiffen [1, 2, 9, 10] hat sich gezeigt, dass sich in der EMV-Umgebung „Schiff“ das bord-eigene sowie bord-fremde Navigationsradar als eine leistungsstarke elektromagnetische Störquelle besonders hervorhebt. Dazu gibt Abbildung 1.2 die vermessene elektrische Spitzenfeldstärke auf der Brücke eines modernen Kreuzfahrtschiffes wieder und zeigt das S-Band-Radar bei 3 GHz sowie das X-Band-Radar bei 9,4 GHz als größte Störquellen im Frequenzbereich bis 10 GHz. Die möglichen Einflüsse dieser leistungsstarken Störquellen auf drahtlose Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband sind jedoch bisher wenig untersucht worden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

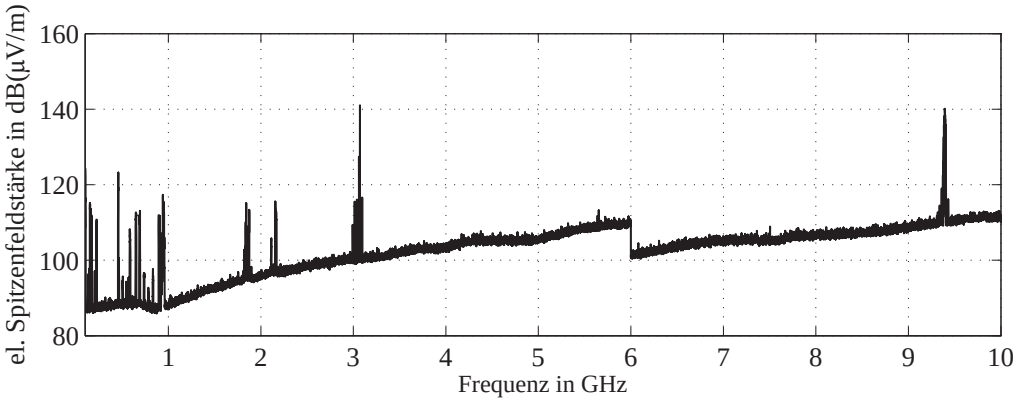

Abbildung 1.2: *Elektrische Spitzenfeldstärke auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffes*

So sind in [1, 9, 10] erste Beeinflussungen von drahtlosen Übertragungssystemen aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband durch diese Navigationsradare zu finden, welche jedoch nicht bei einer Variation verschiedener Parameter (elektrische Spitzenfeldstärke, Pulsdauer und Pulswiederholfrequenz) untersucht worden sind. In [20] wird weiterhin bestätigt, dass auch militärische Radare einen wesentlichen Einfluss auf drahtlose Übertragungssysteme haben können.

Der stetig steigende technologische Fortschritt hat darüber hinaus eine Vielzahl von weiteren potentiellen leistungsstarken elektromagnetischen Störquellen [21, 22] hervorgebracht, die vor allem in militärischen Anwendungen Einsatz finden und auch in der Lage sind, drahtlose Übertragungssysteme gewollt und ungewollt zu stören bzw. zu beeinflussen. Besonders auf die Gefahr der bewusst herbeigeführten elektromagnetischen Störung von elektronischen Systemen wird in [23] hingewiesen und allgemein unter dem Begriff Intentional EMI (IEMI[3]) beschrieben. Diese leistungsstarken elektromagnetischen Störungen haben einen erkennbaren Einfluss auf elektronische Systeme und sind Gegenstand vieler Forschungsvorhaben [24, 25, 26, 27]. Eine Untersuchung dieser leistungsstarken elektromagnetischen Störquellen auf drahtlose Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband hat bisher jedoch nicht stattgefunden.

Das Ziel dieser Arbeit ist das Aufzeigen und die Analyse der auftretenden Effekte, die durch leistungsstarke elektromagnetische Störquellen in drahtlosen Übertragungssystemen hervorgerufen werden. Es soll Auskunft darüber gegeben werden können, inwieweit sich typische drahtlose Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband unter Beeinflussung durch leistungsstarke elektromagnetische Störquellen verhalten. Besonders soll dabei auf die Variation einzelner Störquellenparameter eingegangen werden.

[3] Der Begriff IEMI ist im August 1999 auf der Generalversammlung der URSI (Union Radio-Scientifique Internationale) in Toronto definiert worden („*Resolution of Criminal Activities using Electromagnetic Tools*“) und beschreibt die Fähigkeit, elektronische Komponenten und Systeme gewollt durch elektromagnetische Energie für terroristische oder kriminelle Zwecke zu beeinflussen, zu beschädigen oder zu zerstören.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.1 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen der drahtlosen Datenübertragung und stellt dabei besonders die digitale Datenübertragung mit ihren allgemeinen Grundlagen sowie besonderen Anwendungsbereichen im 2,4-GHz-ISM-Frequenzband vor.

In Kapitel 3 wird eine Übersicht leistungsstarker elektromagnetischer Störquellen vorgestellt, die als Feldimpulsquellen eine potentielle Beeinflussung von drahtlosen Übertragungssystemen hervorrufen können. Dabei wird neben transienten auch auf periodische leistungsstarke Störquellen eingegangen und mit den jeweiligen beschreibenden Parametern erläutert.

Kapitel 4 behandelt die Untersuchung der elektromagnetischen Kopplung der im Kapitel 3 vorgestellten leistungsstarken Störquellen in drahtlose Übertragungssysteme und stellt die verwendeten leistungsstarken elektromagnetischen Feldimpulsquellen mit den verwendeten Untersuchungsumgebungen vor. Es werden die Kopplungspfade in drahtlose Übertragungssysteme untersucht und eine Abschätzung der eingekoppelten Störsignale gegeben.

Mit den Ergebnissen zur Einkopplung leistungsstarker elektromagnetischer Störquellen werden anschließend in Kapitel 5 die Auswirkungen auf das Basisband von drahtlosen Übertragungssystemen analysiert und die Ergebnisse dargestellt. Dabei werden mit Hilfe eines Quadraturdemodulators für das 2,4-GHz-ISM-Frequenzband die Einflüsse auf das demodulierte Bandpasssignal bei Beeinflussung durch die eingekoppelten Störsignale untersucht. Abschließend werden auf Basis eines grundlegenden Übertragungssystems für das 2,4-GHz-ISM-Frequenzband die Untersuchungen der Auswirkungen leistungsstarker elektromagnetischer Störungen ausgeweitet.

Kapitel 6 gibt die Untersuchungen der Einflüsse auf kommerzielle drahtlose Übertragungssysteme wieder und beschreibt die Auswirkungen auf typische Übertragungssysteme wie Wireless LAN und Bluetooth bei Variation diverser Parameter der einkoppelnden Störquellen. Ergänzend zu diesen Ergebnissen werden anschließend durch die Nachbildung der Störung mit einer periodischen Unterbrechung der Verbindung die Untersuchungen auf kommerzielle drahtlose Übertragungssysteme erweitert. Abschließend werden mögliche Schutzkonzepte zur Reduzierung der Beeinflussungen angesprochen.

Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen des Einflusses leistungsstarker elektromagnetischer Störungen auf drahtlose digitale Übertragungssysteme aus dem 2,4-GHz-ISM-Frequenzband zusammen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Drahtlose Datenübertragung

Die drahtlose Datenübertragung beschreibt die Übertragung von Informationen durch Ausnutzung elektromagnetischer Wellen per Funktechnologie. Die Grundlagen für die drahtlose Übertragung lieferte James Clerk Maxwell durch seine postulierten Maxwell'schen Gleichungen im Jahre 1864 [28]. Während Heinrich Hertz den Nachweis elektromagnetischer Wellen und damit den Beweis der Gültigkeit der Maxwell'schen Gleichungen lieferte, gelang es Guglielmo Marconi als Pionier der drahtlosen Datenübertragung am Ende des 19. Jahrhunderts, die erste drahtlose Datenübertragung zu realisieren. Im Laufe des 20. Jahrhunderts ist diese Technik stetig weiter entwickelt worden und findet heutzutage Einsatz in einer Vielzahl von drahtlosen Anwendungen.

Neben lizenzierten drahtlosen Übertragungssystemen, wie z.B. der Mobiltelefonie (GSM[1] und UMTS[2]) oder dem Radio- und Fernsehempfang, sind besonders im privaten und industriellen Umfeld die lizenzfreien drahtlosen Übertragungssysteme in ISM-Frequenzbändern weit verbreitet. ISM-Frequenzbänder bezeichnen Frequenzbereiche, welche für die *„Nutzung elektromagnetischer Wellen durch Geräte oder Vorrichtungen für die Erzeugung und lokale Nutzung von Hochfrequenzenergie für industrielle, wissenschaftliche, medizinische, häusliche oder ähnliche Zwecke“* [29] verwendbar sind und weltweit durch die „Internationale Fernmeldeunion für den Sektor Radiokommunikation“ (ITU-R) festgelegt werden. Eine Übersicht der in Deutschland durch die Allgemeinzuteilung der Bundesnetzagentur (BNetzA) zur Verfügung stehenden ISM-Frequenzbänder gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: *Zur Nutzung freigegebene ISM-Frequenzbänder in Deutschland [29]*

9 kHz bis 10 kHz
13,553 MHz bis 13,567 MHz
26,957 MHz bis 27,283 MHz
40,66 MHz bis 40,70 MHz
433,05 MHz bis 434,79 MHz
2400 MHz bis 2500 MHz
5725 MHz bis 5875 MHz
24 GHz bis 24,25 GHz

[1] GSM - *Global System for Mobile Communications*
[2] UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System*

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.