

Adrien Schoof

Entwicklung und Untersuchung von  
2,4-GHz-ISM-Funksystemen für  
Schiffsbrücken unter besonderer  
Berücksichtigung der EMV



Cuvillier Verlag Göttingen

# Entwicklung und Untersuchung von 2,4-GHz-ISM-Funksystemen für Schiffsbrücken unter besonderer Berücksichtigung der EMV

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von Diplom-Physiker  
Adrien Schoof  
aus Hamburg

2007

## **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-292-6

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. J. L. ter Haseborg

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. A. F. Jacob

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Mai 2007

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2007

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-292-6

**Danksagung:**

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Messtechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein besonderer Dank gilt zuerst Herrn Prof. J. L. ter Haseborg für die Betreuung dieser Arbeit, die anregenden Ideen, Diskussionen und Hinweise sowie für die sehr guten Arbeitsbedingungen.

Für die Übernahme des Korreferats sowie sein Interesse an der vorliegenden Arbeit danke ich Herrn Prof. A. F. Jacob; Herrn Prof. Krautschneider danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss.

Meinen Kollegen danke ich für die angenehme und kooperative Atmosphäre. Besonderer Dank gilt dabei den Herren Dipl.-Ing. T. Stadtler und K. Haake für die vielen Diskussionen sowie die Unterstützung bei der Realisierung der Messaufbauten.

Ebenfalls danke ich allen studentischen Hilfskräften, Studienarbeitern und Diplomanden, die im Rahmen ihrer Tätigkeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonderer Dank gilt weiterhin der Meyer Werft, die durch das umfangreiche und unkomplizierte Bereitstellen von Mess- und Installationsmöglichkeiten auf Schiffen maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat.

Weiterer Dank gilt den Firmen SAM Electronics GmbH und ThyssenKrupp Marine Systems sowie den Reedereien Scandlines und TT-Line.

Schließlich danke ich meiner Freundin Ellen sowie meinen Eltern für ihre unermüdliche Geduld und Unterstützung während meiner gesamten Tätigkeit.



## **Zusammenfassung:**

In den vergangenen Jahren haben sich im Bereich der Unterhaltungs- und Datenverarbeitungselektronik zunehmend drahtlose Datenübertragungsstandards durchgesetzt. Insbesondere der Bluetooth- sowie der WLAN-Standard haben in unterschiedlichsten Aufgabenbereichen einen hohen Verbreitungsgrad erreicht. Sie ersetzen dabei nicht nur umständliche und teure Kabel, sondern bilden auch eine neue Generation von Schnittstellen zwischen bisher nicht zu vernetzenden Geräten.

Aufgrund der großen im Schiffbau verwendeten Kabellängen sowie der hohen Kabeldichten im Bereich der Schiffselektronik erscheint es sinnvoll, auch in diesem Anwendungsbereich drahtlose Datenübertragungseinrichtungen einzusetzen. Eine deutliche Reduktion der Verkabelungskosten, wie auch eine im Vergleich zur klassischen Verkabelung deutlich erhöhte Flexibilität bei der Installation sowie der Um- und Nachrüstung wären die Vorteile. Wesentlich für einen Einsatz drahtloser Technologien im Schiffbau ist dabei die Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der Zuverlässigkeit der eingesetzten Funkübertragungsmodule im Umfeld „Schiff“. Wegen der hohen Anzahl der vorliegenden Funkdienste, der elektromagnetischen Besonderheiten der überwiegend metallischen Grundstruktur und der hohen Anzahl an Mess- und Anzeigeeinrichtungen sowie an steuerungs- und regelungstechnischen Komponenten stellen Schiffe einen besonderen Anwendungsbereich dar.

In der vorliegenden Arbeit werden kommerziell erhältliche Bluetooth- und WLAN-Funkübertragungsmodule auf ihre Eignung zum Kabelersatz im Schiffbau insbesondere auf Schiffsbrücken untersucht. Hierzu werden umfangreiche Untersuchungen der elektromagnetischen Verträglichkeit der Module präsentiert. So wurden detaillierte Messungen der Emission elektromagnetischer Strahlung von Funkübertragern, der Überlagerung der entstehenden Frequenzspektren mit denen anderer Quellen sowie Messungen und Simulationen der Einkopplung der Strahlung in leitfähige Strukturen durchgeführt. Gleichzeitig fand eine ausführliche Charakterisierung des elektromagnetischen Umfelds auf Schiffen statt. Zu diesem Zweck wurde an Bord von Kreuzfahrt-, Fähr-, Fracht- und Marineschiffen die vorhandene Hintergrundstrahlung gemessen und analysiert.

Von besonderem Interesse ist die Störfestigkeit von Funkübertragungssystemen unter dem Einfluss von Radaranlagen. Hierzu fanden Untersuchungen an Bord von Schiffen sowie an stationären Radarsystemen statt. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse sowie der besonderen Anforderungen, wurden weiterführende Untersuchungen zur Störfestigkeit sowie zu den Datenübertragungseigenschaften an kommerziell erhältlichen Funkübertragern durchgeführt. Schließlich wurden für Demonstrationszwecke sowie zum Langzeittest unterschiedliche drahtlose Anzeigen sowie Testsysteme entwickelt. Diese wurden an Bord von Fähr- und Kreuzfahrtschiffen installiert und während mehrwöchiger Werftprobe- und Fährfahrten getestet.

Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung des Anwendungsbereichs „Schiff“ (Schiffsbrücke) sowie der unterschiedlichen Anwendungsszenarien diskutiert. Weiterhin werden Anforderungen für eine serienmäßige Implementierung im Schiffbau dargelegt.

Die gewonnenen Forschungs- und Entwicklungsergebnisse lassen sich entsprechend auch auf andere Verkehrssysteme übertragen.

### **Abstract:**

During the past years, different standards for wireless data transmission have established themselves within consumer electronics. Particularly Bluetooth and WLAN have achieved a high degree of utilization. Not only these standards replace obstructive cabling but also they build up a new generation of interfaces between different, up to now unconnectable devices.

Due to the high cable lengths within ships and the high cable densities within the ships electronics, it seems reasonable to replace data cables by wireless transmission devices. A cost reduction as well as an increased flexibility during the installation process and the retrofit compared to conventional cabling would be the advantage. Essential for the use of wireless data transmission technologies is the observance of the electromagnetic compatibility (EMC) of the modules used. Due to the high number of present radio services, the mainly metallic structures as well as the high number of gauges, displays and controls, ships form a unique environment.

This work examines commercial Bluetooth and WLAN modules in regard to their qualification as a cable replacement on ships, particularly on ship bridges. For this, detailed measurements of the electromagnetic compatibility of the modules are presented. For example, measurements of the emission of modules, of the field superposition as well as measurements and simulations of the coupling of the radiation into conductive structures have been performed. Simultaneously a detailed characterization of the electromagnetic environment on ships took place. To this, measurements of the electromagnetic spectra have been performed on board of ferry-, marine-, cargo- and cruise ships. Further measurements on radar stations have been made in harbors, during cruise and close to stationary units. Considering the results, additional measurements on the immunity as well as on the data transmission characteristics of the modules have been performed. Finally wireless displays and test systems have been developed for demonstration and testing purposes and were installed on board of ferry- and cruise ships. During different functional tests and long term installations the reliability and particularly the EMC of the wireless connections have been tested.

The obtained results are discussed, taking into account the application area “ship”. Furthermore demands considering an implementation in the shipbuilding are stated.

The results of the research and the developments made can be transferred on other transport systems.

---

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemstellung.....	1
1.2. Gliederung der Arbeit.....	2
<b>2. Konventionelle, leitungsführte Datenübertragung auf Schiffsbrücken.....</b>	<b>4</b>
2.1. Datenübertragung auf Schiffsbrücken.....	4
2.2. Kabel und Kabelkategorien.....	8
2.3. Datenprotokolle.....	10
<b>3. Drahtlose Datenübertragung.....</b>	<b>12</b>
3.1. Vor- und Nachteile gegenüber Kabelverbindungen.....	12
3.2. Arten und Standards drahtloser Datenübertragungssysteme.....	14
3.2.1. Bluetooth.....	14
3.2.2. WLAN.....	18
3.2.3. HiperLAN, HomeRF.....	20
3.2.4. ZigBee.....	20
3.2.5. Powerline Communication.....	22
3.2.6. DECT.....	23
3.2.7. IrDA.....	23
3.2.8. Übersicht.....	24
3.3. Regulierung nationaler und internationaler ISM-Bänder.....	25
3.4. Anforderungen an drahtlose Datenübertrager.....	27
3.5. Eingrenzung der Funkübertragungstechniken.....	27
<b>4. Wechselwirkung zwischen Funkübertragern und ihrer Umgebung.....</b>	<b>30</b>
4.1. Emission von Funkübertragungsmodulen.....	31
4.1.1. Messung der feldgeführten Emission von USB- und PCMCIA-Modulen.....	31
4.1.2. Messung der feldgeführten Emission von seriellen Modulen.....	38
4.1.3. Messung der kabelgeführten Emission von Funkübertragungsmodulen.....	40
4.2. Ausbreitung von 2,4-GHz-Funksignalen.....	43
4.3. Messung der Überlagerung von Funksignalen.....	47
4.3.1. Messung der Überlagerung von Bluetoothsignalen.....	48
4.3.2. Messung der Überlagerung von Bluetooth- und WLAN-Signalen.....	52
4.3.3. Messung der Kollisionswahrscheinlichkeiten.....	53
4.4. Einkopplung der Funksignale in leitfähige Strukturen.....	57
4.4.1. Grundlagen der Leitungstheorie.....	58
4.4.2. Grundlagen der Momentenmethode.....	61
4.4.3. Messungen und Simulationen im Fernfeld einer Quelle.....	64
4.4.4. Messungen und Simulationen im Nahfeld einer Quelle.....	67

---

<b>5. Drahtlose Datenübertragung auf Schiffsbrücken.....</b>	<b>75</b>
5.1. Allgemeine Anforderungen.....	75
5.1.1. Normen im Schiffbau .....	75
5.1.2. Prüfkriterien seitens Bluetooth.....	78
5.2. Das elektromagnetische Umfeld auf Schiffen.....	80
5.2.1. Messung der elektromagnetischen Strahlung auf Schiffen .....	80
5.2.2. Radaranlagen.....	89
5.2.3. Radarmessung auf ankernden Schiffen / stationäre Messungen .....	91
5.2.4. Radarmessung an Schiffen sowie an militärischen Radaranlagen.....	93
5.2.5. Datenübertragungstests in der Nähe von Radaranlagen.....	95
5.3. Störfestigkeitsmessungen an Funkübertragungssystemen .....	95
5.3.1. Beeinflussung durch modulierte und unmodulierte Störquellen.....	96
5.3.2. Beeinflussung durch pulsformige Störquellen .....	101
5.3.3. Unterschiede zwischen Frequenzspreiz- und Frequenzsprungverfahren .....	103
5.3.4. Messung des zeitlichen Übertragungsverhaltens von Bluetoothmodulen.....	104
5.4. Personenschutz, Elektromog.....	111
<b>6. Entwicklung und Untersuchung drahtloser Datenübertragungssysteme auf Schiffsbrücken.....</b>	<b>115</b>
6.1. Realisierung drahtloser Datenübertragungssysteme .....	116
6.1.1. Drahtlose Multifunktionsanzeige .....	116
6.1.2. Drahtlose Tochteranzeige.....	118
6.1.3. Praxistests auf Schiffen .....	119
6.2. Langzeittest drahtloser Datenübertragungssysteme .....	120
6.2.1. Kommunikation innerhalb der Schiffsbrücke .....	122
6.2.2. Kommunikation vom Deck auf die Schiffsbrücke.....	125
6.2.3. Ergebnisse der Langzeittests .....	127
6.2.4. Zusammenfassung.....	130
6.3. Anforderungen für die Marktreife.....	132
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>135</b>
<b>8. Anhang.....</b>	<b>137</b>
8.1. Literaturverzeichnis.....	137
8.2. Realisierte Komponenten .....	144
8.3. Durchgeführte Messreihen auf Schiffen .....	147
8.4. Tabellen, Abbildungen .....	148
8.5. Lebenslauf.....	150

**Abkürzungsverzeichnis:**

AIS	Automatic Identification System
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BRZ	Brutto Raumzahl
CAN	Controller Area Network
CCTV	Closed Circuit Television
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DIN	Deutsches Institut für Normung
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMP	Electromagnetic Pulse
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDTD	Finite Difference Time Domain
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FreqBZPV	Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GPIB	General Purpose Interface Bus
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	Hochfrequenz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMO	International Maritime Organization
ISM	Industrial, Scientific, Medical
MoM	Method of Moments
NF	Niederfrequenz
NMEA	National Marine Electronics Association
PCB	Printed Circuit Board
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
QoS	Quality of Service
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
S/UTP	Screened / Unshielded Twisted Pair
SMD	Surface Mounted Devices
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wideband
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VoIP	Voice over Internet Protocol
WLAN	Wireless Local Area Network



# 1. Einleitung

## 1.1. Problemstellung

Moderne Passagier- und Kreuzfahrtschiffe verfügen über eine Verkabelung, die selbst das Kabelaufkommen in Großraumflugzeugen weit übersteigen kann. So werden auf heutigen Kreuzfahrtschiffen mit einer Größe von über 70.000 BRZ<sup>1</sup> mehr als 2.000 km Energie-, Daten- und Kommunikationsleitungen sowie Kabel der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik verlegt. Die Komplexität der ständig zunehmenden Regelungs-, Steuerungs-, Unterhaltungs- und Überwachungselektronik spiegelt sich besonders im Bereich der Schiffsbrücke sowie der angrenzenden Elektronikräume wieder, wo, mit Ausnahme der Energieleitungen, die meisten Kabel zusammengeführt werden. Dementsprechend verfügen aktuelle Schiffsbrücken über eine sehr komplexe Verkabelung, welche sich durch die in der Regel räumlich großzügig verteilten Bedienelemente, Hilfsfahrstände und Anzeigen noch einmal deutlich erhöht.

Parallel zu den vielen unterschiedlichen Anzeigeelementen im Hauptfahrstand einer Schiffsbrücke ist dabei eine hohe Anzahl identischer, über den Brückenbereich verteilter Anzeigen vorhanden. Diese sogenannten Tochteranzeigen besitzen, im Gegensatz zu den Fahrständen, in der Regel keine Eingabeeinheiten und benötigen zur Visualisierung von Daten wie z.B. Geschwindigkeit, Antriebsleistung oder Windrichtung bei geringer Telegrammlänge Aktualisierungsraten im Sekundenbereich. Auch Eingabegeräte wie Mäuse, Tastaturen oder Trackballs erzeugen sehr geringe Datenflüsse. Viele der zur Verkabelung eingesetzten Datenleitungen übertragen dementsprechend Signale mit sehr geringen Bandbreiten, müssen bisher jedoch meist umständlich verkabelt werden.

Aus diesem Grund bietet es sich an, Datenleitungen, die ungefähr 40 % der Brückenverkabelung ausmachen, durch geeignete Funkübertragungssysteme zu ersetzen. Dieses könnte die notwendige Verkabelung auf die Energieversorgungsleitungen und damit auf ein Minimum reduzieren. Einen Hauptansatzpunkt stellen hierbei die über die Brücke verteilten Tochteranzeigen dar, da durch die großen Kabellängen zwischen Fahrständen und Tochteranzeigen hohe Verkabelungskosten entstehen. Darüber hinaus bestehen weitere Anwendungen in der drahtlosen Verbindung von Elektronikkomponenten innerhalb der Brückenkonsolen. Ohne die aufwändige Verkabelung entfielen die zugehörigen Lager-, Planungs- sowie Einbaukosten, da sich Funkverbindungen vollständig in die Geräte integrieren lassen und außerdem bei entsprechender Konfiguration in der Lage sind, ihre Verbindung zur Datenquelle selbstständig herzustellen.

---

<sup>1</sup> BRZ: Brutto Raumzahl, Maß für den umbauten Raum eines Schiffs

Die Einsparung von Kabeln ist jedoch nicht der einzige Vorteil, den eine derartige Technologie bietet. Neben der Vereinfachung der Montage ergeben sich erstmals neue Möglichkeiten zur nachträglichen Installation oder zur räumlichen Umordnung der Geräte, da lediglich ein Zugang zur in der Regel überall zugänglichen Stromversorgung benötigt wird. Auch lassen sich bequem ganze Datensätze zur Schiffsführung in Echtzeit auf mobile Anzeigen sowie z.B. Laptops übertragen und dort individuell darstellen oder auch weiter verarbeiten. Besonders die letzten beiden Punkte machen diese Technologie wegen ihrer vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten interessant.

Schließlich bieten sich auch in vielen weiteren Bereichen von Schiffen Anwendungsmöglichkeiten, um die vorhandene Verkabelung durch drahtlose Systeme zu ersetzen. Hier sind insbesondere Maschinen-, Klima- und Elektronikräume zu nennen, die sich ebenfalls durch eine Vielzahl an Mess-, Steuerungs- und Regelungssystemen auszeichnen. So befinden sich auf heutigen Frachtschiffen zwischen 1.000 und 2.000 Sensoren, von denen die Hälfte im Bereich des Maschinenraums untergebracht sind. Alleine die Hauptmaschine eines Frachtschiffs verfügt heutzutage über ca. 500 unterschiedliche Sensoren, z.B. zur Druck-, Temperatur- und Drehzahlmessung. Auf modernen Kreuzfahrtschiffen werden zusammen mit der Sensorik im Passagier- und Unterhaltungsbereich sogar zwischen 5.000 und 8.000 Sensoren integriert. Ließe sich zumindest ein Teil dieser Systeme über drahtlose Datenübertrager anbinden, würde auch dies zu einer schnelleren und vereinfachten Bauweise und damit letztlich zu einer deutlichen Kostenreduktion sowie weiterer, im Folgenden ausführlich diskutierter Vorteile führen.

## 1.2. Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Schrift gliedert sich in drei Teile, wobei im ersten Teil der Stand der Technik referiert und in den Teilen zwei und drei die eigenen Arbeiten dargestellt werden.

In Kapitel 2 wird die bestehende, konventionelle bzw. kabelgeführte Datenübertragung moderner Schiffsbrücken erläutert. Ebenso werden die im Hinblick auf drahtlose Datenübertrager wichtigen Datenströme beschrieben. Kapitel 3 gibt einen allgemeinen Überblick über die aktuellen drahtlosen Datenübertragungstechniken. Dabei werden zuerst Vor- und Nachteile gegenüber der kabelgeführten Datenübertragung diskutiert. Anschließend werden die bekanntesten Funkstandards bezüglich Anwendungen, Sendecharakteristika und Netztopologien beschrieben. Durch Zusammenfassen der Anforderungen an drahtlose Datenübertrager im Schiffbau erfolgt schließlich eine Eingrenzung der Funkübertragungstechniken in für diesen Anwendungsbereich geeignete Standards.

Im zweiten Teil der Arbeit, Kapitel 4 und 5, werden die ausgewählten Funkübertragungsstandards bezüglich ihrer Eignung zum Ersetzen von drahtgebundenen Systemen auf Schiffen untersucht. Hierzu werden in Kapitel 4 die grundlegenden Wechselwirkungen zwischen von den Funkübertragern erzeugten elektromagnetischen Feldern und leitfähigen Strukturen analysiert. Dabei werden sowohl Simulationen als auch Messungen an kommerziell erhältlichen

---

Funkübertragungssystemen durchgeführt. Kapitel 5 betrachtet die drahtlose Datenübertragung unter Berücksichtigung des Anwendungsbereichs „Schiff“ im Speziellen. Hierfür werden zuerst die besonderen Anforderungen an Datenübertragungssysteme innerhalb des Schiffbaus erörtert. Anschließend werden Messungen des elektromagnetischen Umfelds an Bord von Schiffen präsentiert, diskutiert und, unter Berücksichtigung der Ergebnisse sowie der Anforderungen an Funkübertrager, Störfestigkeitsmessungen an auf dem Markt verfügbaren Systemen durchgeführt.

Im dritten Teil, Kapitel 6, werden schließlich innerhalb dieser Arbeit entwickelte Demonstrationsmodelle und Langzeittestsysteme sowie die damit gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen dargestellt und bewertet. Hieraus wird ein Konzept für mögliche drahtlose Datenübertragungsanlagen auf Schiffen entwickelt und Anforderungen an Normen sowie Funkübertrager zusammengefasst.

## 2. Konventionelle, leitungsführte Datenübertragung auf Schiffsbrücken

### 2.1. Datenübertragung auf Schiffsbrücken

Der typische Aufbau einer modernen, integrierten Schiffsbrücke besteht aus einer Vielzahl elektronischer Anzeige-, Eingabe- und Datenverarbeitungsgeräte. Diese sind im Allgemeinen in Funktionseinheiten gruppiert.

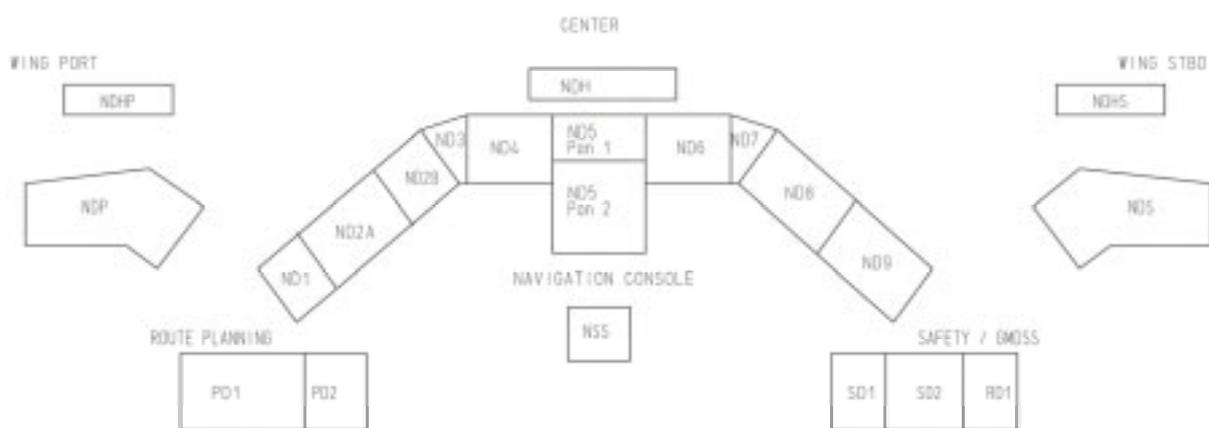


Abbildung 2.1: Gliederung der Brücke eines Fährschiffs. In der Mitte befindet sich der Hauptfahrstand mit dem Ruderstand, seitlich liegen der Kartenstand sowie der Sicherheitsstand und in den Nocken die Seitenfahrstände. Quelle: SAM Electronics [SAM]

Abbildung 2.1 zeigt die Brückenkonfiguration eines Fährschiffs. Zentrales Element der Brücke ist der Hauptfahrstand (ND1 bis ND9), von dem aus die ganze Brücke und große Teile des Schiffs einsehbar sind. Um einen seitlichen und rückwärtigen Überblick zu erlangen, befinden sich auf beiden Seiten der Brücke über das Schiff hinausragende sogenannte Brückennocken. In diesen befinden sich weitere vollwertige, aber in der Anzahl der Anzeige- und Bedienelemente eingeschränkte Seitenfahrstände (NDP und NDS). Diese dienen dem Manövrieren unter schwierigen Bedingungen, z.B. beim Wenden, Anlegen oder beim Einschleusen.

Neben den Fahrständen befinden sich in der Mitte der Brücke der Ruderstand (NSS) und im hinteren Bereich der Kartenstand (PD1 und PD2) sowie der Brandschutz-, Sicherheits- und Seefunkstand (SD1, SD2 und RD1). Um von jedem Punkt der Brücke aus eine schnelle Übersicht über die wichtigsten Parameter des Schiffs zu erhalten, befinden sich oberhalb der Fahrstände zusätzliche, von der Decke abgesetzte Tochteranzeigen (NDHP, NDH, NDHS), wie sie in Abbildung 2.2 gezeigt sind. Derartige Tochteranzeigen setzen sich aus 10 bis 20 unterschiedlichen Anzeigeelementen zusammen, die jeweils einzeln angesteuert werden. Je nach Größe der Brücke können wichtige Anzeigeelemente wie Schiffskurs oder Maschinenleistung

insgesamt mehr als zehnmals redundant an unterschiedlichen Stellen im Brückenbereich vorhanden sein.



Abbildung 2.2: Tochteranzeige über dem Seitenfahrstand eines Kreuzfahrtschiffs. In den Anzeigen werden die wichtigsten Größen wie Schiffskurs, Maschinenleistung und Ruderstellung schnell erkennbar dargestellt. Viele der Anzeigeelemente sind dabei ebenfalls im zur Tochteranzeige zugehörigen Seitenfahrstand vorhanden.

Zusätzlich zu den auf der Brücke befindlichen Systemen zur Steuerung des Schiffs liegen hinter sowie zum Teil unterhalb der Brücke mehrere Elektronikräume. In diesen befinden sich die Kommunikationselektronik, wie Satellitenfunk und Mobilfunk und unter anderem der Fahrtenschreiber. Der Anteil der Elektronik zur Steuerung der über das gesamte Schiff verteilten Kameras und Sensoren sowie der Anteil an Unterhaltungselektronik für die Passagiere nimmt dabei kontinuierlich gegenüber dem Anteil an konventioneller, nautischer Elektronik zu.

Die Datenverarbeitung innerhalb der Brücke findet durch mehrere gleichberechtigte Rechner statt, die gleichzeitig die Multifunktionsdisplays und die Tochteranzeigen ansteuern (Abbildung 2.3). Innerhalb des Hauptfahrstands befinden sich typischerweise zwei bis drei dieser Systeme, in den Seitenfahrständen jeweils eines. Die redundanten Rechner sind untereinander vernetzt, so dass Eingaben, Ausgaben, aber auch Änderungen am System automatisch auf alle anderen Gruppen übertragen werden. Die Versorgung der in der Decke befestigten Tochteranzeigen erfolgt über Schnittstellenleisten mit bis zu 30 seriellen Anschlüssen, welche mit den Rechnern verbunden sind.

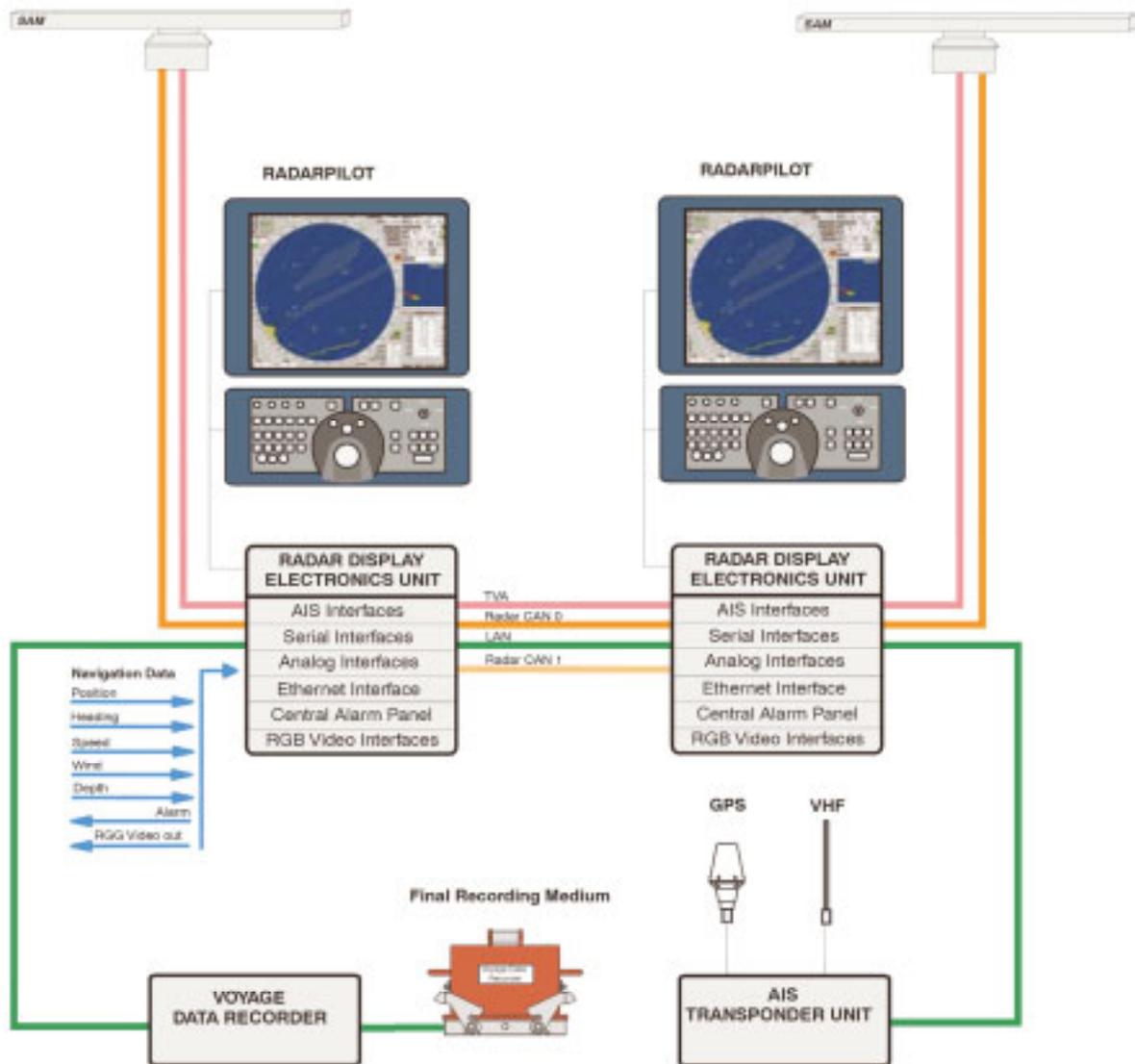


Abbildung 2.3: Ausschnitt aus dem Netzwerk zwischen den einzelnen Datenverarbeitungs- und Anzeigegeräten einer Schiffsbrücke sowie zu den außerhalb der Brücke liegenden Messgeräten und Datenschaibern, Foto: SAM Electronics [SAM]

Bedingt durch die hohe Anzahl redundanter Eingabe-, Datenverarbeitungs- und Anzeigeeinheiten kommt es erwartungsgemäß zu einem erheblichen Kabelaufkommen zwischen den einzelnen Komponenten. Diese sind innerhalb des doppelten Brückenbodens sowie der Decke verkabelt und werden in den Elektronikräumen miteinander verschaltet (Abbildung 2.4). Die gesamte Verkabelung besteht dabei typischerweise aus 200 bis 500 Einzelverbindungen [Ehrke04]. Die einzelnen Rechner sind entweder über Ethernet oder über CAN<sup>1</sup>-Bus miteinander verbunden (Abbildung 2.3). Aufgrund der Anforderungen an die Kabelbeständigkeit gegenüber mechanischen und witterungsbedingten Einflüssen kommen ausschließlich robuste, geschirmte Kabel zum Einsatz. Im Fall des Netzkabels wird deswegen noch regelmä-

<sup>1</sup> CAN: Controller Area Network, Feldbussystem

ßig statt des heutzutage allgemein verwendeten 100 MBit/s schnellen S/UTP-Kabels<sup>1</sup> das über RG58-Koaxialleitung verlegte 10 MBit/s schnelle 10Base2- oder 10Base5-Netz verwendet, da hier aus der Radar- und Militärtechnik mechanisch robustere Kabel vorliegen.



Abbildung 2.4: Kabelstränge in einem hinter der Brücke liegenden Elektronikraum. Die Kabel führen über den doppelten Boden bzw. über die Decke zu den Anzeigen und Systemen auf der Brücke sowie zu weiteren Elektronikräumen im Deck unterhalb der Brücke.

Die Verbindung zwischen den Rechnern und den Tochteranzeigen erfolgt durch geschirmte Mehrfachleiter, wobei für jede Anzeige ein eigenständiges Kabel verwendet wird. Ein Einsatz von gebündelten Datenleitungen (Multiplex) zur Versorgung der Anzeigen wird zwar diskutiert, konnte sich, unter anderem wegen der bisher nicht geklärten Anforderungen an das entstehende Übertragungsprotokoll, jedoch noch nicht durchsetzen. Bedingt durch die baulich eingeschränkte Kabelführung entstehen allein im Brückenbereich Kabellängen von etlichen Kilometern, von denen ein Großteil auf Datenleitungen entfällt.

Da sich der Aufwand an Verkabelung bei den meisten heutigen Kreuzfahrt- und Passagierschiffen in einem vergleichbar hohen Rahmen bewegt, bietet sich der Ansatz an, Teile der Brückenverkabelung durch drahtlose Datenübertragungseinrichtungen zu ersetzen. Die Verkabelung zwischen den Konsolen würde sich damit zum Beispiel auf wesentliche Datenleitungen, wie die Leitungen zwischen den einzelnen Netzwerkknoten, sicherheitskritische Leitungen für z.B. die Notab- bzw. Umschaltungen und natürlich die Stromversorgung reduzieren. Die Verkabelung zu den Tochteranzeigen und Tochtereingabegeräten, welche einen Großteil der Verkabelung ausmachen, ließe sich komplett auf die Stromversorgung beschränken.

---

<sup>1</sup> S/UTP: Screened / Unshielded Twisted Pair, Netzwerkkabel

## 2.2. Kabel und Kabelkategorien

Zur Vermeidung einer gegenseitigen Störbeeinflussung zwischen den im Schiffbau verwendeten Kabeln werden diese üblicherweise in fünf Kategorien eingeteilt. Die Verlegung erfolgt entweder auf getrennten Kabelbahnen oder auf gemeinsamen Kabelbahnen mit entsprechenden Mindestabständen oder geeigneten Entkopplungsmethoden zwischen den Kategorien. Die Kabel werden nach anlagenbedingten Übertragungsfunktionen folgenden Kategorien zugeordnet [GL89]:

- Kategorie 1: unempfindlich, störend,
- Kategorie 2: unempfindlich, wenig störend,
- Kategorie 3: empfindlich, nicht störend,
- Kategorie 4: sehr empfindlich, nicht störend,
- Kategorie 5: unempfindlich, stark störend.

Bei Parallelverlegung von Kabeln verschiedener Kategorien werden dabei die in Tabelle 2.1 aufgeführten Abstände eingehalten.

Kabelkategorie	1	2	3	4	5
1	0	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0	0,1	0,1	0,1
3	0,1	0,1	0	0,1	0,2
4	0,1	0,1	0,1	0	0,2
5	0,1	0,1	0,2	0,2	0

Tabelle 2.1: Typische, im Schiffbau beim Verlegen von Kabeln zwischen den Kabeln unterschiedlicher Kategorien einzuhaltende Abstände in Metern

Tabelle 2.2 zeigt eine Einordnung der Kabel für typische Beispiele in die jeweiligen Kategorien. Die Verlegung in festgelegten Kategorien und Kabelbahnen schränkt die Flexibilität der Verkabelung im Schiffbau ein. Zumindest in den Elektronikräumen sind die Bereiche mit Funkelektronik, wie Satellitenkommunikation oder Funkanlagen sowie Bereiche mit herkömmlicher Datenverarbeitung zum Teil räumlich getrennt angeordnet. Hierdurch wird eine raumnahe Verlegung unterschiedlicher Kategorien vermieden. Gleichzeitig besitzt die Unterteilung und Verlegung in Kabelklassen den Vorteil, dass potentiell empfindliche Kabel als solche gekennzeichnet sind und räumlich getrennt vorliegen. Bei möglichen Bedenken einer Beeinflussung durch drahtlose Datenübertragungsdienste kann so leicht eine genügende Trennung gewährleistet werden.

Kabelkategorie	Nutzsignale	Störsignale	Systemkabel	typische Leitungsarten
1 unempfindlich, störend	10 bis 1000 V DC, 50, 60, 400 Hz, schmalbandig	schmalbandig, breitbandig	Stromversorgungskabel, allgemeine Steuerkabel, Kabel für Beleuchtungsanlagen, Kabel für Alarmanlagen	verseilt und geschirmt
2 unempfindlich, wenig störend	0,1 bis 115 V, NF, schmalbandig	---	Fernsprechkabel, Fernmelde- und Signalkabel, Kabel für Synchronverbindungen, Kabel für spannungs-, frequenz- und phasenabhängige Signalinformation	verdrillt, geschirmt und verseilt, geschirmt
3 empfindlich, nicht störend	0,1 bis 15 V, HF, breitbandig  15 bis 115 V, NF	breitbandig	Synchronverbindung, Videosignale, Synchronisation und Impulskabel kleiner Leistung, z.B. Multikoaxialkabel für digitale Datenübertragung	geschirmt oder koaxial
4 sehr empfindlich, nicht störend	0,1 bis 500 mV, 50 bis 2000 W, DC, NF, HF, schmalbandig	schmalbandig, breitbandig	Empfangsantennenkabel, Fernlenk- und Nachrichtenkabel, Kabel für Radarwarnempfänger	geschirmt oder koaxial
5 unempfindlich, stark störend	schmalbandig	10 bis 100 V NF, HF, schmalbandig	Kabel für Senderendstufen und Sendeantennen	koaxial
6 Sonderkabel	---	schmalbandig, breitbandig	Sendeempfängerkabel, Betriebsfunk, Kabel für Stromrichter, Datenbuskabel, Kabel für Anzünd- und Zündkreise, Mikrofonleitungen	---

Tabelle 2.2: Im Schiffbau verwendete Kabelkategorien, geordnet nach Nutz- und Störsignal sowie nach Anwendung. Zur Vermeidung gegenseitiger Störungen werden zwischen den einzelnen Kabelkategorien bei Parallelverlegung Mindestabstände (Tabelle 2.1) eingehalten [GL89].

Generell werden halogenfreie Kabel verwendet, um im Falle eines Brands die Bildung von Salzsäure und damit Brandfolgeschäden gering zu halten. Die im Zwischenboden oder auf Kabelbahnen unterhalb des Decks verlaufenden Kabel werden mit Schellen gegen eine Verschiebung bzw. Aufscheuern aufgrund der Schiffsbewegung gesichert (Abbildung 2.5). Zwischen getrennten Sektionen werden die Kabel durch Schottdurchführungen verlegt, die mit wasserdichter und feuerhemmender Vergussmasse ausgegossen werden. Bei Verlegung auf Deck sowie an kritischen Punkten werden die Kabel zur Verringerung von Beschädigungen in Schutzrohren verlegt [GL06, Scholl96, Thamm85].



Abbildung 2.5: Kabelverlegung in getrennten Kabelbäumen im doppelten Boden unterhalb der Schiffsbrücke. Die Kabel werden in kurzen Abständen durch Kabelschellen gegen Verschieben gesichert.

### 2.3. Datenprotokolle

Das am häufigsten verwendete Protokoll zum Datenaustausch zwischen Navigationsgeräten im Schiffbau ist das in den 80er Jahren entwickelte NMEA 0183-Protokoll, entsprechend dem IEC-Standard 61162<sup>1</sup> [IEC61162]. Das von der National Marine Electronics Association definierte Protokoll wird hauptsächlich zum Datenaustausch zwischen den Sensoren und dem verarbeitenden Endgerät verwendet. Entsprechend seinem Ursprung in der Navigation wird das NMEA 0183-Protokoll unter anderem auch von zivilen GPS<sup>2</sup>-Empfängern genutzt. Am geläufigsten ist hierbei der NMEA 0183-2-Standard, der die ungebündelte, serielle Datenübertragung über eine symmetrische Zweidrahtleitung (RS422) beschreibt. Das Format der übertragenen Datentelegramme sowie die Datengeschwindigkeit wird jedoch auch bei der im zivilen Bereich häufiger eingesetzten asymmetrischen RS232-Schnittstelle, wie sie zum Beispiel an PCs zu finden ist, verwendet.

Bei der Netztopologie handelt es sich beim NMEA 0183-2-Standard um einen einzigen Sender. An diesen können, je nach Treiberleistung und benötigtem Pegel, über geschirmte Zweidrahtleitungen entsprechend viele Empfänger parallel geschaltet werden (single Talker, multiple Listener). Durch die symmetrische Datenübertragung über eine RS422-Schnittstelle wird gegenüber der unsymmetrischen, seriellen RS232-Schnittstelle heutiger PCs eine höhere Reichweite und deutlich geringere Störempfindlichkeit erzielt [Lerch96].

<sup>1</sup> „Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces, Part 1: Single talker and multiple listeners“

<sup>2</sup> GPS: Global Positioning System, System zur satellitengestützten Positionsbestimmung

Die Daten werden im ASCII<sup>1</sup>-Format kodiert und zu Datentelegrammen mit einer maximalen Länge von 79 Zeichen zusammengefasst. Der NMEA 0183-Standard ist für Anwendungen niedriger Datenrate mit typischerweise einer Aktualisierung pro Sekunde gedacht und besitzt aufgrund seines Alters eine für heutige Verhältnisse sehr geringe Übertragungsgeschwindigkeit von 4,8 kBit/s. Damit können bis zu 480 Zeichen pro Sekunde übertragen werden. Neben der Identifikationskennung des Senders verfügen die Telegramme über eine Prüfsumme zur Fehlererkennung, nicht jedoch über einen Zeitstempel (Abbildung 2.6).

#### MWD - Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Dargestellte Größe: Richtung aus welcher der Wind über Grund weht, bezogen auf Nord, sowie die Windgeschwindigkeit

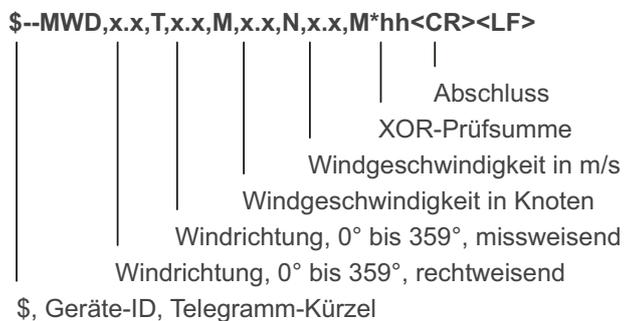


Abbildung 2.6: Aufbau eines NMEA-Telegramms, hier am Beispiel eines Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitstelegramms. Die im ASCII-Zeichensatz<sup>1</sup> übertragenen Datentelegramme weisen ein einheitliches Format sowie eine Prüfsumme auf.

Neben dem NMEA 0183-Standard zur Verbindung zwischen Messgeräten sowie zur einfachen Kommunikation zwischen Brückengeräten haben mittlerweile auch breitbandige Bussysteme ihren festen Platz im gesamten Schiffsbereich gefunden. Aufgrund der zunehmenden Nutzung von PC-Systemen sowie der wachsenden Bedürfnisse und immer komplexer werdender Dienste, finden, wie in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt, je nach Verwendungszweck sowohl das Ethernet als auch der CAN-Bus Anwendung. Zusätzlich zu diesen Bussystemen gibt es im Bereich des Maschinenraums weitere Bussysteme, wie beispielsweise den Profibus [Bender92]. Einige Busvarianten, z.B. der Profibus PA, können dabei über eine Zweidrahtleitung sowohl die Versorgungsspannung der Messwertnehmer aller am Bus befindlichen Geräte wie auch die Datenübertragung zwischen diesen und den Schiffsrechnern realisieren [ProfibusPA].

<sup>1</sup> ASCII: American Standard Code for Information Interchange, Zeichensatz

## 3. Drahtlose Datenübertragung

### 3.1. Vor- und Nachteile gegenüber Kabelverbindungen

Drahtlose Datenübertragungen bieten gegenüber konventionellen Kabelverbindungen eine Reihe von Vorteilen. Sie weisen aber auch einige wesentliche Nachteile auf, die gegebenenfalls mehrmals gegeneinander abgewogen werden müssen.

Bereits die ökonomische Betrachtung der kabelgeführten Verbindung weist viele Vorteile für einen kabellosen Ersatz aus. Bei der Vernetzung zweier Geräte im Haushalt werden konventionelle Kabel meist nur als störend und umständlich zu verlegen empfunden. Im Vergleich zur eigentlichen Schnittstelle treten hier allerdings eher geringe Kosten auf. In der industriellen Vernetzung kommt es zu weitaus höheren Kosten, deren Ursprung anhand der Verkabelung im Brückenbau auf Schiffen erläutert werden soll.

Zu Beginn steht die eigentliche Planung, wobei bereits sehr früh, in der Grundrissphase der Brücke, Wege für Kabelstränge, Durchbrüche und Verbindungsstellen eingeplant werden müssen. Nachdem der Brückengrundriss und die Netzwerktopologie festgelegt sind, erfolgt noch vor dem eigentlichen Einbau in das Schiff ein grundlegender Test an Land, bei dem die Brücke einschließlich der Verbindungen auf ihre ordnungsgemäße Funktion hin geprüft wird. Nach erfolgreichem Test sowie dem Einbau in den Brückenrohbau erfolgen die eigentlichen Verkabelungen und der erneute Test aller Komponenten. Die verwendeten Kabel sind in der Regel hochwertige, individuell konfektionierte Kabel. Die hierdurch entstehenden Kabelkosten werden von den Herstellern mit über 100 € pro Verbindung angegeben [Ehrke04] und übersteigen damit die Kosten der eigentlichen Schnittstelle um mehrere Größenordnungen. Noch deutlich höhere Kosten treten bei Erweiterungen, Erneuerungen bzw. Nachrüstung des bestehenden Systems (Retrofit) auf. Die hinzukommende Verkabelung muss hier der bereits vorhandenen Infrastruktur angepasst werden, wobei meistens ein hoher Aufwand für die Darstellung geeigneter Kabeltrassen erforderlich ist.

Die ökonomischen Anreize für die Hersteller werden dabei zunehmend größer. Waren die Hersteller von Brückenelektronik früher in der Regel nur für die Lieferung der Komponenten zuständig, gehen die Werften heutzutage vermehrt dazu über, die Brückenhersteller auch für die Verkabelung ihrer Produkte zu verpflichten. Diese können dadurch erstmals eine Gesamtkalkulation über die Verkabelungskosten sowie die Gerätekosten durchführen, so dass sich die Entwicklung sowie der Einsatz drahtloser Technik direkt durch den verringerten Verkabelungsaufwand rentieren.

Darüber hinaus gibt es Situationen, in denen eine kabelgeführte Datenübertragung nicht möglich bzw. unerwünscht ist. So können Anlagen oder Räume, die elektrisch oder hermetisch voneinander getrennt bzw. gegeneinander abgeschirmt werden sollen, nur sehr umständlich

kabelgeführt miteinander verbunden werden. Ebenfalls erfordern bewegliche Teile, wie z.B. Kranausleger, rotierende Achsen oder verschiebbare Tore und Schotte, eine mechanisch belastbare und oftmals aufwändige Verkabelung, während drahtlose Datenübertrager eine einfache Anbindung erlauben. Durch das Ersetzen von Schleifringen, Schleppkabeln oder beweglichen Kabelverbindungen erhöht sich außerdem die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems [Rauchhaupt05]. Drahtlose Datenübertrager ermöglichen weiterhin eine einfache und kostengünstige Kommunikation innerhalb explosionsgeschützter Umgebungen, da weder Kabelöffnungen in den Gehäusen notwendig sind, noch leitfähige Verbindungen wie Kabel zwischen den Geräten oder innerhalb der gefährdeten Räume verlegt werden müssen. Wegen ihrer geringen Schirmwirkung erlauben die Sichtfenster druckgekapselter Gehäuse hier ein Unterbringen der gesamten Funkelektronik sowie der Antennen innerhalb bereits zugelassener Gehäuse [Cyrol05].

Ein letzter wesentlicher Vorteil kabelloser Verbindungen besteht darin, dass diese nicht nur das eigentliche Datenkabel ersetzen, sondern gleichzeitig auch eine universelle Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen angeschlossenen Geräten bilden. Somit können unterschiedlichste Geräte ohne Pegelwandler, Adapter oder ggf. sogar Datenkonverter verbunden werden. Der Anwender benötigt dadurch keine Kenntnisse mehr über Protokolle oder Stecker- bzw. Kabelbelegungen, sondern erhält eine einfach einzurichtende und zuverlässige Schnittstelle.

Als ein wesentlicher Nachteil kabelloser Verbindungen wird oftmals die Nachhaltigkeit bzw. Verfügbarkeit der Datenübertragungsmodule angeführt. Selbst die Kabelhersteller räumen ein, dass Kabelverbindungen, ebenso wie Funkmodule, zerstört werden können. Dabei liegen die Kosten für die Reparatur einer defekten Kabelverbindung in der Regel um Größenordnungen über den Kosten, die für den Austausch eines Funkmoduls nötig wären. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass selbst Spezialkabel sowie -steckverbindungen auch in mehreren Jahrzehnten, also der typischen Betriebsdauer heutiger Anlagen, als uneingeschränkt verfügbar angenommen werden können. An diesem Punkt setzt die Sorge der Unternehmen an, dass aufgrund der extrem schrumpfenden Dauer der Produkt- sowie Innovationszyklen in der Unterhaltungselektronik bereits in wenigen Jahren keine Ersatzteile für heutige Funkübertrager mehr zu beschaffen sind. Diese Sorge ist jedoch nur teilweise berechtigt, als dass sie entsprechend auch für jedes der an Bord befindlichen Rechnersysteme gelten müsste. Zum Teil sind diese noch schnelleren Produktzyklen unterworfen als heutige Funkübertragungsmodule.

Eine weitere Sorge liegt in der mangelnden Kenntnis über zukünftige Belegungen der verwendeten Frequenzbänder und somit über mögliche Störungen durch zukünftige Funkdienste. Zwar lassen sich die Frequenzbandbelegungen bzw. Ausnutzungen und die damit verbundenen Einschränkungen durch heutige Funkdienste untereinander recht gut abschätzen, neue Funkdienste könnten jedoch zu einer nicht berücksichtigten und ggf. nicht kompensierbaren Belegung des verwendeten Frequenzbereichs führen.

Zuletzt gibt es insbesondere im Bereich der Messtechnik innerhalb der Maschinenräume und Versorgungssysteme von Schiffen Bussysteme, die mit einer einzigen Zweidrahtleitung auskommen. So ist der Profibus PA in der Lage, bis zu 32 Messaufnehmer über eine Zweidrahtleitung innerhalb eines bis zu 1000 m großen Netzes miteinander zu verbinden und gleichzeitig die Messwertaufnehmer mit der zum Betrieb nötigen Energie zu versorgen [ProfibusPA]. Bei einem solchen System haben drahtlose Datenübertrager in der Regel nur geringe Vorteile vorzuweisen, da auch bei funkgestützter Kommunikation bislang immer ein Kabel zur Energieversorgung der Messwertaufnehmer sowie der Funkmodule nötig ist. Die Vorteile von Funk sind hier insbesondere die höheren erzielbaren Datenübertragungsraten sowie die einfachere Konfigurierbarkeit und Nachrüstbarkeit.

Bussysteme stellen immer einen Kompromiss zwischen Topologie, Netzlänge und verfügbarer Bandbreite dar. Ebenfalls kommt es, insbesondere während der Inbetriebnahmen von Bussystemen, immer wieder zu Problemen durch mangelhafte Steckverbinder und Kontakte. So liegen laut Herstellern von Bussystemen über 90 % aller Datenübertragungsfehler auf Bussystemen an einer ungenügend geplanten bzw. qualitativ mangelhaft ausgeführten Verkabelung. Funkverbindungen jedoch sind im Gegensatz zu Kabelverbindungen unempfindlich gegen Rütteln, Bruch oder extreme Umweltbedingungen.

Wegen der begrenzten Stromtragfähigkeit eines Zweidrahtbusses bietet sich ein solcher außerdem nur für stromsparende Messinstrumente und nicht für die Datenübertragung zu Tochteranzeigen oder Eingabeinstrumenten an. Diese haben wegen ihrer aktiven, beleuchteten Anzeigeelemente nicht selten Anschlussleitungen von mehr als 10 Watt pro Anzeige, so dass hier ein Zweidrahtbus nicht in Frage kommt. Ebenso können mit Zweidrahtbussystemen auf der einen Seite zwar Buslängen von mehreren Kilometern erreicht werden, auf der anderen Seite ist ab einer gewissen Länge jedoch auch hier eine separate Stromversorgung am Ort des Messaufnehmers sowie eine drahtlose Richtfunkstrecke zum Rechner wegen der sonst nötigen komplexen Kabelführung sinnvoller.

## 3.2. Arten und Standards drahtloser Datenübertragungssysteme

Im Folgenden werden die bekanntesten Standards zur drahtlosen Datenübertragung in ihren charakteristischen Eigenschaften beschrieben und diskutiert, um anschließend eine Eingrenzung in geeignete Verfahren zu ermöglichen.

### 3.2.1. Bluetooth

Obwohl Bluetooth sich erst in den vergangenen Jahren durchsetzen konnte, basiert der Standard auf einem Entwurf der Firma Ericsson aus dem Jahr 1994. Zu diesem Zeitpunkt gab es lediglich die Infrarotkommunikation als Lösung zur Verbindung von Kommunikationsprodukten. Es wurde deswegen bereits lange vor der aktuellen Welle von elektronischen Kleinge-

räten bzw. PDAs nach einem Kabelersatz gesucht, der in der Lage war, auch ohne direkten Sichtkontakt durch Wände, Stoffe oder um Hindernisse herum eine zuverlässige Verbindung zu gewährleisten. In Verbindung mit Nokia, IBM, Toshiba und Intel wurde 1998 die Bluetooth Special Interest Group (SIG) ins Leben gerufen, der sich mittlerweile über 2.000 weitere Firmen angeschlossen haben [Held01]. Als Industriestandard ist Bluetooth unter dem Namen IEEE 802.15.1 bekannt.

Bluetooth wurde speziell konzipiert für die Verbindung mobiler Endgeräte, also als eine Nahbereichsfunkschnittstelle zum Anschluss von z.B. Tastaturen, Headsets, Mobiltelefonen oder Druckern untereinander bzw. an Notebooks oder PCs. Der Hauptgedanke bzw. -vorteil für den Anwender liegt dabei gleichermaßen im Wegfall von Kabelverbindungen, wie in der Einführung einer einheitlichen und leicht zu bedienenden Schnittstelle. Hierzu bietet jedes mit Bluetooth ausgestattete Gerät eine Reihe von Diensten, den sogenannten Profilen (z.B. serielle Schnittstelle, Headset, Dateiübertragung) an, die durch ein zweites Bluetoothgerät angefordert und in eine physikalische Verbindung umgewandelt werden können.

Als Frequenzband für die Funkschnittstelle wurde, wie auch bei den meisten der im Folgenden vorgestellten Funkdienste, das ISM-Band<sup>1</sup> im Bereich zwischen 2,4 und 2,48 GHz gewählt. Dieses Frequenzband war ursprünglich als Frequenzband speziell für Anwendungen in der Industrie, Wissenschaft und Medizin reserviert und diente als Frequenzband, in dem Geräte zu beliebigen Zwecken in bestimmten Grenzen elektromagnetische Leistung emittieren durften (siehe Kapitel 3.3). Der bekannteste Nutzer des 2,4-GHz-ISM-Bands ist der Mikrowellenherd zum Aufwärmen von Nahrungsmitteln.

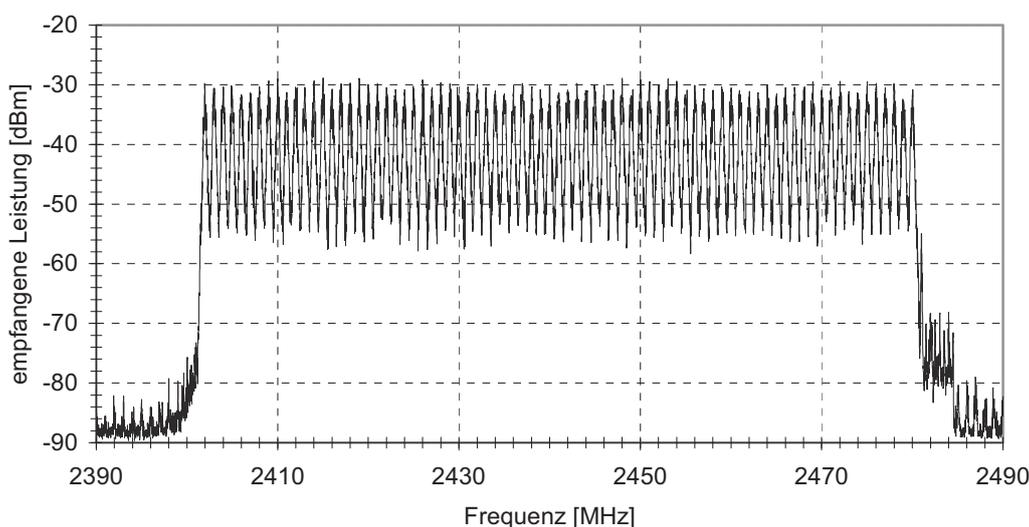


Abbildung 3.1: Langzeitspektrum eines Bluetoothmoduls über das gesamte 2,4-GHz-ISM-Band. Es ist zu erkennen, wie der zur Verfügung stehende Frequenzbereich in 79 gleich breite Kanäle unterteilt wird.

<sup>1</sup> ISM: Industrial, Scientific, Medical

Da die innerhalb des 2,4-GHz-ISM-Bands arbeitenden Funkübertragungssysteme nicht nur miteinander, sondern auch mit aus elektromagnetischer Sicht weitaus störenderen Strahlungsquellen wie zum Beispiel dem Mikrowellenherd konkurrieren, setzen alle Dienste Frequenzspreiz- bzw. Frequenzsprungverfahren zur Erhöhung der Störuneempfindlichkeit ein [McCune00, VanderWurff04a]. Bei Bluetooth kommt ein Frequenzsprungverfahren<sup>1</sup> zum Einsatz. Hierzu wird das ISM-Band in 79 Kanäle (Abbildung 3.1) mit einer Breite von je 1 MHz unterteilt, zwischen denen die Funkübertragungsmodule in einer pseudo-zufälligen Sprungsequenz wechseln [Bluetooth]. Für die Kanalfrequenz gilt:

$$f[\text{MHz}] = 2402 + k, k = 0, \dots, 78. \quad (3.1)$$

Die Sprungfrequenz kann je nach Datenaufkommen bis zu 1600 Sprünge pro Sekunde betragen. Mit diesem Sprungverfahren wird dabei nicht nur die Robustheit gegenüber fremden Inband-Störquellen, wie z.B. WLAN erhöht [Howitt02, Pradidkwan03, Sakal03], sondern auch die gegenseitige Störung unabhängig voneinander arbeitender, konkurrierender Bluetoothnetze minimiert [Baatz03, Zürbes00]. Da mit dem Frequenzsprungverfahren eine sehr hohe Robustheit erreicht wird, werden die Nutzdaten innerhalb der einzelnen Kanäle ungespreizt mit einer Netto-Bitrate von 1 MBit/s übertragen. Als Modulation kommt eine Frequenzumtastung zum Einsatz, wobei zur Reduzierung von Oberwellen eine zusätzliche Gaußfilterung<sup>2</sup> verwendet wird. Abhängig vom verwendeten Dienst ergibt sich durch die hohe Sprungfrequenz und dem damit verbundenen hohen Anteil an Kopfdaten eine maximale Nutzdatenrate von ca. 700 kBit/s.

Die bislang am häufigsten verwendeten Bluetoothmodule entsprechen der Spezifikation 1.1. Weiterentwicklungen bestehen in der Spezifikation 1.2, die z.B. ihre Sprungsequenz adaptiv an eventuelle Störer anpassen kann<sup>3</sup> sowie in der Spezifikation 2.0, welche eine dreifache Datenübertragungsgeschwindigkeit mit bis zu 2,1 MBit/s vorsieht<sup>4</sup>. Beide Spezifikationen sind abwärtskompatibel [Bluetooth]. Die in dieser Arbeit untersuchten sowie verwendeten Bluetoothmodule entsprechen ausschließlich der Spezifikation 1.1.

Bei Bluetooth können sich bis zu acht aktive Teilnehmer zu einem *Piconet* zusammenfügen. Die Kommunikation wird dabei von einem *Master* gesteuert, der bis zu sieben *Slaves* Zeitschlitze für eine Kommunikation untereinander zuteilt. Sollen mehr als acht Teilnehmer in einem Netz eingebunden werden, so können bis zu 256 Module als geparkte, d.h. nicht aktiv teilnehmende Module eingebunden werden. Bei Bedarf werden diese dann im Austausch gegen aktive Module eingewechselt. Dieses Verfahren wird jedoch bislang ebenso wenig eingesetzt, wie das der *Scatternets* (Streunetze), bei denen ein Bluetoothmodul gleichzeitig

---

<sup>1</sup> FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum

<sup>2</sup> GFSK: Gaussian Frequency Shift Keysing

<sup>3</sup> AFH: Adaptive Frequency Hopping

<sup>4</sup> EDR: Enhanced Data Rate

Mitglied in zwei unabhängigen Netzen ist und zwischen diesen als Gateway fungiert (Abbildung 3.2).

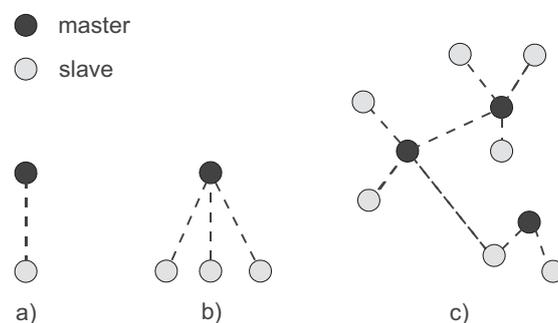


Abbildung 3.2: Unterschiedliche Bluetoothtopologien: a) Point to Point, b) Point to Multipoint, c) Scatternet. Die Topologie des *Scatternet* wird bislang noch von keinem kommerziellen Produkt unterstützt.

Entsprechend den internationalen Reglementierungen für das 2,4-GHz-ISM-Band dürfen Bluetoothmodule eine maximale Strahlungsleistung von 100 mW isotroper Strahlung<sup>1</sup> aufweisen [ETSI300328]. Um eine Einteilung zu erzielen, spricht man bis zu einer Leistung von 1 mW von Klasse 3-, bis zu 2,5 mW von Klasse 2- und bei einer Sendeleistung von bis zu 100 mW von Klasse 1-Modulen (Tabelle 3.1). Heutige Module verfügen durch den in der Spezifikation 1.1 hinzugefügten Signalstärkeindikator<sup>2</sup> nahezu ausnahmslos über eine aktive Regelung der Sendeleistung, die bei Klasse 1-Modulen sogar gesetzlich vorgeschrieben ist. Aktuelle Klasse 3-Module erreichen eine Reichweite von typischerweise 10 m, Klasse 1-Module können im Freifeld über 100 Meter erreichen.

Leistungsklasse	maximale isotrope Sendeleistung (EIRP)
1	100 mW bzw. 20 dBm
2	2,5 mW bzw. 4 dBm
3	1 mW bzw. 0 dBm

Tabelle 3.1: Leistungsklassen zur Einteilung von Bluetoothmodulen

Der ungewöhnliche Name dieses Funkstandards geht zurück auf den Wikingerkönig Harald Blåtand<sup>3</sup>, der im zehnten Jahrhundert die verschiedenen Nordvölker miteinander zu vereinen versuchte. In Analogie soll Bluetooth dazu dienen, die verschiedenen Produkte unterschiedlicher Hersteller miteinander zu vereinen bzw. zu verbinden [Kral03].

<sup>1</sup> EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power

<sup>2</sup> RSSI: Received Signal Strength Indicator

<sup>3</sup> Harald I. Blauzahn Gormson

## 3.2.2. WLAN

WLAN steht für Wireless Local Area Network und wurde in den späten 80er Jahren von der Arbeitsgruppe 802 des IEEE<sup>1</sup>, zuständig für die Standardisierung von LAN-Standards, wie Ethernet oder Token Ring, entworfen. 1997 bestätigte das IEEE den als WLAN bekannt gewordenen Standard IEEE 802.11. Mittlerweile haben sich verschiedene, zum Teil proprietäre Substandards entwickelt (Tabelle 3.2), die unterschiedliche Datenraten besitzen und mitunter auch unterschiedliche Frequenzbänder benutzen. Die bekanntesten hiervon sind in Tabelle 3.3 aufgeführt [Kral03].

Standard	maximale Brutto-Datenrate
IEEE 802.11	2 MBit/s
IEEE 802.11 a	54 MBit/s
IEEE 802.11 b	11 MBit/s
IEEE 802.11 g	54 MBit/s
802.11 b+	44 MBit/s, nicht standardisiert
802.11 a+/g+	108 / 125 MBit/s, nicht standardisiert

Tabelle 3.2: Übersicht über WLAN-Varianten sowie ihre maximalen Brutto-Datendurchsätze. Abhängig von der verwendeten Verschlüsselung und der Verbindungsqualität fallen die erzielbaren Netto-Datenraten zum Teil deutlich geringer aus.

Standard	Frequenzband	Anzahl nutzbarer Kanäle
IEEE 802.11 a	5,15 bis 5,725 GHz	19, alle überlappungsfrei
IEEE 802.11 b	2,4 bis 2,4835 GHz	11 in den USA / 13 in Europa / 14 in Japan. Maximal 3 Kanäle überlappungsfrei nutzbar
IEEE 802.11 g	2,4 bis 2,4835 GHz	11 in den USA / 13 in Europa / 14 in Japan. Maximal 3 Kanäle überlappungsfrei nutzbar

Tabelle 3.3: Die drei am häufigsten verwendeten WLAN-Varianten sowie die Anzahl der derzeit in den verschiedenen Ländern zur Verfügung stehenden Übertragungskanäle

Im Folgenden wird mit WLAN der zurzeit am weitesten verbreitete Standard IEEE 802.11 b bezeichnet. IEEE 802.11 b arbeitet ebenso wie Bluetooth im 2,4-GHz-ISM-Band. Da WLAN weniger als Verbindung zu den Endgeräten, sondern als breitbandiger Netzwerkdienst gedacht war, kam hier nicht das aufgrund seiner hohen Latenzzeit für die Übertragung großer Datenströme eher ungeeignete Frequenzsprungverfahren zum Einsatz. Stattdessen wird ein Frequenzspreizverfahren<sup>2</sup> verwendet, bei dem die Nutzdaten mit einer Sequenz künstlich aufgeweitet und anschließend über einen festen Kanal übertragen werden. Da hierbei mehr

<sup>1</sup> IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers

<sup>2</sup> DSSS: Direct Sequenz Spread Spectrum

Daten als nötig übertragen werden, wird eine Redundanz und damit eine Robustheit gegenüber Störern erreicht.

Bei WLAN wird das ISM-Band in 13 frequenzfeste Übertragungskanäle aufgeteilt, die eine Breite von jeweils 22 MHz aufweisen (Abbildung 3.3). Für die Kanalfrequenzen von WLAN gilt:

$$f[\text{MHz}] = 2407 + 5 \cdot k, k = 1, \dots, 14. \quad (3.2)$$

Entsprechend der Kanalbreite können drei Netze vollständig überlappungsfrei eingerichtet werden. Die Außenbandstörung ist jedoch bereits bei benachbarten Netzen gering. Eine gleichzeitige Nutzung zweier Netze auf dem gleichen Kanal in unmittelbarer Nähe ist nicht möglich. Durch das Festlegen auf einen festen Kanal ist WLAN im Vergleich zu Frequenzsprungverfahren deutlich empfindlicher gegenüber Inbandstörern.

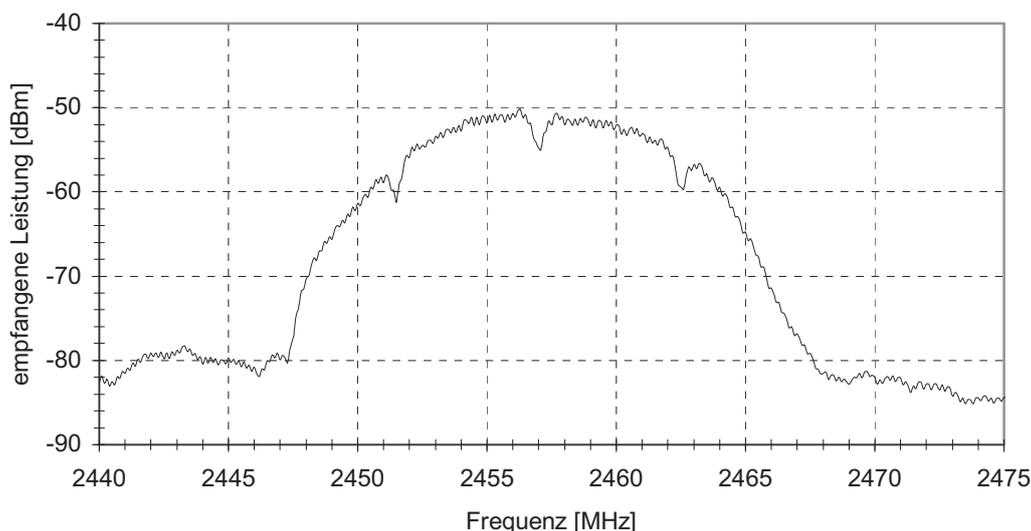


Abbildung 3.3: Spektrum eines WLAN-Kanals, hier Kanal 10 bei 2,457 GHz

Abhängig vom Signal-Rausch-Verhältnis und der damit verbundenen Modulationsform liegt die Brutto-Datenrate zwischen 2 und 11 MBit/s. Als Betriebsart wird zwischen dem *Infrastruktur-Modus* und dem *Ad-hoc-Modus* unterschieden. Der *Infrastruktur-Modus* beschreibt das Einwählen beliebiger Geräte in ein ausgezeichnetes, als Basisstation arbeitendes Gerät. Dieses koordiniert das Netz und dient häufig auch als Vermittler in weitere Netze, wie Ethernet oder ADSL<sup>1</sup>. Beim *Ad-hoc-Modus* existiert keine festgelegte Basisstation. Die einzelnen Netzteilnehmer organisieren sich vielmehr selbst. Entsprechend ist hier lediglich ein Datenaustausch untereinander, jedoch kein Routing in und zwischen anderen Netzen möglich [Held01].

<sup>1</sup> ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line, Anschlussleitung für digitale Breitbandanschlüsse

Aufgrund der Reglementierungen ist WLAN wie auch Bluetooth auf eine maximale isotrop abgestrahlte Sendeleistung von 100 mW beschränkt. Bei nicht ausreichender Signalqualität wird die Datenrate durch Änderung des Übertragungsverfahrens herabgesetzt. Entsprechend den oftmals vom Benutzer einstellbaren maximalen Sendeleistungen liegen die erzielbaren Reichweiten zwischen unter 20 m in Gebäuden über 100 m im Freifeld.

### 3.2.3. HiperLAN, HomeRF

Neben dem klassischen WLAN bzw. IEEE 802.11 b gibt bzw. gab es noch weitere Breitband-Funknetzdienste, von denen jedoch nur HiperLAN und HomeRF einen gewissen Bekanntheitsgrad erreicht haben. Bei beiden handelt es sich um alternative Technologien zu WLAN.

HiperLAN steht für High Performance Radio Local Area Network und wurde 1996 vom ETSI<sup>1</sup> definiert und existiert wie WLAN mittlerweile in mehreren aufeinander aufbauenden Weiterentwicklungen. Die verschiedenen Versionen (HiperLAN/1, HiperLAN/2, Hiperaccess und Hiperlink) arbeiten in unterschiedlichen Bereichen des 5-GHz-ISM-Bands. Erreichbare Datenraten liegen zwischen 23,5 MBit/s und bis zu 155 MBit/s. Aufgrund der starken Konkurrenz durch den 802.11 b Standard konnte sich der HiperLAN-Standard jedoch bislang nicht durchsetzen [Held01].

Ein weiteres Konkurrenzprodukt zu Bluetooth und WLAN war das von der Home Radio Frequency Working Group, einem Konsortium von Mobilfunkfirmen, entwickelte HomeRF. HomeRF nutzte ebenfalls das 2,4-GHz-ISM-Band und sah anfänglich eine maximale Datenrate von 10 MBit/s, später sogar 20 MBit/s vor. Als Hauptanwendungsgebiete wurden TV-Geräte, HiFi-Komponenten und ähnliche Multimediageräte vorgesehen. Die Arbeitsgruppe um HomeRF wurde 2003 aufgelöst, als der 802.11 b-Standard für Heimanwender benutzbar bzw. bezahlbar wurde und gleichzeitig Bluetooth seinen Siegeszug unter Endgeräten antrat. Bis dahin konnte es sich lediglich in den USA verbreiten, in Europa traten keine nennenswerten Lösungen auf den Markt [Held01, Sikora03].

### 3.2.4. ZigBee

Nicht zuletzt durch ihre nahezu serienmäßige Implementierung in die heutige Unterhaltungselektronik bzw. Betriebssysteme haben WLAN und Bluetooth über ihre mittlerweile stark ausgeprägte Vormachtstellung übrige drahtlose Lösungen fast vollständig verdrängt. Da der ZigBee Standard jedoch neue Anwendungsbereiche erschließt, die in absehbarer Zeit bzw. innerhalb der geplanten Weiterentwicklungen nicht durch WLAN oder Bluetooth bzw. andere erhältliche Funkübertragungsdienste abgedeckt werden können, besitzt zumindest dieser Standard ebenfalls eine hohe Erfolgsaussicht als Kabelersatz.

---

<sup>1</sup> ETSI: European Telecommunications Standards Institute

Grundzüge von ZigBee gehen zurück in das Jahr 1998. Unter anderem Philips bildete im Rahmen von HomeRF eine Arbeitsgruppe, die Entwürfe für eine neue Funklösung unter dem Namen HomeRF-lite erarbeitete. Im Jahr 2002 bildete sich dann aus kooperierenden Unternehmen die ZigBee Alliance. ZigBee bzw. IEEE 802.15.4 soll hauptsächlich als Kabelersatz für Sensor- und Aktornetzwerke dienen und richtet sich speziell an die Nachteile, die Bluetooth und WLAN in dieser Disziplin aufweisen. Hierbei sind vor allem der hohe Stromverbrauch sowie die Modulkomplexität, aber auch die z.B. bei Bluetooth relativ hohen Latenzzeiten und die Beschränkung auf lediglich acht aktive Teilnehmer innerhalb eines Netzes zu nennen.

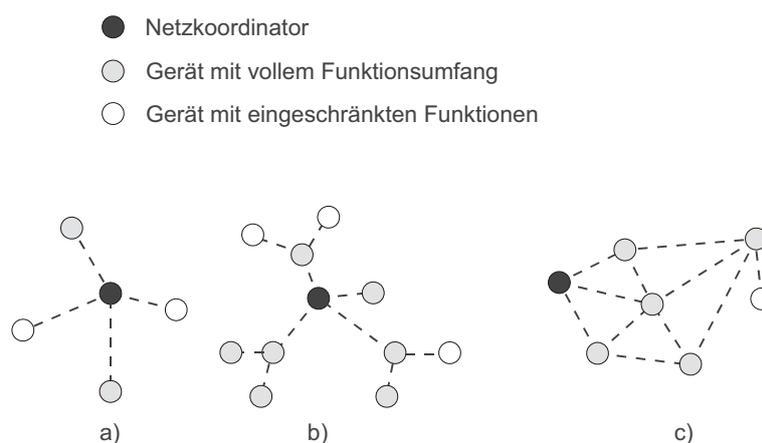


Abbildung 3.4: Mögliche Topologien innerhalb eines ZigBee-Netzes: a) sternförmig, b) Peer-to-Peer, c) netzförmig

ZigBee-Module sollen große und störungempfindliche Netze bilden können (Abbildung 3.4), wobei die einzelnen Teilnehmer in der Lage sind, die Daten auch untereinander zu routen. Hierdurch sind auch bei geringen Sendeleistungen bzw. unter ungünstigen Bedingungen, durch Routing über mehrere Zwischenstationen, hohe Distanzen überbrückbar. Die Module sollen dabei sowohl extrem preisgünstig, sogar günstiger als Bluetoothmodule, als auch um mehrere Größenordnungen stromsparender als diese sein. Hierdurch würde sich ZigBee besonders für batteriebetriebene und selbst bzw. adaptiv organisierende Netzwerke zwischen Sensoren und Aktoren aller Art in der Industrie aber auch im Haushalt eignen [Ondrej06].

Als Funkschnittstelle sieht ZigBee im Gegensatz zu den anderen beschriebenen Funkübertragungsstandards mehrere Frequenzbänder zur Kommunikation vor. Diese müssen jedoch nicht notwendig alle in einem Produkt implementiert werden. Hauptband ist das 2,4-GHz-ISM-Band, welches in 16 Kanäle mit einem Kanalabstand von 5 MHz unterteilt wird (Tabelle 3.4). Um einer Konkurrenz mit Bluetooth oder WLAN aus dem Weg zu gehen, sind als Ersatz bzw. zum Ausweichen zusätzlich zwei weitere Frequenzbänder definiert: in Europa ein Kanal im 866 MHz-ISM-Band bei 868,3 MHz und in den USA zehn Kanäle zwischen 902 und 928 MHz mit jeweils 2 MHz Abstand. Als Modulationsverfahren kommt, wie bei WLAN, ein Frequenzspreizverfahren zum Einsatz [ZigBee].

Frequenzband	Region	Kanalnummer	Datenrate
868 bis 868,6 MHz	Europa	0	20 kBit/s
902 bis 928 MHz	Amerika	1 bis 10	40 kBit/s
2,4 bis 2,4835 GHz	weltweit	21 bis 26	250 kBit/s

Tabelle 3.4: Von ZigBee verwendete Übertragungskanäle sowie die im jeweiligen Kanal erzielbaren Datenübertragungsraten

Der Name ZigBee geht zurück auf den Schwänzeltanz der Honigbiene, im Englischen *ZigBee Principle* genannt, der die Entwickler an die Vernetzung sowie das zugehörige Routing der Funkmodule erinnerte.

### 3.2.5. Powerline Communication

Die Powerline Communication, oft durch PLC abgekürzt, ist ein Oberbegriff für die verschiedenen Formen der Datenübertragung über das klassische Stromversorgungsnetz. Strenggenommen handelt es sich bei diesem Datenübertragungsverfahren also nicht um ein drahtloses Verfahren, weil als Träger stets ein vorliegendes Stromversorgungskabel benötigt wird. Da die meisten Geräte auf eine externe Stromversorgung angewiesen sind und diese auch praktisch überall vorhanden ist, werden jedoch zusätzliche Kabel zur Vernetzung der Geräte untereinander eingespart. Im Gegensatz zur Bustechnik werden allerdings nicht Datenkabel zur Stromübertragung, sondern Stromkabel zur Datenübertragung verwendet. Dadurch stehen weitaus höhere Anschlussleistungen als bei busgespeisten Systemen für die angeschlossenen Geräte zur Verfügung.

Grundprinzip der PLC ist die Übertragung von Informationen mit Hilfe modulierter hochfrequenter Ströme, die in das Stromnetz eingekoppelt werden und sich anschließend über das angeschlossene Netz verbreiten [Dostert00]. Der einfachste Vertreter der Powerline Communication ist das kabelgestützte Babyphon.

So einfach wie zweckmäßig die Datenübertragung über das ohnehin fast überall zugängliche Stromnetz scheint, so liegt hierin auch der größte Nachteil dieser Datenübertragungstechnik: durch die hohe Unsymmetrie der Stromversorgungsnetze sind diese zur Übertragung hochfrequenter Ströme strenggenommen nicht in der Lage. Bereits nach wenigen Metern Leitungslänge können große Teile des Signals abgestrahlt werden, wodurch sich bei ungünstiger Leitungsführung die Signalqualität rasch und unkontrolliert verringert. Hinzu kommt, dass durch die in vielen Geräten enthaltenen Netzfilter große Teile des Signals gedämpft werden, was ebenfalls stark die Signalqualität beeinflusst. Die Verluste auf den Leitungen konnten zwar durch höhere Pegel und empfindlichere Gegenstellen kompensiert werden, jedoch bleibt das Problem der unkontrollierten Ausbreitung und Abstrahlung elektromagnetischer Energie über das Stromversorgungsnetz [Gebhardt02].

Während funkgestützte, drahtlose Datenübertragungsdienste in dafür fest reservierten Frequenzbändern arbeiten und sich dadurch höchstens untereinander stören, arbeitet die PLC in einem Bereich zwischen 1 und 30 MHz. Durch die unkontrollierte Abstrahlung der Versorgungsleitungen kommt es zur massiven Störung einer Vielzahl der in diesem Frequenzband arbeitenden Funkdienste, wie Amateurfunk und Radio. Auf diese Störungen wird insbesondere auf EMV-Konferenzen immer wieder hingewiesen. Dieses hält die Hersteller jedoch nicht davon ab, kontinuierlich neue Produkte auf den Markt zu bringen.

Aufgrund der Alternative durch heutige „echte“ drahtlose Funkübertragungsdienste, bei denen die emittierte Strahlung definiert und kontrollierbar auftritt, sowie der beobachteten Störungen durch die PLC [Feile04, Vick04], ist nicht davon auszugehen und auch nicht zu befürworten, dass sich diese Technik im industriellen Umfeld durchsetzen wird.

### 3.2.6. DECT

Der DECT Standard ist ein Standard, der in Deutschland fast ausschließlich in schnurlosen Telefonen Verbreitung findet. DECT steht für Digital Enhanced Cordless Telecommunications und beruht auf dem ETSI Standard ETS 300 175 aus dem Jahr 1992 [Sikora03]. Das Sendeverfahren ähnelt mit TDMA<sup>1</sup> und FDMA<sup>2</sup> dem GSM-Standard<sup>3</sup> heutiger Mobiltelefone. DECT arbeitet im Frequenzbereich zwischen 1880 MHz und 1900 MHz, welcher in zehn Kanäle mit je 1728 kHz Bandbreite aufgeteilt wird. Als Modulation kommt, wie bei Bluetooth, GFSK zum Einsatz. Die Sendeleistung von DECT liegt bei maximal 250 mW, womit eine Reichweite ähnlich der von WLAN und Bluetooth erreicht wird. Häufig kritisiert wird in diesem Zusammenhang bei DECT, dass die Basisstation ständig sendet, somit also im Gegensatz zu den meisten anderen Datenübertragungsstandards auch ohne aktiven Nutzdatenverkehr eine vergleichsweise hohe Grundstrahlung vorliegt. Wie bei Bluetooth gibt es bei DECT eine Reihe von Profilen, die ein Einbinden in vorhandene Netze bzw. einen Kabelersatz erleichtern sollen.

Obwohl sich DECT im Bereich der schnurlosen Haustelegone vollständig durchsetzen konnte und die vorhergehenden CT1 und CT2 Standards<sup>4</sup> nahezu verdrängt hat [Arens95], gibt es nur sehr wenige Lösungen für Datenübertragung außerhalb des Mobilfunks.

### 3.2.7. IrDA

IrDA ist ein Standard, der auf das gleiche Anwendungsgebiet wie Bluetooth abzielt: die Vernetzung hauptsächlich von Endgeräten untereinander und an PCs über kurze Strecke unter

---

<sup>1</sup> TDMA: Time Division Multiple Access

<sup>2</sup> FDMA: Frequency Division Multiple Access

<sup>3</sup> GSM: Global System for Mobile Communications

<sup>4</sup> CT1 / CT2: Cordless Telephone 1 / 2

Schaffung einer einheitlichen und leicht zu bedienenden Schnittstelle. Im Gegensatz zu den bisherigen Standards dient bei IrDA jedoch Licht zur Übertragung der Daten.

IrDA steht für Infrared Data Association und wurde ursprünglich von Hewlett Packard entwickelt, dem sich 1993 weitere Firmen anschlossen. Wie der Name impliziert, findet die Datenübertragung mit infrarotem Licht im Wellenlängenbereich zwischen 850 bis 900 nm und einer Sendeleistung zwischen 40 und 500 mW/Sr statt. Die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt, abhängig von der verwendeten Spezifikation, bis zu 16 MBit/s.

Der größte Nachteil von IrDA gegenüber der Funkübertragung besteht in der Notwendigkeit von direktem Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger. Auch die Reichweite ist mit typischerweise 1 m im Vergleich zu heutigen Standards sehr gering, wobei Standard IrDA-Transmitter zusätzlich lediglich in einem Raumwinkel von 30° arbeiten.

### 3.2.8. Übersicht

In Tabelle 3.5 sind die wichtigsten Funktechniken sowie ihre Eigenschaften zusammengefasst. Die erzielbaren Reichweiten beziehen sich hierbei immer auf die Reichweite von Standardmodulen im Freien bei Nutzung von omnidirektionalen Antennen.

Technologie	maximale Brutto-Datenrate	Reichweite	maximale Anzahl an Netzknoten	Einsatzbereich
IrDA	4 MBit/s	1 m / 15°	2	Punkt-zu-Punkt Datenübertragung, Peripherie
DECT	128 kBit/s	50 m	8	Punkt-zu-Punkt Datenübertragung, Sprachanwendung
Bluetooth	1 MBit/s	100 m	8	Datenübertragung zwischen Endgeräten und Peripherie
HomeRF	2 MBit/s	50 m	> 128	Vernetzung im Haushalt
WLAN 802.11 b	11 MBit/s	100 m	ca. 10	drahtloses Netzwerk, Datenübertragung
HiperLAN	54 MBit/s	150 m	ca. 10	drahtloses Netzwerk, Datenübertragung
ZigBee	250 kBit/s	100 m	65536	Hausautomation, Anbindung von Sensoren und Aktoren

Tabelle 3.5: Übersicht über die oben beschriebenen drahtlosen Datenübertragungstechniken sowie wichtiger Kenngrößen. Wegen einer mangelnden Standardisierung sowie der diskutierten Probleme ist die Powerline Communication nicht aufgeführt.

Zusätzlich zu den oben diskutierten Standards gibt es neben einer Reihe von Substandards noch weitere Verfahren zur drahtlosen Datenübertragung in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Wie jedoch in den folgenden Kapiteln eingehender diskutiert wird, ist es in diesem

Zusammenhang sinnvoll, sich auf die gebräuchlichsten und bekanntesten Standards zu beschränken.

### 3.3. Regulierung nationaler und internationaler ISM-Bänder

Generell ist die Emission elektromagnetischer Strahlung in nahezu allen Ländern innerhalb eines sehr breiten Frequenzbereichs reguliert. So regelt in Deutschland die Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV) eine Aufteilung der im Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 275 GHz emittierten elektromagnetischen Strahlung auf Frequenznutzungen [FreqBZPV04]. Diese Festlegungen enthalten die den Frequenzzuteilungen betreffenden rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die technischen und betrieblichen Bedingungen, welche bei der Nutzung von Frequenzen einzuhalten sind. So ist z.B. für den Betrieb einer Radio- oder Mobilfunksendeanlage eine Lizenz nötig [BGB01], welche der Staat in der Regel meistbietend an einen Nutzer versteigert und die diesem dann für einen festgelegten Zeitraum die alleinige Nutzung bzw. eine Nutzungsteilung mit Dritten ermöglicht.

Neben den regulierten Frequenzbändern gibt es mehrere ISM-Bänder (Tabelle 3.6), welche nicht der staatlichen Regulierung unterliegen und lizenzfrei genutzt werden dürfen. Innerhalb dieser Bänder müssen lediglich Auflagen bezüglich der Sendeleistung und der Störung benachbarter Frequenzbereiche eingehalten werden. Hierdurch ist den Herstellern von Kommunikationselektronik die Möglichkeit gegeben, drahtlose Geräte auf den Markt zu bringen, die vom Konsumenten ohne weitere Zulassungen oder Genehmigungen betrieben werden dürfen.

Von besonderem Interesse für die Industrie sind dabei ISM-Bänder, deren Regularien in mehreren Ländern Anwendung finden. Somit wird ein in einem Land zugelassenes Gerät automatisch auch den Anforderungen in einem anderen Land gerecht und darf damit dort verkauft und insbesondere auch betrieben werden. Dies bewirkt eine deutliche Vergrößerung des Marktes bei gleich bleibendem Entwicklungsaufwand. So können z.B. Bluetoothgeräte eines deutschen Herstellers weltweit verkauft und genutzt werden. Mobiltelefone auf der anderen Seite müssen wegen der unterschiedlichen Frequenzbereiche und Regularien in Form von Tri- oder sogar Quad-Band-Mobiltelefonen speziell an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden, sofern der Kunde nicht für jedes Land eine separate Lösung erwerben möchte bzw. kann.

Entsprechend der „Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzteilbereichen gemäß Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV)“ sind ISM-Anwendungen „alle Nutzungen elektromagnetischer Wellen durch Geräte oder Vorrichtungen für die Erzeugung und lokale Nutzung von Hochfrequenzenergie für industrielle, wissenschaftliche, medizinische, häusliche oder ähnliche Zwecke“. Für diese Art der Anwendungen reserviert sind in Deutschland die in Tabelle 3.6 aufgeführten Bereiche. Ausschließlich für die industrielle, wissenschaftliche und medizinische Nutzung sind vier weitere Bereiche zwischen 6,7 GHz und 246 GHz festgelegt. Bekannteste Nutzer der unterschiedlichen Bänder sind Funkfernsteu-

erungen bei 27 MHz, drahtlose Babyphone und Haustechnik bei 433 MHz sowie der Mikrowellenherd und die oben genannten Funkübertragungssysteme im 2,4-GHz-Band. Frequenzbänder wie z.B. das 866-MHz-Band für drahtlose Audio-Funkanwendungen sind demgegenüber nur für bestimmte Anwendungsbereiche bzw. unter Auflagen zugelassen, um eine geringere gegenseitige Störung durch unterschiedliche Systeme und damit eine höhere Nutzungsqualität zu gewährleisten.

ISM-Frequenzbänder
9 bis 10 kHz
13,553 bis 13,567 MHz
26,957 bis 27,283 MHz
40,66 bis 40,70 MHz
433,05 bis 434,79 MHz
2,400 bis 2,500 GHz
5,725 bis 5,875 GHz
24 bis 24,25 GHz

Tabelle 3.6: In Deutschland für die „...Nutzung elektromagnetischer Wellen durch Geräte oder Vorrichtungen... für industrielle, wissenschaftliche, medizinische, häusliche oder ähnliche Zwecke...“ reservierte Frequenzbänder (ISM-Bänder)

Obwohl große Bereiche des 2,4-GHz-ISM-Bands weltweit festgelegt bzw. vereinheitlicht sind, gibt es dennoch regionale Besonderheiten. So ist z.B. in Frankreich nur der obere Teil des Frequenzbands verfügbar (Tabelle 3.7). Dies führt dazu, dass bei Frequenzspritzverfahren nur ein Teil der Kanäle genutzt werden kann und dass bei Frequenzsprungverfahren angepasste Sprungsequenzen verwendet werden. Generell wird jedoch eine international einheitliche Reglementierung angestrebt.

Region	Frequenzband	nutzbare Kanäle
USA	2,4000 bis 2,4835 GHz	79
Europa	2,4000 bis 2,4835 GHz	79
Frankreich	2,4465 bis 2,4835 GHz	27
Spanien	2,4450 bis 2,4750 GHz	35
Japan	2,4710 bis 2,4970 GHz	23

Tabelle 3.7: Von Bluetooth in unterschiedlichen Ländern nutzbare Frequenzbereiche sowie die daraus resultierende Anzahl an Kanälen. Die Sprungsequenzen werden der Bandbreite entsprechend angepasst.

### 3.4. Anforderungen an drahtlose Datenübertrager

Die Entscheidung für einen möglichen drahtlosen Datenübertragungsstandard auf Schiffen ist sowohl von der hauptsächlich in dieser Arbeit diskutierten EMV der entsprechenden Funkmodule als auch von den nachrichtentechnischen Anforderungen an das Funkprotokoll abhängig. Ebenfalls muss es sich aus wirtschaftlichen Gründen um eine verhältnismäßig einfache Lösung handeln.

Per Definition ist die EMV einer elektrischen Einrichtung die Fähigkeit, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Geräte gehören, unzulässig zu beeinflussen. Hieraus resultieren die beiden wesentlichen Forderungen der EMV [Schwab96]:

- Die verwendeten Funkmodule dürfen keine umliegenden Geräte oder Schaltkreise stören,
- die verwendeten Funkmodule dürfen sich nicht über ein bestimmtes Maß hinaus von umliegenden Quellen stören lassen.

Die zweite Forderung betritt jedoch bereits ein Grenzgebiet zwischen der Datenverarbeitung und der EMV: da Funkmodule, wie bereits erläutert, durch Benutzung desselben Frequenzbands mit anderen Funkübertragern in Konkurrenz treten, kommt es funktionsbedingt regelmäßig zu Störungen bei der drahtlosen Datenübertragung durch andere Geräte. Auch das Umfeld eines Funkübertragungsmoduls kann die Datenübertragung, z.B. durch Interferenz oder starke Absorption, in einer Weise beeinträchtigen, dass es zu nennenswerten Störungen bei der Datenübertragung kommt. Hier gilt nun von beiden Seiten zu klären, ob die im Anwendungsbereich auftretenden Störungen im Rahmen der Anwendung nicht nennenswert bzw. noch tolerierbar sind, oder aber zu Ausfällen oder Fehlfunktionen übergeordneter Systeme infolge einer Unterbrechung des Datenflusses führen können.

Da Funkmodule in jedem Fall aber einen Eingriff in einen Datenfluss darstellen, ist seitens der Nachrichtentechnik auch die Anforderung bezüglich z.B. der Datenrate und Übertragungsgeschwindigkeit, der maximalen Verzögerung und der Übertragungssicherheit zu beachten. Die Überlegungen bezüglich der Informatik sowie der Nachrichtentechnik werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit, sofern sie nicht in direkter Wechselwirkung mit der EMV stehen, nur grundsätzlich und nicht im Detail angesprochen bzw. diskutiert.

### 3.5. Eingrenzung der Funkübertragungstechniken

Anhand der in Kapitel 3.2 beschriebenen Eigenschaften, Vorteile und Anwendungsbereiche der zur Verfügung stehenden drahtlosen Datenübertragungsstandards sowie der in Kapitel 3.3

diskutierten Wahl des Frequenzbereichs lässt sich im Folgenden für die hier zur Diskussion stehenden Anwendungen bereits eine Eingrenzung in Frage kommender Standards durchführen:

Wegen des hohen Kostendrucks ist es nicht zweckmäßig auf andere als die etablierten und oben beschriebenen Funkübertragungssysteme zurückzugreifen, zumal es für diese Standards ein breites Spektrum angepasster und ggf. zertifizierter Lösungen gibt, die sich schnell und zuverlässig in ein Endprodukt integrieren lassen. Aufgrund der besonderen Charakteristik des Verkehrsmittels Schiff sowie der Anforderungen in der industriellen Automation im Allgemeinen, kann bereits an dieser Stelle unter der Auswahl an Funkübertragungsstandards eine deutliche Einschränkung getroffen werden [Beikirch05].

Eine Datenübertragung auf Schiffen muss ständig, also auch beim Liegen im Hafen oder lediglich beim Durchfahren von Hoheitsgewässern aufrechterhalten werden. Bereits ab der Seegrenze gelten jedoch die nationalen Immissionsschutzverordnungen. Aus diesem Grund können nur Funkübertragungssysteme verwendet werden, die sämtlichen nationalen und internationalen Verordnungen genügen. Wegen der unterschiedlichen internationalen Reglementierungen zur Nutzung und Belegung von Frequenzbändern muss damit eine Lösung verwendet werden, die einen normkonformen Betrieb innerhalb sämtlicher befahrener Regionen, zweckmäßigerweise weltweit, erlaubt.

Als Frequenzband bietet sich damit, wie bereits in der Übersicht über die Funkübertragungsmodule erwähnt, das international lizenzfrei verfügbare ISM-Band bei 2,4 GHz an. Zwar ist die Breite des Bands bisher noch nicht vollständig international angeglichen, jedoch laufen Bestrebungen einen weltweit einheitlichen Frequenzbereich herbeizuführen. Auf die wenigen regionalen Besonderheiten haben die Hersteller bereits Rücksicht genommen, so dass alle für dieses Frequenzband erhältlichen Produkte international ohne Betriebslizenz verwendet werden dürfen. Innerhalb aller in diesem Band verfügbaren Funkübertragungsstandards, führte der hohe Konkurrenzdruck in der heutigen Unterhaltungselektronik zu einer deutlichen Vormachtstellung von Bluetooth und WLAN.

Betrachtet man die beiden Standards einmal näher unter Berücksichtigung möglicher Anwendungsgebiete zur Kabelreduzierung auf Schiffsbrücken, so lässt sich feststellen, dass die beiden Funkdienste zwar um das gleiche Frequenzband konkurrieren, sich jedoch von den Anwendungsbereichen her ergänzen. Eine Tendenz, die sich auch in der heutigen Unterhaltungselektronik dadurch abzeichnet, dass in vielen Geräten beide Techniken parallel verwendet werden. Folgende Anwendungsbereiche bieten sich für die beiden Standards an:

Bluetoothmodule verfügen im Vergleich zu anderen Funkübertragungstechniken über eine eher geringe Datenrate. Gleichzeitig kommt es durch das rasche Frequenzsprungverfahren zu einer deutlichen Verzögerung bei der Signalübertragung (Kapitel 5.3.4). Im Bereich des Schiffs bieten sich Bluetoothmodule daher vor allem für die Datenübertragung von den Hauptsensoren zu Rechnern und von Rechnern zu den Tochteranzeigen an. Beide Anwendun-

gen weisen mit Aktualisierungsraten im Bereich zwischen 1 und 10 Hz extrem niedrige Datenraten auf. Ebenso eignet sich Bluetooth besonders zur Anbindung von Zweit- und Dritteingabegeräten, wie Trackballs, Tastaturen oder auch mobilen Eingabestationen, wofür es z.B. in der Unterhaltungselektronik bereits verwendet wird. Ein großer Vorteil von Bluetoothmodulen ist, dass dieser Standard von Anfang an als sehr günstige Lösung mit sehr geringer Produkteinführungszeit vorgesehen war. So bestehen viele der heutigen Bluetoothmodule aus einem einzigen Bauteil und integrieren neben den nötigen Schnittstellen auch die Steuerlogik sowie zum Teil sogar D/A- und A/D-Wandler. Aufgrund der hohen Produktion liegen die Preise für die Bluetoothmodule mittlerweile bei unter 5 € pro Stück.

WLAN eignet sich mit einer Netto-Datenübertragungsrate von bis zu 11 MBit/s im Gegensatz zu Bluetooth eher für höhere Datenströme mit lediglich minimalen Verzögerungszeiten. Damit bietet es sich beispielsweise für Radaranwendungen, das Conning display (Schiffsführung) oder für CAN-over-Ethernet-Anwendungen an [Beikirch04, Pohlmann05]. Durch die WLAN-Versionen im 5-GHz-ISM-Band besteht im Fall einer globalen Freigabe auch die Möglichkeit, Bluetooth und WLAN in zwei getrennten Frequenzbändern operieren zu lassen, um damit mögliche gegenseitige Störungen zu minimieren. Auch WLAN-Module sind mittlerweile stark im Preis und auch in ihren Abmessungen gesunken, benötigen jedoch im Vergleich zu Bluetooth noch aufwändigere externe Ansteuerungen und verfügen bislang auch nicht über auf einem Chip integrierte Schnittstellen.

In diesem Zusammenhang sollte auch der ZigBee Standard erwähnt werden. Dieser befindet sich zwar noch in der Planungs- bzw. Startphase, bietet jedoch vom Grundgedanken her vielversprechende Ansätze zur sinnvollen Ergänzung von Bluetooth und WLAN. Da ZigBee innerhalb des 2,4-GHz-ISM-Bands arbeitet, entfallen auch hier umständliche Zulassungen, so dass der Hersteller bei der Auswahl bereits zertifizierter Funkmodule keine weiteren lizenzrechtlichen Schritte für sein Endprodukt mehr unternehmen muss. ZigBee soll im Vergleich zu Bluetooth einen um mehrere Größenordnungen geringeren Stromverbrauch aufweisen und deutlich größere Netze unterstützen. Damit würde es sich als simple, batterie- oder solargestützte Lösung besonders für die Übertragung von Sensordaten in z.B. Maschinen- oder Klimaräumen mit geringen Datenraten und Aktualisierungsraten im Bereich einiger Sekunden bis Minuten eignen. Zuletzt sollen auch ZigBee-Module für eine extrem günstige Herstellung entwickelt werden und ebenfalls wie Bluetoothmodule die am häufigsten verwendeten Schnittstellen enthalten. Somit könnte auch hier eine einfache und schnelle Implementierung erfolgen.

Da erst langsam vereinzelte ZigBee-Lösungen auf den Markt kommen, werden sich die im Folgenden durchgeführten Untersuchungen auf den Bluetooth- sowie den WLAN-Standard beschränken. Insbesondere wegen seiner hohen Eignung zur Übertragung von NMEA-Daten wird dabei der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung von Bluetoothmodulen liegen. Allerdings lassen sich viele der gewonnenen Ergebnisse, wie z.B. die in Kapitel 4 durchgeführten Untersuchungen zur Emission sowie zur Einkopplung der Strahlung von Funkübertragungsmodulen, auch auf andere 2,4-GHz-Systeme übertragen.

## 4. Wechselwirkung zwischen Funkübertragern und ihrer Umgebung

Grundsätzlich werden bei der Analyse der elektromagnetischen Verträglichkeit eines Systems drei Bereiche unterschieden:

- Störquelle, in diesem Fall das Funkmodul,
- Art der Kopplung zwischen Quelle und Empfänger,
- Empfänger der Störung (Senke), in diesem Fall umgebende elektrisch leitfähige Strukturen.

Es ergibt sich damit das folgende EMV-Beeinflussungsmodell [Schwab96]:

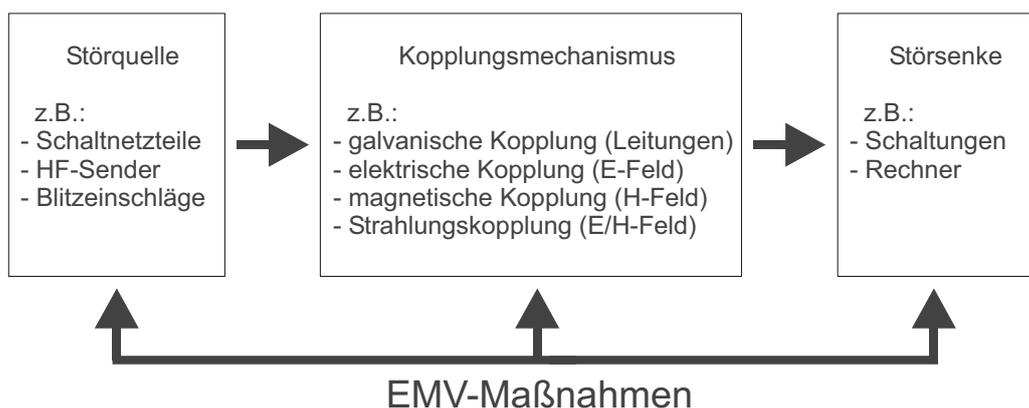


Abbildung 4.1: EMV-Beeinflussungsmodell mit Beispielen für Störquellen und -senken. Je nach Art und Stärke der Störung sowie der Kopplung setzen Gegenmaßnahmen an unterschiedlichen Stellen an.

Bei den verwendeten kommerziellen Funkübertragern handelt es sich vom Prinzip her um gewollte Strahlungs- bzw. Störquellen, deren Außerbandemission durch Verordnungen begrenzt sowie überwacht wird (Kapitel 5.1.2). Die Störquellen können damit auf ihre Eigenschaften als Strahler im Bereich um 2,4 GHz reduziert werden. Als Störsenken kommen wegen der kleinen Abmessungen der Funkmodule sowie ihrer hohen Verbreitung alle Komponenten und Geräte bzw. allgemein alle Formen leitfähiger Strukturen in Frage. Von Interesse im Sinne des Störmodells ist daher die Kopplung zwischen den 2,4-GHz-Signalen der Funkübertrager und umgebenden leitfähigen Strukturen.

Zur genaueren Untersuchung der Kopplung kann diese in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Die Abstrahlung von 2,4-GHz-Signalen über die Antennen sowie die Abstrahlung über Versorgungs- und Datenleitungen (Quelle),
- die Ausbreitung der Signale zwischen Quelle und Senke,
- die Einkopplung der Signale in leitfähige Strukturen (Senke).

Diese drei Abschnitte werden im Folgenden nacheinander betrachtet und diskutiert, um eine Aussage über die Abstrahlung, Ausbreitung und die anschließende Einkopplung der Signale machen zu können.

## 4.1. Emission von Funkübertragungsmodulen

### 4.1.1. Messung der feldgeführten Emission von USB- und PCMCIA-Modulen

Zur Messung der Emission von Funkübertragungsmodulen wurden unterschiedliche Notebooks mit USB-Bluetoothsendern verschiedener Leistungsklassen sowie mit WLAN-Modulen ausgerüstet (Abbildung 4.2). Außerdem wurden unterschiedliche serielle Bluetoothmodule der Leistungsklasse 1 (maximal 20 dBm bzw. 100 mW) vermessen.



Abbildung 4.2: Bluetooth- und WLAN-Funkübertragungsmodule in unterschiedlichen Bauformen, deren abgestrahlte Felder vermessen wurden

In allen Fällen wurde mit Hilfe eines zweidimensionalen Nahfeldscanners die senkrechte Komponente des elektrischen Feldes in einer Ebene wenige Zentimeter unterhalb der Notebooks bzw. der Module (Abbildung 4.3) gemessen. Bei beiden Funkstandards wurde hierzu

eine Paarung zwischen zwei Geräten initiiert und während des gesamten Messvorgangs eine Datenübertragung bei üblicherweise maximaler Bandbreite aufrechterhalten. Ebenfalls wurden Vergleichsmessungen im gepaarten Zustand ohne Datenübertragung durchgeführt.

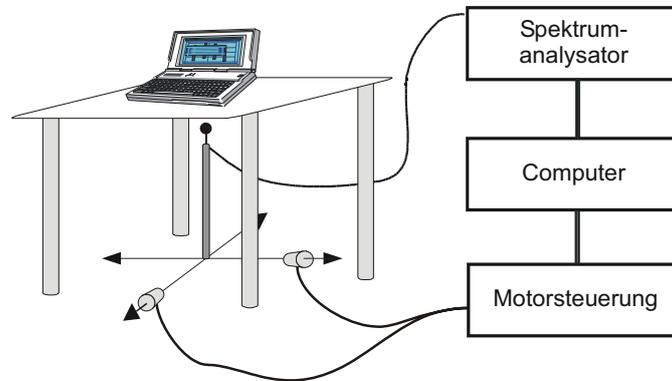


Abbildung 4.3: Aufbau zur Messung des abgestrahlten Feldes eines Testobjekts. Über einem zweidimensionalen Verschiebetisch wird eine Antenne unterhalb des Testobjekts bewegt. Das Signal wird von einem Spektrumanalysator gemessen. Alle Geräte werden von einem PC aus über GPIB<sup>1</sup> oder Ethernet gesteuert.

Das gepaarte Modul wurde bei den Messungen in genügend großer Entfernung aufgestellt, um die Messung nicht durch dessen Fremdfelder zu stören. Viele Bluetoothmodule verfügen über eine automatische Regulierung ihrer Sendeleistung, was bei den Messungen durch die damit verbundenen Schwankungen der Sendeleistung zu Fehlern führen kann. Durch eine genügend große Entfernung zwischen den gepaarten Modulen wurde sichergestellt, dass diese mit maximaler Sendeleistung arbeiteten.

Als Messgerät diente ein Spektrumanalysator im Maxhold-Modus. Als Messempfänger wurde ein kurzer Monopol mit bekanntem Antennenfaktor verwendet. Der üblicherweise logarithmisch ausgedrückte Antennenfaktor  $AF$  gibt das Wandlungsmaß zwischen der Feldstärke  $E$  an, mit der die Antenne beaufschlagt wird und der an der Anschlussbuchse der Antenne abgreifbaren Fußpunktspannung  $U_{\text{Fußpunkt}}$  an einem Widerstand von  $50 \Omega$ :

$$AF = 20 \cdot \lg \left( \frac{E}{U_{\text{Fußpunkt}}} \right). \quad (4.1)$$

Die Fußpunktspannung wiederum lässt sich aus der im Messgerät umgesetzten Leistung  $P$  berechnen:

$$P = \frac{(U_{\text{Fußpunkt}})^2}{R}. \quad (4.2)$$

<sup>1</sup> GPIB: General Purpose Interface Bus, Bussystem zum Verbinden von Messgeräten

Unter Verwendung des logarithmischen Ausdrucks für die Leistung:

$$P[dBm] = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right) \Leftrightarrow P = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{P[dBm]}{10}}, \quad (4.3)$$

sowie für die Spannung:

$$U[dB\mu V] = 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{1 \mu V}\right) \Leftrightarrow U = 1 \mu V \cdot 10^{\frac{U[dB\mu V]}{20}}, \quad (4.4)$$

ergibt sich mit Gleichung 4.2:

$$R \cdot (1 \cdot 10^{-3} \text{ W}) \cdot 10^{\frac{P[dBm]}{10}} = \left( (1 \cdot 10^{-6} \text{ V}) \cdot 10^{\frac{U[dB\mu V]}{20}} \right)^2 \quad (4.5)$$

und damit schließlich der Ausdruck für die Spannung in dB $\mu$ V:

$$U[dB\mu V] = 10 \cdot \lg\left(\frac{R}{1 \cdot 10^{-9} \Omega}\right) + P[dBm]. \quad (4.6)$$

Bei einer Impedanz von  $R = 50 \Omega$  ergibt sich für die Umrechnung von der im Messgerät umgesetzten Leistung in die Eingangsspannung:

$$U[dB\mu V] = 106,99 + P[dBm_{50\Omega}]. \quad (4.7)$$

Unter Verwendung des Antennenfaktors AF sowie der Dämpfung D des Anschlusskabels ergibt sich schließlich für die gemessene Feldstärke:

$$E\left[\frac{dB\mu V}{m}\right] = 106,99 + P[dBm_{50\Omega}] + AF + D, \quad (4.8)$$

wobei AF und D in dB einzusetzen sind. Eine Grafik zur Umrechnung der Feldstärke von dB $\mu$ V/m in V/m ist im Anhang in Abbildung 8.6 aufgeführt. Zur Vermeidung von Reflexionen befand sich der Aufbau des Senders in einer mit Absorbern ausgekleideten, leicht geöffneten Schirmkabine. Das gepaarte Modul wurde außerhalb der Schirmkabine aufgestellt. Durch geeignete Wahl des Messkanals sowie der Filterbandbreite wurde sichergestellt, dass bei allen durchgeführten Messungen lediglich die durch die betrachteten Sender verursachten Signale gemessen wurden. Weiterhin wurde durch Verdrehen der Messanordnung im Raum bzw. innerhalb der Kabine und anschließender erneuter Messung bei ansonsten gleich blei-

bendem Messaufbau überprüft und sichergestellt, dass die gemessenen Feldverteilungen frei von Reflexionen waren.

Ebenfalls war bei diesen Messungen wichtig, die Messbandbreite des Detektors auf das vorliegende Datenübertragungsverfahren und damit auf die Breite des Trägers anzupassen. Bei Frequenzspreizverfahren, wie WLAN, und ihrem breitbandigen, quasi rauschähnlichen Signal ist das Detektorsignal proportional zur Messbandbreite. Daher ist es wichtig, das Signal entweder durch eine genügend große Messbandbreite oder durch Aufsummieren der einzelnen Messpunkte über den gesamten Träger zu integrieren. Beim Frequenzsprungverfahren, wie Bluetooth, genügt eine Messbandbreite unterhalb der Kanalbreite, wodurch außerdem ein fälschliches Messen der Nebenchkanäle vermieden wird.

Die Umrissse der Laptops sowie die der Funkübertragungsmodule und Anschlusskabel wurden als Linien auf die gemessene Feldverteilung projiziert. Ein Ergebnis für einen USB-Bluetoothsender ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die über große Teile der leitfähigen Struktur des Laptops auf der Seite des Moduls verteilte Abstrahlung.

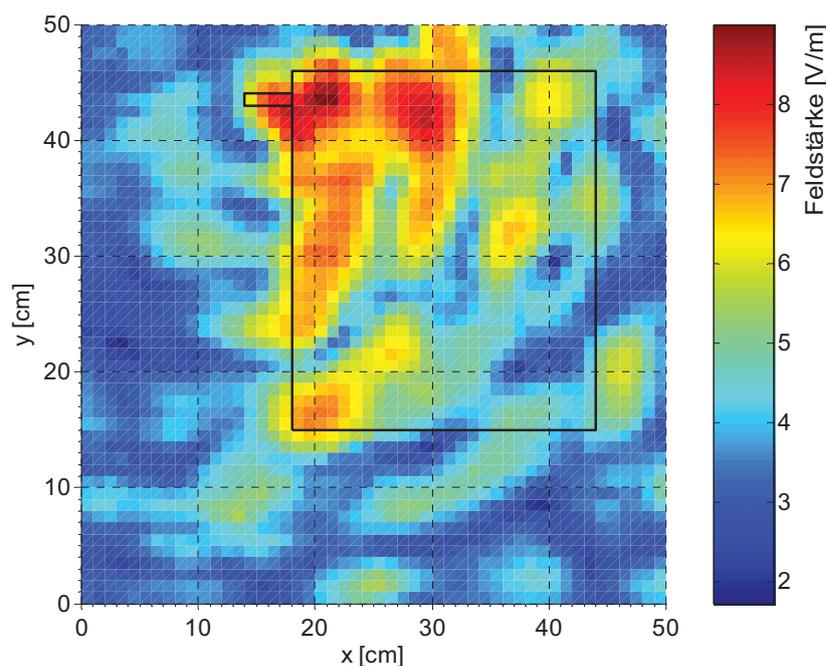


Abbildung 4.4: Feldverteilung unterhalb eines Laptops mit einem USB-Bluetoothmodul (links oben). Auffällig ist die über große Teile der leitfähigen Struktur des Laptops auf der Seite des Moduls verteilte Abstrahlung.

Wegen des Kostendrucks sowie der angestrebten minimalen Modulgrößen, werden bei Funkübertragungsmodulen in diesem Preissegment und besonders bei USB-Modulen überwiegend Keramikantennen sowie geätzte Antennen verwendet. Diese Antennen befinden sich dabei direkt auf der Leiterplatte, wodurch es zu starken Einkopplungen des abgestrahlten Feldes in unmittelbar benachbarte leitfähige Strukturen kommt. Ebenso dient bei dieser Antennenform

das Modul bzw. dessen Massefläche in hohem Maß als Gegengewicht zur Antenne, wodurch es ebenfalls auf den zur Antenne benachbarten leitfähigen Strukturen zu einer deutlichen Abstrahlung kommt. Hierdurch wird die entstehende Feldverteilung nicht nur vom Funkübertragungsmodul selbst, sondern ebenso vom Aufbau der umgebenden Strukturen abhängig. Bereits das Verwenden eines anderen Steckplatzes für den Funkübertrager kann ein in seiner Verteilung unterschiedliches Feldbild hervorrufen. Die auftretenden Feldstärken sind jedoch annähernd gleich.

Dieser Effekt ist auch bei Laptops mit integrierten Antennen erkennbar, wie Abbildung 4.5 zeigt. Die am oberen Ende des Displays angebrachte Antenne verursacht in dieser Messung ein Resonanzmuster über den gesamten oberen Displaybereich.

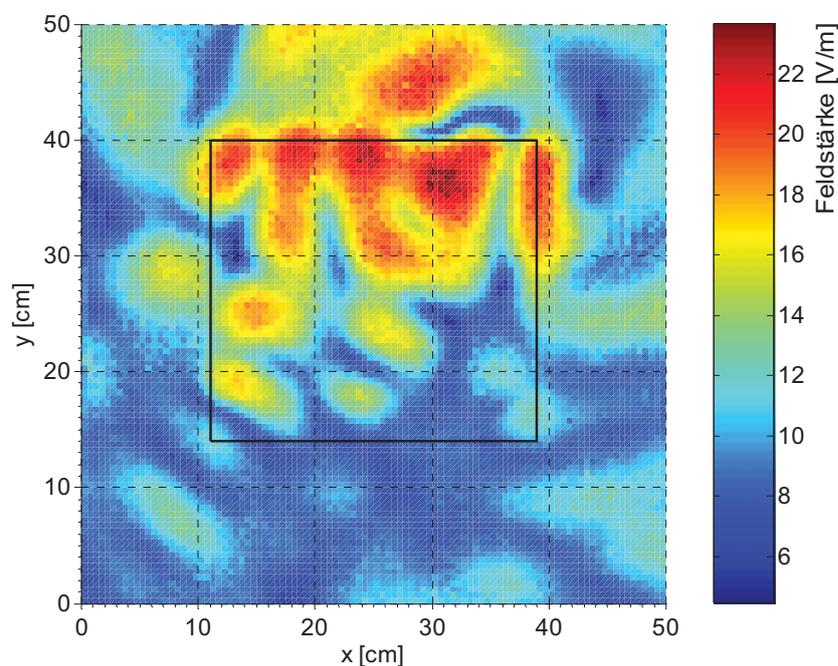


Abbildung 4.5: Feld eines Notebooks mit im Display integrierter WLAN-Antenne. Das Notebook lag für diese Messung auf seinem Display. Erkennbar sind die Antenne sowie die durch sie verursachte Abstrahlung entlang des oberen Bildschirmrands.

Noch deutlicher wird dieser Effekt, wenn die entsprechenden Module nicht direkt am Notebook, sondern einzeln an einem langen USB-Kabel verwendet werden, wie in Abbildung 4.6 gezeigt. Es ist erkennbar, dass das Zuleitungskabel wesentlich zur Abstrahlung beiträgt, was auf die gleichen Mechanismen wie die Abstrahlung des Computergehäuses bei Verwendung der USB-Module zurückzuführen ist. Der Masseschirm strahlt in dieser Konfiguration sogar in weit höherem Maß als das eigentliche Funkübertragungsmodul selbst ab. Als Nebeneffekt dieses Verhaltens ist bei Nutzung von Anschluss- bzw. Verlängerungskabeln immer auch eine Erhöhung der Reichweite bzw. der Empfindlichkeit der Module beobachtbar.

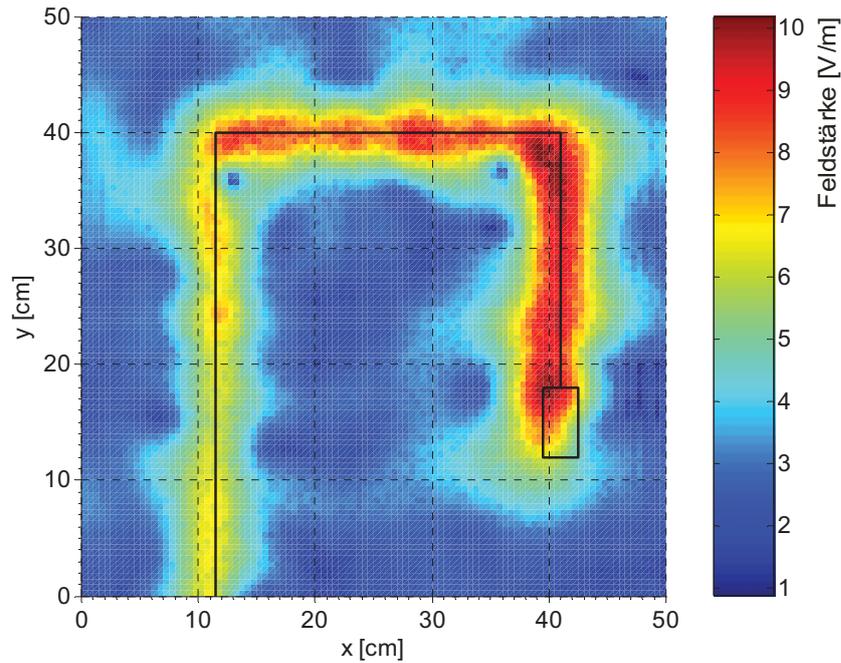


Abbildung 4.6: Messung der Feldverteilung unterhalb eines USB-Bluetoothmoduls an einem USB-Kabel. Der ansteuernde Laptop befand sich bei dieser Messung außerhalb der Messebene.

Entsprechend der Signalfrequenz von 2,4 GHz treten auf den Kabelschirmen der USB-Kabel Maxima in Abständen von ca. 5 cm auf. Diese sind noch deutlich entfernt von der Antenne nachweisbar (Kapitel 4.1.3).

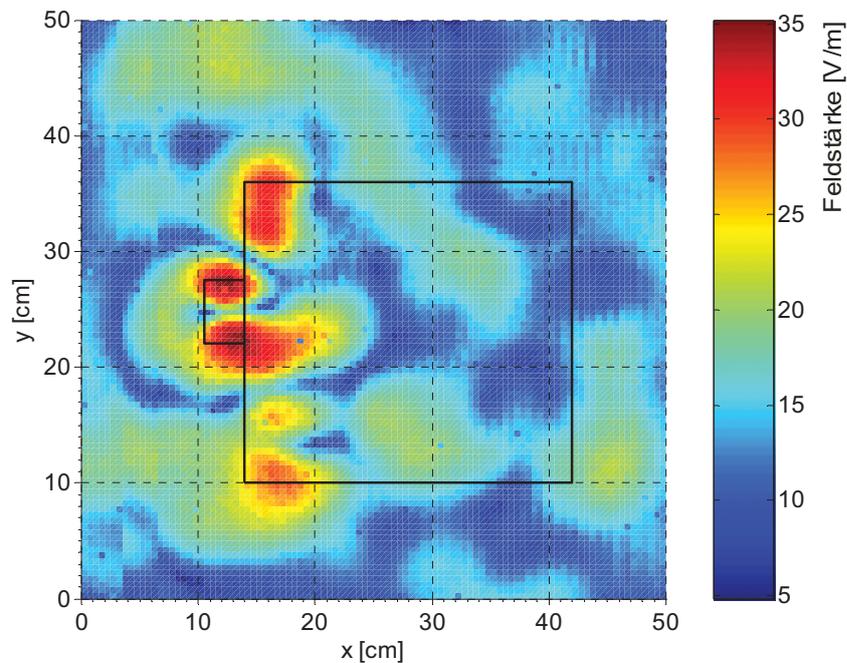


Abbildung 4.7: Feldverteilung unterhalb eines Laptops mit PCMCIA-WLAN-Karte. Im Vergleich zum USB-Bluetoothmodul liegt hier eine konzentriertere Abstrahlung vor.

Im Vergleich zu den günstigen Miniaturantennen erzeugen hochwertigere Antennen, wie sie z.B. in PCMCIA-Karten oder in seriellen Modulen aufgrund des dort vorliegenden größeren Platzangebotes verwendet werden, eine räumlich konzentriertere Abstrahlung. Dies wird in Abbildung 4.7 sowie bei den Messungen an seriellen Modulen deutlich.

Um die Überlagerung der Felder gepaarter Sender zu messen, wurden mit Bluetoothmodulen ausgerüstete Notebooks in direkter Nähe zueinander aufgestellt und das entstehende Feld vermessen (Abbildung 4.8). Wie zu erwarten, ergab sich keine Erhöhung der auftretenden Feldstärken. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei Bluetooth um ein Zeitmultiplexverfahren handelt, in dem Sender und Empfänger nacheinander senden und es so zu keiner zeitgleichen Überlagerung der Signale kommt. Im Hinblick auf eine Feldüberlagerung bedeutet dies, dass sich eine Erhöhung mit jedem hinzukommenden Netz, nicht jedoch mit jedem Sender ergibt. Dieses Ergebnis ist auch auf WLAN übertragbar, gilt jedoch nicht für die neuerdings erprobten MIMO-Verfahren<sup>1</sup>, bei denen mehrere unabhängige Antennen gleichzeitig zur Übertragung der Daten verwendet werden. Hierdurch kann es, abhängig vom verwendeten Multiplexverfahren, zu einer zeitgleichen Emission bei verschiedenen Frequenzen und damit zu einer entsprechenden Überlagerung der Felder kommen.

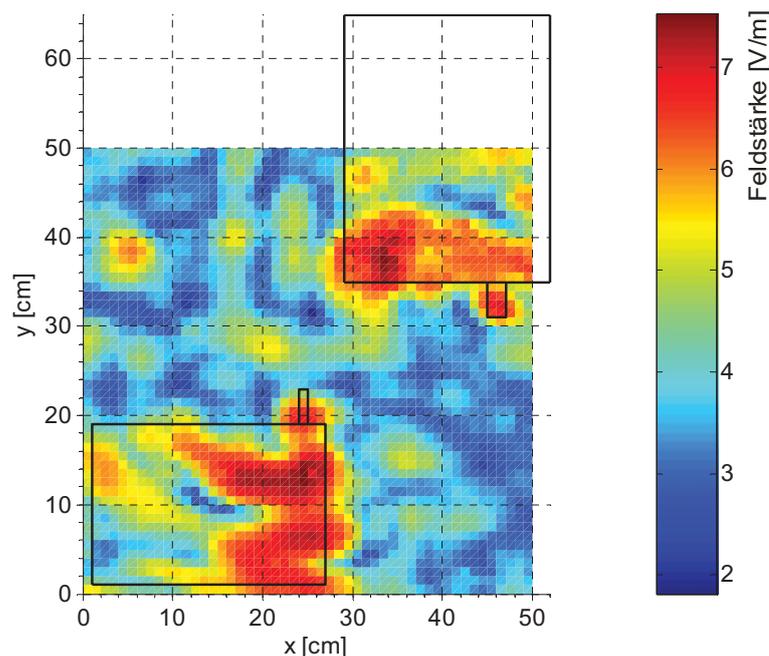


Abbildung 4.8: Messung der Feldverteilung unterhalb zweier über USB-Bluetoothmodule miteinander gepaarter Notebooks

Bezüglich der Feldstärken wurden bei Bluetoothmodulen Werte bis zu 25 V/m gemessen. Bei geringerer Entfernung zwischen Sender und Empfänger lagen die gemessenen Werte aufgrund der Leistungsregulierung der Module zwischen 6 V/m und 14 V/m in unmittelbarer

<sup>1</sup> MIMO: Multiple Input / Multiple Output

Nähe zum Sender. Bei WLAN lagen die Feldstärken zwischen 25 und 35 V/m in einer Entfernung von ca. 1 cm. zum Sender. Der Unterschied in den gemessenen Feldstärken liegt unter anderem daran, dass WLAN-Module üblicherweise mit höheren Sendeleistungen arbeiten als Bluetoothmodule. Durch zunehmende Miniaturisierung und Kostenverringerung erreichen jedoch zum einen auch USB-Module die maximal erlaubte Sendeleistung, was die auftretenden Feldstärken zukünftig erhöhen könnte. Zum anderen sinken bei gleicher Entfernung zwischen den Modulen durch die empfindlicher werdenden Empfängerbausteine auch die benötigten Sendeleistungen, was in diesem Fall wiederum zu einer Reduzierung der auftretenden Feldstärke führen könnte. Im speziellen Fall ist somit eine Überprüfung der individuell auftretenden Felder ratsam.

#### 4.1.2. Messung der feldgeführten Emission von seriellen Modulen

Ebenso wie USB-Bluetoothmodule wurden auch serielle Bluetoothmodule vermessen. Diese wurden über ein serielles Kabel, welches an einen der Laptops angeschlossen wurde, mit Daten gespeist. Zusätzlich wurden die Module extern mit Strom versorgt. Im Unterschied zu den USB-Modulen kommt es durch die im Vergleich zur Bluetooth-Datenübertragungsrates geringere Geschwindigkeit der seriellen Schnittstelle zu einer geringeren Bandbreitenauslastung und damit zu einer geringeren Funkaktivität. Wie in Abbildung 4.9 erkennbar, muss diese durch entsprechend längere Messzeiten kompensiert werden, um eine zuverlässige Maximalwertmessung zu gewährleisten.

Abbildung 4.9 zeigt ein Bluetoothmodul im Plastikgehäuse mit einer internen  $\lambda/4$ -Antenne. Im Vergleich zu den USB-Bluetoothmodulen ist bei diesem Modul wegen der höherwertigen Antenne eine geringere Abstrahlung über die Kabel festzustellen. Allerdings sind auch hier deutliche Resonanzen auf den Kabeln ausgebildet. Ein Hauptgrund hierfür liegt unter anderem darin, dass die Leitungen in unmittelbarer Nähe zur Antenne aus dem Modul herausgeführt werden. Im Gegensatz dazu besitzt das Modul in Abbildung 4.10 ein Aluminiumgehäuse sowie eine im Sinne der EMV bessere interne Kabelführung. Hier sind die auf den Kabeln auftretenden Ströme geringer als beim oben vermessenen seriellen Modul.

Die bei den seriellen Modulen gemessenen Feldstärken entsprechen den bereits oben festgestellten Werten um 25 V/m. Ein Modul muss im Übrigen nicht gepaart sein oder angesteuert werden, um störende Felder auszusenden. Einerseits senden die Module, falls sie als *Master* entsprechend konfiguriert wurden oder bei USB-Modulen seitens des Betriebssystems eine Aktivierung der Suchfunktion erfolgte, selbstständig Signale aus, um nach benachbarten Modulen zu suchen. Dies geschieht allerdings in deutlich größerem zeitlichem Abstand als bei normaler gepaarter Aktivität bzw. bei Datenübertragung. Andererseits müssen gepaarte Module wegen der Synchronisation untereinander sowie der Netzkoordination regelmäßig miteinander kommunizieren.

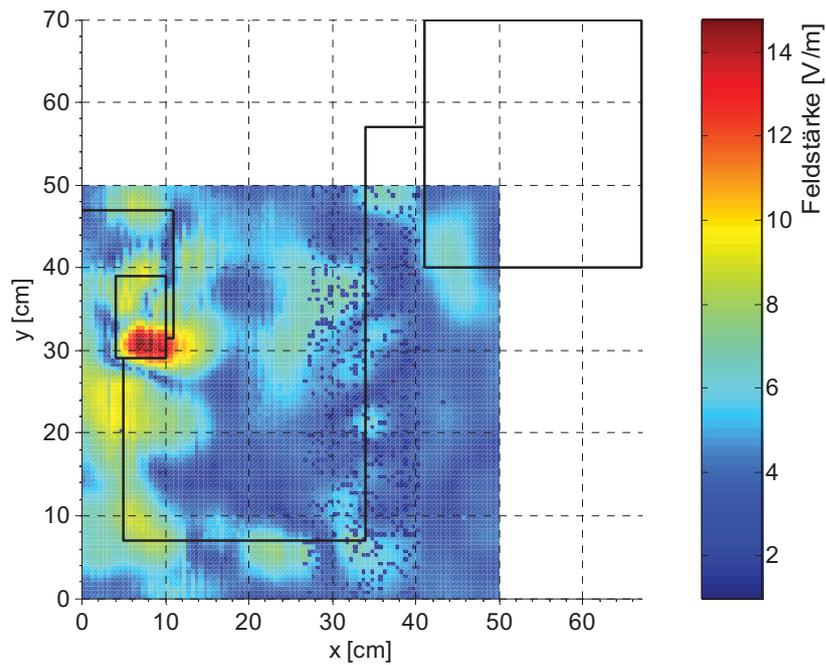


Abbildung 4.9: Messung der Feldverteilung eines seriellen Bluetoothmoduls mit integrierter Antenne. In der Mitte der Messung wurde die Menge der übertragenen Daten für einige Zeit herabgesetzt, weshalb nicht auf jedem Messpunkt eine Aktivität des Moduls vorlag.

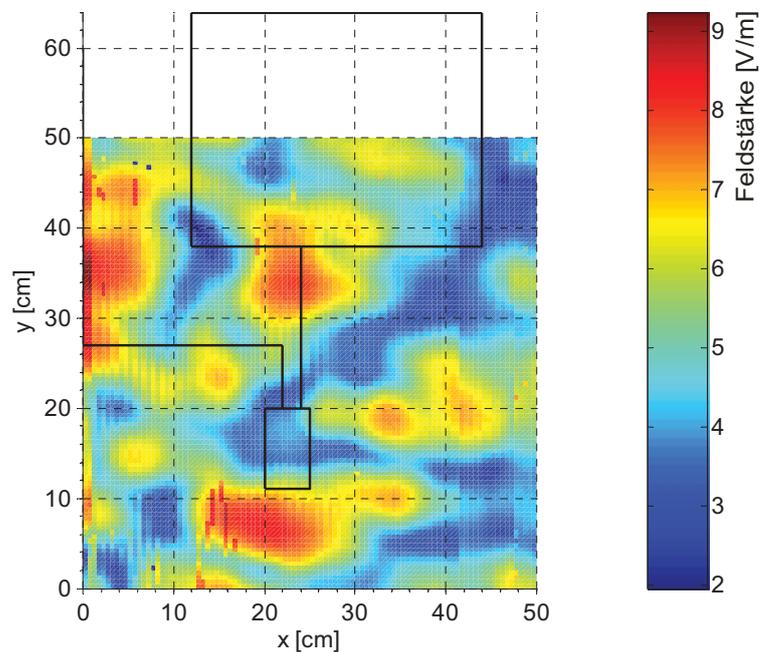


Abbildung 4.10: Messung der Feldverteilung eines seriellen Bluetoothmoduls im Aluminiumgehäuse mit externer Antenne. Die Strahlung geht hier nicht vom Modul, sondern vollständig von der Antenne aus.

## 4.1.3. Messung der kabelgeführten Emission von Funkübertragungsmodulen

Wie bei den Messungen der feldgeführten Emissionen im Fall von USB- und seriellen Bluetoothmodulen ersichtlich wurde, kommt es auf den Signal- sowie Versorgungsleitungen der Module zu leitungsgeführten Emissionen. Diese sind, neben der Kabelführung innerhalb des Moduls, abhängig von Art und Ort der verwendeten Antenne sowie des verwendeten Anschlusskabels.

Zur Untersuchung wurden mit Hilfe einer Stromzange und eines Spektrumanalysators die externen Funkübertragungsmodule vermessen. In einer Stromzange wird durch Induktion eine der zur messenden Stromänderung proportionale Spannung erzeugt. Die Stromzange wird über ihre Transferimpedanz charakterisiert. Diese gibt das Verhältnis zwischen dem zu messenden Strom und der Ausgangsspannung des Sensors an:

$$\underline{Z}_T = \left| \frac{U}{I} \right|. \quad (4.9)$$

Die Transferimpedanz wird üblicherweise logarithmisch in  $dB\Omega$  angegeben, was eine direkte Umrechnung der am Netzwerkanalysator umgesetzten Leistung in den zu messenden Strom erlaubt. Entsprechend dem Ohmschen Gesetz in logarithmischer Darstellung:

$$I[dBmA] = U[dBmV] - R[dB\Omega] = U[dB\mu V] - 60 - R[dB\Omega] \quad (4.10)$$

und ersetzen von U mit Gleichung 4.7:

$$I[dBmA] = 106,99 + P[dBm_{50\Omega}] - 60 - R[dB\Omega] \quad (4.11)$$

folgt:

$$I[dBmA] = P[dBm] + 46,99 - R[dB\Omega], \quad (4.12)$$

welches bei Bedarf in die lineare Form:

$$I[mA] = 10^{\frac{I[dBmA]}{20}} \quad (4.13)$$

umgerechnet werden kann.

Die Messungen erfolgten wegen der hohen Anzahl an Messpunkten sowie der nötigen Genauigkeit ebenfalls mit einem automatisierten Messaufbau. Dieser besteht aus dem Messroboter aus Kapitel 4.1.1, welcher im Unterschied zur oben beschriebenen zweidimensionalen Nah-

feldmessung mit einer Stromzange anstelle einer Nahfeldsonde bestückt und lediglich entlang einer Achse verfahren wird (Abbildung 4.11).

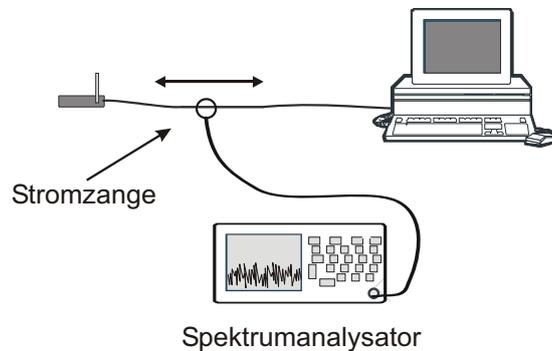


Abbildung 4.11: Aufbau zur Messung der leitungsgeführten Emission von Funkübertragungsmodulen. Für hochauflösende Messungen wird die Stromzange mit Hilfe eines Roboters entlang der Leitung bewegt.

Abbildung 4.12 zeigt die Ergebnisse von zwei Messungen für ein USB-Bluetoothmodul, welches über zwei unterschiedliche USB-Kabel angeschlossen wurde.

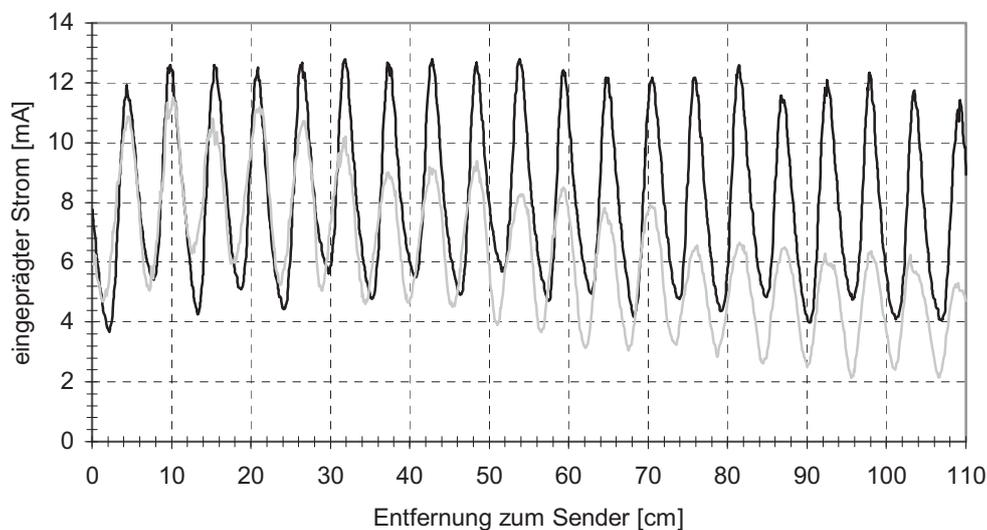


Abbildung 4.12: Durch ein USB-Bluetoothmodul auf dem Anschlusskabel verursachter Strom, gemessen für zwei unterschiedliche USB-Anschlusskabel, schwarze Kurve Kabel 1, graue Kurve Kabel 2

Deutlich erkennbar sind die stehenden Wellen entlang der Kabel im Abstand von ungefähr einer halben Wellenlänge der Modulationsfrequenz von 2,4 GHz. Mit zunehmender Entfernung vom Modul nimmt der Strom ab, behält jedoch selbst über Entfernungen von einem Meter noch seine Größenordnung. Dieses Verhalten bestätigen auch die Messungen mit dem Nahfeldscanner. Erkennbar ist auch, dass die Stromverteilungen auf den Kabelschirmen von den Kabeln selbst abhängig sind. So nimmt, bei anfänglich gleicher Stromverteilung auf den

beiden Kabeln gleicher Länge, der Kabelstrom auf einem Kabel deutlich schneller ab als auf dem anderen Kabel.

Um den Einfluss der in den Modulen verwendeten Antennen genauer untersuchen zu können, wurden Messungen an einem modifizierten USB-Modul unternommen. Bei diesem wurde die interne Antenne abgetrennt und durch einen SMA-Stecker ersetzt. Dies erlaubt den Vergleich zwischen baugleichen Modulen mit SMD-Antenne<sup>1</sup> und unterschiedlichen externen Antennen bei ansonsten identischem Aufbau (Abbildung 4.13).

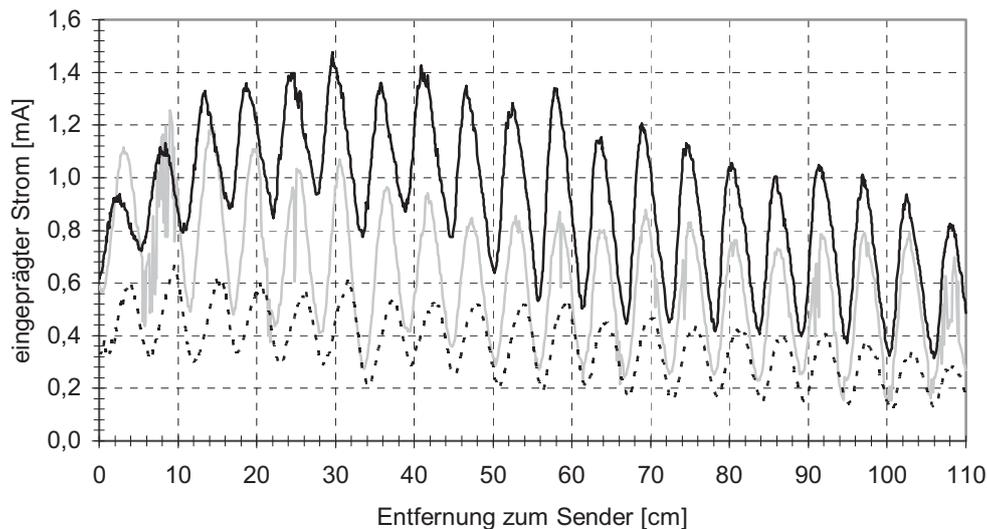


Abbildung 4.13: Kabelströme für unterschiedliche verwendete Antennen am gleichen Modul, schwarze Kurve lange Antenne, graue Kurve kurze Antenne, punktierte Kurve 50- $\Omega$ -Abschluss

Im Vergleich zu dem unveränderten Modul mit SMD-Antenne in Abbildung 4.12 ist erkennbar, dass die Kabelströme hier deutlich geringer ausfallen, was ebenfalls die Untersuchungen mit dem Nahfeldscanner bestätigen. Vergleiche zwischen zwei Antennen mit unterschiedlichem Gewinn sowie einer 50- $\Omega$ -Terminierung zeigen kaum Unterschiede. Der vorübergehende Anstieg der Einkopplung mit zunehmender Entfernung zum Modul, besonders bei der Antenne mit höherem Gewinn, lässt vermuten, dass auch feldgeführte Einkopplungen von den Antennen in die Kabel eine Rolle spielen.

Wie in Abbildung 4.14 erkennbar, ist auch bei diesen Messungen darauf zu achten, dass die Module mit maximaler Sendeleistung arbeiten. Bei Verwendung von langen USB-Anschlusskabeln bzw. hochwertigen Antennen können die Module hohe Empfindlichkeiten erzielen und verwenden deswegen lediglich verringerte Sendeleistungen. Deshalb bietet sich auch in diesem Messaufbau die Messung aus einer nahezu geschlossenen und mit Absorbieren ausgekleideten Schirmkabine heraus an. Neben USB-Modulen wurden auch serielle Bluetoothmodule untersucht.

<sup>1</sup> SMD: Surface Mounted DeVICES

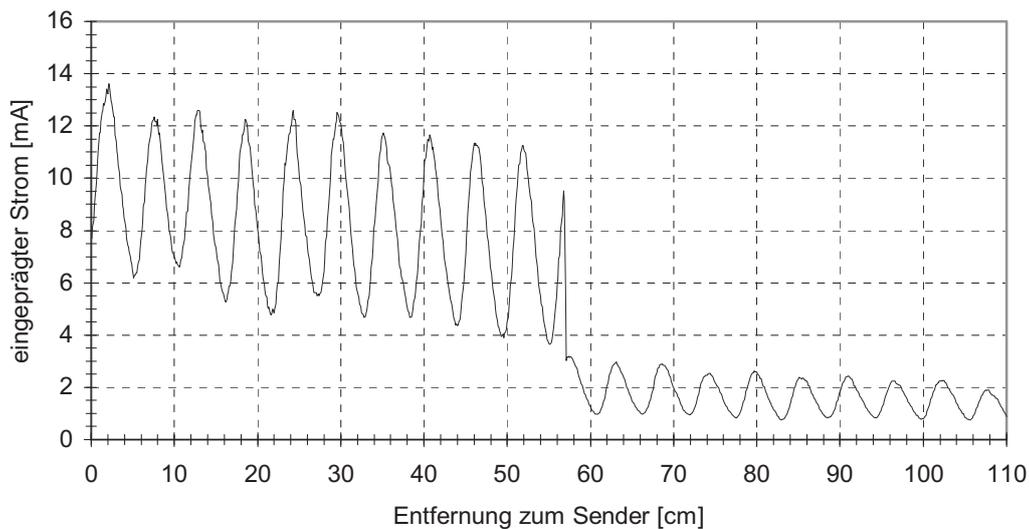


Abbildung 4.14: Unterschiedliche Kabelströme bei Leistungsanpassung eines Klasse 1-Bluetoothmoduls während der Messung

Die Messungen an unterschiedlichen Modulen ergaben Einkopplungen im Bereich zwischen 1 und 2 mA bei Modulen mit externen Antennen und bis zu 13 mA bei Modulen mit SMD-Antennen. Die gemessene Verteilung entspricht dabei den Ergebnissen der Feldstärkenmessungen in Kapitel 4.1.1 im Bereich der Kabel.

## 4.2. Ausbreitung von 2,4-GHz-Funksignalen

Ein wichtiger Aspekt bezüglich der Nutzung von Funkübertragern ist die Ausbreitung der Strahlung im Umfeld des Senders, hier insbesondere unter der Berücksichtigung des Anwendungsbereichs „Schiff“. Generell ist die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zwischen Sender und Empfänger und damit auch die Übertragungsqualität in starkem Maß von dem dazwischen liegenden Umfeld und Medium abhängig. So werden die Standardreichweiten von Funkübertragungsmodulen für den Fall einer Freifeldausbreitung sowie die erzielbaren Übertragungsraten zusätzlich unter der Annahme einer optimalen Entfernung zwischen Sender und Empfänger angegeben.

In realen Umgebungen kommt es jedoch durch die Entfernung zwischen beiden Partnern und die dazwischen liegenden reflektierenden bzw. absorbierenden Objekte, wie Wände, Tische aber auch Personen, zu Reflexionen sowie zu einer zusätzlichen Abschwächung des Signals. Während absorbierende Gegenstände die Übertragungsqualität stets verringern, können Reflexionen, besonders an metallischen Oberflächen, aufgrund der Interferenzen entweder zur Erhöhung oder zur Reduzierung der Feldstärke am Empfangsort und damit zur Verbesserung bzw. Verschlechterung der Übertragungseigenschaften führen. Falls zwischen Sender und Empfänger keine Sichtverbindung besteht, kann es überhaupt erst durch Reflexionen zu einer

Verbindung kommen. Dies ist vor allem auf Schiffen der Fall, wo, durch die häufige Verwendung von leitfähigen Materialien in Wänden sowie den metallischen Aufbauten auf den Decks, Objekte im elektromagnetischen Sinne abgeschattet werden.

Neben der Netzabdeckung sowie der Signalstärke wirkt sich auch die Mehrwegeausbreitung auf die Signalqualität aus. In stark reflektierenden Umgebungen bilden sich in den meisten Fällen durch vielfache Reflexionen unzählige Ausbreitungskanäle zwischen dem Sender und dem Empfänger. Bedingt durch die unterschiedlichen Weglängen der einzelnen Kanäle, besitzen die jeweiligen Signale eine unterschiedliche Stärke, insbesondere aber auch eine unterschiedliche Phasenlage bzw. sogar Verzögerungen im Bereich einzelner Symbole gegeneinander.

Wenn die Weglängenunterschiede der einzelnen Kanäle gegeneinander genügend groß sind, kommt es aufgrund der dann deutlich unterschiedlichen Signalstärken zu keiner Beeinflussung. In diesem Fall wird nur der stärkste Träger erkannt. Bei geringen Weglängenunterschieden sind die Laufzeitunterschiede wiederum nicht hoch genug, um zu nennenswerten Störungen zu führen. Zwischen diesen beiden Bereichen gibt es jedoch den Fall, dass es, aufgrund der Mehrwegeausbreitung am Empfänger, zu einer Überlagerung aus Signalen ähnlicher Stärke aber deutlich unterschiedlicher Laufzeit kommt. Beim Empfang kommt es in diesem Bereich zur Intersymbolinterferenz und damit zu vermehrten Zeichenfehlern und letztlich zu einer Beeinträchtigung der Verbindung. Die Größe dieses Bereichs ist sowohl vom benötigten Signal-Rausch-Verhältnis als auch von der Datenrate sowie der verwendeten Modulationsart abhängig.

Generell birgt die Simulation der Ausbreitung in dem von Bluetooth oder auch WLAN genutzten Frequenzbereich viele Nachteile bzw. Unzulänglichkeiten. Im Gegensatz zu den klassischen an Bord von Schiffen befindlichen Funkdiensten im Bereich einiger 100 MHz, haben 2,4-GHz-Dienste eine deutlich kleinere Wellenlänge. Die betrachteten Objekte liegen bei niedrigen Funkfrequenzen bzw. großen Wellenlängen meist in oder unterhalb der Größe der Wellenlänge und können damit als homogen angesehen und bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften hinreichend genau charakterisiert werden. Dies ermöglicht relativ präzise Aussagen über die vorliegenden Feldverteilungen. Bei 2,4-GHz-Systemen ist die Wellenlänge jedoch klein im Vergleich zur Brücke sowie zu den auf der Brücke befindlichen Objekten wie Konsolen und Personen. Diese beeinflussen deshalb durch ihre Formen, Materialien und Positionen die Feldverteilung bei 2,4 GHz deutlich stärker als bei niedrigeren Frequenzen und müssen in eine Simulation miteinbezogen werden.

Ebenso bestehen die Decken, Böden und Wände aus Verbundmaterialien mit deutlich unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften. Weder der genaue Aufbau der Elemente noch deren Position bzw. Verbindungsstellen, Lüftungs- oder Durchführungsschlitze sind bekannt. Selbst Abschätzungen sind wegen der geringen Wellenlänge und der dadurch nötigen hohen Diskretisierung der Umgebung nur eingeschränkt möglich und erlauben damit nur grundlegende Aussagen für den Bereich als Ganzes [Schäfer02].

Bei Frequenzen im Bereich bis hin zu einigen 100 MHz können für Simulationen von nur bedingt geschlossenen Anordnungen, wie Schiffsbrücken, Verfahren wie die in Kapitel 4.4 angewendete Momentenmethode verwendet werden. Da bei der Momentenmethode (MoM)<sup>1</sup> der zum Lösen der Gleichungen benötigte Rechenaufwand an Rechenschritten mit der dritten Potenz der Anzahl an Variablen skaliert, wird das Simulieren heutiger Brücken mit ihren Abmessungen von zum Teil über 30 Metern bei 2,4 GHz jedoch selbst in naher Zukunft nicht in einem akzeptablen Zeitrahmen durchgeführt werden können. Bedingt durch die bei 2,4 GHz sehr aufwändige Diskretisierung dauert die Simulation der Feldausbreitung mit der Momentenmethode bereits für einen Kleinwagen mit wenigen Kubikmetern Rauminhalt auf einem modernen Rechencluster selbst unter Ausnutzung von Symmetrien einige Stunden [Schoof03a]. Damit ist sie deutlich aufwändiger als das Simulieren eines Airbus A380 bei 200 MHz. Alleine wegen des benötigten Arbeitsspeichers stößt das Simulieren großer Objekte bei hohen Frequenzen auf unmittelbare Grenzen.

Mögliche Lösungsansätze bestehen hier in einer Verwendung von Hybridmethoden [Bernardi04b]. Bei diesen wird zuerst aus der Umgebung im Nahfeld der Antenne das Richtdiagramm der Anordnung berechnet. Anschließend erfolgt eine vereinfachte Simulation der Wellenausbreitung unter optischen Gesichtspunkten. Zuletzt findet wiederum eine genaue Simulation an Wanddurchführungen, Türen etc. unter dem Einfluss einer ebenen Welle, entsprechend den vorherigen Ergebnissen, statt. Hierdurch werden die nicht direkt an der Wellenausbreitung beteiligten Strukturen vernachlässigt bzw. deutlich vereinfacht, was den Rechenaufwand stark verringert. Allerdings erfordern auch derartige Simulationen in hochreflektierenden, großen Räumen einen sehr großen Diskretisierungs- und Rechenaufwand. Ein weiterer Nachteil der MoM sowie ähnlicher Verfahren ist, dass sie keine Aussagen über mögliche Intersymbolinterferenzen sowie das *fading*, also dem Auftreten großer Amplitudenschwankungen über kurze Zeitintervalle zulassen [Schäfer04].

Einfacher können Abschätzungen der Netzabdeckung sowie der möglichen Intersymbolinterferenz bei den betrachteten Wellenlängen und Raumgrößen durch Beschränkung auf Simulationsverfahren auf Basis strahlenoptischer Verfahren (Raytracing-Methoden) oder ähnlicher Methoden erlangt werden. Allerdings erlauben auch diese Ergebnisse nur allgemeine Aussagen und erfordern bei komplexen Räumen mit vielen reflektierenden Flächen wegen der vielfältigen unterschiedlichen Ausbreitungschanäle ebenfalls eine hohe Rechenzeit. Ein Nachteil dieser Verfahren ist unter anderem, dass sich Wand- und Gehäusedurchführungen sowie Schlitze und Nähte nur sehr eingeschränkt berücksichtigen lassen.

Wegen der Komplexität sowie der, zusätzlich zu den bereits bestehenden Veröffentlichungen, begrenzten Aussagekraft von Simulationen, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf eine Simulation möglicher Ausbreitungsszenarien auf Schiffen verzichtet. Stattdessen erfolgten ausführliche messtechnische Untersuchungen der Kommunikationsbedingungen bei 2,4-GHz-Signalen

---

<sup>1</sup> MoM: Method of Moments

an Bord von Schiffen (Kapitel 6.1.3 sowie Kapitel 6.2). Diese zeigen, vorweggenommen, die Auswirkungen des metallischen, geräumigen Aufbaus von Schiffen. So liegt innerhalb von Räumen und Fluren eine gegenüber normalen Gebäuden deutlich verbesserte Ausbreitung der Strahlung vor. Da die Wände stark reflektierend wirken, wird ein großer Teil der Strahlung innerhalb der betrachteten Räume gehalten. Zwischen getrennten Räumen wurde entsprechend eine deutlich verminderte Übertragungsqualität festgestellt, da eine Kopplung hier lediglich über Fugen, Durchführungen und Türen stattfindet. Wegen der geringen Auskopp- lung sowie der reflektierenden Wände ist innerhalb von Räumen eine gleichmäßige, ausrei- chende Signalabdeckung vorhanden. Bei geringer Entfernung zwischen dem Sender und dem Empfänger kommt es gelegentlich zu leichten Beeinträchtigungen durch Interferenzen, wie sie auch bei den Messungen in Schirmkabinen oder in GTEM-Zellen beobachtet wurden.

Begleitende Untersuchungen und Simulationen an Kraftfahrzeugen [Schoof03a] zeigen, dass die Strahlungsverteilung in Räumen mit reflektierenden Wänden ein homogenes Interferenz- muster ergibt. Der mittlere Abstand zwischen den Minima und den Maxima liegt entspre- chend der Wellenlänge von 2,4 GHz bei 6 cm, wie in Abbildung 4.15 erkennbar. In dieser Darstellung ist bewusst auf die Angabe absoluter Werte verzichtet worden, da lediglich die Feldverteilung in diesem Zusammenhang von Interesse ist.

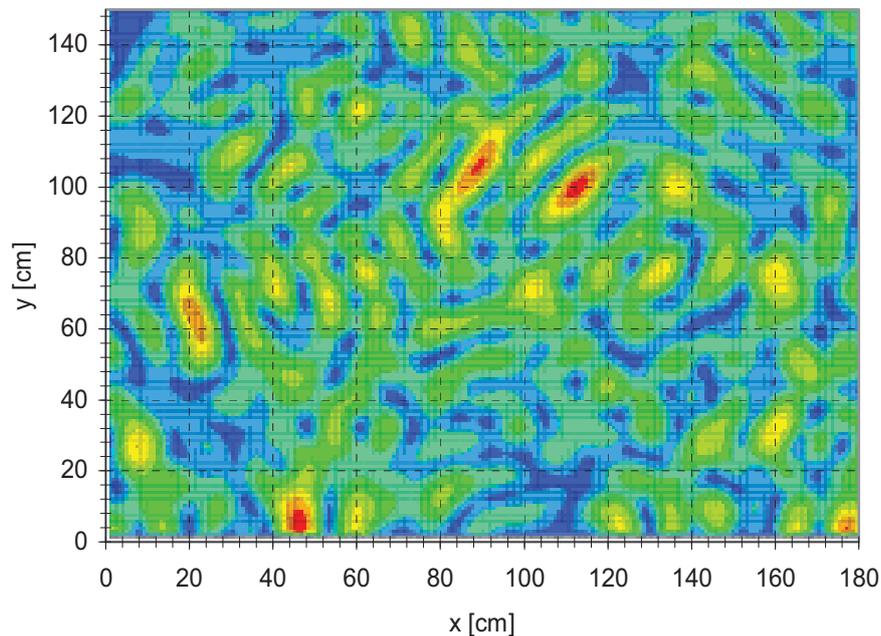


Abbildung 4.15: Flächenanalyse bei 2,45 GHz innerhalb eines reflektierenden Raumes. Erkennbar ist das relativ homogene Interferenzmuster, verursacht durch einen Sender außerhalb der Darstellungsebene. Der Dynamikbereich liegt in der Nähe zum Empfänger bei über 30 dB und sinkt in großer Ent- fernung zunehmend.

Die gewonnenen Ergebnisse decken sich mit den Simulationen und Labormessungen in ähnli- chen Anwendungsbereichen aus der Literatur. So geben Schäfer et al. bei Messungen der Eigenschaften von Wänden in Schichtbauweise mit Metallschichten Dämpfungen zwischen

40 und 50 dB an. Die Dämpfung wird dabei in der Regel durch Schlitze in Türen und Durchführungen begrenzt. Innerhalb der Räume stellen sie eine ausreichende, homogene Ausleuchtung fest. Zwischen den Räumen jedoch war bei Verwendung metallverstärkter Wände keine zuverlässige Kommunikation möglich. Flächenanalysen der Strahlung kommen zu den gleichen Ergebnissen, wie in Abbildung 4.15 gezeigt [Schäfer02, Schäfer06].

Van der Wurff et al. zeigen in ihren Simulationen und Messungen, dass es sowohl bei Bluetooth als auch bei WLAN innerhalb von großen Räumen und langen Fluren auf Schiffen, durch die hohe Reflektivität der Wände, zu einer sehr guten Netzabdeckung kommt. Allerdings kommen sie ebenfalls zu dem Schluss, dass die hohe Reflektivität gleichzeitig eine zuverlässige Kommunikation zwischen einzelnen Räumen unterbindet. Bezüglich der Inter-symbolinterferenz kommen sie zu dem Ergebnis, dass sich der erreichbare Datendurchsatz verringert, dieses jedoch bei größeren Entfernungen durch die besseren Ausbreitungsbedingungen kompensiert wird [VanderWurff04a, VanderWurff04b].

Eine nennenswerte Störung durch Personen oder andere bewegliche Objekte innerhalb der betrachteten Räume wurde weder bei den Messungen noch in der Literatur beobachtet.

### 4.3. Messung der Überlagerung von Funksignalen

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Betrachtung von Störquellen ist der Überlagerungsfall mehrerer Quellen in unmittelbarer Umgebung zueinander. In diesem Bereich kann das überlagerte Feld höher sein als die Felder direkt an den Quellen, in diesem Fall den Antennen. Das Störpotential kann dabei je nach Art der Quelle und Störgröße unterschiedlich mit der Anzahl der Quellen skalieren. Bei gepaarten und damit abhängigen Bluetooth- oder WLAN-Netzen sendet aufgrund der Netzkoordination stets nur ein Modul innerhalb eines Zeitfensters. Ebenso verhält es sich bei anderen Zeitmultiplexverfahren, wie im Mobilfunk, falls nur ein Kanal freigegeben ist. Bei unabhängigen Netzen kann es jedoch zur Sendeaktivität mehrerer Module gleichzeitig kommen.

Abhängig von der Messgröße, wie beispielsweise der mittleren Strahlungsleistung oder der auftretenden Spitzenfeldstärke, skaliert diese unterschiedlich mit der Anzahl der interferierenden Quellen, wie im Folgenden gezeigt wird. Der entsprechende sogenannte *Multiple Equipment Factor* ist nicht nur für den Anwendungsfall „Schiffbau“ interessant. Auch in der Luftfahrt, d.h. in der Kabine von Passagierflugzeugen, existiert das Szenario, dass gleichzeitig eine hohe Anzahl unabhängiger Sender, hier die von den Passagieren mitgebrachten elektronischen Geräte mit integrierten Funkübertragungsmodulen, betrieben werden [DO-294A]. In reflektierenden Räumen, wie z.B. in Flugzeugen oder Schiffen, kann es dabei zu einer deutlichen Feldüberhöhung kommen.

## 4.3.1. Messung der Überlagerung von Bluetoothsignalen

Um zu demonstrieren, wie sich die Feldstärken von unabhängigen, also ungepaarten Bluetoothmodulen addieren, wurden serielle Bluetoothmodule jeweils mit unabhängigen PCs gepaart und eine Datenübertragung initiiert. Um eine synchrone und einfach zu steuernde Konfiguration zu erzielen, wurden alle Sender von einem einzigen PC aus kontrolliert (Abbildung 4.16). Um eine Fehlinterpretation zwischen der automatischen Leistungsanpassung der Module und der zu messenden Feldüberlagerung zu verhindern, wurde durch Abschwächer an den empfangenden Modulen eine maximale Sendeleistung der Sender hervorgerufen. Das Feld wurde anschließend mit einem Spektrumanalysator im Zero-Span-Modus für verschiedene Filterbandbreiten und Abtastzeiten gemessen [Schoof04b].

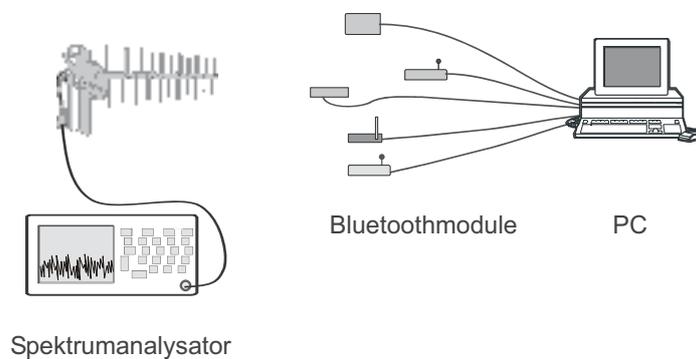


Abbildung 4.16: Aufbau zur Messung der Überlagerung der Felder von unabhängigen Bluetoothmodulen. Die empfangenden Module wurden jeweils durch einen separaten PC gesteuert.

Wichtig bei der Aufstellung der Module in diesem Messaufbau ist, dass jedes Modul für sich alleine am Ort der Antenne die gleiche Feldstärke hervorruft. Nur so kann eine eindeutige Überlagerungsmessung erfolgen. Sobald einer der Sender am Messpunkt relativ zu den anderen eine kleinere Leistung verursacht, ist keine eindeutige Zuordnung möglich bzw. der zu beobachtende Effekt nimmt deutlich ab. Weiterhin bewirkt mitunter bereits die Erwärmung der Sender bei Inbetriebnahme Unterschiede von ca. 1 dB, so dass ebenfalls auf eine ausreichende Warmlaufzeit der einzelnen Module geachtet werden muss.

Im einfachsten Fall zweier Module der Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  gleicher Amplitude  $y$  am Ort des Empfängers, ergibt sich für die Überlagerung  $y_R$  der elektromagnetischen Wellen die Schwebung:

$$y_R = y[\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)], \quad (4.14)$$

welche sich umformen lässt in:

$$y_R = 2y \cos[\pi(f_1 - f_2)t] \cdot \sin[\pi(f_1 + f_2)t]. \quad (4.15)$$

Die resultierende Welle besitzt die doppelte Amplitude sowie eine Frequenz:

$$f_R = \left( \frac{f_1 + f_2}{2} \right), \quad (4.16)$$

welche von der Schwebung:

$$f_S = \left( \frac{f_1 - f_2}{2} \right) \quad (4.17)$$

eingehüllt wird.

Aufgrund der nicht exakt gleich einstellbaren Amplituden am Ort des Empfängers tritt im realen Messaufbau allerdings der Fall einer unreinen Schwebung zwischen den unterschiedlichen Quellen auf, deren Frequenzen durch die GFSK-Umtastung zusätzlich moduliert sind.

Abbildung 4.17 zeigt eine Überlagerung der Emission zweier unabhängig sendender Bluetoothmodule. Durch Verändern ihres Abstands zur Antenne wurden beide Module auf eine maximale Empfangsleistung von -36 dBm am Ort der Antenne positioniert. Erkennbar ist eine Überlagerung innerhalb des rechten Pakets eines der Module durch das unabhängig innerhalb der Messbandbreite des Spektrumanalysators sendende andere Modul. Die Eingangsleistung zeigt eine Erhöhung der Feldstärke von 6 dB. Dies entspricht der erwarteten Verdopplung der Feldstärke und damit der Vervierfachung der gemessenen Leistung am Messempfänger.

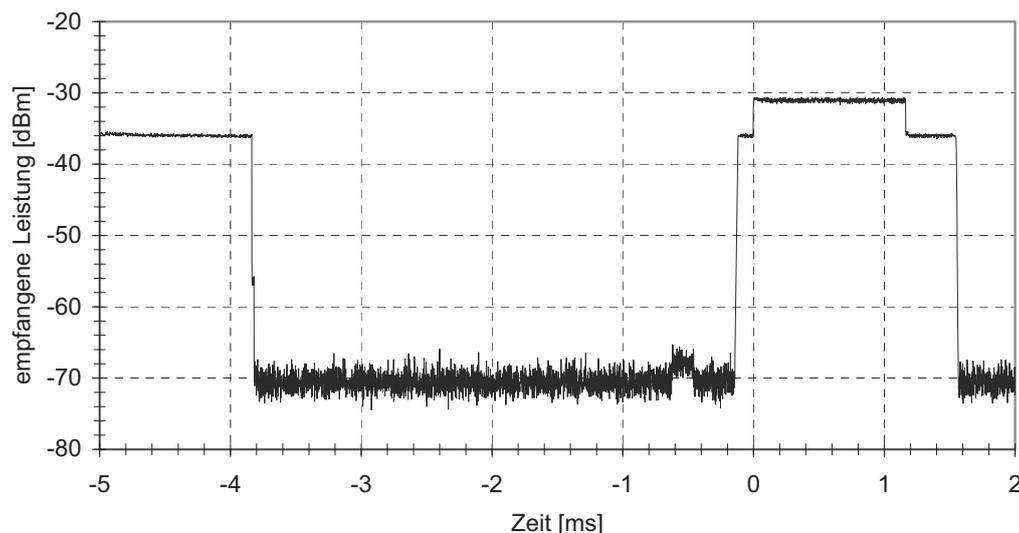


Abbildung 4.17: Überlagerung von zwei unabhängigen Bluetoothmodulen mit jeweils -36 dBm Leistung am Ort der Antenne innerhalb des rechten Pakets

Wie in Abbildung 4.18 erkennbar, treten bei Überlagerung von mehr als zwei Signalen ebenfalls Schwebungen auf. Allerdings weicht die Einhüllende zunehmend von einer Sinusfunktion ab und es kommt mit wachsender Anzahl an Quellen immer seltener zu einer vollständigen Addition der einzelnen Signale.

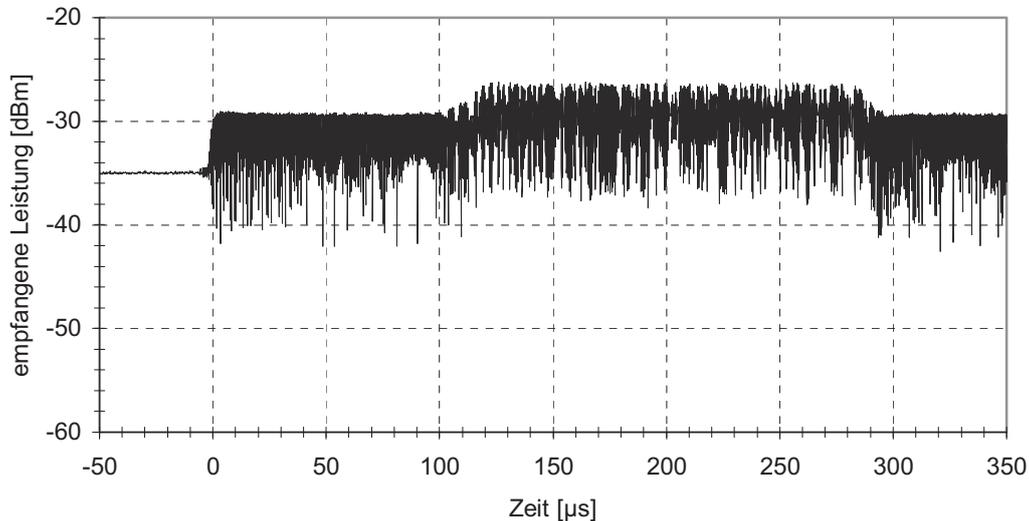


Abbildung 4.18: Überlagerung von drei unabhängigen Bluetoothmodulen auf deutlich unterschiedlichen Frequenzen

Sofern beide Module auf demselben Kanal senden, werden, anstelle der Schwebung, ausgehende konstruktive und destruktive Interferenzen sichtbar, wie in Abbildung 4.19 erkennbar.

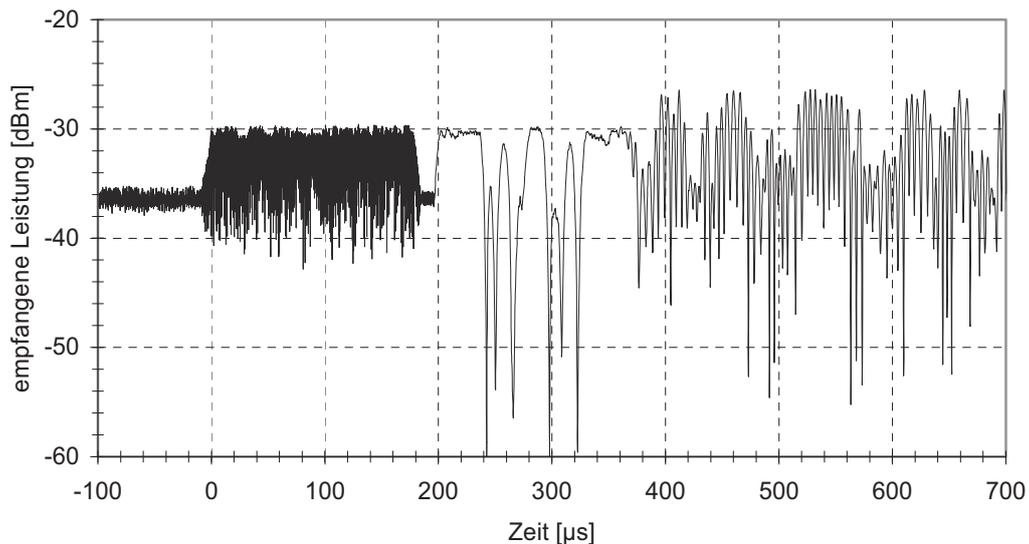


Abbildung 4.19: Beispiel von Überlagerungen. Im ersten Drittel liegt eine Überlagerung zwischen unterschiedlichen Kanälen vor und im zweiten Drittel eine Überlagerung innerhalb desselben Kanals. Diese artet im dritten Drittel durch einen weiter hinzukommenden unterschiedlichen Kanal in eine dreifache Überlagerung aus.

Diese Interferenzen entstehen durch den nichtsynchrone Takt sowie das übertragene Bitmuster. Ebenfalls erkennbar in Abbildung 4.19 ist die Überlagerung zwischen anfangs zwei und schließlich drei benachbarten Kanälen.

Bereits bei der Überlagerung von vier unabhängigen Modulen, wie in Abbildung 4.20 gezeigt, tritt die phasengleiche, additive Überlagerung von theoretisch 12 dB, selbst bei naheliegenden Frequenzen nur noch in zeitlich kurzen Abschnitten auf. Bedingt durch die unterschiedlichen Frequenzen der Träger kommt es in Verbindung mit der zufälligen Phase der untereinander nicht synchronisierten Netze zu einem Abfall zwischen der Addition der maximalen Feldstärken und einer Überlagerung entsprechend der Wurzel der Quadratsumme der Feldstärken für eine große Anzahl unabhängiger Netze.

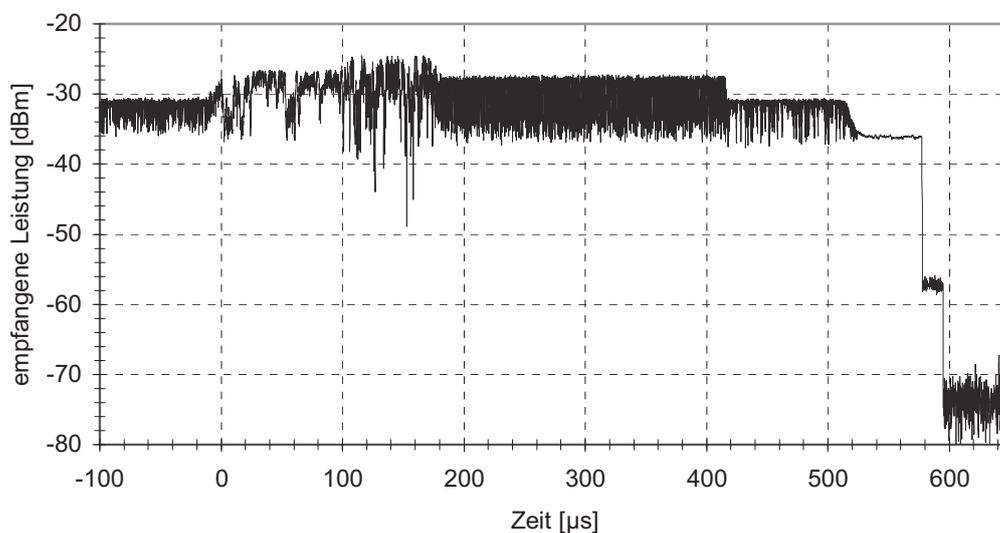


Abbildung 4.20: Überlagerung von bis zu vier Bluetoothmodulen. Die Zunahme der empfangenen Leistung entspricht den theoretisch zu erwartenden Schritten von 6 dB, 9,5 dB und 12 dB.

Die Überlagerung von 6 dB widerspricht im Übrigen nicht der Energieerhaltung. Mit der elektrischen Feldstärke  $E$ , der Freiraumimpedanz  $Z_0$  sowie der Sendeleistung  $P$  folgt für die Strahlungsdichte  $S$  harmonischer Zeitvorgänge im Abstand  $r$ :

$$S(r) = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{|E|^2}{2Z_0} \quad (4.18)$$

und damit

$$|E|^2 \sim P. \quad (4.19)$$

Bei mehreren Sendern der Sendeleistung  $P_i$  ergibt sich somit für die Feldstärke:

$$E \sim \sqrt{\sum_i P_i} . \quad (4.20)$$

Das elektrische Feld erhöht sich bei mehreren Sendern insgesamt somit mit der Wurzel der Summe der Sendeleistungen, also bei zwei gleichen Sendern um den Faktor 1,41, bzw. um 3 dB. Da es sich entsprechend dem Aufbau allerdings um zwei Sender an unterschiedlichen Orten handelt, gilt diese Feldaddition nur gemittelt über den gesamten Bereich. Analog dem Interferenzbild zweier Kreiswellen auf dem Wasser, kommt es hier zu einer räumlichen Überlagerung. In dieser gibt es sowohl Orte destruktiver Interferenz als auch Orte vollständiger konstruktiver Überlagerung der auftretenden Felder.

Bezüglich des *Multiple Equipment Factors* lässt sich damit sagen, dass dieser, bei Betrachtung der Spitzenfeldstärke, für eine kleine Anzahl an Funkübertragern mit der Anzahl der Module skaliert, für eine größere Anzahl unabhängiger Netzte zunehmend jedoch mit der Wurzel aus der Modulzahl.

#### 4.3.2. Messung der Überlagerung von Bluetooth- und WLAN-Signalen

Der Aufbau zur Messung der Überlagerung von Bluetooth- und WLAN-Signalen entspricht dem Aufbau der Überlagerungsmessungen in Abbildung 4.16. Bei diesen Messungen wurden zum einen die Felder serieller Bluetoothmodule mit den Feldern von PCMCIA-WLAN-Karten überlagert, zum anderen die Felder zweier WLAN-Karten miteinander. Die jeweiligen Messzeiten wurden entsprechend lang gewählt, um ein unveränderliches Signal zu erhalten.

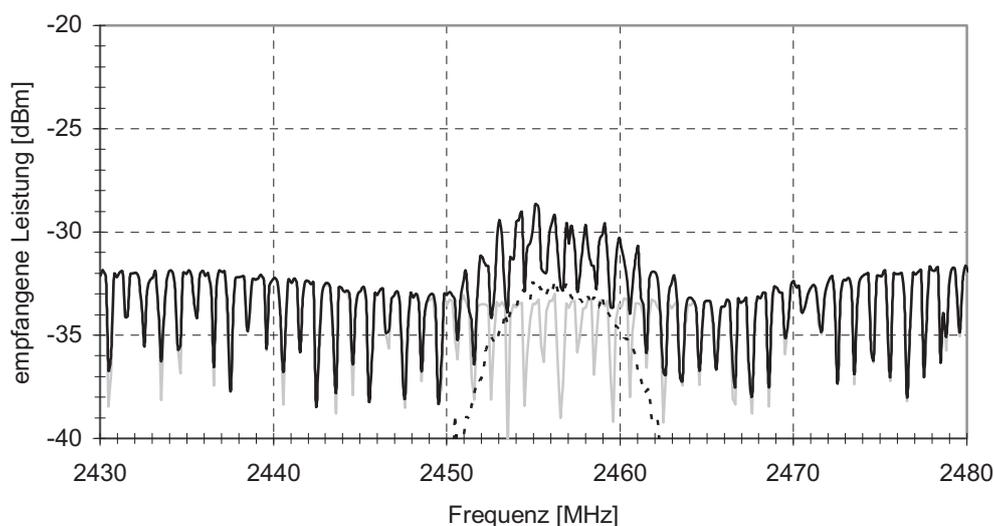


Abbildung 4.21: Gemessene Überlagerung eines Bluetoothsignals mit einem WLAN-Signal (Kanal 10), graue Kurve Bluetooth einzeln, gepunktete Kurve WLAN einzeln, schwarze Kurve Überlagerung der Signale

Im Unterschied zu den Bluetooth-Bluetooth-Messungen wird deutlich, dass, im Fall Bluetooth-WLAN (Abbildung 4.21), die Erhöhung der Feldstärken lediglich im Bereich von 3 dB liegt. Im Unterschied zu Bluetooth handelt es sich bei WLAN um ein Signal, welches mit einer rauschähnlichen Sequenz moduliert wird und dessen Modulationsfrequenz (11 MHz) deutlich höher als die von Bluetooth (1 MHz) ist. Aus diesem Grund tritt praktisch keine phasengleiche konstruktive Interferenz, wie im Fall von Bluetooth mit sich selbst, auf. Die empfangene Leistung erhöht sich, wie zu erwarten, nahezu entsprechend der Wurzel der Summe der Einzelleistungen.

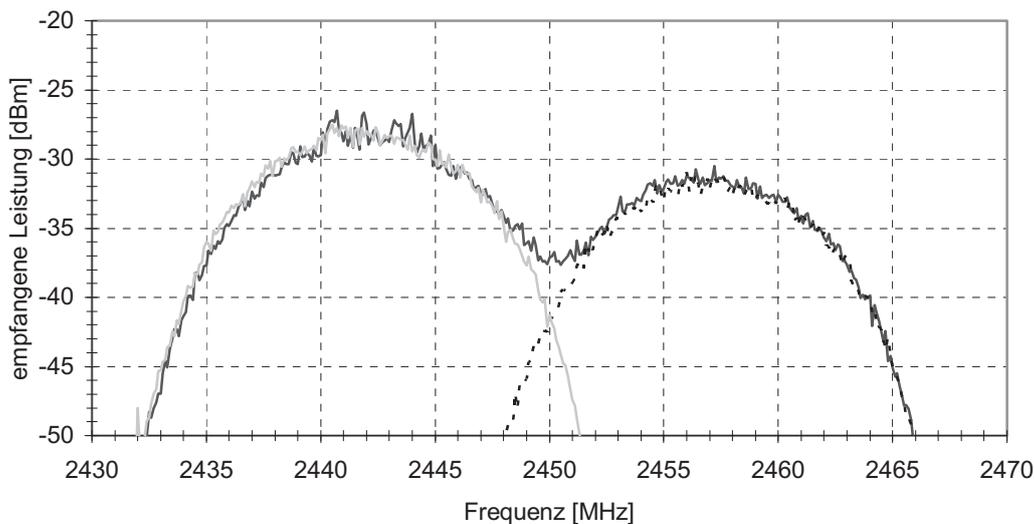


Abbildung 4.22: Überlagerung zweier WLAN-Signale auf den Kanälen 7 und 10. graue und punktierte Kurve: Signale einzeln, schwarze Kurve: Überlagerung

Bei der Überlagerung zweier WLAN-Signale kommt es jedoch, aufgrund der gleichen Modulationsfrequenz, bei Messungen über einen langen Zeitraum wieder zu einer vollständigen Addition (Abbildung 4.22) der Feldstärken. Dabei ist zu beachten, dass wegen der frequenzfesten Kanäle kein zweites unabhängiges Netz in der Nähe eines bereits bestehenden Netzes eingerichtet werden kann. Aufgrund der gegenseitigen Störungen kommt es sonst zu einem Zusammenbruch eines der Netze oder sogar beider Netze. Lediglich bei größeren Entfernungen zueinander und somit geringen Feldstärken im Zwischenraum zwischen den Sendern ist eine doppelte Belegung einzelner Kanäle möglich. In dieser Konfiguration ist jedoch von einer Störung der Kommunikation innerhalb der Übergangszone zwischen beiden Modulen auszugehen.

#### 4.3.3. Messung der Kollisionswahrscheinlichkeiten

Wie im vorherigen Kapitel bereits gezeigt werden konnte, kommt es bei Bluetooth, im Gegensatz zum frequenzfest sendenden WLAN, durch das Frequenzsprungverfahren häufig zu Überlagerungen unabhängig innerhalb desselben Kanals sendender Module. Um die Häufig-

keit des Auftretens konstruktiver Feldüberlagerungen abschätzen zu können, wurden ergänzend zu den Messungen der Stärke der Überlagerungen Messungen über die Häufigkeit ihres Auftretens durchgeführt. Da über die Modulfirmware nicht einsehbar bzw. kontrollierbare Parameter in das Sendeverhalten einfließen, gestaltet sich im Fall von Bluetooth eine rechnerische bzw. analytische Lösung der Kollisionswahrscheinlichkeit schwierig bzw. nur unzureichend durchführbar. So beziehen sich die Literaturangaben zum Kollisionsverhalten in der Regel auf den Fall maximaler Bandbreitenausnutzung bei konstanter Paketgröße oder zumindest auf ein konstantes Paketgrößenverhältnis. Diskussionen über die theoretisch auftretende Kollisionswahrscheinlichkeiten sind unter anderem in [Batz03, Cordeiro01, Elhoiydi01, Feng02, Howitt03, Lin03 und Zanella02] zu finden.

Wie Messungen mit einem Spektrumanalysator zeigten, verwenden Bluetoothmodule jedoch je nach Datenmenge, individuell unterschiedliche Paketlängen (Tabelle 4.1) in zusätzlich unterschiedlichen Häufigkeiten zum Übertragen der Daten.

Pakettyp	Telegrammlänge in Zeitschlitzen [1/1600 s]	Zykluslänge in Zeitschlitzen [1/1600 s]	FEC	maximale Nutzdaten [Byte]	Übertragungszeit [ms]	maximale Datenrate [kBit/s] Hin- / Rückkanal
DM1	1	2	2/3	17	171-366	108,8 / 108,8
DM3	3	4	2/3	121	186-1626	387,2 / 54,4
DM5	5	6	2/3	224	186-2871	477,8 / 36,3
DH1	1	2	-	27	150-366	172,8 / 172,8
DH3	3	4	-	183	158-1622	585,6 / 86,4
DH5	5	6	-	339	158-2870	732,2 / 57,6

Tabelle 4.1: Unterschiedliche Bluetoothtelegramme. FEC = forward error correction (Fehlerkorrektur), DM = Data medium rate, DH = Data high rate. Alle Pakete besitzen Fehlererkennungen für den Telegrammkopf bzw. für die Nutzdaten, um eine fehlerfreie Adressierung und Übertragung zu gewährleisten. Zur Übertragung von Audiodaten stehen weitere Telegrammformen ohne Fehlererkennung zur Verfügung.

Zur Messung der Kollisionswahrscheinlichkeiten wurde der Aufbau aus Abbildung 4.16 verwendet. Die seriellen Module wurden mit ihrer maximalen Datenübertragungsrate von 115,2 kBit/s angesprochen. Im Unterschied zu den vorangegangenen Messungen, wurde der Spektrumanalysator zwar im Single-Span-Modus, aber mit langen Abtastzeiten im Bereich einiger Sekunden (ca. ein Messpunkt pro Bluetoothzeitfenster) betrieben. Mittels eines PCs wurde automatisch die Häufigkeitsverteilung der Peaks in Abhängigkeit ihrer Leistung ermittelt, wobei als Kriterium für den Kollisionsgrad die empfangene Leistung diente.

Abbildung 4.23 zeigt eine typische Messung, in welcher die Anzahl der Kanalbelegungen pro Minute und Kanal für drei unterschiedliche Bluetoothmodule gemessen wurde. Es ist erkennbar, dass die Module bei gleichen Tätigkeiten deutlich unterschiedliche Funkaktivitäten zeigen. Da bei geringer Bandbreitenausnutzung die Nutzdaten auf verschiedenen Paketlängen bzw. über unterschiedliche Strategien übertragen werden können, ist eine Voraussage bzw.

Bewertung der auftretenden Funkaktivitäten hier nicht möglich. Auch ist die Funkaktivität im Ruhezustand von der Firmware der Module abhängig. Bezüglich der Datenraten der einzelnen Pakettypen (Tabelle 4.1) lässt sich lediglich feststellen, dass eine Übertragung ausschließlich über DM1-Pakete wegen der damit zu geringen erzielbaren Datenrate nicht möglich ist. Entsprechend zeigen Messungen mit dem Spektrumanalysator eine Mischung aus 1, 3 und 5 Zeitslitze langen Paketen. Eine Bewertung des Funkverhaltens im Hinblick auf eine Eignung als Kabelersatz kann zweckmäßiger Weise nur über die im Kapitel 5.3.4 diskutierten Parameter, wie zeitliche Verzögerung und zeitliche Streuung der Übertragung, erfolgen.

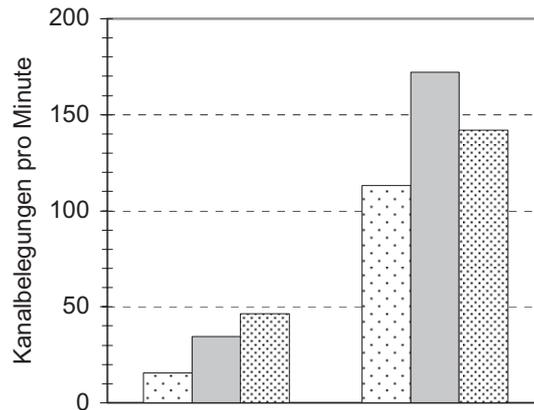


Abbildung 4.23: Kanalbelegungen von drei unterschiedlichen seriellen Bluetoothmodulen im Ruhezustand (rechts) sowie bei maximaler Datenübertragung (links)

Abbildung 4.24 zeigt eine Messung der Überlagerung der Felder zweier Module pro Minute für unterschiedliche Messbandbreiten (10 MHz, 3 MHz und 1 MHz, entsprechend 10, 3 oder 1 Bluetoothkanälen), bezogen auf eine Messbandbreite von 1 MHz.

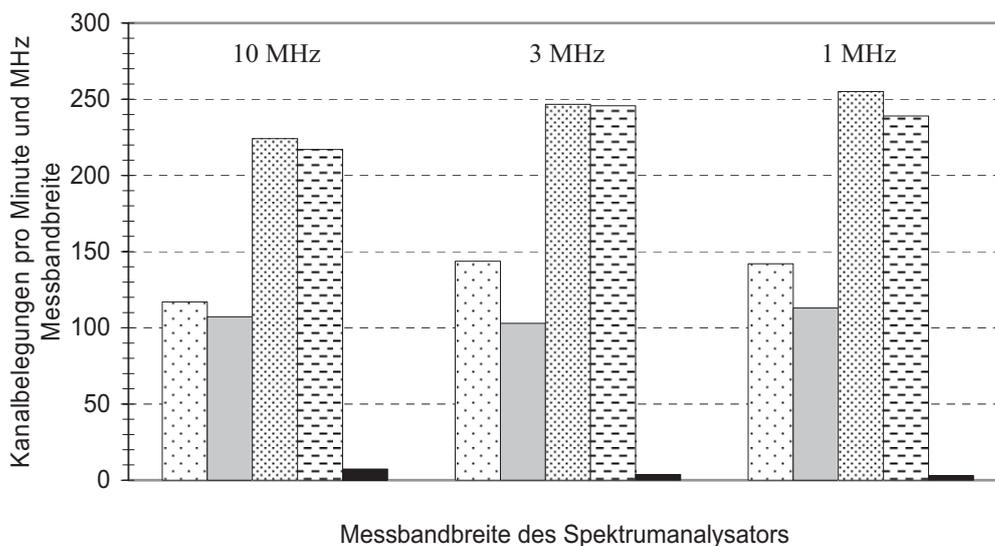


Abbildung 4.24: Anzahl der Kanalbelegungen pro Minute in Abhängigkeit der Messbandbreite für zwei unterschiedliche Bluetoothmodule. Von links nach rechts: Modul 1 alleine, Modul 2 alleine, Summe 1 + 2 berechnet, Summe 1 + 2 gemessen, Kollisionen gemessen

Je größer die verwendete Messbandbreite des Spektrumanalysators, desto mehr Kanäle werden gleichzeitig erfasst. Dadurch lassen sich zum einen die Häufigkeit der Kanalbelegungen sowie die Häufigkeit der sogenannten Nebenanalkollisionen bestimmen und zum anderen Aussagen über Störbeeinflussungen breitbandig empfindlicher Empfänger durch gleichzeitig im Empfangsbereich sendende Quellen treffen. Die ersten zwei Balken in Abbildung 4.24 zeigen die gemessenen Kanalbelegungen für beide Module einzeln gemessen, der dritte die berechnete Summe aus beiden Werten und der vierte die tatsächlich gemessene Summe. Der fünfte Balken schließlich zeigt die Anzahl der gemessenen Überlagerungen. Wie zu erwarten, sind die Ergebnisse nahezu unabhängig von der Messbandbreite des Spektrumanalysators. Wegen der pseudozufälligen Sprungsequenz liegt bei langen Messzeiten theoretisch eine Gleichverteilung der Kanalbelegungen vor.

Der Abfall der registrierten Überlagerungen bei großen Messbandbreiten lässt sich dadurch erklären, dass bei geringer zeitlicher Messauflösung kurze aufeinanderfolgende Pakete in unterschiedlichen Kanälen innerhalb der Filterbandbreite mitunter nicht von einem einzelnen langen Paket unterschieden werden können. Der Spektrumanalysator misst dann fälschlicherweise eine zu geringe Anzahl an Paketen. Bei mehreren unabhängigen Netzen kann der Spektrumanalysator deshalb bei großen Messbandbreiten nicht mehr zuverlässig zwischen einzelnen Paketen unterscheiden. Entsprechend höher ist der gemessene Abfall der Kanalbelegungen für große Messbandbreiten, wie in Abbildung 4.25 für drei und in Abbildung 4.26 für vier unabhängige Netze gezeigt.

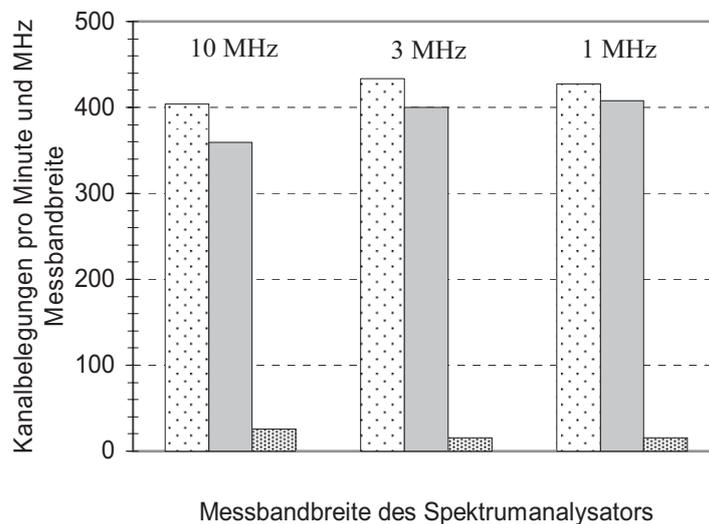


Abbildung 4.25: Anzahl der Kanalbelegungen pro Minute in Abhängigkeit der Messbandbreite für drei unterschiedliche serielle Bluetoothmodule. Von links nach rechts: rechnerische Summe, gemessene Summe und Anzahl an Kollisionen zwischen zwei Modulen

Wie die Messungen zeigen, ist die Anzahl der messbaren Überlagerungen sehr gering. Lediglich eine Überlagerung dreier Module konnte pro Kanal und Minute bei der Messung von vier

unabhängigen Netzen festgestellt werden. Eine gleichzeitige Überlagerung aller vier Module konnte nicht nachgewiesen werden. Die Anzahl der messbaren einfachen Überlagerungen lag in den durchgeführten Messungen für die verwendeten Module bei ca. 5 % für zwei und bei ca. 10 % für vier unabhängige Netze. Bei Überlagerungen von mehr als zwei Modulen gleichzeitig lag die Kollisionswahrscheinlichkeit deutlich unterhalb von 1 %. Zwar ist die Anzahl der tatsächlich auftretenden Überlagerungen größer, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Diese addieren sich aber nicht in jedem Fall maximal konstruktiv.

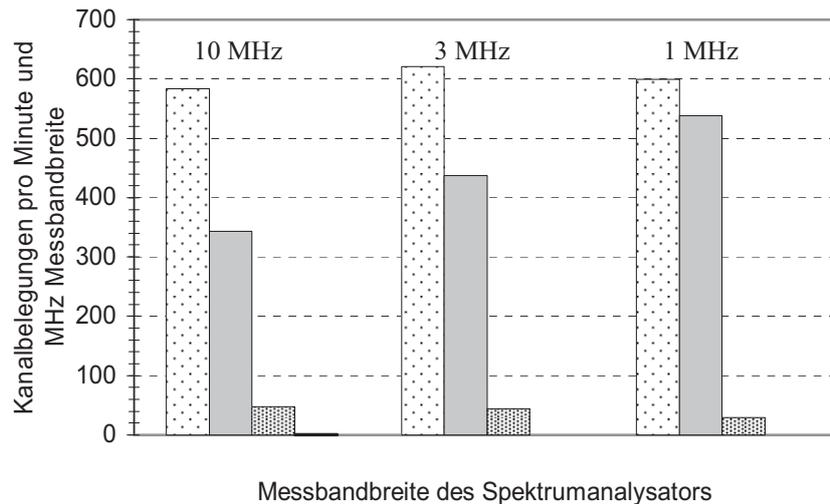


Abbildung 4.26: Anzahl der Kanalbelegungen pro Minute in Abhängigkeit der Messbandbreite für vier unterschiedliche serielle Bluetoothmodule. Von links nach rechts: rechnerische Summe, gemessene Summe, gemessene Anzahl an Kollisionen zwischen zwei Modulen. Die Anzahl an Kollisionen zwischen mehr als zwei Modulen gleichzeitig liegt in dieser Messung bei ca. 0,5 pro Minute und Megahertz Messbandbreite.

Selbst beim gleichzeitigen Betrieb mehrerer unabhängiger Netze in unmittelbarer Umgebung zueinander liegt somit nur ein sehr seltenes Auftreten höherer Feldstärken infolge von Kollisionen vor.

#### 4.4. Einkopplung der Funksignale in leitfähige Strukturen

Im Rahmen der Emission von Funkübertragern ist die Untersuchung der Einkopplung der emittierten 2,4-GHz-Strahlung in leitfähige Strukturen von besonderem Interesse. Da die Funkübertrager als Kabelersatz dienen, ist es sinnvoll, diese ohne zusätzliche Zwischenverkabelung direkt an der Datenquelle, z.B. einem Messgerät sowie der Datensenke, z.B. einem Computer, einzusetzen. Aus diesem Grund befinden sich Funkübertragungsmodule häufig in unmittelbarer Nähe zu elektronischen Systemen bzw. zu Kabeln.

Bei empfindlichen Systemen kann es dabei aufgrund unerwünschter Einkopplungen zu Störungen kommen. Ein bekanntes Beispiel sind Mobiltelefone, die in empfindliche Empfänger-

elektronik einkoppeln und beim Verbindungsaufbau z.B. in Rundfunkempfängern ein charakteristisches Summen erzeugen. Zwar verwenden Bluetooth sowie WLAN im Vergleich zu Mobiltelefonen deutlich geringere Sendeleistungen (Tabelle 5.8), durch die oftmals geringeren Abstände zur Elektronik kommt es aber auch hier zum gleichen Effekt. Um ein Maß für die auftretende Einkopplung zu erhalten, wurden Messungen und Simulationen der Einkopplung in unterschiedliche leitfähige Strukturen, wie Leitungen über leitender Ebene und gedruckten Schaltungen, durchgeführt [Schoof03b].

#### 4.4.1. Grundlagen der Leitungstheorie

Die Simulation einer Leitung über leitender Ebene lässt sich beispielsweise mit dem Leitungsdifferentialgleichungssystem lösen, welches auf der sogenannten Leitungsgleichung basiert. Wesentliche Einschränkungen der Leitungstheorie sind, dass die Querschnittsabmessungen des Systems gering gegenüber den Längsabmessungen sowie der minimalen Wellenlänge sein müssen, so dass sich auf den Leitungen nur Transversal-Elektromagnetische Wellen (TEM-Wellen) ausbreiten. Weiterhin muss die Komponente der elektrischen Feldstärke in Ausbreitungsrichtung Null bzw. zumindest gering gegenüber der transversalen Komponente sein, so dass Quasi-TEM-Wellenausbreitung herrscht [Unger95].

Für eine Doppelleitung der Länge  $dz$  ergibt sich das in Abbildung 4.27 dargestellte, vereinfachte Ersatzschaltbild aus konzentrierten Elementen.

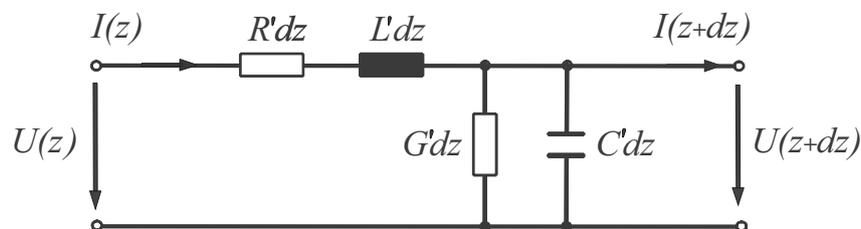


Abbildung 4.27: Ersatzschaltbild einer Doppelleitung der Länge  $dz$

Eine Doppelleitung kann sowohl eine Leitung über leitender Ebene, eine ungeschirmte Zweidrahtleitung wie auch den Fall einer Koaxialleitung beschreiben. Die Querschnittsform kann dabei beliebig sein. Die Leitungsgrößen werden in Form von längenbezogenen Leitungsbelägen  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  und  $C'$  ausgedrückt, wobei  $R'$  den Widerstandsbelag,  $L'$  den Induktivitätsbelag,  $G'$  den Leitwertsbelag und  $C'$  den Kapazitätsbelag repräsentieren. Diese sogenannten primären Leitungsconstanten sind abhängig von der Leitergeometrie, den Materialparametern, der Frequenz sowie einem eventuell vorhandenem Dielektrikum.

Die Anwendung des Kirchhoff'schen Maschen- und Knotensatzes ergibt im Frequenzbereich die Leitungsdifferentialgleichung erster Ordnung:

$$\frac{dU(z)}{dz} = -(R' + j\omega L') \cdot I(z) = -Z' \cdot I(z) \quad (4.21)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G' + j\omega C') \cdot U(z) = -Y' \cdot U(z). \quad (4.22)$$

$Z'$  stellt den aus dem Widerstandsbelag und dem Induktivitätsbelag gebildeten Impedanzbelag und  $Y'$  den aus dem Leitwertbelag und dem Kapazitätsbelag gebildeten Admittanzbelag dar. Durch Einführung der komplexen Ausbreitungskonstante  $\gamma$ , die sich aus der Dämpfungskonstante  $\alpha$  und der Phasenkonstante  $\beta$  zusammensetzt:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta, \quad (4.23)$$

wobei die sogenannten sekundären Parameter  $\alpha$  die Dämpfung und  $\beta$  die Phasendrehung beschreiben, ergeben sich durch Differenzieren nach  $z$  und gegenseitiges Einsetzen die Leitungsdifferentialgleichungen zweiter Ordnung:

$$\frac{d^2U(z)}{dz^2} = \gamma^2 \cdot U(z) \quad (4.24)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} = \gamma^2 \cdot I(z). \quad (4.25)$$

Sei die komplexe Impedanz  $\Gamma$  der Wellenwiderstand der Leitung mit:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}}, \quad (4.26)$$

so ergeben sich mit der Spannung am Leitungsanfang  $U_a = U(0)$  sowie dem Strom am Leitungsanfang  $I_a = I(0)$  die Leitungsgleichungen in physikalischer Form:

$$U(z) = \frac{1}{2}(U_a + \Gamma I_a)e^{-\gamma z} + \frac{1}{2}(U_a - \Gamma I_a)e^{\gamma z} \quad (4.27)$$

$$I(z) = \frac{1}{2}\left(\frac{U_a}{\Gamma} + I_a\right)e^{-\gamma z} - \frac{1}{2}\left(\frac{U_a}{\Gamma} - I_a\right)e^{\gamma z}. \quad (4.28)$$

Diese Darstellungsform entspricht dem Bild zweier entgegenlaufender Wellen, wobei die hinlaufende Welle bei zunehmendem  $z$  und die rücklaufende Welle bei abnehmendem  $z$  um den Faktor  $e^{-\alpha z}$  bzw.  $e^{\alpha z}$  gedämpft werden. Eine wichtige Größe der Leitungstheorie ist der Reflexionsfaktor:

$$r = \frac{Z_e - \Gamma}{Z_e + \Gamma}. \quad (4.29)$$

$Z_e$  stellt hierbei den Abschlusswiderstand der Leitung dar. Bei Anpassung der Leitung mit ihrem Wellenwiderstand wird die rücklaufende Welle Null und das Signal wird reflexionsfrei übertragen.

Durch Anwendung der Hyperbelfunktionen lassen sich die Leitungsgleichungen in die mathematische Form umformen:

$$U(z) = U_a \cosh(\gamma z) - \Gamma I_a \sinh(\gamma z) \quad (4.30)$$

$$I(z) = I_a \cosh(\gamma z) - \frac{U_a}{\Gamma} \sinh(\gamma z). \quad (4.31)$$

Bei Beaufschlagung der Doppelleitung mit einem externen elektromagnetischen Feld kommt es zu einer Anregung, die durch die verteilten Quellen  $u'$  und  $i'$  beschrieben werden kann (Abbildung 4.28) [Gebele03].

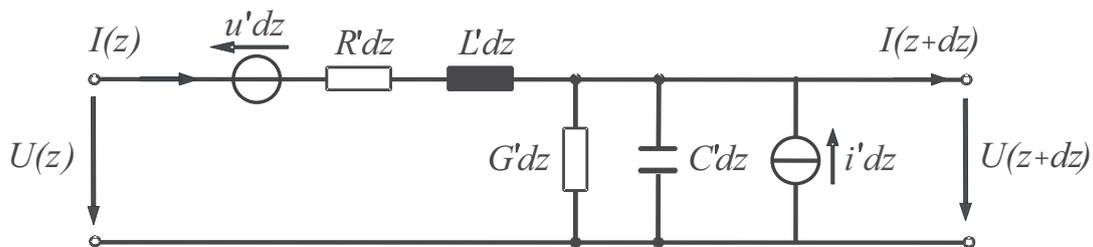


Abbildung 4.28: Ersatzschaltbild einer Doppelleitung der Länge  $dz$  unter Anregung durch ein externes Feld, beschrieben durch die verteilten Quellen  $u'$  und  $i'$

Die Gleichungen 4.21 und 4.22 erweitern sich entsprechend um den Einfluss des externen Feldes:

$$\frac{dU(z)}{dz} = -Z' \cdot I(z) + u'(z), \quad (4.32)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -Y' \cdot U(z) + i'(z). \quad (4.33)$$

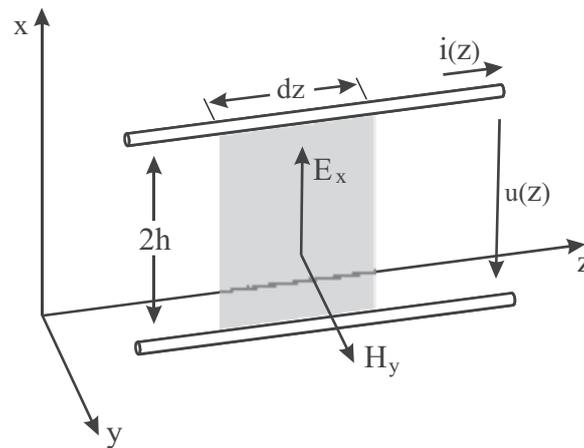


Abbildung 4.29: Feldeinkopplung in eine Doppelleitung

Für die verteilten Quellen  $u'$  und  $i'$  (Abbildung 4.29) gilt dabei im Fall einer kontinuierlichen Anregung [Gebele03]:

$$u'(z) = j\omega\mu_0 \int_{-h}^h H_y(x, z) dx, \quad (4.34)$$

$$i'(z) = -j\omega C' \int_{-h}^h E_x(x, z) dx. \quad (4.35)$$

$H_y$  und  $E_x$  stellen hierbei die einfallenden Felder dar, welche auch in Abwesenheit des Leiters vorhanden sind. Ein wesentlicher Vorteil der Leitungstheorie ist, dass Probleme, die den Voraussetzungen genügen, mit minimalem Rechenaufwand gelöst werden können.

#### 4.4.2. Grundlagen der Momentenmethode

Eine weitere Methode zur Simulation von Stromverteilungen auf Leitungen, die jedoch auch auf den Fall zweidimensionaler und dreidimensionaler Probleme erweitert werden kann, stellt die bereits in Kapitel 4.2 erwähnte Momentenmethode dar.

Grundlage der Momentenmethode sind die Helmholtz-Gleichungen für das skalare elektrische Potential  $\phi$  sowie das Vektorpotential  $\vec{A}$  in einem verlustlosen Medium [Singer92]:

$$\Delta\phi + k_0^2 \cdot \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (4.36)$$

$$\Delta\vec{A} + k_0^2 \cdot \vec{A} = -\mu \cdot \vec{J}, \quad (4.37)$$

wobei  $k_0$  die Wellenzahl darstellt:

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} . \quad (4.38)$$

Sei  $V'$  ein Gebiet, in dem sich Ströme und / oder Ladungen als Quellen befinden (Abbildung 4.30).

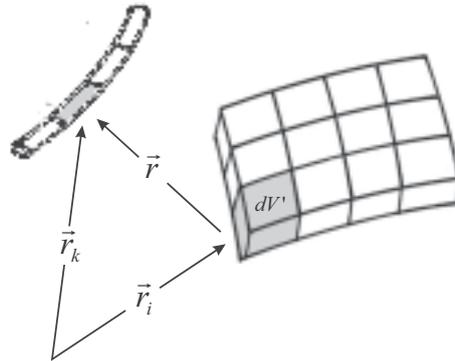


Abbildung 4.30: Die im Quellsegment  $dV'$  befindlichen Ströme und Ladungen verursachen im Leiter in der Entfernung  $\vec{r}$  die Potentiale  $\phi$  und  $\vec{A}$  sowie die Feldstärken  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  [Singer92].

Die Stromdichte  $\vec{J}$  und die Raumladungsdichte  $\rho$  in einem betrachteten Quellsegment  $i$  verursachen in einem Aufpunkt  $k$  in einer Entfernung  $\vec{r}$  die Potentiale  $\phi$  und  $\vec{A}$  sowie die Feldstärken  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$ :

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi - j\omega\vec{A} \quad (4.39)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot}\vec{A} \quad (4.40)$$

$$\phi = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \iiint_{V'} \rho(V') \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV' \quad (4.41)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \iiint_{V'} \vec{J}(V') \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV' . \quad (4.42)$$

Dabei sind  $\vec{J}(V')$  und  $\rho(V')$  über die Kontinuitätsgleichung verknüpft:

$$\text{div}\vec{J} = -j\omega\rho . \quad (4.43)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 4.41 und Gleichung 4.42 in Gleichung 4.39 sowie durch Substitution der Raumladungsdichte durch  $\vec{J}$  ergibt sich für die elektrische Feldstärke:

$$\vec{E} = \frac{-j}{4\pi\epsilon\omega} \cdot \iiint_{V'} \text{div}\vec{J} \cdot \text{grad} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV' - \frac{j\omega\mu}{4\pi} \cdot \iiint_{V'} \vec{J} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV'. \quad (4.44)$$

Durch Integration der elektrischen Feldstärke über ein Leitersegment der Länge  $\Delta s$  erhält man schließlich den Spannungsabfall über das Segment:

$$U = \frac{j}{4\pi\epsilon\omega} \cdot \int_{\Delta s} \left[ \iiint_{V'} \text{div}\vec{J} \cdot \text{grad} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV' \right] \cdot d\vec{s} + \frac{j\omega\mu}{4\pi} \cdot \int_{\Delta s} \left[ \iiint_{V'} \vec{J} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} dV' \right] \cdot d\vec{s}. \quad (4.45)$$

Um die benötigte Stromverteilung zu erhalten, wird die betrachtete Anordnung zuerst in ihren Randflächen segmentiert und anschließend in jedem Segment ein separater Ansatz zur Lösung der Stromverteilung über vorhandene Randbedingungen gewählt. Nachdem die Stromverteilungen in den einzelnen Segmenten bestimmt sind, können die übrigen Größen, wie Feldstärken oder Spannungen, ermittelt werden.

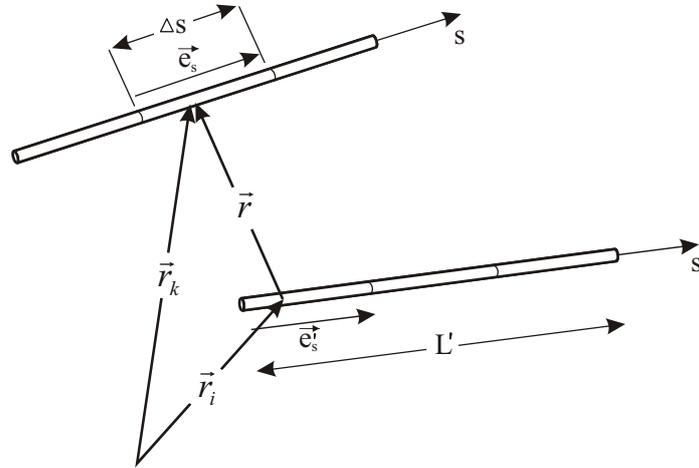


Abbildung 4.31: Bezeichnungen bei Dünndrahtanordnungen, entsprechend Gleichung 4.46

Bei einer Dünndrahtnachbildung (Abbildung 4.31) wird Gleichung 4.45 dabei zum Linienintegral:

$$U_k = -\vec{E}_k \vec{\Delta s} = \frac{j}{4\pi\epsilon\omega} \cdot \int_0^{L'} \frac{\partial I(s')}{\partial s'} \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right) \cdot \vec{e}_s \cdot ds' \cdot \vec{\Delta s} + \frac{j\omega\mu}{4\pi} \cdot \int_0^{L'} I(s') \cdot \vec{e}'_s \cdot \left( \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right) \cdot ds' \cdot \vec{\Delta s}, \quad (4.46)$$

bzw. zum Flächenintegral bei einer Flächenstruktur. Durch Diskretisierung bzw. Segmentierung der Leitung in Leitungselemente konstanter Strombelegung lässt sich das Integral in eine Summe überführen:

$$U_K = \sum_{i=1}^N Z_{ki} \cdot I_i \quad (4.47)$$

Entsprechend erfolgt bei Dünndrahtnachbildungen eine Segmentierung in einer Richtung und bei Flächen eine Segmentierung in zwei Richtungen. Bei N unterschiedlichen Segmenten ergeben sich N Randbedingungen für N Stromamplituden. Das lineare Gleichungssystem vom Grad N:

$$[Z_{NN}] \cdot [I_N] = [U_N] \quad (4.48)$$

lässt sich durch Verfahren wie Matrixinversion oder Gaußelimination lösen.

Der Rechenaufwand der MoM ist im Vergleich zur Leitungstheorie ungleich höher. Allerdings lassen sich mit der MoM auch komplizierte Probleme, wie z.B. Strahlungsausbreitungen in Automobilen oder, wie im Folgenden gezeigt, Einkopplungsvorgänge in ausgedehnte, leitfähige Strukturen untersuchen. Der Aufwand zum Erstellen der Matrix nimmt dabei mit  $N^2$ , der Aufwand zum Lösen des Gleichungssystems mit  $N^{2...3}$  zu, so dass die Rechenzeit bereits für kleine Anordnungen durch die überproportional ansteigende Zeit zum Lösen dominiert wird. Für das Lösen komplizierter Anordnungen benötigt die MoM wegen der Größe der Matrizen ebenfalls sehr viel Arbeitsspeicher.

#### 4.4.3. Messungen und Simulationen im Fernfeld einer Quelle

In genügender Entfernung zum Sender kann das Feld, über einen kleinen Bereich gesehen, als homogen angenommen werden. Die Beaufschlagung der leitfähigen Struktur kann somit durch Anregung mittels einer ebenen Welle erfolgen. Die maximale Feldstärke E im Fernfeld eines Senders in der Entfernung r kann über die im ISM-Band maximal erlaubte isotrope Sendeleistung  $P_i$  ermittelt werden:

$$S(r) = \frac{P_i}{4\pi r^2} = \frac{|E|^2}{2Z_0} \quad (4.49)$$

$$|E(r)| = \sqrt{\frac{P_i Z_0}{2\pi r^2}} \quad (4.50)$$

Hierbei ist  $Z_0$  die Freifeldimpedanz. WLAN-Module sowie Bluetoothmodule der Klasse 1 erzeugen demnach ein Feld von maximal 2,45 V/m in einer Entfernung von 1 m, Bluetoothsender der Klasse 3 entsprechend maximal 0,245 V/m.

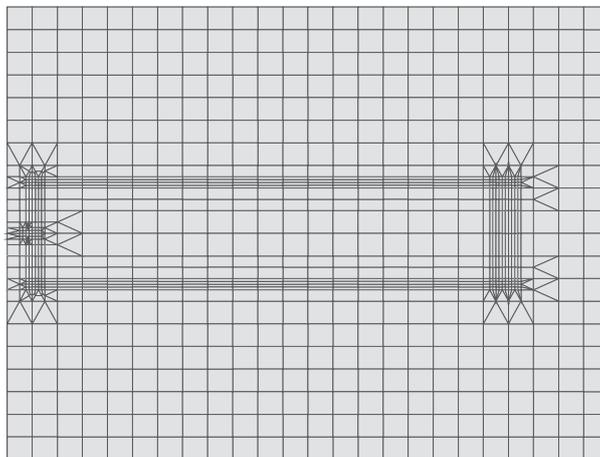


Abbildung 4.32: Für die Simulation mit der Momentenmethode verwendete, diskretisierte Leiterschleife. Das Modell besteht aus ungefähr 2.500 Unbekannten.

Zur Simulation der Kopplung zwischen den ISM-Sendern und Leitungsstrukturen über leitenden Ebenen im Fernfeld wurden sowohl die Leitungstheorie wie auch die Momentenmethode verwendet [Stadtler02]. Die Simulationen mit der Momentenmethode wurden mit dem Programmpaket CONCEPT II durchgeführt [Concept]. Zur Simulation der Kopplung zwischen Sendern und zweidimensionalen, leitfähigen Strukturen im Nahfeld der Sender wurde ausschließlich die Momentenmethode verwendet.

Wegen der bei 2,4-GHz-Sendern im Vergleich zur Trägerfrequenz geringen Modulationsbandbreiten, wurde die Modulation sowohl bei den Simulationen als auch bei den Messungen mit dem Signalgenerator vernachlässigt. Unter diesen vereinfachenden Voraussetzungen wurde die Kopplung zwischen einer Antenne und PCB-Strukturen<sup>1</sup> sowie Leitungen über leitender Ebene an über 1.000 unterschiedlichen Punkten berechnet. Für alle Berechnungen wurde ein 50- $\Omega$ -Abschlusswiderstand angenommen, dieser entspricht dem Eingangswiderstand der Messanordnung bestehend aus Messkabel in Verbindung mit dem Spektrumanalysator.

Der Aufbau zur Bestimmung der Einkopplung in eine PCB-Leiterschleife (Abbildung 4.32) im Fernfeld ist in Abbildung 4.33 gezeigt. Eine Platine mit Leiterschleife wird hier in einer Entfernung von 1 m zum Sender positioniert. Der zweite Aufbau besteht aus einer Leitung über einer leitenden Ebene (Abbildung 4.34). Beide Anordnungen stellen praxisnahe Aufbauten dar und sind gleichermaßen für Simulationen und Messungen geeignet, da sie sich präzise realisieren sowie für die Simulation hinreichend genau diskretisieren lassen.

<sup>1</sup> PCB: Printed Circuit Board

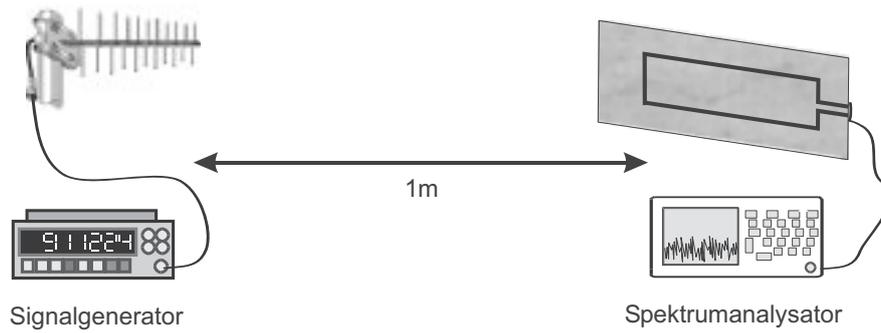


Abbildung 4.33: Aufbau zur Messung der Einkopplung in PCB-Leiterschleifen im Fernfeld eines 2,4-GHz-Senders

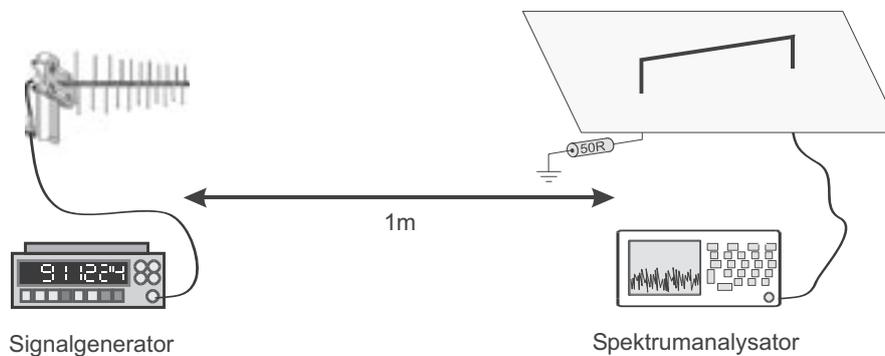


Abbildung 4.34: Aufbau zur Messung der Einkopplung in Leitungen über leitender Ebene im Fernfeld eines 2,4-GHz-Senders

Die beschriebenen Aufbauten wurden mit dem homogenen Feld einer unmoduliert angeregten Antenne in genügend großer Entfernung beaufschlagt. Anstelle eines Abschlusswiderstands wurde ein Spektrumanalysator zur direkten Messung der Einkopplung verwendet. Die maximale Feldstärke des anregenden Feldes wurde ermittelt und auf 100 mW Sendeleistung extrapoliert.

Wie Abbildung 4.35 zeigt, stimmen Messung und Simulation für die Einkopplung in eine Leiterschleife über einen weiten Frequenzbereich überein. In Tabelle 4.2 werden Messungen und Simulationen über die Einkopplungen bei gleich bleibender Frequenz für unterschiedliche Leitergeometrien verglichen.

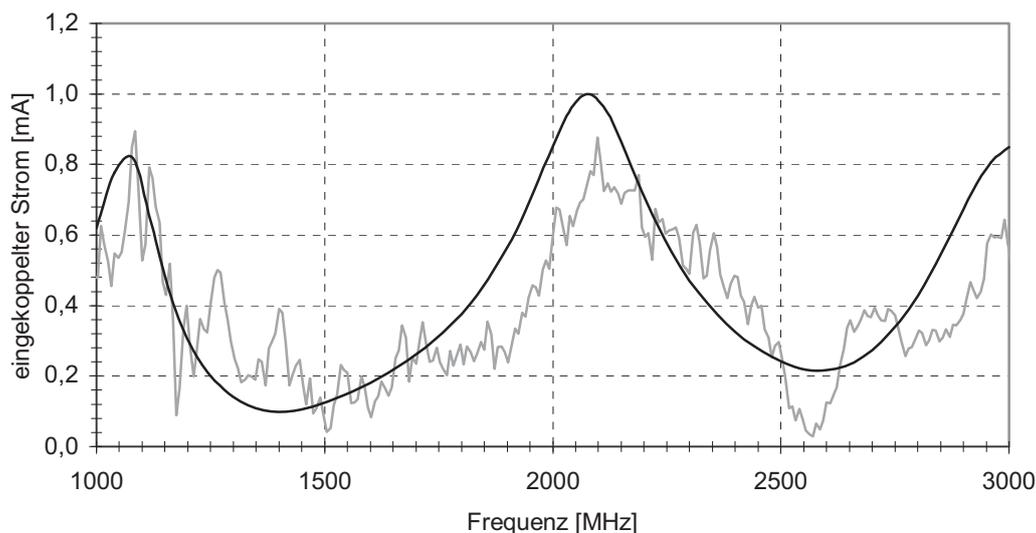


Abbildung 4.35: Vergleich zwischen der gemessenen (graue Kurve) und der mit der Momentenmethode simulierten (schwarze Kurve) Einkopplung einer ebenen Welle in eine PCB-Leiterschleife entsprechend Abbildung 4.33 (Länge der Leiterschleife 9,8 cm, Breite 2,5 cm) in Abhängigkeit von der Frequenz

Die auftretenden Ströme liegen im Bereich von unterhalb 1 mA, weshalb außer bei empfindlicher Analogelektronik nicht von einer Störung auszugehen ist.

Testobjekt	Messung	Simulation
PCB-Leiterschleife Länge 9,8 cm, Breite 2,5 cm	424 $\mu\text{A}$	272 $\mu\text{A}$
PCB-Leiterschleife Länge 8,5 cm, Breite 2,5 cm	698 $\mu\text{A}$	772 $\mu\text{A}$
Leitung über leitender Ebene Länge 15,3 cm, Höhe 2 cm	580 $\mu\text{A}$	495 $\mu\text{A}$
Leitung über leitender Ebene Länge 16,3 cm, Höhe 1 cm	200 $\mu\text{A}$	322 $\mu\text{A}$

Tabelle 4.2: Vergleich zwischen der gemessenen und der simulierten Fernfeldeinkopplung eines 2,4-GHz-Senders mit 100 mW Sendeleistung in verschiedene leitfähige Strukturen

#### 4.4.4. Messungen und Simulationen im Nahfeld einer Quelle

Das Feld in der Nähe zum Sender, wobei nicht notwendigerweise Nahfeldbedingungen vorliegen müssen, kann nicht als homogen über den Abmessungen des gestörten Objekts angenommen werden. Es muss weiterhin berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Sender deutlich unterschiedliche Abstrahlcharakteristika und insbesondere in ihrer Umgebung unterschiedliche Feldverteilungen aufweisen. Wie die Messungen in Kapitel 4.1 ergeben haben, ist die Abstrahlcharakteristik in hohem Maße von der angeschlossenen Peripherie abhängig. Eine

exakte Simulation ist somit weder möglich noch sinnvoll. Für die Untersuchungen wurden deswegen Simulationen mit der Momentenmethode mit vereinfachten Antennen und sinusförmiger Anregung durchgeführt, um die Größenordnung der einkoppelnden Ströme abschätzen sowie Werte über den ungünstigsten Fall erhalten zu können.

Es eignen sich auch hier Anordnungen wie in Kapitel 4.4.3, die sich simulieren und einfach sowie präzise realisieren lassen. Als vereinfachte Antenne diente in den Simulationen ein kurzer Dipol mit einer Länge von 20 mm. Der Speisestrom des Dipols lässt sich dabei über die Strahlungsdichte des Hertz'schen Dipols:

$$S(r, \Theta) = \frac{|E_{\Theta}|^2}{2Z_0} = \frac{Z_0 |I|^2 l^2}{8r^2 \lambda^2} \sin^2(\Theta) \quad (4.51)$$

und der im ISM-Band erlaubten Strahlungsdichte eines isotropen Strahlers im Fernfeld (Gleichung 4.49) mit der maximal erlaubten isotropen Emissionsleistung von 100 mW berechnen. Für den Fall einer Beaufschlagung in der Ebene des Dipols gilt:

$$|I| = \sqrt{\frac{2P_i \lambda^2}{\pi Z_0 l^2}}. \quad (4.52)$$

Die Rechenzeiten bei Verwendung der Momentenmethode für die Leiterschleifen betragen auf einem normalen PC ungefähr 2 Stunden bzw. 6 Minuten auf einem 25-PC-Cluster. Durch Einfügen einer leitenden Ebene als Symmetriebedingung verringern sich die benötigten Rechenzeiten auf einem Einzelrechner auf 30 Minuten. Wegen der einfachen Geometrie der Leitungen über leitender Ebene waren die Rechenzeiten hier im Gegensatz zu den Simulationen der Leiterschleifen vernachlässigbar gering.

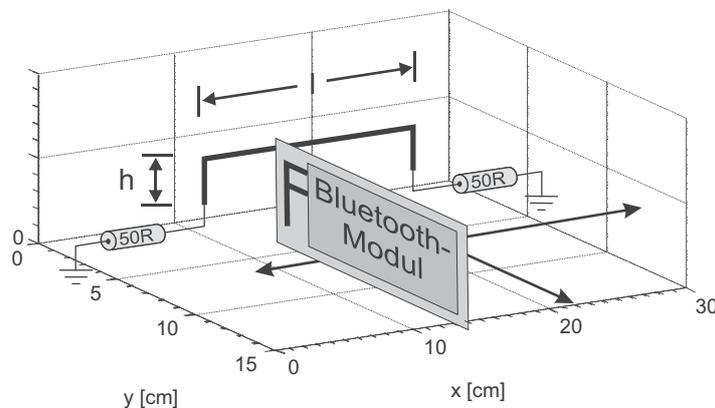


Abbildung 4.36: Aufbau für die Simulation und Messung der Einkopplung von 2,4-GHz-Sendern in Leitungen über leitender Ebene. Die x-y-Ebenen wurden als Masseflächen ausgeführt, die Leitungen lagen bei  $y = 0$  cm und zentriert bei  $x = 15$  cm. Die Ergebnisse wurden auf die maximale Sendeleistung von 100 mW extrapoliert.

Zur messtechnischen Überprüfung der Simulationen, wurden die Leiterschleifen (Abbildung 4.37) bzw. die Leitungen über leitender Ebene (Abbildung 4.36) realisiert und über einem x-y-Positioniertisch angebracht. Die Ausgänge wurden mit dem 50- $\Omega$ -Eingang eines Spektrumanalysators verbunden. Als Quelle dienten zwei kommerziell erhältliche USB-Bluetoothmodule.

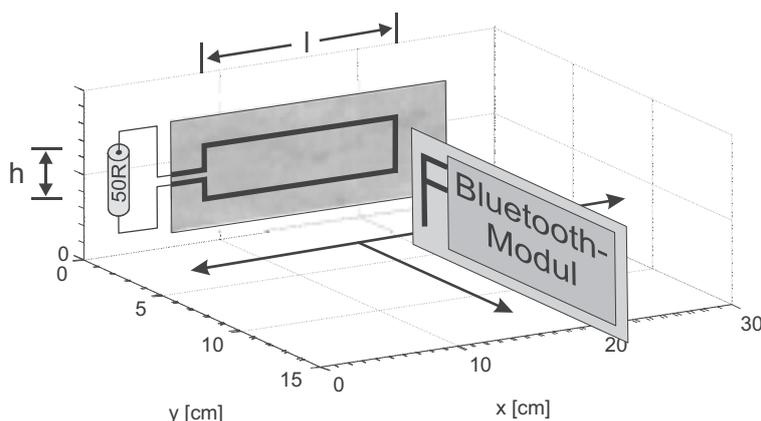


Abbildung 4.37: Aufbau für die Simulation und Messung der Einkopplung von 2,4-GHz-Sendern in PCB-Leiterschleifen. Die Leiterschleifen lagen bei  $y = 0$  cm und zentriert bei  $x = 10$  cm. Die Ergebnisse wurden auf die maximale Sendeleistung von 100 mW extrapoliert.

Ein Modul verfügte über eine Inverted-F-Antenne, das andere über eine Meander-inverted-F-Antenne (Abbildung 4.38). Die Messungen wurden bei aktivem Datenaustausch mit einem gepaarten Bluetoothmodul im Maxhold-Modus und mit genügend langer Durchlaufzeit durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Messungen mit einer sinusförmig angeregten konischen Antenne.

Die Funkübertragungsmodule sowie die konische Antenne wurden an der Positioniereinheit des Tisches aus Kapitel 4.1 befestigt. Anschließend wurden automatische zweidimensionale Vermessungen der eingekoppelten Ströme durchgeführt (Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37). Die Ausgangsentfernung zwischen der Antenne und den leitfähigen Strukturen betrug 2 cm bei dem USB-Bluetoothmodul mit Meander-Antenne sowie 1 cm bei den übrigen Messungen. Zuletzt wurden die Messungen auf die maximal erlaubte Sendeleistung von 100 mW EIRP extrapoliert. Abbildung 4.39 bis Abbildung 4.46 zeigen Ergebnisse von Simulationen und Messungen der Einkopplungen in eine Leiterschleife bzw. eine Leitung über leitender Ebene.

Die Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen sind, vor allem unter Berücksichtigung der angenommenen Vereinfachungen und der unterschiedlichen verwendeten Antennen, erstaunlich gut. Die Kurvenverläufe decken sich in den meisten Details und stimmen in ihren Amplituden auf nahezu 2 dB überein. Diese Unterschiede resultieren vermutlich

eher aus einer ungenauen Antennenpositionierung als aus Messungenauigkeiten oder Simulationsfehlern.

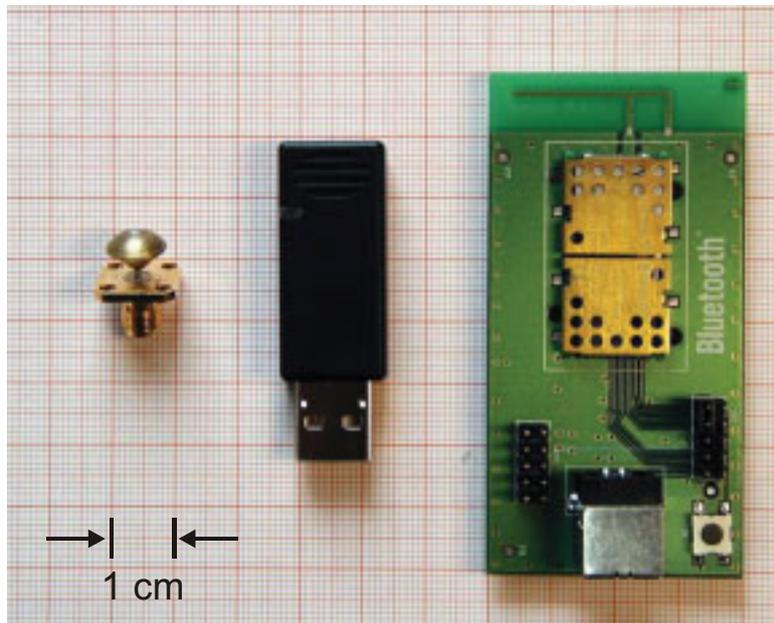


Abbildung 4.38: Zur Messung der Einkopplung in leitfähige Strukturen verwendete Module bzw. Antennen, von links nach rechts: konischer Monopol, USB-Bluetoothmodul mit einer Meander-inverted-F-Antenne, USB-Bluetoothmodul mit einer Inverted-F-Antenne

Bezüglich der EMV von Bluetoothmodulen ergibt sich, dass lediglich in unmittelbarer Umgebung eines leistungsstarken Moduls ( $> 10 \text{ mW}$ ) mit einer hohen Einkopplung zu rechnen ist. Allerdings können im ungünstigsten Fall eines 100-mW-Moduls in 1 cm Entfernung Ströme von über 40 mA eingekoppelt werden, was sowohl die PCB- als auch die Leitungsmessungen bestätigen. Es sollten externe, hochwertige Antennen verwendet werden. Ebenso sollte bei Nutzung empfindlicher Elektronik in unmittelbarer Nähe auf eine ausreichende Schirmung bzw. auf einen Mindestabstand geachtet werden.

Die Ergebnisse haben weiterhin gezeigt, dass sich mit Hilfe von Simulationsrechnungen, selbst unter deutlich vereinfachenden Annahmen bezüglich der Antenne oder der Signalmodulation, gute Voraussagen über Nahfeldeinkopplungen treffen lassen. Hierdurch können bereits im Entwicklungsstadium Abschätzungen über den ungünstigsten Fall durchgeführt und damit frühzeitig die EMV des Systems berücksichtigt werden. Wegen der im Vergleich zur Modulationsfrequenz hohen Trägerfrequenz lassen sich die Ergebnisse auch auf andere 2,4-GHz-Systeme übertragen.

Vergleichsmessungen an realen Kabelbäumen in Automobilen unter dem Einfluss von 2,4-GHz-Sendern ergaben eingekoppelte Ströme im Bereich von maximal 1 bis 4 mA. Aufgrund des größeren Abstands zwischen dem Sender und den Kabelbäumen deckt sich dies mit den oben gewonnenen Ergebnissen [Schoof03a].

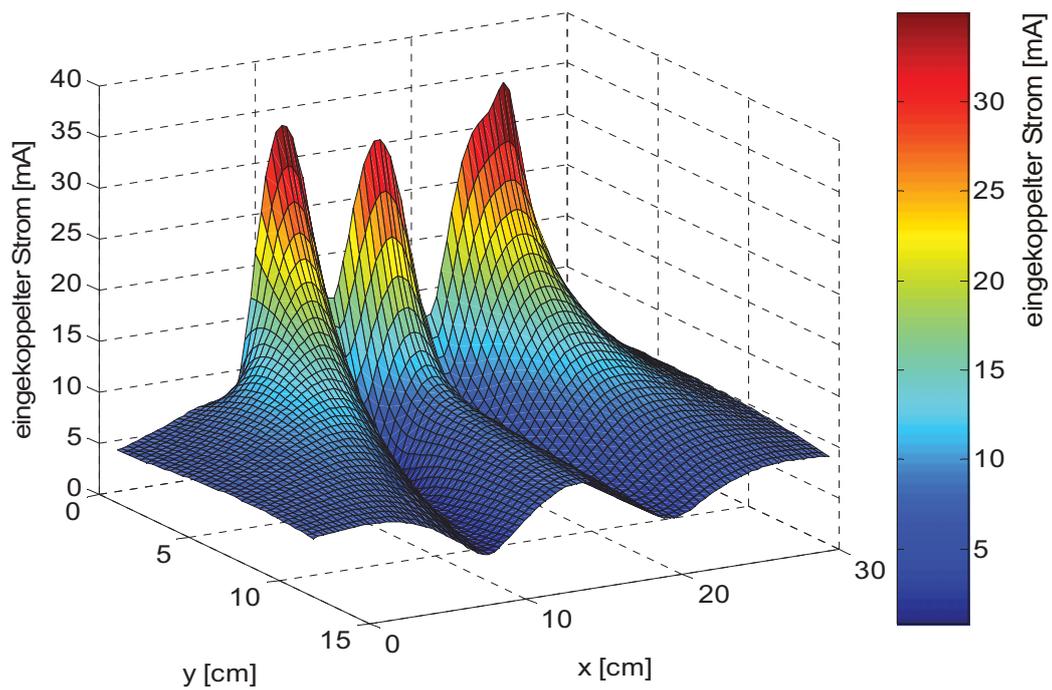


Abbildung 4.39: Mit der Momentenmethode simulierte Einkopplung in eine Leitung entsprechend Abbildung 4.36 mit  $l = 15,3$  cm und  $h = 2$  cm über einer leitenden Ebene in Abhängigkeit von der Position zum Sender

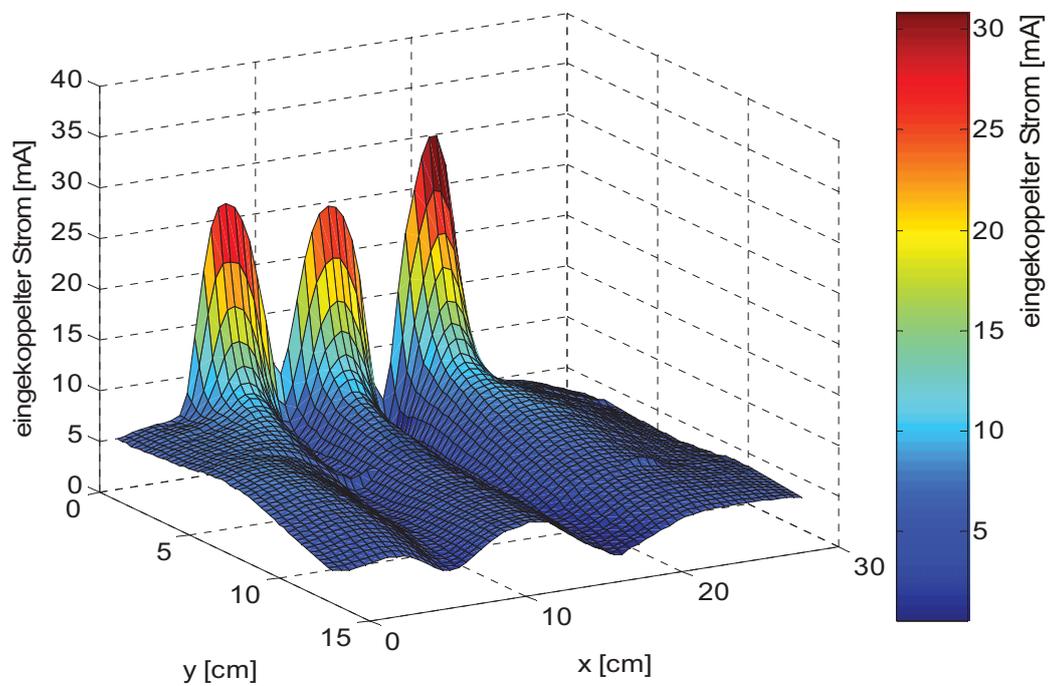


Abbildung 4.40: Gemessene Einkopplung in eine Leitung entsprechend Abbildung 4.36 mit  $l = 15,3$  cm und  $h = 2$  cm über einer leitenden Ebene mit einem sinusförmig angeregten konischen Monopol als Quelle

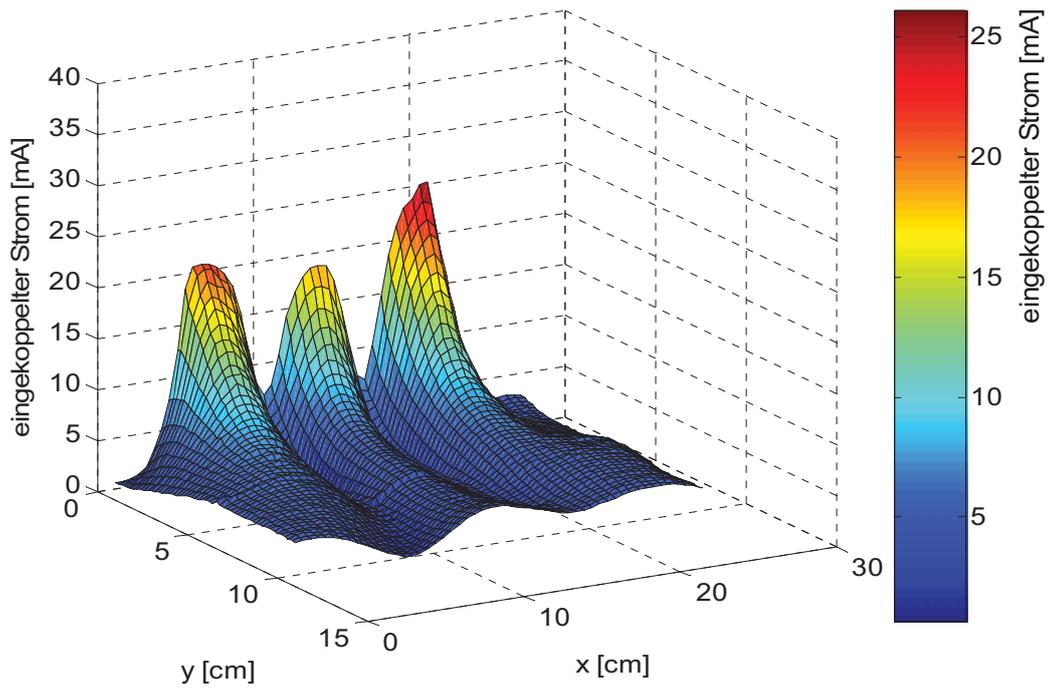


Abbildung 4.41: Gemessene Einkopplung in eine Leitung entsprechend Abbildung 4.36 mit  $l = 15,3$  cm und  $h = 2$  cm über einer leitenden Ebene mit einem Bluetoothmodul mit Inverted-F-Antenne als Quelle

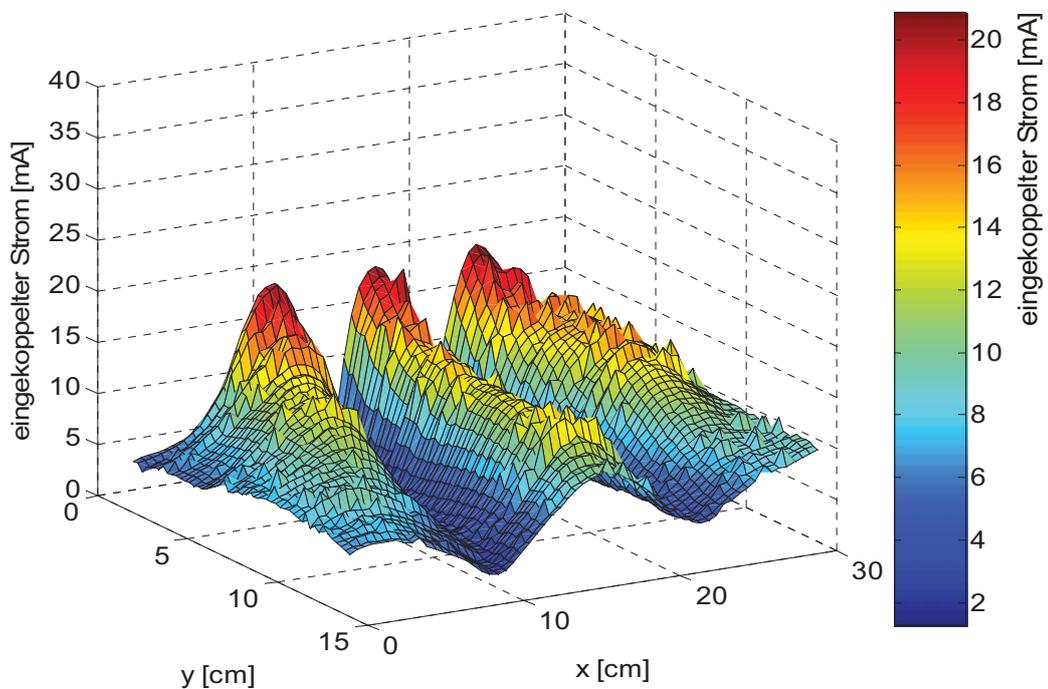


Abbildung 4.42: Gemessene Einkopplung in eine Leitung entsprechend Abbildung 4.36 mit  $l = 15,3$  cm und  $h = 2$  cm über einer leitenden Ebene mit einem USB-Bluetoothmodul mit Meander-inverted-F-Antenne als Quelle

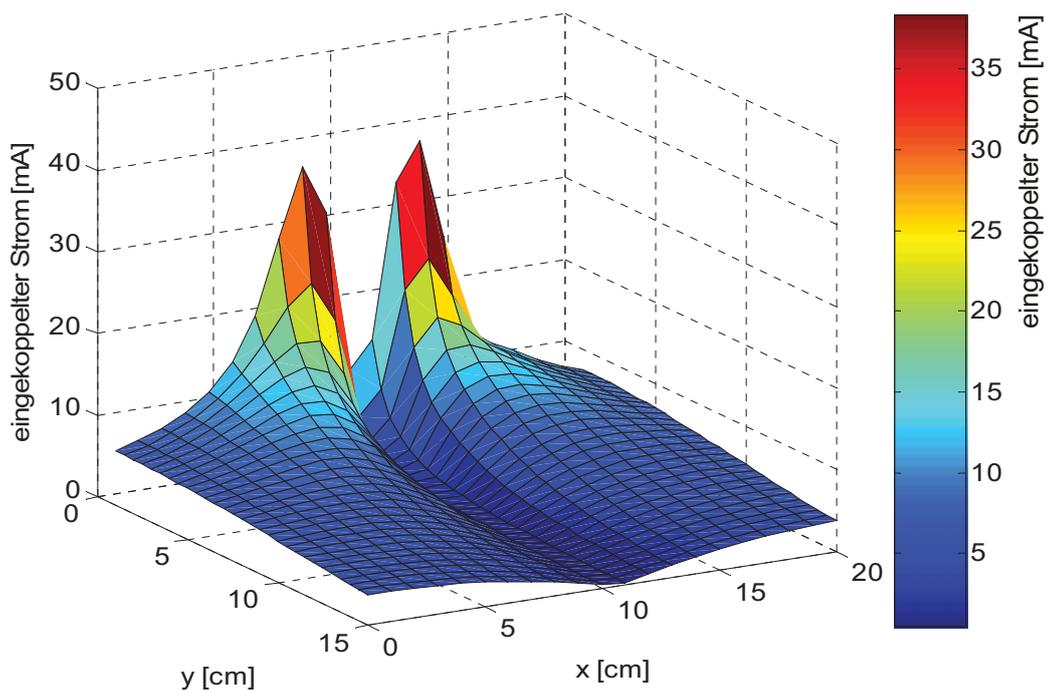


Abbildung 4.43: Mit der Momentenmethode simulierte Einkopplung in eine Leiterschleife entsprechend Abbildung 4.37 mit  $l = 8,8$  cm und  $h = 2,5$  cm in Abhängigkeit von der Position zum Sender

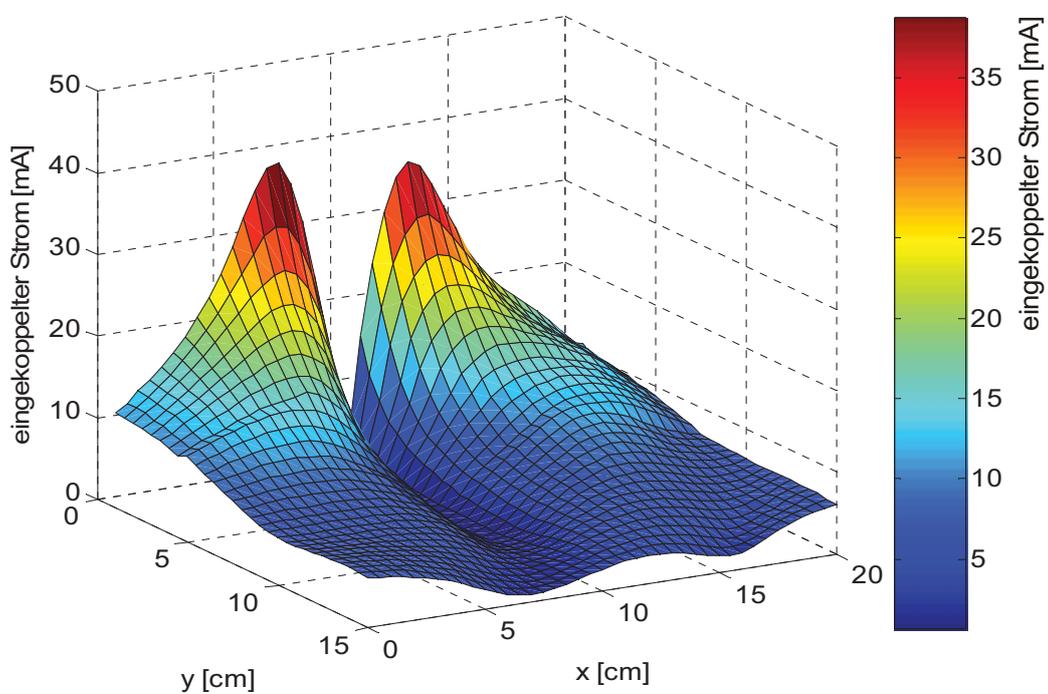


Abbildung 4.44: Gemessene Einkopplung in eine Leiterschleife entsprechend Abbildung 4.37 mit  $l = 8,8$  cm und  $h = 2,5$  cm mit einem sinusförmig angeregten konischen Monopol als Quelle

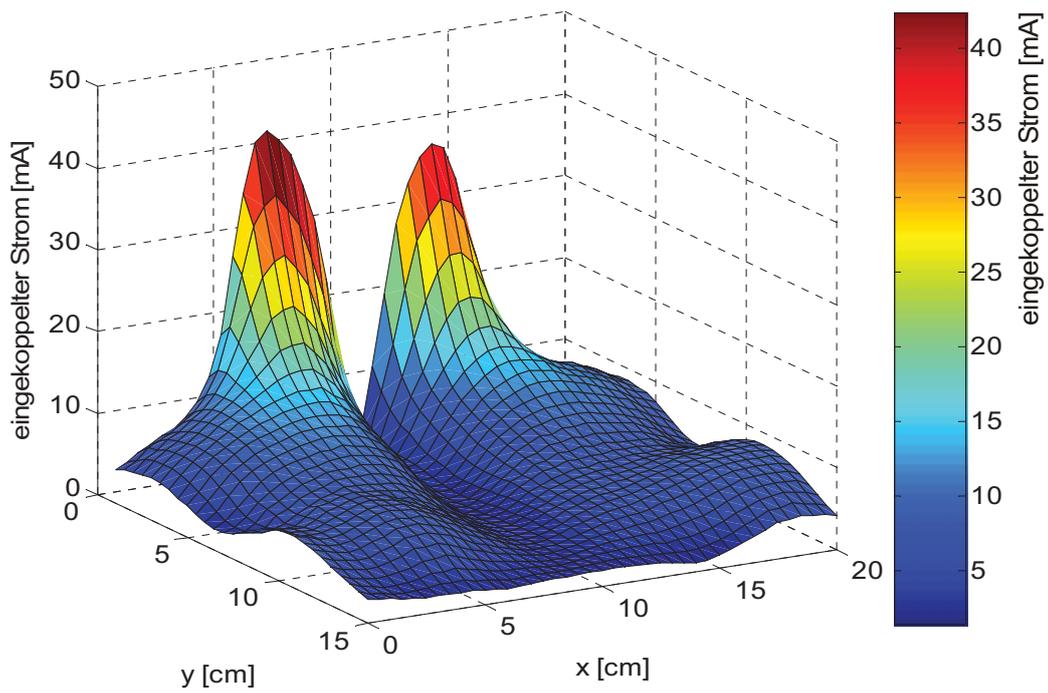


Abbildung 4.45: Gemessene Einkopplung in eine Leiterschleife entsprechend Abbildung 4.37 mit  $l = 8,8$  cm und  $h = 2,5$  cm mit einem Bluetoothmodul mit Inverted-F-Antenne als Quelle

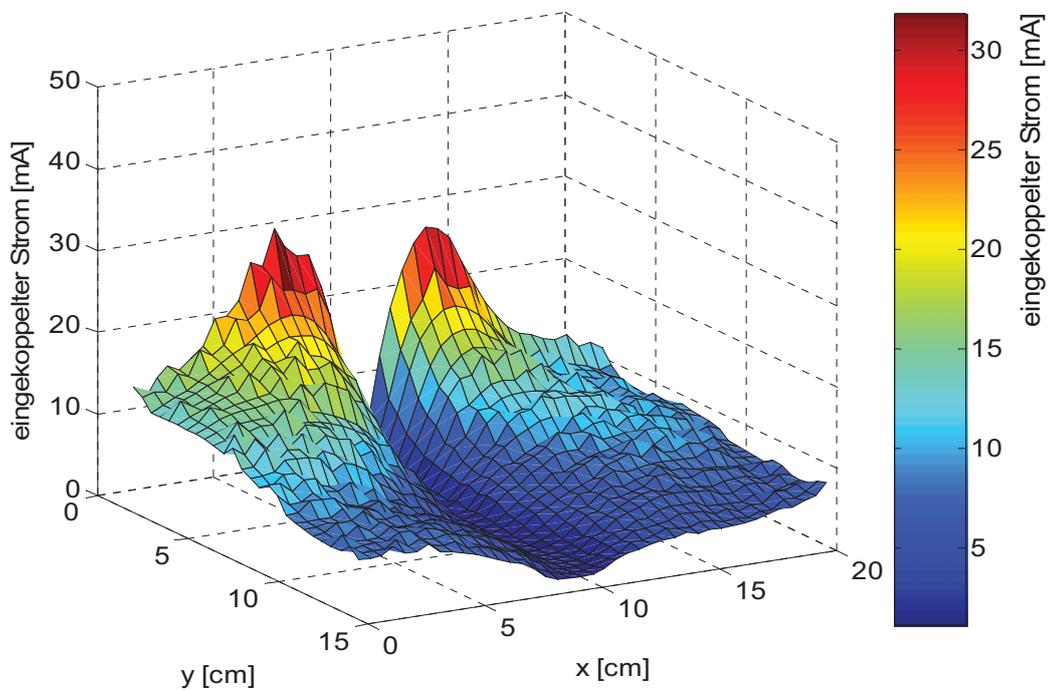


Abbildung 4.46: Gemessene Einkopplung in eine Leiterschleife entsprechend Abbildung 4.37 mit  $l = 8,8$  cm und  $h = 2,5$  cm mit einem Bluetoothmodul mit Meander-inverted-F-Antenne als Quelle

## 5. Drahtlose Datenübertragung auf Schiffsbrücken

Nachdem in Kapitel 4 die EMV von 2,4-GHz-Datenübertragern unter allgemeinen Gesichtspunkten betrachtet wurde, werden im Folgenden die speziellen Gegebenheiten im Bereich des Schiffbaus sowie die daraus resultierenden Anforderungen an drahtlose Datenübertrager erörtert. Im Anschluss daran wird durch Messungen die Eignung der verwendeten Funkübertragungsmodule für eine Nutzung unter den speziellen Anforderungen überprüft.

### 5.1. Allgemeine Anforderungen

#### 5.1.1. Normen im Schiffbau

Grundlegende Norm für den Betrieb elektrischer Geräte bzw. Systeme an Bord von Schiffen ist die IEC 60945<sup>1</sup> bzw. EN 60945 [IEC60945]. Bezüglich der EMV orientiert sich diese unter anderem an der IEC 61000<sup>2</sup> sowie den CISPR 16-1 bzw. CISPR 16-2 Standards<sup>3</sup> [IEC61000]. Sofern für ein bestimmtes Gerät oder System keine speziellen Vorschriften bzw. Grenzwerte existieren, finden die in der IEC 60945 vorgeschriebenen Prüfvorschriften und Grenzwerte Anwendung.

Gemäß der IEC 60945 dürfen die in Tabelle 5.1 bzw. die in Abbildung 8.7 aufgeführten Grenzwerte bei den leitungsgeführten Störungen auf Versorgungs-, Daten- und Kontrollleitungen im Brückenbereich nicht überschritten werden. Für die Abstrahlung des Prüflings in 3 m Abstand zum Gehäuse gelten die in Tabelle 5.2 bzw. die in Abbildung 8.8 aufgeführten Grenzwerte.

Frequenzband	erlaubte leitungsgeführte Emission	
10 bis 150 kHz	63 bis 0,3 mV	96 bis 50 dB $\mu$ V
150 bis 350 kHz	1 bis 0,3 mV	60 bis 50 dB $\mu$ V
350 kHz bis 30 MHz	0,3 mV	50 dB $\mu$ V

Tabelle 5.1: Gemäß IEC 60945 erlaubte leitungsgeführte Emission auf Versorgungs-, Daten- und Kontrollleitungen elektrischer Geräte an Bord von Schiffen (siehe Abbildung 8.7)

Die IEC 60945 bezieht sich mit ihren Grenzwerten über leitungsgeführte sowie von Gehäusen abgestrahlte Störleistung allerdings nur auf Störstrahlung, die nicht im Zusammenhang mit

<sup>1</sup> „Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – General requirements – Methods of testing and required test results“

<sup>2</sup> „Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques“

<sup>3</sup> „Specification for radio disturbances and immunity measuring apparatus and methods“

der Antennenabstrahlung steht. Typische in Frage kommende Quellen sind Schaltnetzteile, Oszillatoren und Mikroprozessoren, wie sie in fast allen elektronischen Geräten zu finden sind. Die erlaubten Abstrahlungen von Funkgeräten über die Antenne sowie insbesondere deren Außerbandemissionen sind von der IEC 60945 nicht betroffen. Sie werden vielmehr durch einzelne, der jeweiligen Applikation zugehörige Normen festgelegt.

Frequenzband	erlaubte elektrische Feldstärken bei Abstrahlung	
150 bis 300 kHz	10 mV/m bis 360 $\mu$ V/m	80 bis 51 dB $\mu$ V/m
300 kHz bis 30 MHz	360 bis 50 $\mu$ V/m	51 bis 34 dB $\mu$ V/m
30 MHz bis 2 GHz	500 $\mu$ V/m	54 dB $\mu$ V/m
außer 156 bis 165 MHz	16 $\mu$ V/m	24 dB $\mu$ V/m

Tabelle 5.2: Gemäß IEC 60945 erlaubte Abstrahlung der Schiffselektronik, gemessen in 3 m Abstand zum Gehäuse. Der Einbruch in den Grenzwerten zwischen 156 MHz und 165 MHz dient der sicheren Radiokommunikation im VHF-Band (siehe Abbildung 8.8).

Die IEC 60945 sieht im Fall vorhandener Radiokommunikationssysteme vor, dass es bei diesen durch Abstrahlung über die Antenne zu höheren Feldstärken kommen kann, als durch die oben aufgeführten Grenzwerte erlaubt ist. Hierin sieht die IEC 60945 aufgrund entsprechend ausgelegter Frequenzbereichszuweisungen sowie nachhaltiger Störabstände keine störende Beeinflussung. Als Konsequenz fordert sie vielmehr, dass Radiokommunikationssysteme wegen ihrer vermutlich oberhalb der Grenzwerte liegenden Emissionen während des Emissionstests im Rahmen der Zulassung des Gesamtsystems nicht über die Antenne abstrahlen dürfen. Im Fall einer Prüfung im Rahmen der IEC 60945 werden die Antennenanschlüsse deswegen ohne Antenne und mit einer der Antenne entsprechenden Last versehen und das System im Zustand mit der höchsten Sendeleistung betrieben.

Nachteilig bei der Untersuchung von 2,4-GHz-Systemen im Hinblick auf die bestehenden Normen und Grenzwerte im Schiffbau ist, dass der Bereich oberhalb von 2 GHz zum derzeitigen Zeitpunkt noch keinen Einzug in die zuständigen Normen gefunden hat. Insbesondere bestehen für Kommunikationssysteme innerhalb des 2,4-GHz-ISM-Bands, wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden, noch keine verbindlichen Aussagen oder Richtwerte für die erlaubten Emissionen. Dies beschränkt eine Bewertung der in dieser Arbeit untersuchten Radiokommunikationssysteme auf grundsätzliche Aussagen in Bezug auf bereits reglementierte Frequenzbereiche. Auch kann, wegen der fehlenden Vorschriften in Bezug auf Störfestigkeit und Abstrahlung, bislang kein 2,4-GHz-Funkübertragungssystem eine Zulassung erhalten.

Auf Anregung des Instituts für Messtechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit der Technischen Universität Hamburg-Harburg und durch die dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsarbeiten, ist eine Berücksichtigung der Frequenzen oberhalb von 2 GHz in den zuständigen Normungsgremien für die IEC 60945 veranlasst worden.

Neben der Abstrahlung sind in der IEC 60945 entsprechend der IEC 61000 auch Störfestigkeitsschwellen gegenüber Störungen und Unterbrechungen auf Versorgungs- und Datenleitungen festgelegt. Zu den wesentlichen Kriterien gehören die in Tabelle 5.3 aufgeführten Tests [IEC61000].

Prüfkriterium	Klasse	Prüfnorm	durchzuführender Test
elektrostatische Entladung	B	IEC 61000-4-2	6 kV direkt, 8 kV Luft
Hochfrequenzeinstrahlung	A	IEC 61000-4-3	10 V/m 80 MHz bis 2 GHz, 80 % AM, 1 kHz
Transienten	B	IEC 61000-4-4	2 kV
Stromstoß	B	IEC 61000-4-5	0,5 kV zwischen Leitern, 1 kV zur Erde
leitungsgeführte Hochfrequenzstörungen	A	IEC 61000-4-6	3 Vrms kapazitiv gekoppelt, 150 kHz bis 80 MHz, 80 % AM, 1 kHz
Versorgungsschwankung	A	IEC 61000-4-11	Schwankung der Versorgungsspannung um +20 % / -25 %
Stromausfall	C	IEC 61000-4-11	60 s Ausfall
leitungsgeführte Niederfrequenzstörungen	A	IEC 61000-4-16	Interferenz, 10 % der Versorgungsspannung, 50 Hz bis 10 kHz

Tabelle 5.3: EMV Prüfvorschriften gemäß IEC 61000 zur Störfestigkeitsuntersuchung elektrischer Geräte. Entsprechend der Prüfklasse wird dabei zwischen drei unterschiedlichen Störbeeinflussungen unterschieden.

Bezüglich der möglichen Störbeeinflussung wird dabei zwischen drei Klassen unterschieden, in denen der Prüfling

- (A) während der Störbeaufschlagung die volle Funktionsfähigkeit besitzen muss,
- (B) nach Beendigung der Störung unmittelbar wie vorgesehen arbeiten muss,
- (C) nach Beendigung der Störung zumindest selbstständig in gegebener Zeit in den vorgesehenen Zustand zurückkehrt.

Kriterium „B“ besagt demnach, dass, z.B. bei Störung der Funkverbindung, die Funktionalität eingeschränkt sein darf, die Datenübertragung unter Umständen also unterbrochen wird. Allerdings muss die Datenübertragung nach Wegfall der Störung unmittelbar fortgeführt werden. Kriterium „C“ betrifft zum Beispiel das Paarungsverhalten von Funksendern und besagt, dass die Module sich nach einer Unterbrechung der Versorgungsspannung selbstständig neu paaren und die Verbindung damit automatisch wiederaufnehmen müssen.

Neben den Prüfvorschriften für die EMV sind in der EN 60945 weitere Tests vorgegeben, unter anderem bezüglich der Umweltbedingungen, wie Temperatur- und Luftfeuchtigkeit, Korrosionsbeanspruchung, der mechanischen Beanspruchung sowie dem Staub- und Wasserschutz. Bei der Integration drahtloser Datenübertrager in Schiffselektronik ist jedoch davon auszugehen, dass die Module weniger als eigenständiger Kabelersatz, als vielmehr als integrierter Teil eines Geräts oder Systems eingesetzt werden, weswegen nicht alle diese Tests Anwendung finden. Sofern das Funkübertragungsmodul nicht eigenständig, sondern als Baugruppe innerhalb eines Geräts betrieben wird, ist es durch den übergeordneten Rahmen z.B. gegen ESD<sup>1</sup> sowie Einstrahlung, aber oftmals auch gegen leitungsgeführte Störungen geschützt. Somit finden bei USB- oder PCMCIA-Modulen die Prüfvorschriften bezüglich Versorgungsschwankungen, leitungsgeführter Störungen, Transienten, Stromstoß und ESD keine Anwendung, da die Module bei entsprechender Immunität des übergeordneten PCs durch diesen geschützt werden. Die gleichen Überlegungen gelten auch für vom Modul abgehende leitungsgeführte Störungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher die Punkte Hochfrequenzeinstrahlung, Abstrahlung sowie Stromausfall betrachtet, da diese Punkte nicht durch übergeordnete Systeme abgefangen werden.

#### 5.1.2. Prüfkriterien seitens Bluetooth

Gemäß dem *Bluetooth Specification Book* sind bestimmte Mindestanforderungen an Bluetoothprodukte festgeschrieben [Bluetooth]. Diese Anforderungen beziehen sich jedoch lediglich auf den Hochfrequenzteil des Bluetoothchipsatzes und nicht auf das fertige Endprodukt. Die Festlegung der zulässigen Störpegel und der erlaubten Emissionen erfolgt leitungsgeführt, bezogen auf die Pegel am Antenneneingang (Tabelle 5.4). Sollte das Modul über keinen Antenneneingang verfügen, so ist das Modul als eine Antenne mit einem Gewinn von 0 dBi anzunehmen, also als ein ideal isotroper Strahler.

Frequenzband	Emission bei Datenübertragung	Emission im Ruhezustand
0,030 bis 1 GHz	-36 dBm	-57 dBm
1 bis 12,75 GHz	-30 dBm	-47 dBm
1,8 bis 1,9 GHz	-47 dBm	-47 dBm
5,15 bis 5,3 GHz	-47 dBm	-47 dBm

Tabelle 5.4: Gemäß Bluetoothspezifikation erlaubte Außerbandemissionen im Ruhezustand sowie bei aktiver Datenübertragung in dBm [Bluetooth]

<sup>1</sup> ESD: Electrostatic Discharge

Die Definition über den isotropen Strahler erlaubt eine Umrechnung der eingekoppelten bzw. abgestrahlten Feldstärken. Es ergeben sich für die Abstrahlung der Antenne in 3 m Abstand gemäß Gleichung 4.49 und Gleichung 4.50 die in Tabelle 5.5 aufgeführten Feldstärken.

Da es sich hierbei um über die Antenne abgestrahlte Leistung handelt, hat die IEC 60945-Norm, wie bereits erwähnt, keine Gültigkeit. Da die Grenzwerte für die Emission von Funksystemen auf jeden Fall mindestens so hoch wie Grenzwerte von nicht sendenden Geräten bzw. sogar deutlich über diesen liegen, lassen sich trotzdem einige abschätzende Aussagen treffen.

Frequenzband	Emission bei Datenübertragung	Emission im Ruhezustand
0,03 bis 1 GHz	62 dB $\mu$ V/m	41 dB $\mu$ V/m
1 bis 12,75 GHz	68 dB $\mu$ V/m	51 dB $\mu$ V/m
1,8 bis 1,9 GHz	51 dB $\mu$ V/m	51 dB $\mu$ V/m
5,15 bis 5,3 GHz	51 dB $\mu$ V/m	51 dB $\mu$ V/m

Tabelle 5.5: Gemäß Tabelle 5.4 erlaubte elektrische Feldstärken von Außerbandemissionen von Bluetoothmodulen im Ruhezustand sowie bei aktiver Datenübertragung, umgerechnet in dB $\mu$ V/m in einem Abstand von 3 m zur Quelle

Im Vergleich zwischen den Werten aus Tabelle 5.5 und den Grenzwerten aus Tabelle 5.2 lässt sich feststellen, dass die entsprechend dem Bluetoothstandard im Sendefall erlaubten 62 dB $\mu$ V/m bzw. 68 dB $\mu$ V/m oberhalb der durch die IEC 60945 geforderten 54 dB $\mu$ V/m liegen. Dieser geringe Unterschied ließe sich innerhalb des durch die IEC 60945 abgedeckten Bereichs bereits mit einem einfachen Hochpassfilter bei 2 GHz auf das erlaubte Maß eingrenzen. Im Ruhezustand erfüllen die erlaubten Emissionen sogar bereits über einen weiten Frequenzbereich die geforderten Grenzwerte. Es ist somit nicht von einem Konflikt zwischen den Emissionen und zukünftig geforderten Grenzwerten sowie von Störungen auszugehen.

Messungen an den verwendeten Funkübertragungsmodulen im Frequenzbereich ab 200 MHz und in einem Abstand von lediglich einem Meter ergaben sogar mit angeschlossenen Antennen und ohne abschirmende Gehäuse keine nennenswerten Feldstärken im Bereich unterhalb von 1 GHz (Abbildung 5.1). Im Bereich zwischen 1 GHz und 2 GHz war im Rahmen der Messgenauigkeit keine Emission festzustellen. Insbesondere war auch innerhalb des Bereichs zwischen 156 und 165 MHz keine Emission der untersuchten Module zu erkennen. Normgerechte Messungen der Feldstärken im Bereich unterhalb von 200 MHz waren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Nguyen et al. zeigen bei vergleichbaren Messungen der Außerbandemissionen an Bluetooth- und WLAN-Systemen in für die Luftfahrt wichtigen Frequenzbändern, dass keine Beeinträchtigungen wichtiger Funkdienste zu erwarten sind [Nguyen04].

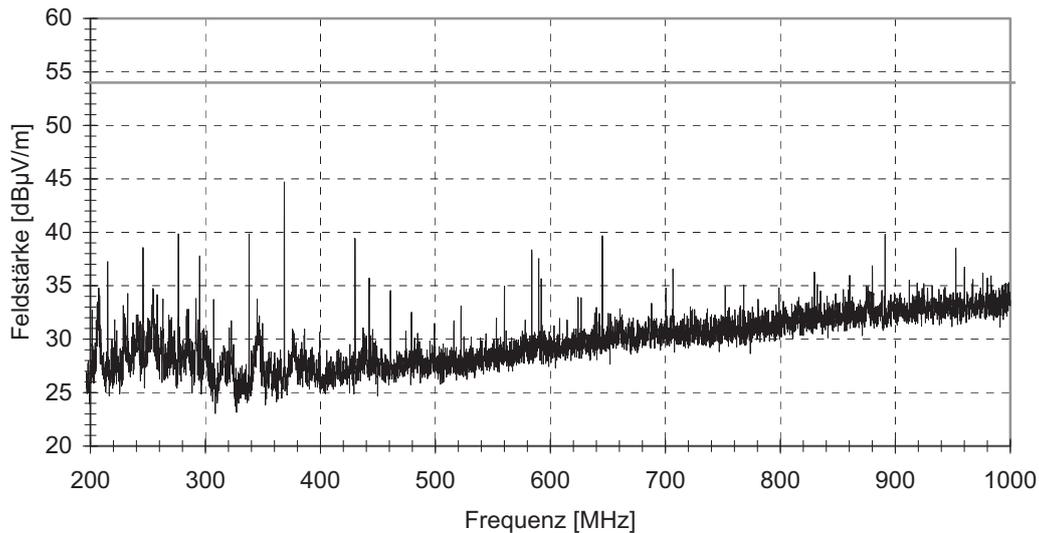


Abbildung 5.1: Messung der feldgeführten Emission von Bluetoothmodulen. Für die Messung wurden unterschiedliche Module mit angeschlossenen Antennen in einer Entfernung von ca. 1 Meter vermessen. Die graue Linie entspricht dem geforderten Grenzwert von 54 dB $\mu$ V/m.

## 5.2. Das elektromagnetische Umfeld auf Schiffen

Um einen störungslosen Betrieb von Funkübertragern an Bord von Schiffen sicherzustellen ist es notwendig, die an Bord vorherrschenden Funkdienste zu ermitteln und mögliche störende Auswirkungen der vorliegenden Hintergrundstrahlung auf die Funkübertragungsmodule zu untersuchen. Diese können sowohl durch In- als auch durch Außerbandsender hervorgerufen werden. Bei der Ermittlung der vorliegenden Strahlung ist dabei sowohl das zeitliche Sendeverhalten als auch die Stärke der Strahlung von Bedeutung.

### 5.2.1. Messung der elektromagnetischen Strahlung auf Schiffen

An Bord von Schiffen befindet sich eine hohe Anzahl unterschiedlicher Funkdienste, die in dieser räumlichen Dichte kaum an anderen Orten anzutreffen sind. So sind in Tabelle 5.6 und Tabelle 5.7 die wichtigsten an Bord von Schiffen befindlichen maritimen und zivilen Funkdienste aufgeführt. Eine Gliederung der erwähnten Frequenzbereiche findet sich im Anhang in Tabelle 8.2 und Tabelle 8.3.

Über die angeführten Dienste hinaus können viele weitere Funkdienste Anwendung finden. Aus diesem Grund ist bei der Ermittlung der charakteristischen Grundstrahlung eine besonders detaillierte messtechnische Erfassung aller im möglichen Anwendungsbereich von drahtlosen Datenübertragern vorhandenen Quellen elektromagnetischer Strahlung nötig.

Funkdienst	Frequenzband	Empfindlichkeit	Sendeleistung
LORAN <sup>1</sup>	90 bis 110 kHz	20 $\mu\text{V}/\text{m}$	nur Empfang
DGPS <sup>2</sup>	283,5 bis 315 kHz	5 $\mu\text{V}/\text{m}$	nur Empfang
MW Radiotelegrafie	415 bis 535 kHz	50 $\mu\text{V}/\text{m}$	150 W
MW Radiotelefonie	1605 bis 3800 kHz	25 $\mu\text{V}/\text{m}$	400 W
KW Radiotelegrafie	4 bis 27,5 MHz	25 $\mu\text{V}/\text{m}$	1500 W
UKW Radiotelefonie	156 bis 165 MHz	2 $\mu\text{V}$	25 W
AIS <sup>3</sup>	161,975 und 162,025 MHz	2 $\mu\text{V}$	12,5 W
COSPAS-SARTSAT <sup>4</sup>	406,025 MHz	nur Senden	5 W
Inmarsat <sup>5</sup>	1525 bis 1544 MHz	0,03 $\mu\text{V}$	nur Empfang
GPS	1575,42 $\pm$ 1,023 MHz	0,07 $\mu\text{V}$	nur Empfang
GLONASS <sup>6</sup>	1602 bis 1615 MHz	0,07 $\mu\text{V}$	nur Empfang
Inmarsat	1626,5 bis 1646,5 MHz	nur Senden	25 W
S-Band-Radar	2,9 bis 3,1 GHz	1,4 $\mu\text{V}$	25 kW
X-Band-Radar	9,3 bis 9,5 GHz	1,4 $\mu\text{V}$	25 kW

Tabelle 5.6: Typische maritime Funkdienste an Bord von Schiffen [IEC 60945]

Kategorie	Funkdienst	Frequenzband	Sendeleistung
Mobiltelefonie	DECT	1880 bis 1900 MHz	250 mW
	GSM 900	880 bis 960 MHz	2000 mW
	GSM 1800	1710 bis 1880 MHz	1000 mW
	GSM 1900	1850 bis 1990 MHz	1000 mW
	UMTS	1900 bis 2170 MHz	250 mW
Betriebsfunk		410 bis 470 MHz	
Rundfunk	UKW	87,5 bis 108 MHz	nur Empfang
	$\mu\text{W}$	471 bis 860 MHz	nur Empfang

Tabelle 5.7: Typische zivile Funkdienste an Bord von Schiffen

Zur Charakterisierung der an Bord von Schiffen vorhandenen Hintergrundstrahlung wurden auf unterschiedlichen Kreuzfahrt-, Fähr-, Marine- und Frachtschiffen an ca. 25 verschiedenen Messpunkten über den gesamten Messbereich verteilte Spektren der elektromagnetischen Strahlung aufgenommen (Abbildung 5.2) [Schoof04a]. Die Liste aller Schiffe, auf denen Messungen der Spektren vorgenommen wurden, findet sich im Anhang in Tabelle 8.1. Dabei

<sup>1</sup> LORAN: Long Range Navigation, Funknavigationssystem in der See- und Luftfahrt

<sup>2</sup> DGPS: Differential Global Positioning System, Korrekturdaten zur Erhöhung der GPS-Genauigkeit

<sup>3</sup> AIS: Automatic Identification System, System zur automatischen Übertragung wichtiger Schiffsdaten

<sup>4</sup> satellitengestütztes Such- und Rettungssystem zur Erfassung und Lokalisierung von Notfunkbaken

<sup>5</sup> Inmarsat: International Maritime Satellite, Satellitenkommunikationssystem

<sup>6</sup> russisches Satellitennavigationssystem, ähnlich dem amerikanischen GPS

wurden neben der Brücke die wichtigsten weiteren Anwendungsbereiche, wie Elektronikräume und Maschinenräume, untersucht. Die Aufnahme der Spektren erfolgte richtungs- und polarisationsabhängig. Um auch sporadisch sendende Quellen zu erfassen, wurden im Max-Hold-Modus Leistungsmessungen durchgeführt.

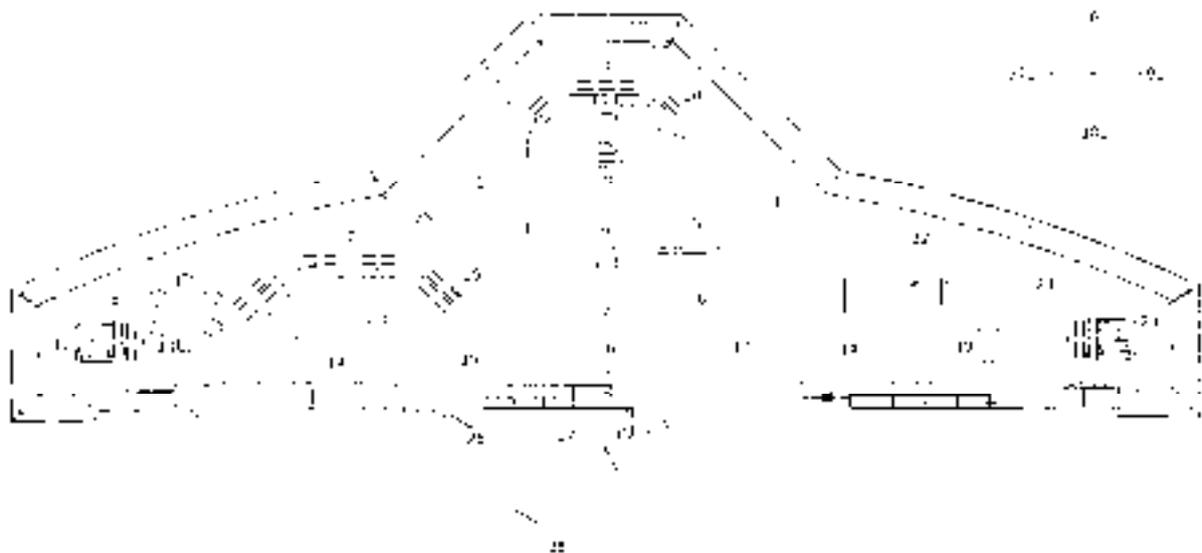


Abbildung 5.2: Messpunkte (eingetragene Nummern) während einer Messkampagne auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffs. Grundriss: Meyer Werft [MeyerWerft]

Ein großes Problem bei den Messungen der vorhandenen elektromagnetischen Strahlung stellt der breite Frequenzbereich aller auf dem Schiff befindlichen sowie von außerhalb einstrahlenden Quellen dar. So liegen zwischen den niederfrequenten Sendern für die Radiokommunikation im MHz-Bereich und den X-Band-Radaranlagen bei 9 GHz fast vier Größenordnungen. Dementsprechend wurden bei den durchgeführten Messungen möglichst breitbandige Messantennen verwendet. Um auch kleine Signale zuverlässig erfassen zu können, ist bei den verwendeten Antennen sowie dem verwendeten Messempfänger weiterhin eine ausreichende Empfindlichkeit gefordert.

Im Bereich oberhalb von 100 MHz bieten sich für derartige Messungen logarithmisch-periodische (LogPer) Antennen an, die je nach Größe den Faktor 20 im Frequenzbereich überdecken können. Wegen der geforderten Empfindlichkeit in Verbindung mit dem Spektrumanalysator besitzen sie außerdem einen ausreichend kleinen Antennenfaktor. Die in den Messungen verwendeten LogPer-Antennen besitzen einen Messbereich zwischen 300 MHz und 2.200 MHz bzw. zwischen 700 MHz und 18 GHz. Gleichzeitig lassen sich durch die Richtwirkung dieser Antennenform sowohl richtungs- als auch polarisationsaufgelöste Messungen durchführen. Für einen Messeinsatz in engen Räumen ist eine niederfrequente LogPer-Antenne mit einem Frequenzbereich ab 300 MHz in ihren Abmessungen bereits sehr unhandlich. Soll eine Messung bei noch tieferen Frequenzen erfolgen, werden logarithmisch-periodische Antennen für einen Feldeinsatz zu groß. In diesem Bereich kommen Doppelko-

nusantennen bzw. bikonische Antennen zum Einsatz (Abbildung 5.3). Diese weisen im UKW-Bereich einen ausreichend kleinen Antennenfaktor auf.



Abbildung 5.3: Mobile Messaufbauten zur Untersuchung der elektromagnetischen Strahlung auf Schiffen. Links: bikonische Antenne für niedrige Frequenzen zwischen 30 MHz und 300 MHz, rechts: logarithmisch-periodische Antenne für hohe Frequenzen zwischen 700 MHz und 18 GHz

Für Messungen außerhalb des Nennfrequenzbereichs der Antenne waren Kalibriermessungen an einem Antennenmessplatz erforderlich. Bei Bedarf fanden anschließend weiterführende Untersuchungen mit zusätzlichen Antennen statt. Die gültigen Messbereiche sind in den Abbildungen entsprechend ausgewiesen.

Ein weiteres Problem bei der Feldstärkenmessung bei tiefen Frequenzen besteht darin, dass im Frequenzbereich unterhalb von 300 MHz oftmals im Übergang zwischen Nah- und Fernfeld gearbeitet wird. Die Messergebnisse werden in diesem Bereich abhängig von der Messumgebung. Da insbesondere Schiffe mit ihrer ausgeprägten metallischen Struktur und den nur gering dämpfenden Wänden eine eher ungünstige Umgebung für niederfrequente Messungen darstellen, sind die gemessenen Amplituden in diesem Frequenzbereich mit einer mittleren Unsicherheit behaftet.

Ein genaues, breitbandiges Messen der auftretenden Feldstärken bei noch geringeren Frequenzen, also unterhalb von 30 MHz, ist wegen der großen Wellenlängen sowie der speziellen Struktur der Schiffe nicht sinnvoll. Insbesondere sind die hier benötigten Antennengrößen und -formen nicht für einen Feldeinsatz geeignet. Ein möglicher Kompromiss besteht bei

Bedarf darin, mit einer lediglich für einen höheren Frequenzbereich ausgelegten Antenne die im niederfrequenten Bereich vorkommenden Frequenzen zu sichten und diese dann schmalbandig mit angepassten Antennen einzeln zu vermessen. Da bei den Messungen keine ausgeprägt starken Quellen im niederfrequenten Bereich beobachtet wurden (Abbildung 5.4), konnte wegen des großen Abstands zum ISM-Band auf dieses Verfahren verzichtet werden.

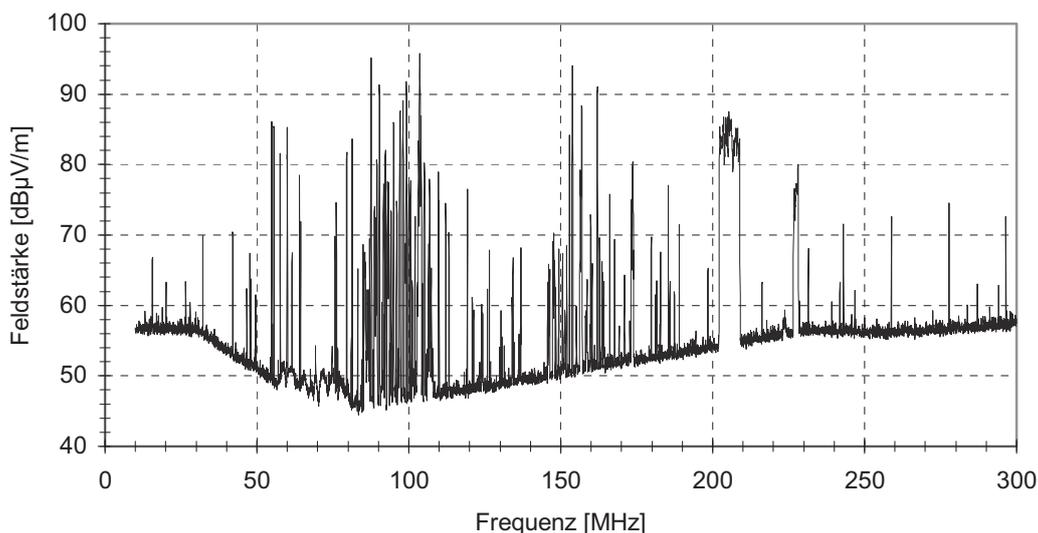


Abbildung 5.4: Feldstärke im niederfrequenten Bereich zwischen 30 und 300 MHz auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffs. In diesem Frequenzbereich befinden sich hauptsächlich Radiokommunikationsdienste.

Der in dieser Arbeit verwendete Spektrumanalysator besitzt ein Grundrauschen von ca.  $-74$  dBm im Bereich bis 3 GHz und von  $-70$  dBm im Bereich oberhalb von 3 GHz, gemessen mit einer Bandbreite von 1 MHz bei einer internen Eingangsdämpfung von 10 dB. Zwar lässt sich das Grundrauschen durch Verringerung der Messbandbreite bzw. der Eingangsdämpfung weiter verringern, dieses würde aufgrund des breiten betrachteten Frequenzbereichs jedoch zu unzulässig langen Messzeiten bzw. aufgrund der hohen vorliegenden Feldstärken zu einer möglichen Übersteuerung bzw. sogar Beschädigung des Eingangsmischers führen. Mit einem Antennenfaktor von ca. 32 dB/m bei 2,4 GHz, wie im Fall der verwendeten 0,7-18 GHz LogPer-Antenne, liegt die minimal detektierbare Feldstärke unter Berücksichtigung der Dämpfung eines Messkabels bei dieser Frequenz z.B. bei ca.  $65$  dB $\mu$ V/m.

Wichtig bei den Feldstärkenmessungen ist, dass nach Möglichkeit alle vorhandenen aktiven Quellen, z.B. Betriebsfunk, Satellitenfunk und Radar, erfasst werden. Besonders bei Werftmessungen ist deshalb darauf zu achten, dass die verschiedenen, auf der Brücke befindlichen Systeme, insbesondere Kommunikationssysteme sowie die Radaranlagen, eingeschaltet sind. Um auch die zeitlich nur selten genutzten Kommunikationseinrichtungen zu erfassen, wurden während der Messungen Gespräche über die an Bord befindlichen Funkdienste, wie Satellintelefone, Bord-Mobiltelefone oder auch über die Funkanlagen geführt. Durch Langzeitmessungen mit Messzeiten von über einer Stunde an unterschiedlichen Stellen wurde zudem

sichergestellt, dass auch kurze oder selten auftretende Signale detektiert wurden. Ein weiterer wichtiger Punkt bei diesen Messungen war es festzustellen, inwiefern bereits eine Belegung des ISM-Bands vorliegt, da hieraus eine mögliche Konkurrenz für nachträglich hinzukommende Funkübertragungssysteme entstehen könnte.

Abbildung 5.5 zeigt das Ergebnis einer typischen Langzeitmessung auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffs. Die Umrechnung von  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  in  $\text{V}/\text{m}$  erfolgt gemäß Abbildung 8.6. Die während der Messungen auf Schiffen erfassten Radioquellen befanden sich fast ausschließlich im Bereich bis 3,5 GHz. In den darüber liegenden Frequenzbereichen wurden während der Messungen lediglich im X-Band arbeitende Radarsysteme registriert (Abbildung 5.6).

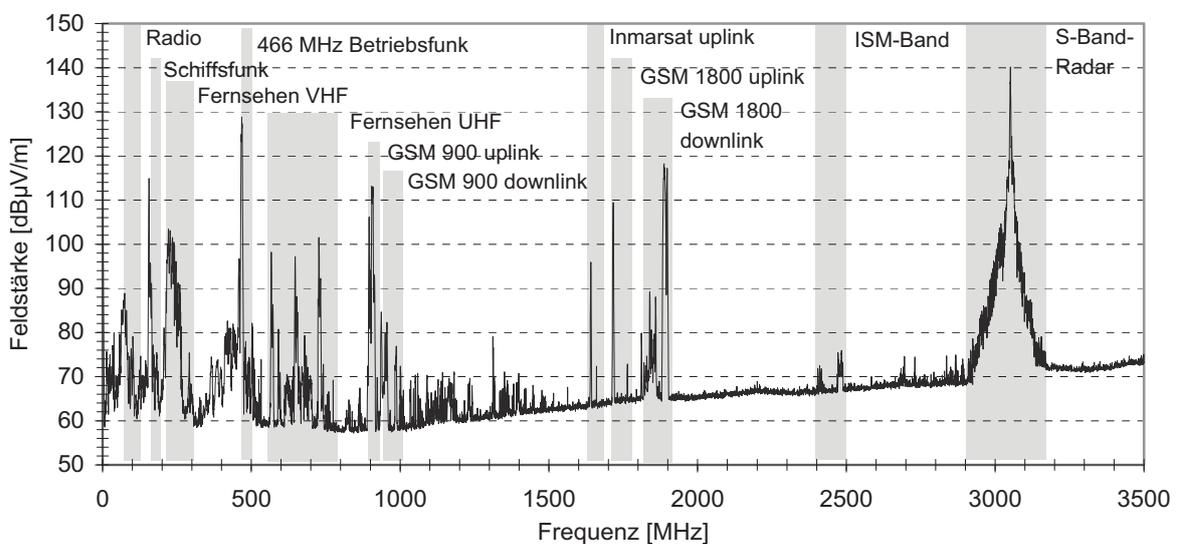


Abbildung 5.5: Spektrum einer Langzeitmessung auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffs im Bereich 700 bis 3.500 MHz. Die wichtigsten maritimen (Tabelle 5.6) und zivilen (Tabelle 5.7) Funkdienste sind unterlegt und gekennzeichnet.

Als größte Strahlungsquelle konnte bei den Messungen das S-Band-Bugradar (3 GHz) identifiziert werden. Dieses erzeugt auf der deutlich außerhalb der Hauptstrahlungsrichtung liegenden Brücke, trotz seiner horizontalen Richtwirkung und einer aktiven Ausblendung der Hauptkeule, über den Schiffsbereich Feldstärken mit bis zu 20  $\text{V}/\text{m}$ .

Als weitere Strahlungsquellen liegen der Betriebsfunk (Funkgeräte etc.) mit bis zu 5  $\text{V}/\text{m}$ , die Mobilfunknetze mit bis zu 1  $\text{V}/\text{m}$  sowie zeitweilig Satellitenkommunikation oder Seefunk mit bis zu 1  $\text{V}/\text{m}$  bzw. 5  $\text{V}/\text{m}$  vor, deren Quellen sich in der Regel direkt innerhalb der Brücke oder der angrenzenden Elektronikräume befinden. Da diese jedoch von der Frequenz her deutlich entfernt vom ISM-Bereich sind und weit geringere Feldstärken als die des Radars verursachen, ist das Bugradar als Haupt-Außerbandstörer anzusehen.

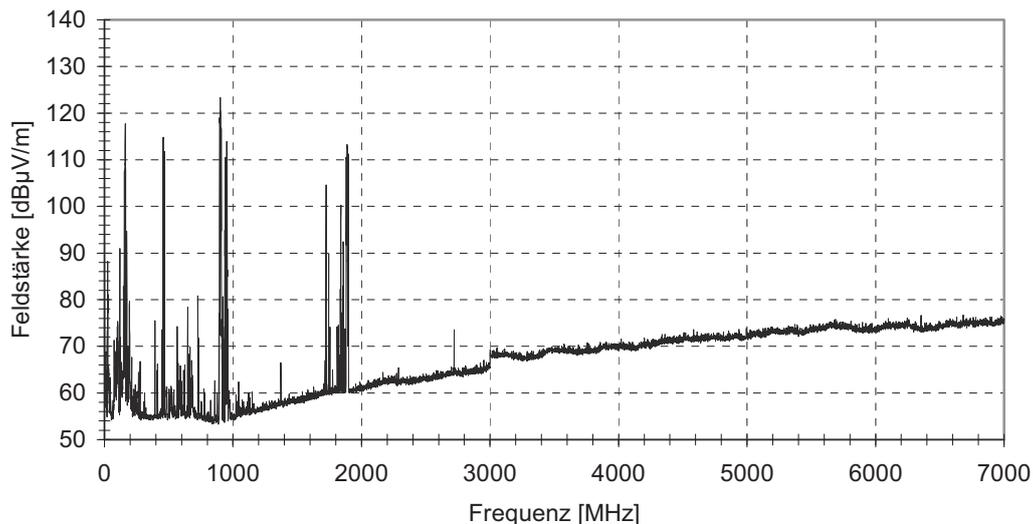


Abbildung 5.6: Langzeitspektrum auf einem Fährschiff im Bereich von 700 MHz bis 7 GHz. Oberhalb der zivilen Dienste bis 2 GHz sind bei abgeschaltetem Radar keine Quellen erkennbar.

Bei den übrigen Radiosignalen mit Feldstärken von unter  $0,1 \text{ V/m}$  handelt es sich um zivile Hintergrundstrahlung, die stark von der geografischen Position des Schiffs abhängt und durch UKW-Funkdienste, Fernsehsender und landgestützte Mobilfunkdienste dominiert wird. Hier ist mit zunehmender Entfernung zur Küste eine deutliche Abnahme der Feldstärken zu beobachten (Abbildung 5.7).

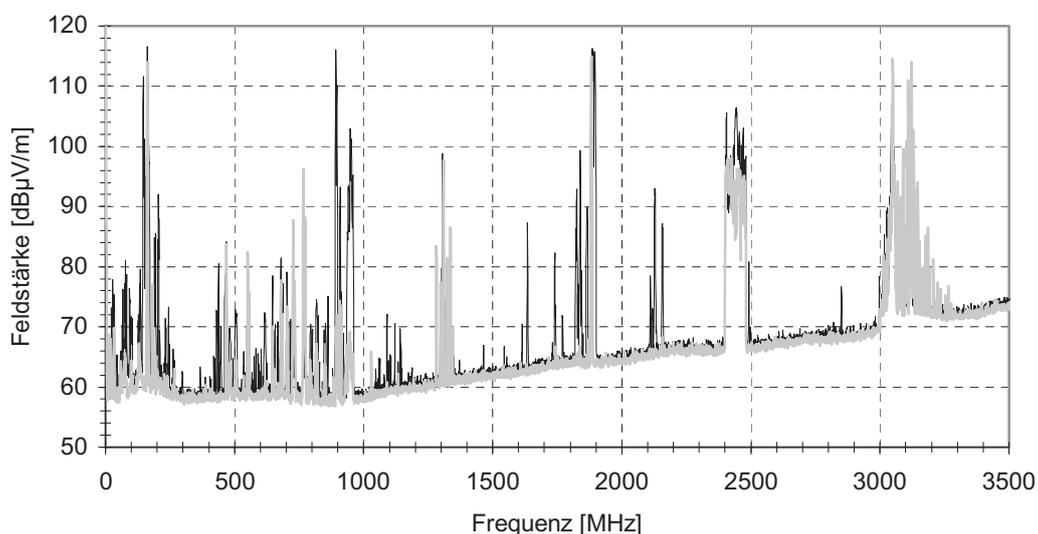


Abbildung 5.7: Vergleich der Feldstärken im Bereich 700 bis 3.500 MHz auf der Brücke eines Fährschiffs im Hafen von Trelleborg (schwarze Kurve) sowie auf See (graue Kurve). Deutlich erkennbar sind eine Abnahme der Feldstärken der meisten zivil genutzten Frequenzen bei zunehmender Entfernung zum Hafen sowie die stärkere Radaraktivität auf See.

Bei den Untersuchungen auf mögliche Inbandstörer wurden während der gesamten Messungen, außer den selbst verursachten Funksignalen, lediglich einige wenige kurzzeitige Signale

innerhalb des ISM-Bands festgestellt. Da viele der heutigen Geräte eine interne Bluetooth- oder WLAN-Schnittstelle besitzen, konnte der Ursprung dieser Signale aufgrund des während der Werftmessungen hohen Personenverkehrs auf der Brücke nicht geklärt werden. Die Untersuchungen ergaben, dass mit nennenswerten Inbandstörungen von Systemen und Geräten mit Modulen zur Funkübertragung im 2,4-GHz-ISM-Band somit nicht zu rechnen ist.

Bezüglich der räumlichen Feldverteilung lässt sich für alle Frequenzen, eine direkte Nähe zum Sender wie beispielsweise zum Funkstand ausgeschlossen, nahezu eine Gleichverteilung feststellen. In der Nähe z.B. der zur Satellitenkommunikationsanlage gehörenden Komponenten kommt es jedoch zu erhöhten Feldstärkewerten bei den jeweiligen Betriebsfrequenzen. Eine große Positionsabhängigkeit der Radarfeldstärke entsteht durch die mitunter innenbeheizten Hauptscheiben der Brückenverglasung sowie die metallbedampften Sonnenschutzrollos, die eine Dämpfung von ca. 10 dB hervorrufen können (Abbildung 5.8).

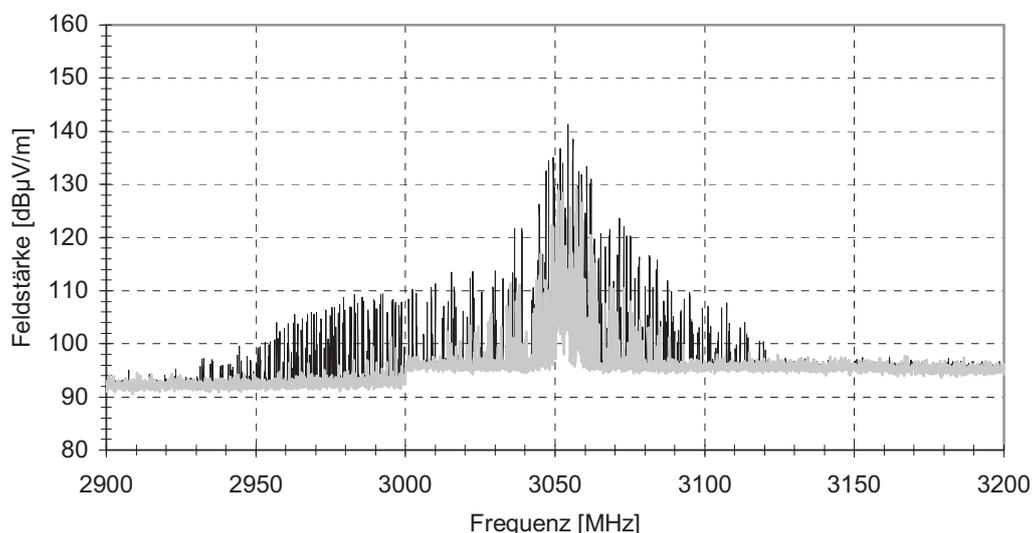


Abbildung 5.8: Vergleich der Feldstärken eines S-Band-Radars auf der Brücke hinter konventionellen Scheiben (schwarze Kurve) und innenbeheizten Scheiben (graue Kurve). Der Unterschied beträgt, wie auch beim Sonnenschutzrollo, ca. 10 dB.

Es konnten, abgesehen vom stark horizontal polarisierten und aus Bugrichtung einstrahlenden Bugradar sowie den auf der Brücke befindlichen vertikal polarisierten Mobilfunkantennen, weder deutliche Vorzugsrichtungen noch Vorzugspolarisationen der auftretenden Strahlung festgestellt werden (Abbildung 5.9). Zur Kommunikation mit X-Band-Seezeichen ist das X-Band-Radarsignal horizontal polarisiert<sup>1</sup>. Üblicherweise werden auch S-Band-Systeme mit dieser Polarisation hergestellt. Mobilfunksignale sind wegen der typischen vertikalen Orientierung von Mobiltelefonen beim Telefonieren und der damit verbundenen vertikalen Ausrichtung der Antenne vorwiegend vertikal polarisiert.

<sup>1</sup> Bei Empfang eines horizontal polarisierten X-Band-Radarpulses senden entsprechende Seezeichen, z.B. Funkbojen oder Leuchttürme, ihre Morse-codierte Identifikationsbake (RaCon: Radar Beacon) auf der Radarfrequenz zurück. Diese erscheint dadurch als Morse-Code auf dem Radarschirm.

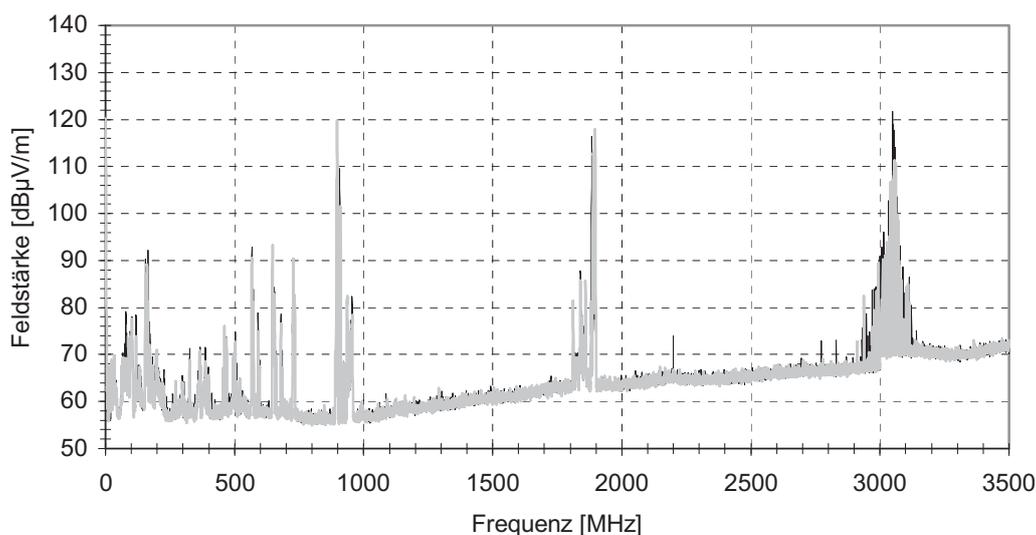


Abbildung 5.9: Vergleich zwischen der horizontalen (schwarze Kurve) und vertikalen Polarisation (graue Kurve) der in einer Brücke auftretenden Feldstärken. Wegen der reflektierenden Wände ist außer bei den Frequenzen für Mobilfunk und beim Bugradar keine Vorzugspolarisation festzustellen.

Im Bereich der an die Brücke angrenzenden bzw. neben der Brücke befindlichen Elektronikräume waren bei geschlossenen Türen allenfalls mittlere Feldstärkenwerte für das Bugradar von bis zu 1 V/m und für die Mobilfunk- bzw. Satellitenkommunikationsnetze von bis zu 0,5 V/m feststellbar. Diese nahmen mit zunehmender Entfernung des Raumes von der Brücke weiter um ein bis zwei Größenordnungen ab (Abbildung 5.10).

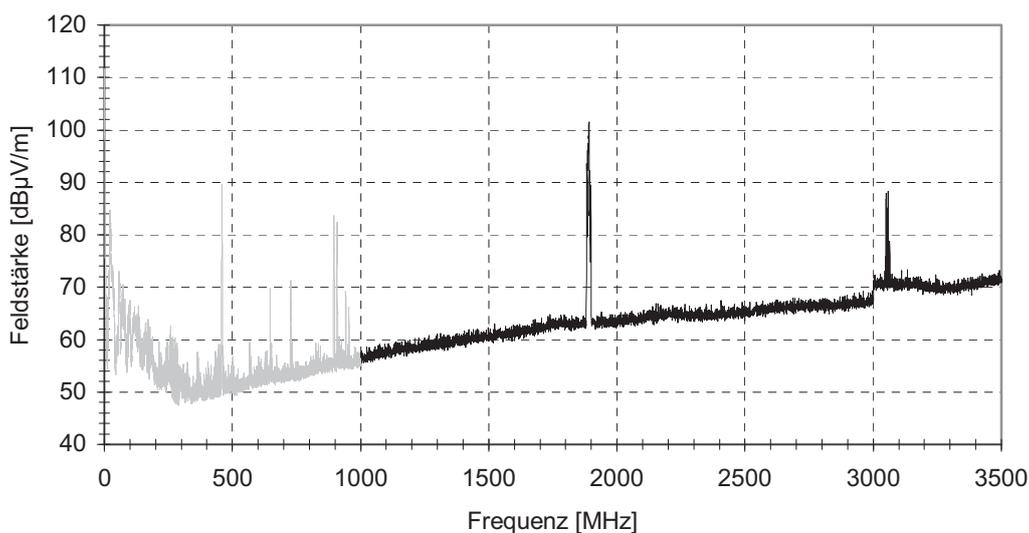


Abbildung 5.10: Messung der elektrischen Feldstärke im hinter der Brücke liegenden Elektronikraum eines Kreuzfahrtschiffs mit zwei LogPer-Antennen, grau: Messung im Bereich 250 bis 1.000 MHz, schwarz: Messung im Bereich 700 bis 3.500 MHz

Die übrigen Frequenzen waren bereits direkt neben der Brücke sehr stark gedämpft, was auf die im Schiffbau üblicherweise verwendeten Stahlwände oder zumindest auf die mit metallbedampften Feuer- und Wärmeisolationen ausgestatteten Rauntrennwände zurückzuführen ist. Die Einkopplung erfolgt hier hauptsächlich durch kabelgeführte Signale sowie durch Türschlitze und Kabeldurchführungen.

Dies zeigen auch Messungen in den Maschinenräumen, wie den Generatorräumen, den Antriebsräumen sowie den Umrichterräumen. Hier waren außer den Frequenzen für die Mobilkommunikation lediglich mittlere Feldstärken im Bereich unterhalb von 1 GHz, verursacht durch die elektrischen Anlagen, messbar (Abbildung 5.11).

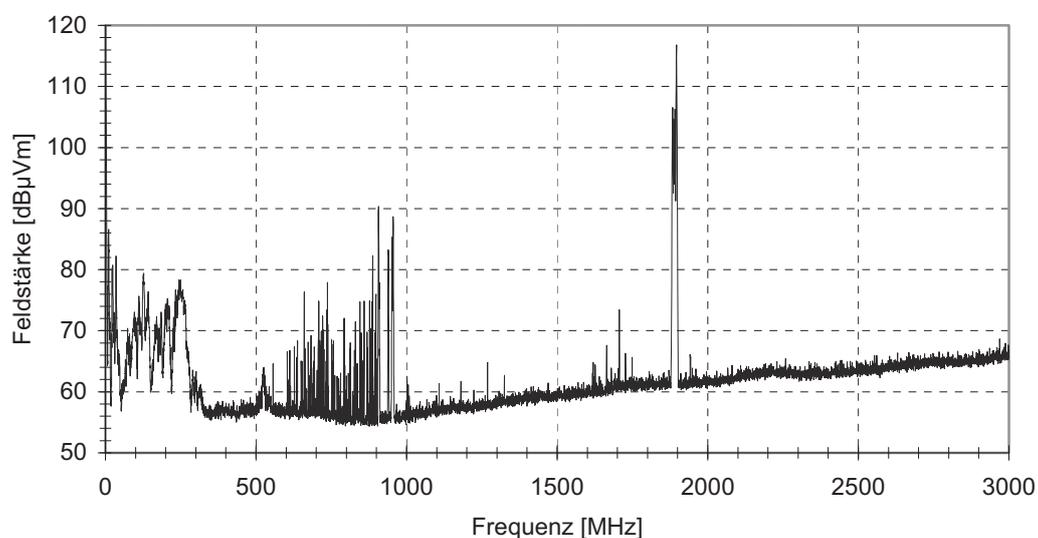


Abbildung 5.11: Messung der Feldstärken im Maschinenraum eines Kreuzfahrtschiffs. Neben den Frequenzen für den Mobilfunk sind hier lediglich breitbandige Emissionen geringer Feldstärke, verursacht durch die Maschinenanlagen, im Bereich unterhalb 1 GHz vorhanden.

### 5.2.2. Radaranlagen

Da sich bei den Messungen der elektromagnetischen Strahlung auf Schiffsbrücken die Radaranlagen der Schiffe als bei weitem stärkste Strahlungsquellen herausstellten, wurden weiterführende Messungen über die Emission speziell von Radaranlagen durchgeführt.

Die typischen Betriebsmodi einer Radaranlage sind 1  $\mu$ s Pulslänge bei einer Pulsfrequenz von 500 Hz im Weitbereichsmodus sowie 80 ns Pulslänge bei einer Pulsfrequenz von 2 kHz im Nahbereichsmodus. Die Pulsleistung liegt zwischen 10 und 30 kW bei einer Umdrehungszeit der Radarantenne von ca. 1 bis 2,5 s (Abbildung 5.12). Für den Fall einer langsam drehenden S-Band-Antenne (26 Umdrehungen/min) im Nahbereichsmodus (1.000 Pulse/s) ergibt sich, bei einem horizontalen Öffnungswinkel von 1,5°, dass ein Objekt 25 Mal pro Umdrehung von einem in der Hauptkeule liegenden Puls getroffen wird. Diese Überlegungen zeigen, dass dem Radar eine hohe Bedeutung im Fall der Störfestigkeitsuntersuchungen zukommt.

Antenna rotation 23/28 rpm										
Range [NM]	0.25***	0.50	0.75	1.5	3	6	12	24	48	96
<b>Short Pulse</b>	0.08		0.15		0.30	0.50	0.90*/1.0**			
Pulse length [µs]	2000		1000		500					
PRF [Hz]	0.15		0.30		0.50	0.90*/1.0**				
<b>Long Pulse</b>	1000		500							
Pulse length [µs]	0.15		0.30		0.50					
PRF [Hz]	1000		500							
Antenna rotation 46/56 rpm										
Range [NM]	0.25***	0.50	0.75	1.5	3	6	12	24	48	96
<b>Short Pulse</b>	0.08		0.15		0.30	0.50				
Pulse length [µs]	2000		1000							
PRF [Hz]	0.15		0.30		0.50					
<b>Long Pulse</b>	1000		500							
Pulse length [µs]	1000		500							
PRF [Hz]	1000		500							

\* 12.5 kW X-Band Transceiver  
 \*\* 25 kW X-Band and 30 kW S-Band Transceiver  
 \*\*\*the given figures are also valid for 250 and 500 m range

Abbildung 5.12: Betriebsmodi einer Radaranlage. Die Reichweite des Radars ist, entsprechend der Pulslaufzeit zum abgetasteten Objekt und zurück, umgekehrt proportional zur Pulswiederholfrequenz<sup>1</sup>. Die Auflösung wird durch die Pulslänge bestimmt. Foto: SAM Electronics [SAM]

Ein wesentlicher Punkt, der bei den Messungen der Feldstärken an Radaranlagen beachtet werden muss, ist, dass die Radarstrahlung der schiffseigenen Radarantennen über den Bereich des Schiffs in der Regel ausgeblendet wird. Ohne das *Sector Blanking* würde es durch die hochreflektierende Struktur des Schiffs in diesem Bereich zu keiner sinnvollen Abbildung, dafür aber zu unzulässig hohen Feldstärken sowohl im für Personen zugänglichen Bereichen als auch durch Reflexionen des Radarpulses innerhalb der Radarelektronik kommen. Einzig die Radarantennen am höchsten Punkt des Schiffs, in der Regel auf dem Mast, verfügen über eine weitgehend offene Rundumsicht und werden deswegen nicht ausgeblendet (Abbildung 5.13). Die bei den Messungen der Spektren auf Schiffsbrücken gemessene Radarstrahlung stellt, bei ordnungsgemäß konfigurierter Sektorausblendung, somit lediglich einen geringen Teil des Hauptpulses dar. Dieser wird zum einen verursacht durch die Reflexionen der Hauptkeule an umliegenden Objekten und zum anderen durch die Nebenkeulen der Radarantenne.

Bei engen Manövern bzw. beim Ankern in Häfen oder Kanälen nähern sich Schiffe im Allgemeinen auf sehr geringe Distanzen, so dass das eigene Schiff in die deutlich stärkeren, nicht ausgeblendeten Hauptkeulen der kreuzenden Schiffe gelangt. Um diesen Umstand zu untersuchen, fanden im Nord-Ostsee-Kanal sowie in Häfen Messungen an kreuzenden bzw. dicht passierenden sowie ankernden Schiffen statt. Diese Messungen wurden durch Messungen an der schiffseigenen Radaranlage sowie an stationären Radaranlagen bei abgeschalteter Sektorausblendung ergänzt.

<sup>1</sup> PRF: Pulse Repetition Frequency



Abbildung 5.13: Peildeck einer Fähre. Erkennbar sind ein S-Band- (große Antenne) sowie ein X-Band-Radarsystem (kleine Antenne). Die Radarsysteme auf dem Peildeck besitzen nahezu Rundumsicht und werden daher für vollständig umlaufende Radardarstellungen verwendet. Neben den Radarantennen sind weitere GPS- und Stabantennen sowie ein akustisches Ortungssystem erkennbar.

### 5.2.3. Radarmessung auf ankernden Schiffen / stationäre Messungen

Um den ungünstigsten Fall einer Radarantenne in unmittelbarer Nähe zum Funkübertrager zu untersuchen, wurde bei unterschiedlichen Kreuzfahrtschiffen die Sektorausblendung der vor der Brücke befindlichen Bugradaranlage deaktiviert. Hierdurch werden der rückwärtige Bereich des Schiffs und damit auch die Brücke von dem vollen Radarpuls getroffen. Eine weitere stationär durchführbare Messung von Radaranlagen besteht bei dicht ankernden Schiffen. Hierzu wurde auf mehreren fremden Schiffen eine Aktivierung der Radaranlagen veranlasst, wodurch sich deren Strahlung an Bord des eigenen Schiffs vermessen ließ (Abbildung 5.14).

Die Ergebnisse der Messungen an den schiffseigenen Radaranlagen zeigen, dass im Bereich der Brücke Feldstärken von über  $160 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  bzw.  $100 \text{ V/m}$  erreicht werden können, selbst wenn sich die Brücke außerhalb der Hauptstrahlrichtung der Antennenanlage befindet. Die gemessenen Werte konnten durch Messungen nahe ankernder Schiffe bestätigt werden. Die Strahlung der eigenen Radaranlage nimmt zum hinteren Bereich der Brücke und zu den Nocken leicht ab, hat jedoch im Bereich des Hauptfahrstands und in dessen Nähe eine annähernd gleiche Höhe. Ein dämpfender Einfluss wird durch vorhandene Sonnenschutzvorhänge sowie durch die immer häufiger verwendeten Frontscheiben mit Innenbeheizung bewirkt.



Abbildung 5.14: Messung der Feldstärken an der Radaranlage eines dicht ankernden Schiffs. Durch die unterschiedlichen Brückenhöhen liegt die Radaranlage des fremden Schiffs auf der Höhe der eigenen Brücke, wodurch diese sich in der Hauptkeule der Radarantenne befindet.

Begleitend zu den Messungen auf Schiffen wurden Messungen an den stationären Radaranlagen eines Brückenherstellers durchgeführt. Bei diesen Messungen traten in einer Entfernung von 15 Metern zur Antenne Feldstärken von über 700 V/m auf.

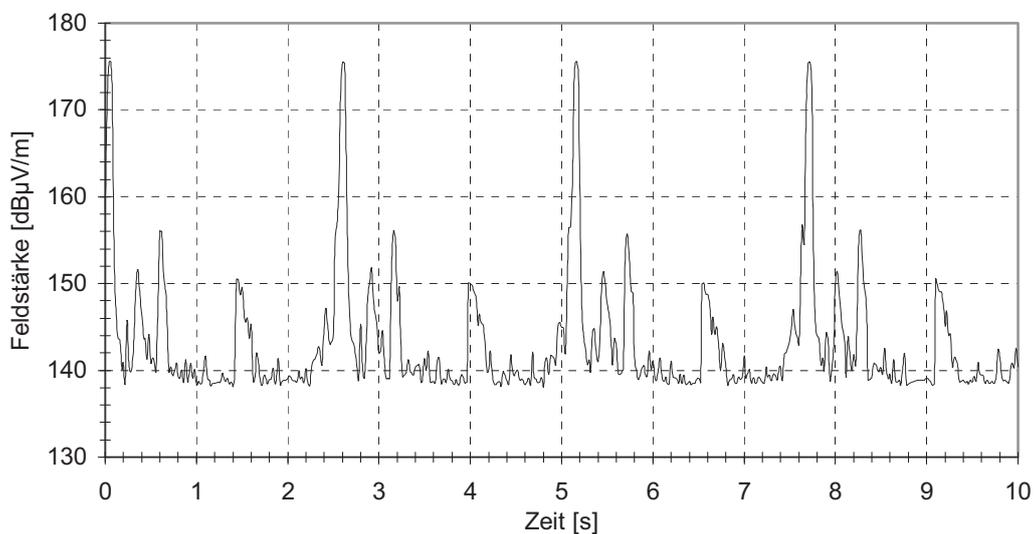


Abbildung 5.15: Messung an einer stationären Radaranlage. Erkennbar sind die direkt einstrahlenden Hauptpeaks sowie die Nebenpeaks, verursacht durch Reflexionen an umliegenden Gebäudestrukturen.

Bei derartig hohen Signalen kommt es selbst durch Reflexionen an umliegenden Objekten zu Feldstärken von über 50 V/m (Abbildung 5.15).

Generell sind bei Messungen in unmittelbarer Nähe zu Antennenanlagen unbedingt der Personenschutz sowie der Schutz der Messeinrichtungen, speziell des Spektrumanalysators, sicherzustellen. Bei dem Spektrumanalysator ist dabei nicht nur auf eine genügende Abschwächung des Antennensignals, sondern auch, durch Leermessungen bei abgeschlossenem Antenneneingang, auf eine ausreichende Abschirmung des Messgeräts gegenüber Störeinkopplungen über z.B. Versorgungsleitungen oder das Gehäuse (Backdoor-Coupling) zu achten (Abbildung 5.16).

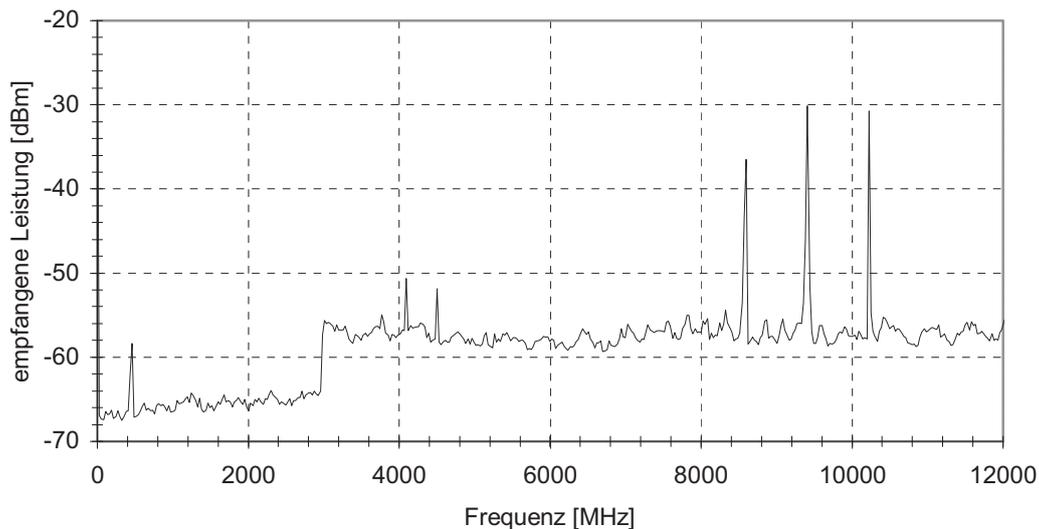


Abbildung 5.16: Störeinkopplung in einen Spektrumanalysator in der Nähe einer X-Band-Radaranlage. Das Gerät war während der Messung mit einem vollständig geschirmten Abschluss direkt am Messeingang versehen.

#### 5.2.4. Radarmessung an Schiffen sowie an militärischen Radaranlagen

Um die Situation eines dicht vorbeifahrenden Schiffs zu untersuchen, wurden während einer Revierfahrt im Nord-Ostsee-Kanal die Spektren der Radarstrahlung entgegenkommender Schiffe untersucht (Abbildung 5.17). Hierzu wurde, wie bei den Messungen der Feldstärken im Brückenbereich, ein tragbares System verwendet. Wegen der Richtcharakteristik der Antenne kam die Schwenkmethode zum Einsatz. Auf der freistehenden Brückennock wurden bei diesen Messungen Feldstärken von über 120 V/m festgestellt, was sich mit den Messungen an stationären Radaranlagen deckt.

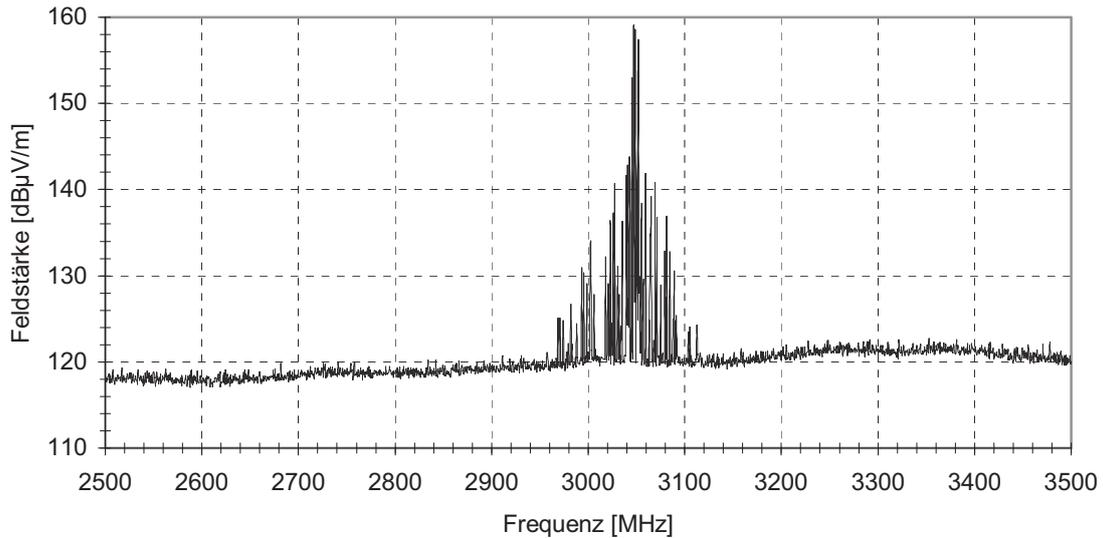


Abbildung 5.17: Spektrum des S-Band-Radars eines dicht vorbeifahrenden Schiffs während der Fahrt durch den Nord-Ostsee-Kanal

Um einen möglichst umfassenden Überblick über verschiedene Radarsysteme zu erlangen, wurden neben den Messungen an zivilen nautischen Radaranlagen Messungen an militärischen Radarsystemen durchgeführt. Hierzu wurden auf einem Marineschiff Messungen sowohl an den klassischen S- und X-Band-Radarsystemen wie auch Messungen an den militärischen Nah- und Weitbereichsradaranlagen durchgeführt (Abbildung 5.18). Die Feldstärken im Brückenbereich lagen hier bei über 50 V/m sowohl beim klassischen wie auch bei den militärischen Systemen. Da über die verwendeten Betriebsmodi sowie über die Sendeleistung der Systeme aus Datenschutzgründen jedoch keine Angaben vorliegen, muss davon ausgegangen werden, dass gegebenenfalls deutlich höhere Felder erzeugt werden können.

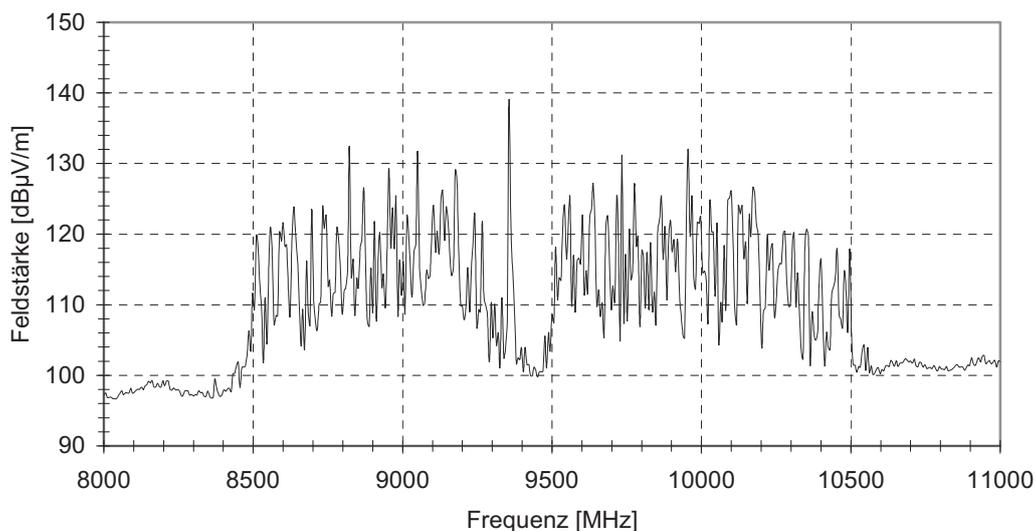


Abbildung 5.18: Messung am Nahbereichsradar eines Marineschiffs. Zu erkennen ist der Peak des X-Band-Radars in der Mitte des Spektrums sowie die umliegenden Signale, verursacht durch das Nahbereichsradar des Marineschiffs.

### 5.2.5. Datenübertragungstests in der Nähe von Radaranlagen

Neben den Messungen der Spektren wurden auch Datenübertragungstests in unmittelbarer Nähe von Radaranlagen durchgeführt. Nachteilig bei diesen Messungen ist die der Funkstrecke übergeordnete automatische Fehlerkorrektur, da hierdurch direkte Anzeichen für Störbeeinflussungen unterdrückt werden. Außerdem lässt sich bei Bluetooth keine genaue Aussage über die Kanalqualität machen, so dass hier nur Messungen der Übertragungszeit Auskunft über mögliche Störungen geben können. Messungen an einer stationären S-Band-Radaranlage in ca. 10 m Entfernung zeigten bei WLAN-Datenübertragungen einen Rückgang der Datenübertragungsrate durch zwischenzeitliches Umschalten auf langsamere und damit robustere Übertragungsgeschwindigkeiten. Bei Bluetooth jedoch war kein Unterschied in der Datenübertragungsrate festzustellen. Bei dem Betrieb von X-Band-Radaranlagen zeigte keines der untersuchten Systeme Beeinträchtigungen; hier dürfte die Entfernung zum ISM-Band zu groß für eine Störung sein.

## 5.3. Störfestigkeitsmessungen an Funkübertragungssystemen

Wie bereits diskutiert, ist ein zentraler Punkt bei der Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit der Funkübertragungsmodule auf Schiffsbrücken ihre Störfestigkeit gegenüber den vorhandenen Störquellen. Nachdem durch die oben zusammengefassten Messungen die wesentlichen Quellen identifiziert wurden, wurden daher an kommerziell erhältlichen Systemen Störfestigkeitsuntersuchungen gegenüber den beobachteten Frequenzen bei hohen Prüffeldstärken sowie mit pulsformiger Störung durchgeführt [Schoof05].

Durch Gespräche mit Besatzungsmitgliedern, Ausrüstern und Klassifikationsgesellschaften stellte sich in diesem Zusammenhang als eine weit verbreitete Sorge heraus, dass die Daten bei Störung falsch übermittelt bzw. bei parallel arbeitenden Netzen an den falschen Empfänger adressiert werden könnten.

Die in dieser Arbeit diskutierten Standards Bluetooth, WLAN und ZigBee verfügen alle über diverse Mechanismen zur korrekten Übermittlung der Daten. Dabei kommen sowohl Fehlererkennungs- als auch Fehlerkorrekturmaßnahmen zum Einsatz [Vedral04]. Zwar kann der Anwender in weiten Bereichen Art und Umfang der benutzten Maßnahmen wählen, die Auswahl bezieht sich aber lediglich auf die Nutzdaten. So kann beispielsweise bei Bluetooth zwischen einer Übertragung der Daten ohne und mit 2/3-Vorwärtskorrektur gewählt werden (Tabelle 4.1). Eine Fehlererkennung ist dabei in jedem Fall vorhanden, solange sie nicht ausdrücklich wie im Fall der Übertragung von Audiodaten deaktiviert wird. Ungeachtet der Einstellungen bezüglich der Fehlerkorrektur ist bei allen Standards, auch bei Störungen, eine sichere, eindeutige Adressierung an den Empfänger sowie eine korrekte Übermittlung der Daten gewährleistet. Bei Erkennung eines Fehlers wird das als falsch erkannte Paket verwor-

fen und, je nach Standard, so lange erneut übertragen bzw. erneut angefordert, bis eine korrekte Übermittlung erfolgt ist. Dies geht dabei zu Lasten des verfügbaren Datendurchsatzes.

Bei einer extremen Störung und damit einer deutlichen Verringerung der Bandbreite kann es, bei anhaltendem Datenfluss, allerdings sehr wohl dazu kommen, dass nicht alle der an die Module übergebenen Daten übermittelt werden können. In diesem Fall werden, z.B. bei der Übertragung von NMEA-Telegrammen, unvollständige, abgehackte Telegramme bzw. scheinbare Zusammenschnitte aus mehreren Telegrammen übertragen. Diese Daten werden meist irrtümlich als falsch übermittelt bezeichnet, sind aber in Wirklichkeit nur Ausschnitte der Originaldaten. Da Standards wie NMEA, CAN oder TCP/IP jedoch ihrerseits ebenfalls Prüfsummen zur Überprüfung der übertragenen Daten verwenden, erkennen sie diese Fehler zuverlässig und filtern die unvollständigen bzw. schadhaften Abschnitte automatisch aus.

### 5.3.1. Beeinflussung durch modulierte und unmodulierte Störquellen

Wie sich bei der Messung der elektromagnetischen Hintergrundstrahlung auf Schiffsbrücken gezeigt hat, liegen die vorhandenen Quellen fast ausschließlich im Bereich bis zum S-Band-Radar bei 3 GHz, wobei dieses gleichzeitig die Hauptstrahlungsquelle darstellt. Die durchgeführten Untersuchungen fanden aus diesem Grund in einem Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 4 GHz statt. Als Testobjekte wurden sowohl batteriebetriebene als auch extern versorgte serielle Bluetoothmodule mit  $\lambda/2$ - oder Stummelantenne sowie USB-Bluetoothmodule mit unterschiedlichen Sendeleistungen (4 - 50 mW) verwendet.

Um die Module gleichmäßigen Fernfeld-Bedingungen auszusetzen, wurden die Untersuchungen in einer GTEM-Zelle durchgeführt. Dabei befand sich ein Modul im vorderen Bereich der GTEM-Zelle, das andere im hinteren Bereich, wodurch eine unterschiedlich hohe Feldbeaufschlagung der beiden Module erzielt wurde (Abbildung 5.19). In der Praxis liegt überwiegend ein stark asymmetrischer Datenfluss der zwischen den Modulen übertragenen Daten vor. Obwohl Funkmodule ständig bidirektional untereinander Daten austauschen, ist es deswegen sinnvoll, ein Modul als Sender und das andere als Empfänger zu betrachten. Außerdem liegt bei Betrieb möglicher Störquellen in der Nähe eines Funknetzwerkes überwiegend die Situation einer asymmetrischen Störbeaufschlagung vor. Durch eine unterschiedlich hohe Beaufschlagung der Module können bei asymmetrischem Datenfluss Aussagen über die Störempfindlichkeit in Abhängigkeit der Aktivität, also getrennt zwischen Sender und Empfänger, gemacht werden.

Die Antennen der Module wurden bei den Messungen in Richtung der maximalen Feldstärke ausgerichtet. Zur Messung der Beeinflussung wurden jeweils zwei identische Module gepaart und die Datenübertragungsrate in Abhängigkeit der beaufschlagten Störung gemessen. Zur Verbindung mit dem PC dienten eigens entwickelte serielle Glasfaserverbindungen. Bei den Störfeldern handelte es sich sowohl um CW-Beaufschlagung (kontinuierlich) als auch um

amplituden- bzw. frequenzmodulierte Felder (AM bzw. FM), die in ihrem Modulationsfaktor sowie in ihrer Modulationsfrequenz variiert wurden.

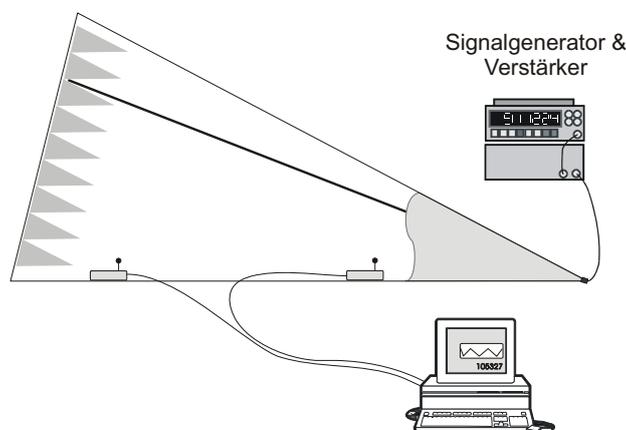


Abbildung 5.19: Aufbau zur Messung der Beeinflussung von Funkübertragungsmodulen im Fernfeld einer Störquelle. Die Prüffeldstärke wurde durch eine glasfasergekoppelte E-Feld-Sonde am Ort des vorderen Moduls ermittelt.

Entsprechend der IEC 60945 wird im zuständigen Bereich zwischen 80 MHz und 2 GHz eine Prüffeldstärke von 10 V/m gefordert [IEC60945]. Um die Module jedoch größeren Störfeldern auszusetzen, wurden die Messungen über einen weiten Frequenzbereich bei einer maximalen Feldstärke von 40 V/m durchgeführt. Lediglich im Frequenzbereich um 800 MHz sowie 1.200 MHz wurde, wegen der Erzeugung von Oberwellen im Verstärker, die Verstärkerleistung auf eine erzeugte Feldstärke von 5 V/m begrenzt. Gemessen wurde die Feldstärke am Ort des stärker beaufschlagten Moduls im vorderen Teil der Zelle durch eine glasfasergekoppelte E-Feld-Sonde. Abbildung 5.19 zeigt den vollständigen Versuchsaufbau. Mit einem Spektrumanalysator wurden, begleitend zu den Messungen, die vom Verstärker erzeugten höheren harmonischen Frequenzen überprüft, um eine unbeabsichtigte Störung durch diese auszuschließen.

Bei keinem der Module konnte, abgesehen von Inbandstörungen im ISM-Band, eine Störung beobachtet werden. Wie zu erwarten, lag jedoch eine große Störempfindlichkeit um den Bereich des ISM-Bands, also im Bereich von 2.300 MHz bis 2.700 MHz. Hier führten Feldstärken ab 5 V/m für FM und AM sowie ab 20 V/m für CW zu kompletten Unterbrechungen der Verbindung. Abhängig von der Feldstärke ließ sich dabei die Größe des störbaren Frequenzbereichs verändern und über den eigentlichen Bereich des ISM-Bands hinaus erweitern.

Um die Auswirkung der unterschiedlich hohen Feldstärken zwischen den beiden Modulen untersuchen zu können, wurde die Datenübertragungsrate richtungsabhängig gemessen. Durch die Paketbestätigung bei Bluetooth senden bzw. empfangen alle miteinander gepaarten Module regelmäßig. Allerdings nimmt die Störempfindlichkeit mit der Menge der empfangenen Daten zu. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler bei langen Telegrammen und damit

vielen zu empfangenden Zeichen ist dadurch deutlich größer als beim Empfang des relativ kurzen Bestätigungs-Telegramms (ACK), welches im Wesentlichen nur aus einem Telegrammkopf besteht. Bei Betrieb von zwei identischen Modulen mit einstellbarer Ausgangsleistung unterhalb des kritischen Störpegels war die Datenübertragungsrate in Richtung des Moduls, das mit der höheren Feldstärke beaufschlagt wurde, deutlich geringer (ca. 50 %) als in der umgekehrten Richtung. Ein Erhöhen der Ausgangsleistung des stärker gestörten Moduls zeigte keine wesentlichen Änderungen der Datenübertragungsraten. Eine Erhöhung der Sendeleistung des weniger gestörten Moduls verbesserte jedoch die Datenübertragung in abgehender Richtung, da sich hierdurch das Signal-Rausch-Verhältnis des stärker beaufschlagten Moduls verbesserte.

Obwohl die Datenübertragungsrate und damit auch die benutzte Bandbreite bei USB-Modulen im Vergleich zu den seriellen Modulen fünfmal höher ist, konnten keine wesentlichen Unterschiede in ihrem Verhalten festgestellt werden. Bei beiden Modularten waren nur zwei ausgeprägte Zustände festzustellen. Zwischen dem störungsfreien Betrieb und dem Ausfall war sowohl bei einer Variation der Feldstärke als auch bei einer Variation der Frequenz ein nahezu plötzlicher Abbruch oberhalb eines Schwellwerts zu beobachten. In der Nähe dieser schmalen Grenze nimmt gleichzeitig die Verzögerungszeit für die Übertragung kurzer Datentelegramme deutlich zu.

Neben den beobachteten Störeffekten zeigten die Module eine Abhängigkeit bezüglich des zeitlichen Verhaltens des Störpegels: sofern die Module augenblicklich mit einer genügend hohen Feldstärke beaufschlagt wurden, führte dies zu einem unmittelbaren, anhaltenden Abbruch der Datenübertragung und bei längerer Störung ggf. zu einem Verlust der Verbindung. Wurde der Störpegel langsam erhöht bzw. die Störfrequenz bei gleichem Pegel langsam in das beeinflussbare Band verschoben, zeigten sich erst deutlich über den für eine plötzliche, komplette Störung nötigen Feldstärken Beeinflussungen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Module zwar auf langsam schlechter werdende Verbindungen reagieren, indem sie ihre Sendeleistung schrittweise erhöhen, nicht jedoch auf plötzliche Verbindungsabbrüche, da hier die Anfrage des gegenüberliegenden Moduls auf eine Erhöhung der Sendeleistung wegen der zu starken Störungen ausbleibt. Dieses Verhalten konnte durch entsprechende Messungen mit einem Richtkoppler bestätigt werden.

Aufgrund des unterschiedlichen durch die Firmware vorgegebenen Timings bei der Leistungsanpassung variiert die Zeit zur Reaktion auf eine Störung und damit die Zeit zum Wiederherstellen einer zuverlässigen Verbindung zwischen den einzelnen Modulen. Entsprechend den Messungen betrug diese bis zu einige Sekunden (Abbildung 5.20). Nachdem aufgrund anhaltender Störungen eine Unterbrechung der Verbindung durch Trennung der Module eingetreten war, mussten die Störfeldstärken weit über den Punkt hinweg abgesenkt werden, bei dem die Störung auftrat. Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin, dass die Module beim Suchen ihres Partners nicht notwendig ihre maximale Sendeleistung verwenden und so bei anhaltender Störung auch nicht in der Lage sind, sich gegenseitig zu finden. Sofern die Module eine Paarung initiieren konnten, versuchen sie jedoch die Verbindung bis zur maxi-

mal verfügbaren Sendeleistung aufrecht zu erhalten (Abbildung 5.21) [Catrysse04]. Das gleiche Verhalten trat auch bei den Messungen auf Schiffen bei der Paarung mit entfernten Partnern auf.

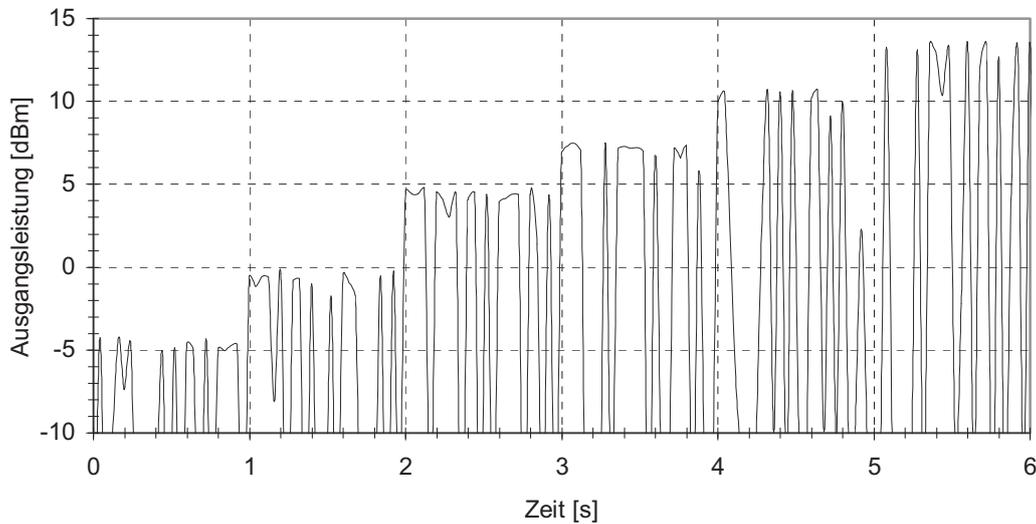


Abbildung 5.20: Anheben der Sendeleistung eines seriellen Bluetoothmoduls nach Beaufschlagung mit konstanter Störung ab dem Zeitpunkt  $t = 0$ . Das Modul zeigte das gleiche Zeitverhalten beim Absenken der Sendeleistung nach Beendigung der Störung. Der Messaufbau entspricht Abbildung 5.22.

Selbst bei vollständiger kurzzeitiger Unterbrechung der Verbindung von einigen Sekunden, wurde die Datenübertragung unmittelbar nach Wegfall der Störung, also ohne Verlust der Paarung, weitergeführt.

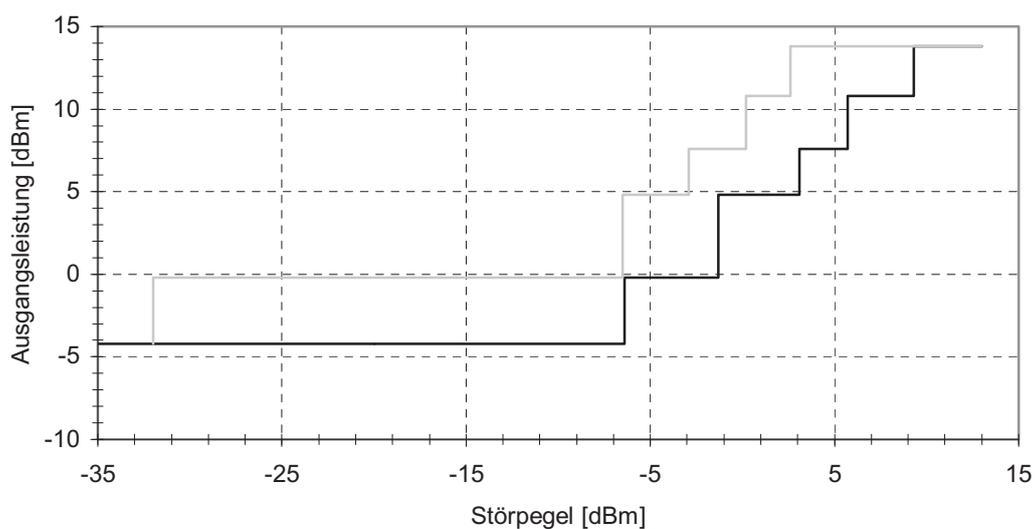


Abbildung 5.21: Gemessene Ausgangsleistung eines seriellen Bluetoothmoduls in Abhängigkeit des Störpegels am Antenneneingang. Die schwarze Kurve gilt für steigende Störleistung, die graue für sinkende. Der Messaufbau entspricht Abbildung 5.22.

Neben den Messungen in der GTEM-Zelle wurden außerdem Messungen durchgeführt, bei denen die Störleistung direkt in die Module eingespeist wurde. Die Module wurden dabei über Richtkoppler miteinander verbunden. Der entsprechende Aufbau ist in Abbildung 5.22 gezeigt. Die seriellen Module mit externem Antennenanschluss wurden jeweils über den Auskoppelzweig eines Richtkopplers miteinander verbunden, wobei durch Dämpfungsglieder eine zusätzliche Dämpfung des Nutzsignals erzeugt wurde. Um einen maximalen Störpegel zu erreichen, wurde das Störsignal direkt über den Richtkoppler eingespeist. Über den zweiten Richtkoppler wurde ein Spektrumanalysator angeschlossen, mit dem das Verhalten des zweiten Moduls beobachtet werden konnte.

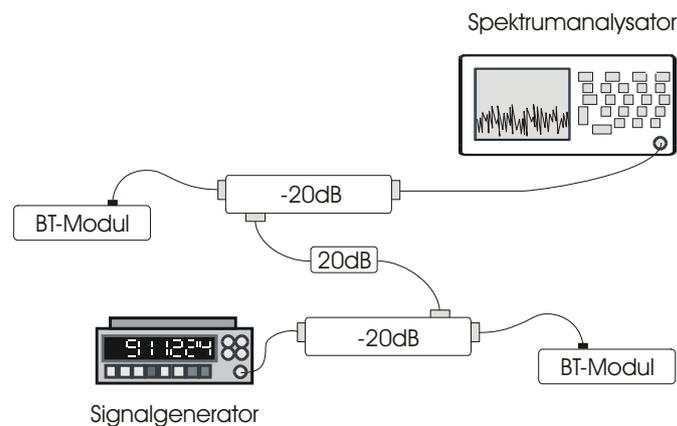


Abbildung 5.22: Aufbau zur Messung der Beeinflussung von Bluetoothmodulen durch leitungsgeführte Störsignale. Die verwendeten Richtkoppler besaßen eine Auskoppelung von jeweils -20 dB. Die Bluetoothmodule sowie die Datenübertragung wurden über einen separaten PC gesteuert.

Selbst bei einer Störleistung von 13 dBm zeigten die leitungsgekoppelten Module keinerlei Empfindlichkeit gegenüber leitungsgeführten Störungen außerhalb des Bereichs um das ISM-Band. Der störempfindliche Bereich hatte dabei annähernd die gleiche Breite für AM, FM und CW-Störfelder und damit eine geringere Modulationsabhängigkeit als bei den GTEM-Zellen-Messungen.

#### Zusammenfassende Beurteilung:

Die Messung der Störbarkeit der Funkübertragungsmodule durch modulierte und unmodulierte Störquellen mit hohen Feldstärken ergab, dass die untersuchten Bluetooth-Funkübertragungsmodule in keinem der Frequenzbereiche empfindlich reagierten, in dem an Bord von Schiffen hohe Feldstärken registriert wurden. Selbst bei Feldstärken bis zu 40 V/m war, abgesehen von Inbandstörungen, keine störende Beeinflussung nachweisbar. Eine Beeinflussung durch die an Bord von Schiffen untersuchten zum ISM-Band benachbarten Funkdienste kann, mit Ausnahme des extrem leistungsstarken Radars, somit ausgeschlossen werden. In Verbindung mit dem zeitlichen Verhalten der untersuchten Module bei Störung zeigte sich jedoch, dass eine Anpassung der Firmware sinnvoll ist. So sollten die Module im Fall

einer Störung schneller mit dem Anheben der Sendeleistung beginnen, um bei massiven Inbandstörungen die Unterbrechungszeit zu verringern bzw. einem möglichen Verlust der Verbindung vorzubeugen.

### 5.3.2. Beeinflussung durch pulsförmige Störquellen

Zusätzlich zu den Messungen der Störbarkeit durch schmalbandige Quellen wurde wegen seiner speziellen Strahlungsform als extrem breitbandige und gepulste Quelle sowie der besonders hohen erzeugten Feldstärken das Störvermögen von UWB-Strahlung<sup>1</sup> auf die verwendeten Funkübertragungssysteme untersucht. Diese Fragestellung wird zurzeit vor allem in Verbindung mit der Eignung bzw. einer zunehmenden Nutzung der Funkübertrager in militärischen Bereichen diskutiert, wo UWB-Strahlung zur gezielten Störung von Systemen verwendet wird [Camp01, Nitsch05].

Für die Messungen wurden serielle sowie USB-Bluetoothmodule in einer GTEM-Zelle mit den Feldern von UWB-Pulsen beaufschlagt. Der Messaufbau entspricht dem Aufbau zur Messung der Beeinflussung durch hohe Feldstärken in Abbildung 5.19. Anstelle eines Signalgenerators mit Verstärker wurde hier jedoch ein spezieller Hochspannungspulsgenerator, ein sogenannter UWB-Generator, verwendet. Die Pulse haben eine Anstiegszeit von 100 ps sowie eine Halbwertsbreite kleiner 2,5 ns [Weber04]. Durch pulsfeste Dämpfungsglieder konnte die Feldstärke am Ort der Module zwischen 1 kV/m und 10 kV/m eingestellt werden. Die Pulswiederholfrequenz wurde durch einen Funktionsgenerator zwischen 10 Hz und 1 kHz variiert. Die verwendeten seriellen Bluetoothmodule wurden über Netzteile versorgt und über eine Glasfaserstrecke an einen PC angebunden, der die Datenübertragungsrate überwachte. Es wurden jeweils eine stehende und eine liegende  $\lambda/4$ -Antenne verwendet. Die verwendeten USB-Bluetoothmodule wurden über eine aktive USB-Verlängerung betrieben und jeweils von einem außerhalb der GTEM-Zelle befindlichen PC gesteuert.

Keines der seriellen Module zeigte für Feldstärken unterhalb von 10 kV/m Beeinträchtigungen. Lediglich bei 10 kV/m und Pulswiederholraten oberhalb von 500 Hz stürzte ein Modul ab, wobei es die Bluetoothstrecke aufrecht erhielt, jedoch die Verbindung zum PC abbrach. Der Ausfall war durch einen Reset zu beheben. Nach einer zusätzlichen vollständigen Schirmung des ausgefallenen Moduls zeigte dieses keine erneuten Ausfälle.

Messungen an USB-Bluetoothmodulen zeigten bei einer Feldstärke von 10 kV/m, dass die Datenübertragungsrate mit steigender Pulswiederholfrequenz näherungsweise linear abnimmt, jedoch war selbst bei 1 kHz Pulswiederholfrequenz noch eine Datenübertragungsrate von über 200 kBit/s möglich. Keines der untersuchten Module stürzte während der Messungen ab.

---

<sup>1</sup> UWB: Ultra Wideband

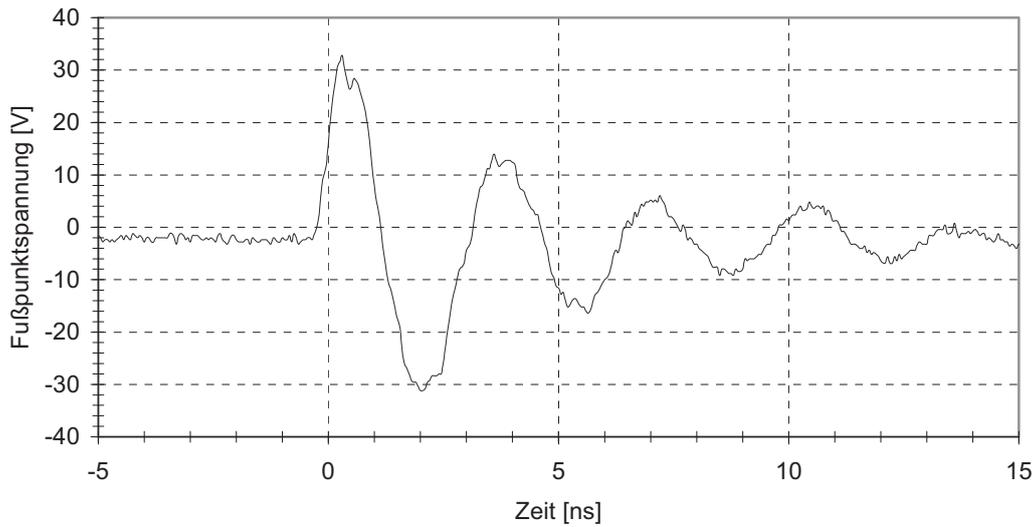


Abbildung 5.23: Einkopplung eines in einer GTEM-Zelle abgestrahlten UWB-Feldes in eine 2,4-GHz-Antenne (verkürzter  $\lambda/2$ -Monopol). Eine Fourier-Analyse ergab, dass nur nennenswerte Frequenzen unterhalb von  $f = 1$  GHz angeregt wurden.

Begleitende Zeitbereichsmessungen mit anschließender Fourier-Analyse der Signale an unterschiedlichen 2,4-GHz-Antennen ergaben, dass durch den verwendeten Puls nennenswert nur niederfrequente Resonanzen angeregt wurden (Abbildung 5.23). Die angeregten Frequenzen konnten durch Messungen der S-Parameter der Antennen an einem Netzwerkanalysator bestätigt werden (Abbildung 5.24).

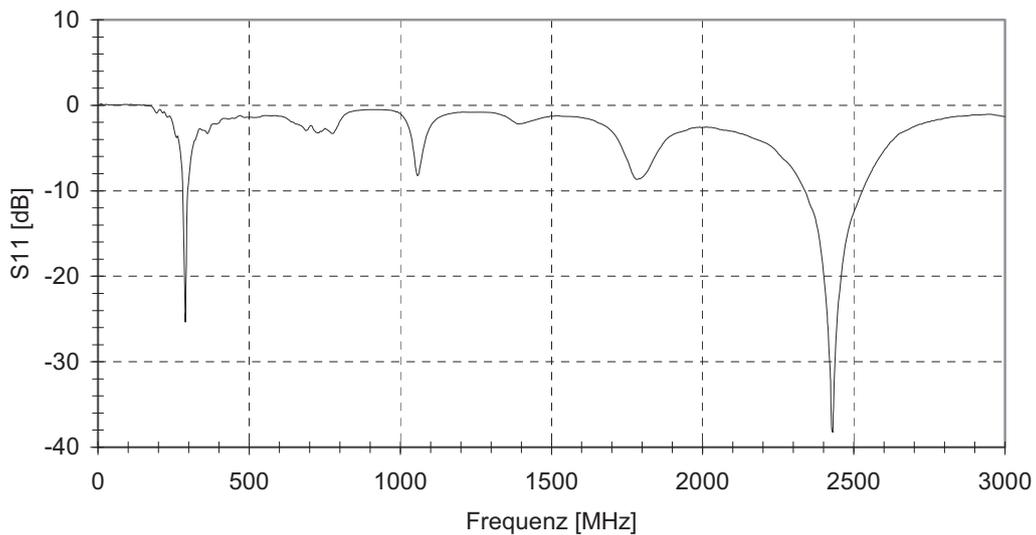


Abbildung 5.24:  $S_{11}$ -Parameter der 2,4-GHz-Antenne aus Abbildung 5.23, gemessen mit der Antenne am Eingang des Netzwerkanalysators. Die Resonanz bei 300 MHz deckt sich mit der im Zeitbereich erkennbaren Anregung in Abbildung 5.23.

UWB-Pulse erzeugen demnach bislang noch nicht genügend Leistung im Frequenzbereich oberhalb von 2 GHz (Abbildung 5.25), um bei diesen Frequenzen zu störenden Einkopplungen bzw. zu nennenswerten Anregungen am Antenneneingang zu führen.

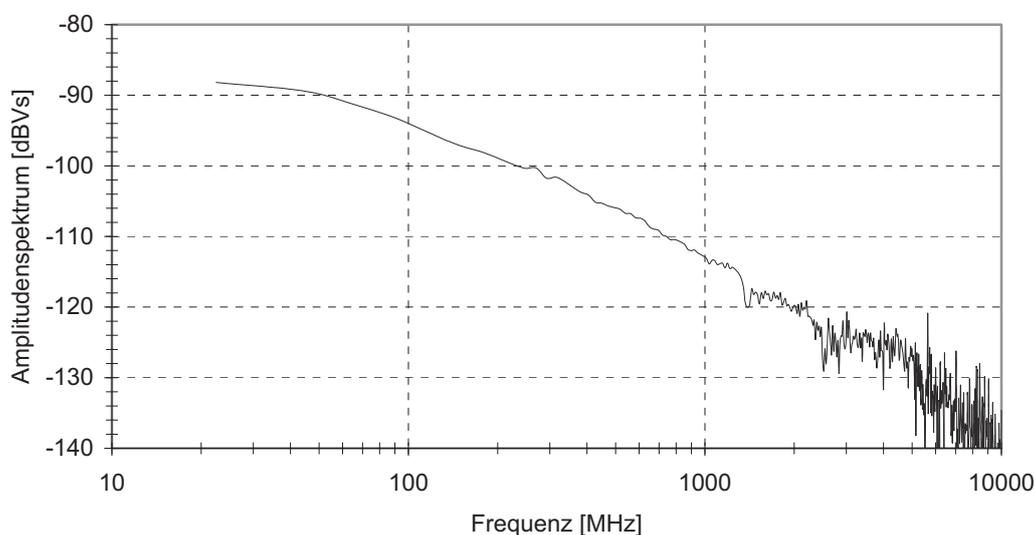


Abbildung 5.25: Amplitudenspektrum des in Abbildung 5.23 verwendeten 12,5 kV-UWB-Pulses [Weber04]

Wegen ihrer kleinen Abmessungen und robusten Bauweise können Bluetoothmodule somit ebenfalls als unempfindlich gegenüber sehr hohen Feldstärken angesehen werden, sofern zumindest die Frequenzanteile innerhalb des ISM-Bands und damit die Einkopplungen über die Antenne gering sind. Zwar ist davon auszugehen, dass die untersuchten Module geringe Störungen erfahren, diese können sie jedoch, wegen der kurzen Störpulsbreite und der bei seriellen Modulen lediglich geringen Bandbreitenausnutzung, ohne einen deutlichen Leistungsabfall kompensieren.

### 5.3.3. Unterschiede zwischen Frequenzpreis- und Frequenzsprungverfahren

Untersuchungen an WLAN-Systemen aus der Literatur zeigen, dass WLAN wesentlich empfindlicher und zum Teil unterschiedlich im Vergleich zu Bluetooth auf Störfelder reagiert. Werden beide Verfahren mit mittleren, frequenzfesten Störfeldstärken beaufschlagt, so führt dies bei Frequenzsprungverfahren zum Verlust der betroffenen Kanäle. Frequenzpreisverfahren können dies, zumindest bei schmalbandiger Störung, jedoch ausgleichen, selbst wenn der Störpegel größer als das eigentliche Nutzsignal ist. Bei starken Störern kommt es beim Frequenzpreisverfahren zur Übersteuerung im Empfangskreis und damit zum Zusammenbruch der gesamten Übertragung. Frequenzsprungverfahren wiederum zeigen auch hier nur Verluste der betroffenen Kanäle. Sehr starke Störungen führen allerdings bei beiden Systemen zu einer Übersteuerung und damit zum Totalausfall [McCune00]. Frequenzsprungverfahren, wie bei Bluetooth, sind somit zwar leichter störfähig, der Grad der Störung bleibt jedoch über einen weiten Störpegelbereich konstant und ist lediglich abhängig von der Breite des Störsignals.

Hierdurch wird auch bei breitbandigen Störern ein vergleichsweise hoher Datendurchsatz gewährleistet. Frequenzspreizverfahren, wie bei WLAN, zeigen dagegen ein diskretes Verhalten, welches schnell zum Verlust der gesamten Verbindung führen kann.

#### 5.3.4. Messung des zeitlichen Übertragungsverhaltens von Bluetoothmodulen

Ein wesentlicher und sicherheitskritischer Aspekt bei einer möglichen Zulassung von drahtlosen Datenübertragungsstandards bzw. von Funkübertragungsmodulen für die Datenübertragung auf Schiffen ist die Übertragungszeit für die im Bereich der Schifffahrt verwendeten Daten. Diese liegen im angestrebten Einsatzbereich in der Regel im NMEA-Format vor. Die Übertragungszeit ist definiert als der Zeitabschnitt zwischen der Übergabe des ersten Nutzdatenbytes eines Paketes an die Schnittstelle, hier dem Funkübertrager, bis zum Empfang des letzten Bytes durch den Empfänger.

Gegenüber der direkten Verbindung über serielle Kabel kommt es bei der Übertragung innerhalb übergeordneter Rahmen, wie dem Bluetoothprotokoll, zu einer Zerstückelung der Daten, einer paketweisen Übertragung sowie einer anschließenden Zusammenführung der Pakete. Dieses Verhalten lässt sich bei allen drahtlosen sowie kabelgebundenen Multiplexverfahren und Bussystemen, wie TCP/IP, CAN, GSM und Bluetooth bzw. WLAN beobachten. Es ist unter anderem abhängig von vorhandenen Störungen der Signalübertragung, hervorgerufen durch Kollisionen oder Interferenzen. Insbesondere kann die Übermittlungszeit bzw. der Übermittlungszeitpunkt nicht genau vorherbestimmt werden (nichtdeterministisches Verhalten). Der auftretende Effekt ist ebenfalls abhängig von der Bandbreite, dem Verhältnis von den Kopfdaten (Header) zu den Nutzdaten (Payload) und der Paketrate. Wird die zur Verfügung stehende Bandbreite nicht voll ausgenutzt, wie dies beim seriellen Protokoll von Bluetooth der Fall ist, lässt sich das Zeitverhalten der Übertragung durch Anpassen der Firmware der Module beeinflussen. Hierdurch können die Übertragung zeitkritischer Daten gegebenenfalls auf das zu übertragende Datenformat angepasst und die auftretenden Verzögerungen minimiert werden [Lührs04, Müller01].

Generell sind folgende Werte von Bedeutung:

- die garantierte Übertragungszeit, welche im störungsfreien Betrieb nicht überschritten wird,
- die mittlere Übertragungszeit sowie deren Spannweite (Jitter) im störungsfreien Betrieb,
- die mittlere Übertragungszeit sowie deren Spannweite bei definierter Störung.

Diese Werte sind analog auch auf Parameter wie Antwortzeit (Zeit zwischen Anfrage und vollständig erhaltener Antwort), Bandbreite sowie Datenübertragungsrate anzuwenden und in der Regel miteinander verknüpft. Gegebenenfalls lässt sich noch ein vierter Wert definieren:

der „mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erreichbare Wert bei definierter Störung“. Alle vier Werte sind nicht nur vom Funkstandard, sondern auch von der implementierten Firmware abhängig und können somit selbst zwischen verschiedenen Versionen derselben Modulreihe variieren.

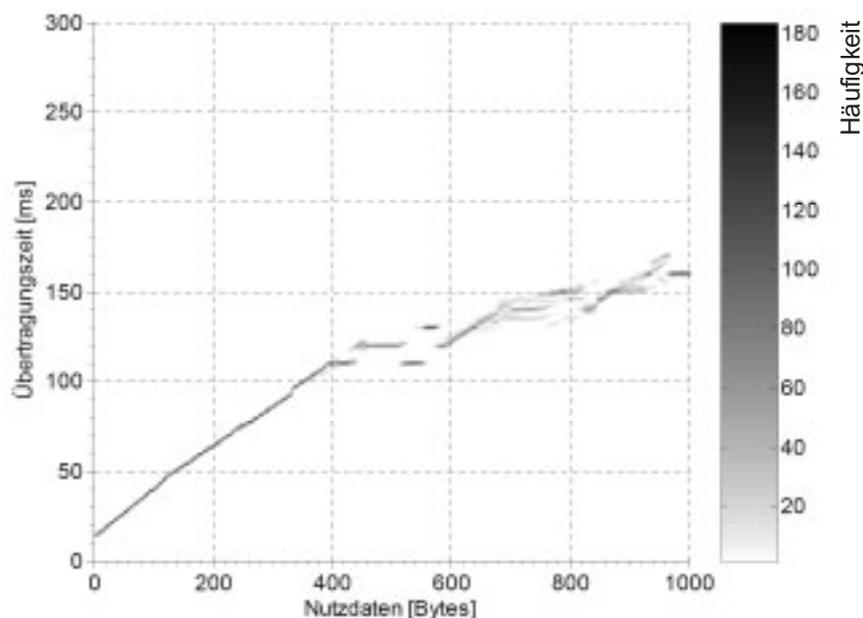


Abbildung 5.26: Gemessene Übertragungszeiten eines seriellen Bluetoothmoduls (Datenübertragungsrate 115,2 kBit/s) in Abhängigkeit von der Länge der übertragenen Datentelegramme ohne Störung

In Bezug auf eine Anwendung gilt nun zu klären, welche Anforderungen erfüllt werden müssen, und anschließend zu überprüfen, ob die in Frage kommenden Module den Anforderungen genügen. So ist z.B. bei sicherheitstechnischen Anwendungen wie Brandschutz oder auch bei Tochteranzeigen auf Schiffsbrücken lediglich die maximal tolerierbare Übertragungszeit, typischerweise im Bereich von einer Sekunde, von Interesse. Bei Sprachverbindungen oder langsamen Regelungsprozessen sind kurze Verzögerungen im Millisekundenbereich akzeptabel, solange die Spannweite konstant klein ist. Im Bereich der Maschinensteuerung schließlich sollten alle Größen möglichst klein sein. Hier werden selbst bei langsam drehenden Maschinen zum Teil Regelzeiten unterhalb von Millisekunden benötigt.

Zur Untersuchung der typischen auftretenden Verzögerungen im ungestörten und gestörten Fall wurde im Rahmen dieser Arbeit die Übertragungszeit in Abhängigkeit der Datenlänge für verschiedene Bluetoothmodule vermessen [Schoof06]. Abbildung 5.26 und Abbildung 5.27 zeigen Messungen der Übertragungszeit zweier verschiedener, ungestörter Bluetoothmodule für Datentelegramme in Abhängigkeit der Paketlänge. Dabei betrug die Paketrage 1 Hz.

Erkennbar bei allen Messungen ist, dass die Module selbst bei lediglich 1 Byte langen Telegrammen nicht unmittelbar mit der Datenübertragung beginnen, sondern immer eine minimale Zeit, im Folgenden mit Latenzzeit bezeichnet, benötigen, um die Datenübertragung zu initiieren. Die anschließende Übertragung der Daten entspricht in weiten Bereichen einer

Geraden, der mittleren Datenübertragungsrate, die von einer Streuung, dem Jitter, überlagert wird.

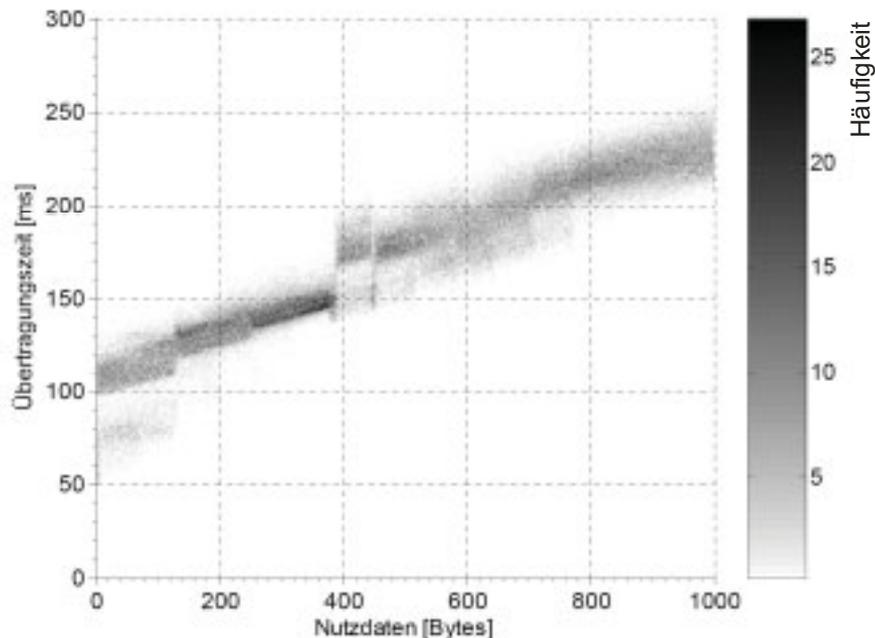


Abbildung 5.27: Übertragungszeiten eines seriellen Bluetoothmoduls (115 kBit/s) in Abhängigkeit von der Länge der übertragenen Datentelegramme ohne Störung. Das untersuchte Modul weist eine schlechtere Anpassung als das in Abbildung 5.26 untersuchte auf, erkennbar unter anderem an der größeren Streuung sowie der höheren minimalen Übertragungszeit (Latenzzeit).

Das in Abbildung 5.26 gemessene Modul besitzt eine Latenzzeit von ca. 15 ms und einen Jitter im Bereich von 1 bis 2 ms. Da Bluetooth maximal 1.600 Zeitfenster pro Sekunde erlaubt, werden für die Übertragung eines Telegramms mit anschließender Bestätigung durch den Empfänger mindestens  $1/800$  Sekunde (2 Zeitfenster) benötigt. Der bei diesem Modul auftretende Jitter beträgt also lediglich  $\pm 1$  Telegramm und kann als erreichbarer Minimalwert angenommen werden. Die Latenzzeit wiederum könnte durch entsprechende Änderungen der Firmware noch verkürzt werden. Im Vergleich hierzu besitzt das Modul in Abbildung 5.27 eine Latenzzeit von ungefähr 110 ms sowie einen Jitter größer als 40 ms und ist damit schlecht angepasst. Diese Spannweite der Übertragungszeiten ist reziprok mit einer hohen Schwankung der Datenübertragungsrate verbunden, welche auch bei vielen anderen Modulen beobachtet wurde. Im Gegensatz hierzu zeigt das erste Modul eine nahezu konstante Datenübertragungsrate.

Das Modul in Abbildung 5.26 ist somit besser zur Übertragung von NMEA-Telegrammen geeignet als das in Abbildung 5.27 vermessene Modul. Bei beiden Modulen ist erkennbar, dass diese für große Telegrammlängen, also im Fall eines quasi kontinuierlichen Datenstroms, unterschiedliche Übertragungslängen für gleiche Telegrammlängen sowie Sprünge in der Übertragungszeit besitzen. Dieses Verhalten konnte aufgrund mangelnder Informationen über die Firmware nicht geklärt werden, wurde jedoch bei den meisten untersuchten Modulen

festgestellt. Lediglich für kurze Datenpakete im Bereich bis 400 Byte lag bei seriellen Modulen ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Datenmenge und Übertragungszeit vor.

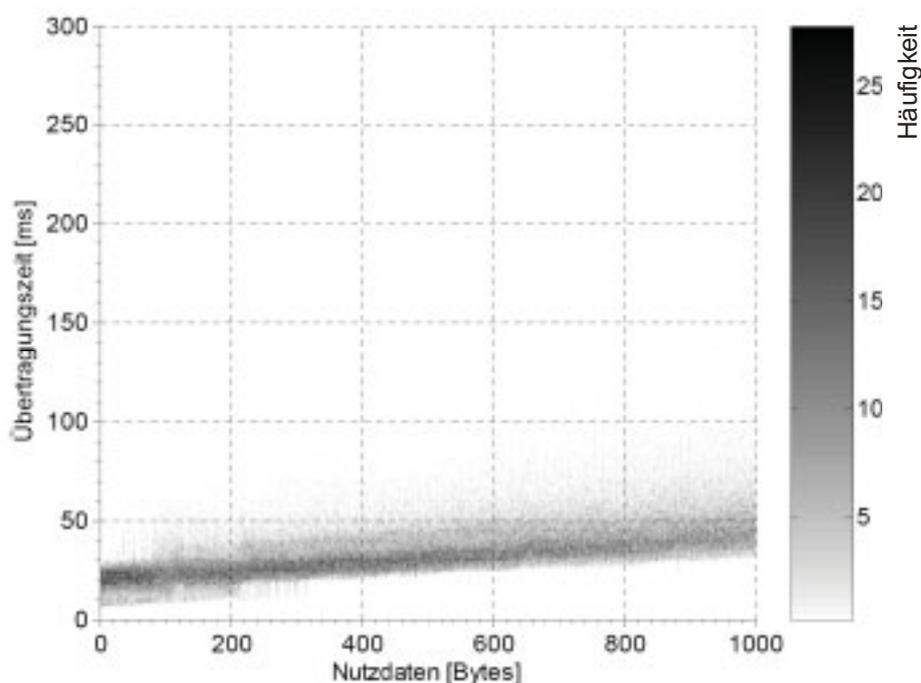


Abbildung 5.28: Übertragungszeiten eines USB-Bluetoothmoduls (ca. 600 kBit/s) in Abhängigkeit von der Länge der übertragenen Datentelegramme ohne Störung. Erkennbar ist die im Vergleich zum seriellen Modul höhere Übertragungsgeschwindigkeit, aber auch die größere zeitliche Spannweite der Übertragungszeit (Jitter).

Das USB-Modul (Abbildung 5.28) wiederum erreicht zwar Latenzzeiten von unter 8 ms, die mittlere Latenzzeit beträgt jedoch ca. 20 ms bei einem Jitter von anfangs 20 ms. Der Jitter bei USB-Modulen ist dabei stark von der Telegrammlänge abhängig und kann für sehr große Telegramme deutlich über 100 ms liegen. USB-Module folgten über den gesamten untersuchten Bereich einem linearen Verhalten zwischen Telegrammlänge und Übertragungszeit. Allerdings nimmt auch hier für große Datenmengen der Jitter deutlich zu. Ursache ist vermutlich das übergeordnete Betriebssystem sowie die USB-Schnittstelle. Durch viele parallel ablaufende Prozesse kommt es, insbesondere bei länger anhaltenden Operationen, zu unterschiedlich langen Verzögerung- bzw. Bearbeitungszeiten durch das Betriebssystem des ansteuernden PCs. Dieses wird jedoch für lange Telegramme durch die im Vergleich zu seriellen Modulen deutlich höhere Bandbreite mehr als kompensiert.

Da bei Bluetooth ein Modul als sogenannter *Master* für die Koordination der Kommunikation innerhalb eines Netzes zuständig ist, werden von diesem abgehende Daten geringfügig schneller übermittelt als eingehende. Eingehende Daten müssen vom *Master* zuerst angefordert werden. Bei vorwiegend einseitigen Datenströmen ist es deshalb sinnvoll, den überwiegenden Sender als *Master* zu konfigurieren und dadurch die Latenzzeit zu verringern.

Zur Messung des Übertragungsverhaltens unter periodischen Störungen wurden Bluetoothmodule über einen HF-Schalter mit hoher Schaltfrequenz kabelgeführt miteinander verbunden (Abbildung 5.29). Aufgrund der hohen Sendeleistungen der Module sowie ihrer hohen Eingangsempfindlichkeit ist durch geeignete Abschirmung, räumliche Trennung sowie zusätzliche Abschwächer darauf zu achten, dass die Verbindung vollständig durch den Schalter unterbrochen werden kann. So sind Bluetoothmodule auch mit einem Abschlusswiderstand direkt am Antenneneingang in der Lage, in unmittelbarer Nähe zueinander eine zuverlässige Verbindung untereinander aufzubauen.

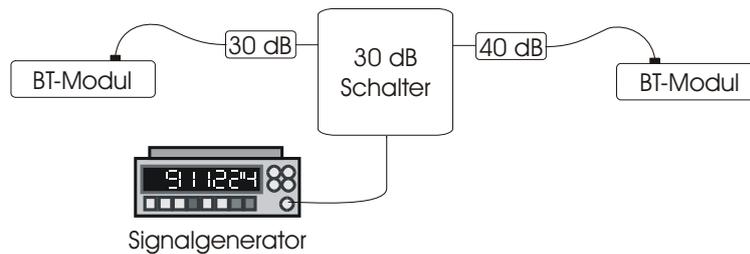


Abbildung 5.29: Aufbau zur Messung des zeitlichen Übertragungsverhaltens von Bluetoothmodulen. Die Module sowie die Datenübertragung werden über einen PC gesteuert.

Die Unterbrechungen erfolgten periodisch unter Variation der Austastlänge und der Austastfrequenz. Abhängig von der auftretenden Spannweite der Übertragungszeit wurden zwischen 100 und einigen 1.000 Messungen pro Telegrammlänge durchgeführt. Es zeigte sich, dass für kurze Datentelegramme von 30 bis 50 Byte Länge, wie sie in der Schifffahrt üblich sind, selbst bei Unterbrechungen der Funkverbindung mit bis zu  $10 \mu\text{s}$  Länge bzw. Wiederholfräquenzen von bis zu 5 kHz kaum Auswirkungen auf das Übertragungsverhalten auftraten. Die Latenz- bzw. Übertragungszeiten erhöhten sich ebenfalls nur geringfügig, insgesamt war jedoch ein höherer Jitter erkennbar.

Im Vergleich zwischen Abbildung 5.30 und Abbildung 5.31 ist dabei deutlich erkennbar, wie das in dieser Messung verwendete Modul bei Störungen die Daten zunehmend in späteren Zeitfenstern übermittelt, da aufgrund anhaltender Störung immer häufiger Pakete gestört werden und so die erfolgreiche Übertragung hinausgezögert wird.

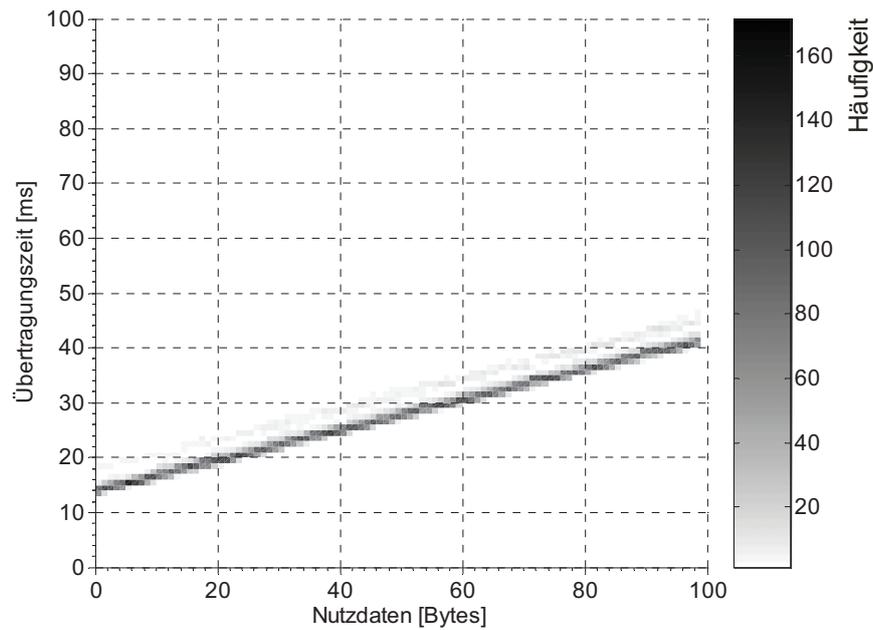


Abbildung 5.30: Messung der Beeinflussung der Datenübertragung eines Bluetoothmoduls durch eine pulsformige Störquelle mit 2-kHz-Repetierfrequenz

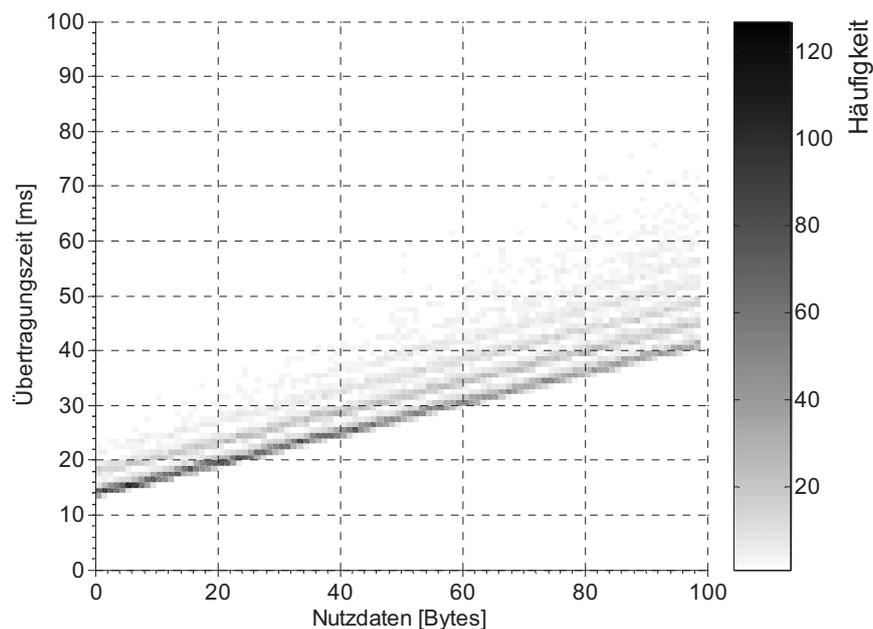


Abbildung 5.31: Messung der Beeinflussung der Datenübertragung eines Bluetoothmoduls durch eine pulsformige Störquelle mit 14-kHz-Repetierfrequenz. Die Übertragung verzögert sich für große Datentelegramme zunehmend.

In Abbildung 5.32 ist für dasselbe Modul für verschiedene Störfrequenzen die gemessene Häufigkeit an Übertragungszeiten für ein 60 Byte langes Telegramm aufgeführt. Bei Störungen steigen demnach, wie zu erwarten, sowohl die Latenzzeit als auch der Jitter in Abhängig-

keit der Telegrammlänge bei allen Modulen an, wobei auch hier jedes Modul unterschiedlich stark reagiert.

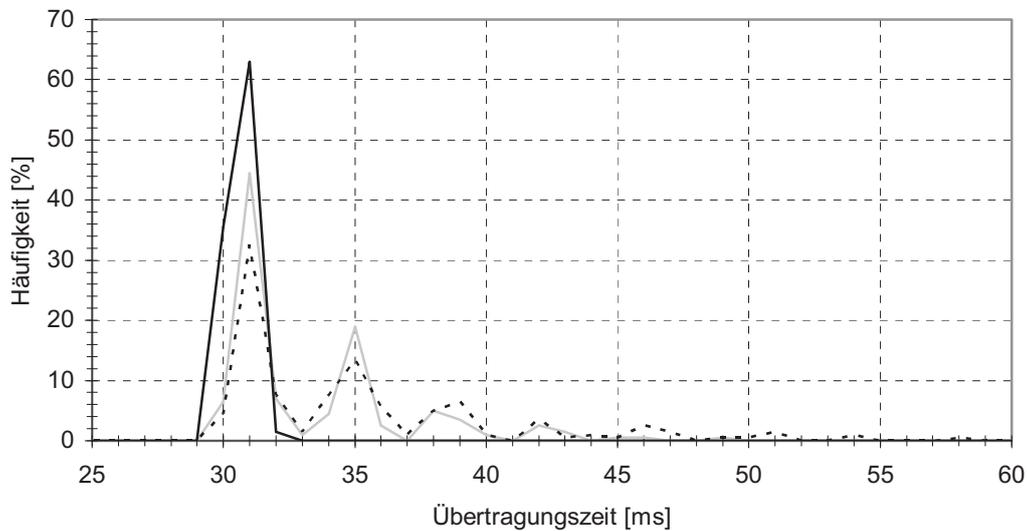


Abbildung 5.32: Histogramm über Messungen der Beeinflussung der Datenübertragung eines Bluetoothmoduls durch eine pulsformige Störquelle für verschiedene Störfrequenzen. Schwarz ohne Störung, grau 4-kHz-, punktiert 14-kHz-Wiederholfrequenz. Die übertragene Paketlänge betrug 60 Byte.

Sofern die Menge der zu übertragenden Daten und damit auch die Länge des Bluetoothpakets klein in Bezug auf die Störfrequenz war, zeigten sich nur geringe Auswirkungen durch periodisch wiederholtes Stören der Übertragungsstrecken. Austastlängen deutlich unterhalb  $1 \mu\text{s}$  zeigten nur geringe Störungen.

Bei einer geeigneten Anpassung der Modulfirmware ist somit, auch im Störfall durch Radardienste, das Übertragen zeitkritischer Informationen möglich. Die Anpassung der Firmware auf den Datentyp bietet sich jedoch auch im ungestörten Fall an, da sich bei vielen der untersuchten Module das zeitliche Übertragungsverhalten im Hinblick auf die Übertragung von NMEA-Daten optimieren lässt. Alternativ bietet sich beispielsweise auch ein neues Profil zum Übertragen maritimer Datenprotokolle an [Schütte04].

Für die häufigsten Anwendungen der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik ist im Fall gut angepasster Module, wie beispielsweise in Abbildung 5.26 erkennbar, selbst bei Störung die Übertragungscharakteristik als ausreichend anzusehen. Bei schnellen Prozessen, wie der Drehzahlüberwachung einer Maschine oder der Übertragung gyroskopischer Daten, sind jedoch hohe Anforderungen zu stellen. Hier ist im Einzelfall zu klären, inwieweit eine funkgestützte Lösung nötige Reserven bereitstellt.

## 5.4. Personenschutz, Elektrosmog

In den vergangenen Kapiteln wurden viele wesentliche Fragen in Bezug auf eine Anwendung drahtloser Kommunikationssysteme im Schiffbau untersucht und diskutiert. Interessanterweise wurden die Probleme bzw. Ängste von Besatzungsmitgliedern, Ausrüstern und Klassifikationsgesellschaften im Umgang mit dieser Technik oft an anderen Stellen gesehen als es aus Sicht dieser Arbeit zu vermuten wäre.

Eine der dabei am häufigsten im Zusammenhang mit dem Einsatz drahtloser Datenübertragungstechniken eingebrachten und diskutierten Fragen, stellt das umgangssprachlich oftmals mit Elektrosmog bezeichnete Gebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit mit der Umwelt, auch EMVU genannt, dar. Kern der Fragestellung ist, ob es durch eine zunehmende drahtlose Datenübertragung an Bord von Schiffen zu einer Gefährdung oder gesundheitlichen Beeinträchtigung des Personals, aber auch der Passagiere kommen kann. Da das Fachgebiet der EMVU nicht in der Elektrotechnik, sondern im Wesentlichen in der Medizin angesiedelt ist, können und insbesondere sollen in dieser Arbeit keine Aussagen über die oft und kontrovers diskutierten, möglichen biologischen Wirkungen der Strahlung gemacht werden. Speziell kann im Rahmen der elektromagnetischen Verträglichkeit auch nur eine Bewertung von Größen in Bezug auf bestehende Grenzwerte erfolgen, und nicht eine Bewertung der Grenzwerte an sich. Trotzdem lassen sich im Hinblick auf die Fragestellung bzw. die gültigen Grenzwerte einige wichtige, grundlegende Aspekte zu diesem Thema diskutieren.

Unbestritten handelt es sich bei den Funkübertragern um Quellen elektromagnetischer Strahlung, deren Feldern das Personal aber auch die Passagiere auf Schiffen kontinuierlich ausgesetzt werden. Beachtet werden muss jedoch, dass die Funkübertrager nur einen sehr kleinen Bruchteil der gesamten auf dem Schiff vorhandenen Strahlung darstellen. Wie in Tabelle 5.6 sowie Tabelle 5.7 nach Dienst und Sendeleistung aufgelistet, existieren an Bord von Schiffen viele unterschiedliche Funkdienste. Zu diesen kommt weiterhin die von zivilen, landgestützten Funkdiensten ausgehende Strahlung. Das durch die hinzu kommenden Funkübertrager erzeugte Feld ist selbst in der Umgebung zu den Sendern im Vergleich zu der bereits vorhandenen Strahlung gering, was insbesondere an der niedrigen Sendeleistung von maximal 100 mW liegt. Diese Sendeleistung von Bluetooth- oder auch WLAN-Modulen beträgt einen Bruchteil der Leistung von Mobiltelefonen bzw. Funkgeräten (Tabelle 5.8). Selbst beim Einsatz mehrerer unabhängiger Netze kommt es, betrachtet über das gesamte Spektrum und bei Wichtung nach Frequenz, nicht zu einer nennenswerten Erhöhung der Strahlungsexposition.

maritime Funkdienste	Sendeleistung [W]
Radar (pulsförmig)	25.000
MW-Radiotelefonie	150
UKW-Radiotelefonie	25
Inmarsat	25
COSPAS-SARTSAT	5

zivile Funkdienste	Sendeleistung [W]
CB-Funk	4
D-Netz	2
E-Netz	1
DECT	0,25
Bluetooth	0,1
WLAN	0,1

Tabelle 5.8: Maximale Sendeleistungen maritimer und ziviler Funkdienste

Zuständig für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen für gewerbliche Zwecke oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen in Deutschland ist die „Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“ [26BimSchV]. Diese Verordnung gilt für stationäre Anlagen.

Dort heißt es „Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich in Gebäuden oder auf Grundstücken, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Sendefunkanlagen [...] Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke für den jeweiligen Frequenzbereich nicht überschritten werden“. Folgende Grenzwerte sind hierbei anzuwenden:

Frequenzband	elektrische Feldstärke [V/m]
10 bis 400 MHz	27,5
400 bis 2.000 MHz	$1,375 \cdot \sqrt{\frac{f}{\text{MHz}}}$
2 bis 300 GHz	61

Tabelle 5.9: Gemäß Anhang 1 der 26. BImSchV festgelegte Grenzwerte der Effektivwerte der elektrischen Feldstärke, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle

Abgeleitet ist die 26. BImSchV von der DIN VDE-Norm 0848, Teil 2. Dort gelten für die Grenzwerte der unmittelbaren Gefährdung im Expositionsbereich 2, also innerhalb von Gebieten, in denen nicht nur mit Kurzzeitexposition gerechnet werden kann, die in Tabelle 5.10 bzw. in Abbildung 5.33 aufgeführten Grenzwerte [VDE0848].

Frequenzband	Effektivwert der elektrischen Feldstärke [V/m]
30 bis 140 kHz	300
140 bis 920 kHz	300
0,92 bis 10 MHz	$275 \cdot \left(\frac{f}{\text{MHz}}\right)^{-1}$
10 bis 30 MHz	27,5
30 bis 400 MHz	27,5
400 bis 2000 MHz	$1,375 \cdot \sqrt{\frac{f}{\text{MHz}}}$
2 bis 300 GHz	61,4

Tabelle 5.10: Grenzwerte entsprechend DIN VDE-Norm 0848, Teil 2, für die unmittelbare Gefährdung innerhalb von Gebieten, in denen nicht nur mit Kurzzeitexposition gerechnet werden darf, also bei Einwirkzeiten  $\geq 6$  Minuten

Für Einwirkzeiten kleiner als 6 Minuten erhöht sich der Grenzwert zwischen 2 und 300 GHz auf 226 V/m. Der Spitzengrenzwert der unmittelbaren Gefährdung in Gebieten, in denen nicht nur mit Kurzzeitexposition gerechnet werden kann, beträgt in diesem Frequenzbereich 2000 V/m.

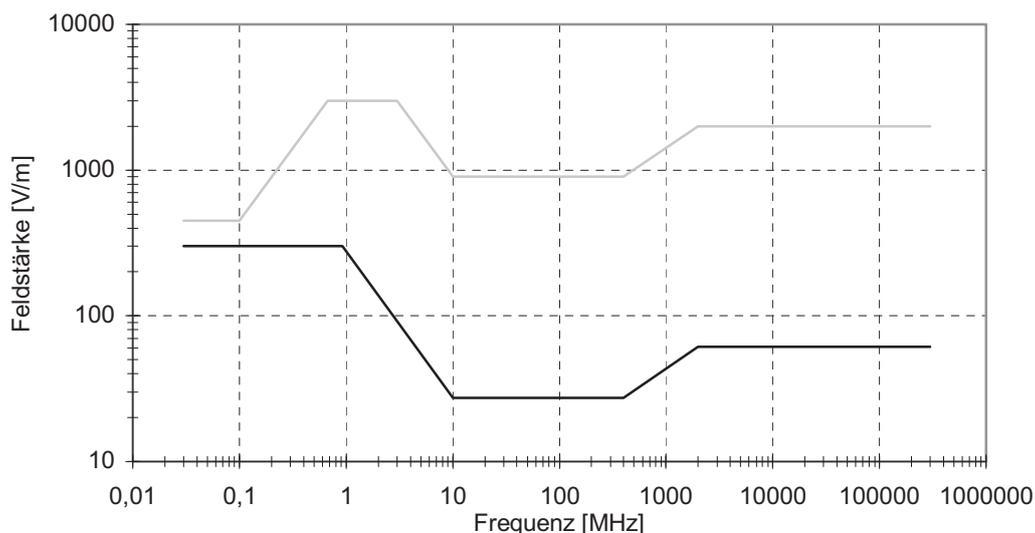


Abbildung 5.33: Grenzwerte entsprechend DIN VDE-Norm 0848, Teil 2, für die unmittelbare Gefährdung innerhalb von Gebieten, in denen nicht nur mit Kurzzeitexposition gerechnet werden kann. Untere Kurve bei Einwirkzeiten  $\geq 6$  Minuten, obere Kurve Spitzengrenzwerte.

Durch die Regularien für die Nutzung des ISM-Bands sind die Sendeleistungen begrenzt, so dass in einer Entfernung von einem Meter Feldstärken von 2,45 V/m nicht überschritten werden. Diese Feldstärken werden gemäß den durchgeführten Messungen jedoch nur äußerst selten erreicht. Wie die Messungen an Funkübertragungsmodulen in Kapitel 4.1 zeigen, werden selbst in unmittelbarer Nähe zu den Sendern die Grenzwerte für die Langzeitexposition deutlich unterschritten.

Unter Annahme einer maximalen Sendeleistung, wird der Grenzwert von 61,4 V/m erst bei über 620 gleichzeitig sendenden Funkmodulen erreicht. Ebenso ergibt die Berücksichtigung der Spitzenwertwirkung, wie sie in Kapitel 4.3 gemessen wurde, selbst unter der Annahme vollständig phasensynchroner konstruktiver Addition der einzelnen Signale, einen Wert von über 800 zum Erreichen des Grenzwerts nötigen Sendern. Selbst bei der Nutzung vieler unabhängiger Netze ist also eine Einhaltung des Personenschutzes entsprechend den gültigen Grenzwerten uneingeschränkt gewährleistet.

Diese Ergebnisse werden von anderen Arbeitsgruppen auch durch Simulationen bestätigt [Bernardi04a].

## 6. Entwicklung und Untersuchung drahtloser Datenübertragungssysteme auf Schiffsbrücken

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erwähnt, bietet sich im Schiffbau eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für drahtlose Datenübertragungseinrichtungen an. Diese beschränken sich dabei nicht auf den im Laufe der Messungen vornehmlich untersuchten Schiffstyp Kreuzfahrtschiff. Vielmehr finden sich auf allen Schiffen unterschiedlicher Größe mögliche Anwendungen. Ein besonderer Vorteil der drahtlosen Datenübertragung ist, dass diese sich auch einfach und bequem nachrüsten lässt, was gleichzeitig die Erprobung drahtloser Datenübertragungssysteme wesentlich vereinfacht.

Bezogen auf die unterschiedlichen Bereiche innerhalb eines Schiffs lassen sich verschiedene Anwendungsgebiete abgrenzen. Hierzu gehören insbesondere:

Drahtlose Kommunikation innerhalb eines geschlossenen Geräts oder Systems:

- innerhalb von Brückenkonsolen und Schaltschränken,
- zwischen einzelnen Modulen bzw. Komponenten,
- Kommunikation innerhalb der Elektronikräume.

Drahtlose Kommunikation aus einem Gerät oder System in die Umgebung:

- aus der Konsole auf die Brücke,
- Anbindung mobiler Eingabegeräte, z.B. Trackballs und Tastaturen,
- Datenübertragung zu Tochteranzeigen,
- Datenübertragung zwischen getrennten Konsolen,
- einheitliche Schnittstelle für PCs, Lotsenrechner etc.

Drahtlose Kommunikation vom Außendeck auf die Brücke:

- Anbindung von Messwertaufnehmern außerhalb der Brücke, z.B. meteorologische Daten, Statusdaten der Rettungsboote bzw. Rettungsinseln,
- Anbindung entfernter Messwertaufnehmer über Richtfunkstrecken auf dem Deck, z.B. Wellengang- oder Grünwasserdetektoren im Bugbereich von Frachtschiffen.

Drahtlose Kommunikation innerhalb von Frachträumen, Fluren, Decks:

- drahtlose Systemtechnik, z.B. Registrierkassen, Buchungsterminals, Bestandserfassung, Personenerfassung,
- drahtlose Brandmeldeanlagen sowie Sicherheitstechnik,
- Synchronisation von Uhren,
- drahtlose Informationsanzeigen, Monitore,
- drahtlose Datenübertragung in Maschinen- und Klimaräumen.

Eine zuverlässige Kommunikation ist zwischen einzelnen Räumen innerhalb eines Schiffs aufgrund der dazwischen liegenden, stark dämpfenden Wände nicht sichergestellt. Hier bietet sich bei der Kommunikation zwischen unterschiedlichen Abschnitten ein zentraler Empfänger zur Anbindung an das interne Schiffsnetz an. Dadurch ließen sich viele einzelne Quellen bündeln und über eine drahtgebundene Leitung, beispielsweise auf Ethernet-Basis, innerhalb des Schiffs weiterleiten.

Ebenso ließen sich auch auf dem Außendeck des Schiffs befindliche Messwertaufnehmer über einen zentralen, zweckmäßigerweise oberhalb der Brücke befindlichen Empfänger anbinden. Von diesem aus erfolgt dann ein gebündelter Zugang zu einem der Schiffsrechner.

### 6.1. Realisierung drahtloser Datenübertragungssysteme

Den letzten wichtigen Schritt bei der Entwicklung und Untersuchung der drahtlosen Datenübertragungstechnik stellte die Realisierung von Demonstrationssystemen, die auch für Langzeittestsysteme geeignet sind, dar. Die Anwendungsbereiche sollten dabei möglichst vielen der diskutierten Szenarien gerecht werden, um umfassende Daten über die Zuverlässigkeit und EMV sowie Erfahrungen bezüglich der Installation zu erhalten.

Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Lösungen, basierend auf den untersuchten, kommerziell erhältlichen Modulen, entwickelt. Diese dienten dazu, praxisbezogene Erfahrungen bezüglich des Einbaus, der Reichweite sowie der Handhabung zu gewinnen. Die entwickelten Lösungen wurden entsprechend ihres Anwendungsbereichs an Bord von Schiffen installiert sowie betrieben und vielfältigen Tests unterzogen. Eine Übersicht über die entwickelten Systeme ist in Kapitel 8.2 gegeben.

#### 6.1.1. Drahtlose Multifunktionsanzeige

Als einfachste Form der drahtlosen Anzeige bietet sich die drahtlose Multifunktionsanzeige an. Bei dieser werden die vom Schiffsrechner aufbereiteten Daten gebündelt und über eine drahtlose Schnittstelle auf einen PC mit großflächiger Anzeige gesendet und dort zur Darstel-

lung gebracht. Konkreter für den Einsatz auf der Brücke ist die Multifunktionsanzeige, zweckmäßig realisiert durch einen Tablet-PC<sup>1</sup> oder ähnliche Bauformen. Mittels geeigneter grafischer Bedienoberflächen kann der Anwender hier zwischen verschiedenen Anzeigemas-ken, wie Schiffsführung, Radar oder auch klassischer Instrumentenanzeige wählen und dabei, durch Filterung, die für ihn interessanten Größen darstellen (Abbildung 6.1). Durch die heut-zutage kompakten Bauformen und geringen Gewichte bei gleichzeitig großen Bildschirmgrö-ßen, wird, in Verbindung mit den integrierten Stromversorgungen sowie den integrierten drahtlosen Schnittstellen, ein hohes Maß an Flexibilität erreicht. Durch die Bedienung von Tablet-PCs mittels Touchscreen oder Stift wäre gleichzeitig eine intuitive Bedienung gewähr-leistet. Da diese Lösungen auf verbreiteten Betriebssystemen wie Windows oder Linux auf-setzen, kann der Anwender hier neben der Darstellung der nautischen Daten weitere für ihn wichtige Programme ausführen.



Abbildung 6.1: Laptop-PC als universelle Multifunktionsanzeige. Der Anwender kann hier zwischen verschie- denen Darstellungsmasken und darzustellenden Größen wählen. Auch ließen sich weitere Pro- gramme oder Dienste, wie z.B. VoIP<sup>2</sup> oder CCTV<sup>3</sup> implementieren. Foto: SAM Electronics [SAM]

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Basis eines Subnotebooks eine Multifunktionsanzeige mit grafischer Oberfläche entwickelt, die häufig verwendete NMEA-Daten visualisieren sowie aufzeichnen kann (Abbildung 8.3). Die Anbindung erfolgt über ein externes USB-Bluetoothmodul, welches sich bei Bedarf mit einem an einen Schiffsrechner angebundnen Bluetoothserver, bestehend aus einem Datenkonverter (Abbildung 8.5) sowie einem offenen Bluetoothmodul, paaren kann.

<sup>1</sup> Laptop-PC, der in ein tragbares Touchscreen integriert ist

<sup>2</sup> VoIP: Voice over Internet-Protocol, Telefondienst

<sup>3</sup> CCTV: Closed Circuit Television, System zur Videoüberwachung

Diese Realisierung entspricht gleichzeitig dem Bereitstellen einer einheitlichen, einfach zu verwendenden Schnittstelle, analog zu dem gelegentlich zitierten „Pilots Plug“: Lotsen fordern immer wieder die Möglichkeit, über ihre eigene Hard- bzw. Software und damit über ihre gewohnte sowie angepasste Navigationsoberfläche auf wesentliche nautische Daten zugreifen zu können. Andererseits wird es vom Reeder sowie von den Kapitänen mitunter nicht gerne gesehen, wenn der Lotse an den Instrumenten im Hauptfahrstand arbeitet bzw. sogar Einstellungen verändert. Aus diesem Grund lassen einige Reeder für die Lotsen spezielle Anzeigen installieren, an denen diese arbeiten können, ohne den übrigen Brückenbetrieb zu beeinflussen. Eine solche Anzeige, meistens abseits vom Hauptfahrstand im vorderen Bereich der Brücke installiert, ist in Abbildung 8.3 links neben der in dieser Arbeit entwickelten drahtlosen Lösung bzw. in Abbildung 5.3 rechts neben der LogPer-Antenne zu sehen. Durch eine drahtlose, unidirektionale Schnittstelle könnte der Lotse seinen eigenen PC bzw. seine eigene Hardware verwenden und so für optimale Arbeitsbedingungen bei minimalem Aufwand sorgen.

Durch geeignete Wahl der drahtlosen Schnittstelle könnten dabei nicht nur nautische bzw. technische Daten des Schiffs oder der Schiffsautomatisierung, sondern insbesondere auch Dienste mit hoher Bandbreite, also Echtzeit-Videodienste wie Radar oder CCTV implementiert werden. Parallel ließe sich auch eine VoIP Kommunikationsschnittstelle realisieren, die Dienste wie Pager, Telefon oder Funkgerät ergänzen bzw. sogar ersetzen könnte. Da heutige Laptops und Tablet-PCs in der Regel sowohl über Bluetooth- als auch über WLAN-Schnittstellen verfügen, ist dies selbst bei Beschränkung der Dienste auf einzelne Funkübertragungsstandards kein Problem.

#### 6.1.2. Drahtlose Tochteranzeige

Als Ergänzung zu der drahtlosen Multifunktionsanzeige auf Basis eines Laptop-PCs wurde aus im Brückenbau verwendeten Anzeigeelementen eine tragbare Tochteranzeige realisiert (Abbildung 8.2). Die Datenübertragung erfolgt ebenfalls über eine Bluetoothstrecke. Um einen vollständig tragbaren Betrieb zu gewährleisten, besitzt die Anzeige eine Pufferbatterie zum mehrstündigen freien Betrieb. Abgesehen vom Batteriebetrieb, entspricht diese Lösung dem Kabelersatz zu den hauptsächlich im Deckenbereich verwendeten Tochteranzeigen bzw. dem einfachsten Fall einer Nach- bzw. Umrüstung mithilfe von Standard-Anzeigekomponenten.

Sinnvoll ist in diesem Zusammenhang eine Bündelung der Telegramme über eine einzige Funkstrecke, im Gegensatz zu den separaten Datenkabeln im Fall der drahtgebundenen Kommunikation. Seitens der Schiffsrechner kann dieses im Allgemeinen über eine simple Konfiguration der Schnittstelle erfolgen, die eine Ausgabe mehrerer Datensätze statt eines einzigen bewirkt. Auf der Seite der Tochteranzeigen ist jedoch zu beachten, ob die seriell eintreffenden Telegramme bezüglich der einzelnen Anzeigeelemente gefiltert werden müssen.

Anzeigeeinstrumente können in der Regel mehr als ein Telegramm auswerten und darstellen, so dass es hier unter Umständen zu einer doppeldeutigen Darstellung kommen kann. Mit Hilfe einer der Bluetoothstrecke nachfolgenden Mikrocontrollerschaltung, wie sie ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde (Abbildung 8.5), könnte der serielle Telegrammstrom in diesem Fall auf separate Ausgänge entbündelt bzw. individuell gefiltert werden. Eine derartige Schaltung könnte bei Bedarf auch eine Digital-Analog-Wandlung der Telegramminformationen für Anzeigen mit Analogeingang, z.B. im 4-20 mA-Standard, durchführen.

### 6.1.3. Praxistests auf Schiffen

Es zeigte sich bei den Erprobungen der realisierten Systeme, dass Schiffsbrücken aufgrund ihrer metallischen Struktur im Vergleich zu normalen Umgebungen in den häuslichen und gewerblichen Bereichen ein besseres Umfeld zur Funkübertragung bieten. Dadurch ließen sich deutlich höhere Übertragungreichweiten erzielen, was die Ergebnisse aus Kapitel 5 bestätigen.

Die durchgeführten Kommunikationstests aus geschlossenen Konsolen auf die Brückenbereiche bzw. aus den Brücken auf die Schiffsdecks verliefen problemlos und zuverlässig. Durch die großflächigen abnehmbaren und vollständig lackierten und damit von der übrigen Struktur elektrisch isolierten Konsolenwände mit ihren langgezogenen Lüftungsschlitzen erfahren die hochfrequenten Funksignale lediglich eine vernachlässigbare Dämpfung. Selbst beim Einbau der Sender tief in die Konsolen bzw. innerhalb der doppelten Böden unterhalb der Konsolen ist deshalb eine ausreichende Ausleuchtung der Brücke gewährleistet.

Aufgrund der massiven, metallverstärkten Türen und Türrahmen sowie aufgrund der metallverstärkten und mitunter sogar verschweißten Wände ergab sich, dass zwischen den einzelnen Räumen auf der Brücke sowie innerhalb eines Schiffs eine zuverlässige Kommunikation nicht gewährleistet werden kann. So brach die Kommunikation mit dem vollständigen Schließen der zwischen Sender und Empfänger liegenden Türen ab. Wie zu erwarten, stellten vorhandene Fenster keine Hindernisse dar. So konnten selbst bei Übertragungstests mit in den Brückenkonsolen integrierten Sendern und Antennen Verbindungen auf die rückwärtigen Schiffsdecks hergestellt werden. Entsprechend den Ergebnissen ist bei hohen Entfernungen zur Brücke allerdings eine direkte Sichtverbindung vorteilhaft. Im Bereich von Abschattungen durch Aufbauten hinter der Brücke bestehen nicht immer alternative Signalwege über umliegende reflektierende Strukturen, weshalb es hier zu einer starken Reduktion der Bandbreite bis hin zur Unterbrechung der Verbindung kommen kann.

Bei den Ausbreitungstests innerhalb der Brücken sowie der Frachtdecks (Abbildung 6.2) ließen sich bereits mit Modulen mittlerer Leistung hohe Distanzen überbrücken. Eine zuverlässige Kommunikation über den gesamten zusammenhängenden Bereich war selbst bei Längen von über 150 m gewährleistet.

Gleiche Ergebnisse konnten auch innerhalb von Fluren oder in miteinander verbundenen Ebenen, wie den Treppenhäusern, beobachtet werden. Auch in diesen ließ sich eine zuverlässige Kommunikation über große Entfernungen erzielen. Insbesondere zeigte sich im Schiffsinnen, dass aufgrund der reflektierenden Wände keine direkten Sichtverbindungen nötig sind. So waren Verbindungen in Treppenhäusern über mehrere Decks oder auch in verschachtelten Gängen möglich, vorausgesetzt, es befanden sich keine Türen bzw. Schotte zwischen den Funkmodulen.



Abbildung 6.2: Ausbreitungsmessung innerhalb des Frachtdecks eines Fährschiffs. Selbst mit Modulen mittlerer Leistung und ohne direkten Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger konnte der gesamte Frachtbereich zuverlässig abgedeckt werden.

Der gleichzeitige Betrieb der unterschiedlichen Radaranlagen sowie der übrigen vorliegenden In- und Außerbandsender während der durchgeführten Messungen zeigte keine erkennbaren Beeinflussungen. Auch bei gleichzeitigem Betrieb konkurrierender Funkübertragungsnetze bzw. -standards war keine Einschränkung der Übertragungsqualität erkennbar.

## 6.2. Langzeittest drahtloser Datenübertragungssysteme

Neben Demonstrationssystemen zur Erprobung der drahtlosen Datenübertragung wurden auch Langzeitintegrationen von Testsystemen in Schiffsbrücken durchgeführt. Hierdurch konnten zum einen die Zuverlässigkeit bzw. Stabilität der Funkstrecken und zum anderen die Zuverlässigkeit der Schnittstellen sowie der Auswerte- und Anzeigeelektronik getestet bzw. demonstriert werden.

Im Rahmen der Messungen wurden auf Fähr- und Kreuzfahrtschiffen drahtlose Funkübertragungssysteme in die Brücken bzw. auf den Schiffsdecks integriert und während mehrwöchi-

ger Testzeiten betrieben (Tabelle 6.1). Bei allen Tests nahm die EMV einen besonderen Stellenwert ein.

Es wurden wiederum die wichtigsten Anwendungsbereiche berücksichtigt:

- drahtlose Kommunikation innerhalb einer Konsole,
- drahtlose Kommunikation zwischen unterschiedlichen Konsolen,
- drahtlose Kommunikation aus der Konsole auf einen Laptop innerhalb der Brücke,
- drahtlose Kommunikation von Decks außerhalb der Brücke auf die Brücke,
- drahtlose Kommunikation von Decks außerhalb der Brücke in eine Konsole.

Die ersten drei Szenarien sind stellvertretend für die Kommunikation innerhalb der Brücke zwischen einem Schiffsrechner und den Tochteranzeigen bzw. tragbaren Anzeige- und Steuergeräten. Die beiden letzten sind stellvertretend für die Kommunikation von mess- und regelungstechnischer Elektronik außerhalb der Brücke zu einem Schiffsrechner auf der Brücke für die weitere Datenverarbeitung. Bei den Tests wurden sowohl einzelne Funkstrecken als auch parallel arbeitende Systeme installiert. Zur Dokumentation der Zuverlässigkeit und der EMV waren alle Systeme in der Lage, einen Ausfall bzw. Verzögerungen in der Verbindung zu erkennen und diese sowie die übertragenen Daten zu speichern. Die Schiffe, auf denen Langzeitinstallationen vorgenommen wurden, sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. In Tabelle 8.1 sind zu diesen Schiffen weitere Informationen zusammengefasst.

Schiff	Zeitraum	realisierte Funkstrecken	Messdauer
Jewel of the Seas	03-04.2004	innerhalb einer Konsole	3 Wochen
Nils Holgersson	07-08.2004	aus der Konsole auf die Brücke	3 Wochen
Norwegian Jewel	06-07.2005	innerhalb der Konsole, zwischen Konsolen, vom Außendeck auf die Brücke	4 Wochen
Pride of Hawaii	02-04.2006	zwischen Konsolen, vom Außendeck auf die Brücke	5 Wochen

Tabelle 6.1: Durchgeführte Langzeittests drahtloser Datenübertragungssysteme auf Schiffen

Das auf der *Nils Holgersson* [TTLine] installierte System zur Datenübertragung aus einer geschlossenen Konsole auf einen auf der Brücke befindlichen Laptop wurde während des normalen Fährbetriebs zwischen Trelleborg und Travemünde getestet. Um weiterführende Tests unter erschwerten Bedingungen zu erzielen, wurden vor der Werftprobefahrt Systeme auf Schiffen der Meyer Werft installiert und während sowie nach dieser im mehrwöchigen Betrieb getestet. Bei einer Werftprobefahrt werden die Schiffe bezüglich aller Parameter extremen Bedingungen ausgesetzt. So finden innerhalb einer Erprobungsfahrt beispielsweise

mehrmalige und anhaltende Stromausfalltests statt. Diese Testumgebungen sowie die Möglichkeit zur Installation von Systemen in noch nicht an den Reeder übergebene Schiffe erlauben außerdem deutlich umfangreichere Installationen sowie ausführlichere Tests als dies im normalen Fährbetrieb möglich wäre.

Da während des regulären Werft- und Fährbetriebs im Allgemeinen nur äußerst selten die Möglichkeit zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion der installierten Systeme besteht, mussten die installierten Komponenten mehreren Anforderungen genügen. Zum einen mussten sie wartungsfrei arbeiten und in der Lage sein, sich bei Störungen bzw. nach einem Stromausfall selbst neu zu starten; dies ist vor allem während der Werftprobefahrt wichtig, da aufgrund von Tests mehrmals für einen längeren Zeitraum ein Stromausfall simuliert wird bzw. zu Wartungszwecken Teile des Systems von der Stromversorgung getrennt werden. Zum anderen mussten die Systeme einfach zu transportieren, zu montieren und in das laufende System zu integrieren sein. Wegen des geringen Platzangebots in den heutigen integrierten Brücken müssen die Systeme schließlich kompakt und robust sein sowie mit möglichst wenigen externen Komponenten wie Netzteilen oder Konvertern auskommen.

Im Fall von im Außenbereich installierten Einheiten mussten diese ebenfalls wetterfest und folglich hitze-, kälte- und regenbeständig sein. Wegen des ungeschützten Standorts bedeutete dies einen Temperaturbereich zwischen 0 und ca. 70 °C, anhaltende direkte Sonneneinstrahlung, Dauerregen sowie Salznebel und Windstärken mit Geschwindigkeiten von mehr als 150 km/h. Dieses stellte eine besondere Herausforderung an die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Hard- und Software.

#### 6.2.1. Kommunikation innerhalb der Schiffsbrücke

Der schematische Aufbau für die Funkstrecke innerhalb einer Brücke, also für die Verbindung innerhalb einer Konsole, zwischen zwei unterschiedlichen Konsolen und zwischen einer Konsole und einem auf der Brücke befindlichen Laptop, ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Die Funkstrecke besteht aus drei Komponenten:

- Mikrocontrollerschaltung zur Anbindung an einen Schiffsrechner bzw. nautische Instrumente,
- Bluetoothübertragungsstrecke zum Übertragen der Daten,
- Laptop zum Protokollieren und Auswerten der Daten.

Als Datenquelle dienten entweder in der Brückenkonsole installierte Geräte, wie das GPS oder das AIS, deren Rohdaten abgegriffen wurden, oder Rechner des Schiffsnetzwerks, deren bereits zusammengefasste NMEA-Daten übertragen und aufgezeichnet wurden. Die Anzahl der übertragenen Telegramme lag zwischen fünf und zehn Telegrammen pro Sekunde.

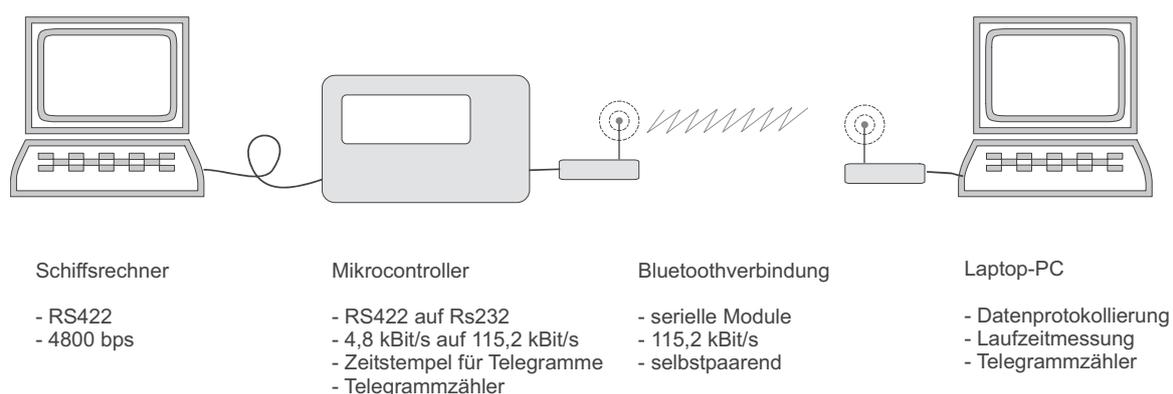


Abbildung 6.3: Schematischer Aufbau der Teststrecke zur drahtlosen Kommunikation innerhalb einer Konsole oder Schiffsbrücke

Viele der auf der Brücke befindlichen Systeme verfügen über mehrere Ausgabeschnittstellen bzw. sind in der Lage, über eine Schnittstelle mehrere Empfänger zu treiben, so dass die Funkübertrager bequem nachträglich ergänzt bzw. parallel angeschlossen werden konnten. Am besten eignet sich jedoch die Anbindung an einen Ausgang eines Schiffrechners (Abbildung 6.4). Bei diesem können aus der Gesamtheit aller im System vorliegenden und bereits aufgearbeiteten Telegramme die zur Darstellung bzw. zur Übertragung benötigten Datentelegramme ausgewählt sowie deren Wiederholungsrate individuell angepasst werden.



Abbildung 6.4: In die Backbord-Brückenock eines Kreuzfahrtschiffs installierter, drahtlos über Bluetooth an einen Schiffsrechner angebundener Laptop

Gemäß NMEA 0183-Standard ist der am häufigsten verwendete Schnittstellentyp zum Austausch der nautischen Datentelegramme die symmetrische, serielle RS422-Schnittstelle mit einer Geschwindigkeit von 4.800 Bit/s. Bluetoothsender verfügen im Allgemeinen lediglich über die asymmetrische, serielle RS232-Schnittstelle, welche in Consumerprodukten verwendet wird. Diese besitzt eine maximale Geschwindigkeit von 115,2 kBit/s. Eine Schaltung (Abbildung 8.5) muss deswegen zuerst die vom Schiffsrechner bzw. die von einem Gerät empfangenen Daten umwandeln. Durch ein Anheben der Übertragungsgeschwindigkeit vor der Übermittlung an die Bluetoothmodule wird erreicht, dass diese das zu übertragende Telegramm in kürzerer Zeit erhalten und damit, bedingt durch die interne Firmware, auf weniger Bluetoothdatenpakete aufteilen. Dadurch verringert sich sowohl die Übertragungszeit als auch die Fehlerwahrscheinlichkeit bei externen Störungen.

Da der NMEA-Standard keinen Zeitstempel beinhaltet bzw. vorsieht, ermittelt ein Mikrocontroller für die empfangenen Daten einen proprietären, NMEA-konformen Zeitstempel. Dieser wird unmittelbar im Anschluss an die eigentlichen Daten übertragen. Nach dem Empfang durch den Laptop erzeugt dieser einen zweiten Zeitstempel. Durch beide Zeitstempel lassen sich die Laufzeiten der Telegramme bestimmen. Außerdem erhalten Endgeräte dadurch die Möglichkeit, das Alter der erhaltenen Telegramme abzuschätzen und bei Verzögerungen durch massive Störungen der Funkstrecke ggf. alte Telegramme zu verwerfen. Durch zählen der Telegramme auf beiden Seiten können weiterhin bei unregelmäßigem Datenaufkommen Verluste einzelner ganzer Telegramme ermittelt werden. Der Verlust bzw. die Änderung einzelner Teile des Telegramms lässt sich bereits über die im NMEA-Telegramm enthaltene Prüfsumme erkennen. Die gesamten übertragenen Telegramme sowie die zusätzlich generierten Daten werden auf einem PC zur späteren Analyse gespeichert und nach dem Abbau des Systems im Labor ausgewertet.

Wegen der langen Testzeiten sowie des hohen Stromverbrauchs von Bluetoothsendern benötigt das Gerätepaar, bestehend aus Mikrocontrollerschaltung und Bluetoothsender, Netzspannung zum Betrieb. Es ist jedoch in der Lage sich nach einem Stromausfall unmittelbar sowie selbsttätig neu zu initialisieren.

Als PC zur Datenspeicherung und Auswertung wurde ein Laptop verwendet, da sich dieser einfach transportieren und aufgrund seiner geringen Größe leicht in eine Konsole integrieren bzw. auf der Schiffsbrücke unterbringen lässt. Ein großer Vorteil von Laptops ist außerdem, dass diese bei Stromausfall, durch den internen Akku, über eine Nachlaufzeit von bis zu vier Stunden verfügen. Sie können damit die Abschaltzeiten bei Netzausfalltests überbrücken. Nachteilig bei Laptops ist allerdings, dass sich diese im Fall einer Abschaltung aufgrund einer Stromunterbrechung länger als ca. vier Stunden, im Gegensatz zu PCs, nicht selbstständig nach Wiederherstellung der Stromversorgung neu starten können. Dieses Problem ließe sich durch geringe Modifikationen am Laptop in Verbindung mit einer externen Reset-Schaltung (Watchdog) lösen. Hierdurch könnte gleichzeitig auch ein Schutz gegen Ausfall des Systems oder von Programmen realisiert werden.

### 6.2.2. Kommunikation vom Deck auf die Schiffsbrücke

Im Gegensatz zu den auf der Schiffsbrücke vorhandenen Systemen, befinden sich außerhalb der Brücke aufgrund der dort notwendigen witterungsfesten Installation keine Geräte mit zugänglichen Schnittstellen. Zur Untersuchung der Kommunikation vom Außendeck auf die Schiffsbrücke wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine eigenständige GPS- und Wetterstation entwickelt, die die Funkstrecken mit NMEA-konformen Datensätzen versorgt. Die Station wurde auf den oberhalb der Schiffsbrücken befindlichen Außendecks installiert und über eine Richtantenne mit den innerhalb der Brückenkonsolen befindlichen Laptops verbunden. Die Realisierung einer vollwertigen GPS- und Wetterstation hat gegenüber dem Übertragen von Daten aus einem NMEA-Simulator den Vorteil, dass sich die real aufgezeichneten Daten mit den von den schiffsinternen Systemen aufgezeichneten Daten vergleichen lassen.

Die GPS-Funkstrecke (Abbildung 6.5) besteht, ebenso wie die interne Strecke, aus drei Komponenten:

- Außeneinheit mit GPS- und Windsensor sowie weiteren Sensoren, Mikrocontroller-Einheit zum Aufbereiten der Daten sowie Stromversorgung,
- Bluetoothübertragungsstrecke zum Übertragen der Daten auf die Brücke,
- Laptop zum Auswerten und Protokollieren der Daten.

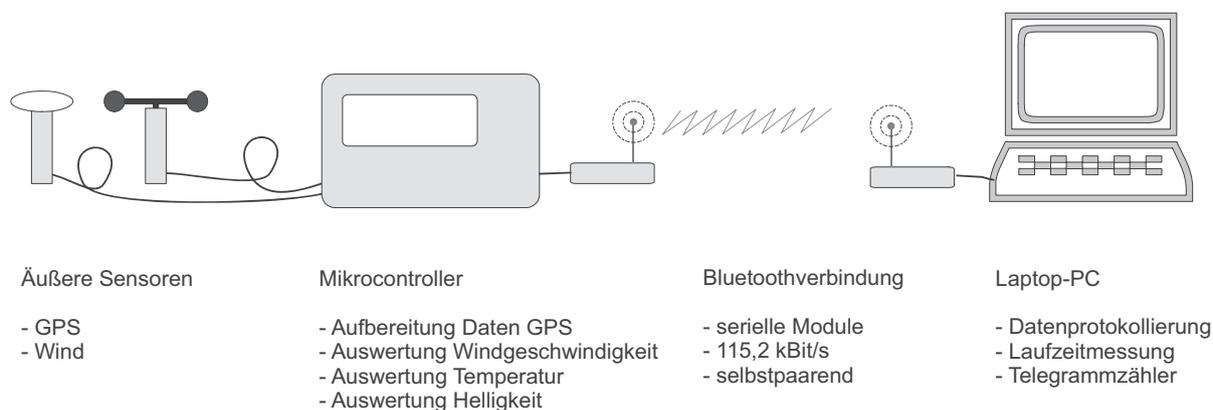


Abbildung 6.5: Schematischer Aufbau der Teststrecke zwischen den außerhalb der Brücke installierten Sensoren und dem auf der Brücke bzw. in der Brückenkonsole befindlichen Empfänger

Als Aufstellungsort für den GPS- und den Windsensor wurden die über den Brücken befindlichen Positionslichtmasten ausgewählt (Abbildung 6.6). Diese verfügen über ein weitgehend freies Sichtfeld, was gleichermaßen für den GPS-Empfang als auch für die Windmessung von Vorteil ist. Außerdem verfügen die im Schiffbau verwendeten Positionslichter über ein einheitliches Lochmaß für ihre Befestigungsschrauben, so dass das entwickelte System einfach

und ohne Änderungen an bestehenden Aufbauten unter das Positionslicht beliebiger Schiffe montiert werden kann.

Als GPS-Empfänger dient ein kommerzielles GPS-Modul, als Windempfänger ein Schalenkreuzanemometer mit DC-Tachoausgang. Um gleichermaßen eine möglichst freie Aufstellung wie auch eine sichere und statisch unbedenkliche Befestigung am vorhandenen Positionslichtmast zu gewährleisten, wurde ein zweiarmiger Halter aus Aluminium angefertigt. Dieser lässt sich zwischen dem Positionslicht und dem Mast schieben und über die Befestigungsschrauben des Positionslichts fixieren. Hierdurch ist eine besonders schnelle und mechanisch höchst stabile Anbringung möglich. Insbesondere muss bei dieser Installationsart weder die Witterungsisolation des Positionslichts noch dessen Verkabelung beschädigt bzw. geändert werden.

Über ein witterungsfestes Kabel sind die Sensoren mit einer Mikrocontroller-Einheit verbunden. Als zusätzliche Messwerte zeichnet diese Temperatur, Luftfeuchte und Lichtstärke, Parameter der Funkverbindung sowie Daten der Spannungsversorgung auf. Die wichtigsten aufbereiteten Daten werden auf einem LCD-Display dargestellt. Um eine bequeme Ablesung des Displays zu ermöglichen, wurde die Mikrocontroller-Einheit vom Positionslicht abgesetzt am Geländer des Decks befestigt (Abbildung 6.6). Die Anzahl der übertragenen Telegramme betrug, je nach Anzahl an sichtbaren Satelliten, ungefähr zehn Telegramme pro Sekunde.

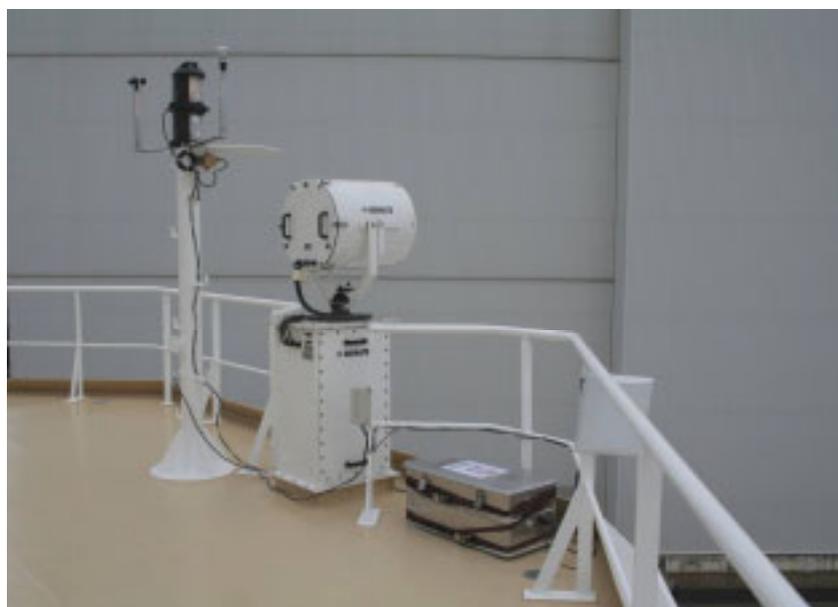


Abbildung 6.6: Positionslichtmast eines Kreuzfahrtschiffs mit installiertem Bluetooth GPS- und Windsensor. Der Windsensor befindet sich links vom Positionslicht, der GPS-Sensor rechts von diesem. Die Mikrocontroller-Einheit befindet sich mittig rechts vom Suchscheinwerfer am Geländer. Rechts am Geländer ist die Richtantenne in Form einer Patchantenne erkennbar.

Zur Übermittlung der Daten auf die Brücke dient ein in der Mikrocontroller-Einheit integriertes Bluetoothmodul, welches die Daten über eine ebenfalls separat angebrachte Richtantenne

auf die Brücke übermittelt. Die Stromversorgung des gesamten Systems erfolgt über eine in der Aluminiumkiste verbleibende Batterie, welche über ein ebenfalls integriertes Netzteil geladen wird. Die Standzeit der Batterie beträgt ungefähr einen Tag. Durch eine Laderegelung ist die Batterie durch Lastabwurf vor Tiefentladung geschützt. Ebenso wie die Mikrocontroller-Einheit auf der Brücke ist auch dieses System in der Lage, sich bei Stromausfall unmittelbar und selbstständig neu zu initialisieren.

Wegen des hohen Stromverbrauchs der einzelnen Komponenten ist dieses System bei längerem Betrieb auf eine externe Stromversorgung angewiesen. Aus diesem Grund wurde als Alternative zur Netzversorgung eine Versorgung über Solarzellen entwickelt. Zusätzlich zur Batterie befindet sich bei dieser auf der Oberseite der Transportbox eine Solarzelle, welche über eine Ladeschaltung die Batterie lädt.

Als Empfänger auf der Brücke diente der in den Hauptfahrstand integrierte Laptop (Abbildung 8.4), der gleichzeitig als Empfänger für das innerhalb der Brücke befindliche System genutzt werden konnte. Beide Anbindungen erfolgten dabei über einzelne Funkstrecken, um den Fall des gleichzeitigen Betriebs unabhängiger und damit konkurrierender Netze zu realisieren. Wegen der großen Distanz zur Außenantenne wurde, im Gegensatz zur Funkstrecke innerhalb der Brücke, ein Modul mit externer Antenne verwendet.

Die mit dem Laptop verbundenen seriellen Bluetoothmodule können von diesem mit Strom versorgt werden. Da die GPS-Station durch die eingebaute Batterie ebenfalls abgepuffert wird, ist diese Funkübertragungsstrecke, im Gegensatz zur Strecke innerhalb der Brücke, gegen einen beidseitigen kurzzeitigen Stromausfall gesichert. Selbst bei Stromabschaltung können so Daten über die Position des Schiffs aufgenommen werden. Im Fall der brückeninternen Funkstrecke macht eine Pufferbatterie für die Anbindung an die Schiffselektronik jedoch keinen Sinn, da die Schiffsrechner bei Stromausfall keine Daten bereitstellen.

### 6.2.3. Ergebnisse der Langzeittests

#### - Nils Holgersson

Das System auf der *Nils Holgersson* [TTLi] diente einem ersten Langzeittest und verband einen GPS-Empfänger in Brückenmitte über einen in der geschlossenen Konsole liegenden Sender mit einem nahe der Nock aufgestellten Laptop. Der Test fand zwischen dem 20. Juli 2004 und dem 09. August 2004 statt. Insgesamt wurden 7,13 Mio. Telegramme übertragen. Dabei traten 770 Übertragungsfehler auf, was einer Fehlerrate von  $1,08 \cdot 10^{-4}$  entspricht.

#### - Jewel of the Seas

Bei dem Langzeittest auf der *Jewel of the Seas* [RCI] (Abbildung 6.4) wurde in der Zeit vom 30. März 2004 und dem 13. April 2004 die Kommunikation innerhalb der Konsole untersucht. Das Testsystem verband einen in der Brückennock befindlichen Rechner mit einem in der

gleichen Nock befindlichen Laptop. Dabei wurden 3,64 Mio. Telegramme übertragen wobei 329 Fehler auftraten. Die Fehlerrate betrug demnach  $9,04 \cdot 10^{-5}$ .

- Norwegian Jewel

Während der Messfahrt auf der *Norwegian Jewel* [NCL] zwischen dem 20. Juni 2005 und dem 21. Juli 2005 wurde in Verbindung mit der externen Funkstrecke der Unterschied zwischen einer innerhalb der Konsole und einer außerhalb der Konsole liegenden Antenne untersucht. Dazu wurde während der ersten Hälfte der Testzeit als Antenne für das Bluetoothmodul eine  $\lambda/4$ -Antenne außerhalb der Konsole auf der Konsolenwand befestigt. In der zweiten Hälfte wurde eine verkürzte  $\lambda/2$ -Antenne innerhalb der Konsole aufgehängt.

Hierbei stellte sich heraus, dass eine Unterbringung der Antenne innerhalb der Konsole zu bevorzugen ist. So kompensiert die definierte Umgebung innerhalb der Konsole und die Möglichkeit, aufgrund des besseren Platzangebots größere Antennen einzusetzen, offenbar wegen der besseren Ausbreitungsbedingungen die Nachteile durch das dämpfende Konsolengehäuse. Außerhalb des teilweise schirmenden Metallgehäuses kann insbesondere nicht ausgeschlossen werden, dass beispielsweise Personen die Antenne unbeabsichtigt berühren bzw. verdecken und damit die Empfangsbedingungen negativ beeinflusst werden. Außerdem werden externe Antennen oftmals als störend empfunden. Durch eine Unterbringung der Antenne innerhalb der Konsole vereinfacht sich auch die Installation deutlich, da die Antenne nahe beim Sendemodul und damit ohne aufwändige Kabelführung angebracht werden kann. Eine Ausrichtung der auf dem Außendeck befestigten Richtantenne auf den Ort des Empfängers innerhalb der Brücke war für einen zuverlässigen Empfang nicht nötig: es genügte, dass die Richtantenne lediglich grob in Richtung Brückennock zeigte.

Für die GPS-Strecke wurden folgende Werte ermittelt:

Antenne	Anzahl Telegramme	Anzahl Fehler	Mio. Zeichen
externe Antenne	13.744.832	733	702,83
interne Antenne	7.574.487	20	386,76

Tabelle 6.2: Daten der getesteten Funkübertragungsstrecken während der Überführungs- und Werftprobefahrten der *Norwegian Jewel*

Während des ersten Abschnitts mit einer außerhalb der Konsole liegenden Antenne lag die Fehlerrate demnach bei  $5,3 \cdot 10^{-5}$ . Nach dem Einbau der Antenne in die Konsole verringerte sich die Fehlerrate auf  $2,6 \cdot 10^{-6}$ . Dies entspricht 36 fehlerhaften Telegrammen pro Tag im ersten Teil und lediglich zwei fehlerhaften Telegrammen pro Tag im zweiten Teil (Tabelle 6.2). In Abbildung 6.7 sind beispielhaft die über die Funkstrecke aufgezeichneten Messwerte aufgeführt.

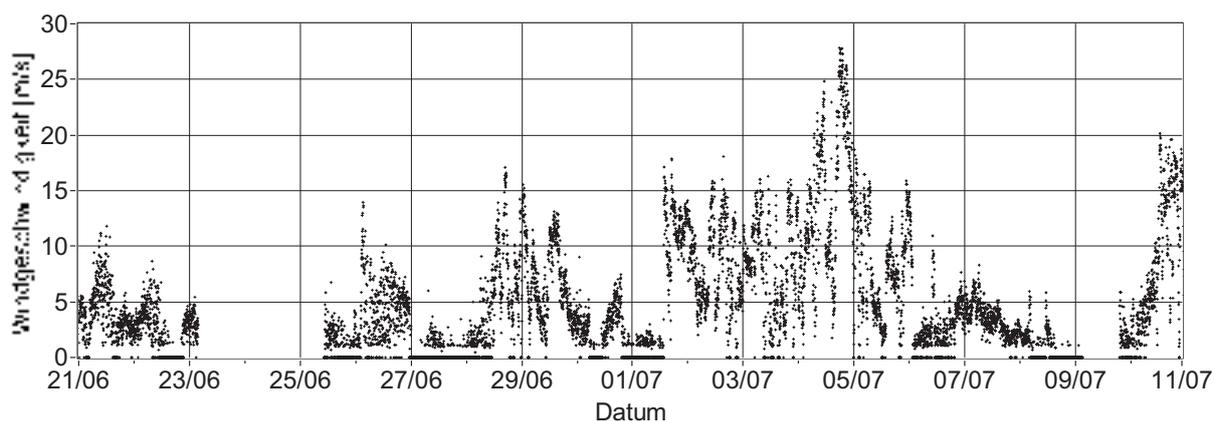


Abbildung 6.7: Windstärke auf der *Norwegian Jewel* in der Zeit vom 21.06.2005 bis zum 11.07.2005. Die Daten wurden über die installierte, funkgestützte GPS- und Wetterstation aufgezeichnet.

#### - Pride of Hawaii

Bei der Messung auf der *Pride of Hawaii* [NCL] zwischen dem 22. Februar 2006 und dem 04. April 2006 wurden die Erfahrungen aus den vorherigen Installationen zusammengefasst. Als Module wurden dabei ausschließlich die auf der externen Strecke der *Jewel of the Seas* bewährten Module verwendet, die eine bessere Verarbeitung im Gegensatz zu den vorher verwendeten aufweisen. Die interne Strecke fand innerhalb des Hauptfahrstands zwischen einem Rechner im vorderen Teil (Abbildung 8.4) und einem Laptop im hinteren Teil der Mittenkonsole (Abbildung 8.5) statt. Beide Module wurden dabei in den doppelten Boden unterhalb der Brücke eingelassen und verfügten über interne Antennen. Die externe Strecke wurde analog zur *Jewel-of-the-Seas*-Messung aufgebaut. Im Unterschied wurde die Antenne des konsoleninternen Moduls von Anfang an in die Konsole integriert. Abbildung 6.8 zeigt die Route der Erprobungsfahrten, gemessen über die externe, funkgestützte GPS-Station.

Für die Funkübertragungsstrecken wurden folgende Werte ermittelt:

Messtrecke	Anzahl Telegramme	Anzahl Fehler	Mio. Zeichen
NMEA	18.445.181	15	1.611,78
GPS	20.782.622	49	1.038,72

Tabelle 6.3: Daten der getesteten Funkübertragungsstrecken während der Überführungs- und Werftprobefahrten der *Pride of Hawaii*

Demnach konnten die Fehlerraten auf  $2,3 \cdot 10^{-6}$  für die externe Strecke und  $0,8 \cdot 10^{-6}$  für die interne Strecke gesenkt werden (Tabelle 6.3).



Abbildung 6.8: Route eines Kreuzfahrtschiffs während der Werftprobe- und Überführungsfahrten in der Nordsee. Die Daten wurden über die installierte, funkgestützte GPS- und Wetterstation aufgezeichnet. Die Route entspricht den Routen der Schiffe der Meyer Werft während der Werfterprobung.

#### 6.2.4. Zusammenfassung

Die Integrationen der Funkübertrager in die bestehenden Brückensysteme ließen sich mit den entwickelten Konverterschaltungen ohne weiteren Hardwareaufwand direkt bewerkstelligen. Sowohl die Einbauten in die Brückenkonsolen als auch die Installationen an den Außenbereichen ließen sich elektrisch wie auch mechanisch einwandfrei durchführen. Die installierten Systeme haben die durchgeführten Netzabschaltungen sowie die weiteren Tests einwandfrei überstanden und die selbsttätigen Neuinitialisierungen anstandslos durchgeführt.

Störungen umliegender Geräte durch die Bluetooth-Funkübertragungsstrecken oder Störungen der Funkübertragungsstrecken durch umliegende Geräte konnten nicht beobachtet werden.

Bei Nutzung der externen Funkstrecken mit maximaler Sendeleistung zeigten begleitende Messungen der elektrischen Feldstärken, dass die erzeugten Feldstärken im Vergleich zu den übrigen vorliegenden Funkdiensten gering waren und im Brückenbereich unterhalb von 1 V/m lagen.

Im Vergleich zwischen den beiden verwendeten Modultypen zeigte sich, dass die auftretenden Fehlerraten auch maßgeblich von der Verarbeitung der Module abhängen können. Dies konnte durch anschließende Messungen im Labor unter optimalen Übertragungsbedingungen bestätigt werden. Der Grund hierfür deutet sich im Fall eines auf der *Norwegian Jewel* ausgefallenen Moduls an und liegt vermutlich weniger an der Funkübertragungsstrecke als an der seriellen Schnittstelle zwischen dem Modul und dem Laptop bzw. dem angeschlossenen Controller. Durch schlechte Pegelanpassung des Signals bzw. durch leichte Störbarkeit der Kabelverbindung kann es auch hier zu Fehlern kommen, die nicht wie im Fall der Funkstrecke erkannt und durch erneutes Übertragen berichtigt werden. Durch Vergleich der Fehlerraten beider Module lässt sich feststellen, dass die Fehlerraten zwischen den verwendeten Modulen um mehr als eine Größenordnung variieren können. Bei den zuletzt erreichten, sehr geringen Fehlerraten von ca.  $10^{-6}$  lassen sich die Fehler im Rahmen der Untersuchungen nicht mehr eindeutig der Funkschnittstelle bzw. der seriellen Schnittstelle zuweisen.

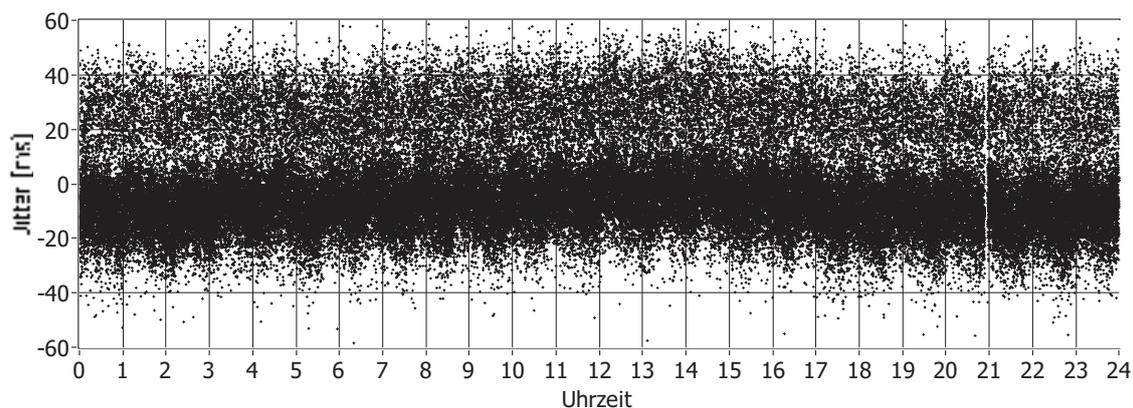


Abbildung 6.9: Gemessene Streuung der Verzögerung bei der Datenübertragung auf Schiffsbrücken für das in Abbildung 5.27 vermessene Modul. Die sinusförmige Schwebung auf der Gesamtmessung ist vermutlich durch die Temperaturdrift der in der Mikrocontrollerschaltung befindlichen Zeitquelle verursacht.

Die gemessenen Streuungen bei der Übertragung der Telegramme (Abbildung 6.9 bzw. Abbildung 6.10) korrelierten mit den in Kapitel 5.3.4 gemessenen Streuungen der Module. Allerdings umfassten die Messungen den gesamten Übertragungsvorgang, also vom Empfang des ersten Bytes durch den Konverter (Abbildung 8.5) bis zum Empfang des letzten Bytes durch den Laptop (Abbildung 8.4). Bedingt durch die Verarbeitungen durch den Mikrocontroller und die auf dem Laptop befindlichen Programme sowie die Verzögerung durch das Betriebssystem konnte eine leicht vergrößerte Streuung festgestellt werden.

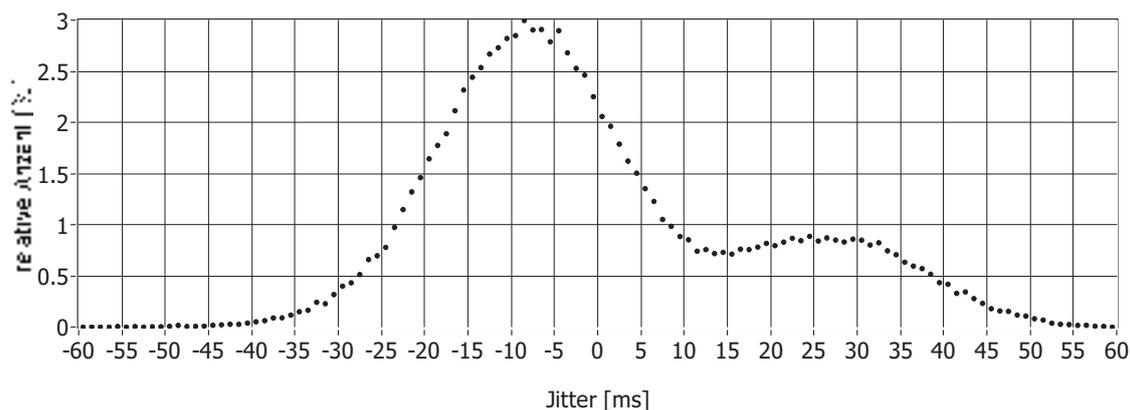


Abbildung 6.10: Histogramm zur Messung aus Abbildung 6.9

### 6.3. Anforderungen für die Marktreife

Wie aufgrund der umfangreichen Messungen und Simulationen in Verbindung mit drahtlosen Funkübertragungsmodulen im 2,4-GHz-ISM-Band gezeigt werden konnte, handelt es sich bei den untersuchten Systemen um zuverlässige und aus Sicht der Elektrotechnik und insbesondere der EMV unbedenkliche Lösungen zum Ersatz von Kabelverbindungen. Allerdings sind vor einer breiten Markteinführung zuerst die genauen Anforderungen zu klären und Grenzwerte festzulegen. So müssen seitens der Norm bzw. der Klassen eindeutige Vorgaben im Hinblick auf die verwendeten Funkprotokolle festgelegt werden. Zum Beispiel werden die Nutzdaten bei der Funkübertragung im Gegensatz zum Kabel nicht augenblicklich, sondern abhängig von der Kanalqualität sowie der Firmware der Module zeitlich verzögert übertragen. Die Übertragungszeit der Daten muss dabei „dem Prozess gerechtfertigt“, d.h. klein gegenüber der Regelzeit des Prozesses sein. Wichtige, im Hinblick auf jedes einzelne Telegramm unterschiedlich zu beurteilende Größen sind:

- maximal erlaubte zeitliche Verzögerung der Datenübertragung,
- maximal erlaubtes Alter der übertragenen Daten bei Telegrammen ohne Zeitstempel,
- minimale geforderte Verschlüsselung der übertragenen Daten.

Im Hinblick auf die realisierbaren Netztopologien und die damit verbundenen Bandbreitenanforderungen der jeweiligen Telegramme ist es ebenfalls sinnvoll, eine Einschränkung an mögliche Netzformen, zum Beispiel entsprechend Tabelle 6.4, vorzunehmen.

Datenquelle	Aktualisierung der Daten	Netztopologie
Kompass, Maschine	sehr häufig > 10 Hz	nur direkt, Punkt zu Punkt
Wassertiefe, Geschwindigkeit, Kurs	häufig > 1 Hz	begrenzt, sternförmig
Wind, Temperatur	selten $\leq 1$ Hz	beliebig

Tabelle 6.4: Mögliche Einteilung der Netztopologien sowie der Aktualisierungsraten von Funkstrecken für verschiedene Telegramme

Die Implementierung der Module sollte zweckmäßig so geschehen, dass der Ausrüster über die Konfigurationsoptionen des Rechners neben den Parametern für die klassischen Schnittstellen auch die wichtigen Parameter für Funkschnittstellen konfigurieren kann. Diese sollten insbesondere folgende Parameter, die auch in hochwertigen Consumerprodukten anzutreffen sind, umfassen:

- MAC-Adresse<sup>1</sup> oder Name des installierten Funkübertragungsmoduls,
- Adressen der durch das installierte Modul aufzurufenden bzw. zu paarenden Module,
- Art der Paarung (automatisch, bei Bedarf, nur abgehend, etc.),
- PIN-Code für externe Verbindungsanfragen,
- Art der Datenverschlüsselung und Schlüssellänge,
- erlaubte Nutzkanäle bei Frequenzsprungverfahren, wie z.B. Bluetooth,
- Übertragungskanal bei Frequenzsprungverfahren, wie z.B. WLAN,
- Verhalten bei Störung, z.B. Kollisionstabelle, automatischer Kanalwechsel, Kanalmeidung.

Weiterhin ist, besonders bei erweiterbaren Netzen, eine Filterfunktion für MAC-Adressen eingehender Verbindungsanforderungen sinnvoll. Auch kann eine Möglichkeit zur Bevorzugung bestimmter Module oder Datentelegramme Sinn machen, um für zeitkritische Telegramme eine gleichbleibend hohe Kanalqualität zu gewährleisten. Für die Datenübertrager ist darüber hinaus eine Testapplikation sinnvoll, mit deren Hilfe sich der Ausrüster bzw. die Klassifikationsgesellschaften schnell und zuverlässig über die Qualität der Funkverbindung informieren können. Dieses könnte zum Beispiel über ein Auslesen der RSSI-Information sowie über einen Loopback-Test mit Fehlerprüfung erfolgen [Vedral04].

<sup>1</sup> MAC: Media Access Control, einzigartige Hardwareadresse eines Geräts in einem Netzwerk

Bezüglich des Einbaus sollten ebenfalls zum Beispiel Bauart und Aufstellungsort der Antenne bzw. des Moduls und eventuell einzuhaltende Abstände zu empfindlicher Elektronik festgeschrieben werden. Schließlich sollten in Form einer Baumusterprüfung grundlegende mechanische und elektrische Anforderungen an die Module beinhaltet sein, wie sie auch an die übrigen im Schiffbau verwendeten Schnittstellen gestellt werden.

Da es sich bei den von der Software bzw. vom Protokoll geforderten Eigenschaften um Parameter handelt, die sich über die Firmware der Module anpassen lassen, ist bei einer geforderten Anpassung seitens der Industrie kein nennenswerter Entwicklungsaufwand nötig. Ebenso dürfte es sich mit den geforderten mechanischen Eigenschaften verhalten. Da heutige Module mit wenigen Bauteilen auskommen, keine beweglichen Teile besitzen und ausschließlich in SMD-Technik gefertigt werden können, ist von einer hohen mechanischen Belastbarkeit auszugehen. Da weiterhin aufgrund der geringen Leistungsaufnahme keine Kühlung notwendig ist, können die Module bei Bedarf sogar vollständig vergossen bzw. gekapselt werden.

Nach dem Festlegen verbindlicher Rechtsgrundlagen bzw. Vorschriften ist deswegen von einer schnellen möglichen Markteinführung auszugehen. So präsentieren Brückenhersteller bereits erste Lösungen drahtloser Datenübertragungssysteme. Diese arbeiten vorerst zwar lediglich als Ergänzung der bereits bestehenden Systeme und bislang nur in nicht sicherheitskritischen Anwendungen, bei einer weiterreichenden Akzeptanz und einer fortschreitenden Implementierung der drahtlosen Schnittstellen in die Brückenelektronik ist jedoch von einem Einzug der Systeme in einem mittleren Zeitraum von einigen Jahren auszugehen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Wie im ersten Teil dieser Arbeit gezeigt werden konnte, verfügen Schiffe über einen breiten Anwendungsbereich für das Ersetzen konventioneller Verkabelung durch drahtlose Funkübertrager. Sowohl innerhalb der Brücke als auch in Maschinen-, Klima- und Elektronikräumen können Kabelverbindungen in den Bereichen Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik ersetzt werden. Ebenfalls lassen sich in den Passagierbereichen viele neue Anwendungsmöglichkeiten finden. Zusätzlich zu den bereits auf Schiffen vorhandenen Lösungen lassen sich mit drahtlosen Datenübertragern auch eine Reihe neuer Dienste, wie z.B. Pilots-Plug, VoIP oder auch drahtlose Steuereinheiten realisieren.

Als aussichtsreichste Kandidaten für den funkgestützten Kabelersatz sind dabei bislang der Bluetooth- sowie der WLAN-Standard und ggf. später auch der ZigBee-Standard anzusehen. Durch ihren Sitz im lizensfreien 2,4-GHz-ISM-Band und den damit verbundenen diskutierten ökonomischen und technischen Vorteilen ermöglichen sie dem Hersteller eine schnelle Realisierung hochwertiger, drahtloser Lösungen.

Anhand detaillierter Messungen und Simulationen, basierend auf der Momentenmethode (MoM) sowie der Leitungstheorie, konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass dabei dem Einsatz der in Frage kommenden Systeme auf Schiffen aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit nichts entgegenzusetzen ist. Allerdings sollte bei Nutzung der drahtlosen Systeme auf die in dieser Arbeit diskutierten Einschränkungen, wie z.B. Schirmung, Mindestabstände zu empfindlicher Elektronik und Verwendung hochwertiger Antennen geachtet werden.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass sich mit kommerziell erhältlichen Funkübertragungsmodulen zuverlässige und störteste Lösungen im elektromagnetischen Umfeld „Schiff“ realisieren lassen. Hierzu wurden unter anderem Demonstratoren und Langzeittestsysteme entwickelt und auf Kreuzfahrt- und Fährschiffen installiert sowie ausführlichen Tests unterzogen.

Entsprechend den Ergebnissen dieser Arbeit ist im Hinblick auf die diskutierten Anwendungsmöglichkeiten auf Schiffen eine Einschränkung der Nutzung der bisher erhältlichen drahtlosen Systeme nur in wenigen Bereichen nötig. So werden hochdynamische und zeitkritische Regelungs- und Steuerprozesse sowie Notfallsysteme auch auf absehbare Zeit nicht durch drahtlose Lösungen ersetzt werden. Ebenso ist durch das begrenzte Ausbreitungsvermögen der Funksignale zwischen den unterschiedlichen Räumen auf Schiffen eine besondere, raumgebundene Vernetzung nötig. Als Kabelersatz für die Regelung und Überwachung mittelschneller sowie langsamer Prozesse, im Bereich Monitoring sowie parallel bzw. ergänzend zu den bereits bestehenden Breitband-Kabelnetzen und Bussystemen, ist der Einsatz von Funkübertragungsmodulen jedoch als in höchstem Maße sinnvoll anzusehen.

Aufgrund der derzeitigen Entwicklungen sowohl im Bereich des Norm- und Regelwerks als auch seitens der Gerätehersteller ist von einem Einzug drahtloser Technologien bzw. Lösungen innerhalb der nächsten Generation von Schiffen auszugehen. Da der Zyklus zur Überarbeitung der zuständigen Normen mehrere Jahre beträgt, dürfte die Einführung anfänglich unter Vorbehalt als „technische Neuerung“ erfolgen, bis die notwendigen Anforderungen mittel- bis langfristig zusammengefasst und in die Normen und Vorschriften eingearbeitet worden sind.

Der Einsatzbereich ist anfangs in der Überwachung und Übertragung unkritischer bzw. redundant vorliegender Daten sowie in der Kommunikation zu sehen. Mit fortschreitender Entwicklung der Funkmodule sowie mit zunehmenden Erfahrungen seitens der Anwender und Ausrüster ist jedoch eine Nutzung in nahezu allen Bereichen des Schiffbaus zu erwarten.

## 8. Anhang

### 8.1. Literaturverzeichnis

- [26BimSchV] *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*, [http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_26/](http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/), Dezember 1996
- [Arens95] G. Arens, R. Bräuer, P. Zimmers: *Alles über schnurlose Telefone und Nebenstellenanlagen*, Franzis', 1995
- [Baat3] S. Baatz, M. Frank, P. Martini: *A Worst-Case Model for Co-Channel Interference in the Bluetooth Wireless System*, Proceedings of the 28th Annual Conference on Local Computer Networks, Königswinter, Oktober 2003
- [Beikirch04] H. Beikirch: *Funkgestützte Vernetzung mit dem Controller Area Network (CAN)*, VDI-Berichte Nr. 1843, VDI-Verlag, 2004
- [Beikirch05] H. Beikirch: *Etablierte Funktechnologien aus der Perspektive der industriellen Automation*, VDI-Berichte Nr. 1889, VDI-Verlag, 2005
- [Bender92] K. Bender: *Profibus – Der Feldbus für die Automation*, Carl Hanser Verlag, 1992
- [Bernardi04a] P. Bernardi, M. Cavgnaro, R. Cicchetti: *Human exposure to the electromagnetic fields produced by coexisting wireless communication systems in a complex indoor environment*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [Bernardi04b] P. Bernardi, R. Cicchetti, O. Testa: *A Model for the analysis of disturbances induced in equipment working in the presence of an indoor wireless local-area network*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [BGB01] Bundesgesetzblatt: *Gesetz über Funkanlagen und Telekommunikations-einrichtungen (FTEG)*, BGB1 I NR.6, 2001
- [Bluetooth] The official Bluetooth Website: *Bluetooth Core Specifications*, <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Learn/Technology/Specifications/>
- [Brittany] Brittany Ferries: *Flotte*, <http://www.brittanyferries.de/index.cfm?articleid=96>

- [Camp01] M. Camp, H. Garbe, D. Nitsch: *UWB and EMP Susceptibility of modern electronics*, Proceedings of the 2001 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2001), Kanada, August 2001
- [Catrysse04] J. Catrysse, J. Rayée, D. Degrendele: *Simulation of an industrial environment and overview of test results*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [Cordeiro01] C. Cordeiro, D. Sadok: *Piconet interference modeling and performance evaluation of Bluetooth MAC protocol*, GLOBECOM '01. IEEE Global Telecommunications Conference, November 2001
- [Concept] CONCEPT II-Homepage: <http://www.tet.tu-harburg.de/concept>
- [Cyrol05] T. Cyrol: *Mobile Datenterminals mit WLAN in explosionsgefährdeten Bereichen*, VDI-Berichte Nr. 1889, VDI-Verlag, 2005
- [DO-294A] Radio Technical Commission for Aeronautics: *Guidance on Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (T-PEDs) on Aircraft*, RTCA, 2006
- [Dostert00] K. Dostert: *Power Line Kommunikation*, Franzis' Verlag GmbH, 2000
- [Ehrke04] K.-C. Ehrke: *AUTENDIB – Automatisierung der Endmontage integrierter Brückensysteme durch deutliche Reduzierung der Verkabelung*, Schiffbauforschung, Verlag Technik, Berlin, 2004
- [Elhoiydi01] A. El-Hoiydi: *Interference between Bluetooth Networks – upper bound on the packet error rate*, IEEE communication letters, Juni 2001
- [ETSI300328] ETSI-Standard: *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz ISM band using spread spectrum modulation techniques*, ETSI, Frankreich, 2001
- [Feile04] M. Feile, I. Dittrich: *Störungen des Funkempfangs durch großflächig installierte PLC-Pilotprojekte*, Symposium EMV 2004, Düsseldorf, Februar 2004
- [Feng02] W. Feng, A. Nallanathan, H. K. Garg: *Impact of interference on performance of Bluetooth Piconets in 2.4 GHz ISM Band*, Electronics Letters, Dezember 2002
- [FreqBZPV04] Bundesgesetzblatt: *Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV)*, BGBl. I, 2006
- [Gebele03] O. Gebele: *EMV-Analyse beliebiger Leitungen über oberflächen-diskretisierten Strukturen*, VDI-Verlag, 2003

- 
- [Gebhardt02] M. Gebhardt: *Emission elektromagnetischer Felder aus Energieverteilungsnetzen durch hochfrequente Kommunikationssignale*, Mensch und Buch Verlag, 2002
- [GL06] Germanischer Lloyd: *GL Rules and Guidelines, Technical Publications – Part 1 Seagoing Ships, Electrical Installations*, Germanischer Lloyd, 2006
- [GL89] Germanischer Lloyd: *Richtlinien für die elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Betriebsmittel*, Germanischer Lloyd, 1989
- [Singer92] K. H. Gonschorek, H. Singer: *Elektromagnetische Verträglichkeit - Grundlagen, Analysen, Maßnahmen*, B. G. Teubner Stuttgart, 1992
- [Held01] G. Held: *Data over wireless Networks – Bluetooth, WAP & Wireless LANs*, McGraw-Hill, 2001
- [Höegh] Höegh LNG: *Fleet List*, [http://www.hoegh.com/lng/fleet/fleet\\_list/](http://www.hoegh.com/lng/fleet/fleet_list/)
- [Howitt02] I. Howitt: *Bluetooth performance in the presence of 802.11 b WLAN*, IEEE Transactions on vehicular technology, November 2002
- [Howitt03] I. Howitt: *Mutual interference between independent Bluetooth piconets*, IEEE transaction on vehicular technology, Mai 2003
- [IEC60945] IEC-Standard IEC 60945:2002: *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – general requirements – method of testing and required test results*, 2002
- [IEC61000] IEC-Standard 61000-4:1992: *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques*, 1992
- [IEC61162] IEC-Standard 61162-1:2000: *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces, Part 1: Single talker and multiple listeners*, 2000
- [Kral03] A. Kral, H. Kreft: *Wireless LANs networker's Guide*, Markt und Technik Verlag, 2003
- [Lerch96] R. Lerch: *Elektrische Messtechnik – analoge, digitale und computergestützte Verfahren*, Springer, 1996
- [Lin03] Ting-Yu Lin, Yu-Chee-Tseng, Nat Chiao-Tung: *Collision analysis for multi Bluetooth Picocells Environment*, IEEE Communications Letters, 2003
- [Lührs04] C. Lührs: *QoS und Determinismus in Bluetooth Systemen*, VDI-Berichte Nr. 1843, VDI-Verlag, 2004
- [Macnamara95] T. Macnamara: *Handbook of Antennas for EMC*, Artech House, 1995
- [Marine] Deutsche Marine: *Waffen und Systeme/Fregatten*, [www.marine.de](http://www.marine.de)

- 
- [McCune00] E. McCune: *DSSS vs. FHSS narrowband interference performance issues*, R.F. Design, USA, September 2000
- [MeyerWerft] <http://www.meyerwerft.de>
- [Müller01] N. J. Müller: *Bluetooth*, MITP-Verlag, Bonn, 2001
- [NCL] Norwegian Cruise Line: *Flotte*,  
[http://www.ncl.de/ncl-de/index\\_fleet.html](http://www.ncl.de/ncl-de/index_fleet.html)
- [Nguyen04] T. X. Nguyen, S. V. Koppen, J. J. Ely: *Portable wireless device threat assessment for aircraft navigation radios*, 2004 IEEE international Symposium on electromagnetic compatibility, Santa Clara, August 2004
- [Nitsch05] D. Nitsch: *Die Wirkung eingekoppelter ultrabreitbandiger elektromagnetischer Impulse auf komplexe elektronische Systeme*, Magdeburger Forum Elektrotechnik, 2005
- [Ondrej06] S. Ondrej, B. Zdenek, F. Petr: *ZigBee Technology and device Design*, Proceedings of the International Conference on networking, Santa Clara, Juli 2006
- [Pohlmann05] T. Pohlmann: *Funktechnologien für CAN – Netzwerke*, VDI-Berichte Nr. 1889, VDI-Verlag, 2005
- [Pradidkwan03] T. Pradidkwan, S. Malisuwan, J. Sivaraks: *Performance Impairments of Bluetooth Systems in EMI Environment Specified by WLAN Transmissions*, 2003 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Istanbul, 2003
- [ProfibusPA] Profibus International: *PROFIBUS PA, User and Installation Guideline*,  
<http://www.profibus.com/pall/meta/downloads/>
- [Rauchhaupt05] L. Rauchhaupt: *Funkkommunikation in der industriellen Automation – Wunsch oder Wirklichkeit*, VDI-Berichte Nr. 1889, VDI-Verlag, 2005
- [RCI] Royal Caribbean International: *Schiffe*,  
<http://www.royalcaribbean.de/flotte/index.html>
- [Sakal03] I. Sakal, D. Simunic: *Simulation of Interference between Bluetooth and 802.11 b Systems*, 2003 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Istanbul, 2003
- [SAM] SAM Electronics GmbH, [www.sam-electronics.de](http://www.sam-electronics.de)
- [Scandlines] Scandlines: *Schiffe*,  
[http://www.scandlines.de/de/infocenter/wir\\_ueber\\_uns/flotte/flotte.htm](http://www.scandlines.de/de/infocenter/wir_ueber_uns/flotte/flotte.htm)
- [Schäfer02] M. Schäfer, W. Sörgel, W. Wiesbeck: *Experimentelle Untersuchung des Dämpfungsverhaltens von Klinikwänden*, Symposium EMV 2002, Düsseldorf, April 2002

- 
- [Schäfer04] T. M. Schäfer, M. Baldauf, W. Wiesbeck: *Simulative Analyse der Funkwellenausbreitung in Kliniken*, Symposium EMV 2004, Düsseldorf, Februar 2004
- [Schäfer06] T. M. Schäfer, T. Kayser, M. Pauli: *Modeling of Composite Walls in Hospitals for Ray-Tracing and FDTD Simulations*, Proceedings of the 16th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, 2006
- [Scholl96] Lars U. Scholl: *Technikgeschichte des industriellen Schiffbaus in Deutschland, Band 2, Hauptantriebe, Schiffspropulsion, Elektrotechnik*, Ernst Kabel Verlag, 1996
- [Schoof03a] A. Schoof, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg: *Simulation and Measurement of the Propagation of Bluetooth Signals in Automobiles*, 2003 Int. Symposium on EMC, Istanbul, Mai 2003
- [Schoof03b] A. Schoof, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg: *Two dimensional simulation and measurement of the coupling of Bluetooth signals into conductive structures*, 2003 IEEE Symposium on electromagnetic compatibility, Boston, August 2003
- [Schoof04a] A. Schoof, T. Stadtler, J. L. ter Haseborg: *EMV von ISM-Funkverbindungen (2,4 GHz) zur Kabelreduzierung auf Schiffsbrücken*, EMV 2004, Düsseldorf, Februar 2004
- [Schoof04b] A. Schoof, J. L. ter Haseborg: *Measurement of the mutual interference between Bluetooth devices*, EUROEM 2004, Magdeburg, Juli 2004
- [Schoof05] A. Schoof, J. L. ter Haseborg: *Immunity of Bluetooth-transmitters against interfering electromagnetic fields with high field-strengths*, 16th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, Februar 2005
- [Schoof06] A. Schoof, J. L. ter Haseborg: *EMV-Festigkeit bei der drahtlosen Übertragung von NMEA-Daten auf Schiffen*, EMV 2006, Düsseldorf, März 2006
- [Schütte04] H.-D. Schütte, H.-J. Naumann: *Substitution of RS422 navigation sensor networks using Bluetooth communication for integrated bridges on vessels*, 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Barcelona, September 2004
- [Schwab96] A. Schwab: *Elektromagnetische Verträglichkeit*, Springer-Verlag, 1996
- [Sikora03] A. Sikora: *Wireless personal and local area networks*, Wiley, 2003
- [Stadtler02] T. Stadtler, A. Schoof, J. L. ter Haseborg: *Electromagnetic Compatibility of a System under the Influence of a Bluetooth Transmitter*, Symposium EMC Europe 2002, Sorrent, September 2002

- [Staniec04] K. Staniec, R. J. Zielinski: *Indoor radiowave propagation modeling for predicting interference in wireless Systems*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [Thamm85] G. Thamm, S. Gleß: *Schiffs-elektrotechnik*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1985
- [TTLine] TT-Line: *Die TT-Line Flotte*,  
[http://www.ttline.de/GERMAN/fracht/fracht\\_schiffe.htm](http://www.ttline.de/GERMAN/fracht/fracht_schiffe.htm)
- [Unger95] Hans-Georg Unger: *Elektromagnetische Wellen auf Leitungen*, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1995
- [VanderWurff04a] W. van der Wurff, L. Duerink, H. Schurer: *Interference of WLAN and Bluetooth in EM-hostile environments*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [VanderWurff04b] W. van der Wurff, L. Duerink, H. Schurer: *Wireless LAN and Bluetooth in highly reflective environments*, EMC Europe 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Eindhoven, September 2004
- [VDE0839] DIN EN 61000-6 / VDE 0839 Teil 6: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)*, VDE Verlag, 2002
- [VDE0848] DIN VDE 0848: *Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Teil 2, Schutz von Personen im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz*, VDE Verlag, 2002
- [Vedral04] A. Vedral, J. F. Wollert: *Analyse und Definition der Qualität von Funkkanälen für die Echtzeitübertragung*, VDI-Berichte Nr. 1843, VDI-Verlag, 2004
- [Vick04] R. Vick, L. Dunker, P. Mosshammer: *Zusammenfassung der Ergebnisse von ‚Power Line Communication‘ Studien*, Symposium EMV 2004, Düsseldorf, Februar 2004
- [Weber04] T. Weber: *Messverfahren und Schutzmaßnahmen für elektromagnetische Pulse im UWB-Bereich*, VDI Verlag, 2004
- [Zanella02] A. Zanella, A. Tonello, S. Pupolin: *On the impact of fading and inter-piconet interference on Bluetooth performance*, 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, USA, Oktober 2002
- [ZigBee] ZigBee Alliance: *ZigBee Specification*, [www.zigbee.com](http://www.zigbee.com)

- 
- [Zürbes00] S. Zürbes, W. Stahl, K. Matheus: *Radio network performance of Bluetooth*, Proceedings of IEEE International Conference on Communications, New Orleans, Juni 2000

## 8.2. Realisierte Komponenten

Die folgenden Komponenten und Systeme sowie die dazugehörigen Programme wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Demonstration und zur Untersuchung drahtloser Datenübertragungssysteme auf Schiffen entwickelt und verwendet:



Abbildung 8.1: Drahtlose GPS- und Wetterstation zur Generierung und Übertragung von NMEA-Daten auf die Schiffsbrücke (siehe auch Abbildung 6.6). Die Station wird unterhalb des Positionslichts eines Schiffs befestigt. Der Windsensor befindet sich links und der GPS-Sensor rechts vom Positionslicht. Die Mikrocontroller-Einheit zur Datenverarbeitung befindet sich mittig rechts vom Suchscheinwerfer am Geländer. Über ein Display an der Mikrocontroller-Einheit werden die wichtigsten Daten der Sensoren und des Systems angezeigt. Rechts am Geländer sind die Richtantenne und in der Aluminiumkiste auf dem Boden die Stromversorgung des Systems untergebracht.



Abbildung 8.2: Drahtlose Tochteranzeige (unten), basierend auf kommerziellen Anzeigeelementen, wie sie auch in klassischen Tochteranzeigen (oben) verwendet werden. Die Antenne der batteriebetriebenen, tragbaren Anzeige befindet sich links oben am Gehäuse. Die linke Anzeige zeigt den Kurs des Schiffs an, die rechte kann beliebige NMEA-Daten darstellen (hier die Wassertiefe). Ein Ausfall bzw. eine Unterbrechung der Funkverbindung wird über die Anzeigeelemente sowie akustisch signalisiert.

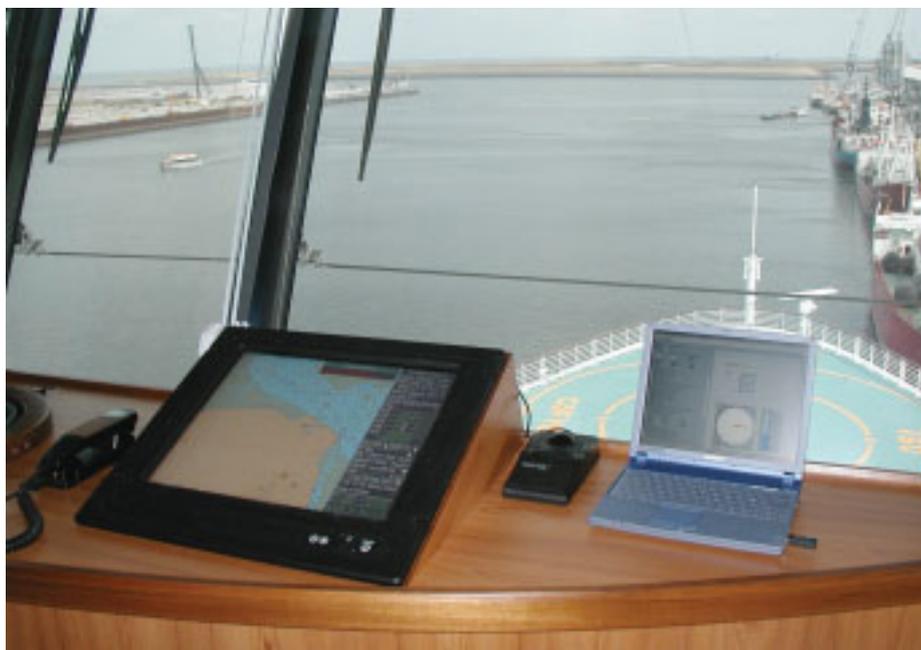


Abbildung 8.3: Drahtlos an einen Schiffsrechner angebundener Laptop (rechts) mit Programmen zur Darstellung und zur Protokollierung der empfangenen NMEA-Daten. Die Bereitstellung der Daten erfolgt über eine an einen Schiffsrechner angeschlossene Mikrocontroller-Einheit mit Bluetoothmodul (Abbildung 8.5).



Abbildung 8.4: Eine von zwei im Rahmen dieser Arbeit realisierten Laptop-Einheiten mit Funkübertragern zum Langzeittest drahtloser Datenübertragungssysteme auf Schiffen sowie zur anschließenden Auswertung der Daten. Der Laptop sowie die Funkübertragungsmodule wurden während der Werftprobe- und Überführungsfahrten von Kreuzfahrtschiffen in den Konsolen der Fahrstände untergebracht. Am rechten oberen Rand der Konsolenöffnung ist eine der Antennen erkennbar. Die seriellen Funkübertragungsmodule befinden sich bei dieser Installation im doppelten Boden unterhalb des Laptops und werden von diesem mit Strom versorgt.



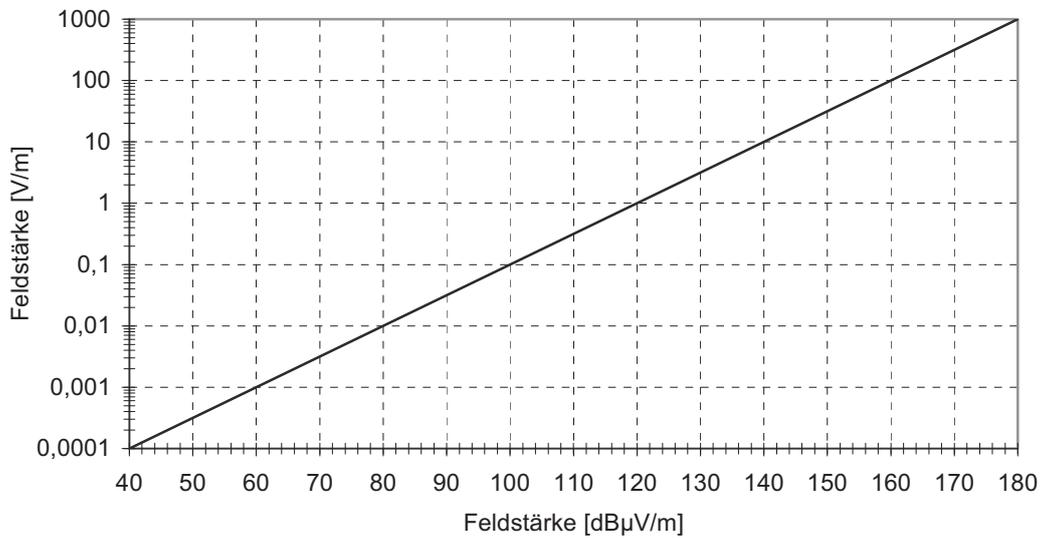
Abbildung 8.5: Oben: Mikrocontroller-Einheit zur Anbindung von Funkübertragungsstrecken an Schiffselektronik mit NMEA-Ausgängen. Die Einheit konvertiert die Signalpegel und Datenformate zwischen der Datenquelle und dem Bluetoothmodul und erzeugt zusätzlich Zeitstempel und proprietäre Telegramme zum Langzeittest der Funkübertragungsstrecken. Über ein Display wird der Status des Systems angezeigt. Unten: Demultiplexer zum Entbündeln von zusammengefassten NMEA-Datenströmen aus einer RS232-Schnittstelle in bis zu acht RS422-Schnittstellen nach beliebigen Filterkriterien und bei beliebigen Datenübertragungsraten.

## 8.3. Durchgeführte Messreihen auf Schiffen

Schiff	BRZ	Zeitraum	Werft	Reederei
Norwegian Dawn	92.200	11.2002	Meyer, Papenburg	Norwegian Cruise Line
Serenade of the Seas	90.000	07.2003	Meyer, Papenburg	Royal Caribbean International
Matthew	63.460	09.2003	Newport News Shipbuilding, USA	Höegh LNG
Pont Aven	39.300	02.2004	Meyer, Papenburg	Brittany Ferries
Sachsen, F219	---	03.2004	Blohm + Voss, Hamburg	Deutsche Marine
Jewel of the Seas	90.090	03-04.2004	Meyer, Papenburg	Royal Caribbean International
Deutschland	15.000	05.2004	Van der Giessen de Noord, Holland	Scandlines
Nils Holgersson	36.468	07-08.2004	Schichau Seebeck Shipyard, Bremerhaven	TT-Line
Norwegian Jewel	93.502	06-07.2005	Meyer, Papenburg	Norwegian Cruise Line
Pride of Hawaii	93.500	02-03.2006	Meyer, Papenburg	Norwegian Cruise Line

Tabelle 8.1: Übersicht über die Schiffe auf denen umfangreiche messtechnische Untersuchungen der elektromagnetischen Felder bzw. Langzeituntersuchungen an drahtlosen Datenübertragungssystemen durchgeführt wurden [NCL, Höegh, TTLine, RCI, Scandlines, Marine, Brittany]

## 8.4. Tabellen, Abbildungen

Abbildung 8.6: Umrechnung der elektrischen Feldstärke von  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  in  $\text{V/m}$ 

englische Abkürzung	englische Bezeichnung	deutsche Abkürzung	deutsche Bezeichnung	Frequenzband
VLF	Very low frequency	SLW	Längstwelle	3 – 30 kHz
LF	Low frequency	LW	Langwelle	30 – 300 kHz
MF	Medium frequency	MW	Mittelwelle	0,3 – 3 MHz
HF	High frequency	KW	Kurzwelle	3 – 30 MHz
VHF	Very high frequency	UKW	Ultrakurzwelle	30 – 300 MHz
UHF	Ultra high frequency	$\mu\text{W}$	Mikrowelle	0,3 – 3 GHz

Tabelle 8.2: Frequenzbänder für die Radiokommunikation sowie ihre englischen und deutschen Abkürzungen [Macnamara95]

Bezeichnung	Frequenzband
L	1 – 2 GHz
S	2 – 4 GHz
C	4 – 8 GHz
X	8 – 12 GHz
Ku	12 – 18 GHz
K	18 – 27 GHz

Tabelle 8.3: Einteilung der Frequenzbänder gemäß der International Telecommunication Union (ITU). Je nach Anwendung und Land besitzen die Bänder allerdings unterschiedliche Frequenzbereiche sowie zum Teil unterschiedliche Benennungen [Macnamara95].

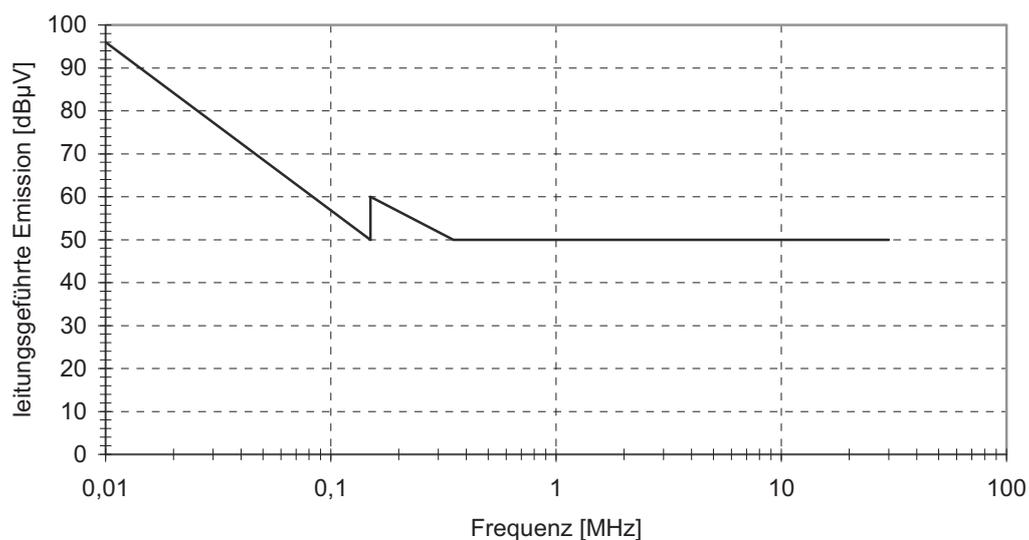


Abbildung 8.7: Gemäß EN 60945 erlaubte leitungsgeführte elektromagnetische Emission auf Versorgungs-, Daten- und Kontrollleitungen elektrischer Geräte an Bord von Schiffen

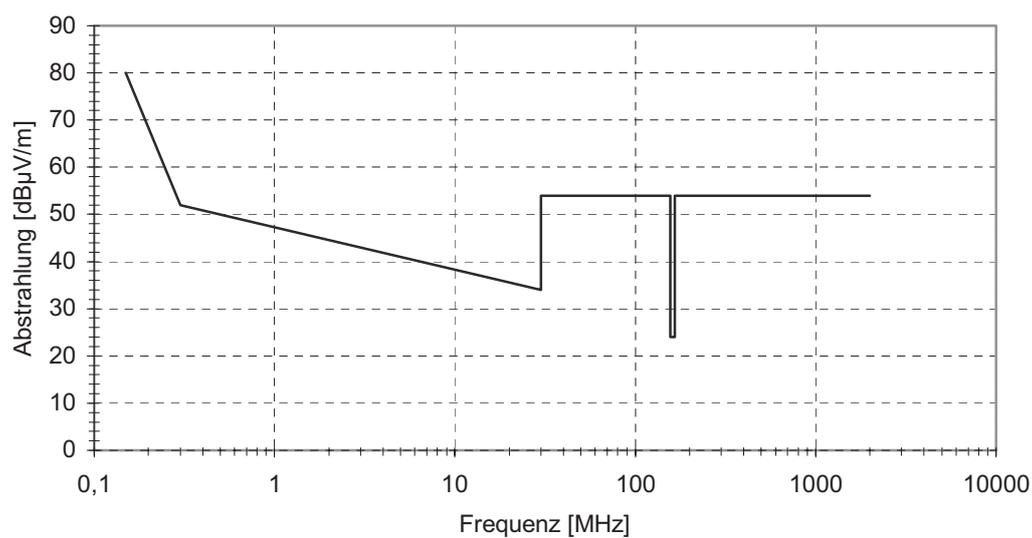


Abbildung 8.8: Gemäß EN 60945 erlaubte elektromagnetische Abstrahlung der Schiffselektronik, gemessen in 3 m Abstand zum Gehäuse

## 8.5. Lebenslauf

### **Persönliche Daten:**

Geburtsdatum, Ort: 15. April 1975 in Hamburg

Staatsangehörigkeit: deutsch / französisch

### **Schule:**

1981-1985 Grundschule Müssenredder, Hamburg

1985-1994 Gymnasium Harksheider Straße, Hamburg  
Abschluss: Abitur

### **Berufsausbildung:**

08/1991-01/1995 Ausbildung zum staatlich geprüften Chemisch-technischen Assistent (CTA), Staatliche Gewerbeschule Chemie / Gymnasium Altona, Hamburg

### **Wehrdienst:**

04/1995-01/1996 Grundwehrdienst als Sanitäter in Breitenburg

Fortbildung zum Krankenpflegehelfer im Bundeswehrkrankenhaus Hamburg

### **Studium:**

04/1996-09/2001 Studium an der Universität Hamburg

Abschluss: Diplom-Physiker

Wahlfach: Biophysik, Nebenfach: Elektronik

Diplomarbeit: Entwicklung eines ultrastabilen Laserdiodensystems bei 657 nm für die Metrologie

### **Auslandspraktika:**

10/2001-12/2001 DAAD Auslandsstipendium an der staatlichen Universität von Campinas (Unicamp), Sao Paulo, Brasilien

**Berufliche Tätigkeiten:**

02/1996-07/1996	Hilfskraft bei der Eppendorf–Netheler–Hinz GmbH, Hamburg
08/1997-08/1999	Hilfskraft im Institut für Zellbiochemie und klinische Neurobiologie des Universitätskrankenhauses Eppendorf, Hamburg
Studiums begleitend	Hilfskraft an den physikalischen Instituten der Universität Hamburg
02/2002-09/2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Messtechnik und Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) an der Technischen Universität Hamburg-Harburg
Seit 10/2006	System Engineer EMC im Automotive Innovation Center (AIC) bei der NXP Semiconductors GmbH, Hamburg





