

Zuverlässige Datenübertragung in maritimer Umgebung unter besonderer Berücksichtigung der EMV

Helge Fielitz, Jan Luiken ter Haseborg, Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Messtechnik

1. Einleitung

An Bord von Schiffen befindet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Funkssysteme. Hierbei sind insbesondere die Radaranlagen zu nennen, da sie Hochfrequenzpulse im Kilowattbereich abstrahlen. Weitere Systeme sind z.B. UKW Seefunk, AIS, Satellitenkommunikationseinrichtungen, Wetterfax, Handsprechfunkgeräte (Walkie-Talkies) etc. Bei Kreuzfahrtschiffen kommen für den Passagierkomfort weitere Systeme wie GSM-Basisstationen und WLAN-Zugangspunkte zum Einsatz. Zusätzlich befindet sich eine erhebliche Anzahl an Mobiltelefonen an Bord, die neben der Mobilfunkanbindung fast alle mit Bluetooth- und WLAN- Funksystemen ausgestattet sind. Diese Vielzahl an Hochfrequenzsystemen auf engem Raum stellt besondere Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit der Anlagen.

Durch diese große Anzahl an Sendergeräten auf engem Raum ergeben sich besondere Herausforderungen für die elektromagnetische Verträglichkeit der schiffsinternen Baugruppen.

Die für den Schiffsbetrieb benötigten Sendeanlagen nutzen gesetzlich zugewiesene und geschützte Frequenzbereiche, die Koexistenz mit anderen installierten Systemen ist gewährleistet [3]. Für zusätzlich installierte drahtlose Systeme gilt diese Koexistenzbetrachtung jedoch nicht, insbesondere wenn sie Frequenzen oberhalb von 2 GHz nutzen. Die in diesem Bereich relevante Norm IEC 60945, in der die maximale elektromagnetische Abstrahlung festgelegt wird, ist aktuell nur bis 2 GHz definiert. Bei höheren Frequenzen ist kein Grenzwert für die Abstrahlung definiert, es muss in diesem Bereich daher mit Störungen gerechnet werden [6].

In Bild 1 wird ein typisches Spektrum auf der Brücke eines modernen Kreuzfahrtschiffes dargestellt. Um kurzzeitig auftretende Signale, z.B. Radarpulse, zu messen, wird im Max-Hold-Modus mit einer Summationszeit > 1 Minute gemessen.

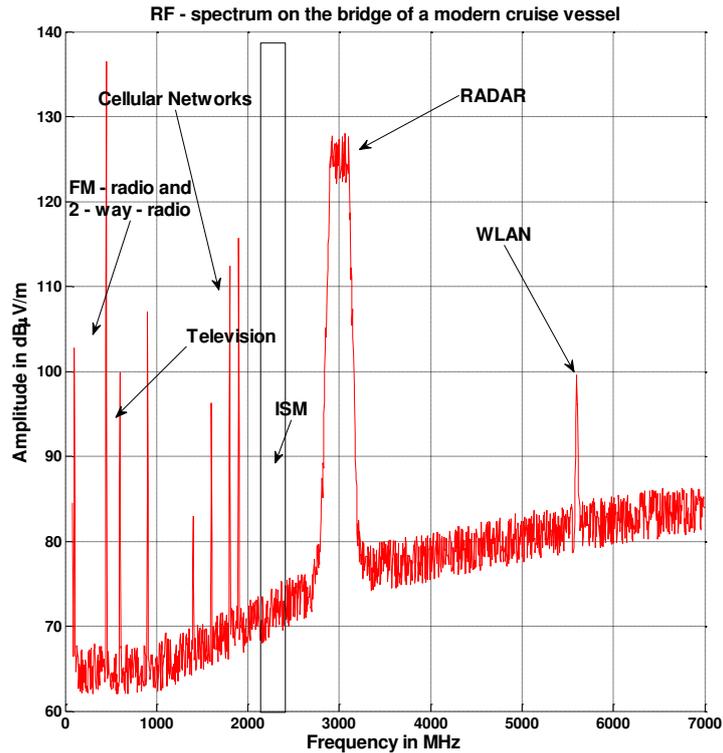


Bild 1: Frequenzspektrum aufgenommen auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiffes

Die gemessenen Signale lassen sich aufgrund der Herkunft in zwei Gruppen einteilen:

- 1) Signale die durch Systeme an Bord erzeugt werden: Hierzu gehören Funkgeräte im VHF- und UHF-Bereich, Radarsysteme, Mobiltelefon-Basisstationen, Störungen durch die Bordelektronik und weitere Quellen
- 2) Signale von externen Quellen: Im Spektrum sind deutlich die an Land installierten Radio- und Fernsehsender zu erkennen. Ebenfalls sieht man die starken Signale der an Land befindlichen Mobilfunk-Basisstationen.

Ein Funkkanal beeinflusst das übertragene Signal abhängig von der Umgebung. Neben der frequenz- und entfernungsabhängigen Dämpfung wird das Signal durch Rauschen, Störungen durch andere Funksysteme, Phasendrehungen, Mehrwegeausbreitung und Auslöschung beeinflusst. Diese Effekte können zu Fehlern bzw. zu einem Ausfall der Übertragung führen.

Störungen durch andere Funksysteme lassen sich durch eine exklusive Nutzung eines Frequenzbereiches und der Nutzung von steilflankigen Filtern im Empfänger minimieren. Phasendrehungen, Mehrwegeausbreitung und Auslöschungen werden durch eine exklusive Frequenznutzung nicht beeinflusst, diese Effekte sind laufzeit- und frequenzabhängig.

Ein Ansatz für eine hochverfügbare Datenübertragung kann daher die gleichzeitige Nutzung unterschiedlicher Frequenzen sein. Frequenzabhängige Beeinflussungen

(Auslöschungen etc.) lassen sich durch dieses Verfahren minimieren. Zusätzlich bietet diese Verfahren gute Störfestigkeit gegen schmalbandige Störquellen, z.B. andere Datenübertragungssysteme, da die gestörte Frequenz ausgeblendet werden kann. Das Funksystem wählt automatisch andere, störrärmere Übertragungskanäle im Frequenzband. Ein bekannter Vertreter dieser Kategorie ist z.B. Bluetooth. Dabei wird ein Frequenzsprungverfahren genutzt, bei dem bis zu 1600 Mal pro Sekunde ein Frequenzwechsel durchgeführt wird. Dafür stehen insgesamt 79 Frequenzen im 1 – MHz - Abstand zu Verfügung. Zusätzlich werden belegte Frequenzen erkannt und für die weitere Datenübertragung nicht mehr verwendet [7]. Durch die spektrale Aufweitung der übertragenen Informationen ist im Gegensatz zu Einzelfrequenzsystemen eine erhöhte Bandbreite für die Übertragung notwendig. Gegen breitbandige Störer, die den kompletten verwendeten Frequenzbereich abdecken, ist dieses System hingegen nicht geschützt [4].

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Ausnutzung der unterschiedlichen Ausbreitungswege, hervorgerufen durch Mehrwegereflexionen. Bei diesem sogenannten Diversity - Verfahren werden mehrere Empfangsantennen in einem festen Abstand zueinander positioniert. Der Empfänger wählt selbsttätig die Antenne mit dem stärksten Signal aus. Als Entscheidungskriterium kann hierbei z.B. die Feldstärke oder das Signal-zu-Rausch-Verhältnis dienen. Diese Möglichkeit bietet gewissen Schutz gegen Signalauslöschungen durch destruktive Interferenz von Mehrwegesignalen. Eine Störquelle im Nahbereich, die von allen Empfangsantennen aufgenommen wird, kann jedoch durch diese Anordnung nicht ausgeblendet werden.

Wird bei den potentiellen Störquellen von kurzen, pulsformigen Störungen ausgegangen, kann eine zeitlich versetzte Mehrfachübertragung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Übertragung beitragen. Im Empfänger werden beide Datenpakete zwischengespeichert, analysiert und nur das fehlerfreie wird zur weiteren Verarbeitung freigegeben.

Da in vielen Fällen bei der Dimensionierung von zusätzlichen Funkstrecken die Minimierung von Folgekosten gefordert ist, bieten sich die lizenzfreien ISM-Bänder als Übertragungsmedium an [2]. Das Problem der Störvermeidung einer Übertragung ist dabei besonders wichtig, da das Funksystem mit vielen anderen in dem Frequenzbereich angesiedelten Diensten in Koexistenz tritt. Eine exklusive, ungestörte Frequenznutzung kann daher nicht gewährleistet werden. Einige konkurrierende Funkdienste, z.B. analoge Videoübertragungen mit mehreren MHz Bandbreite, können als Breitbandstörer das Frequenzband in ihrem Umfeld komplett blockieren [4].

Wird statt eines Frequenzbereiches zur Datenübertragung mehrere weit auseinander liegende Bereiche genutzt, ergeben sich Vorteile:

Breitbandstörer wirken nur noch auf einen Kanal des Funksystems. Ist der Frequenzabstand zwischen den Übertragungskanälen größer als die Bandbreite der Störung, ist zumindest ein Übertragungsweg unbeeinflusst. Auslöschungen durch Mehrwegeausbreitung treten bei den Übertragungswegen unabhängig voneinander auf, ein gleichzeitiges Minimum lässt sich durch geschickte Frequenzwahl vermeiden. Ist der Frequenzabstand zwischen den Übertragungskanälen hinreichend groß, reichen einfache Eingangsfiler vor den Empfängern, um eine gegenseitige Desensibilisierung durch das Sendesignal zu verhindern. Werden die beiden

Frequenzen zusätzlich nicht als Vielfache voneinander gewählt, haben eventuell vorhandene Oberwellen des jeweils anderen Systems keinen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Eingangsstufe des Empfängers.

In Europa werden die Forderungen nach großem Frequenzabstand und lizenzfreier Nutzung vom Frequenzpaar 868 MHz und 2,4 GHz erfüllt. Für beide Frequenzbereiche sind kostengünstige Funkmodule industriell verfügbar. Ein weiterer Vorteil liegt dabei bei der Nutzung von Bluetooth im 2,4 - GHz – ISM - Band: Durch das verwendete adaptive Frequenzsprungverfahren ist diese Übertragung deutlich robuster gegenüber Störungen als schmalbandige auf einen Kanal festgelegte Übertragungsverfahren.

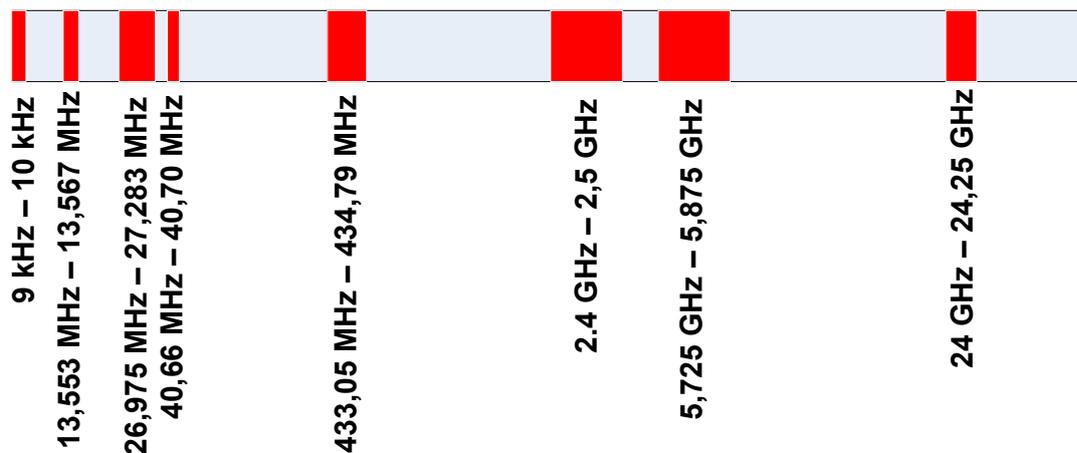


Bild 2: ISM Frequenzbereiche in Europa

Eine Sonderrolle nehmen die Frequenzen im Bereich 863 MHz bis 870 MHz ein. Sie zählen nicht zu den ISM-Frequenzen, dürfen jedoch in Deutschland unter ähnlichen Bedingungen wie der ISM-Bereich genutzt werden. Im Frequenzband von 869,40 MHz bis 869,65 MHz ist dabei eine maximale Sendeleistung von 500 mW ERP zugelassen [1].

Bei der Untersuchung der Frequenzbelegung auf einem modernen Kreuzfahrtschiff, vgl. Bild 1, wurde festgestellt, dass die Frequenzbereiche bei 869 MHz und 2,4 GHz nahezu unbelegt sind, d.h. es finden dort zur Zeit der Messung keine Aussendungen statt. Trotzdem ist insbesondere im 2,4 - GHz – Band von einer Nutzung z.B. durch WLAN oder Bluetooth von Mobiltelefonen der Besatzung und der Passagiere auszugehen. Diese Tatsache muss bei der Konzeption des Übertragungssystems berücksichtigt werden.

Um eventuell auftretende konstruktive und destruktive Interferenzen der Funksignale durch Mehrwegeausbreitung abschätzen zu können, wird die Funkübertragung mittels Matlab simuliert. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

Zwischen Sender und Empfänger befindet sich eine direkte Sichtverbindung. Es gibt einen dominierenden Reflexionspfad, hervorgerufen durch den Boden oder die Wasseroberfläche. Das direkte und das reflektierte Signal überlagern sich, was zu ortsabhängiger konstruktiver und destruktiver Interferenz führt. Die Simulation wird

für die Anfangs- und Endfrequenz des Bluetooth-Funksystems und für eine Festfrequenz von 869 MHz durchgeführt.

Beide Antennen befinden sich in einer Höhe von 40 m über dem Boden, die Sendeleistung beträgt 20 dBm, abgestrahlt über einen Dipol mit 0 dB Gewinn bezogen auf einen Dipol. Die Empfängerempfindlichkeit beträgt -90 dBm. Der Empfänger nutzt eine identische Antenne wie der Sender. Durch Kabel und Steckverbinder im Signalweg kommen zusätzlich 5 dB Verluste hinzu. Die maximale Streckendämpfung, bei der eine Übertragung noch möglich ist, errechnet sich über folgende Formel:

$$P_{TX} + G_{RXAnt} + G_{TXAnt} - d_{Stecker} + E_{Empfänger} = d_{Strecke}$$

P_{TX} : Sendeleistung in dBm

G_{RXAnt} : Gewinn der Empfangsantenne

G_{TXAnt} : Gewinn der Sendeantenne

$d_{Stecker}$: Verluste in Kabeln und Steckverbindern

$E_{Empfänger}$: Empfängerempfindlichkeit

$d_{Strecke}$: maximal zulässige Streckendämpfung

In dem simulierten Beispiel darf die maximale Streckendämpfung demnach 105 dB betragen.

Zusätzlich wird die entfernungsabhängige Freifeldämpfung als Referenzwert mit Hilfe der Formel 1 berechnet [5]:

$$L_F = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 20 \log\left(\frac{c}{4\pi}\right) \quad [1]$$

L_F ist der errechnete Pfadverlust in dB, f die Sendefrequenz, d die Entfernung zwischen Sender und Empfänger und c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit, hier die Lichtgeschwindigkeit.

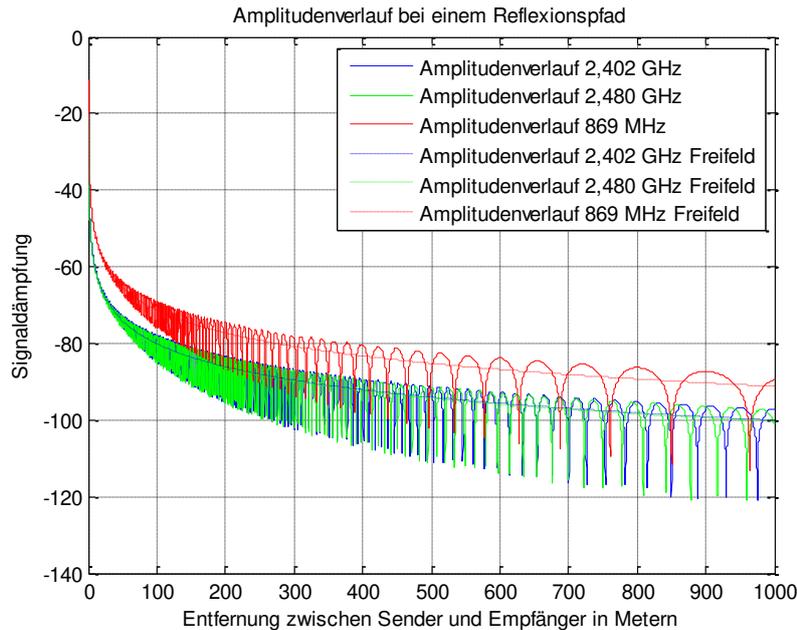


Bild 3: Simulation der Minima und Maxima einer Funkübertragung mit zwei Frequenzbereichen

Die Ausbildung von Signalminima und Signalmaxima aufgrund der Überlagerung des direkten und des reflektierten Signals am Empfänger ist zu erkennen. Diese Signaleinbrüche sind bis zu 20 dB unterhalb des Wertes der errechneten Freifelddämpfung. Die Minima und Maxima für die unterschiedlichen Frequenzen treten an verschiedenen Orten auf.

Ab einer Entfernung von 300 m wird die durch die Parameter der Funkstrecke festgelegte zulässige Dämpfung von 105 dB in den Minima unterschritten. Ab dieser Entfernung ist mit einem positionsabhängigen Ausfall der Datenübertragung des 2,4 - GHz – Systems zu rechnen. Durch die geringere Streckendämpfung bei 869 MHz tritt dieser Effekt bei der Frequenz erst ab einer Entfernung von ca. 500 m zwischen Sender und Empfänger auf. Durch eine Kombination beider Funkssysteme lässt sich die Reichweite auf über 1000 m ausdehnen, da die räumlichen Positionen der Minima beider Funkssysteme nicht zusammenfallen.

2. Praktische Realisierung

Es soll für eine Schiffsüberführung von der Werft zur Nordsee für navigatorische Zwecke eine zuverlässige und redundante Datenübertragung zwischen ortsfesten Landstationen und einer mobilen Schiffsstation realisiert werden. Über diese Verbindung sollen Wetterinformationen im NMEA-Datenformat übertragen und in das eigens für die Schiffsüberführung installierte Conning-Display eingespeist werden. Für das redundante Übertragungssystem werden Funkmodule eingesetzt, die jeweils das Frequenzband im Bereich 869 MHz und 2,4 GHz nutzen.

Das System besteht aus zwei Einheiten, einer Landstation, die NMEA-Daten aussendet, und einer Schiffstation zum Empfang der Informationen. Die Landstation

sendet auf beiden Frequenzbändern gleichzeitig identische Datentelegramme. Die mobile Schiffsstation empfängt beide Datenströme. Eine Auswahlbaugruppe wählt dabei selbsttätig das Signal mit der geringsten Fehlerrate aus und leitet es an die Schiffsautomatisierung weiter. Durch dieses Verfahren findet trotz Ausfall eines Übertragungsweges eine unterbrechungsfreie Datenübertragung statt. Von einer gleichzeitigen Störung der beiden genutzten Frequenzbereiche (869 MHz und 2,4 GHz) wird bei der Auslegung des Systems nicht ausgegangen. Die übertragenen NMEA-Telegramme besitzen zur Fehlererkennung eine Prüfsumme am Ende des Datensatzes. Falls es trotz der redundanten Übertragung zu Fehlern kommt, werden diese im Empfangsgerät erkannt und das Telegramm wird verworfen.

Als Beispiel sind die grundlegenden Daten zweier Module für 2,4 GHz und 869 MHz beschrieben [8] [9]:

	Modul 1	Modul 2
Frequenzbereich	2,402 GHz – 2,480 GHz	869,525 MHz
Übertragungsverfahren, Modulation	GFSK mit Frequenzsprungverfahren, Auswahl aus 79 Frequenzen nach dem Bluetooth-Standard	Frequenzumtastung, feste Trägerfrequenz
Reichweite unter optimalen Bedingungen (Freifeld) laut Datenblatt	1500	> 2000 m
Fehlererkennung / Fehlerkorrektur	Vorhanden, automatische Wiederaussendung fehlerhafter Datenpakete	Fehlererkennung über Prüfsumme vorhanden, fehlerhafte Datenpakete werden verworfen
Sendeleistung	20 dBm	27 dBm
Empfängerempfindlichkeit	-90 dBm	-90 dbm
Selbsttätiges Ausweichen bei Störung einer Frequenz	Ja	Nein

Tabelle 1: Grundlegende Parameter der verwendeten Funkmodule

Bei einer räumlich dichten Anordnung mehrerer Sender muss insbesondere die elektromagnetische Verträglichkeit der Systeme betrachtet werden. Die hohen Feldstärken der Sendeantennen können zu ungewollter Einstrahlung in andere Schaltungsteile führen. Im Falle eines kombinierten Sender-Empfängers kann Hochfrequenzenergie über den Antenneneingang in den Empfänger einkoppeln, was zu einer unerwünschten Desensibilisierung der Schaltung führen kann. Die hier gewählten Frequenzbereiche liegen mindestens 1,53 GHz auseinander. Dadurch ist davon auszugehen, dass auch einfache Filter im Empfängerzweig das Sendesignal des jeweils anderen Systems hinreichend dämpfen und es somit den Empfänger nicht desensibilisiert.

Desweiteren wird die gegenseitige Beeinflussung der Funksysteme durch Oberwellen betrachtet. Da sich in den 2,4 GHz – Bereich jedoch keine Vielfachen von 869 MHz befinden, befinden sich die Oberwellen des Senders außerhalb des genutzten Frequenzbereiches.

Für die beiden verwendeten Frequenzbereiche soll jeweils eine Antenne verwendet werden. Aufgrund baulicher Einschränkungen werden beide Antennen räumlich dicht beieinander auf einem Antennenträger montiert. Für das 2,4 GHz – Band soll eine gestockte Dipolantenne verwendet werden, für 869 MHz wird eine Groundplane-Antenne genutzt. Beide Antennen verhalten sich in horizontaler Ebene als Rundstrahler. Mittels Simulation wird die gegenseitige Beeinflussung der Antennen und die Veränderung des Antennendiagramms betrachtet.

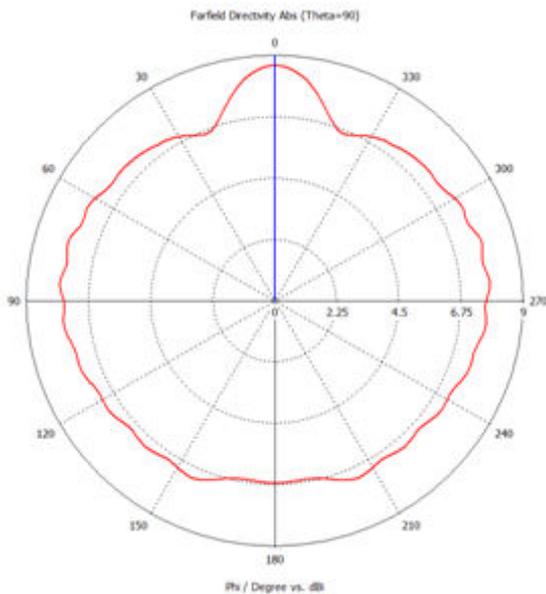


Bild 4: Simulation des horizontalen Antennendiagramms im Fernfeld der gestockten Dipolantenne bei 2,4 GHz mit einer 60 cm entfernten Groundplane - Antenne, die Groundplane - Antenne befindet sich in der 180° - Position

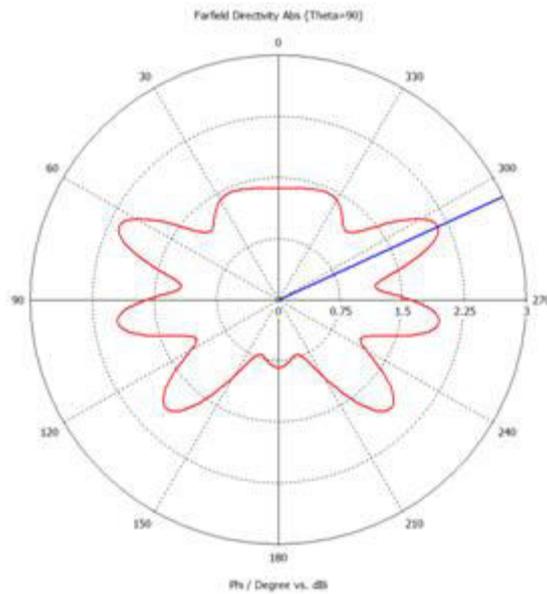


Bild 5: Simulation des horizontalen Antennendiagramms der Groundplane-Antenne bei 869 MHz mit einer 60 cm entfernten gestockten Dipolantenne, die Dipolantenne befindet sich bei 0°

Wie die Simulation zeigt, beeinflusst die jeweils andere Antenne das Richtdiagramm der sendenden Antenne. Die absolute Änderung im Fernfeld der 2,4 – GHz - Antenne beträgt jedoch weniger als 2 dB. Die absolute Änderung im Fernfeld der Groundplane – Antenne beträgt weniger als 1 dB. Die Abstrahlung in horizontaler Richtung kann daher als dem Rundstrahlverhalten angenähert betrachtet werden.

Zur einfachen Wartung ist das System in funktionale Baugruppen aufgeteilt, die auf einer gemeinsamen Tragschiene montiert werden. Jede Baugruppe ist mit einem eigenen Spannungsregler ausgestattet, um gegenseitige Beeinflussungen über die Stromversorgung zu vermeiden. Ein wasserdichtes Kunststoffgehäuse sorgt für Wetterschutz, die Spannungsversorgung erfolgt über ein externes Netzgerät.

3. Zusammenfassung

Durch die Vielzahl von Sendeanlagen und die ausgedehnten metallischen Flächen handelt es sich bei Schiffen um komplexe elektromagnetische Umgebungen. Die Anzahl und Art der potentiellen Störquellen ist nur begrenzt vorhersagbar, da z.B. im Fall von Kreuzfahrtschiffen die Passagiere eine Vielzahl elektronischer Systeme (Telefone, Laptops etc.) mitbringen, deren Ort und Betriebsdauer variieren kann. In dieser komplexen Umgebung ist eine zuverlässige und ausfallsichere Kommunikationslösung mit Landstationen im Nahbereich gefordert. Zur Minimierung der Kosten wird dabei auf kostenfrei nutzbare ISM-Bänder zurückgegriffen, die mit anderen Funkdiensten konkurrierend geteilt werden müssen.

In dieser Veröffentlichung werden die Auswirkungen der Störungen betrachtet und eine einfache Mehrwegeausbreitungsumgebung simuliert. Aufgrund dieser Betrachtungen wird ein System projiziert, das simultan zwei unterschiedliche Frequenzbereiche zur Datenübertragung verwendet. Durch dieses Verfahren können die Auswirkungen von elektromagnetischen Störungen auf das System minimiert werden. Durch die unterschiedlichen Frequenzen variieren die Interferenzmuster der Mehrwegeausbreitung. Somit ist gewährleistet, dass sich mindestens eine Funkübertragungsstrecke nicht in einer Zone mit destruktiver Interferenz befindet und daher die Übertragung aufrechterhalten werden kann.

Das vorgestellte System wird praktisch aufgebaut und im Rahmen einer Schiffsüberführung auf der Ems zur Übermittlung von Wetterdaten erfolgreich eingesetzt.

Literatur:

- [1] Bundesnetzagentur Vfg 43/2012: Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen mit geringer Reichweite für nicht näher spezifizierte Anwendungen; Non-specific Short Range Devices (SRD), Bundesnetzagentur Vfg 43/2012
- [2] Bundesnetzagentur, Vfg 76/2003: Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzteilbereichen gemäß Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV), Teil B: Nutzungsbestimmungen (NB) D138 und D150 für die Nutzung durch die Allgemeinheit für ISM-Anwendungen
- [3]: Pilsak, T., ter Haseborg, J.: "EMC investigations of narrowband and broadband interferences of 2.4-GHz-WLAN applicationson cruise and container vessels" 19th International Wrocklaw symposium and exhibition on electromagnetic compatibility, Wrocklaw, 11-13 June,2008
- [4] Fielitz, H., ter Haseborg, J.: "On How to Measure the Interference of Multiple Wireless Transmission Systems Using a Well Defined Environment" International Rome symposium and exhibition on electromagnetic compatibility, Rome, 17-21 September, 2012
- [5] T.S. Rappaport: "Wireless communications", Prentice-Hall, 1996

- [6] IEC 60945, „Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – General requirements – Methods of testing and required test results”
- [7] Sauter, Martin: “Grundkurs mobile Kommunikationssysteme. Von UMTS und HSDPA, GSM und GPRS zu Wireless LAN und Bluetooth Piconetzen.“, Vieweg & Sohn, 2008
- [8] BlueMod+C11/g2 Data sheet, Release r02, Stollmann E+V GmbH, abgerufen am 1.10.2013
- [9] ARF54 UART TTL modules, Adeunis Wireless products & solutions, abgerufen am 1.10.2013