



1 Einleitung

Moderne Schiffe sind hochkomplexe Anlagen, auf denen eine Vielzahl an Systemen zur Navigation, Kommunikation und Automation zusammenarbeiten. Der Zweck der Systeme ist die Unterstützung der Mannschaft zur Aufrechterhaltung eines sicheren und effizienten Betriebes. Im Gegensatz zu anderen Verkehrsmitteln wie Autos, Eisenbahnen oder Flugzeugen ist die zeitlich begrenzte vollständige Autarkie des Schiffes. Während einer längeren Seereise, z. B. einer Atlantiküberfahrt, müssen sämtliche Bedürfnisse wie Versorgung der Mannschaft und Passagiere, Energie, Positionsbestimmung und Navigation, Fehlererkennung und Behebung von der Mannschaft und den Schiffsystemen eigenständig gelöst werden. Seit 2003 gibt es z. B. die Save Return To Port - Forderung der IMO¹, die eine sichere Navigation von Passagierschiffen bei einem Totalverlust der Brücke für 1.000 Seemeilen (1.852 km) fordert [1]. Für Sonderschiffe, z. B. für Forschungsschiffe oder für Kreuzfahrtschiffe die in Polargebieten eingesetzt werden, wird diese Forderung bis auf 1.500 Seemeilen ausgedehnt. Diese Forderungen stellen besondere Ansprüche an Technik und Personal. Vergleicht man die technischen Ansprüche von Handelsschiffen mit denen von Kreuzfahrtschiffen, wird die höhere technische Komplexität von Kreuzfahrtschiffen deutlich. Die grundlegenden Anforderungen zur Navigation sind identisch, die Ansprüche und Forderungen an Kommunikationseinrichtungen und Sicherheit sind höher.

Der Markt für Kreuzfahrten befindet sich seit Jahren in einem kontinuierlichen Aufwärtstrend. Betrachtet man den europäischen Kreuzfahrtmarkt mit einer Gesamtpassagierzahl von 6,4 Millionen im Jahre 2013, liegt Deutschland als Herkunftsland der Gäste mit rund 1,69 Millionen Gästen an zweiter Stelle [2, 3]. Die weltweit mit Kreuzfahrten generierten Umsätze steigen seit 2010, im Jahre 2014 belaufen sie sich weltweit auf ca. 37,1 Milliarden US \$ [4].

Die Nutzung des Internets ist heutzutage selbstverständlich geworden. Mit der Entwicklung schneller Mobilfunknetze (2G, 3G, LTE) und der Markteinführung leistungsfähiger Smartphones ist auch die drahtlose Internetnutzung in Europa bedeutsam geworden. In der Entwicklung der mobilen Internetnutzung in Deutschland ist in den letzten Jahren ein starker Wachstumstrend erkennbar. Nutzten im Jahre 2012 noch 35% der Internetnutzer einen mobilen Internetzugang, sind es im Jahre 2014 bereits 69% [5].

¹ International Maritime Organisation



Daraus lässt sich ein großes Interesse an ständiger, individueller, mobiler Kommunikation ableiten. Gepaart mit den stetig steigenden Passagierzahlen der Kreuzfahrtindustrie lässt sich ein großer Bedarf nach individueller mobiler Kommunikation mit hohen Datenraten auf Kreuzfahrten annehmen.

Während an Land Internetanbindungen mit Datenraten über 100 MBit in vielen Gebieten Deutschlands verfügbar sind [6], erfolgt die Internetanbindung von Kreuzfahrtschiffen selbst im Hafen über eine Satellitenverbindung. Diese Verbindungen haben, abhängig von den verwendeten Satelliten, eine relativ geringe Datenraten, lange Latenzen und sind kostenintensiv. Eine Nutzung dieser Verbindung für den Schiffsbetrieb findet heutzutage bereits statt, darüber wird die Kommunikation mit Behörden, Reedereien und Reparatur- und Zulieferbetrieben abgewickelt. Eine weitere Nutzung, z. B. die Übertragung von navigatorischen Informationen in Echtzeit, erfolgt aktuell nicht. Eine Nutzung der an Land verfügbaren Datenverbindung an Bord kann zum Komfort und zur Schiffssicherheit beitragen.

Vorversuche haben ergeben, dass in Hafengebieten mit komplexen Mehrwegeausbreitungsbedingungen zu rechnen ist. Diese haben gezeigt, dass eine Datenübertragung zwischen Schiffen und einer Landstation mit handelsüblichen WLAN - Komponenten trotz Sichtverbindung fehlschlägt. Die besonderen Ausbreitungsbedingungen verhindern die Nutzung von kommerziell erhältlichem Equipment, wie es z. B. für Büro- oder Industrieanwendungen verfügbar ist. Ein wichtiges Thema bei der Nutzung von Funkanwendungen ist die elektromagnetische Verträglichkeit mit den elektronischen Systemen an Bord. Neben den für die Navigation notwendigen Systemen wie Sprechfunk und Radar, befindet sich eine große Anzahl von Mobiltelefonen, Laptops und Smartphones der Passagiere an Bord. Zusätzlich kommt hinzu, dass die gängigen EMV - Normen die Störemission und die Störfestigkeit für navigatorisches Equipment nur bis 2 GHz spezifizieren. WLAN - Systeme mit einer Nutzfrequenz bei 2,4 GHz bzw. 5 GHz befinden sich mit ihren Sendesignalen außerhalb dieser Spezifikation. Im Gegensatz zu anderen maritimen Funksystemen kann bei diesen Anwendungen nicht von einem ungestörten Kanal ausgegangen werden [7].



2 Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Realisierung von zuverlässigen Datenübertragungslösungen in komplexen elektromagnetischen Umgebungen für maritime Anwendungen. Die Funkausbreitung in exemplarischen Gebieten des Schiffsbetriebes wird vermessen und untersucht, um die technischen Anforderungen, die an das System gestellt werden, definieren und umsetzen zu können. Diese gemessenen Szenarien dienen als Datengrundlage für die Erstellung von Simulationen, um die Funkausbreitung in neuen, unbekanntem Szenarien abschätzen zu können. Über einen Vergleich mit gängigen elektromagnetischen Ausbreitungsbedingungen werden Unterschiede und Besonderheiten der Funkausbreitung in maritimen Gebieten im Vergleich zu z. B. Büroumgebungen identifiziert. Ein besonderer Schwerpunkt wird dabei auf die elektromagnetische Verträglichkeit der Übertragungsstrecke mit anderen Systemen, sog. Koexistenz, gelegt.

In Hafengebieten und auf Schiffen befinden sich eine Vielzahl an Sendern, die die Datenübertragungsstrecke beeinflussen können. Verfahren auf der Hardwareebene zur Minimierung dieser Einflüsse werden untersucht und in Demonstrationsanlagen der Schiff-Land-Übertragung erprobt. Zugleich muss sichergestellt werden, dass die neuen Übertragungsstrecken die vorhandenen Anlagen und Systeme nicht beeinflussen oder stören. Die Nachbildung der gemessenen Ausbreitungsbedingungen wird im Labormaßstab untersucht. Basierend auf den gemessenen Ausbreitungsbedingungen werden Antennenformen und Anordnungen entwickelt und untersucht, die eine zuverlässige und stabile Datenübertragung mit hoher Datenrate in komplexer, sich ändernder Umgebung ermöglichen. Um die praktische Realisierbarkeit zu demonstrieren, werden funktionsfähige Prototypen für die Datenübertragungsstrecke aufgebaut. Dabei werden unterschiedliche Verfahren zur Behandlung der Mehrwegeausbreitungsproblematik betrachtet und im realen Betrieb untersucht. Zusätzlich zur Schiff-Land-Kommunikation werden die Datenübertragungssysteme im Schiff untersucht. Es werden Lösungen untersucht und erprobt, um vorhandene, für den Schiffsbetrieb notwendige Systeme an ein schiffweites Datennetzwerk anzubinden. Zur Erhöhung der Sicherheit des Personals bei Störfällen in abgeschlossenen Bereichen, z. B. in Maschinenräumen, wird eine passive Personenlokalisierungsmethode, basierend auf einem drahtlosen Sensornetzwerk, vorgestellt.

3 Stand der Technik

3.1 Drahtlose Übertragungssysteme

In der industrialisierten Welt werden eine Vielzahl von Funksystemen verwendet. Von vielen dieser Systeme wird von den Nutzern eine nahezu flächendeckende und ständige Funktion erwartet. Das Bewusstsein, dass für die Funktion eine komplexe Funkstrecke notwendig ist, fehlt den Nutzern.

Ein geeignetes Beispiel ist hierbei die Nutzung von Mobiltelefonen, deren Nutzung zunehmend die klassischen verkabelten Telefonanschlüsse ersetzt. Mobile Datenraten, die denen von Festanschlüssen entsprechen, sind in Industrieländern mittlerweile großflächig verfügbar und bezahlbar. Weitere alltägliche Anwendungen für Funksysteme sind z. B. drahtlose Thermometer oder Funktüröffner für Kraftfahrzeuge. Diese weit verbreiteten Systeme besitzen idealerweise eine hohe Zuverlässigkeit, damit sie vom Verbraucher akzeptiert werden.

Insbesondere in industriellen Umgebungen und speziell in maritimer Umgebung kann die Funktion von Funksystemen sicherheitskritisch sein. Ein eventuell auftretender Ausfall kann immense Kosten verursachen oder sogar Menschenleben gefährden. In diesen speziellen Umgebungen ist es notwendig, dass die sicherheitskritischen Funksysteme unter allen Bedingungen zuverlässig funktionieren.

Zur Veranschaulichung der Frequenznutzung wird im folgenden das Hochfrequenzspektrum auf einem modernen Kreuzfahrtschiff gezeigt (Bild 1) und analysiert.

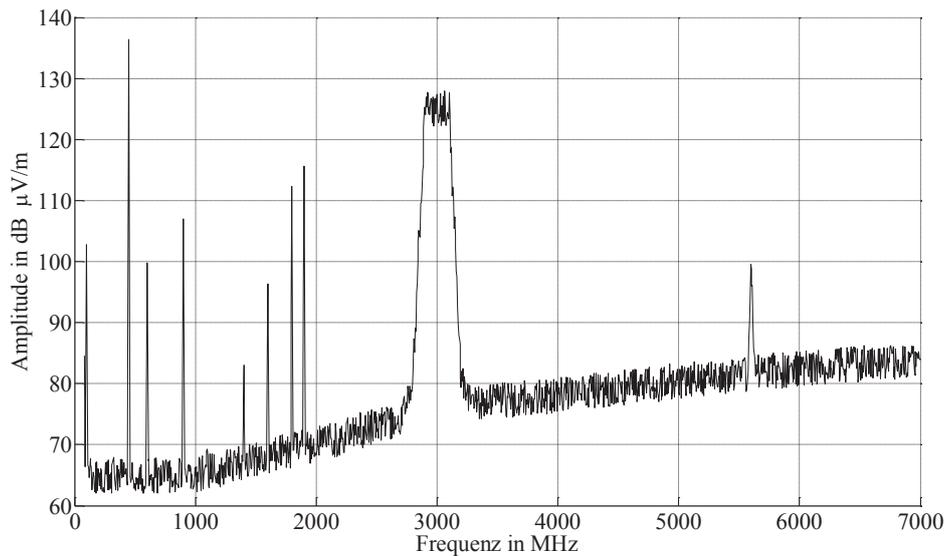


Bild 1: Gemessenes Hochfrequenzspektrum auf der Brücke eines modernen Kreuzfahrtschiffes

Bild 1 zeigt die gemessene Frequenzbelegung auf der Brücke eines Kreuzfahrtschiff in einem deutschen Hafengebiet im Jahre 2013 im Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 7 GHz. Zur Zeit der Messung ist das Schiff weitestgehend unbelegt, außer der Crew und Wartungspersonal befinden sich keine Gäste an Bord.

Eine genauere Betrachtung der Emissionen lässt einen Rückschluss auf die Quelle der Aussendungen zu. Die nachfolgende Tabelle stellt die zu diesem Zeitpunkt aktiven Funkdienste dar. Die zugehörigen Frequenzen korrelieren mit den gemessenen Peaks der Amplituden in Bild 1.

Frequenz	Funkdienst
87,5 MHz – 108 MHz	Analoger Rundfunk
450 MHz	Sprechfunk
600 MHz	Fernsehen (DVB-T)
900 MHz, 1800 MHz	Mobilfunk
3 GHz	S – Band Radar
5,5 GHz	WLAN nach IEEE 802.11a bzw. IEEE 802.11n

Tabelle 1: Aktive Funkdienste während der Messung des Hochfrequenzspektrums



Der ISM - Frequenzbereich zwischen 2,4 GHz und 2,5 GHz ist zur Zeit der Messung nicht belegt, zum Zeitpunkt der Messung findet in diesem Frequenzbereich keine Aktivität statt.

Es können noch weitere Funkssysteme in dem vermessenen Gebiet installiert sein, es ist möglich dass diese Sender zur Zeit der Messung jedoch nicht aktiv waren. Die Messung wird im Max – Hold – Modus mit einer Integrationsdauer von 10 Minuten durchgeführt, daher werden zur Messdauer inaktive Funkdienste nicht vom Spektrumanalysator erfasst.

3.1.1 Maritime Anwendungen drahtloser Übertragungssysteme

Die Nutzung von Systemen zur Übertragung von Informationen über größere Entfernungen wird für Anwendungen an Land seit 180 vor Christus beschrieben. Der Grieche Polybios schlägt eine optische Übertragungslinie für Buchstaben mittels Fackelsignale vor. Praktische Anwendungen von optischen Übertragungseinrichtungen waren die Zeigertelegrafienlinien, z. B. eine 1834 eröffnete, 600 km lange Verbindung zwischen Berlin und Koblenz [8]. Mit der Nutzung von leitungsgeführten elektrischen Signalen konnten die Übertragungslinien weitestgehend wetterunabhängig betrieben werden. Als Guglielmo Marconi 1901 die erfolgreiche drahtlose Übertragung von Morsezeichen zwischen England und Amerika demonstrieren konnte, lag die Nutzung von drahtlosen Übertragungssystemen für die Schifffahrt in greifbarer Nähe [8]. Mit der Entwicklung der praktischen Nutzbarkeit dieser Technik in den folgenden Jahren wuchs das Interesse der Seefahrt an dieser damals revolutionären Technologie. Zuvor war eine Kommunikation zwischen Schiffen bzw. zwischen Schiff und Landstation nur mittels optischen oder akustischen Hilfsmitteln möglich. Die Reichweite dieser Kommunikationslösungen war auf Sicht- bzw. Hörweiten begrenzt. Im Jahre 1901 gelang erstmals eine drahtlose Übertragung eines gemorsten „S“ zwischen Neufundland und England. Die bei diesem Experiment verwendete Wellenlänge wird mit 366 m angegeben, was einer Frequenz von 820 kHz entspricht. Der erste belegte Einbau einer Funkstation für praktische Anwendungen auf einem deutschen Handelsschiff ist für das Jahr 1901 auf der „Kaiser Wilhelm der Große“ belegt [9]. Die Anlage war in der Lage, Morsezeichen über das Tasten des Senders abzustrahlen. Der Empfang erfolgte über einen Spitzengleichrichter. Aus einem Halbleitermaterial und einer Metallnadel wird eine Diode aufgebaut, an der das Antennensignal direkt ohne Verstärkung demoduliert wird. Der Empfang erfolgte über Kopfhörer, da die empfangene Leistung für Lautsprecherbetrieb nicht ausreichte. Die Reichweite damaliger Anlagen betrug etwa 400 km. Aus dieser Zeit stammt der Beruf des Funkers, denn für den Betrieb der Anlagen und die Nachrichtenübermittlung war speziell für diese Tätigkeit ausgebildetes Personal notwendig.



Die drahtlose Telegrafie wurde hinsichtlich der Sende- und Empfangstechnik stetig verbessert, erforderte jedoch weiterhin eine manuelle Kodierung und Dekodierung, um die gemorsten Zeichen in lesbare Buchstaben umzusetzen. Die Entwicklung des Sprechfunks stellte den nächsten Meilenstein in der Entwicklung der drahtlosen Kommunikation dar. Zur damaligen Zeit wurden Kurz- und Grenzwellenfrequenzen genutzt. Dieser Frequenzbereich erlaubt durch Reflexionen an höheren Luftschichten zwar sehr große Reichweiten, die Verbindung kann jedoch stark durch Störungen beeinträchtigt werden. Die Qualität der Übertragung eines Gespräches kommt nicht an die Signalqualität eines Telefongespräches heran.

Mit dem Aufkommen von UKW Sprechfunk für den Schiffsbetrieb im Jahre 1951 wird das Funkgerät erstmals auch für nicht speziell für die Tätigkeit ausgebildetes Personal im Regelbetrieb nutzbar [9]. Die genutzten Frequenzen werden in Kanäle mit weltweit einheitlichem Raster aufgeteilt. Durch die Frequenzmodulation und die Übertragung im 2 - m - Band bei 160 MHz wird eine hohe Sprachqualität erreicht. Die Reichweite wird, abhängig von der Antennenhöhe, mit etwa 30 Seemeilen, entsprechend ca. 56 km, angegeben [10]. Mit einer UKW - Sprechfunkanlage wird eine telefonähnliche Kommunikation zwischen Schiffen und zwischen Schiff und Landstation möglich.

Parallel dazu werden erste Systeme zur maritimen Datenübertragung entwickelt. Zuerst wird mittels Funkfern schreiben ausschließlich Text übertragen, was eine schnelle Verbreitung von z. B. Wetterdaten und anderen nautischen Informationen ermöglicht. Später werden Faxübertragungen realisiert, mit denen komplette Wetterkarten auf die mit den entsprechenden Systemen ausgestatteten Schiffe übertragen werden können [11].

Um eine sichere Erkennung und Identifizierung von kommerziellen Schiffen zu ermöglichen, wird im 21. Jahrhundert das Automatic Identification System (AIS) eingeführt. Das System sendet in regelmäßigen Abständen die wichtigsten Schiffsdaten (Geschwindigkeit, Kurs, Position, Name des Schiffes und weitere Daten) auf zwei exklusiven UKW - Kanälen aus [12]. Andere Schiffe und Landstationen empfangen diese ausgestrahlten digitalen Daten und können sie z. B. auf elektronischen Seekarten sichtbar machen.

Mit der Entwicklung der Satellitentechnik werden Satellitentelefone auf Schiffen installiert. Damit ist nahezu weltweite Telefonie bei guter Sprachqualität möglich. Zusätzliche Anschlüsse für Faxgeräte erlauben Kommunikationswege wie in landbasierten Büros. Da die

Entwicklung und der Betrieb einer Satellitenflotte sehr kostspielig sind, entstehen hohe Kosten für die Nutzer bei der Verwendung dieser Systeme.

Aktuell können über Satelliten IP -basierte Datenverbindungen mit Datenraten im Bereich von einigen 10 MBit aufgebaut werden. Abgesehen von der Laufzeit der Signale, entspricht diese Geschwindigkeit einem DSL Anschluss, wie er an Land verfügbar ist. Die Kosten sind jedoch sehr hoch, die Abrechnung erfolgt häufig über einen zeit- oder volumenbasierten Tarif. Bedingt durch die langen Übertragungswege vom Schiff zu dem Satelliten und zurück zur Landstation lassen sich Latenzen im Bereich größer 200 ms nicht vermeiden.

Für die Kommunikation während der Revierfahrt, d. h. während der Fahrt im Hafen, auf Flüssen und in küstennahen Gebieten wird teilweise je nach Verfügbarkeit das landbasierte UMTS bzw. LTE Mobilfunknetz genutzt.

In Bild 2 ist die Entwicklung der maximalen Datenrate der Funkssysteme dargestellt. Da das Morse zwar eine binäre Datenübertragung darstellt, die Zeichenlänge allerdings nicht konstant ist, wird eine Analogie zur digitalen Datenübertragung getroffen. Ein geübter Funker kann etwa 20 Wörter pro Minute geben, wobei ein Wort als 5 Zeichen definiert ist. Das ergibt 1,67 Zeichen pro Sekunde. Wird ein Zeichen als ein Byte einer digitalen Übertragung angenommen, ergibt sich eine Datenrate von 13 Bit pro Sekunde.

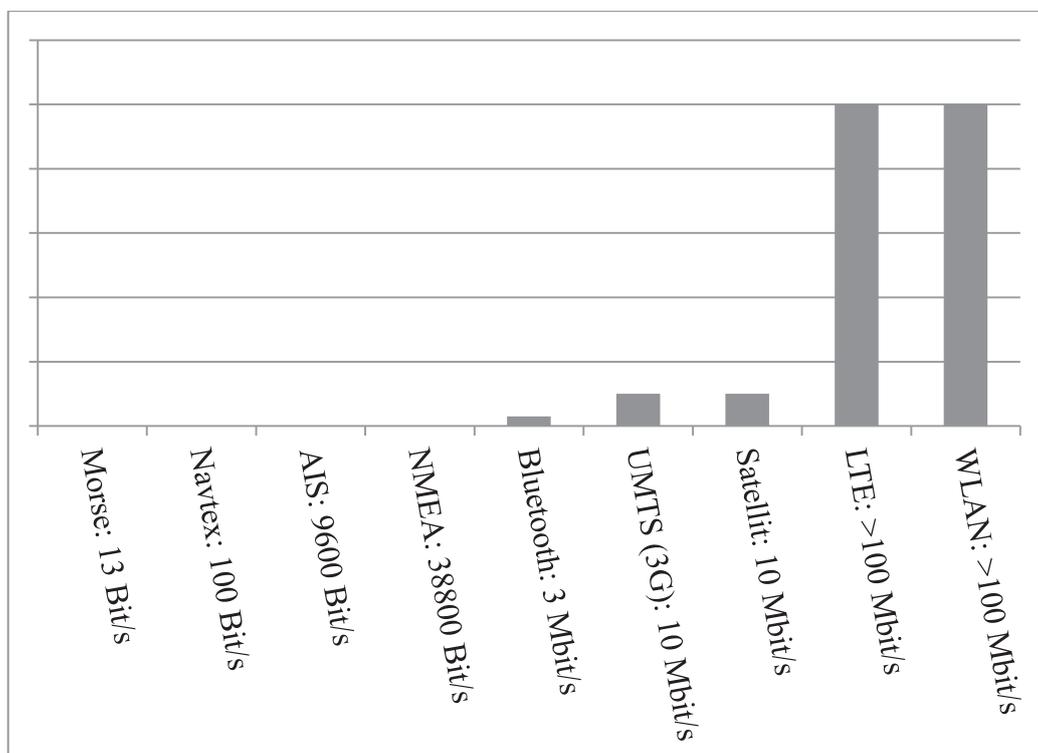


Bild 2: Datenraten für unterschiedliche maritime Datenübertragungssysteme

Ein Spezialfall für die Anzahl der drahtlosen Kommunikationssysteme sind moderne Kreuzfahrtschiffe. Neben den für den sicheren Schiffsbetrieb notwendigen Funksysteme (UKW, Satellitenkommunikation, Wetterfax, Kurz- und Grenzwellenfunk, RADAR, AIS) befinden sich weitere Systeme an Bord. Vielfach werden neben Sprechfunksystemen im VHF - und UHF - Band (160 MHz bzw. 450 MHz) DECT - Schnurlostelefonanlagen installiert. Die für die Gäste zuständigen Crewmitglieder sind darüber in den funkversorgten Bereichen des Schiffes zu erreichen. GSM - und UMTS - Basisstationen, sogenannte Microzellen, versorgen die Passagiere mit einem Mobiltelefonnetz, die Anbindung an das Landnetz wird über Satellit realisiert. Über WLAN - Basisstationen können Gäste und Crewmitglieder das Internet nutzen, die Anbindung erfolgt wie bei der Mobiltelefonnutzung über Satellit.

3.1.2 Rechtliche Betrachtungen und Genehmigungen zur Nutzung von hochfrequenten Spektren

Das elektromagnetische Spektrum ist eine begrenzte Ressource, die sich viele Anwendungen und Dienste teilen müssen. In Deutschland übernimmt die Bundesnetzagentur die Überwachung, Vergabe und Zuteilung von Frequenzen für unterschiedliche Anwendungen. Bei der Frequenzzuteilung wird zwischen individuellen Zuteilungen, Kurzzeitzuteilungen, öffentlichen Netzen und Allgemeinzuteilungen unterschieden. Individuelle Zuteilungen sind z. B. Betriebsfunkfrequenzen, die eine Firma für ein bestimmtes Gebiet zur Nutzung nach Antragstellung zugeteilt bekommt. Kurzzeitzuteilungen sind vergleichbar mit individuellen Zuteilungen, sie sind jedoch zeitlich befristet. Ein Beispiel für öffentliche Netze sind die Mobilfunknetze. Frequenzzuteilungsinhaber sind die Netzbetreiber. Die Nutzer dürfen Endgeräte, z. B. Mobiltelefone, ohne zusätzliche Lizenzkosten in dem Netz nutzen. Das Mobilfunkunternehmen verhandelt die Nutzungsentgelte mit den Anwendern. Allgemeinzuteilungen sind z. B. die Frequenzzuteilungen für die ISM - Frequenzbänder. ISM steht für Industrial, Scientific und Medical und beschreibt die Nutzung dieser Frequenzen. Sie dürfen ohne individuelle Frequenzzuteilung für diese Zwecke eingesetzt werden, es fallen keine Frequenznutzungsgebühren an. Für den Betrieb ist keine Lizenz notwendig, es müssen jedoch technische Randbedingungen eingehalten werden. Abhängig von der Frequenz sind maximale Sendeleistungen, maximale Bandbreite der Aussendungen und die zeitliche Belegung des Kanals festgelegt [13]. Bild 3 zeigt die ISM – Frequenzbereiche in Deutschland auf einer logarithmischen Skala.

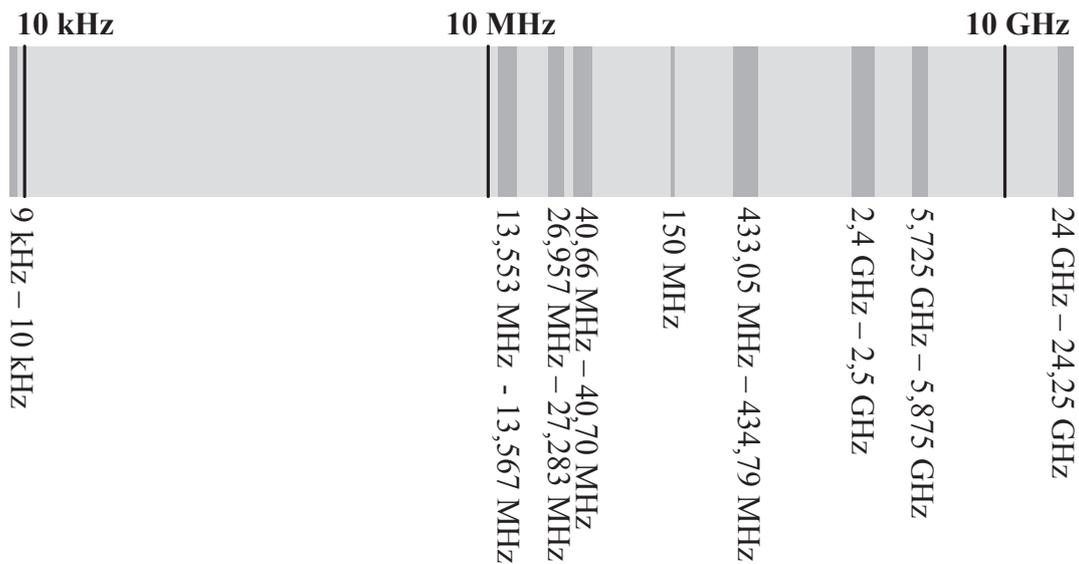


Bild 3: ISM - Frequenzbereiche in Deutschland

Im Gegensatz zu beispielsweise einer Seefunkfrequenzzuteilung, können eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte diese Frequenzen nutzen. Ein Schutz vor gegenseitigen Störungen gibt es nicht, ein Rechtsanspruch auf die störungsfreie Nutzung existiert in Deutschland nicht [14]. Die Nutzung der ISM – Frequenzen im 2,4 GHz – Band ist in fast allen Ländern der Erde lizenzfrei möglich. Für ein zusätzliches Kommunikationssystem für die Verwendung auf weltweit operierenden Schiffen bietet sich dieser Frequenzbereich daher an.

3.1.3 Anwendungsbeispiel: Schiffsübergreifendes Netzwerk unter Berücksichtigung der IMO - Forderung Safe - Return - To - Port

Die Sicherheit von Mannschaft und Passagieren auf hochseefähigen Schiffen ist Motivation vieler Forschungsvorhaben. Aktuelle SOLAS² - Richtlinien, herausgegeben von der International Maritime Organisation (IMO), fordern eine Notbrücke für hochseetaugliche Passagierschiffe [1]. Fällt die normale Brücke z. B. aufgrund von Feuer, technischem Defekt oder Wellenschlag aus, soll eine von der Hauptbrücke abgesetzte Notbrücke einen grundlegenden Navigationsbetrieb ermöglichen. Mit dieser Anordnung soll ein sicherer Schiffsbetrieb für 1.000 Seemeilen gewährleistet und damit eine eigenständige Fahrt in den nächsten Hafen ermöglicht werden. Aus technischer Sicht ist der Aufbau einer Notbrücke anspruchsvoll. Die Schiffselektrik für Navigation und Automation ist für die Nutzung lediglich auf einer Brücke ausgelegt. Die Integration einer weiteren Brücke mit weiteren

² Safety of Live at Sea, internationale Vereinbarungen zur Personensicherheit auf Hochseeschiffen