

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien (AM7)

Funkmikrofone und deren Zukunft

Vorgelegt von Maurice Sebastian Schill

Matrikel-Nummer: 27783

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 03. August 2017

zur Erlangung des akademischen Grades eines „Bachelor of Engineering“

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: André Bohr

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Maurice Sebastian Schill, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Funkmikrofone und deren Zukunft“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Ort, Datum

Maurice Sebastian Schill

Abstract

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die physikalischen Grundlagen für die Funktionsweise der Übertragung elektromagnetischer Wellen, der Antennenübertragung sowie die grundlegende Funktionsweise von Funkmikrofonen zu beleuchten. Daraufgehend wird auf analoge und digitale Funkmikrofonsysteme eingegangen und die Grenzen der Funkübertragung aufgezeigt.

Danach wird die Digitalisierung und die damit einhergehende Digitale Dividende I & II erläutert, wie auch die dadurch entstehenden Folgen für die Nutzer der Funkmikrofone.

Anschließend werden die aktuelle Lage der Funkmikrofone und mögliche Ansätze für die Verwendung in der Zukunft dargestellt.

Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit mit einem Fazit.

The aim of this thesis is to take a closer look on the physical foundations of the operating principle of the transmission of electromagnetic waves and antennas as well as the operating principle of wireless microphones. In the following analog and digital wireless microphones are discussed and the limitations of wireless transmission are shown.

Afterwards the digitization along with the Digital Dividend I & II is explained as well as the resulting consequences for the user of wireless microphones.

Subsequently, the current situations of wireless microphones and possible approaches for the usage in the future are presented.

The present thesis is completed with a conclusion.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Grundlagen	2
2.1.	Elektromagnetische Wellen	2
2.2.	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen.....	3
2.3.	Funktionsweise der Funkübertragung.....	4
2.4.	Funktionsweise der Funkmikrofone	5
2.5.	Elektromagnetisches Spektrum.....	7
2.6.	Aufbau des Frequenzspektrums.....	7
2.6.1.	VHF-Spektrum.....	8
2.6.2.	UHF-Spektrum.....	8
3.	Funkstrecken	8
3.1.	Analoge Funksysteme	9
3.1.1.	Amplitudenmodulation	9
3.1.2.	Frequenzmodulation	9
3.1.3.	Vergleich Amplituden- und Frequenzmodulation	11
3.2.	Digitale Funksysteme.....	11
3.2.1.	Analog zu Digital	11
3.2.2.	Amplitudenumtastung (ASK)	15
3.2.3.	Frequenzumtastung (FSK).....	15
3.2.4.	Phasenumtastung (PSK).....	16
3.3.	Analoge Funksysteme versus digitale Funksysteme.....	17
3.4.	Diversity	19
3.4.1.	Antennen-Switching Diversity	20
3.4.2.	Audio-Switching (True Diversity)	20
3.4.3.	Spatial Diversity	21
3.4.4.	Quadiversity.....	21
3.5.	Grenzen der Funkübertragung.....	21

3.5.1.	Interferenzen	21
3.5.2.	Intermodulationen	22
3.5.3.	Dynamikumfang	25
3.5.4.	Verzerrung	27
3.5.5.	Frequenzgang	28
3.6.	Anforderung an Funkmikrofone	29
4.	DVB-T	30
5.	Frequenzzuteilung.....	31
6.	Digitale Dividende.....	33
6.1.	Der Beginn.....	33
6.2.	Digitale Dividende I	35
6.3.	Digitale Dividende II	37
6.4.	Aktuelle Frequenzlage für Funkmikrofone.....	38
6.4.1.	Frequenzen mit Allgemeinzulassung	38
6.4.2.	Frequenzen mit Einzelzulassung	40
6.5.	Resümee & Auswirkungen der Digitalen Dividenden auf Funkmikrofone.....	41
7.	Lösungsansätze für die Zukunft	43
7.1.	1.8 GHz ISM Band	43
7.2.	2.4 GHz ISM Band	44
7.2.1.	WiMi-System	45
7.3.	Shure Axient Digital	46
7.4.	PMSE xG	47
7.5.	Nutzung des VHF-Spektrums.....	49
7.6.	Schlussfolgerung der Lösungsansätze	50
8.	Fazit.....	51
9.	Abbildungsverzeichnis	53
10.	Formelverzeichnis	55
11.	Tabellenverzeichnis.....	56

12.	Anhang	57
13.	Literaturverzeichnis	59
13.1.	Internetquellen.....	61
13.2.	Andere Internetquellen	66
13.3.	Online PDF.....	67
14.	Danksagung	71

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog/Digital
AES3	Norm zur Übertragung digitaler Audiosignale
AES42	Norm in der Tontechnik für digitale Audioschnittstelle bei Mikrofonen
AM	Amplitudenmodulation
ASK	Amplitude Shift Keying/Amplitudenumtastung
D/A	Digital/Analog
DAB+	Digital Audio Broadcasting
DAW	Digital Audio Workstation
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial, 2 nd Generation
ECC	Electronic Communications Committee
ERP	Effective radiated power, effektive Sendeleistung eines Senders
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
FCC	Federal Communication Commission
FM	Frequenzmodulation
FSK	Frequenz Shift Keying/Frequenzumtastung
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications, Anforderungsliste aus ITU-Empfehlungen
ISM-Band	Industrial, Scientific and Medical Band
ITU	International Telecommunication Union

ITU-R	International Telecommunication Union, Radio Sector
LSB	Least Significant Bit
LTE	Long Term Evolution
MSB	Most Significant Bit
NAB	National Association of Broadcasters
PMSE	Program Making and Special Event
PMSE xG	Program Masking an Special Events Next Generation
PSK	Phase Shift Keying/Phasenumtastung
PTP	Precision Time Protocol
QAM	Quadrature Amplitude Modulation/Quadratamplitudenmodulation
QPSK	Quadraturphasenumtastung
SAR	Successive Approximation Register
TSN	Time Sensitive Networking
UKW	Ultrakurzwelle
VGA	Variable Gain Adjustment
WiFi / WLAN	Wireless Local Area Network
WiMi	Wireless Microphone
WRC	World Radiocommunication Conference

Physikalische Größen

c	Lichtgeschwindigkeit
dB	Dezibel
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante, (As/Vm)
f	Abkürzung für die Frequenz einer Welle
GHz	Gigahertz
Hz	Einheit der Frequenz in Hertz, (1/s)
kHz	Kilohertz
λ	Lambda, Wellenlänge einer Welle
MHz	Megahertz
ms	Millisekunde
$\frac{m}{s}$	Meter pro Sekunde, Einheit für Geschwindigkeit
mW	Milliwatt, Einheit für Leistung
μ_0	Magnetische Feldkonstante, (Vs/Am)
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
π	Kreiskonstante

1. Einleitung

Jeder von uns war schon mal auf einem Konzert oder einer Veranstaltung, bei der Mikrofone verwendet wurden. Heutzutage wird meist auf Funkmikrofone zurückgegriffen, damit sich der Protagonist frei bewegen kann und kein Kabel mit sich tragen muss. Es kommt zudem auch des Öfteren vor, dass die Künstler ihre eigenen Mikrofone verwenden.

Bestimmt kam schon einmal die Frage auf, wie diese Technik eigentlich funktioniert, dass Personen in ein kabelloses Mikrofon sprechen und die Stimme aus der Anlage zu hören ist.

Genau dieses Thema möchte ich mit dieser Arbeit erläutern und werde auf Grundlegendes wie die Entwicklung dieser und zukünftiger Technologien eingehen, die gezwungenermaßen durch die Digitale Dividende geschaffen werden müssen.

2. Grundlagen

Aktuell sind Funkmikrofone kaum mehr von Drahtmikrofonen zu unterscheiden. Der einzige Unterschied ist, dass dieses Mikrofon eine Antenne benötigt. Mithilfe dieser Antenne sendet das Mikrofon das Signal an den Empfänger, welcher das hochfrequente Signal verarbeitet. Grundsätzlich bedeutet das, dass für jedes Mikrofon beziehungsweise Sender, ein separater Empfänger benötigt wird. Mehrere Mikrofonsignale können somit nicht gleichzeitig über einen Empfänger empfangen werden. Hierfür müssen die Mikrofone auf verschiedenen Frequenzen senden, damit sich die Signale nicht gegenseitig beeinträchtigen. Ein Empfänger ist in der Lage, wie ein Radio, nur auf eine Frequenz eingestellt zu werden.¹

2.1. Elektromagnetische Wellen

Wie auch die Signale des Rundfunks, werden die Signale der Funkmikrofone mithilfe elektromagnetischer Wellen übertragen. Diese setzen sich aus einer elektrischen und magnetischen Komponente zusammen. Für die Verwendung der Funkmikrofone ist die elektrische Komponente wichtig. Die Ausrichtung dieser Komponente entscheidet darüber, ob die Welle eine vertikale oder horizontale Polarisierung besitzt. Die beiden Komponenten stehen bei einer ebenen Welle in einem Winkel von 90° zueinander.²

Die Geschwindigkeit mit der sich die elektromagnetischen Wellen in unserer Atmosphäre ausbreiten, wird als Lichtgeschwindigkeit c bezeichnet. Wie in Formel 1 ersichtlich, beträgt diese im Normalfall $2.998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$. Jedoch müssen Eigenschaften der Atmosphäre berücksichtigt werden. Diese sind die Brechung, Beugung aber auch die Sonneneinstrahlung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Aufgrund der nicht konstanten Eigenschaften wird der exakte Wert der Lichtgeschwindigkeit nicht erreicht.³ Die Geschwindigkeit, mit der sich elektromagnetische Wellen ausbreiten, ist bei allen Frequenzen gleich. In der folgenden Formel 1 ist der Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit, der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 und der magnetischen Feldkonstante μ_0 erkennbar.⁴

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \Rightarrow c = \frac{1}{\sqrt{8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}}} \approx 2.998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Formel 1: Berechnung der Lichtgeschwindigkeit c

¹ Vgl. Thomann GmbH (o.J.a).

² Vgl. Shure Audio Institute (o.J.a).

³ Vgl. Kühn (2008), S.25.

⁴ Vgl. Kark (2017), S.1.

Die Wellenlänge λ einer Frequenz f berechnet sich mit folgender Formel:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Formel 2: Berechnung der Wellenlänge λ

Aus Formel 2 leitet sich dieser Grundsatz ab: Je höher die Frequenz, desto kürzer ist deren Wellenlänge. Dies bedeutet auch, dass Signale mit höherer Frequenz immer weiter die Eigenschaft verlieren, sich um Objekte zu beugen. Des Weiteren können hohe Frequenzen von metallischen Gegenständen abgeschattet werden.⁵

2.2. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Grundsätzlich lässt sich die Signalausbreitung elektromagnetischer Wellen in einen Frequenzbereich unter- und oberhalb von 30 MHz unterteilen. Bei ersteren breiten sich die Wellen unter anderem an der Erdoberfläche aus. Daher tragen diese auch den Namen Bodenwelle.⁶ Dazu sind für die Reichweite und die Sendeleistung die Leitfähigkeit des Bodens sowie die Sendefrequenz zu berücksichtigen. Ein feuchter Boden dämpft das Signal weniger als ein trockener Boden. Mit steigender Frequenz nimmt die Dämpfung zu und somit sinkt die Reichweite. Die Bodenwelle ist daher bei Frequenzen im Lang- und Mittelwellenbereich am effektivsten.⁷ In diesem Bereich haben die Wellen eine Frequenz von 30 kHz bis 3 MHz.⁸ Hier können mit leistungsstarken Sendern, die im Langwellenbereich arbeiten, sehr hohe Reichweiten erzielt werden. Frequenzen im Kurzwellenbereich erzielen nur eine Reichweite von wenigen Kilometern. Zusätzlich zur Bodenwelle gibt es auch die Raumwelle. Diese wird von der Ionosphäre auf die Erdoberfläche reflektiert. Dadurch sind Reflexionen möglich, die eine große Reichweite erlauben. Im Gegensatz zur Bodenwelle eignet sich die Raumwelle für hohe Frequenzen. Daher wird diese hauptsächlich im Kurzwellen- sowie im oberen Mittelwellenbereich verwendet.⁹ Oberhalb von 30 MHz befindet sich das VHF- und UHF-Spektrum. Durch die Erdkrümmung ist in diesem Bereich die Funkübertragung begrenzt. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind Höhe sowie die Art der verwendeten Antennen. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die Größe des zu versorgenden Gebiets.

⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.a).

⁶ Vgl. Kühn (2008), S.25.

⁷ Vgl. Kühn (2008), S.25f.

⁸ Vgl. Kühn (2008), S.14.

⁹ Vgl. Kühn (2008), S.26.

Störungen, welche durch Reflexionen auftreten können, entstehen durch stationäre aber auch bewegliche Objekte.¹⁰ Diese treten vor allem durch Objekte wie Berge oder Gebäude auf, da diese über eine hohe Materialdichte verfügen.¹¹

2.3. Funktionsweise der Funkübertragung

Mithilfe der bereits erklärten elektromagnetischen Wellen ist es möglich verschiedene Arten von Signalen zu übertragen. Darunter auch Signale für Funkmikrofone. Diese Art von Signal wird mit einer Antenne übertragen. Das Signal wird über die Luft gesendet und empfangen. Mit elektromagnetischen Feldern werden elektrische Signale, im hochfrequenten Bereich, über die Antennen übertragen.¹² Die einfachste Form der Antenne ist die Dipolantenne. Diese Antenne wird mithilfe eines Kondensators und einer Spule erzeugt. Es entsteht ein Schwingkreis. Wenn nun Strom an diesen Kreis gelangt, entsteht ein Wechselstrom. Der Kondensator erzeugt hierbei ein sich wechselndes elektrisches Feld und die Spule ein sich wechselndes Magnetfeld. Daraus resultiert ein elektromagnetisches Feld. Damit sich die elektrischen Feldlinien im Raum ausbreiten können, müssen die Platten des Kondensators weiter auseinander gezogen werden. Dasselbe muss mit der Spule geschehen. Dadurch bewegen sich die elektrischen Feldlinien von einer zur anderen Seite des Drahtes.

Das Resultat ist eine Dipolantenne, die in der Lage ist Signale zu versenden.¹³ In der Praxis ist diese Antenne die einfachste Möglichkeit diese Art von Signal zu übertragen. Die optimale Dipollänge ergibt sich aus der Wellenlänge $\lambda/2$. Hierbei treten das magnetische Feld auf der horizontalen und das elektrische Feld auf der vertikalen Achse aus.¹⁴ Für die Übertragung der Signale von Funkmikrofonen ist die elektrische Komponente ausschlaggebend. Diese ist durch die Polarisation dafür verantwortlich, wie die Sende- und Empfangsantennen aufzustellen sind. Zu beachten ist, dass die Antennen immer parallel zueinander aufgestellt sind. Um einen Versatz von 90° bei beiden Antennen zu vermeiden, sollten die am Empfänger befestigten Antennen vertikal positioniert werden.¹⁵ Um jedoch das Signal übertragen zu können, bedarf es dafür einiger Schritte. Um das Signal mithilfe elektrischer Wellen über eine größere Entfernung zu übertragen, muss dieses moduliert werden.¹⁶

¹⁰ Vgl. Kühn (2008), S.27.

¹¹ Vgl. Kühn (2008), S.28.

¹² Vgl. Moltrecht (o.J.a).

¹³ Vgl. Moltrecht (o.J.b).

¹⁴ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.b).

¹⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.a).

¹⁶ Vgl. Rindfleisch (1985), S.16.

Dabei wird die eigentliche Information an einen Signalträger übergeben.¹⁷ Mithilfe des Signalträgers wird das Informationssignal in einen wesentlich höheren Frequenzbereich verschoben.¹⁸ Das Informationssignal verändert in einem Modulator die sinusförmige Träger-schwingung wahlweise in der Amplitude, Frequenz oder Phase.¹⁹ Hier wird also bestimmt, welches Modulationsverfahren angewendet wird.²⁰ Dem Träger wird nun das Informationssignal aufgeprägt. Vor der Modulation wird das Informationssignal jedoch verstärkt. Nach der ersten Modulation wird dieses Signal in einem Mischer auf die benötigte Sendefrequenz moduliert. Dies geschieht mithilfe eines weiteren Oszillators. Bevor das Signal gesendet wird, wird es nochmals verstärkt. Um es schlussendlich empfangen zu können, wird nun noch ein Empfänger benötigt. Dieser arbeitet in umgekehrter Weise. Die Aufgabe des Empfängers besteht darin, das Signal aus der Frequenz zu filtern und es zu demodulieren. Das bedeutet, dass das Signal von der hohen Übertragungsfrequenz wieder in seine ursprüngliche Frequenz umgewandelt wird. Um hierbei das Informationssignal möglichst gut vom modulierten Signal trennen zu können, gibt es zwei grundsätzliche Empfängerprinzipien: Den Geradeaus- und Überlagerungsempfänger. Der Geradeausempfänger verändert das empfangene Signal nicht in der Frequenz. Um das Signal von unerwünschten Signalen trennen zu können, werden Filter verwendet. Diese Filter werden mithilfe von Parallelschwingkreisen realisiert. Es besteht jedoch der Nachteil, dass die Bandbreite relativ hoch ist und das gewünschte Signal nicht scharf von Nebensignalen getrennt werden kann. Die geringe Trennschärfe kann durch das zusammenschalten mehrerer Parallelschwingkreise verbessert werden. Somit erhält man einen Filter, der eine bessere Trennschärfe besitzt. Allerdings ist der Nachteil des Filters, dass die Frequenz die Filterkurve beeinflusst und somit die Filtereigenschaften stark verschlechtert. Der Überlagerungsempfänger ist die Lösung dieses Problems.²¹ Dieser mischt das Eingangssignal mit einer abgestimmten Oszillatorfrequenz auf eine konstante Zwischenfrequenz. Mit selektiven Verstärkern, die über eine hohe Trennschärfe verfügen, kann man diese Frequenz verstärken. Danach wird dieses Signal demoduliert und kann weiterverarbeitet werden.²²

2.4. Funktionsweise der Funkmikrofone

Die Funktion der Übertragung von Mikrophon zu Empfänger wurde im vorigen Unterkapitel erläutert.

¹⁷ Vgl. Koch (o.J.), S.27.

¹⁸ Vgl. Rindfleisch (1985), S.16.

¹⁹ Vgl. Koch (2008), S.52.

²⁰ Vgl. Koch (2008), S.53.

²¹ Vgl. Moltrecht (o.J.c).

²² Vgl. DATACOM Buchverlag GmbH (o.J.).

Zur Funktion des Mikrofons wird eine Versorgungsspannung benötigt. Diese heißt Phantomspannung und kommt überwiegend bei Kondensatormikrofonen zum Einsatz. Sie versorgt das Mikrofon mit einer Spannung von 48 V. Bei kabelgebundenen Mikrofonen wird diese Spannung über das Mikrofonskabel übertragen.²³ Als nächster Schritt muss die Schallenergie, das Tonsignal, in eine elektrische Form bzw. Energie gebracht werden, denn Mikrofone sind nichts anderes als Schallwandler.²⁴ Als Schall werden mechanische Schwingungen eines Mediums elastischer Natur bezeichnet.²⁵ Um die Schallenergie umwandeln zu können, wird eine Membran verwendet. Diese Membran reagiert auf Schall in dem sie schwingt. Es entstehen mechanische Schwingungen, welche durch einen Wandler in elektrische Schwingungen umgewandelt werden.²⁶ Dafür gibt es verschiedene Wandlerverfahren. Die am häufigsten angewandten Verfahren sind das elektrostatische und elektrodynamische. Diese werden bei Kondensator- und dynamischen Mikrofonen angewandt.²⁷

Nachdem das Tonsignal als elektrische Schwingung vorliegt, wird das Signal weiterverarbeitet. Hierzu wird das Signal im Vorverstärker verstärkt und Maßnahmen unternommen, um das Rauschen zu vermindern. Dazu wird das Signal einer Preemphasis (siehe Kapitel 3.5.3.) und einer Kompression unterzogen.²⁸ Bei einem analogen Funkmikrofon wird danach das elektrische Signal mithilfe eines spannungsgesteuerten Oszillators in den benötigten Frequenzbereich verschoben. Erst dadurch kann es übertragen werden. Vor der Übertragung wird das Signal nochmals abschließend verstärkt. Bei digitalen Funkmikrofonen wird das elektrische Signal zudem digitalisiert (siehe Kapitel 3.2.1.).²⁹ Für Funkmikrofone gibt es drei verschiedene Sendertypen, die jeweils batteriebetrieben sind. Zum einen den Handsender, der im Mikrofonschaft untergebracht ist.³⁰ Dieser Typ ist geeignet für Anwendungen wie Gesang und normale Sprache. Der Sender sollte in der Hand getragen werden. Der Vorteil bei diesem Sender ist, dass die Mikrofonskapsel austauschbar ist.³¹

Das bedeutet, dass die Richtcharakteristik des Mikrofons geändert werden kann. Zum anderen gibt es den Taschensender. Bei diesem Typ wird der Sender mit einem Clip am Gürtel oder an der Hose befestigt. Das Mikrofon ist über ein Kabel mit dem Sender verbunden.³²

²³ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.165.

²⁴ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.136.

²⁵ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.1.

²⁶ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.139.

²⁷ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.140.

²⁸ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.190.

²⁹ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.23.

³⁰ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.190.

³¹ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.c).

³² Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.190.

Besonders geeignet ist dieser Sender vor allem für Headsets, Clip- und Lavaliermikrofone.³³ Als letzte Variante gibt es den Aufstecksender. Mit diesem kann jedes analoge Mikrofon als Funkmikrofon betrieben werden. Dieser Sender verfügt über eine XLR-Buchse sowie die 48 V-Phantomspeisung.³⁴

2.5. Elektromagnetisches Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum beinhaltet den gesamten Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Dieses reicht vom Gleichstrom bis zur Gammastrahlung. Innerhalb davon befindet sich der für diese Arbeit wichtige Bereich der Radiowellen, aber auch Röntgenstrahlung und sichtbares und ultraviolettes Licht sind im elektromagnetischen Spektrum vertreten. Der Bereich des Radiospektrums umfasst lediglich den Bereich von 3 Hz bis 300 GHz. Das Radiospektrum wurde schon frühzeitig in Frequenzbereiche aufgeteilt, damit gegenseitig auftretende Störungen minimiert werden können. Diese Bereiche werden in Frequenzbänder aufgeteilt, welche wiederum in Kanäle und Frequenzblöcke aufgespalten werden.³⁵

2.6. Aufbau des Frequenzspektrums

Die untenstehende Tabelle 1 wurde im RR Artikel 5S verfasst. Diese fasst das weite Spektrum zusammen, welches in kleinere Frequenzbänder unterteilt wurde. Grund hierfür war die bessere Unterteilung des Spektrums.³⁶ Die für diese Arbeit relevanten Frequenzbereiche werden in Tabelle 1 ersichtlich.

Bandnummer	Symbol	Frequenzbereich
4	VLF	3 kHz – 30 kHz
5	LF	30 kHz – 300 kHz
6	MF	300 kHz – 3 MHz
7	HF	3 MHz – 30 MHz
8	VHF	30 MHz – 300 MHz
9	UHF	300 MHz – 3 GHz
10	SHF	3 GHz – 30 GHz
11	EHF	30 GHz – 300 GHz

Tabelle 1: Aufteilung des Spektrums in Frequenzbänder

³³ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.c).

³⁴ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.190.

³⁵ Vgl. Kühn (2008), S.13.

³⁶ Vgl. Withers (1999), S.25.

2.6.1. VHF-Spektrum

Das VHF-Spektrum erstreckt sich von 30 MHz bis 300 MHz. Hieraus resultieren Wellenlängen von zehn bis einem Meter. Verwendet wird das Spektrum für die Fernseh- und Radioübertragung. Aufgrund dessen, dass die Wellen in diesem Bereich nicht stark von der Atmosphäre reflektiert werden, können diese nur für kürzere Strecken verwendet werden. Außerdem können sich die Wellen nicht gut beugen, daher ist die Übertragung durch Hindernisse wie Berge eingeschränkt.³⁷

2.6.2. UHF-Spektrum

Das UHF-Spektrum erstreckt sich von 300 MHz bis 3 GHz. Aufgrund der hohen Frequenz sind die Wellenlängen maximal einen Meter lang.³⁸ Deshalb besitzen Frequenzen in diesem Bereich die Eigenschaften, dass sie von metallischen Objekten abgeschattet und auch von Körpern absorbiert werden können.³⁹ Zusätzlich kann es durch andere Signale wie Bluetooth und WLAN, die bei 2.4 GHz arbeiten, zu Störungen kommen.⁴⁰

Vorteile dieses Spektrums sind die guten physikalischen Ausbreitungseigenschaften, wodurch eine gute Empfangsqualität und hohe Reichweiten erzielt wird. Zudem hat dieses Spektrum den Vorteil, dass es von den Störungen wie Man-made-Noise so gut wie unberührt bleibt.⁴¹

Bei Man-made-Noise handelt es sich um Störungen, die vor allem durch Kommunikations- und Rundfunksysteme aber auch durch den Transport von elektrischer Energie entstehen.⁴² Es hat sich herausgestellt, dass sich das UHF-Spektrum unterhalb von einem GHz am besten für Funkmikrofone eignet, aufgrund der Eigenschaften wie Grundrauschen, Ausbreitung und der verwendbaren Antennengrößen.⁴³

3. Funkstrecken

Als Funkstrecke wird die drahtlose Verbindung zwischen einer Sender- und Empfangseinheit bezeichnet. Diese übertragen mit den in Kapitel 2.1. angesprochenen elektromagnetischen Wellen Signale.

³⁷ Vgl. Encyclopedia Britannica (o.J.a).

³⁸ Vgl. Encyclopedia Britannica (o.J.b).

³⁹ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.22.

⁴⁰ Vgl. Wisse (2009), S.25.

⁴¹ Vgl. Wisse (2009), S.24.

⁴² Vgl. Bianchi und Meloni (2007), S.435.

⁴³ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.22.

3.1. Analoge Funksysteme

Durch Entwicklungen wie der Erzeugung von Hochfrequenzschwingungen, die erstmals Valdemar Paulsen 1903 gelang, und der Signalverstärkung durch Elektronenröhren 1906, die von Robert von Lieben und Lee De Forest entwickelt wurde, waren die Grundsteine für die elektrische Nachrichtenübertragung gelegt.⁴⁴ Es war nun durch die Trägermodulation möglich, Nachrichten über größere Strecken zu übermitteln.⁴⁵

3.1.1. Amplitudenmodulation

Die AM besitzt ein hochfrequentes Trägersignal, welches durch ein niederfrequentes Informationssignal verändert wird. Genauer gesagt, werden die Amplitude des Trägers und die Kreisfrequenz durch ein Informationssignal beeinflusst. Hierbei werden die beiden Signale miteinander multipliziert.⁴⁶ Das wird in Abbildung 1 ersichtlich. Jedoch ist die AM anfällig gegen Amplitudenänderungen. Dies wird beispielsweise klar wenn ein Signal nicht nur über den direkten Weg den Empfänger erreicht, sondern auch über Reflexionen. Die Signale überlagern sich, wodurch es zu Auslöschungen kommen kann. Die Amplitudenänderungen durch zusätzliche Einflüsse sind daher nicht hinnehmbar, da diese bei der Demodulation zur Gewinnung des Nutzsignals benötigt werden.⁴⁷

3.1.2. Frequenzmodulation

Die FM stellt infolge ihrer Robustheit einen wichtigen Meilenstein für die Entwicklung der modernen Kommunikation dar. Aufgrund dessen und der besseren Klangqualität wurde sie ab 1948 in Mitteleuropa in der Rundfunktechnik eingesetzt. Heutzutage wird sie weltweit im UKW-Rundfunk verwendet. Aber sie findet nicht nur dort Anwendung, sondern auch in der Mobilkommunikation und im Fernsehrundfunk zur Tonübertragung.⁴⁸ Bei der FM wird das hochfrequente Trägersignal durch das übertragende, in unserem Fall ein niederfrequente Nutzsinal, in ihrer Frequenz moduliert.⁴⁹ Das Trägersignal fängt nun an rhythmisch zur Amplitude des Nutzsignals zu schwingen.⁵⁰ Mit dem Frequenzhub wird der Signalpegel des Nutzsignals übermittelt. Dieser wird mit der Geschwindigkeit der Frequenzänderung ausgedrückt.

⁴⁴ Vgl. Werner (2006), S.54.

⁴⁵ Vgl. Werner (2006), S.55.

⁴⁶ Vgl. Görne (2015), S.191.

⁴⁷ Vgl. Koch (o.J.), S.31.

⁴⁸ Vgl. Werner. (2006), S.100.

⁴⁹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.192.

⁵⁰ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.d).

Besitzt also das FM-Signal eine starke Frequenzänderung, hat das Nutzsignal eine hohe Amplitude.⁵¹ Dieses Phänomen wird in Abbildung 2 veranschaulicht. Ohne Nutzsignal würde das Trägersignal nicht beeinflusst werden und wäre somit konstant in seiner Frequenz.⁵² Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Modulationsindex. Dieser Parameter beschreibt, wie präzise die FM arbeitet. Aus einem großen Modulationsindex ergibt sich eine fein auflösende Modulation. Dieser kann aus der Modulatorfrequenz und dem Frequenzhub berechnet werden.⁵³ Bei maximaler Aussteuerung darf laut Bundesnetzagentur maximal ± 50 kHz um die Mittelfrequenz (Trägerfrequenz) moduliert werden. Würde die Trägerfrequenz beispielsweise 800 MHz betragen, dürfte das Signal maximal von 799,950 bis 800,050 MHz moduliert werden.⁵⁴

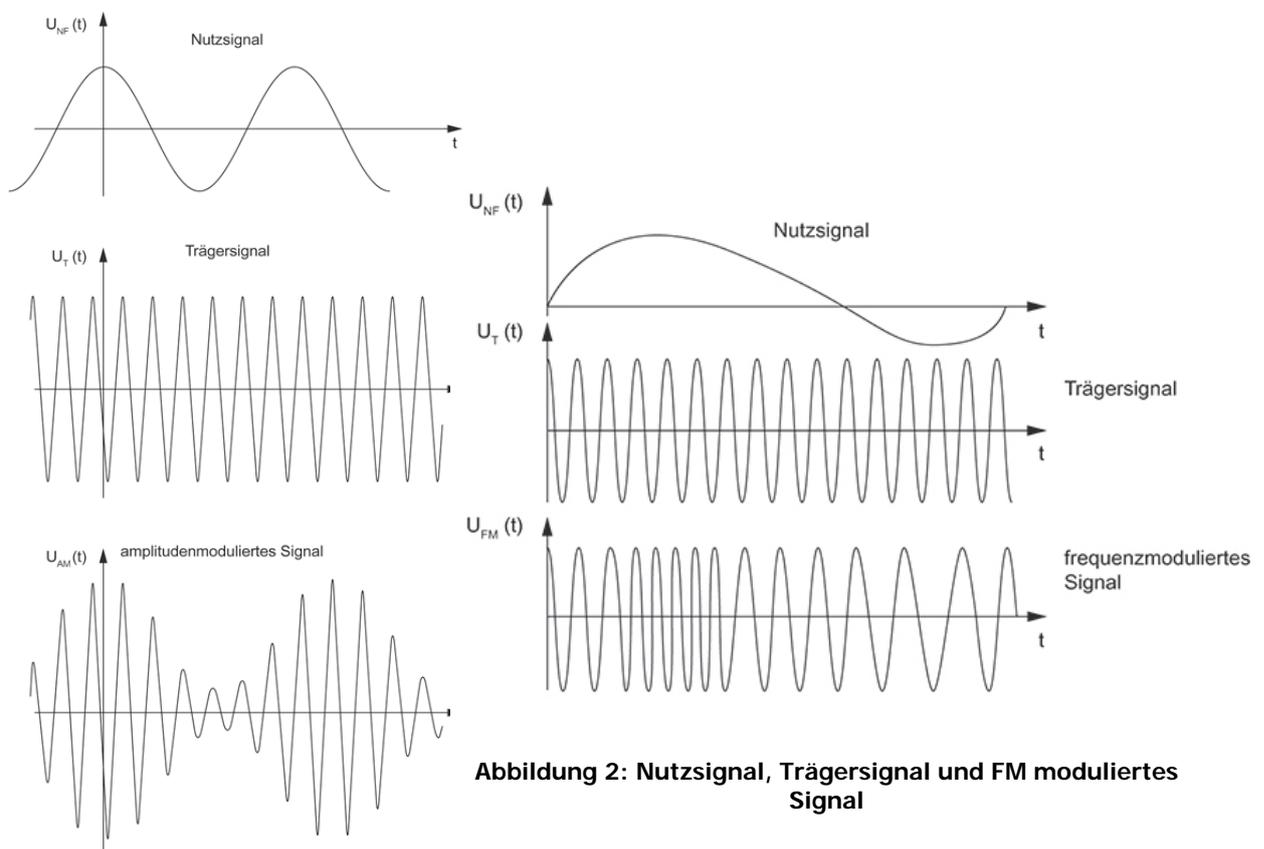


Abbildung 2: Nutzsignal, Trägersignal und FM modulierte Signal

Abbildung 1: Nutzsignal, Trägersignal und AM modulierte Signal

⁵¹ Vgl. Koch (o.J.), S.30.

⁵² Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.192.

⁵³ Vgl. Holzmann (o.J.), S.3.

⁵⁴ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.192.

3.1.3. Vergleich Amplituden- und Frequenzmodulation

Aufgrund der Tatsache, dass bei der FM mit kleinem Hub mehr Amplitude übertragen werden kann als bei der AM, ist die Qualität bei FM besser. Daher hat sich FM auch beim Rundfunk durchgesetzt.

Des Weiteren ist die FM unempfindlich gegenüber Amplitudenänderungen. Dies ist wichtig, da in der Realität ein Signal nicht nur auf direktem Weg den Empfänger erreicht, sondern auch durch Reflexionen, die durch umliegende Objekte entstehen. Dadurch überlagern sich die eintreffenden Signale und es kann zu Amplitudenänderungen kommen, die bei der AM nicht akzeptabel sind.

Allerdings besitzt die FM auch eine Schwachstelle, nämlich die der Frequenzänderung. Tritt diese ein, kann ein Signal nicht empfangen werden.⁵⁵ Ein weiterer Vorteil der FM ist, dass sie störungsunempfindlicher ist.⁵⁶

3.2. Digitale Funksysteme

Um das Signal des Mikrofons in digitaler Form zu erhalten, wird der Schaltung des Mikrofons ein A/D-Wandler hinzugefügt. Auf den Prozess der A/D-Wandlung wird im Unterkapitel 3.2.1. eingegangen. Die im Unterkapitel 2.4. angesprochene Phantomspeisung ist jedoch nicht in der Lage, den Leistungsbedarf mit der benötigten Spannung zu versorgen. Daher wurden unter anderem mehradrige Kabel, welche über eine separate Speisung verfügen, entwickelt. In der Norm AES42 ist eine modifizierte Phantomspeisung über einen XLR-3 Stecker und ein Übertragungsprotokoll für Signal- sowie Steuerdaten normiert. Das Datenformat hierbei ist AES3, auch als AES/EBU bekannt. Durch die Einbeziehung von Signalprozessoren ist die Verwendung anderer Funktionen möglich. Hierbei können beispielsweise der Einsatz von Kompressoren, Limiter aber auch Filter ermöglicht werden.⁵⁷

3.2.1. Analog zu Digital

Damit das Signal digitalisiert werden kann, durchläuft es die drei Bearbeitungsschritte: Abtastung, Quantisierung und Kodierung.⁵⁸ Bei der Abtastung wird das kontinuierliche analoge Signal genommen und abgetastet. Erreicht wird dies, indem zu regelmäßigen Zeitpunkten Proben entnommen werden, welche dann als Abtast-Zeitpunkte vorliegen.

⁵⁵ Vgl. Koch (o.J.), S.31.

⁵⁶ Vgl. Holzmann (o.J.), S.2.

⁵⁷ Vgl. Schneider (2008), S.374

⁵⁸ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.668.

Diese Abtastung wird mithilfe der Abtastfunktion durchgeführt. Dabei werden modifizierte Dirac-Impulse verwendet, welche den konstanten Amplitudenwert eins besitzen. Jene werden in einer periodischen Folge eingesetzt. Somit liegt das abgetastete Signal in einer Folge von gewichteten Dirac-Impulsen vor.

Aus der Abtastperiode, welches das Intervall zwischen den beiden Abtastpunkten darstellt, kann die Abtastfrequenz hergeleitet werden. Dies ist möglich, da die Frequenz in ihrer Einheit Hz den Kehrwert der Zeiteinheit s darstellt.⁵⁹

Wie genau die Abtastzeitpunkte abgetastet werden bestimmt das Taktsignal für die Abtastung (sampling clock). Um die Zeitschwankungen zwischen den Abtastpunkten und das schlechtere Signal-/Störspannungsverhältnis zu reduzieren, wurden Methoden wie Clock-Generatoren oder Pufferspeicher entwickelt. Clock-Generatoren generieren ein präzises Quarzsignal, welches die Abtastzeitpunkte synchronisiert. Die Pufferspeicher dienen dazu, einzelne Bearbeitungsprozesse zu entkoppeln. Diese Abweichungen tragen den Namen Jitter.⁶⁰ Wie in Abbildung 3 verdeutlicht, liegt nach der Abtastung das ursprüngliche kontinuierliche Signal als zeitdiskretes Signal vor. Um das Signal fehlerfrei und vollständig abtasten zu können, gibt es einige Voraussetzungen. Hierbei muss das sogenannte „Abtasttheorem/Shannon-Theorem“ erfüllt werden.⁶¹ Dieses lautet wie folgt: „Das Originalsignal kann nur dann fehlerfrei aus einem abgetasteten Signal rekonstruiert werden, wenn die Abtastfrequenz größer als die doppelte höchste vorkommende Frequenz f_{max} des Nutzsignals ist. Es gilt daher $f_s > 2 f_{max}$.“⁶²

Um das nicht endende Spektrum des zeitdiskreten Signals auf eine Maximalfrequenz zu begrenzen, wird ein Tiefpassfilter, auch Rekonstruktionsfilter genannt, angewendet.⁶³

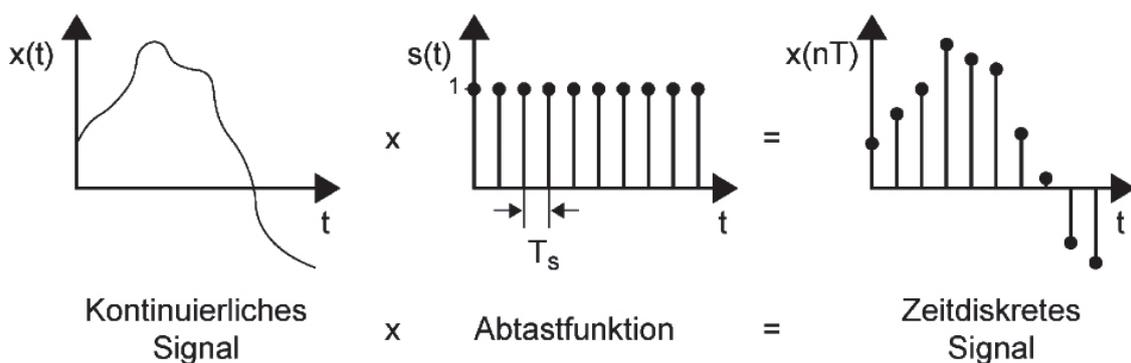


Abbildung 3: Erzeugung eines zeitdiskreten Signals mittels Abtastfunktion

⁵⁹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.663f.

⁶⁰ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.666f.

⁶¹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.665.

⁶² Dickreiter et al. (2014), S.665.

⁶³ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.664.

Wird das Abtasttheorem jedoch nicht eingehalten, entsteht eine Unterabtastung des Signals. Daraus resultieren Alias-Effekte. Das bedeutet, dass die Frequenzen die höher als die halbe Abtastfrequenz sind, in den Bereich der niedrigeren Frequenzen gespiegelt werden.

Es entstehen somit hochfrequente Störsignale, welche die niederfrequenten Nutzsignale überlagern können.⁶⁴ Um diese Frequenzen vor der Wandlung zu filtern, werden steilflankige Filter eingesetzt. Diese haben auch den Namen Anti-Aliasing-Filter.⁶⁵

Um den Schaltungsaufwand für die A/D-Wandlung zu reduzieren, wird innerhalb der Wandler mit viel höheren Abtastfrequenzen gearbeitet, die weitaus höher als die theoretische Abtastfrequenz sind. Das wird als Überabtastung oder Oversampling bezeichnet.⁶⁶ Durch die höheren Abtastfrequenzen lassen sich analoge Tiefpassfilter mit einer geringeren Flankensteilheit einsetzen. Durch Oversampling steigt zudem auch die Datenrate des Signals, aber man erhält dadurch kein besseres Audiosignal, da keine zusätzliche Information codiert wird. Es wird lediglich die Redundanz des Signals erhöht.⁶⁷

Das immer noch analoge Signal muss nun in diskrete Werte umgewandelt werden. Hierzu muss noch der Schritt der Quantisierung erfolgen. Dafür gibt es verschiedene Methoden. Die am häufigsten vorkommende ist die Multibit-Quantisierung.

Bei dieser Art der Quantisierung werden die Amplituden der analogen Abtastwerte mit einer Kennlinie verglichen. Jene Kennlinie ist in sehr feine Stufungen aufgeteilt. Nach dem Vergleich wird jeder Wert auf den am nächsten liegenden Vergleichswert gerundet.⁶⁸ Diese Aufteilung des Wertebereichs des analogen Signals werden auch Quantisierungsintervalle genannt.⁶⁹ Dadurch werden, in Abhängigkeit der Stufenzahl der Kennlinie, die unendlich vielen Werte auf endlich viele Werte begrenzt. Da die Amplituden quantisiert werden, besitzt diese Quantisierung auch den Namen Amplitudenquantisierung.

Um eine verlustfreie Amplitudenquantisierung durchführen zu können, muss laut Informationstheorie die Dynamik des digitalen Signals mindestens gleichgroß wie die des analogen Signals sein. Technisch realisiert wird die Quantisierung mit der Sample-&Hold-Schaltung.⁷⁰ Hierbei wird in der Schaltung das kontinuierliche Signal in zeitlichen Abständen, die durch die Abtastperiode vorgegeben wird, für eine gewisse Zeit in den Ladungsspeicher übergeben.

⁶⁴ Vgl. Nelles (2016), S. 15.

⁶⁵ Vgl. Bremm (2004), S.73.

⁶⁶ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.666.

⁶⁷ Vgl. Görne (2015), S.164.

⁶⁸ Vgl. Görne (2015), S.169.

⁶⁹ Vgl. Meinel und Sack (2009), S.217.

⁷⁰ Vgl. Görne (2015), S.169.

Dazu dient ein Kondensator als Speicher. Der Kondensator wird jeweils auf den momentanen Signalwert aufgeladen.

Danach wird der Schalter der Schaltung bis zum nachfolgenden Abtastwert geöffnet und somit wird der im Kondensator gehaltene Wert dem nachgeschalteten Quantisierer übergeben. Dieser hat somit bis zum nächsten Abtastwert Zeit, den Wert in digitale Werte zu überführen.⁷¹ Der Quantisierer vergleicht den momentanen Wert mit der Referenzspannung. Dafür gibt es verschiedene Wägeverfahren. Als Wägeverfahren wird die schrittweise Annäherung an das Signal bezeichnet. Als bester Kompromiss hat sich das SAR herausgestellt. Bei diesem Verfahren wird zu jedem Taktschritt ein Bit in das Datenwort geschrieben, angefangen mit dem MSB. Danach werden die Schritte immer kleiner bis man beim LSB angekommen ist.⁷² Das MSB stellt das höchstwertige Bit in einem Datenwort dar.⁷³

Nachdem das Signal den Prozess der Umwandlung von einem wertkontinuierlichen in ein wertdiskretes Signal innerhalb des Quantisierers durchlaufen hat, führt dieser für die weitere Verarbeitung des Signals die notwendige Kodierung durch. Das Signal liegt nun in digitaler Form vor. Diese Bearbeitungskette trägt auch den Namen PCM.⁷⁴ Jedoch muss gesagt werden, dass heutige Multibit-Wandler ohne Quantisierer, sondern mit Sigma-Delta-Wandlern arbeiten. Durch das Quantisieren entstehen Fehler, die durch das alleinige Abtasten nicht entstehen. Wenn die Amplitude des analogen Signals mit der Amplitude der nächstliegenden Stufe, der Quantisierungskennlinie nicht übereinstimmt, entstehen Differenzen. Diese Differenzen haben den Namen Quantisierungsfehler. Es handelt sich jedoch um eine Verzerrung. Diese wird meistens als Rauschen wahrgenommen und wird daher als Quantisierungsrauschen bezeichnet.

Quantisierungsfehler können unter Umständen zu Informationsverlusten führen, die folglich eine negative Auswirkung auf die Quantisierung des Signals haben. Um diesen vorzubeugen, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Die Amplitude des Signalrauschens muss höher sein als die Stufenhöhe der Quantisierungskennlinie und die Fehleramplitude. Wenn ein rauscharmes Signal leise wird, nehmen Quantisierungsfehler die Art einer nichtlinearen Verzerrung an. Um Quantisierungsfehler zu verhindern, wird ein additives Rauschsignal, auch Dither genannt, verwendet.⁷⁵

⁷¹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.666.

⁷² Vgl. Görne (2015), S.169f.

⁷³ Vgl. Görne (2015), S.167.

⁷⁴ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.674.

⁷⁵ Vgl. Görne (2015), S.170.

Vor der Quantisierung wird ein analoges oder digitales Rauschen erzeugt, welches das Kleinsignalverhalten der Wandler bei kleinen Signalen linearisieren soll.⁷⁶

Das Rauschsignal besitzt eine Amplitude einer halben Stufe der Quantisierungskennlinie. Mit der zufälligen Folge der Amplituden werden eine starke Minderung von Verzerrungen und eine subjektive Abnahme des Rauschens erreicht.⁷⁷

Eine weitere Fehlerquelle ist das Rechnen mit digitalen Signalen. Da digitale Audiosignale aus ganzzahligen Werten bestehen und man beim Dividieren Kommazahlen erhält, wird auf die nächstliegende Ganzzahl auf- oder abgerundet. Dadurch entstehen Rundungsfehler und somit auch das Rundungsrauschen, welches dem Quantisierungsrauschen ähnlich ist.

Um dieses Rauschen so gering wie möglich zu halten, ist es zu empfehlen, die Signalverarbeitung mit der höchsten Wortbreite durchzuführen. Es ist die Rede von 24 oder gar 32 Bit. Des Weiteren ist es von Vorteil mit Gleitkommazahlen zu arbeiten, wodurch es möglich ist auch sehr kleine Zahlen genau darzustellen. Gleitkommazahlen werden bereits von vielen digitalen Geräten und Workstations intern verwendet.⁷⁸

3.2.2. Amplitudenumtastung (ASK)

Die ASK kann auch als AM mit einem rechteckförmigen Modulationssignal gesehen werden, denn die Hüllkurve hat einen rechteckförmigen Verlauf.⁷⁹ Hiermit ist gemeint, dass im Takt des digitalen Nachrichtensignals die Trägeramplitude ein- bzw. ausgeschaltet wird.⁸⁰ Dieses Verfahren wird auch als on-off-keying bezeichnet, da das modulierte Signal entweder mit einer vollen oder gar keiner Amplitude vorliegt.⁸¹ Das ASK-Signal ist das Produkt des Trägers und des modulierenden Rechtecksignals.⁸²

Da es sich um ein digitales Signal handelt gibt es entweder nur Nullen bzw. Einsen. Aufgrund der sprunghaften Übergänge bei der ASK, wird diese auch als digitale AM bezeichnet.⁸³

3.2.3. Frequenzumtastung (FSK)

Bei der FSK wird die Frequenz der Trägerschwingung sprunghaft verändert.⁸⁴ Die Trägersignale werden hierbei mit Oszillatoren erzeugt.⁸⁵

⁷⁶ Vgl. Görne (2015), S.170, 173.

⁷⁷ Vgl. Görne (2015), S.174.

⁷⁸ Vgl. Görne (2015), S.171.

⁷⁹ Vgl. Freyer (2009), S.196.

⁸⁰ Vgl. Stadler (2000), S.146.

⁸¹ Vgl. Meyer (2014), S.203.

⁸² Vgl. Meyer (2014), S.204.

⁸³ Vgl. Freyer (2009), S.196.

Das Nachrichtensignal welches in binärer Form vorliegt, schaltet zwischen zwei unterschiedlichen Kennfrequenzen um. Die Amplitude bleibt der FSK unberührt. Man spricht auch von einer inkohärenten FSK, bei der Phasensprünge entstehen. Daraus können bei einer schmalbandigen Übertragung Amplitudeneinbrüche im FSK-Signal entstehen.⁸⁶ Mit dem Wechsel zwischen vier, acht oder gar mehr Frequenzen wird eine höherwertige FSK erreicht. Diese ermöglicht, dass gleichzeitig mehrere Bitströme übertragen werden können. Dadurch wird die Bandbreitenausnutzung erhöht.⁸⁷

3.2.4. Phasenumtastung (PSK)

Aufgrund der Tatsache, dass die PSK gegenüber Störungsspannungen am unempfindlichsten ist, ist die PSK für die Datenübertragung von größter Bedeutung. Hier wird die Phase der Trägerschwingung sprunghaft verändert.⁸⁸ Bei der PSK gibt es bei der Übertragung von Bitfolgen die Zustände Null oder Eins. Bei der zweiwertigen PSK treten bei einem Wechsel von Null auf Eins, oder umgekehrt, Phasensprünge in einem Winkel von 180 Grad auf. Dadurch, dass bei der 2-PSK nur zwei Phasenzustände möglich sind, ist die Bandbreitenausnutzung mit 1 (Bit/s)/Hz äußerst gering.

Daher wird mit mehreren Phasenumtastungen gearbeitet.⁸⁹ Die 4-PSK, auch als QPSK bekannt, überträgt bei gleicher Bandbreite die doppelte Bitrate, da hier nun 4 Phasensprünge möglich sind.⁹⁰ Es gibt noch weitere Steigerungen wie die 8-PSK, 16-PSK und 32-PSK. Bei letzterem ist eine Bandbreitenausnutzung von 5 (Bit/s)/Hz möglich.⁹¹ Die QPSK ist eines der Modulationsverfahren von LTE.⁹²

Diese Steigerungen werden in der Praxis jedoch nur selten eingesetzt, da bei steigender Phasenlage deren Bereiche immer kleiner werden und diese nicht mehr gut unterscheidbar sind. Somit würde es zu Fehlern kommen.⁹³

⁸⁴ Vgl. Pehl (1998), S.205.

⁸⁵ Vgl. Meyer (2014), S.205.

⁸⁶ Vgl. Stadler. (2000), S.149.

⁸⁷ Vgl. Freyer (2009), S.197.

⁸⁸ Vgl. Stadler (2000), S.155.

⁸⁹ Vgl. Freyer (2009), S.198.

⁹⁰ Vgl. Meyer (2014), S.210.

⁹¹ Vgl. Freyer (2009), S.198.

⁹² Vgl. Bundesnetzagentur (o.J.a.), S.3.

⁹³ Vgl. Freyer (2009), S.198f.

3.3. Analoge Funksysteme versus digitale Funksysteme

Durch die digitalen Modulationstechniken haben sich viele verschiedene Vorteile für die Funkübertragung ergeben, die bei analogen Übertragungswegen nicht möglich sind. Jedoch können bei beiden Übertragungsmethoden Störungen auftreten. Tritt beispielsweise Rauschen auf, so kann das Signal im analogen System nicht reproduziert werden. Das ist bei digitalen Systemen möglich, denn bei der Übertragung mit der FSK oder PSK werden trotz Rauschen die Frequenz oder die Phasenlage des Signals erkannt.

Daraus lässt sich das Signal reproduzieren und kann somit rauschfrei wiedergegeben werden. Ein weiterer Vorteil von digitalen Funksystemen liegt in der Reichweite. Im Gegensatz zu analogen Systemen können bei digitalen Systemen Signale immer noch störungsfrei empfangen werden, solange die Phasenlage oder die Frequenz des Signals erkannt wird.⁹⁴ Mit derselben Sendeleistung hat ein digitales System eine 15 Prozent größere Reichweite als ein analoges System. Des Weiteren ist auch der Frequenzgang auch ein klarer Pluspunkt bei digitalen Systemen. Diese können aufgrund der Tatsache, dass sie keine analogen Modulationsverfahren verwenden, einen größeren Frequenzbereich (20 Hz bis 20 kHz) und Dynamikbereich übertragen.⁹⁵

Manche digitalen Funksysteme ermöglichen auch die Verschlüsselung des Signals. Die Firma Shure bietet beispielsweise Systeme an, die ihre Signale mit dem Standard AES256 verschlüsseln. Dieser Verschlüsselungsstandard sorgt zudem dafür, dass eventuell auftretendes Übersprechen verhindert wird.⁹⁶ Zudem ist im Gegensatz zu analogen Systemen die Übertragungsqualität in Bezug auf die Distanz, bei digitalen Systemen, konstant.⁹⁷ Außerdem ist es möglich, das Spektrum effizienter zu nutzen. Mit Shures digitalem QLX-D System hat man die Möglichkeit 22 Kanäle innerhalb von 8 MHz zu nutzen.⁹⁸ Das hochwertige analoge System UHF-R von Shure ist in der Lage, nur 13 Kanäle in demselben Frequenzbereich zu verwenden.⁹⁹ In der nachfolgenden Tabelle 2 ein kleiner Vergleich von analogen und digitalen Systemen und derer Spektrumseffizienz.

⁹⁴ Vgl. Schwörer (2013).

⁹⁵ Vgl. Schwörer (2014).

⁹⁶ Vgl. Schwörer (2013).

⁹⁷ Vgl. Altemark (2016), S.13f.

⁹⁸ Vgl. Schwörer (2014).

⁹⁹ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.b).

System	Technologie	Kanäle pro 8 MHz
Shure Axient Digital	Digital	63 Kanäle
Shure Axient Analog	Analog	19 Kanäle
Shure ULX-D	Digital	23 Kanäle
Shure UHF-R	Analog	13 Kanäle

Tabelle 2: Spektrumseffizienz bei analogen und digitalen Systemen

Diese zeigt auf, dass die digitalen Systeme von Shure effizienter mit dem vorhandenen Spektrum arbeiten. Das ULX-D-System von Shure ist neben den 23 Kanälen in der Lage, 63 Funkstrecken innerhalb von 8 MHz unterzubringen. Das wird mit dem High Density Mode erreicht (siehe Kapitel 7.3.). Dieser stellt die Frequenzen des Trägers im Raster von 125 kHz ein. Zudem kann der Empfänger die Trägerfrequenzen von Intermodulationen differenzieren. Bei analogen Funksystemen würde bei diesem Frequenzraster ein Übersprechen zwischen den einzelnen Kanälen auftreten. Jedoch leidet bei dieser Spektrumausnutzung die Reichweite und die Latenz steigt. Diese ist auch der einzige kritische Nachteil der digitalen Funksysteme. Dadurch, dass die Daten in digitaler Weise vorliegen, wird bei einer A/D zu D/A Wandlung Zeit benötigt, um diese wieder in ein analoges Signal zu wandeln. Bei diesem Prozess entstehen Latenzen. Diese sind jedoch heutzutage gering, bei kleineren Setups noch nicht hörbar und liegen unterhalb von 10 ms. Erst bei einer Latenz von 10 ms ist diese vom menschlichen Gehör wahrnehmbar.¹⁰⁰ Somit wäre die Latenz bei dem Speechline Digital Wireless System von Sennheiser hörbar. Dieses verfügt nämlich über eine Latenz von 19 ms.¹⁰¹ Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass sich die Latenzen addieren. Daher sind Latenzen von mehreren Millisekunden bei größeren Setups schon kritisch zu betrachten. Aus diesem Grund müssen die Modulationsverfahren eine Übertragung von unter 3 ms gewährleisten. Somit fallen viele Modulationsverfahren weg.¹⁰² Demzufolge wird bei größeren Setups mit zusätzlichen Mitteln wie Dante gearbeitet. Hier muss nun keine zusätzliche Wandlung stattfinden, denn Dante ist ein digitales Audioformat, welches Audiosignale digital über normale Netzwerkkabel übertragen kann. Bezüglich des Preis bewegen sich analoge und digitale Systeme in unterschiedlichen Preisklassen. Der teuerste Empfänger für das ULX-D System von Shure kostet 7497 Euro.¹⁰³ Im Vergleich dazu kostet der teuerste Empfänger für das analoge System UHF-R 4047,19 Euro.¹⁰⁴

¹⁰⁰ Vgl. Schwörer (2013).

¹⁰¹ Vgl. Sennheiser electronic GmbH & Co. KG (o.J.a), S.4.

¹⁰² Vgl. Altmark (o.J.), S.1.

¹⁰³ Vgl. Shure Deutschland (2017a).

¹⁰⁴ Vgl. Shure Deutschland (2017b).

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, würde man mit zwei Empfänger der UHF-R Reihe dennoch nicht auf die Spektrumeffizienz des Empfängers der ULX-D Reihe kommen.

3.4. Diversity

Ein Signal, welches gesendet wird, hat keine gerichtete, sondern wellenförmige Ausbreitung. Dadurch findet das Signal nicht den direkten Weg zum Empfänger, sondern auch kreisrund und damit indirekt über Reflexionen die durch Wände, Decken oder sonstige Oberflächen auftreten können. Aus diesem Grund erreicht das Signal zu unterschiedlichen Zeiten den Empfänger. Es kann sein, dass das Signal in Phase eintrifft. Dies hat zur Folge, dass das Signal verstärkt wird oder es trifft gegenphasig ein und somit wird das Signal ausgelöscht. Dieser gegenphasige Eintritt wird auch Dropout genannt. Deswegen wird mit einer zweiten Antenne gearbeitet.

Diese Methode wird Diversity-Empfang genannt.¹⁰⁵ Die Diversität kann über drei verschiedene Arten genutzt werden.¹⁰⁶ Bei der Zeitdiversität wird dasselbe Datenpaket eines Signals mehrfach zu unterschiedlichen Zeitpunkten gesendet. Mit der Frequenzdiversität wird das Signal vor dem Senden auf zwei unterschiedliche Trägerfrequenzen moduliert.¹⁰⁷ Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass sich Frequenzen bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften anders verhalten.¹⁰⁸ Bei der Polarisationsdiversität wird der bereits angesprochene Effekt ausgenutzt, dass Wellen reflektiert werden, sich beugen können und dadurch unterschiedlich lange Wege bis zum Empfänger besitzen. Dadurch wird die Polarisationssebene der Wellen gedreht. Es werden dafür zwei Antennen benötigt, jede empfängt einer der beiden Feldkomponenten.¹⁰⁹ Daher sollte die zweite Antenne in einem Abstand von minimal einer halben Wellenlänge von der anderen Antenne positioniert werden. Dieser Abstand gilt für den UHF-Frequenzbereich. Das System überprüft ständig, welche der beiden Antennen über das bessere Signal verfügt. Falls sich also die erste Antenne beispielsweise in 5 m Abstand und die zweite Antenne in 20 m Abstand befindet, würde das System normalerweise nie auf die zweite Antenne umschalten, da die erste Antenne über ein deutlich stärkeres Signal verfügt.¹¹⁰

¹⁰⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.c).

¹⁰⁶ Vgl. Keller (2011), S.216.

¹⁰⁷ Vgl. Nuszowski (2010), S.180.

¹⁰⁸ Vgl. Keller (2011), S.216.

¹⁰⁹ Vgl. Nuszowski (2010), S.181.

¹¹⁰ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.c).

3.4.1. Antennen-Switching Diversity

Wie in Abbildung 4 veranschaulicht, werden bei dem Antennen-Switching Diversity Verfahren zwei Antennen verwendet. Diese arbeiten über einen gemeinsamen Schalter. Das Signal der beiden Antennen wird dabei über den Schalter zum Empfänger des Systems geleitet. Falls dieses Signal während der Übertragung schlechter wird, gibt der Umschaltprozessor ein Signal an den Antennenschalter weiter, dass auf die andere Antenne umgeschaltet werden soll. Falls dann die Signalqualität weiterhin schlechter sein sollte, wird wieder zurückgeschaltet. Daher ist dieses Verfahren nicht besonders empfehlenswert.¹¹¹

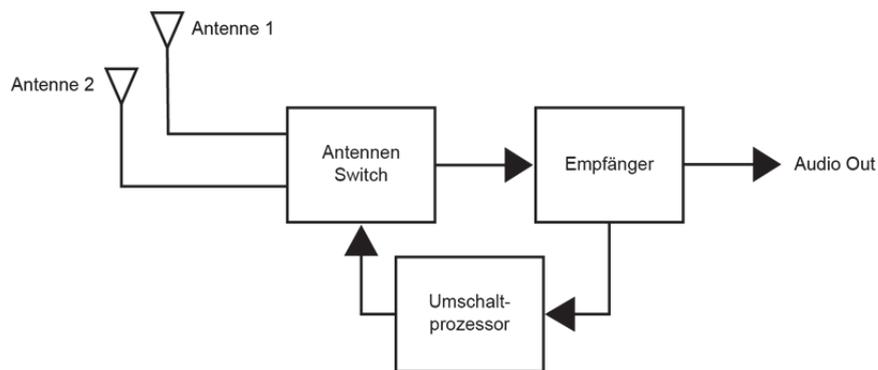


Abbildung 4: Funktionsweise des Antennen-Switching Diversity Verfahrens

3.4.2. Audio-Switching (True Diversity)

Im Gegensatz zu der Antennen-Switching-Diversity besitzt die True Diversity Variante zu jeder Antenne auch einen eigenen Empfänger. Das wird in Abbildung 5 ersichtlich. Diese sind so positioniert, dass einer der beiden Antennen immer ein besseres Signal empfangen kann. Das hat den Vorteil, dass hiermit zwei einzelne Audiosignale vorhanden sind. Diese Signale werden an einen Umschaltprozessor geleitet, welcher die Amplitude und die Signalqualität auswertet und schließlich entscheidet, welches der beiden Signale an den Audioausgang geleitet wird. Diese Umschaltung ist nicht hörbar.¹¹²

¹¹¹ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.c).

¹¹² Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.c).

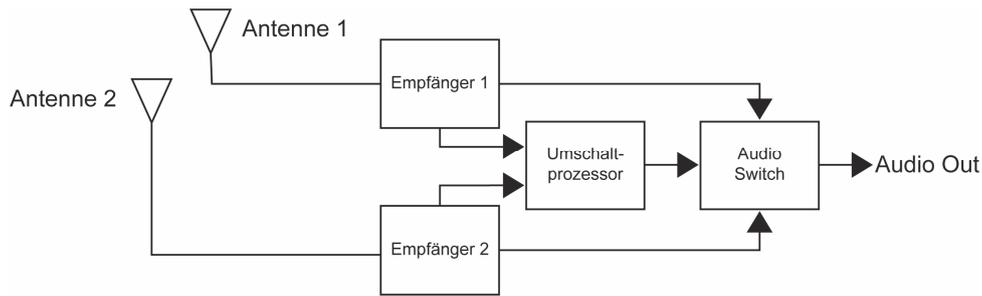


Abbildung 5: Funktionsweise des Audio-Switching (True Diversity) Verfahrens

3.4.3. Spatial Diversity

Das Spatial Diversity Verfahren ist aufgebaut wie das True Diversity Verfahren. Allerdings wird nicht zwischen den Empfangseinheiten umgeschaltet, sondern die Signale der Empfänger werden miteinander verglichen.

Danach wird das fehlerärmste Signal ausgewählt und weitergeleitet. Somit kann jederzeit und ohne Signalausfälle zwischen beiden Signalen umgeschaltet werden.¹¹³

3.4.4. Quadiversity

Das Quadiversity Verfahren besteht aus vier eigenen Antennen pro Kanal. Dadurch kann die Reichweite erhöht werden. Zusätzlich ist dieses Verfahren nicht so anfällig gegenüber Interferenzen und es wird die Gefahr gegen hochfrequente Störgeräusche minimiert.¹¹⁴

3.5. Grenzen der Funkübertragung

Angesichts der Eigenschaften der Funkübertragung gibt es bei der Nutzung von Funkmikrofonen verschiedene Punkte, die beachtet werden müssen, um eine einwandfreie Nutzung zu gewährleisten. Wenn mehrere Funkmikrofone beispielsweise auf einer Bühne verwendet werden, können Interferenzen und Intermodulationen entstehen.

3.5.1. Interferenzen

Zu Interferenzen kommt es dann, wenn sich verschiedene Frequenzen überlagern. Diese machen sich durch Audio-Artefakte bemerkbar. Analoge Funkmikrofonensysteme umgehen diese mithilfe einer sogenannten Rauschsperrung, auch Squelch genannt. Hier wird die Ausgabe eines Audiosignals solange unterdrückt bis ein Audiosignal gesendet wird. Dies soll verhindern, dass währenddessen kein Signal gesendet und auch kein Rauschen übertragen

¹¹³ Vgl. Line 6 (2010), S.8.

¹¹⁴ Vgl. Shure Distribution GmbH (2017), S.6.

werden kann. Um aber das Rauschen von einem Nutzsignal unterscheiden zu können, wird zusammen mit dem Audiosignal ein Pilotton gesendet. Dieser besitzt eine sehr hohe Frequenz und wird gefiltert. Während der Pilotton den richtigen Lautstärkepegel hat ist die Rauschsperrdeaktiviert.

Digitale Systeme haben den Vorteil, dass es als Informationen nur Nullen oder Einsen gibt.¹¹⁵ Dadurch können fehlerhafte Dateninhalte interpretiert und somit reproduziert werden. Bei professionellen Funkmikrofonsystemen besteht die Möglichkeit, am Empfänger den Wert des Squelchs einzustellen. Falls der minimale Squelch eingestellt ist, wird eine maximale Reichweite aber zugleich die minimale Betriebssicherheit erreicht. Das System verhält sich genau gegensätzlich, wenn der maximale Squelch eingestellt wird. Jedoch hat sich gezeigt, dass für die meisten Anwendungen empfehlenswert ist, den Mittelwert einzustellen.

Im Umfeld, in denen es zu Störungen durch DVB-T oder LTE kommen kann, sollte der Wert des Squelches auf den maximalen Wert eingestellt werden.¹¹⁶ Analoge Systeme benötigen im Vergleich zu digitalen Systemen einen größeren Abstand zueinander, um Interferenzen zu verhindern. Die Frequenzen sollten dafür einen minimalen Abstand von 1 MHz besitzen.¹¹⁷

3.5.2. Intermodulationen

Wenn in einem nichtlinearen System ein oder mehrere Signale Vielfache ihrer eigenen Frequenz erzeugen, spricht man von Intermodulationen.¹¹⁸ Das Eingangssignal steht bei diesen Systemen nicht im Verhältnis zum Ausgangssignal. Das geschieht durch die im System verbauten Komponenten, die eine nicht lineare Kennlinie besitzen. Das können Bauteile wie Widerstände oder Transistoren sein. Falls also die Aussteuerung des Ausgangssignals zu groß ist, wird dieses reduziert und gegebenenfalls beschnitten. Dadurch, dass das Signal abgeschwächt wird, entstehen neue Oberwellen oberhalb der Grundfrequenz des Signals.¹¹⁹ Intermodulationen können als Summen- und/oder Differenzprodukte der Trägerfrequenzen und deren Harmonischen betrachtet werden.¹²⁰ Diese können in zweiter, dritter usw. Ordnung entstehen, wobei diese darüber bestimmt, in welchen Teil die Frequenzen in das Summen- oder Differenzprodukt kommen.¹²¹ Wie in Formel 3 zu sehen ist, entstehen Intermodu-

¹¹⁵ Vgl. Line 6 (2010), S.7.

¹¹⁶ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.e).

¹¹⁷ Vgl. Line 6 (2010), S.9.

¹¹⁸ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.a), S.2.

¹¹⁹ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.f).

¹²⁰ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.d).

¹²¹ Vgl. Shure Audio Institute (o.J.g).

lationen zweiter Ordnung durch die Summe zweier Frequenzen oder die zweite Harmonische der Grundfrequenz.¹²²

$$f_1 + f_2 = f_{intermod}$$

$$f_1 + f_1 = 2 \cdot f_1 = f_{intermod}$$

Formel 3: Berechnung der Intermodulationen zweiter Ordnung

Mit Formel 4 lassen sich Intermodulationen dritter Ordnung berechnen.

Diese können entweder durch zwei verschiedene Signale oder eines einzelnen Signals und deren Summen- und Differenzprodukte entstehen.¹²³

$$f_1 + f_2 - f_3 = f_{intermod}$$

$$(2 \cdot f_1) - f_2 = f_{intermod}$$

$$(2 \cdot f_1) + f_2 = f_{intermod}$$

$$f_1 + f_1 + f_1 = 3 \cdot f_1 = f_{intermod}$$

Formel 4: Berechnung der Intermodulationen dritter Ordnung

In Abbildung 6 werden zwei Mikrofone mit den Trägerfrequenzen 900 MHz und 901 MHz verwendet. Durch das nichtlineare System entstehen die Summen- bzw. Differenzprodukte. Bei der Intermodulation zweiter Ordnung entstehen also die Frequenzen 1801 und 1 MHz. Diese zwei Frequenzen liegen aber weit entfernt von der Trägerfrequenz und stören somit nicht das Signal.

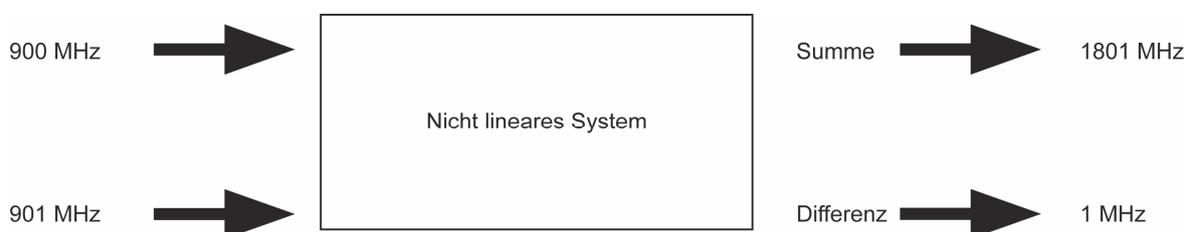


Abbildung 6: Summen- und Differenzsignal bei Intermodulationen zweiter Ordnung

¹²² Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.a), S.6.

¹²³ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.d).

Betrachtet man wie in Abbildung 7 die Intermodulation der dritten Ordnung sieht die Situation schon anders aus. Die Funkmikrofone mit den Trägerfrequenzen 900 und 901 MHz arbeiten einwandfrei. Kommt aber jetzt ein weiteres Funkmikrofon ins Spiel, welches mit einer Trägerfrequenz von 899 oder 902 MHz arbeitet, kommt es zu Störungen des Signals, da die beiden anderen Mikrofone auch Signale auf diesen Frequenzen erzeugen.¹²⁴

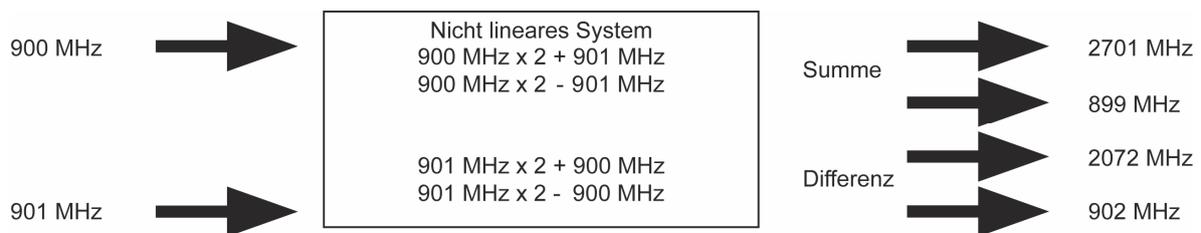


Abbildung 7: Summen- und Differenzsignal bei Intermodulationen dritter Ordnung

Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, steht fest, dass je mehr Frequenzen verwendet werden, desto mehr Intermodulationen werden erzeugt.

Die Empfängerqualität entscheidet darüber wie groß die Anzahl der verwendbaren Kanäle ist. Denn dieser muss das Signal aus dem Frequenzspektrum filtern. Wenn der Empfänger also hochwertige Filter besitzt, können mehr eng beieinanderliegende Frequenzen verwendet werden, da der Filter in der Lage ist, das Signal besser von anderen Störsignalen zu trennen.¹²⁵

Verwendete Frequenzen	Intermodulationsprodukte N (N-1)
1	0
2	2
3	6
4	12
5	20
6	30
7	42

Tabelle 3: Anzahl an Intermodulationsprodukten dritter Ordnung

¹²⁴ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.d).

¹²⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (o.J.d).

Allerdings sollte grundsätzlich vermieden werden, Mikrofone in einem engen Frequenzabstand zu betreiben.¹²⁶ Außerdem ist es ratsam, mithilfe von Sicherheitsabständen solchen Effekten vorzubeugen.¹²⁷

3.5.3. Dynamikumfang

Der Begriff Dynamikumfang legt den Bereich fest, den das menschliche Gehör wahrnehmen kann. Dieser reicht von der Hörschwelle bis hin zur Schmerzgrenze.¹²⁸ Es handelt sich hierbei um die Schalldruckpegel von 0 bis 130 dB.¹²⁹

Bei technischen Geräten ist dieser Umfang durch den Pegelunterschied der Übersteuerungsgrenze und des Eigenrauschens begrenzt und ist zudem auch ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Diese trägt auch den Namen Systemdynamik.¹³⁰

Aufgrund der Tatsache, dass eine CD Audiodateien mit 16 Bit wiedergibt, ergibt sich, wie in Formel 5 zu sehen ist, ein Dynamikumfang von 96 dB.¹³¹

$$16 \text{ Bit Tiefe} \times 6 \text{ dB pro Bit} = 96 \text{ dB}$$

Formel 5: Berechnung der Dynamik einer CD

Die 6 dB pro Bit werden für eine gleichförmige und symmetrische Quantisierung benötigt.¹³² Das bedeutet, dass bei einer professionellen Anwendung von Funkmikrofonen mindestens mit 16 Bit gearbeitet werden sollte, um einen vollen Dynamikumfang gewährleisten zu können. Grund hierfür ist der Dynamikumfang bei analogen Systemen von 100 dB.¹³³ Digitale Systeme von Shure schaffen es über einen analogen Ausgang einen Dynamikumfang von 120 dB zu übertragen. Mit dem digitalen Ausgang, welcher das Dante-Protokoll verwendet, ist sogar ein Umfang von 130 dB möglich.¹³⁴ Damit diese 100 dB übertragen werden können, wird, wie in Abbildung 8 zu sehen ist, das eingehende Signal im Verhältnis bzw. Ratio 2:1 auf 50 dB, mithilfe eines VGA's komprimiert. Dieser bestimmt den Arbeitspegel mittels des durchschnittlichen Eingangspegels.¹³⁵ Um den Dynamikumfang zu reduzieren, werden leise Signale angehoben und lautere Signale abgeschwächt. Diese Komprimierung findet im Sen-

¹²⁶ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.a), S.13.

¹²⁷ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.a), S.21f.

¹²⁸ Vgl. von Brockdorff (2006), S.1.

¹²⁹ Vgl. Sengpiel (o.J.).

¹³⁰ Vgl. von Brockdorff (2006), S.1.

¹³¹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.861.

¹³² Vgl. Werner (2006), S.39.

¹³³ Vgl. Line 6 (2010), S.9.

¹³⁴ Vgl. Wehowski (2014), S.29.

¹³⁵ Vgl. Line 6 (2010), S.9.

der statt. Das ermöglicht es, das Signal lauter zu übertragen, ohne es zu verzerren. Mit diesem Verfahren wird der Signal-Rausch-Abstand erhöht. Um ansatzweise wieder den vollen Dynamikumfang zu erreichen, wird das Signal im Empfänger expandiert. Die Ratio des Expanders liegt hier bei 1:2. Dabei werden leise Signale abgeschwächt und lautere Signale verstärkt. Dieses Verfahren hat auch den Namen „Compander“, denn dieser Begriff setzt sich aus den Worten Compressor und Expander zusammen.¹³⁶

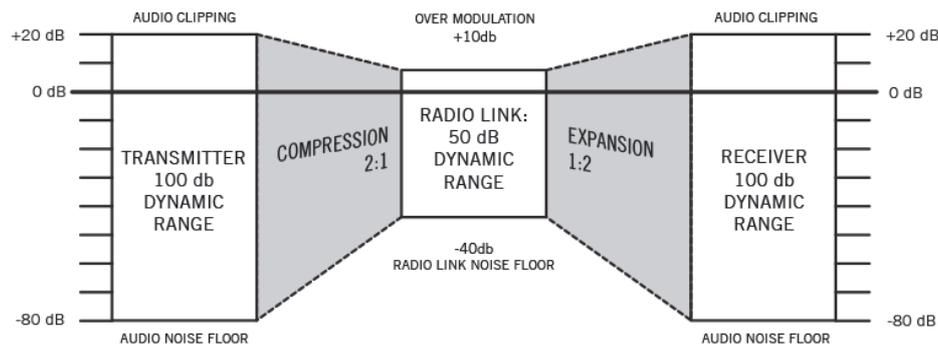


Abbildung 8: Funktionsweise eines Companders

Jedoch kommt es durch das Komprimieren und Expandieren zu Artefakten. Diese Artefakte machen sich zum Beispiel durch Pump-Effekte und schnelle Pegeländerungen bemerkbar.¹³⁷ Weitere Artefakte, welche hinzukommen können, sind Rauschfahnen und etwas lautere Höhen des Audiosignals.¹³⁸ Das Pumpen fällt vor allem bei Signalen wie einer Snare oder Kickdrum auf. Hierbei handelt es sich nämlich um Signale, welche über starke Transienten verfügen. Unter Transienten versteht man Signale mit kurzen und impulsiven Anschlägen und schnellen Pegeländerungen. Dieser kurze und starke Transient wird hörbar durch den VGA abgeschwächt und der leise Nachklang angehoben. Somit kommt es zum Pumpen.

Des Weiteren ist auch oft ein Limiter im Sender integriert. Dieser hat die Aufgabe, Pegelspitzen die zur Übersteuerung führen abzufangen und in ihrem Pegel abzdämpfen. Zusätzlich kann er eine Übermodulation, was bedeutet, dass sich das Signal auf angrenzende Frequenzen ausbreitet, verhindern. Um den Rauschabstand in hohen Frequenzen zu verbessern, wird das Signal im Sender einer Preemphasis unterzogen.¹³⁹ Wie in Abbildung 9 dargestellt, werden dabei die Frequenzen des Signals oberhalb von 2 kHz um 6 dB pro Oktave angehoben. Dadurch wirkt man der Verringerung des Rauschabstandes bei höheren Frequenzen entgegen.

¹³⁶ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.b).

¹³⁷ Vgl. Line 6 (2010), S.9.

¹³⁸ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.b).

¹³⁹ Vgl. Line 6 (2010), S.10.

gen.¹⁴⁰ Im Empfänger wird das Signal schließlich noch einer Deemphasis unterzogen.¹⁴¹ Bei diesem Prozess wird der ursprüngliche Frequenzgang wieder hergestellt, also die hohen Frequenzen wieder um 6 dB pro Oktave abgesenkt.¹⁴²

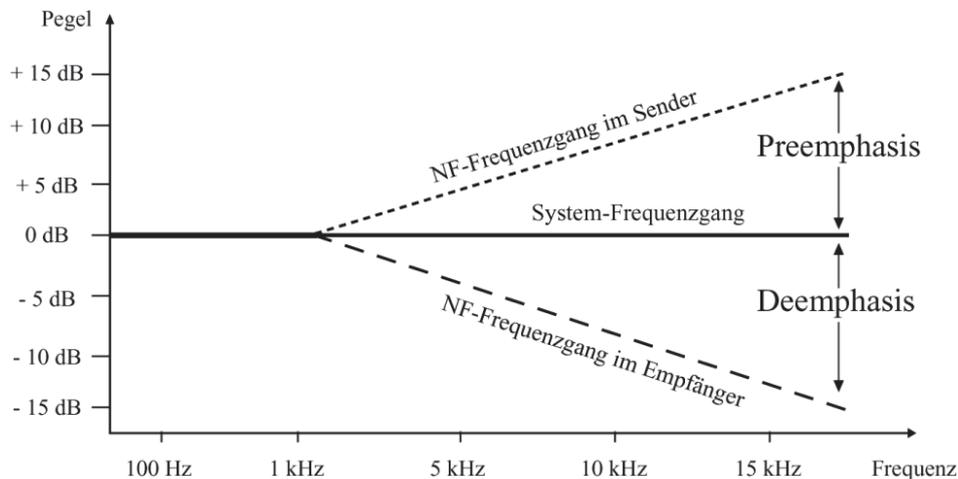


Abbildung 9: Pre- & Deemphasis im Sender & Empfänger

3.5.4. Verzerrung

Eine Verzerrung des Signals bedeutet, dass sich das Ausgangssignal vom Eingangssignal unterscheidet. Hierbei gibt es verschiedene Arten. Die lineare Verzerrung entsteht durch elektrische Bauteile wie Verstärker und kapazitive bzw. induktive Spannungsteiler, welche frequenzabhängig arbeiten. Hierbei wird jedoch nicht die Sinusform der Wechselspannung verändert. Deshalb bleibt bei der linearen Verzerrung die Kurvenform des Signals unberührt und zudem kommen auch keine weiteren Obertöne (Harmonische) hinzu. Das Signal wird lediglich in seiner Amplitude verändert. Bei der nichtlinearen Verzerrung wird die Sinusschwingung der Wechselspannung verändert. Dadurch entstehen neue Oberschwingungen. Die Frequenzen der neuen Oberschwingungen sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Diese entstehen durch Halbleiter, welche eine nicht lineare Kennlinie besitzen. Die Halbleiter verzerren. Eine Übersteuerung ist beispielsweise eine nicht lineare Verzerrung, denn hierbei wird vom Signal der negative und positive Amplitudenbereich beschnitten. Dies hat zur Folge, dass neue Obertöne entstehen. Die Stärke der nichtlinearen Verzerrung wird mit dem Klirrfaktor angegeben. Dieser spiegelt den Oberwellenanteil eines Signals in Prozent wieder

¹⁴⁰ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.190.

¹⁴¹ Vgl. Line 6 (2010), S.10.

¹⁴² Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.191.

und ist frequenzabhängig. Je größer der Klirrfaktor also ist, desto mehr weicht das Signal vom Originalsignal ab.¹⁴³

Erzeugt man wie in Abbildung 10 zu sehen, eine Sinusschwingung und fügt dieser eine nicht-lineare Verzerrung in Form von Distortion hinzu, entsteht, wie in Abbildung 11 zu sehen, eine beschnittene Sinusschwingung. Diese kann auch als Rechteckschwingung betitelt werden. Hier entstehen auch weitere Obertöne.

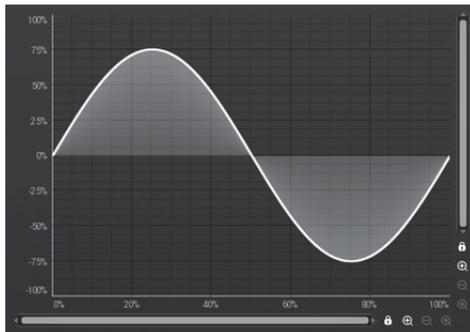


Abbildung 10: Unverzerrte Sinusschwingung

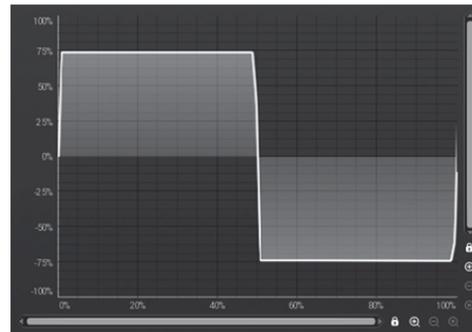


Abbildung 11: Verzerrte Sinusschwingung

3.5.5. Frequenzgang

Damit die Funktionsweise des Componders nicht beeinträchtigt wird, sind die Frequenzen im Tiefen- sowie im Höhenbereich begrenzt. Daher müssen diese Frequenzen abgemindert werden. Der Frequenzgang eines analogen Systems hat daher leichte Züge eines Bandpasses, bei dem die tiefen und hohen Frequenzen beschnitten sind. Aufgrund dessen, dass besonders tiefe Frequenzen eine große Wellenlänge und somit im Vergleich zu hohen Frequenzen eine langsame Pegeländerung besitzen, kann es besonders bei diesen Frequenzen zu Pegeländerungen kommen. Aus diesem Grund werden bei analogen Systemen besonders tiefe Frequenzen beschnitten. Auch die hohen Frequenzen sind aufgrund des analogen Modulationsverfahrens von der Filterung betroffen. Die FM kann nämlich nur Frequenzen bis zu 15 kHz übertragen. Daher fallen Frequenzen ab diesem Punkt bei analogen Funkmikrofonen ab.

Bei digitalen Funksystemen ist dies nicht der Fall, da hier die Abtastfrequenz für das zu übertragende Frequenzspektrum verantwortlich ist. Daher besitzen digitale Systeme einen größeren Frequenzgang als analoge Systeme und es können auch Frequenzen über 15 kHz übertragen werden. Man kann also sagen, je höher die Abtastfrequenz ist, desto mehr Frequenzen kann das System übertragen. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass jedes Mikro-

¹⁴³ Vgl. Sengpiel (2007).

fon seinen eigenen Frequenzgang besitzt und somit nicht linear arbeitet. Ein digitales System hat den Vorteil, dass es den Frequenzgang des Audiosignals nicht weiter verfärbt. Folglich besitzen diese Systeme im Bereich von 10 Hz bis 20 kHz einen linearen Frequenzgang.¹⁴⁴

3.6. Anforderung an Funkmikrofone

Klar ist, dass Funkmikrofone dieselben Anforderungen wie kabelgebundene Mikrofone erfüllen müssen. Daher muss eine sehr hohe Übertragungssicherheit im genutzten Frequenzspektrum gewährleistet sein.

Des Weiteren muss der bereits angesprochene Dynamikumfang von 100 dB gewährleistet sein (siehe Kapitel 3.5.3). Wenn Funkmikrofone eingesetzt werden, sind diese das erste Glied des Signalweges. Heißt, dass wenn in diesem Glied Störungen wie Interferenzen oder Intermodulationen auftreten, das Signal in der Qualität rapide leidet und somit die Signalqualität auf dem gesamten Signalweg abnimmt.¹⁴⁵ Das ist vor allem bei Live-Events sehr kritisch zu beurteilen, da diese nicht wiederholt werden können. Dadurch hat der Ton erheblichen Einfluss auf das Event selbst und auch auf eine mögliche weitere Auswertung wie Live-DVDs etc.

Demzufolge ist beim Einsatz der Funkmikrofone darauf zu achten, dass möglichst wenige Störungen wie Interferenzen oder Man-made-Noise auftreten. Das ECC hat dafür einige zu berücksichtigende Faktoren ausgegeben, die unter anderem Funkmikrofone erfüllen müssen. Demnach darf die Tonqualität während des Events nicht benachteiligt werden.¹⁴⁶ Die Schlüsselfaktoren für einen reibungsfreien Ablauf liegen darin, dass mit einer möglichst niedrigen Latenz gearbeitet wird. Diese liegt meistens unterhalb von 3 bis 4 ms. Zusätzlich muss der „Audio duty cycle“ 100 Prozent betragen, was bedeutet, dass keine Verfälschungen oder Unterbrechungen auftreten dürfen. Wenn Funkmikrofone mit großen Verstärkern verbunden sind, was sie bei Konzerten etc. sind, dürfen keine Interferenzen auftreten. Diese sind nämlich in der Lage, das Gehör der Zuhörer sowie der Künstler zu schädigen.¹⁴⁷ Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Bandbreite, die für die Funkmikrofone vorgesehen ist. Diese beträgt außer bei Sonderfällen immer 200 kHz.¹⁴⁸

An den Grenzen eines Bandes hat das Signal einen geringeren Pegel von 60 dB im Vergleich zur Trägerfrequenz. Hierfür gibt es eine Europannorm. Die ETSI-Maske gibt vor, dass sich das

¹⁴⁴ Vgl. Line 6 (2010), S.11.

¹⁴⁵ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.20.

¹⁴⁶ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.19.

¹⁴⁷ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.20.

¹⁴⁸ Vgl. Kürner et al. (2013), S.14.

Signal bei Vollaussteuerung innerhalb des Rahmens dieser Maske zu bewegen hat. Übersteuerungen müssen durch einen harten Limiter abgeschnitten werden. Er beginnt bei einem Hub von 48 kHz zu arbeiten. Dieser ist gesetzlich vorgeschrieben und verhindert, dass der Sender übermoduliert und somit zu viel Bandbreite belegt.¹⁴⁹ Hier kommt hinzu, dass wenn mehrere Funkmikrofone am gleichen Ort verwendet werden, ein nötiger Schutzabstand zwischen den Mikrofonen herrschen muss. Bei dem Betrieb zweier Funkmikrofone muss ein Schutzabstand von mindestens 400 kHz herrschen.

Steigt die Anzahl der verwendeten Funkmikrofone, steigt auch der benötigte Schutzabstand. Es muss daher vor allem auf die Intermodulation dritter Ordnung geachtet werden.¹⁵⁰ Um das zur Verfügung stehende Frequenzspektrum effizienter nutzen zu können, ist es von Vorteil, das Spektrum nicht als einen einzigen Block zu nutzen, sondern mehrere verteilte Blöcke zu verwenden. Somit entstehen einige Kanäle, die intermodulationsfrei nutzbar sind. Befinden sich Sender sowie Empfänger von Funkmikrofonen und In-Ear Monitoren in räumlicher Nähe, bedarf es einem Schutzabstand von minimal 7 MHz.¹⁵¹

Belegen zwei Funkmikrofone denselben Kanal, benötigen diese in einer Stadt einen Schutzabstand von minimal 400 m, um mögliche Interferenzen zu vermeiden.¹⁵²

4. DVB-T

Durch die Umstellung des analogen Fernsehsignals auf DVB-T haben sich viele positive Dinge aufgetan. Beispielsweise, dass mit dem zur Verfügung stehenden Frequenzspektrum mehr Spielraum vorhanden ist. Jedoch ist diese Umstellung für die Funkmikrofone alles andere als gut, denn das analoge Fernsehen belegte von den 8 MHz breiten UHF-Kanälen nur 7 MHz. Diese besaßen außerdem Schutzabstände, um im Überlappungsbereich massive Störungen zu vermeiden. Dieser Freiraum von 1 MHz und mehr wurde unter anderen für die Nutzung der Funkmikrofone verwendet.¹⁵³ Zudem wird ein Schutzabstand zu den DVB-T Kanälen benötigt. Dieser sollte 600 kHz betragen.¹⁵⁴

¹⁴⁹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.193.

¹⁵⁰ Vgl. Kürner et al. (2013), S.16.

¹⁵¹ Vgl. Kürner et al. (2013), S.17.

¹⁵² Vgl. Kürner et al. (2013), S.18.

¹⁵³ Vgl. Wisse (2009), S.24.

¹⁵⁴ Vgl. Kürner et al. (2013), S.16.

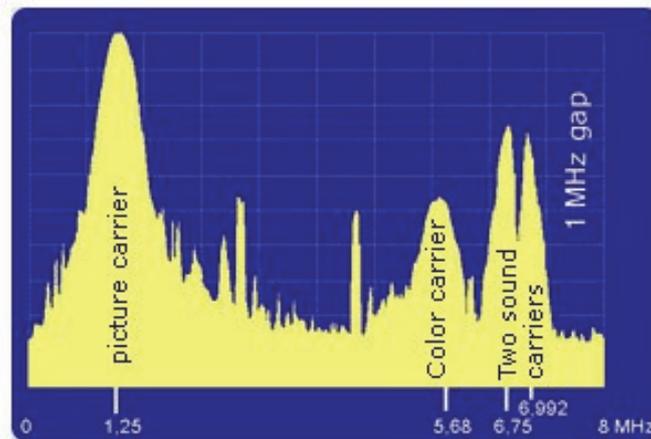


Abbildung 12: Frequenznutzung eines analogen TV-Senders

Wie in Abbildung 12 und 13 zu sehen ist, fällt durch die Umstellung auf DVB-T und jetzt auf DVB-T2 dieser Freiraum von 1 MHz des analogen Fernsehens weg.¹⁵⁵ Dieser wird nun für die Ausstrahlung des digitalen Fernsehprogramms verwendet.¹⁵⁶ Somit ist die Mitnutzung ohne erheblichen Aufwand nicht mehr möglich.



Abbildung 13: Frequenznutzung eines digitalen TV-Senders

5. Frequenzuteilung

Funkfrequenzen obliegen eigentlich der nationalen Regulierungshoheit. Dennoch können diese aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften nicht an Staatsgrenzen gebunden werden. Jedoch können unter Berücksichtigung verschiedener Ausbreitungseigenschaften größere Gebiete erreicht werden. Daher ist es notwendig die Frequenznutzung auf internationaler Ebene zu regulieren.¹⁵⁷ Dies resultiert aus der Tatsache, dass eine Frequenz an einem Ort

¹⁵⁵ Vgl. Sennheiser electronic GmbH & Co. KG (o.J.b).

¹⁵⁶ Vgl. Wisse (2009), S.25.

¹⁵⁷ Vgl. Kühn (2008), S.15.

und zur selben Zeit ausschließlich von einem Sender ohne Störungen verwendet werden kann.¹⁵⁸

Es muss aber auch zwischen internationaler und nationaler Nutzung unterschieden werden. Deswegen sind international nur Faktoren wie Obergrenzen für Störwirkungen nach außen von Bedeutung.¹⁵⁹ Für diese Koordination hat man die ITU sowie das ECC, welche in der CEPT agieren, geschaffen. Innerhalb der EU werden die Anforderungen, welche Funksender besitzen müssen, über gemeinsame Richtlinien geregelt.¹⁶⁰ Die ITU organisiert und moderiert die globalen Abstimmungsprozesse. Hierbei wird über die Nutzung der Frequenzen und Frequenzbereiche beraten. Bei der ITU gibt es den Sektor ITU-R, welcher für die globale Spektrumskoordination zuständig ist. Zusätzlich gibt dieser verbindliche Regelungen für die Nutzung des Funkspektrums weltweit heraus. Diese werden als Werk unter dem Namen Radio Regulations herausgegeben. Die Zuweisung der Frequenzbereiche, ob global oder regional, erfolgt auf der WRC. Diese Zuweisungen sind schließlich in den Radio Regulations wiederzufinden.¹⁶¹

Bei der Zuweisung wird zwischen primären und sekundären Diensten unterschieden, wobei letztere in der Rangordnung untergeordnet werden. Aus diesem Grund besitzen sie keinerlei Schutzansprüche gegenüber primären Diensten und dürfen außerdem keine Störungen hervorrufen.¹⁶²

Die Zuständigkeit für die Zuteilung ist in Deutschland zwischen Bund und den Bundesländern aufgeteilt. Die Bundesländer sind für die medienrechtliche Aufsicht und die inhaltliche Belegung der Frequenzen verantwortlich. Dabei haben sie sich unter anderem nach dem Rundfunkstaatsvertrag und den jeweiligen Landesgesetzen zu richten.¹⁶³ Die Bundesnetzagentur ist für die technische Frequenzregulierung und die Zuteilung der Frequenzen verantwortlich. Sie stellt außerdem, nach den Vorschriften des Telekommunikationsgesetzes, die störungsfreie Nutzung sicher.¹⁶⁴

¹⁵⁸ Vgl. Niehoff (2008), S.1036.

¹⁵⁹ Vgl. Kühn (2008), S.15f.

¹⁶⁰ Vgl. Niehoff (2008), S.1036.

¹⁶¹ Vgl. Kühn (2008), S.16f.

¹⁶² Vgl. Kühn (2008), S.17.

¹⁶³ Vgl. Kühn (2008), S.21f.

¹⁶⁴ Vgl. Kühn (2008), S.22.

6. Digitale Dividende

In den frühen 1990er-Jahren gab es ausschließlich analoges Fernsehen und Radio, welches über Antenne, Kabel oder Satellit empfangen wurde. Die analoge Welt war zuverlässig und funktionierte gut, jedoch waren Geisterbilder oder auch Rauschen bei vielen Konsumenten Alltag.¹⁶⁵ Die Halbleiterindustrie verzeichnete starke technologische Fortschritte. Deshalb war Anfang der 1990er-Jahre der Weg für die Digitalisierung des Hör- und Fernsehgrundfunks frei.¹⁶⁶

6.1. Der Beginn

Ein weiterer Grund für die Digitalisierung war, dass der Konsument beispielsweise durch das Aufkommen der CD, in den Genuss eines höheren Qualitätsstandard gekommen ist und diesen ungern missen mochte. Diese Qualität konnte nicht immer mit terrestrischen Mitteln übertragen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht genügend Spektrum zur Verfügung stand, war die Programmauswahl äußerst beschränkt.¹⁶⁷ Daher rückte das Thema der effizienten Spektrumnutzung immer mehr in den Mittelpunkt.¹⁶⁸

Bedingt durch die Tatsache, dass analoges im Vergleich zu digitalem Fernsehen eine sehr hohe Bandbreite benötigte, gab es nur Platz für wenige Sender. In Deutschland war das zur Verfügung stehende Frequenzspektrum mit den Sendern ARD, ZDF und dem üblichen regionalen Sender wie dem SWR schon stark ausgereizt. Zudem mussten benachbarte Senderstandorte die gleichen Sender auf verschiedenen Frequenzen senden. Außerdem mussten die Frequenzen so koordiniert werden, dass sich die Sender nicht gegenseitig störten. Ein weiterer wichtiger Faktor waren die Übertragungskosten. Diese waren bei der analogen Übertragung so hoch, dass sich viele kleine Fernsehsender die analoge Übertragung nicht leisten konnten. Im Radio war die Situation sehr ähnlich. Hier war es schlussendlich so, dass es zu einer Überbelegung der Frequenzen kam.¹⁶⁹ Deshalb wurde überlegt, wie man die zu übertragenden Datenmengen und auch die Frequenznutzung reduzieren kann, ohne dass die

¹⁶⁵ Vgl. Riegler (2009), S.10.

¹⁶⁶ Vgl. Kühn (2008), S.5.

¹⁶⁷ Vgl. Beutler (2012), S.3.

¹⁶⁸ Vgl. Beutler (2012), S.3f.

¹⁶⁹ Vgl. Riegler (2009), S.10f.

Signalqualität allzu stark darunter leidet. Hierzu wurden unter anderem psychoakustischen Effekte angewendet und unterschiedliche Multiträgermodulationen entwickelt.¹⁷⁰

Jedes Audiosignal besitzt einen gewissen Teil an redundanten Informationen. Diese sind mehrfach im Signal vorhanden und können daher, ohne dass das Signal irgendwelche Verluste erleidet, weggelassen werden.¹⁷¹

Dies wird mithilfe von psychoakustischen Effekten realisiert. Dabei werden verschiedene Verdeckungs-/Maskierungseffekte angewendet, die es ermöglichen, Bestandteile eines Signals wegzulassen, ohne dass ein Informationsverlust des Signals entsteht und die übertragende Datenmenge reduziert wird.¹⁷² Bei der Maskierung wird zwischen frequenz- und zeitabhängiger Maskierung unterschieden.¹⁷³ Eine frequenzabhängige Maskierung findet dann statt, wenn die Intensität eines Schallereignisses unterhalb der Maskierungsschwelle liegt. Ist das gegeben, wird das Schallereignis nicht wahrgenommen. Die Maskierungsschwelle ist abhängig von der Amplitude und Frequenz, sowie von Schallereignissen, die im Umfeld stattfinden.¹⁷⁴ Die Hörschwelle für das zweite Schallereignis erhöht sich immens, wenn die Frequenzen der beiden Schallereignisse in einem geringen Abstand zueinanderstehen.¹⁷⁵

Bei der zeitabhängigen Maskierung wird zwischen Vor- und Nachverdeckung unterschieden. Der Vorverdeckungseffekt (pre-masking) tritt dann ein, wenn das zuvor auftretende Signal mit einem kleinen Lautstärkepegel durch ein nachfolgendes Signal mit größerem Lautstärkepegel verdeckt wird. Dadurch wird das Signal mit dem kleinerem Lautstärkepegel nicht mehr wahrgenommen. Die Zeit, in dem die Vorverdeckung stattfinden kann, beträgt 20 ms.¹⁷⁶ Der Nachverdeckungseffekt (post-masking) nutzt die Tatsache aus, dass die Empfindlichkeit des Gehörs in den betroffenen Frequenzen abnimmt, nachdem ein Schallereignis mit einem hohen Lautstärkepegel stattgefunden hat. Durch letzteres wird die Basilarmembran stark angeregt, woraufhin sie mit geringer Geschwindigkeit ausschwingt. Das Gehör benötigt eine Zeit von bis zu 100 ms, um seine vollständige Empfindlichkeit wiederzuerlangen.¹⁷⁷ Das können sich Codierungen zu Nutze machen, indem man Signale mit einem kleineren Lautstärkepegel, die Signalen mit größeren Lautstärkepegeln nachfolgen, stärker maskiert.¹⁷⁸ Um

¹⁷⁰ Vgl. Beutler (2012), S.4.

¹⁷¹ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.714.

¹⁷² Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.715.

¹⁷³ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.715, 718.

¹⁷⁴ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.715.

¹⁷⁵ Vgl. Raffaseder (2002), S.93.

¹⁷⁶ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.718.

¹⁷⁷ Vgl. Raffaseder (2002), S.93.

¹⁷⁸ Vgl. Dickreiter et al. (2014), S.718.

die Jahrtausendwende begann man digitale Übertragungsstandards zu entwickeln. Durch die digitale Fernsehübertragung war es erstmals möglich, dass man innerhalb eines Versorgungsgebietes jedem Haushalt dieselbe Bildqualität bereitstellen konnte. Zudem konnte man erstmals neue Standards der Tonübertragung verwenden. Auch das Radio profitierte von der Digitalisierung. Es war nun erstmals möglich das Radioprogramm in Stereo zu empfangen.¹⁷⁹

Als Folge der Umstellung von analoger zu digitaler Übertragung des Rundfunks ergaben sich einige freie Frequenzen. Für den Gewinn der Frequenzen wird der Begriff Digitale Dividende verwendet. Vor allem ist die Nutzung der Frequenzen im UHF-Spektrum von der Mobilfunk- und Telekommunikationsindustrie sehr begehrt und gilt zudem aus politischer Sicht als überaus wertvoller Bestand. Der Wert dieses gesamten Spektrums in Europa wird von der Europäischen Kommission auf einen dreistelligen Milliardenbetrag geschätzt.¹⁸⁰

6.2. Digitale Dividende I

Bisher wurde für die Rundfunkübertragung das Spektrum im Bereich von 470 bis 862 MHz verwendet.¹⁸¹ Durch den Umstieg ist die Effizienz der Übertragungstechnologie gestiegen. Somit wurden viele Frequenzen im bisher genutzten Frequenzspektrum wieder frei. Aufgrund dessen ist es nun möglich innerhalb des Spektrums eines einzelnen analogen Fernsehkanals sechs bis acht Digital TV-Kanäle, in Standardauflösung, zu übertragen. Für die aktuelle Anzahl an Fernsehkanälen werden mit der digitalen Übertragungstechnologie gerade mal 62 MHz benötigt. Das sind gerade mal 15 Prozent des zur Verfügung stehenden Spektrums.

Durch die Komprimierung der benötigten Frequenzen liegt der Betrag der Digitalen Dividende, laut Schätzungen der Bundesnetzagentur, bei circa 330 MHz.¹⁸² Auf der WRC im Jahr 2007 hat man beschlossen, dass ein Teil des UHF-Bandes auch für die Nutzung von Mobilfunk verwendet werden soll. Für diese Dienste soll das Spektrum im Bereich von 790 bis 862 MHz zusammen mit dem Rundfunk genutzt werden.¹⁸³ Dieser Frequenzbereich wurde bis 2010 vom deutschen Militär genutzt.¹⁸⁴ Im Jahr 2010 versteigerte die Bundesnetzagentur dieses Spektrum. Die Rechte hierfür sicherten sich Vodafone und Telefónica-O2.

¹⁷⁹ Vgl. Riegler (2009), S.11.

¹⁸⁰ Vgl. Picot und Tillmann (2009), S.7.

¹⁸¹ Vgl. Bauer (o.J.a).

¹⁸² Vgl. Picot und Tillmann (2009), S.8.

¹⁸³ Vgl. Picot und Tillmann (2009), S.9.

¹⁸⁴ Vgl. Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (2013), S.33.

Beide Mobilfunkbetreiber zahlten für die Rechte dieser Frequenzen jeweils ungefähr 1,2 Milliarden Euro.¹⁸⁵ Durch die Frequenzversteigerung sind mit den Frequenzbereichen 790 bis 814 und 838 bis 862 MHz auch die Bereiche betroffen, die bisher von Funkmikrofonen verwendet wurden.¹⁸⁶ Es steht nun noch die Lücke von 814 bis 838 MHz zur Verfügung.¹⁸⁷ Laut der Bundesnetzagentur durfte der Bereich von 790 bis 814 und 838 bis 862 MHz bis zum 31.12.2015 für Funkmikrofone mit einer maximalen Strahlungsleistung von 50 mW ERP und einer maximalen Kanalbandbreite von 200 kHz von den Rundfunkanstalten und anderen professionellen Veranstaltern uneingeschränkt genutzt werden.¹⁸⁸ Ab dem 01.01.2016 ist die Verwendung dieses Spektrums untersagt. Durch die Einführung des neuen Mobilfunkstandards LTE im Jahr 2010 sind diese Frequenzen jedoch seit Mitte des Jahres 2012 nicht nutzbar, da der Mobilfunk die Signale der Funkmikrofone stört.¹⁸⁹ Ein ausweichbarer Frequenzbereich liegt nun bei von 823 bis 832 MHz und von 1785 bis 1805 MHz.

Diese gelten für Rundfunkproduktionen. In diesen Bereichen ist aber mit Qualitätseinschränkungen zu rechnen. Für alle anderen Produktionen ist der Bereich von 710 bis 790 MHz angedacht.¹⁹⁰ Allerdings durfte dieser Bereich nur bis zum 31.12.2016 ohne Einschränkungen verwendet werden.

Ab diesem Zeitpunkt muss darauf geachtet werden, ob es zu Störungen mit LTE kommt.¹⁹¹ Die Frequenzlage nach der Digitalen Dividende I ist in Abbildung 14 ersichtlich. Hier wird gezeigt, welcher Bereich dem Mobilfunk und den Funkmikrofonen zugeordnet ist.

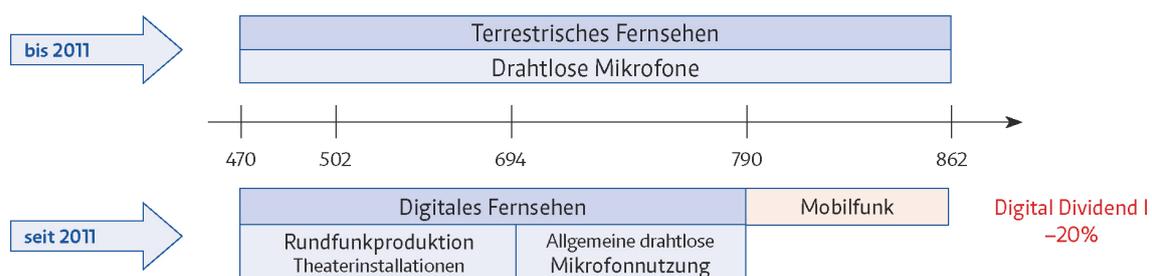


Abbildung 14: Frequenzübersicht vor und nach der Digitalen Dividende I

¹⁸⁵ Vgl. Briegleb (2010).

¹⁸⁶ Vgl. Sennheiser Vertrieb und Service GmbH & Co. KG (2012), S.4f

¹⁸⁷ Vgl. Sennheiser Vertrieb und Service GmbH & Co. KG (2012), S.6f.

¹⁸⁸ Vgl. Bundesnetzagentur (2015a), S.14.

¹⁸⁹ Vgl. Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (2013), S.32.

¹⁹⁰ Vgl. Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (2013), S.35.

¹⁹¹ Vgl. Thomann GmbH (o.J.b).

6.3. Digitale Dividende II

Die Grundlage für eine weitere Digitale Dividende ist die Umstellung von DVB-T auf DVB-T2. Durch höhere Kompression benötigt dieser Übertragungsstandard noch weniger Kapazität bei der Übertragung als sein Vorgänger. Dadurch werden weitere Frequenzen in diesem Bereich frei, welche wieder dem Ausbau der mobilen Breitbandversorgung dienen sollen. Mit mobiler Breitbandversorgung sind Dienste wie LTE gemeint. Der betroffene Frequenzbereich ist der von 694 bis 790 MHz. Der Verkauf dieses Spektrums wurde 2012 auf der WRC verabschiedet. Hier pochten arabische und afrikanische Staaten darauf, dass dieser Frequenzbereich gleichberechtigt an den Mobilfunk zugewiesen werden soll.¹⁹² Um dieser Umstellung gerecht zu werden, wurde vom 28. auf den 29. März 2017 vielerorts in Deutschland die Übertragung mit DVB-T eingestellt. Seither wird nur noch mit dem neueren Standard DVB-T2 gesendet.¹⁹³ Dieser ist im Bereich von 470 bis 690 MHz angesiedelt.¹⁹⁴ Jedoch wird dieser Frequenzbereich vorerst in vielen Gebieten weiterhin für den Betrieb für den Rundfunk verwendet, da es noch viele Regionen gibt die DVB-T nutzen und es beim Parallelbetrieb zu Störungen kommen würde. Zudem fehlen die Geräte, die das 700 MHz LTE-Band unterstützen.

Es ist davon auszugehen, dass dieses Band 2018 oder 2019 zum Einsatz für LTE kommen wird.¹⁹⁵ Die Begründung für das Interesse der Mobilfunkunternehmen für diesen Bereich von 694 bis 790 MHz liegt darin, dass die Frequenzen eine hohe Reichweite und Übertragungsgeschwindigkeit besitzen. Dieser Bereich soll bis 2020 in ganz Europa genau dafür freigegeben werden. Außerdem sind diese Frequenzen eine wichtige Voraussetzung für den neuen Mobilfunkstandard 5G.¹⁹⁶ Wie schon bei der ersten Digitalen Dividende werden die Funkmikrofone wieder aus ihrem zugewiesenen Frequenzbereich vertrieben. Aufgrund der Tatsache, dass das neue Equipment nicht für diesen Frequenzbereich ausgelegt ist, fallen durch den erneuten Frequenzumzug erhebliche Kosten an.

Daher können für die Neuanschaffung oder den Ersatz Ausgleichszahlungen beim Bund beantragt werden. Um diese Zahlungen in Anspruch nehmen zu können, muss das betroffene Equipment für mindestens 410 Euro und in dem Zeitraum vom 01.01.2012 bis zum 31.03.2015 erworben worden sein.¹⁹⁷ Im Stage Apollo Theater in Stuttgart musste neues Equipment im Wert von etwa 130.000 Euro gekauft werden, da das alte nicht in der Lage

¹⁹² Vgl. Wilmsmann (2013).

¹⁹³ Vgl. Bauer (2017a).

¹⁹⁴ Vgl. Ahlers (2015).

¹⁹⁵ Vgl. Neuhetzki (2017).

¹⁹⁶ Vgl. Briegleb (2016).

¹⁹⁷ Vgl. Verband Privater Rundfunk und Telemedien e.V. (2016).

war, in dem neu zugeteilten Frequenzbereich zu senden. Dort werden für die Mikrofone der Mini-Taschensender SK 5212-II und als Empfänger der EM 3732-II von Sennheiser verwendet. Gesendet wird im Frequenzbereich von 470 bis 638 MHz.¹⁹⁸ Für die Funkmikrofone bleibt nun noch das Spektrum von 470 bis 694 MHz.¹⁹⁹ Jedoch werden die Fernsehprogramme durch die Umstellung auf DVB-T2 auch in diesen Frequenzbereich ziehen.²⁰⁰

Hinzu kommt, dass durch die Umstellung zweitweise beide Übertragungsstandards, DVB-T und DVB-T2, ausgestrahlt und somit mehr Frequenzen belegt werden.²⁰¹ Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, wird es für Funkmikrofone nur noch einen kleinen Bereich geben, in dem sie arbeiten können. Wie es dann für die Funkmikrofone weitergeht, ist bisher nicht eindeutig geklärt. Es müssen jedoch Lösungen gefunden werden, da in diesem Bereich nicht mehr ohne weiteres gearbeitet werden kann.

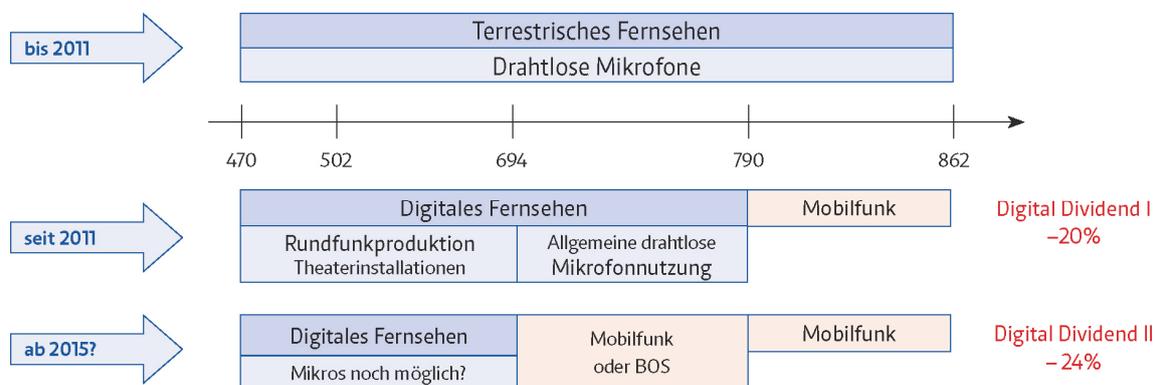


Abbildung 15: Frequenzübersicht vor und nach der Digitalen Dividende II

6.4. Aktuelle Frequenzlage für Funkmikrofone

Durch die Digitalen Dividende I & II hat sich die Frequenzlage für Funkmikrofone erheblich geändert. Viele Bereiche sind weggefallen und neue Bereiche wurden zugeteilt. Nachfolgend sind die wichtigsten Frequenzbereiche der Allgemein- und Einzelzulassung aufgelistet.

6.4.1. Frequenzen mit Allgemeinzulassung

Bei Frequenzbereichen mit einer Allgemeinzuteilung handelt es sich um Frequenzen, die in ganz Deutschland keine Gebühren kosten und keine Anmeldung benötigen.²⁰²

¹⁹⁸ Vgl. Smyrek (2017).

¹⁹⁹ Vgl. Bauer (o.J.b).

²⁰⁰ Vgl. Ahlers (2015).

²⁰¹ Vgl. Bauer (o.J.b).

²⁰² Vgl. Schwörer (2011).

- **32,475 – 34,325 & 36,610 – 38,125 MHz**

Dieser Bereich ist für private Anwender gebühren- sowie anmeldefrei nutzbar. Jedoch agieren in diesem Frequenzbereich auch andere Anwender, die die Verwendung von Funkmikrofonen stören können. Diese Frequenzen sind bis Ende 2025 nutzbar. Die Mikrofone dürfen eine Bandbreite von 50 kHz besitzen.²⁰³

- **174 – 230 MHz**

In diesem Frequenzbereich agiert auch das Digitalradio DAB+. Daher kann es zu Einschränkungen kommen. Des Weiteren genießen Funkmikrofone keine Sicherheit gegenüber Störungen, die von anderen Nutzern verursacht werden können. Diese Frequenzen sind bis Ende 2025 nutzbar.²⁰⁴

- **823 – 832 MHz**

Hierbei handelt es sich um eine LTE Mittellücke. Innerhalb dieser Lücke können mit analogen Systemen maximal 10 Kanäle verwendet werden. Digitale Systeme sind in der Lage, mehr Kanäle zu betreiben. Daher eignet sich dieses Spektrum eher für kleinere Setups. Um Störungen zu vermeiden, sollten Handys mit LTE-Empfang nicht im unmittelbaren Umfeld des Empfängers betrieben werden.²⁰⁵

- **863 – 865 MHz**

Das harmonisierte EU Band bietet aufgrund des schmalbandigen Frequenzbereiches nur Raum für wenige Kanäle. Jedoch hat dieses Band den Vorteil, dass es innerhalb der EU anmeldefrei verwendet werden kann. Somit ist es für kleinere Setups geeignet, welches man ohne Probleme in Europa verwenden kann.²⁰⁶

- **1785 – 1805 MHz**

Bei diesem Frequenzbereich handelt es sich wieder um eine LTE Mittellücke. Die hohe Frequenz macht Funkübertragungen jedoch störanfälliger.²⁰⁷

²⁰³ Vgl. Bundesnetzagentur (2015b).

²⁰⁴ Vgl. Bundesnetzagentur (2015c).

²⁰⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.4.

²⁰⁶ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.5.

²⁰⁷ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.5.

- **1880 – 1900 MHz**

Innerhalb dieses Frequenzbereiches werden Geräte mit dem DECT-Standard verwendet. Das kann beispielsweise das schnurlose Heimtelefon sein. Aus diesem Grund dürfen Funkmikrofone anmelde- und kostenfrei verwendet werden. Jedoch müssen die Funkmikrofone diesen Standard unterstützen, um diesen Bereich nutzen zu können. Geeignet ist dieser Bereich für Tagungen sowie Installationen.²⁰⁸

- **2400 – 2483,50 MHz**

In diesem Band funkt das WLAN. Daher kann es ohne Kosten und weltweit verwendet werden. Aufgrund der sehr geringen Wellenlänge ist die Reichweite jedoch stark begrenzt (bis max. 60m). Ein weiterer Nachteil ist, dass dieses Band Störquellen wie WLAN und auch Bluetooth besitzt und somit die Funksignale der Funkmikrofone beeinflussen. Daher eignet sich dieses Band nur für kleinere Setups.²⁰⁹

6.4.2. Frequenzen mit Einzelzulassung

Bei diesen Bereichen verlangt die Bundesnetzagentur einen kostenpflichtigen Antrag. Diese Bereiche ermöglichen größere Setups, und für den professionellen Gebrauch werden diese Bereiche empfohlen.²¹⁰

- **34,25 MHz – 38,05 MHz**

In diesem Frequenzbereich sind, wie auch im bereits angesprochenen Bereich, 32,475 – 34,325 & 36,610 – 38,125 MHz, Rundfunkanstalten, Museen und Theater tätig. Des Weiteren ist die Verwendung für Hobbyzwecke gestattet.²¹¹

- **470 – 608 MHz, 614 – 703 MHz und 733 – 823 MHz**

Diese Bereiche werden von den öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten sowie den privaten Rundfunkprogrammanbietern verwendet.

Genutzt werden dürfen diese Bereiche für professionelle Produktionen und Veranstaltungen wie Konzerte oder Theateraufführungen. Optional können die Bereiche von 758 – 788 MHz

²⁰⁸ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.5.

²⁰⁹ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.5.

²¹⁰ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.6.

²¹¹ Vgl. Bundesnetzagentur (o.J.b).

sowie 791 – 821 MHz verwendet werden. Jedoch überschneiden sich diese Bereiche mit dem Downlink des mobilen Netzzuganges.²¹² Daher kann es zu Betriebsstörungen kommen.

- **1350 – 1400 MHz**

Aufgrund der Tatsache, dass dieser Bereich vom Militär verwendet wird, bedarf es vor der Nutzung der Erlaubnis des Militärs. Eingesetzt dürfen Funkmikrofone nur innerhalb von geschlossenen Gebäuden und auch nur für ein feststehendes Gebiet verwendet werden. Funkmikrofone dürfen hierbei keine Störungen verursachen.²¹³

- **1452 MHz – 1518 MHz**

Bei diesem Frequenzbereich handelt es sich um einen neuen zugeteilten Bereich. Dieser Bereich darf aber ausschließlich in geschlossenen Räumlichkeiten verwendet werden. Der Teilbereich von 1452 – 1492 MHz wird auch vom Downlink des mobilen Netzzuganges LTE verwendet und kann daher nur eingeschränkt verwendet werden.²¹⁴

6.5. Resümee & Auswirkungen der Digitalen Dividenden auf Funkmikrofone

Mit den Digitalen Dividenden kam erst die Umstellung auf das digitale Fernsehen. Darauf folgte der Wechsel auf den neueren Standard DVB-T2. Aus diesem Grund wurden viele Frequenzen im UHF-Spektrum frei, da der neue Übertragungsstandard deutlich weniger Frequenzen in Anspruch nimmt.²¹⁵ Aber dieses Spektrum, welches auch von Funkmikrofonen genutzt wird, ist größtenteils an Mobilfunkunternehmen verkauft worden. Somit ist das Spektrum, welches bisher für die Funkmikrofone verwendet wurde unbrauchbar, da die Mobilfunkunternehmen den Ausbau des neuen Mobilfunkstandards LTE vorantreiben wollen.

Tatsache ist, dass die Funkmikrofone nach der ersten Digitalen Dividende gezwungen waren, in den Bereich von 470 bis 790 MHz umzuziehen.²¹⁶ Hierdurch wurde die Kapazität an nutzbaren Frequenzen deutlich knapper, als sie davor war.

Nach der Digitalen Dividende II wurde das Frequenzspektrum von 694 bis 790 MHz wieder an Mobilfunkunternehmen verkauft. Dieses Spektrum überschneidet sich allerdings mit dem Spektrum, welches den Funkmikrofonen zugewiesen wurde. Somit mussten die Funkmikro-

²¹² Vgl. Bundesnetzagentur (o.J.b).

²¹³ Vgl. Bundesnetzagentur (o.J.b).

²¹⁴ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.7.

²¹⁵ Vgl. Bauer (o.J.b).

²¹⁶ Vgl. Bauer (o.J.c).

fone wieder in einen anderen Frequenzbereich umziehen und zwar in den übrigbleibenden Bereich von 470 bis 694 MHz.²¹⁷ Derzeit kann das Spektrum von 470 bis 790 MHz noch fast vollständig benutzt werden, da der Ausbau von LTE gerade erst beginnt.²¹⁸ Dennoch ist durch diesen weiteren Umzug vieles an Equipment nicht mehr nutzbar, da dieses nicht in der Lage ist, in dem neu zugewiesenen Frequenzbereich zu senden. Daher musste dieses Equipment aussortiert werden.²¹⁹ Funkmikrofone besitzen zudem eigentlich eine Lebensdauer von 8 bis 10 Jahren.²²⁰ Ein weiteres Problem besteht hierbei auch im Frequenzbedarf für Funkmikrofone.

Dieser wird vor allem bei Großveranstaltungen wie dem Eurovision Song Contest, der Bundestagswahl oder Spitzenspielen im Sportbereich immens ausgeschöpft.²²¹ Beim Eurovision Song Contest 2011 ergaben Messungen, dass nachweislich das genutzte Spektrum mit eingelagerten Fernsehsendern mindestens 242 MHz innerhalb des UHF-Spektrums betragen. Hiervon belegten die Funkmikrofone eine Bandbreite von 72 MHz, In Ear Monitoring mehr als 72 MHz und der dafür benötigte Schutzabstand zwischen Mikrofon und In Ear Monitoring betrug 45 MHz. Der Rest wurde von DVB-T und dessen Schutzabstand zu den Mikrofonfrequenzen belegt.²²² Das ist mehr als das Spektrum, welches nach der ersten Digitalen Dividende zur Verfügung stand. Daher ist davon auszugehen, dass das zur Verfügung stehende Frequenzspektrum nach dem Vollzug der Digitalen Dividende 2 wohl für Großveranstaltungen dieser Art nicht mehr ausreichend sein wird. Das belegen auch Messungen, die während der Bremer Wahl 2015 durchgeführt wurden. Am Wahlabend wurden 332 Frequenzen für Funkstrecken in Anspruch genommen. Dabei mussten einige Kanäle mehrfach belegt werden, da es nicht genügend freie Kanäle gab.²²³

Nach dem der Wechsel auf DVB-T2 und die Parallelausstrahlung zusammen mit DVB-T abgeschlossen und ist, stehen rechnerisch noch 19 TV-Kanäle zur Verfügung, die von Funkmikrofonen verwendet werden können.

Hieraus resultiert das Szenario, dass die freien TV-Kanäle nicht mehr ausreichend sind, um 332 Funkstrecken gleichzeitig verwendet werden können.²²⁴ Daher muss es auf jeden Fall einen Ersatz für das verloren gegangene Spektrum geben. Zudem müssen neue Lösungsan-

²¹⁷ Vgl. Bauer (o.J.b).

²¹⁸ Vgl. Bauer (o.J.d)

²¹⁹ Vgl. Bauer (o.J.b).

²²⁰ Vgl. Altemark (o.J.), S.1.

²²¹ Vgl. Bauer (o.J.e).

²²² Vgl. DKE-AK 731.0.8 (2011), S.39.

²²³ Vgl. DKE-AK 731.0.8 (o.J.), S.9.

²²⁴ Vgl. DKE-AK 731.0.8 (o.J.), S.16.

sätze geschaffen werden, um diesem Problem entgegenwirken zu können. Im nachfolgenden Kapitel dieser Arbeit wird auf einige mögliche Ansätze eingegangen.

7. Lösungsansätze für die Zukunft

Aufgrund der aktuellen Frequenzlage im UHF-Spektrum wird nach neuen Lösungswegen für professionelle Funkmikrofonsysteme gesucht. Das Spektrum von 823 MHz bis 2483.5 MHz ist bereits für Mobilfunk- und Datennetzwerke lizenziert. Dies bedeutet, dass das UHF-Spektrum bereits so gut wie ausgeschöpft ist und es für die Funkmikrofonsysteme kaum noch freie Frequenzen gibt. Die ISM-Bänder sind die einzigen Lücken, die ohne Lizenz verwendet werden können. Zudem verkaufen die Regierungen immer weiter die noch verfügbaren Frequenzen. Hier sind die Mobilfunkbetreiber im Vorteil, da diese viel höhere Lizenzvergütungen anbieten, als die professionelle Audioindustrie es kann.²²⁵ Daher ist die Branche dazu gezwungen neue Wege für die Funkübertragung zu finden.

Eine Möglichkeit, um weiterhin professionelle Audiosignale übertragen zu können besteht darin, die Signale über andere Frequenzbereiche zu übertragen. Im kommenden Abschnitt wird auf mehrere Möglichkeiten eingegangen.

7.1. 1.8 GHz ISM Band

Bei diesem Band handelt es sich um eine Duplexlücke, die sich von 1785 bis 1805 MHz erstreckt, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.²²⁶ Diese Lücken gehören zu den Frequenzbereichen, die im Mobilfunk jedoch keine Anwendung finden und sich zwischen dem Uplink (Endgerät zu Station) und dem Downlink-Bereich (Station zu Endgerät) befinden.

1710				1785		1805					1880
Uplink					Duplex gap	Downlink					
75 MHz					20 MHz	75 MHz					

Abbildung 16: Frequenzaufteilung im 1.8 GHz ISM Band

Mit neueren Mobilfunkgenerationen wie 5G kann es jedoch sein, dass diese Duplexlücken in verschiedenen Frequenzbereichen komplett wegfallen und somit nicht mehr für Funkmikrofone verwendet werden können. Des Weiteren kann es beim Einsatz von Funkmikrofonen in lokaler Umgebung zum Mobilfunk zu gegenseitig störender Beeinflussung kommen.

²²⁵ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.414.

²²⁶ Vgl. Electronic Communications Committee (2013), S.7.

Aus diesem Grund müssen Funkmikrofone einen zusätzlichen Schutzabstand einhalten. Aufgrund der Tatsache, dass das LTE-Band in diesem Frequenzbereich am intensivsten genutzt wird und viele Nutzer auf die LTE-Technologie umsteigen, wird diese Lücke wohl in Zukunft nicht mehr gut nutzbar sein, weil es zu erheblichen Beeinträchtigungen durch den Mobilfunk kommen wird.²²⁷ Der Bereich von 1785 bis 1800 MHz ist allerdings nicht europaweit nutzbar und darf somit ausschließlich lokal benutzt werden.²²⁸ Zudem leidet die Signalqualität aufgrund der physikalischen Eigenschaften. Denn innerhalb dieses Frequenzbandes werden die Wellen stark von Körpern absorbiert und von metallischen Oberflächen reflektiert.²²⁹ Das Frequenzband von 1800 bis 1804.8 MHz ist in vielen Ländern auch nicht freigegeben. Dazu zählen Länder wie Belgien, Tschechien, Türkei und Russland.²³⁰

7.2. 2.4 GHz ISM Band

Das ISM Band bei 2.4 GHz kann nicht nur für WLAN oder Bluetooth, sondern auch für die Übertragung von Funkmikrofonen verwendet werden. Das Band ist 100 MHz groß. Ein großer Vorteil dieses Bandes ist, dass es in fast allen Ländern der Welt ohne Anmeldung verwendet werden kann. Jedoch besteht in der Tatsache, dass dieses Band auch von WLAN oder Bluetooth verwendet wird das größte Problem.²³¹ Ein vorhandenes WLAN Signal beeinträchtigt die Übertragung der Funkmikrofone sehr schnell. Schon drei verwendete WLAN Kanäle können das Band so stark belegen, dass maximal drei Funkmikrofone verwendet werden können.

Dies kann verbessert werden, indem Geräte die Bluetooth oder WLAN verwenden, komplett ausgeschaltet werden oder alle Geräte einen Abstand von mindestens 3 m zu dem Empfänger einhalten. Zudem kann man die Signalqualität erhöhen, indem man den Abstand zwischen Sender und dem Empfänger um minimal 3 m erhöht. Zusätzlich sollte eine Sichtverbindung zwischen Sender und dem Empfänger gegeben sein.²³² Zudem besitzen die Frequenzen in diesem hohen Frequenzbereich nicht ideale Ausbreitungseigenschaften. Denn je höher die Frequenz, desto kleiner ist die Wellenlänge und somit auch anfälliger für Absorption. Vor allem werden diese Frequenzen von Objekten, die aus Metall bestehen, aber auch von Musikinstrumenten absorbiert.²³³

²²⁷ Vgl. DKE-AK 731.0.8 (2014), S.1f.

²²⁸ Vgl. Electronic Communications Committee (2013), S.12.

²²⁹ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.22.

²³⁰ Vgl. Electronic Communications Committee (2017), S.44.

²³¹ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.414.

²³² Vgl. Schwörer (2014).

²³³ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.415.

Dadurch leidet natürlich die Reichweite des Signals. Dennoch können in diesem Bereich Reichweiten von bis zu 60 m erreicht werden. Bei einem gleichzeitigen Betrieb von mehreren Systemen verringert sich diese auf 30 m.²³⁴ Betrachtet man die Wellenlänge eines Signals, welches auf einer Frequenz von 2.4 GHz gesendet wird, resultiert daraus eine Wellenlänge von gerade mal 12,5 cm. Diese Wellenlänge ergibt sich aus der folgenden Formel 6.

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}}{2.4 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0,125 \text{ m}$$

Formel 6: Berechnung der Wellenlänge λ bei 2.4 GHz

Wenn also die Welle und die Reflexion zur selben Zeit aufeinander treffen, wird das Signal verstärkt. Kommt es jedoch zu einer Phasenverschiebung von einer halben Wellenlänge, in unserem Fall 6 cm, löscht sich das Signal gegenseitig aus.

Dies ist in Abbildung 17 veranschaulicht. Um diesem Problem entgegen zu wirken und eine gute Signalstärke zu erreichen, ist es ratsam, für den Sender und Empfänger eine statische Position zu finden.

Trotzdem wird der Benutzer des Funkmikrofons sich immer mal wieder bewegen, was bedeutet, dass das Signal niemals einen optimalen Signalstärkepegel erreichen wird.²³⁵

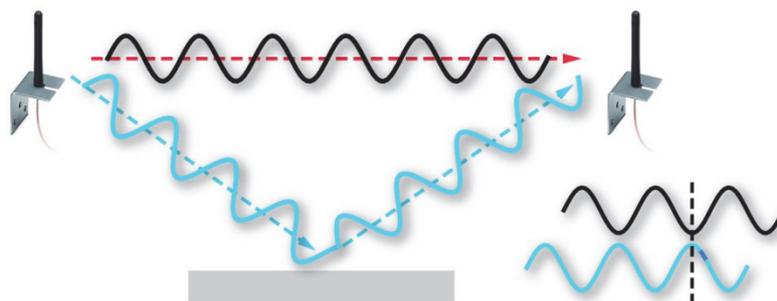


Abbildung 17: Mehrwegeausbreitung eines Signals und durch Reflexion entstehende Signalauslöschung

7.2.1. WiMi-System

Innerhalb des 2.4 GHz ISM-Bandes gibt es eine Funkmikrofonlösung von dem Hersteller Line 6. Um die oben genannten Fehlerquellen so gering wie möglich zu halten, und eine gute Verbindung zu gewährleisten, verwendet das Wi-Mi Konzept verschiedene Strategien. Darunter sind auch die Antennen- und Frequenzdiversität vertreten. Diese werden im Kapitel 3.4

²³⁴ Vgl. Schwörer (2014).

²³⁵ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.415.

und Unterkapitel 3.4.1.1. behandelt. Zusätzlich kann eine Fehlererkennung verwendet werden, indem das empfangene Signal ständig auf Fehler überprüft wird.

Für kleinere Fehler wird ein Make-Up-Gain angewendet. Dies bedeutet, dass das schwächere Signal an den Pegel des ursprünglichen Signals angeglichen wird. Falls gravierendere Fehler auftreten sollten, wird der Übertragungskanal stummgeschaltet. Nach dem die Übertragung wieder störungsfrei ist, wird die Stummschaltung aufgehoben. Um den Fehler so unhörbar wie möglich zu machen, wird ein Fade angewendet. Die letzte Möglichkeit besteht darin, verschiedene Antennentypen zu verwenden. Das hat den Vorteil, dass man keine Signale von WiFi-Sendern empfängt. Mit diesen Strategien wird Platz für mehrere Kanäle dieses System geschaffen. Was jedoch beachtet werden muss ist, dass dieses System nur uneingeschränkt in einer WiFi freien Umgebung verwendet werden kann.

An Orten wie Konzerthallen etc., bei denen mehrere WiFi-Netzwerke in nächster Umgebung liegen, sind die Kanäle für dieses System stark limitiert.²³⁶ Daher sollte in dem Bereich, in welchem dieses System angewendet werden soll, Access Points oder Hotspots für Mobilfunk deaktiviert werden. Des Weiteren sollte das WiFi-Signal auf die Kanäle 1,6 und 11 beschränkt werden.²³⁷

7.3. Shure Axient Digital

Aufgrund der Vorteile, die mit der digitalen Übertragungstechnik möglich geworden sind, steigen immer mehr Funkmikrofonhersteller auf diesen Zug auf. Shure hat auf der NAB 2017 ihre neueste Funkmikrofonlösung im digitalen Bereich vorgestellt. Diese trägt den Namen Axient Digital. Das Produkt soll eine Antwort auf das immer kleiner werdende Spektrum werden. Dank der digitalen Technik ist es möglich, einen größeren Frequenzbereich als bei analogen Systemen zu übertragen (siehe Unterkapitel 3.5.5.). Auch die Latenz ist mit diesem System kein Problem mehr. Diese liegt gerade mal bei 2 ms.

Des Weiteren wird mit Quadversity Dropouts sowie Interferenzen vorgebeugt.²³⁸ Zudem besitzt dieses System den High Density Mode, mit dem noch mehr Kanäle gleichzeitig genutzt werden können. Realisiert wird dieses Verfahren, in dem für die einzelnen Kanäle ein geringerer Modulationshub verwendet wird. Somit müssen die Filter steiler arbeiten und das Spektrum kann dichter verwendet werden. Infolge verkürzt sich dabei die Reichweite auf ungefähr 30 m und die Latenz erhöht sich leicht.

²³⁶ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.415.

²³⁷ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.421.

²³⁸ Vgl. Shure Europe GmbH (2017).

Aber die Audioqualität bleibt uneingeschränkt vorhanden.²³⁹ Zudem kann dieses System mit der hauseigenen Software Wireless Workbench betrieben werden.²⁴⁰

Diese ermöglicht es dem Nutzer, Frequenzen berechnen zu lassen und Informationen zu einzelnen Kanälen zu überwachen. Hierbei können unter anderem Audiopegel, Signalstärke und Interferenzen dargestellt werden.²⁴¹ Eine Überwachung ist auch von iOS Endgeräten mit der ShurePlus Channels App durchführbar.²⁴²

7.4. PMSE xG

Derzeit befindet sich der neue Mobilfunkstandard 5G noch in der Entwicklung. Dieser Standard soll eine 100-mal höhere Datenübertragungsrate als sein Vorgänger 4G ermöglichen. Mit dem Forschungsprojekt PMSE xG untersucht man aktuell, ob der neue Mobilfunkstandard auch für die Audio- und Videoproduktionstechnik geeignet ist.

Vertreten sind in diesem Projekt viele namenhafte Hersteller der Branche wie ARRI. Initiator dieses Projekts ist Sennheiser. Aber auch große andere Unternehmen wie Bosch und Intel arbeiten an diesem Projekt mit. Gefördert wird das Forschungsprojekt von Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur. Ein grundsätzliches Ziel ist es, Lösungen für die immer geringer werdende Verfügbarkeit des Spektrums für drahtlose Anwendungen wie Funkmikrofone zu finden. Jedoch wird sich der neue Mobilfunkstandard nur teilweise dafür eignen.²⁴³ Mit dem 5G Mobilfunkstandard und dem daraus resultierenden zukünftigen zellularem Netzwerk sieht dieses Forschungsprojekt eine Möglichkeit diese auch für Funkmikrofone und andere drahtlose Produktionsmittel verwenden zu können. Jedoch hat die PMSE-Industrie deutlich höhere Anforderungen an ihr Equipment, als der neue Mobilfunkstandard es hat. Ein äußerst wichtiger Faktor ist die Latenz.

Um die Audio- und Videoproduktionstechniken erfolgreich in das Umfeld von 5G integrieren zu können, müssen Eigenschaften wie Zuverlässigkeit bei der Datenübertragung und eine geringe Latenz beachtet werden.²⁴⁴ Infolge der immer größeren und komplexeren Projekte benötigt man für PMSE-Equipment in naher Zukunft mehr freie Frequenzen als aktuell zu Verfügung stehen. Daher könnte man durch die einhergehenden Technologien und den 5G Standard neue Optionen schaffen, in dem man versucht die benötigten Eigenschaften für

²³⁹ Vgl. Wehowski (2014), S.26.

²⁴⁰ Vgl. Shure Europe GmbH (2017).

²⁴¹ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.c).

²⁴² Vgl. Shure Distribution GmbH (2017), S.9.

²⁴³ Vgl. Bauer (2017b).

²⁴⁴ Vgl. PMSE-xG (2017), S.1.

PMSE in den 5G Standard einzubetten.²⁴⁵ Für die IMT 2020 wurde festgelegt, dass die Latenz für Audio-PMSE maximal 1 ms betragen darf.²⁴⁶ Für Projekte in denen Audio- und Video-PMSE verwendet werden muss es in Zukunft eine sehr genaue Synchronisation geben, damit es zu keinem Offset kommt. Audio- und Video-PMSE könnten Vorteile aus der Entwicklung des PTP und dem TSN ziehen.²⁴⁷ Das PTP ist dafür gedacht, dass man Geräte innerhalb eines Netzwerkes synchronisieren kann. Die Genauigkeit liegt bei unter einer Mikrosekunde.

Das wird realisiert, indem man mit dem PTP und einem Haupttaktgeber die lokalen Takte synchronisiert. Damit ist gewährleistet, dass alle Geräte dieselbe Zeitbasis besitzen.²⁴⁸ TSN befindet sich aktuell noch in der Entwicklung vom IEEE. Es handelt sich hier um eine Weiterentwicklung des Ethernets. Mit TSN würde Ethernet weitere nützliche Funktionen erhalten. Darunter zum Beispiel berechenbare Ende-zu-Ende Latenzen, stark begrenzte Latenzschwankungen (Jitter) sowie einen extrem geringen Paketverlust.²⁴⁹ Diese Eigenschaften sind sehr wichtig bei der Audio- und Videoübertragung, da Latenzen und sonstige Fehler den Zuschauern schnell auffallen würden. Abbildung 18 zeigt auf, dass Audio-PMSE im Vergleich zu Video-PMSE eine nicht so hohe Datenrate benötigen. Allerdings benötigen Audio-PMSE viele einzelne Netzwerke, denn für jedes Mikrofon und jeden In-Ear-Monitor wird eine eigene Funkstrecke benötigt. Zusätzlich benötigt Audio eine viel geringere Latenz als Video, damit diese Verzögerung vom Zuschauer nicht wahrgenommen wird.²⁵⁰



Abbildung 18: Benötigte Eigenschaften von Audio- und Video-PMSE in 5G Netzwerken im Vergleich

²⁴⁵ Vgl. PMSE-xG (2017), S.1f.

²⁴⁶ Vgl. PMSE-xG (2017), S.5.

²⁴⁷ Vgl. PMSE-xG (2017), S.4.

²⁴⁸ Vgl. McCarthy (o.J.), S.1.

²⁴⁹ Vgl. Belden Inc. (2016), S.1.

²⁵⁰ Vgl. PMSE-xG (2017), S.6.

Damit dieses Konzept funktioniert, ist eine Kooperation von Netzbetreibern und den entsprechenden Lizenzinhabern nötig, um PMSE-Equipment weltweit einheitlich einsetzen zu können. Derzeit gibt es zwei Geschäftsmodelle die in Betracht gezogen werden können. Ein Modell besteht darin, ein lokales drahtloses Netzwerk ausschließlich für PMSE zu nutzen.

Jedoch muss hierfür die Infrastruktur vom PMSE-Nutzer eingerichtet und überwacht werden.²⁵¹ Die andere Lösung wäre, das PMSE-Equipment in einem öffentlichen Netzwerk über einen PMSE-Service zu betreiben.

Es muss jedoch eine Absicherung seitens des Netzbetreibers vorliegen, dass das Netzwerk und der PMSE-Service ohne Störungen betrieben werden kann.

Damit dennoch die Implementierung von PMSE-Equipment in den 5G Standard funktioniert sind drei Voraussetzungen notwendig.

Erstens müssen die technischen Voraussetzungen, die für PMSE benötigt werden, gesichert sein. Diese sind bisher nicht im neuen 5G Standard und in der IMT 2020 vorhanden. Des Weiteren müssen zusätzlich zu den technischen Voraussetzungen auch die notwendigen Änderungen, welche dann im Standard festgehalten sind, auch in den kommerziellen Chipsätzen für den 5G Standard vorhanden sein. Das muss implementiert sein, da die PMSE Industrie im Vergleich zur Mobilfunkindustrie einen geringeren Absatz der Chipsätze hat. Daher ist die PMSE-Industrie auf die Unterstützung der Mobilfunkindustrie angewiesen.

Die letzte Voraussetzung ist die Integration einer Anwendung in das 5G Netzwerk, mit der sich das PMSE-Equipment steuern lässt. Diese lässt sich jedoch nur realisieren, wenn neue Geschäftsmodelle von Netzbetreibern im engen Verbund mit der PMSE-Industrie entstehen.²⁵²

7.5. Nutzung des VHF-Spektrums

Ein weiterer Ansatz für die Zukunft ist es, dass VHF-Spektrum wieder zu verwenden. Dieses bietet den Vorteil, dass es bis Ende 2025 anmelde- und gebührenfrei genutzt werden kann. Was zusätzlich für diesen Frequenzbereich spricht ist, dass viele Störquellen im Bereich von 174 bis 230 MHz nicht mehr vorhanden sind und dieser Bereich somit nahezu störungsfrei genutzt werden kann. Das bietet eine große Übertragungssicherheit, da hier genug Raum für größere Schutzabstände vorhanden ist. Durch den technischen Fortschritt ist es möglich, dass VHF-Spektrum viel effektiver zu nutzen. Hierzu zählt zum Beispiel die Weiterentwicklung

²⁵¹ Vgl. PMSE-xG (2017), S.6f.

²⁵² Vgl. PMSE-xG (2017), S.7.

der verwendeten Filter. Diese ermöglichen es, dass deutlich mehr Funkstrecken untergebracht werden können.²⁵³

7.6. Schlussfolgerung der Lösungsansätze

Ab dem Zeitpunkt, an dem ausschließlich der Standard DVB-T2 verwendet wird und der Ausbau von LTE abgeschlossen ist, wird es ein großes Problem für die Nutzung der Funkmikrofone geben. Dann fällt nämlich ein weiterer wichtiger Teil des nutzbaren Spektrums weg. Somit muss überlegt werden, in welchem Frequenzspektrum man mit seinen Funkmikrofonen sendet. Das hierfür am besten geeignete Spektrum, der bereits angesprochene Bereich unterhalb 1 GHz, ist jedoch bereits durch LTE belegt.²⁵⁴ Hier bleiben nur die Bereiche von 823 – 832 und 863 – 865 MHz.²⁵⁵ Daher müssen Funkssysteme mit dem zur Verfügung stehenden Spektrum effizienter arbeiten.²⁵⁶ Zusätzlich kann gegebenenfalls auf andere Bereiche wie das 1.8 oder 2.4 GHz Band ausgewichen werden. Jedoch eignen sich diese Bereiche nur bedingt für die Übertragung von Funkmikrofonen. Das liegt daran, dass die Wellenlänge bei diesen hohen Frequenzen sehr kurz ist. Daraus resultiert, dass diese leicht absorbiert und gedämpft werden können. Zudem würden Menschenmengen bei Konzerten einen zu großen Absorptions- und Dämpfungsfaktor besitzen.²⁵⁷

Diese Eigenschaften führen zu einem schlechteren Empfangssignal. Aus diesem Grund sind diese Bereiche mit sehr hohen Frequenzen nicht für professionelle Veranstaltungen geeignet. Dies trifft vor allem bei der Verwendung von Taschensendern zu. Hier können aufgrund der zu hohen Körperabschattung keine hohen Reichweiten und die benötigte Betriebssicherheit gewährleistet werden.²⁵⁸ Im Gegensatz zum 1.8 GHz kann das 2.4 GHz Band in fast allen Ländern der Welt eingesetzt werden.²⁵⁹ Auch die Politik ist bei diesem Thema gefragt. Diese sollte für die Zwecke aus kultureller Sicht ausreichend Spektrum zur Verfügung stellen. Einen Schritt in die richtige Richtung hat das Europäische Parlament im Mai 2017 mit dem Beschluss 2017/899 getan. Dieser besagt, dass die europäischen Mitgliedsstaaten bis mindestens 2030 das Frequenzspektrum von 470 bis 694 MHz für den terrestrischen Rundfunk aber

²⁵³ Vgl. Shure Europe GmbH (o.J.d).

²⁵⁴ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.22.

²⁵⁵ Vgl. Shure Distribution GmbH (2016), S.4f.

²⁵⁶ Vgl. Altemark (o.J.), S.1.

²⁵⁷ Vgl. Electronic Communications Committee (2014), S.22.

²⁵⁸ Vgl. Altemark (o.J.), S.1.

²⁵⁹ Vgl. Juwan und Bakker (2017), S.414.

auch für Audio-PMSE zur Verfügung stellen müssen. Der Zeitplan hierfür soll von jedem Mitgliedsstaat bis zum 30. Juni 2018 beschlossen und veröffentlicht werden.²⁶⁰

8. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, das grundlegende Funktionsprinzip des Funkmikrofons, sowie die Funktionsweise einer Funkübertragung mittels der Modulationsverfahren darzustellen. Nach den Grundlagen, in denen die Funktionsweise der Funkübertragung dargestellt wurde, folgte die Darstellung analoger und digitaler Funksysteme welche abschließend gegenüber gestellt wurden. Darauffolgend wurden die Grenzen der Funkübertragung erläutert und thematisiert. Anschließend wurde auf die Digitalisierung des Rundfunks sowie die daraus resultierende Digitale Dividende und die aktuelle Frequenzlage für Funkmikrofone eingegangen. Im abschließenden Kapitel wurden einige neue Lösungsansätze aufgrund der Frequenzknappheit diskutiert.

Vor allem sind die Menschen betroffen, die sich nach der ersten Digitalen Dividende neues Equipment zugelegt haben. Diese haben aufgrund der zweiten Digitalen Dividende wiederholt hohe Aufwendungskosten zu tragen. Aufgrund der Umstellung auf DVB-T2, die gerade begonnen hat und der Folgen der Digitalen Dividende I und II, die in Kapitel 6.5. und 7.6. bereits angesprochen wurden, wird es in diesem Bereich, der nun auch von Funkmikrofonen genutzt werden muss, eine durchaus dichte Frequenzbelegung geben. Wegen des angrenzenden Mobilfunks ist noch nicht geklärt, ob das Spektrum komplett genutzt werden kann. Der Mobilfunk kann nämlich die benachbarten Frequenzen stören.

Daher wird es immer aufwendiger, größere Veranstaltungen zu planen und zu koordinieren. Zudem bleibt die Frage offen, ob dieses Spektrum weiterhin ausreicht, um größere Veranstaltungen durchführen zu können. Deshalb ist die Bereitstellung eines Ersatzspektrums für Funkmikrofone äußerst wichtig, da durch die letzte Digitale Dividende ein großes Stück des Frequenzspektrums weggebrochen ist. Die Zukunft der Funkmikrofone liegt wohl darin, dass man auf digitaler Ebene die Daten übermittelt. Denn mit dieser Technologie lässt sich eine bessere Audioqualität übertragen, die auch verschlüsselt werden kann. Sie hat auch weitere Vorteile, was Reichweite und den übertragbaren Frequenzbereich angeht (siehe Kapitel 3.3.). Des Weiteren wird derzeit an einer Kooperation mit vielen namenhaften Firmen zur Implementierung der Funkmikrofone in den 5G-Standard gearbeitet. Falls diese erfolgreich sein sollte, ist ein großer Schritt in die richtige Richtung getan.

²⁶⁰ Vgl. Amtsblatt der Europäischen Union (2017), S.5.

Es bleibt die Frage offen, ob die Funkmikrofontechnik auch in Zukunft bezahlbar bleibt oder sich diese zu einem Luxusgut etabliert. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass durch Funkmikrofone die Kultur gefördert wird.

Alleine durch diese lassen sich Konzerte oder Festivals realisieren. Daher arbeiten die Funkmikrofonhersteller mit Hochdruck daran, Lösungen zu finden. Hier muss die Industrie zusammen mit der Politik gemeinsame Lösungen erarbeiten.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: *Nutzsignal, Trägersignal und AM modulierte Signal*. Koch, A. (o.J.). *Elektronik Grundlagen: Grundlagen der Halbleiterbauelemente*. (S.28). ELT202. AKAD. Die Privat-Hochschulen GmbH.*

Abbildung 2: *Nutzsignal, Trägersignal und FM modulierte Signal*. Koch, A. (o.J.). *Elektronik Grundlagen: Grundlagen der Halbleiterbauelemente*. (S.30). ELT202. AKAD. Die Privat-Hochschulen GmbH.*

Abbildung 3: *Erzeugung eines zeitdiskreten Signals mittels der Abtastfunktion*. Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. (S.664). (8 Aufl., Bd. I). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Abbildung 4: *Funktionsweise des Antennen-Switching Diversity Verfahrens*. Abgerufen am 01.06.2017. Eigene Darstellung nach http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-diversity

Abbildung 5: *Funktionsweise des Audio-Switching (True Diversity) Verfahrens*. Abgerufen am 01.06.2017. Eigene Darstellung nach http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-diversity

Abbildung 6: *Summen- und Differenzsignal bei Intermodulationen zweiter Ordnung*. Ordnung. Abgerufen am 01.06.2017. Eigene Darstellung nach http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-intermodulation

Abbildung 7: *Summen- und Differenzsignal bei Intermodulationen dritter Ordnung*. Abgerufen am 01.06.2017. Eigene Darstellung nach http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-intermodulation

Abbildung 8: *Funktionsweise eines Companders*. Abgerufen am 02.06.2017 unter <http://blog.shure.com/wp-content/uploads/2015/01/DigitalWirelessSystems-CompanderFixed-A.png>

* Diese Datei ist auf dem CD-Datenträger, auf dem sich die elektronische Fassung dieser Arbeit befindet, zu finden.

Abbildung 9: *Pre- & Deemphasis im Sender & Empfänger*. Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). Handbuch der Tonstudioteknik. (S.191). (8 Aufl., Bd. I). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Abbildung 10: *Unverzerrte Sinusschwingung*. Eigene Darstellung

Abbildung 11: *Verzerrte Sinusschwingung*. Eigene Darstellung.

Abbildung 12: *Frequenznutzung eines analogen TV-Senders*. Abgerufen am 02.06.2017 unter <http://de-de.sennheiser.com/service-support-dvb-t-und-drahtlose-mikrofone-wechselwirkungen>

Abbildung 13: *Frequenznutzung eines digitalen TV-Senders*. Abgerufen am 02.06.2017 unter <http://de-de.sennheiser.com/service-support-dvb-t-und-drahtlose-mikrofone-wechselwirkungen>

Abbildung 14: *Frequenzübersicht vor und nach der Digitalen Dividende I*. Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (Hrsg.) (Januar 2013). *Update: Digitale Dividende*. (S.33). *vdt Magazin*, 1/2013. Abgerufen am 26.05.2017 unter https://www.tonmeister.de/index.php?p=magazin/20131*

Abbildung 15: *Frequenzübersicht vor und nach der Digitalen Dividende I und II*. Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (Hrsg.) (Januar 2013). *Update: Digitale Dividende*. (S.33). *vdt Magazin*, 1/2013. Abgerufen am 26.05.2017 unter https://www.tonmeister.de/index.php?p=magazin/20131*

Abbildung 16: *Frequenzaufteilung im 1.8 GHz ISM Band*. Electronic Communications Committee. (2013). *CEPT Report 50*. (S.21.). Abgerufen am 02.06.2017 unter <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/CEPTRep050.pdf>

Abbildung 17: *Mehrwegeausbreitung eines Signals und durch Reflexion entstehende Signalauslöschung*. Abgerufen am 02.06.2017 unter <https://images.vogel.de/vogelonline/bdb/299200/299242/sourceimage.jpg>

Abbildung 18: *Benötigte Eigenschaften von Audio- und Video-PMSE in 5G Netzwerken im Vergleich*. PMSE-xG. (2017). *White Paper PMSE and 5G*. (S.6). Abgerufen am 12.06.2017 unter http://www.pmse-xg.research-project.de/Ressources/White%20Paper/PMSE-xG_White_Paper_v1p01.pdf

* Diese Datei ist auf dem CD-Datenträger, auf dem sich die elektronische Fassung dieser Arbeit befindet, zu finden.

10. Formelverzeichnis

Formel 1: *Berechnung der Lichtgeschwindigkeit c* . Kark, W. K. (2017). *Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. (S.1.). (6 Aufl.) Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Formel 2: *Berechnung der Wellenlänge λ* . Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. (S.10). (8 Aufl., Bd. II). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Formel 3: *Berechnung der Intermodulationen zweiter Ordnung*. Shure Europe GmbH.(o.J.a). *Tipps & Tricks im Umgang mit mehrkanaligen drahtlosen Mikrofonanlagen*. (S.6.). Abgerufen am 06.05.2017 unter https://www.osz-teltow.de/fachliches/medienberufe/dokumente/tipps_und_tricks_drahtlos.pptx

Formel 4: *Berechnung der Intermodulationen dritter Ordnung*. Shure Europe GmbH.(o.J.a). *Tipps & Tricks im Umgang mit mehrkanaligen drahtlosen Mikrofonanlagen*. (S.7,10). Abgerufen am 06.05.2017 unter https://www.osz-teltow.de/fachliches/medienberufe/dokumente/tipps_und_tricks_drahtlos.pptx

Formel 5: *Berechnung der Dynamik einer CD*. Eigene Herleitung mit Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. (S.861). (8 Aufl., Bd. I). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH und Werner, M. (2006). *Nachrichten-Übertragungstechnik: Analoge und digitale Verfahren mit modernen Anwendungen*. (S.39). (1 Aufl.). Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH.

Formel 6: *Berechnung der Wellenlänge λ bei 2.4 GHz*. Dickreiter, Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. (S.10). (8 Aufl., Bd. I). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigene Darstellung. *Aufteilung des Spektrums in Frequenzbänder*. Withers, D. (1999). *Radio Spectrum Management: Management of the spectrum and regulation of radio services*. (S.25). (2nd Edition). London: The Institution of Electrical Engineers.

Tabelle 2: Eigene Darstellung. *Spektrumseffizienz bei analogen und digitalen Systemen*. Abgerufen am 22.07.2017 unter <https://www.shure.de/axientdigital/ad-serie>

Tabelle 3: Eigene Darstellung. *Anzahl an Intermodulationsprodukten dritter Ordnung*. (S.15). Abgerufen am 06.05.2017 unter https://www.osz-teltow.de/fachliches/medienberufe/dokumente/tipps_und_tricks_drahtlos.pptx

12. Anhang

Erlaubnis zum Zitieren der Quellen von Moltrecht. E. K.W

Moltrecht. E. K.W. (o.J.a). *Kapitel 11: Antennentechnik*. Abgerufen am 18.06.2017 unter <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e11/>

Moltrecht. E. K.W. (o.J.b). *Kapitel 8: Elektromagnetisches Feld*. Abgerufen am 18.06.2017 unter

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e08/>

Moltrecht. E. K.W. (o.J.c). *Kapitel 15: Sender- und Empfängertechnik*. Abgerufen am 18.06.2017 unter

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e15/>

Betreff: Re: Zitieren des DARC Online Lehrgang Technik
Von: "Eckart Moltrecht (DJ4UF)" <eckart.moltrecht@gmail.com>
Datum: 29.06.2017 17:08
An: Maurice Sebastian Schill <ms377@hdm-stuttgart.de>

Hallo Maurice,
ja, Sie dürfen gern meinen Online-Lehrgang zitieren.
Viel Erfolg und viele Grüße
Eckart Moltrecht

Am 29. Juni 2017 um 11:22 schrieb Maurice Sebastian Schill <ms377@hdm-stuttgart.de>:

Guten Tag sehr geehrter Herr Moltrecht,

ich schreibe derzeit meine Bachelorarbeit zum Thema der Funkmikrofone.
Hierbei gehe ich auf die Funktionsweise der Antennentechnik bzw. Wellenausbreitung ein.
Ihr Lehrgang auf der DARC-Webseite ist hierfür sehr hilfreich und informativ.

Daher würde ich gerne in Erfahrung bringen, ob Sie mir erlauben diesen Lehrgang zu zitieren.

Auf Ihre Antwort freue ich mich.

Vielen Dank und freundliche Grüße
Maurice Schill

--

Meine Adressen:

a) In Deutschland

Eckart Moltrecht, Wohlfarth 24, 53804 Much,
Tel. Festnetz: 02245 3271 - Mobil: 015788542998

b) im Winterhalbjahr (Okt.-April) in Spanien:

Dalias 130, 03726 Benitabell, Spanien,
Festnetz: 0034 96 619 6775, Mobil: 0034 634 303 340

Meine [private Homepage](#)

Mein [Amateurfunklehrgang im Internet](#)

Unsere [Homepage vom Wohngebiet in Spanien](#)

Nachweis der Quelle von Dr. Volker Smyrek zur Fußnote 195

Betreff: Re: Kontakt Prof. Oliver Curdt
Von: Volker Smyrek <volker.smyrek@gmx.net>
Datum: 18.06.2017 12:29
An: Maurice Sebastian Schill <ms377@hdm-stuttgart.de>

Sehr geehrter Herr Schill,

Nun ja, es ist ganz einfach: Vor der digitalen Dividende genutzte Frequenzen können nun eben nicht mehr verwendet werden. Die Folgen in der Praxis sind, dass neue Sender und Empfänger gekauft werden müssen.

Zur Zeit benutzen wir im Apollo Theater 56 Stück Sennheiser SK 5112-II (je 2300 Euro) mit 28 Stück Sennheiser EM 3732-II (je 4200 Euro). Macht zusammen rund 130 000 Euro an Neuinvestition.

Wir senden nun überwiegend im Sennheiser L Band von 470 bis 638 MHz. Oberhalb von 700 MHz haben wir alles "geräumt", da wir hier durch andere Nutzer Störungen erwarten.

Mit freundlichen Grüßen,
Dr. Volker Smyrek

Adlerstr. 13
70199 Stuttgart
volker.smyrek@gmx.net

Maurice Sebastian Schill schrieb:

Guten Tag sehr geehrter Herr Smyrek,

ich habe Ihren Kontakt durch meinen Professor, Oliver Curdt, erhalten.

Ich schreibe gerade meine Bachelorarbeit, die sich mit dem Thema "Funkmikrofonie und dessen Zukunft" auseinandersetzt.

Ein Teil meiner Arbeit beschäftigt sich mit Lösungsansätzen aufgrund der Digitalen Dividenden. Da jedoch Theorie und Praxis immer zwei verschiedene paar Schuhe sind, würde mich interessieren welche Auswirkungen die Digitale Dividende auf die Praxis hat und wie diese in der Praxis behoben werden.

Es würde mich freuen wenn Sie mir weiterhelfen können.

Freundliche Grüße
Maurice Schill

13. Literaturverzeichnis

Beutler, R. (2012). *The Digital Dividend of Terrestrial Broadcasting*. New York: Springer Science+Business Media LLC.

Bremm, P. (2004). *Das digitale Tonstudio*. Bergkirchen: PPVMEDIEN GmbH.

Dickreiter, M., V. Dittel, W. Hoeg, und M. Wöhr (2014). *Handbuch der Tonstudioteknik*. (8 Aufl., Bd. I). Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Freyer, U. (2009). *Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Systeme der Telekommunikationstechnik*. (6 Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.

Görne, T. (2015). *Tontechnik*. (4. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.

Kark, W. K. (2017). *Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. (6 Aufl.) Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Keller, A. (2011). *Breitbandkabel und Zugangsnetze: Technische Grundlagen und Standards*. (2 Aufl.). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Koch, A. (o.J.). *Elektronik Grundlagen: Grundlagen der Halbleiterbauelemente | ELT202*. AKAD. Die Privat-Hochschulen GmbH.*

Kühn, M. (Hrsg.) (2008.). *Der digitale terrestrische Rundfunk*. Heidelberg, München, Landsberg, Berlin: Hüthig, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH.

Meinel, C. und H. Sack (2009). *Digitale Kommunikation. Vernetzen, Multimedia, Sicherheit*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Meyer, M. (2014). *Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung*. (5 Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.

Niehoff, W. (2008). *Drahtlose Audioübertragung*. In S. Weinzierl (Ed.), *Handbuch der Audio-technik*. (S.1035-1071). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Nuszkowski, H. (2010). *Digitale Signalübertragung im Mobilfunk*. (1 Aufl.). Dresden: Jörg Vogt Verlag.

* Diese Datei ist auf dem CD-Datenträger, auf dem sich die elektronische Fassung dieser Arbeit befindet, zu finden.

Pehl, E. (1998). *Digitale und analoge Nachrichtenübertragung: Signale, Codierung, Modulation, Anwendungen*. Heidelberg: Hüthig GmbH.

Picot, A. und H. Tillmann (Hrsg.) (2009.). *Digitale Dividende*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Raffaseder, H. (2002). *Audiodesign*. München/Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Riegler, T. (2009). *Die neue digitale Rundfunk- und Fernsehwelt: Digitale Übertragungstechniken im Vergleich*. (1 Aufl.). Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk.

Rindfleisch, H. (1985). *Technik im Rundfunk: Ein Stück deutscher Rundfunkgeschichte von den Anfängen bis zum Beginn der achtziger Jahre*. Norderstedt: Mensing GmbH + Co. KG, Verlag.

Schneider, M. (2008). *Mikrofone*. In S. Weinzierl (Ed.), *Handbuch der Audiotechnik*. (S.313-429). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Stadler, E. (2000). *Modulationsverfahren: analog und digital*. (8 Aufl.). Würzburg: Vogel Fachbuch Kamprath-Reihe.

Werner, M. (2006). *Nachrichten-Übertragungstechnik: Analoge und digitale Verfahren mit modernen Anwendungen*. (1 Aufl.). Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH.

13.1. Internetquellen

Ahlers, E. (11. Februar 2015). *Frequenzneuordnung: Bundeskabinett beerdigt DVB-T*. Abgerufen am 11.06.2017 unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Frequenzneuordnung-Bundeskabinett-beerdigt-DVB-T-2546116.html>

Bauer, H., G. (29. März 2017a). *DVB-T2 stört öffentliche Veranstaltungen in Hamburg*. Abgerufen am 11.06.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/dvb-t2-stoert-oeffentliche-veranstaltungen-in-hamburg/>

Bauer, H., G. (20. März 2017b). *Senden drahtlose Produktionsmittel künftig im 5G-Mobilfunknetz?*. Abgerufen am 11.06.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/pmse-xg/>

Bauer, H. G. (o.J.a). *Wo sendeten Funkmikrofone bisher?*. Abgerufen am 19.07.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/hintergruende/fragen-und-antworten/#us3-2>

Bauer, H. G. (o.J.b). *Was versteht man unter der „Digitalen Dividende 2“?*. Abgerufen am 26.05.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/hintergruende/fragen-und-antworten/#us3-4>

Bauer, H. G. (o.J.c). *Was versteht man unter der „Digitalen Dividende“?*. Abgerufen am 09.06.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/hintergruende/fragen-und-antworten/#us3-3>

Bauer, H. G. (o.J.d.). *Warum braucht PMSE ausgerechnet das UHF-TV-Band?*. Abgerufen am 14.07.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/hintergruende/fragen-und-antworten/#us4-3>

Bauer, H. G. (o.J.e). *Wie viel Spektrum braucht PMSE?*. Abgerufen am 09.06.2017 unter <https://www.sos-save-our-spectrum.org/hintergruende/fragen-und-antworten/#us4-5>

Briegleb, V. (20.Mai 2010). *Frequenzauktion bringt 4,4 Milliarden Euro*. Abgerufen am 22.05.2017 unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Frequenzauktion-bringt-4-4-Milliarden-Euro-1004771.html>

Briegleb, V. (27. Mai 2016). *700-MHz-Band: EU-Rat stellt die Weichen für 5G*. Abgerufen am 11.06.2017 unter

<https://www.heise.de/newsticker/meldung/700-MHz-Band-EU-Rat-stellt-die-Weichen-fuer-5G-3221224.html>

Bundesnetzagentur (o.J.b). *PMSE: Funkmikrofone (Drahtlose Mikrofone)*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Firmennetze/PMSE/PMSE-node.html

DATAKOM Buchverlag (o.J.). *Superheterodyne-Prinzip*. Abgerufen am 18.06.2017 unter

<http://www.itwissen.info/Superheterodyne-Prinzip-superheterodyne-receiver.html>

Encyclopedia Britannica (o.J.a). *VHF*. Abgerufen am 22.06.2017 unter

<https://www.britannica.com/technology/VHF>

Encyclopedia Britannica (o.J.b). *UHF*. Abgerufen am 22.06.2017 unter

<https://www.britannica.com/technology/UHF>

Moltrecht. E. K.W. (o.J.a). *Kapitel 11: Antennentechnik*. Abgerufen am 18.06.2017 unter

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e11/>

Moltrecht. E. K.W. (o.J.b). *Kapitel 8: Elektromagnetisches Feld*. Abgerufen am 18.06.2017 unter

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e08/>

Moltrecht. E. K.W. (o.J.c). *Kapitel 15: Sender- und Empfängertechnik*. Abgerufen am

18.06.2017 unter

<https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e15/>

Neuhetzki, T. (29. März 2017). *700 MHz: Das passiert jetzt mit den freien DVB-T-*

Frequenzen. Abgerufen am 11.06.2017 unter

<https://www.teltarif.de/freie-frequenzen-dvbt-plaene-700-mhz-telekom/news/68024.html>

Schwörer, J. (10. Juli 2013). *Funktechnik: digital vs. analog*. Abgerufen am 12.05.2017 unter

<https://shuredeutschland.wordpress.com/2013/07/10/funktechnik-digital-vs-analog/>

Schwörer, J. (22. August 2014). *Die Fakten über digitale Funkssysteme*. Abgerufen am

12.05.2017 unter

<https://shuredeutschland.wordpress.com/2014/08/22/die-fakten-uber-digitale-funksysteme/>

Schwörer, J. (28. Februar 2011). *Eine gute Sache: BNetzA vergibt neue Frequenzen für Funkmikrofone*. Abgerufen am 21.07.2017 unter <https://shuredeutschland.wordpress.com/2011/02/28/bnetza-vergibt-neue-frequenzen-fur-funkmikrofone/>

Sengpiel, E. (o.J.). *Tabelle der Schalldruckpegel*. Abgerufen am 10.07.2017 unter <http://www.sengpielaudio.com/TabelleDerSchallpegel.htm>

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG (o.J.b). *DVB-T und drahtlose Mikrofone*. Abgerufen am 12.05.2017 unter <http://de-de.sennheiser.com/service-support-dvb-t-und-drahtlose-mikrofone-wechselwirkungen>

Shure Audio Institute (o.J.a). *Hochfrequenz: 1.1. Elektromagnetische Wellen*. Abgerufen am 10.07.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/grundlagen-der-hochfrequenztechnik/1-hochfrequenz/1-1-elektromagnetische-wellen>

Shure Audio Institute (o.J.b). *Antennentechnik: 2.1 Antenne und Antennentyp* . Abgerufen am 22.05.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/grundlagen-der-hochfrequenztechnik/2-antennentechnik/2-1-antenne-antennentypen>

Shure Audio Institute (o.J.c). *Funkmikrofone: 1.1. Sender*. Abgerufen am 08.06.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/einfuehrung-anwendung-funkmikrofone/1-funkmikrofon-anwendung/1-1-sender>

Shure Audio Institute (o.J.d). *Nachrichtentechnik: 3.3.1. Grafische Betrachtung der Frequenz-Modulation*. Abgerufen am 08.06.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/grundlagen-der-hochfrequenztechnik/3-einfuehrung-nachrichtentechnik/3-3-frequenz-modulation/3-3-1-grafische-betrachtung>

Shure Audio Institute (o.J.e). *Funkmikrofone: 3.2 Amplitude-Squelch*. Abgerufen am 21.05.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/einfuehrung-anwendung-funkmikrofone/3-squelch/3-2-amplitude-squelch>

Shure Audio Institute (o.J.f). *2.1 Intermodulation – Entstehung von Störungen*. Abgerufen am 13.05.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/einfuehrung-anwendung-funkmikrofone/2-vorhersehbare-stoerungen/2-1-entstehung>

Shure Audio Institute (o.J.g). *Funkmikrofone: 2.2 Ordnungen*. Abgerufen am 10.07.2017 unter <http://sai.shure.de/e-learning/einfuehrung-anwendung-funkmikrofone/2-vorhersehbare-stoerungen/2-2-ordnungen>

Shure Deutschland (2017a). *ULX-D Digitales Drahtlossystem*. Abgerufen am 01.08.2017 unter https://www.shure.de/produkte/funkmikrofon_systeme/ulx-d_digital_wireless

Shure Deutschland (2017b). *UHF-R Funksysteme*. Abgerufen am 01.08.2017 unter https://www.shure.de/produkte/funkmikrofon_systeme/uhf-r_wireless

Shure Distribution GmbH (o.J.a). *Funksysteme: Antennentechnik*. Abgerufen am 11.05.2017 unter http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-antennentechnik

Shure Distribution GmbH (o.J.b). *Sender AD Serie*. Abgerufen am 22.07.2017 unter <https://www.shure.de/axientdigital/ad-serie>

Shure Distribution GmbH (o.J.c). *Funksysteme: Diversity*. Abgerufen am 19.05.2017 unter http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-diversity

Shure Distribution GmbH (o.J.d). *Funksysteme: Intermodulation*. Abgerufen am 13.05.2017 unter http://www.shuredistribution.de/support_download/fachwissen/funksysteme/funk-intermodulation

Shure Europe GmbH (24.April 2017). *Shure präsentiert Axient Digital Drahtlossystem*. Abgerufen am 04.07.2017. unter https://www.shure.de/unternehmen/presse/2017/shure_praesentiert_axient_digital_drahtlossystem

Shure Europe GmbH (o.J.b). *Funkmikrofone: Audio-Reference-Companding*. Abgerufen am 24.05.2017 unter

http://www.shure.ch/supportdownload/tipps_grundlagen/funkmikrofone/funkmikrofone-audio-reference-companding

Shure Europe GmbH (o.J.c). *WWB6 Software zur Überwachung und Frequenzberechnung*. Abgerufen am 04.07.2017 unter

<https://www.shure.de/produkte/software/wwb6>

Shure Europe GmbH (o.J.d). *Wissenswertes über das VHF Frequenzband 174 MHz – 230 MHz*. Abgerufen am 14.06.2017 unter

<https://www.shure.de/support/frequenzen/vhf-frequenzbaender>

Thomann GmbH (o.J.a). *Thomann Online-Ratgeber Funkmikrofone: 2.Allgemeines*. Abgerufen am 10.05.2017 unter

https://www.thomann.de/de/onlineexpert_page_funkmikrofone_allgemeines.html

Thomann GmbH (o.J.b). *Thomann Online-Ratgeber Funkmikrofone: 5.Informationen zu Frequenzuteilungen*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

https://www.thomann.de/de/onlineexpert_page_funkmikrofone_informationen_zu_frequenzuteilungen.html

Verband Privater Rundfunk und Telemedien e.V. (9.März 2016) *Ausgleichszahlungen für Produktionsmittel im 700-MHz-Band*. Abgerufen am 21.05.2017 unter

<http://www.vprt.de/thema/verbreitung/digitalisierung/digitale-dividende/content/ausgleichszahlungen-f%C3%BCr-produktionsmitt?c=0>

Wilmsmann, M. (24. Juni 2013). *Digitale Dividende 2: Bundesnetzagentur will Frequenzen schon 2015 versteigern*. Abgerufen am 08.06.2017 unter

<http://www.eventelevators.de/stories/reportagen/digitale-dividende-2-bundesnetzagentur-will-frequenzen-schon-2015-versteigern>

13.2. Andere Internetquellen

Shure Europe GmbH (o.J.a). *Tipps & Tricks im Umgang mit mehrkanaligen drahtlosen Mikrofonanlagen*. Abgerufen am 06.05.2017 unter

<https://www.osz->

[teltow.de/fachliches/medienberufe/dokumente/tipps_und_tricks_drahtlos.pptx](https://www.osz-teltow.de/fachliches/medienberufe/dokumente/tipps_und_tricks_drahtlos.pptx)

Smyrek, V. (2017). E-Mail-Verkehr. Siehe Anhang.

13.3. Online PDF

Altemark, M. (16. November 2016). *Wireless On Stage*. Abgerufen am 22.06.2017 unter https://www.apwpt.org/downloads/tmt29_am_wireless_on_stage.pdf

Altemark, M. (o.J.). *Digitale Dividende: Stellungnahme von beyerdynamic*.*

Amtsblatt der Europäischen Union (25. Mai 2017). *BESCHLUSS (EU) 2017/899 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2017 über die Nutzung des Frequenzbandes 470-790 MHz in der Union*. Abgerufen am 16.07.2017 unter

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0899&from=DE>

Belden Inc. (2016). *TSN-Time-Sensitive Networking*. Abgerufen am 12.06.2017 unter

http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-

[HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-](http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-)

[WA2PNtHUUHL7tW4BnNE1xtJxSIJLmIjOQ34ABaSxJr96B3-M-](http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-WA2PNtHUUHL7tW4BnNE1xtJxSIJLmIjOQ34ABaSxJr96B3-M-)

[oGr6YnjrKa0Vkgw&_hsmi=35426809&utm_content=35426809&utm_source=hs_automation](http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-WA2PNtHUUHL7tW4BnNE1xtJxSIJLmIjOQ34ABaSxJr96B3-M-oGr6YnjrKa0Vkgw&_hsmi=35426809&utm_content=35426809&utm_source=hs_automation)

[&hsCtaTracking=2755135d-8ef8-460d-b772-6566bccb5bf8%7C4aebde9f-129d-4bd1-a248-](http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-WA2PNtHUUHL7tW4BnNE1xtJxSIJLmIjOQ34ABaSxJr96B3-M-oGr6YnjrKa0Vkgw&_hsmi=35426809&utm_content=35426809&utm_source=hs_automation)

[8f015f3d195a](http://www.belden.com/docs/upload/TSN-Time-Sensitive-Networking-EMEA-White-Paper.pdf?utm_campaign=IIT-2016-GL-CWP-TSN-AD-HUB&utm_medium=email&_hsenc=p2ANqtz-_hLiBVcnBHBO0SeRxAk8TaWJhyC-WA2PNtHUUHL7tW4BnNE1xtJxSIJLmIjOQ34ABaSxJr96B3-M-oGr6YnjrKa0Vkgw&_hsmi=35426809&utm_content=35426809&utm_source=hs_automation)

Bianchi, C., und A. Meloni (3. Juni 2007). *Natural and man-made terrestrial electromagnetic noise: an outlook* (ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL. 50, N. 3). Abgerufen am 22.06.2017

unter

<http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/3674/1/11bianchi.pdf>

Bildungswerk des Verbandes Deutscher Tonmeister GmbH (Hrsg.) (Januar 2013). *Update: Digitale Dividende: Ein Gespräch mit Matthias Fehr, APWPT*. (S.32-35). *vdt Magazin*, 1/2013.

Abgerufen am 26.05.2017 unter

https://www.tonmeister.de/index.php?p=magazin/20131*

Brockdorff, T. von. (2006). *Dynamik und Pegel: Von der Aufnahme bis zum Master*. Abgerufen am 10.07.2017 unter

<https://www.hdm-stuttgart.de/~curdt/Brockdorff.pdf>

Bundesnetzagentur (o.J.a.). *LTE und Digitale Dividende*. Abgerufen am 10.07.2017 unter

<http://emf2.bundesnetzagentur.de/pdf/lte-bnetza.pdf>

* Diese Datei ist auf dem CD-Datenträger, auf dem sich die elektronische Fassung dieser Arbeit befindet, zu finden.

Bundesnetzagentur (30.April 2015a). *Funkanwendungen auf den ISM-Bändern*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

<http://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/ISM-BNetzA.pdf>

Bundesnetzagentur (2015b). *Vfg Nr. 53 /2015*. Abgerufen am 19.07.2017 unter

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2015_Vfg_053_drahtl_Mikros_32_MHz.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bundesnetzagentur (2015c). *Vfg 59 / 2015*. Abgerufen am 06.06.2017 unter

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2015_59_DrahtloseMikros_VHF_.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

DKE-AK 731.0.8 (2014). *Nutzbarkeit der Mobilfunk-Duplexlücken und –Schutzbereiche für Audio-PMSE*. Abgerufen am 02.06.2017 unter

<https://www.apwpt.org/downloads/nutzbarkeit-der-mobilfunk-duplexluecken-und-sc.pdf>

DKE-AK 731.0.8 (2011). *Beobachtung der Funkspektrumnutzung im Rahmen des Eurovision Song Contest 2011: Eine Veranstaltung in Düsseldorf, Deutschland*. Abgerufen am 09.06.2017 unter

https://www.apwpt.org/downloads/dke_ak73108_esc2011_07122011_bericht.pdf

DKE-AK 731.0.8 (o.J.). *Spektrumnutzung um UHF-TV-Bereich bei der Wahl zur Bremer Bürgerschaft am Abend des 10.Mai 2015*. Abgerufen am 14.06.2017 unter

<https://www.apwpt.org/downloads/dke-wahl-in-bremen-2015.pdf>

Electronic Communications Committee (2014). *ECC Report 204*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP204.PDF>

Electronic Communications Committee (2013). *CEPT Report 50*. Abgerufen am 02.06.2017 unter

<http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/CEPTRep050.pdf>

Electronic Communications Committee (2017). *ERC Recommendation 70-03*. Abgerufen am 02.06.2017 unter

<http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/pdf/rec7003e.pdf>

Holzmann, R. (o.J.). *FM Synthese*. (Version 1.0). Abgerufen am 16.06.2017 unter http://www.ziti.uni-heidelberg.de/ziti/uploads/ce_group/seminar/2012-Ralph_Holzmann-FM_Synthese-Paper.pdf

Juwan, A., und R. Bakker (2017). *2.4GHz „Wi-Mi“-Systems: Management workflow and set-up suggestions*. In Verband Deutscher Tonmeister e.V. (Hrsg.), *tmt29: expertise in audio media*, (S.414-421). Bergisch Gladbach: Verband Deutscher Tonmeister e.V..*

Koch, A. (2008). *Elektronik 2. Aktive Bauelemente SS 2008*. Skript der Vorlesung Elektronik 2*

Kürner, T., U. Reimers, K.L. Chee, T. Jansen, F. Juretzek und P. Schleger (21. Januar 2013). *Untersuchung der zukünftigen Frequenzbedarfe des terrestrischen Fernsehens und des Mobilfunkdienstes sowie weiterer Funknutzungen im Frequenzband 470-790 MHz sowie Bewertung von Optionen zur Verteilung der Frequenznutzungen unter sozio-ökonomischen und frequenztechnischen Gesichtspunkten insbesondere im Teilfrequenzband 694-790 MHz*. Abgerufen am 09.05.2017 unter http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/frequenzbedarf-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile

Line 6 (2010). *Handbuch über die Funkmikrofontechnologie*. (Version 1.2). Abgerufen am 20.05.2017 unter <http://www.funk-mikrofon.info/downloads/handbuchuberdiefunkmikrofontechnologiev2.pdf>

McCarthy, A. (o.J.). *Zeitsynchronisation gemäß dem Standard IEEE 1588 (Precision Time Protocol)*. Abgerufen am 12.06.2017 unter http://www.channel-e.de/uploads/media/Zeitsynchronisation_gemaess_IEEE_1588.pdf

Nelles, O. (1. Juni 2016). *Signalverarbeitung*. Abgerufen am 30.06.2017 unter <https://www.mb.uni-siegen.de/mrt/lehre/sv/signalverarbeitung-skript.pdf>

PMSE-xG (27. März 2017). *White Paper: PMSE and 5G*. (Version 1.01). Abgerufen am 11.06.2017 unter http://www.pmse-xg.research-project.de/Ressources/White%20Paper/PMSE-xG_White_Paper_v1p01.pdf

* Diese Datei ist auf dem CD-Datenträger, auf dem sich die elektronische Fassung dieser Arbeit befindet, zu finden.

Sengpiel, E. (November 2007). *Verzerrungen – Lineare und nichtlineare Verzerrung*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

<http://www.sengpielaudio.com/LineareUndNichtlineareVerzerrung.pdf>

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG (o.J.a). *SpeechLine DW: SpeechLine Digitale Wireless Systemdatenblatt*. (Version 1.4). Abgerufen am 22.07.2017 unter

[http://de-de.sennheiser.com/global-](http://de-de.sennheiser.com/global-downloads/file/6957/SP_1027_v1.4_SL_Digital_Wireless_System_Specification_DE.pdf)

[downloads/file/6957/SP_1027_v1.4_SL_Digital_Wireless_System_Specification_DE.pdf](http://de-de.sennheiser.com/global-downloads/file/6957/SP_1027_v1.4_SL_Digital_Wireless_System_Specification_DE.pdf)

Sennheiser Vertrieb und Service GmbH & Co. KG (2012). *Digitale Dividende von A-Z: Neuordnung der Funkfrequenzen*. Abgerufen am 20.05.2017 unter

[http://de-](http://de-de.sennheiser.com/downloads/download/file/2022/sennheiser_pocketguide_webversion.pdf)

[de.sennheiser.com/downloads/download/file/2022/sennheiser_pocketguide_webversion.pdf](http://de-de.sennheiser.com/downloads/download/file/2022/sennheiser_pocketguide_webversion.pdf)

Shure Distribution GmbH (2017). *Axient Digital: Hörbare Zuverlässigkeit*. Abgerufen am 04.07.2017 unter

<https://www.shure.de/damfiles/default/axient-digital/lp-docs/axient-digital-brochure-a4-de.pdf-c00a368cca9c5d8e62ec133e68d4ef42.pdf>

Shure Distribution GmbH (August 2016). *Nutzung von Frequenzen für Funkmikrofone*. Abgerufen am 06.06.2017 unter

https://www.shure.de/damfiles/default/support/frequencies/de-de/funk-frequenzen/shure_frequenzguide.pdf-aad64dcc17cc42a0eb16c3245767c7d7.pdf

Wehowski, H. (05.Oktober 2014). *Digitale Dividende II: Die Funkmikrofonlösung ist digital!*. Abgerufen am 20.06.2017 unter

<http://www.evvc.org/de/mediafiles/download,YToyO03795ntzOjM6ImxJRCI7czo1OiIxMDg2NyY1Z3oxOiJpIjtzOjEwOiJmMDJlYjY0ZjdmIj9>

Wisse, E. (2009). *Digitale Dividende – was wirklich dahinter steckt...* Abgerufen am 09.05.2017 unter

https://www.apwpt.org/downloads/vdt-3_2009-digitale-dividende.pdf

14. Danksagung

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit möchte ich mich ganz herzlich bei allen beteiligten Personen bedanken. Im Besonderen bei André Bohr und Prof. Oliver Curdt für die Betreuung und Beratung meiner Arbeit, sowie bei Herrn Michael Altemark für seine genommene Zeit und Hilfe. Zudem bei meinen Eltern, meiner Freundin Nina für die tolle Unterstützung und das Korrekturlesen.