

**HOCHSCHULE
DER MEDIEN**

Bachelorarbeit

im Studiengang Audiovisuelle Medien

**Drahtlose Audioübertragung bei Live-Events:
Grundlagen, Frequenzmanagement und Systemauswahl**

vorgelegt von Alexander Niederleithner

Matrikelnummer: 42148

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 04.09.2025

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering

Erstprüfer: Professor Oliver Curdt

Zweitprüfer: Diplom Ing. Jürgen Schwörer

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Alexander Niederleithner, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Drahtlose Audioübertragung bei Live-Events: Grundlagen, Frequenzmanagement und Systemauswahl“ 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. Ebenso sind alle Stellen, die mit Hilfe eines KI-basierten Schreibwerkzeugs erstellt oder überarbeitet wurden, 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 (§ 24 Abs. 2 Bachelor-SPO, § 23 Abs. 2 Master-SPO (Vollzeit)) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Niederleithner', written in a cursive style.

Stuttgart, den 04.09.2025

Alexander Niederleithner
Matrikelnummer 42148

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Einsatz von Funksystemen zur drahtlosen Audioübertragung bei Live-Events untersucht. Dazu werden zunächst die technischen Grundlagen der Funktechnik, mit speziellem Fokus auf Prinzipien, die für den Bereich des PSME relevant sind, untersucht.

Anschließend werden verschiedene Veranstaltungsarten auf ihre unterschiedlichen Anforderungen für drahtlose Audioübertragungssysteme überprüft und allgemeine Anforderungs/- und Zielsetzungsfragen erläutert. In einem weiteren Teil der Arbeit wird das Thema Frequenzmanagement aufgegriffen und dessen Grundprinzipien sowie zentrale Problemstellungen werden erläutert. Nach einem kurzen Ausblick auf technische Neuerungen im Bereich der drahtlosen Audioübertragung werden im letzten Abschnitt der Arbeit verschiedene Beispiele für Funkanwendungen in Live-Situationen beschrieben und es wird ein kurzer Ausblick in die zukünftige Entwicklung von Funksystemen gegeben.

Abstract

This thesis examines the use cases of radio systems for wireless audio transmission at live events. It first examines the technical fundamentals of radio technology, with a focus on principles that are especially relevant to the field of PSME.

It then reviews different types of events in terms of their requirements for wireless audio transmission systems and explains general rules and goals. The next part of the thesis addresses the field of frequency management and explains its basic principles and key issues. After a brief overview of technical innovations in wireless audio transmission, the final section of the thesis describes various examples of radio systems in live events and gives a short outlook on the future development of PSME-Wireless systems.

Glossar

- PSME: Program Making and Special Events
- Transmitter: Sender
- Receiver: Empfänger
- UHF: Ultra-High-Frequency
- VHF: Very-High-Frequency
- NF: Niederfrequenz
- Audio-Processing: Audiotbearbeitung
- DSP: Digital Signal Processing
- ASK: Amplitude Shift Keying
- FSK: Frequency Shift Keying
- PSK: Phase Shift Keying
- QAM: Quadratur-Amplituden-Modulation
- LNA: rauscharmer Verstärker
- Audio-Output: Audioausgang
- RF: Radiofrequency
- Racks: Eine Art Technikschränk, der frei konfigurierbar ist
- ADC: Analog-Digital-Converter
- DDS: Direct-Digital-Synthesizer
- IEM: In-Ear-Monitoring
- CNR: Carrier to Noise Ratio
- DCS: Digital Coded Squelch
- DVB-T: Digital Video Broadcasting – Terrestrial
- FCC: Federal Communications Commission (US-Regulierungsbehörde)
- CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
- WMAS: Wireless Multichannel Audio Systems
- OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung.....	2
Kurzfassung/Abstract.....	3
Glossar.....	4
1. Einleitung.....	7
1.1 Drahtlossysteme bei Live-Events.....	7
1.2 Ziel der Bachelorarbeit.....	7
2. Grundlagen der Funkmikrofontechnik.....	8
2.1 Grundlegende Funktionsweise.....	8
2.1.1 Transmitter.....	8
2.1.2 Modulation.....	10
2.1.2.1 Amplitudenmodulation.....	11
2.1.2.2 Frequenzmodulation.....	11
2.1.2.3 Phasenmodulation.....	12
2.1.2.4 Amplitude Shift Keying (ASK).....	12
2.1.2.5 Frequency Shift Keying (FSK).....	13
2.1.2.6 Phase Shift Keying (PSK).....	13
2.1.3 Die elektromagnetische Welle.....	15
2.1.4 Antennen.....	16
2.1.5 Receiver.....	19
2.1.5.1 UHF-Stufe.....	20
2.1.5.2 Audio-Stufe.....	21
2.1.5.3 Diversity.....	21
2.1.5.4 Squelch.....	22

2.1.6 Fading.....	23
2.2 Antennenplatzierung.....	24
2.3 Antennenverkabelung.....	26
2.4 Antennensplitter/combiner.....	28
3. Technische Anforderungen verschiedener Live Events an Drahtlossysteme.....	30
3.1 Konzerte.....	30
3.2 Firmen/Politische Events.....	32
3.3 Messen.....	33
3.4 Durchsagen auf weitläufigem Gelände.....	33
3.5 Broadcast und TV-Aufnahmen.....	33
3.6 Übertragung von Messmikrofonen zum Systemtuning.....	34
3.7 Zusammenfassung.....	34
4. Frequenzmanagement von Funksystemen.....	35
4.1 Notwendigkeit des Frequenzmanagements.....	35
4.2 Digitale Dividende I und II.....	35
4.3 CNR(Carrier to Noise Ratio).....	36
4.4 Gründe und Vermeidungsstrategien für Funkstörungen.....	38
4.5 Intermodulation.....	39
4.6 Tools für Frequenzmanagement und RF-System Überwachung.....	40
5. WMAS.....	41
6. Beispiele.....	42
7. Fazit.....	47
8. Abbildungsverzeichnis.....	48
9. Literaturverzeichnis.....	49

1. Einleitung

1.1 Drahtlossysteme bei Live-Events

„Funkmikrofonsysteme spielen eine entscheidende Rolle bei modernen Produktionen, von mitreißenden Rockkonzerten über inspirierende Gottesdienste bis zu wichtigen Geschäftspräsentationen.“¹

Drahtlose Mikrofone sind bei Live Veranstaltungen mittlerweile der Standard und aus dem Event Business nicht mehr wegzudenken. Durch die vielen verschiedenen Formen von Events, deren Durchführung eines Funkmikrofones bedarf, ergeben sich verschiedene Anforderungen, die die Funksysteme erfüllen müssen. Aus diesem Grund existieren zurzeit auf dem Funkmikrofonmarkt zahlreiche Optionen, die sowohl in Preisklasse als auch in ihren technischen Spezifikationen starke Unterschiede aufweisen.

Seit Shure 1953 das erste drahtlose Mikrofon auf den Markt brachte² ist der Markt für Funkmikrofone stetig gewachsen. Durch die immer größer werdende Anzahl an drahtlosen Geräten aller Art und der immer weiter zunehmenden Dichte an Diensten und Organisationen, die im Funkspektrum Platz finden müssen ergeben sich auch immer mehr Herausforderungen an Funksysteme, die im PSME-Bereich eingesetzt werden.

1.2 Ziel der Bachelorarbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Analyse der Bedürfnisse verschiedener Formen von Events und technischer Möglichkeiten von unterschiedlichen Funksystemen, Richtlinien und Empfehlungen zu formulieren, anhand derer eine möglichst passende Wahl des Funksystems getroffen werden kann. Zusätzlich soll der Aufbau und die Einrichtung von Funksystemen beschrieben werden. Um dies zu erreichen ist es unerlässlich zuerst auf die grundlegende Funktionsweise und technischen Verfahren einzugehen, die der Funkmikrofontechnologie zugrunde liegen, um ein möglichst umfassendes Verständnis für die Möglichkeiten und Herausforderungen zu schaffen, die die verschiedenen Systeme unterscheidet. Auch auf das Frequenzmanagement muss eingegangen werden, da die Frequenzwahl und der Vergabeprozess dieser eine wesentliche Rolle im Aufbau und der Verwaltung von Funksystemen spielt, vor allem bei der Inbetriebnahme komplexerer Systeme.

¹ Finde das Passende Funkmikrofonsystem (01.03.2023)

²Vgl. Henshall (2015)

2. Grundlagen der Funkmikrofontechnik

Grundlegend besteht jedes drahtlose Audioübertragungssystem aus drei Komponenten. Dabei unterscheidet man zwischen Transmitter, Träger und Receiver. ³

2.1 Grundlegende Funktionsweise

2.1.1 Transmitter

Grundlegend existieren für Funkmikrofone mehrere Senderarten: Der Handsender (z.B. bei Shure AD2, bei Sennheiser z.B. Sennheiser SKM-S),



Abb.1 Shure AD2



Abb.2 Sennheiser SKM-S

der Taschensender (Shure AD1, Sennheiser SK)



Abb.3 Shure AD1



Abb.4 Sennheiser SK

³ Vgl. Peissig et al. (2023,S.3)

und Aufstecksender wie der Shure AD3 oder der Sennheiser SKP.



Abb.5 Shure AD3

Abb.6 Sennheiser SKP

Natürlich handelt es sich bei den hier gezeigten Produkten nur um einzelne Beispiele aus spezifischen Produktserien der beiden Hersteller. Es existieren eine Vielzahl weiterer Sender auf dem Markt auch von anderen Herstellern. So existieren beispielsweise Spezialformen von Sendern, die in verschiedenen ungewöhnlichen Aufnahmesituationen benutzt werden können.

Gemein ist all diesen Transmittern, dass sie ein niederfrequentes Audiosignal in ein UHF-Signal wandeln, dass über die in allen Transmitter vorhandene Sendeantenne als elektromagnetische Welle abgestrahlt wird. Bei analogen Funkmikrofonen durchläuft das NF(Niederfrequente) Signal eine Reihe an Audio-Processing Schritten. Dazu gehört die Vorverstärkung und die Pre-emphasis, bei der hohe Frequenzen gezielt angehoben werden, um Störungen wie Rauschen bei der späteren Wiedergabe zu reduzieren. Schließlich durchläuft das Signal einen Kompressor, der den ersten Teil des Komponders darstellt, dessen Benutzung es ermöglicht einen deutlich höheren Dynamikbereich zu übertragen, als es die Limitierung durch den Frequenzhub ermöglicht hätte.⁴

Als Frequenzhub bezeichnet man die maximale Auslenkung der Trägerfrequenz bei der Frequenzmodulation. Die Größe dieser Abweichung wird von der Amplitude des zu übertragenden Signals bestimmt.⁵ Da der zulässige Hub von den im Land zuständigen Behörden festgelegt ist und auch von System zu System bzw. von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich ist, und typischerweise nur eine Übertragung eines Dynamikbereich von ca. 50db zulässt, ist es notwendig einen Komponder in das Funksystem zu integrieren, dessen erster Teil, der Kompressor im Transmitter liegt und den Dynamikumfang des Signals so reduziert, dass es auf der zur Verfügung stehenden Bandbreite übertragen werden kann.⁶

⁴ Vgl. Shure Audio Institute(o. D., Processing)

⁵Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.220)

⁶Vgl. Shure Audio Institute(o. D.,Processing)

Das bearbeitete Audiosignal wird mithilfe eines durch Spannung kontrollierten Oszillators auf die vorher bestimmte Trägerfrequenz moduliert und anschließend vor der Ausstrahlung als elektromagnetische Welle verstärkt.⁷

Obwohl digitalen Transmitter dasselbe Grundprinzip der Umwandlung eines NF-Signals in ein Hochfrequentes Signal zugrundeliegt, existieren doch einige Unterschiede in der Umsetzung dieses Prozesses. Das durch die Mikrofonkapsel aufgenommene Audiosignal wird zunächst durch eine AD-Wandlung digitalisiert. Alle notwendigen Filter werden digital mithilfe eines DSP durchgeführt. Zur Generierung des modulierten Signals wird ein DDS (direct digital Synthesizer) verwendet. Das Signal wird anschließend von Digital zu Analog konvertiert und verstärkt.⁸

Transmitter block diagram

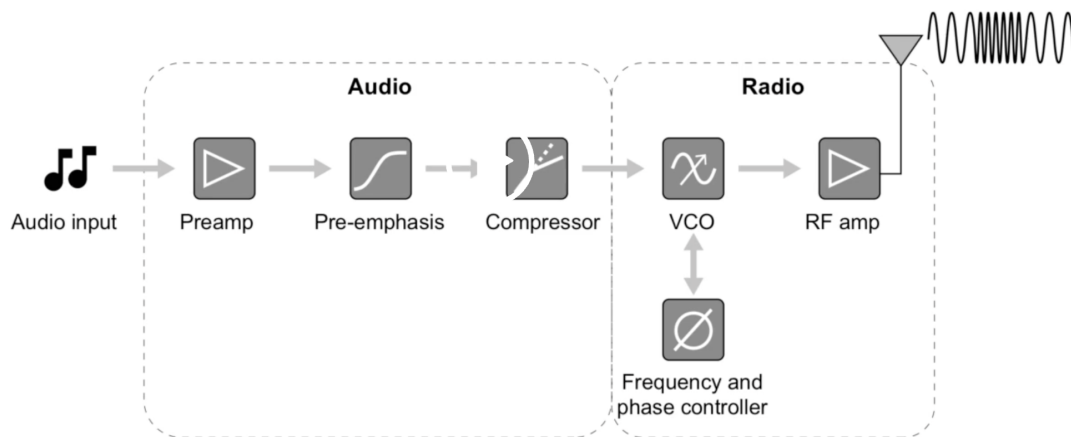


Abb.7 Block Diagram eines typischen analog Transmitter

2.1.2 Modulation

Modulationsverfahren werden benutzt um niederfrequente Nutzsignale auf ein hochfrequentes Trägersignal zu übertragen. Um dies zu erreichen wird der Träger durch die zu übertragenden Daten modifiziert/moduliert.⁹ Es existieren verschiedene Modulationsarten und Vorgehensweisen, da sich die Modulationsart und die dadurch erreichte Datenübermittlung untereinander und zwischen analogen und digitalen Funkmikrofonen stark unterscheidet.

⁷Vgl. Shure Audio Institute(o. D.,Processing)

⁸ Vgl. Fette et al.(2007,S.72)

⁹ Vgl. Peissig et al. (2023,S.10)

2.1.2.1 Amplitudenmodulation

Bei der Amplitudenmodulation wird das Trägersignal anhand der vom Nutzsignal ausgehenden Spannung in seiner Amplitude geändert. Da dieses Verfahren besonders anfällig für Störgeräusche und Einstreuungen ist, wird es vor allem im PMSE (Program Making and Special Events) Bereich nicht angewandt.¹⁰ Bei einer reinen Amplitudenmodulation ist die Phase zeitlich konstant.¹¹

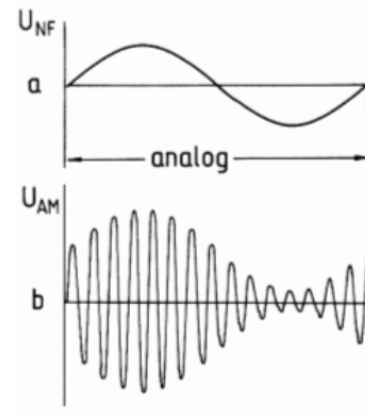


Abb.8
Amplitudenmodulation

2.1.2.2 Frequenzmodulation

Eine für analogen Funkmikrofone typische Art der Modulation ist die Frequenzmodulation. Bei dieser wird die Frequenz des Trägersignals in Abhängigkeit zum zu übertragenden Signal verändert. Dabei sind in der Amplitude des Trägersignals keine Informationen enthalten, was einen entscheidenden Vorteil zur Amplitudenmodulation darstellt, da nun die Amplitude des Trägers schwanken kann, ohne dass Informationen verloren gehen.

Man unterscheidet zwischen Schmalband-FM mit einem Modulationsindex ($\eta < 1$) und Breitband-FM mit einem Modulationsindex ($\eta > 1$).

Die Bandbreite des Schmalband-FM lässt sich mit $f_s \max$ (höchster Frequenzanteil des Audiosignal) berechnen: $B_{HF} = 2 \times f_s \max$.

Die Bandbreite des Breitband-FM auf dem die meisten üblichen analogen Funkmikrofone basieren lässt sich mit dem Frequenzhub Δf und $f_s \max$ berechnen: $B_{HF} = 2 \times (\Delta f + f_s \max)$ ¹²

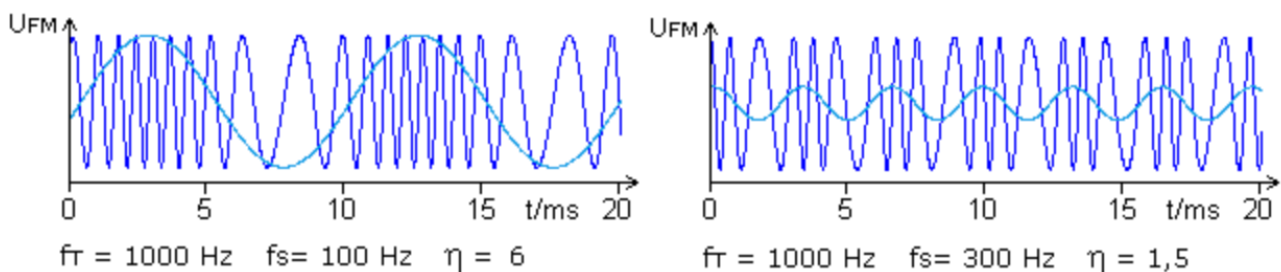


Abb.9 Frequenzmodulation

¹⁰ Vgl. AM - Amplitudenmodulation (o. D.)

¹¹ Vgl. Dickreiter et al. (2008, S.1091)

¹² Vgl. Peissig et al. (2023, S.10)

Obwohl Frequenzmodulierte Signale wesentlich unempfindlicher gegenüber atmosphärischen Störungen und anderen Störimpulsen ist, ist es jedoch sehr anfällig für Mehrwegausbreitung mit langen Echos. Diese Tatsache kann zu nichtlinearen Verzerrungen im demodulierten Audiosignal führen.¹³

2.1.2.3 Phasenmodulation

Bei der Phasenmodulation wird die Phase des Trägersignals in Abhängigkeit zum Datensignal verändert. Dieses Verfahren ist bei analogen Funkmikrofonen eher unüblich, weswegen dieses Modulationsverfahren erst in seiner „digitalen Version“ in Kapitel 2.1.2.6 Phase Shift Keying genauer behandelt wird.

2.1.2.4 Amplitude Shift Keying (ASK)

Ähnlich seiner Analogen Version verändert das Amplitude Shift Keying die Amplitude des Trägersignals. Anders als bei der Amplitudenmodulation wird hier jedoch kein Zeit-/Wertkontinuierliches Signal übertragen sondern die digitalisierte Version des Audiosignals. Das führt dazu, dass es nur zwei Zustände gibt, die es zu übertragen gilt: 0 und 1.¹⁴

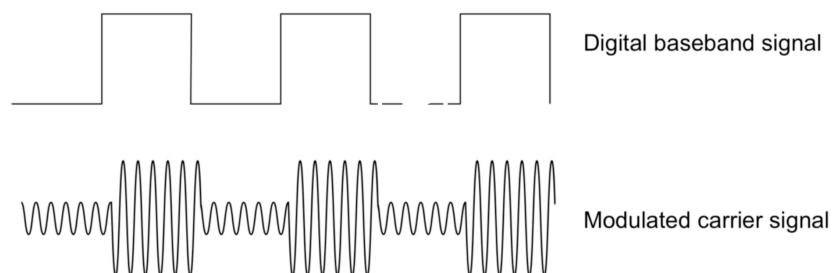


Abb.10 Amplitude Shift Keying

¹³ Vgl. Dickreiter et al. (2008, S.1094)

¹⁴ Vgl. Shure Audio Institute(o. D., Digital RF Transmission)

2.1.2.5 Frequency Shift Keying (FSK)

Beim Frequency Shift Keying handelt es sich um die „digitale Version „ der Frequenzmodulation. Ähnlich wie bei der Frequenzmodulation verändert sich beim FSK die Frequenz des Trägersignals, nun aber abhängig zum Zustand des digital gewandelten Audiosignals.¹⁵

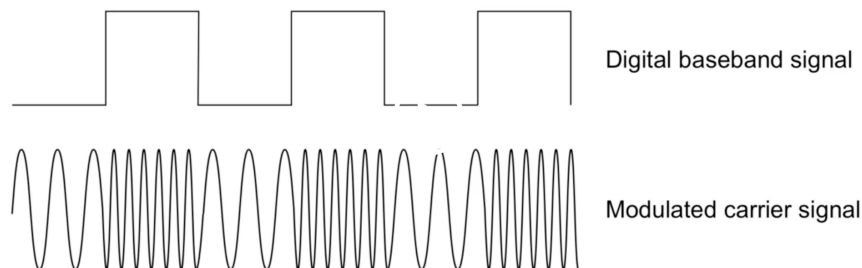


Abb.11 Frequenz Shift Keying

2.1.2.6 Phase Shift Keying (PSK)

Eine weitverbreitete Form der Modulation bei digitalen Funkmikrofonen ist das Phase-Shift Keying bzw. seine Weiterentwicklungen. Eine einfache Form des PSK überträgt wie die anderen Formen der Modulation für digitale Mikrofone zwei Zustände 0 und 1 indem es die Phase des Trägersignals abhängig vom vorherrschenden Zustand des Nutzsignals um 180 Grad dreht.¹⁶

Um die Daten effizienter versenden zu können ist es nun möglich mehrere Bits simultan zu Versenden, indem sie in Symbolen abgebildet werden, die dann spezifischen Phasenzuständen zugeordnet werden.

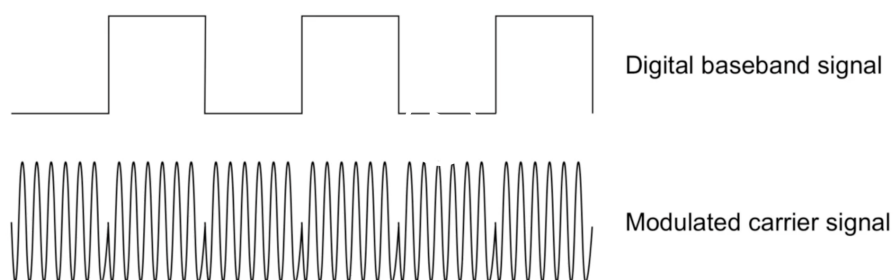


Abb.12 Phase Shift Keying mit zwei Zuständen

¹⁵Vgl. Peissig et al. (2023,S.10)

¹⁶Vgl. Shure Audio Institute(o. D., Digital RF Transmission)

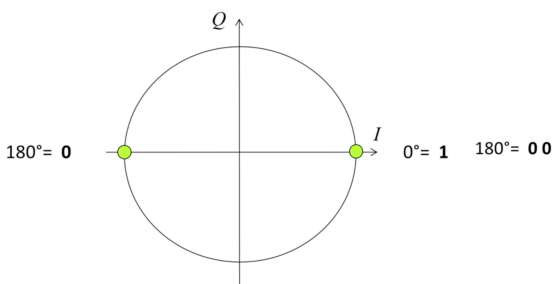


Abb.13 2-PSK

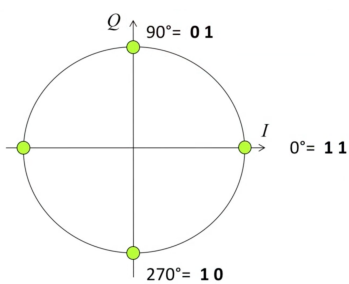


Abb.14 4-PSK

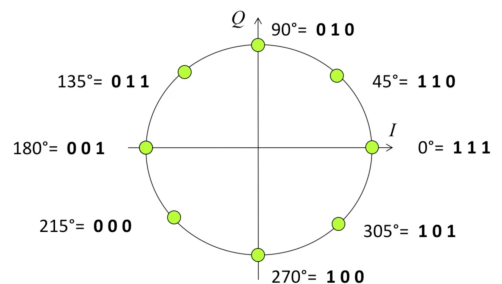


Abb.15 8-PSK

Wenn beim Phase-Shift-Keying vier Phasenzustände anstelle der vorherigen zwei benutzt werden nennt man dieses Verfahren QPSK(Quaternary Phase-Shift-Keying). Jedes aus Bits zusammengesetzte Symbol nimmt dann einen unterschiedlichen Phasenzustand an wie in Abbildung 14 zu sehen. Bei diesem Verfahren ist die Amplitude des Trägersignals konstant.¹⁷

Da es mit dieser Methode möglich ist mehrere Bits gleichzeitig zu senden kann man so die Datenübertragung wesentlich effizienter gestalten, 4-PSK benötigt beispielsweise nur die Hälfte der Bandbreite von 2-PSK.¹⁸

Ab einer gewissen Anzahl an Symbolen ist es für den Receiver zunehmend schwierig, die ihm gesendeten Phasenzustände richtig zuzuordnen und dementsprechend die richtigen Symbole mit den darin enthaltenen Bits aus der Trägerwelle auszulesen. Dies resultiert aus dem bei steigender Symbolanzahl zunehmend geringer werdenden Abständen in der Phase der übertragenen Phasenzustände. Da die Phase durch Fading beziehungsweise Mehrwegausbreitung ständig beeinflusst wird und so immer eine gewisse Ungenauigkeit vorliegt kann es bei zu hoher Symboldichte zu Schwierigkeiten in der genauen Zuordnung kommen.

Dadurch steigt die BER(Bit Error Rate)massiv, und es ist nicht mehr möglich die Phasenzustände akkurat zu erkennen und folgerichtig zu demodulieren. Um die Bandbreite der Datenübertragung weiterhin zu erhöhen existieren zur weiteren Verbesserung der Datenübertragung Mischformen der Modulationsarten wie z.B. 16QAM.¹⁹

QAM steht für Quadratur-Amplituden-Modulation, die 16 bezeichnet dabei die Anzahl an gleichzeitig existierenden Symbolen, die die Bits übertragen.

Dabei handelt es um eine Verknüpfung von Phase-Shift-Keying und Amplitude-Shift-Keying, bei dem man die zu übertragenden Symbole nicht nur verschiedenen Phasen/- sondern auch Amplitudenzuständen zuordnet.

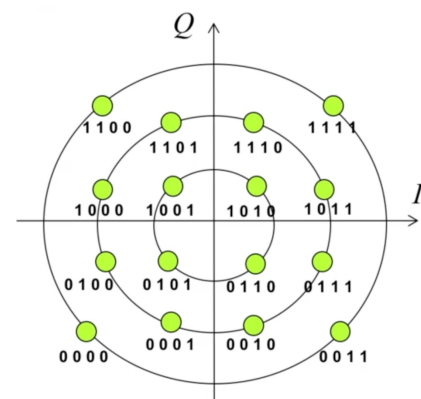


Abb.16 16QAM

¹⁷ Vgl. Dickreiter et al. (2008, S.1096)

¹⁸ Vgl. Shure Audio Institute(o. D.)

¹⁹ Vgl. Peissig et al. (2023, S.12)

So können beispielsweise 4 Bits auf einmal übertragen werden, was die Datenrate im Vergleich zu 2-PSK vervierfacht.

2.1.3 Die elektromagnetische Welle

Im Zuge dieser Arbeit beschäftigen wir uns vornehmlich mit elektromagnetischen Wellen im Bereich UHF(Ultra-High-Frequency, 300MHz-3GHz) und VHF(Very-High-Frequency, 30MHz-300MHz), da diese für den Betrieb von Funkmikrofonen im professionellen Bereich relevant sind. Nähere Informationen zu den verschiedenen Frequenzbereichen befinden sich in Kapitel 4. Frequenzmanagement von Funksystemen.

Elektromagnetische Wellen stellen in der Funktechnologie den Träger dar.

Die elektromagnetische Welle besteht, wie dem Namen zu entnehmen ist aus einem elektrischen und einem magnetischen Anteil, bei dem der elektrische Anteil vertikal und der magnetische Anteil horizontal polarisiert ist.²⁰ Die Polarisation der Wellen spielt eine große Rolle bei der Fähigkeit der Antennen elektromagnetischen Wellen aufzunehmen.²¹ Aus diesem Grund wird die Polarisation von elektromagnetischen Wellen in Kapitel 2.1.4 Antennen und im

Kapitel 4. Frequenzmanagement von Funksystemen weiter behandelt. Anders als z.B. Schallwellen brauchen elektromagnetische Wellen kein Medium wie Luft oder Wasser um sich fortzubewegen. Bei einer Ausbreitung im Vakuum entspricht die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung der Lichtgeschwindigkeit. Dies ändert sich zwar wenn die elektromagnetische Welle sich durch ein Medium wie Luft ausbreitet, doch ist die Änderung so geringfügig das auch für Ausbreitung durch das Medium Luft für elektromagnetische Wellen die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum als Geschwindigkeit angesetzt werden kann. So erhalten wir zur Berechnung der Frequenz einer spezifischen elektromagnetischen Welle die Formel

$$f = c(\text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum}) / \text{Wellenlänge} .^{22}$$

Durch die Erzeugung von elektromagnetischen Wellen durch den Transmitter eines Funksystems, deren Ausbreitung im Raum und die Erkennung solcher von den Antennen des Receiver ist Datenübertragung über Funk erst möglich.

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen unterliegt immer einem von mehreren möglichen Grundprinzipien: Bodenwelle, Raumwelle oder Freiraumwelle.

²⁰Vgl. E. (o. D.-a)

²¹Vgl. Fette et al. (2007,S.105)

²²Vgl. Peissig et al. (2023,S.4)

Bodenwellen sind ausschließlich vertikal polarisiert und werden von vertikalen, sich nahe an der Erdoberfläche befindlichen Antennen produziert und empfangen. Die Wellen werden von der Erdoberfläche übertragen. Die Übertragung von elektromagnetischen Wellen wird nur im Bereich von für HF-Strahlung relativ niedrigen Frequenzen von einigen Megahertz eingesetzt. Da sich die Frequenzen, die für die Übertragung von Audioinformationen eingesetzt werden im VHF und UHF Bereich des Spektrums befinden, ist diese Art der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen für Funkstrecken im PSME-Bereich nicht weiter relevant.

Raumwellen sind in ihrer Ausbreitungsart abhängig von Reflektionen der Ionosphäre, die im oberen Teil der Erdatmosphäre durch die Absorption ionisierender solarer Strahlung entsteht. Langstreckenkommunikation im Frequenzbereich 3-30MHz wird mithilfe der Ionosphäre realisiert. Dabei wird die Übertragung maßgeblich von Tageszeit, Jahreszeit und auch dem Auftreten von Sonnenflecken beeinflusst. Da die Bereiche, in denen die Übertragung von Audio im PSME-Bereich stattfindet, über diesen Frequenzen liegt kann auch diese Art der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen hier außen vorgelassen werden.

Die bei Kurzstreckenkommunikation mit elektromagnetischen Wellen im VHF und UHF Bereich vorherrschende Ausbreitungsart ist die Freiraumwelle, bei der die Stärke des empfangenen Signal von dem direkten(von der Sichtlinie zwischen Transmitter und Receiver ausgehenden)Signal, seinen Reflektionen vom Boden und von umliegenden Objekten abhängig ist. Diese Ausbreitungsart von elektromagnetischen Wellen ist bestimmend für die Funkstrecken, die bei Events und Veranstaltung genutzt werden.²³

2.1.4 Antennen

Antennen werden bei Funksystemen sowohl zum Abstrahlen als auch zum Empfangen der elektromagnetischen Strahlung benötigt.

Die Aufgabe einer Sendeantenne besteht darin, die davor durch Prozessieren und Modulation im Transmitter modulierte Trägerwelle in eine sich im freien Raum ausbreitende elektromagnetische Welle umzuwandeln. Die Aufgabe der Empfangsantenne ist, einen Bruchteil der Energie der abgestrahlten Welle zurückzuwandeln und dem Receiver zuzuführen, der die Welle demoduliert und so die versendeten Daten auslesen kann.²⁴ Also lassen sich Antennen als Transducer (Wandler) beschreiben, da sie eine Form der Energie in eine andere wandeln. Passive Antennen sind in ihrer Funktionsweise reziprok, können also als Sende-/Empfangsantenne gleichermaßen eingesetzt werden.

Eine Antenne ist prinzipiell ein Schwingkreis, der aus einer Spule bzw. einer Induktivität und einem Kondensator bzw. einer Kapazität besteht. Die beiden Anteile einer elektromagnetischen Welle sind in diesen Bauteilen zu finden, das magnetische Feld in der Spule und das elektrische Feld

²³Vgl. Fette et al. (2007,S.75-79)

²⁴Vgl. Meinke und Gundlach (1986,S. N1)

zwischen den Platten des Kondensators. Die Feldlinien des elektrischen Feldes breiten sich auch zu einem geringen Anteil am Rand der Kondensatorplatten im Raum aus. Dieser Effekt lässt sich verstärken, indem die Platten des Kondensators auseinander gezogen werden. Bei Antennen wird nun dieser Effekt weiter ausgenutzt indem die Kondensatorplatten vollständig geöffnet werden um die Raumausbreitung soweit wie möglich zu fördern. So wird die Oberfläche des Kondensators auf einen in der Mitte unterbrochenen Draht reduziert. Die elektrischen Feldlinien liegen nun vertikal zum Draht, die magnetischen radial um den Draht. Dieser Schwingkreis hat eine Resonanzfrequenz, die von der Größe der Bauteile abhängig ist.²⁵

Antennen, die speziell für den Gebrauch mit Funkmikrofonen konzipiert sind haben in der Regel eine Impedanz von 50 Ohm. Dies gilt auch für jegliche Antennenkabel mit denen die Antennen an die Receiver angeschlossen werden.²⁶ Wie schon festgestellt, ist die Größe der Antenne immer von der Wellenlänge bzw. der Resonanzfrequenz abhängig, die sie empfangen soll.

So ist z.B. eine typische Antenne, die Wellen im UHF Bereich empfangen soll ca. 30 cm lang - die halbe Wellenlänge einer in der Mitte des UHF-Spektrums liegenden Welle, in diesem Fall 499,654MHz. Wenn die Antenne die halbe Wellenlänge der gewünschten Empfangsfrequenz als Länge besitzt spricht man von einem $\lambda/2$ -Dipol oder einer Halbwellendipolantenne.²⁷ Im folgenden lassen sich einige charakteristische Bauformen unterscheiden.

Eine der meist benutzten Antennen bei Funksystemen ist die $\lambda/2$ -Dipol Antenne.



Abb.17 Shure UA8
470-636



Abb.18 Sennheiser Half
Wave Dipole Q

Dipolantennen dieser Form empfangen elektromagnetische Wellen omnidirektional in der horizontalen Ebene. ²⁸

²⁵Grzesinski, C. (2020,S.224-226)

²⁶Vgl. Shure Audio Institute,(o. D.-b, Antennas)

²⁷Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.226)

²⁸Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antennas)

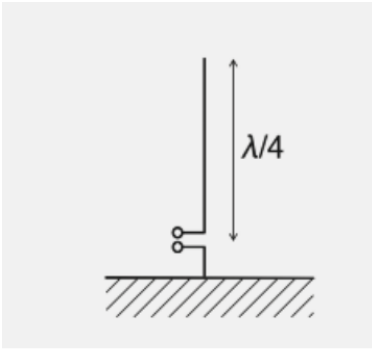


Abb.19 $\lambda/4$ -Dipolantenne.



Abb.20 Sennheiser
576131

Eine weitere häufig auftretende Form der Antenne ist die $\lambda/4$ -Dipolantenne.

Bei dieser Form der Antenne wird die Hälfte der physischen Antennenlänge eingespart. Die Antenne kann nun nur optimal betrieben werden, wenn ein „Gegengewicht“ vorhanden ist. In der Praxis bedeutet dies, dass die Antenne auf dem Boden, an einer Stahlplatte oder einem Metallstativ direkt angebracht sein muss und sich demnach nicht dafür eignet an einer anderen Stelle als direkt am Receiver angebracht zu werden.²⁹

Falls es notwendig sein sollte bei der Antenne eine Richtwirkung zu erhalten, da von einer bestimmten Seite ungewünschte Einstreuungen entstehen oder eine erhöhte Reichweite gewünscht ist, ist es ratsam logarithmisch-periodische Antennen bzw. Richtantennen zu benutzen. Die Richtwirkung dieser Antennenform wird durch das Vorsetzen weiterer Stäbe unterschiedlicher Längen und Abständen erzielt.³⁰

Die Richtcharakteristik solcher Antennen ist eine typische Keulenform. Oftmals sind solche Richtantennen breitbandig, können also in einem wesentlich größeren Bereich des Radiospektrums Signale empfangen oder senden. Bei Richtantennen ist auch der Antennengewinn eine zu beachtende Größe. Um den Gewinn einer Antenne akkurat einordnen zu können braucht es eine Vergleichsantenne. Dazu dient der Isotropstrahler, eine hypothetische Antenne, die in alle Richtungen gleich abstrahlt und empfängt. Hat nun eine Antenne eine Richtwirkung an einer bestimmten Seite lässt sich diese Richtwirkung in dBi (i spezifiziert hier den



Abb.21 Richtantenne

²⁹Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.226)

³⁰Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.227)

Vergleich zum Isotropenstrahler) ausdrücken.³¹ So hat zum Beispiel die aktive Richtantenne Shure UA874-WB einen Antennengewinn von 7,5dBi.³²

Für Anwendungen bei denen eine besonders große Reichweite und/oder Richtwirkung erzielt werden soll kann eine Wendel bzw. Helixantenne verwendet werden. Diese Antennenform hat eine sehr starke Richtwirkung und damit einen höheren Gewinn als beispielsweise eine logarithmisch periodische Antenne. Die in Abbildung 22 gezeigte Helixantenne hat beispielsweise einen Gewinn von 10-12 dBi.³³ Ein weiterer Vorteil von Helixantennen ist, dass sie aufgrund ihrer Bauform keine Polarisation aufweisen. Während es also bei allen anderen Antennenformen wichtig ist, dass die Sendeantenne parallel zur Empfangsantenne steht ist dieser Aspekt bei einer Helixantenne zu vernachlässigen.³⁴



Abb.22 Shure HA-8089

Eine weitere Spezialform der Antenne ist die Breitband(Wideband) Antenne. In Anwendungsfällen bei denen mehrere Funkmikrofone aus verschiedenen Frequenzbereichen zu einem Funksystem zusammengeführt werden kann eine solche Antenne verwendet werden, um zu verhindern, dass mehrere auf die unterschiedlichen Funkbereiche spezialisierten Antennen gleichzeitig verwendet werden müssen.³⁵

Weiteres zu Antennen und deren richtige Verwendung ist in 2.2 Antennenplatzierung und 2.3 Antennenverkabelung zu finden.

2.1.5 Receiver

Der Receiver ist das letzte Teil der Signalstrecke in der drahtlosen Audioübertragung und sorgt dafür, dass aus dem hochfrequenten, von den Antennen empfangenen Signal, wieder ein niederfrequentes Audiosignal wird, dass nun zur Beschallung in ein Mischpult eingespeist werden kann.

³¹Vgl. 50Ω Lernplattform für Amateurfunk(o. D.)

³²Vgl. UA874 - UA874 Aktive Richtantenne - Shure Germany,(o. D.)

³³Vgl. Shure Incorporated(2019)

³⁴Vgl. Was Man Über Antennen Wissen Sollte(o. D.)

³⁵Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antennas)

2.1.5.1 UHF-Stufe

In der UHF- Stufe eines Receivers wird das empfangene Signal zunächst durch einen Bandpassfilter selektiert³⁶, den sogenannten Front-End-Filter. Dabei unterscheidet man zwischen Fixed-Front-End-Filter und Track-Tune-Front-End-Filter.

Ein Front-End-Filter verhindert, dass Signale außerhalb seiner gesetzten Breite in den Signal-Prozessierungsweg des Receivers gelangen. Bei einem Fixed-Front-End-Filter ist diese Breite festgesetzt und unveränderbar. Dabei muss die Breite sich mindestens über die vom Receiver benutzbaren Frequenzen erstrecken.

Ein Track-Tune-Front-End-Filter hat eine deutlich geringere Breite und folgt der im Receiver ausgewählten Frequenz die empfangen werden soll.³⁷ So sorgt er nicht nur für Sicherheit vor Interferenzen von Funksignalen außerhalb der Frequenzreichweite des Receivers sondern auch vor potenziellen Interferenzen im nahen Funkspektrum.

Das Eingangs bereits gefilterte HF-Signal wird nun mit dem Signal eines verstellbaren Lokal Oszillators gemischt. Dabei entstehen nun zwei Zwischenfrequenzsignale:

$$f_{ZF\ low} = f_{ZF} = |f_{HF} - f_{LO}|$$

$$f_{ZF\ high} = f_{HF} + f_{LO}$$

Die gängige Zwischenfrequenz für drahtlose Audioübertragung im UHF-Bereich beträgt 10,7MHz. Daraus lässt sich folgern, dass die Differenz zwischen der zu empfangenden Frequenz und der verstellbaren Frequenz des Lokaloszillators immer 10,7MHz betragen muss. Nun hätte ja nicht nur eine Frequenz eine Differenz von 10,7MHz zum Oszillator sondern immer zwei. Die zweite sogenannte Spiegelfrequenz wird allerdings vom Bandpassfilter am Anfang der Signalkette unterdrückt.

Das Zwischenfrequenzsignal wird nochmals mit einem Kanalfilter(IF-Filter) enger selektiert und schlussendlich dem Demodulator zugeführt. Die Menge an möglichen benutzbaren Funkstrecken in einem bestimmten Bereich des Funkspektrums hängt maßgeblich von der Qualität des IF-Filters ab.³⁸

Einen solchen Empfänger, bei dem das Signal auf eine Zwischenfrequenz überführt wird nennt man einen Superheterodyn-Empfänger.

Um die Spiegelfrequenzunterdrückung zu Verbessern und trotzdem den Vorteil eines sehr schmalen Kanalfilters zu erhalten kann ein Doppelsuperheterodyn-Empfänger eingesetzt werden.

Bei dieser Empfängerform wird eine weitere Zwischenfrequenz benutzt bevor das Signal in den Demodulator eingespeist wird.³⁹

³⁶Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.231)

³⁷Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

³⁸Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

³⁹Vgl. Peissig et al. (2023,S.9)

Bei digitalen Receivern wird das von der Antenne aufgenommene Trägersignal wie bei konventionellen Superheterodynempfängern durch einen rauscharmen Verstärker (LNA) verstärkt und in einem Mixer durch einen Lokalen Oszillator auf die gewünschte Zwischenfrequenz konvertiert. Die bei Doppelsuperheterodynempfängern übliche zweite Mixersektion wird durch einen ADC(Analog-Digital-Converter) ersetzt. Der IF-Filter und die Demodulation des Signals findet in der digitalen Domäne durch einen DSP statt.⁴⁰

2.1.5.2 Audio-Stufe

Nach dem Demodulator wird das nun niederfrequente Audio-Signal bei analogen Funkstrecken nun noch einer Reihe an Prozessieren unterzogen. Der Dynamische Umfang des Signals wird durch eine Expander wieder vergrößert. Damit ist die im Transmitter begonnene Komponderschaltung abgeschlossen. Anschließend werden die in der Pre-emphasis verstärkten hohen Frequenzen durch eine zur Pre-emphasis invertierten Filterkurve wieder abgesenkt. Diesen Vorgang nennt man De-emphasis. Das Audio-Signal wird abschließend verstärkt und an den Ausgang weitergeleitet, wo es zur Benutzung abgegriffen werden kann.⁴¹

Bei digitalen Funksystemen sind diese Schritte nicht notwendig, da das in Bits vorliegende Signal nach der Demodulation entweder direkt in einen digitalen Ausgang des Receivers wie Dante weitergeleitet werden kann oder einer Digital-Analogwandlung unterzogen wird um an den physischen Outputs verfügbar zu sein.

2.1.5.3 Diversity

Diversity kann bei Antennen auf mehrere Arten realisiert werden. Um die Verlässlichkeit der Signalaufnahme zu erhöhen werden häufig auch mehrere Methoden simultan eingesetzt.

Spatial Diversity bezeichnet eine Aufstellung der Antennen, deren Grundgedanke darin besteht, zwei Antennen, die das gleiche Signal empfangen sollen räumlich getrennt zu platzieren.

Pattern Diversity bezeichnet eine Methode der Diversity, bei der die Abstrahlungs/-Richtcharakteristiken der Antennen mit denen Diversity realisiert werden soll unterschiedlich sind.

Bei Polarization Diversity werden Antennen so platziert, dass sie unterschiedliche Polarisierung, der elektromagnetischen Welle aufweisen.⁴² Bei Antennensystemen, die für Anwendungen im Bereich des PSME verwendet werden, sind oft mehrere dieser Methoden im Einsatz.

Eine Antenne empfängt nicht nur das auf direktem Wege gesendete Signal, sondern auch dessen Reflektionen z.B. Von Boden, Wänden, oder der Decke. Dieses Konzept nennen wir Mehrwegausbreitung und wird in Kapitel 2.1.6 Fading weiter erläutert. Empfängt nun eine Antenne das gleiche Signal aber von verschiedenen Wegen kann es durch den zeitlichen Versatz den die

⁴⁰Vgl. Fette et al. (2007,S.72)

⁴¹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

⁴²Vgl. Ekwe et al. (2014)

Wege aufweisen zur teilweisen oder auch vollständigen Signalauslöschung kommen, wenn der Versatz der empfangenen Wellen $1/2$ Wellenlänge beträgt. Um den vollständigen Ausfalls des Signals zu verhindern werden sogenannten Diversity-Verfahren eingesetzt. Grundsätzlich bedeutet Diversity bei Antennen, dass zwei Antennen anstelle einer benutzt werden, da die Wahrscheinlichkeit an zwei Antennen gleichzeitig eine durch Mehrwegausbreitung erzeugte Phasenauslöschung zu erhalten sehr gering ist. Dabei ist es auch wichtig zu erwähnen, dass es nicht reicht die Antennen durch einen Combiner zusammenzuführen. Um ein Diversity-System zu erhalten muss die Möglichkeit für den Receiver bestehen zwischen den Antennen umzuschalten.⁴³ Aufgrund des Umgangs im Receiver mit den zwei Antennen lassen sich mehrere Diversity-Verfahren herausarbeiten.

Bei Antenna Switching Diversity ist ein Empfängerkanalzug an zwei Antennen über einen Antennenschalter angeschlossen. Bei einem Signalverlust an einer Antenne kann der Antennenschalter auf die zweite Antenne umschalten.⁴⁴ Eine Unterform dieser Art von Diversity ist die Predictive antenna switching diversity. Bei dieser Form werden die von den Antennen kommenden Signale verglichen und die Antenne wird bereits vor einem kompletten Signalverlust umgeschaltet. Ein Kompletterverlust des Signals durch Phasenauslöschung kann durch die sich rapide verändernde Amplitude des Eingangssignals schon vor der tatsächlichen Auslöschung erkannt und durch Umschalten auf die andere Antenne verhindert werden.⁴⁵

Bei True Diversity Systemen existiert innerhalb des Receivers für jede der beiden Antennen ein eigenständiger Kanalzug. Die Umschaltung zwischen den Antennen findet auf der Audio-Ebene also schon mit dem demodulierten Signal statt. Die Entscheidung welche Antenne an den Output des Receivers weitergeleitet werden soll, basiert also auf der Qualität des erhaltenen Audiosignals.⁴⁶

2.1.5.4 Squelch

Squelch ist ein Prozess der dafür sorgt, dass der Audio-Output des Receivers stumm geschaltet wird wenn das dem Receiver zugeordnete Funkmikrofon kein Signal sendet. So soll der Squelch dafür sorgen das andere, auf der selben Frequenz wie der Receiver existierenden Funkwellen, die nicht dem Funkmikrofon entspringen nicht weitergegeben werden.

Es lassen sich einige unterschiedliche Arten von Squelch unterscheiden. Bei der einfachsten Form dem Amplitude Squelch wird der Audio-Output des Receivers unter einem bestimmten Pegel an RF-Signal stummgeschaltet. Bei dieser Squelch Schaltung kann allerdings jede Interferenz des RF-Signals über der festgesetzten Pegelgrenze (Threshold) den Squelch öffnen und so Störgeräusche durchlassen.

⁴³Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

⁴⁴Vgl. Peissig et al. (2023,S.6)

⁴⁵Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

⁴⁶Vgl. Peissig et al. (2023,S.6)

Noise sensitive Squelch kann die Qualität des Signals erkennen, da RF-Störgeräusche eine sehr charakteristische Form haben. So bleibt diese Form des Squelch auch für hohe RF-Störgeräuschpegel geschlossen.

Eine weitere Form ist der Tone-Key-Squelch. Bei diesem Prozess sendet der Transmitter zusätzlich zu seinem normalen Signal einen speziellen mit dem Receiver abgestimmten Signalton. Nur wenn dieser Ton empfangen wird öffnet der Squelch den Audioausgang des Receivers. Über diesen Tone Key können auch Zusatzinformationen wie Batteriestand des Transmitter übertragen werden.⁴⁷

Eine digitale Variante des Squelch ist der DCS(Digital-Coded Squelch). Bei dieser Variante wird ein „Codewort“ mit dem normalen Signal in bits übertragen. Der Squelch öffnet den Audioausgang des Receivers nur solange er das Codewort vom Transmitter empfängt.⁴⁸

2.1.6 Fading

Bei der Signalausbreitung von elektromagnetischen Wellen kommt es zu sogenanntem Fading(Schwund). Fading bezeichnet also die Abschwächung des RF-Signals. Je nach Grund der Signalabschwächung ist der Signalabfall entweder dem Large Scale Fading oder dem Small Scale Fading zuzuordnen.

„Large Scale Fading bezeichnet die Signaldämpfung entlang einer größeren Entfernung zwischen Sender und Empfänger inklusive zusätzlicher Abschattung oder Dämpfung aufgrund von Gegenständen im Ausbreitungspfad.“⁴⁹

Small Scale Fading bezeichnet Änderungen der Phase und der Amplitude des Empfangssignals, die von kleineren Orts oder Laufzeitunterschieden stammen. Dabei kann die Ursache für das Small Scale Fading entweder eine zeitliche Varianz des Funkkanals, durch Bewegung ausgelöst oder Mehrwegausbreitung, wie schon in Kapitel 2.1.5.3 Diversity erwähnt, sein.

Zeitliche Variationen des Funkkanals erzeugen einen Dopplereffekt, der dafür sorgt, dass eine spektrale Verbreiterung des abgestrahlten Funksignals am Empfänger auftritt. Je nachdem, ob die zeitliche Veränderung des Kanals langsamer oder schneller ist als die des Übertragungssignals spricht man von Slow/Fast-Fading.⁵⁰

Mehrwegausbreitung bezeichnet das Phänomen, dass ein vom Transmitter gesendetes Signal verschiedene Wege vom Transmitter bis zu den Empfangsantennen des Receivers nehmen kann. Dies geschieht durch Reflexionen an Wänden oder Decken, Streuung an Gegenständen und Beugung an Kanten. Da diese Wege in den meisten Fällen unterschiedliche Längen aufweisen, und die Signale so unterschiedlich lange brauchen, bis sie am Receiver angekommen sind, weisen

⁴⁷Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Processing)

⁴⁸Vgl. Digital-Coded Squelch (DCS) - Signal Identification Wiki(2025)

⁴⁹Peissig et al. (2023,S.5)

⁵⁰Vgl. Peissig et al. (2023,S.5)

die Signale bei der Ankunft unterschiedliche Amplituden und Phasen auf. Wenn ein reflektiertes Signal sich nun mit dem direkten Signal überlagert, kann es je nach Phasenlage des reflektierten Signals zu destruktiven Auslöschungen bzw. Interferenzen kommen. Bei einer geringen Phasenabweichung wird dadurch das Signal entsprechend abgeschwächt. Bei einem Phasenversatz von einer halben Wellenlänge kann es jedoch auch zur vollständigen Auslöschung des Signals kommen.

Dieses Problem lässt sich nicht mithilfe einer Erhöhung der Sendeleistung Seitens des Transmitter lösen, da das Verhältnis zwischen direkt abgestrahltem Signal und den jeweiligen Reflektionen gleichbleibend ist.⁵¹ Deswegen werden zur Lösung dieses Problems Diversity Verfahren eingesetzt.

2.2 Antennenplatzierung

Die Platzierung der Antennen ist eine der wichtigsten Entscheidungen beim Aufbau eines Funksystems. Die Möglichkeiten und Anforderungen variieren hier stark je nach den örtlichen Begebenheiten und anderen veranstaltungsabhängigen Faktoren. Einige allgemein gültige Regeln lassen sich jedoch benennen.

Bei der Platzierung von Antennen für ein Funksystem zur drahtlosen Audioübertragung ist immer eine Sichtlinie zwischen der Sendeantenne und der Empfängerantenne zu wahren. Vor allem wenn es sich um eine Veranstaltung mit vielen Menschen handelt, ist es deswegen empfehlenswert die Antenne über zwei Meter bzw. über der Kopfhöhe zu platzieren. So kann verhindert werden, dass die von den Sendeantennen ausgestrahlte Sendewelle durch die Veranstaltungsbesucher absorbiert wird. In Hallen oder geschlossenen Räumen kann es auch empfehlenswert sein, die Antenne an der Decke anzubringen. Dabei ist allerdings die Richtcharakteristik der jeweiligen Antenne zu beachten.⁵²

Wie schon in Kapitel 2.1.3 erwähnt spielt die Polarisierung der elektromagnetischen Welle eine große Rolle für die Fähigkeit der Receiverantennen die Senderwelle zu empfangen. Im Idealfall ist es wünschenswert, dass die Sendeantenne und die Empfangsantenne parallel zueinander ausgerichtet sind, um bei beiden die gleiche Polarisationsausrichtung zu erreichen. Dies ist allerdings in der Praxis nicht durchgängig möglich, da sich zum einen Sender wie Belpacks und Handsender auf der Bühne bewegen und in ihrer Ausrichtung ändern zum anderen ändert sich die Polarisierung der elektromagnetischen Wellen wenn sie reflektiert werden. Um sicherzustellen, dass in jedem Fall der Senderausrichtung eine genügend gleichartige Polarisierung erreicht werden kann ist es bei Diversity Systemen mit zwei oder mehr Antennen notwendig die jeweilige A und B Antenne in einem 90 Grad Winkel zueinander auszurichten. So ist eine der Antennen vertikal

⁵¹Vgl. Peissig et al. (2023,S.5-6)

⁵²Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

polarisiert und die andere horizontal. ⁵³ Bei Helixantennen ist dies nicht zu beachten, da sie aufgrund ihrer Bauform keine Polarisationsausrichtung aufweisen.

Bei der Platzierung der Antennen sind außerdem nahe parallele Metalloberflächen und Objekte zu vermeiden. Dazu zählen sowohl Racks aber auch andere Antennen. Die nahe Platzierung an derartige Objekte ist zu vermeiden, da die Reflexionen dieser nahen Metallstrukturen die Empfangsfähigkeit der Antenne stören, indem sie die Richtcharakteristik durch Reflexionen un stetig machen. Auch andere Empfangs und Sendeantennen zählen zu dieser Art Metallstrukturen. Deswegen ist es bei einem Aufbau mit mehreren Receivern vorteilhaft mit Antennenverteilern zu arbeiten, um die Anzahl der gleichzeitig aktiven Receiverantennen so weit wie möglich zu reduzieren.⁵⁴

Bei der Entfernung von Sendeantennen an den Transmittern und der Empfangsantennen ist als Faustregel ein Mindestabstand von drei Metern einzuhalten um zu verhindern, das ein zu hoher RF Pegel in den Receiver gelangt. Dieses Phänomen wird als Overload bezeichnet und die meisten modernen Funkreceiver zeigen im Falle eines Overloads eine Warnmeldung. Besonders bei der Benutzung mehrere Funksender gleichzeitig ist dies wichtig, da die Intermodulationen, die zwischen den Funksendern entstehen abhängig von ihrer Nähe zueinander einen stärkeren RF-Pegel entwickeln. ⁵⁵

Auch die Entfernung der beiden Antennen in einem Diversity System hat eine Auswirkung auf die Funktionsfähigkeiten des Funksystems, insbesondere auf dessen Fähigkeit, die Folgen von Mehrwegausbreitung zu kompensieren . Da räumliche Diversitätssysteme in ihrer Funktionsweise davon abhängig sind, dass sich die Antennen an verschiedenen Punkten im Raum befinden, dürfen diese keinesfalls direkt aneinanderliegen. Um überhaupt einen Vorteil aus einem Diversity System zu beziehen müssen die beiden Antennen einen Mindestabstand von einer Viertel-Wellenlänge ihrer Empfangsfrequenz zueinander haben. Um jedoch einen optimalen Vorteil durch Diversity Antennen zu erzielen, ist es notwendig die Antennen mindestens eine vollständige Wellenlänge voneinander entfernt zu Platzieren.⁵⁶ Bei einem UHF-Funksystem wie sie zurzeit in PSME gängig sind beträgt dieser Mindestabstand ca. 60 cm. Es ist möglich die Antennen weiter auseinander zu platzieren als eine volle Wellenlänge, wenn es die Beschaffenheit des Veranstaltungsraumes nicht anders zulässt, dadurch lässt sich jedoch kein weiterer Vorteil erzielen.

Bei Veranstaltungen bei denen mehrere separate Funksysteme gleichzeitig im Einsatz sind, sollte auch zwischen den Antennen dieser ein Abstand gehalten werden. Dies gilt besonders für Sendeantennen von In-Ear-Monitoring Systemen (IEMs). Wenn gleichzeitig zu den Receivern ein

⁵³Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

⁵⁴Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

⁵⁵Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

⁵⁶Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

IEM System aktiv ist sollten die Empfängerantennen der Receiver immer hinter der Sendeantenne des IEMs platziert werden, da IEM- Senderantennen oft mit einer wesentlich höheren Leistung senden und dadurch den Funkempfang an den Empfängerantennen stören könnten. Um dies optimal umzusetzen ist es außerdem notwendig eine gerichtete Senderantenne für das IEM zu verwenden. Der empfohlene Abstand einer IEM- Sendeantenne zur Empfangsantenne beträgt mindestens zwei Meter.⁵⁷

Zuletzt lässt sich zum Thema der Antennenplatzierung noch hinzufügen, dass es sich bei den hier vorgestellten Regeln nicht um in jedem Fall exakt auszuführende Regeln, sondern eher um Richtlinien handelt. Es ist durchaus möglich, dass ein Funksystem auch unter Missachtung einer oder mehrere dieser Regeln einwandfrei funktioniert. Besonders bei Funksystemen, die nur wenig Reichweite oder Kanäle benötigen ist es oft unkritischer wie die Antennen platziert werden. Wenn jedoch Probleme auftreten kann es sinnvoll sein nachzuprüfen ob sich das Problem durch die Replatzierung der Antennen lösen lässt. ⁵⁸

2.3 Antennenverkabelung

Wenn die Antennen eines Funkempfängers nicht direkt an den Receiver sondern an einer anderen Stelle im Raum angebracht werden sollen, muss der Signalverlust im Kabel besonders beachtet werden, da dieser bei UHF Frequenzen in einem Koaxialkabel schnell ein akzeptables Maß überschreitet. Die verwendeten Kabel haben typischerweise einen Widerstand von 50 Ohm. Ein Verlust von fünf dB Signalstärke in der Verkabelung zwischen Antenne und Receiver gilt als Obergrenze des akzeptablem Verlusts.⁵⁹ Ab dieser Grenze ist es notwendig das Signal mit einem Signalverstärker anzuheben um den Verlust im Kabel zu kompensieren.

Der Verlust, den das Signal im Kabel erleidet ist maßgeblich abhängig von der verwendeten Kabelart und der zu übertragenden Frequenz. ⁶⁰

⁵⁷ Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

⁵⁸Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Placement)

⁵⁹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Cabling)

⁶⁰Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Cabling)

dB ATTENUATION OF STANDARD COAXIAL CABLE											
CABLE TYPE	RG-174	RG-58	RG-58/U	RG-58X	RG-59	RG-213	RG-214	RG-6	RG-11	RF9913	RF-9914
dB LOSS PER 100 FEET											
FREQUENCY											
1 MHz	1.9	0.4		0.5		0.2		0.2	0.2	0.2	0.3
10 MHz	3.3	1.4		1.0		0.6		0.6	0.4	0.4	0.5
30 MHz			2.5	2.0		1.2	1.2			0.8	0.8
50 MHz	6.6	3.3	3.1	2.5	2.4	1.6	1.6	1.4	1.0	1.1	1.1
100 MHz	8.9	4.9		3.6	3.4	2.2		2.0	1.6	1.4	1.5
144 MHz		6.2		4.6		2.7	2.7			1.6	
150 MHz			6.2	4.7		2.8	2.8			1.7	1.7
200 MHz	11.9	7.3		5.4		3.3		2.8	2.3	1.8	2.0
220 MHz		7.4	7.4	6.0		3.5	3.5			2.1	2.1
400 MHz	17.3	10.1		7.9	7.0	4.8		4.3	3.5	2.6	2.9
450 MHz		10.6	10.6	8.6		5.2	5.2			3.1	3.1
700 MHz	26.0	16.9		11.0		6.6		5.6	4.7	3.6	3.8
900 MHz	27.9	20.1	16.5	12.6	11.1	7.9	7.9	6.0	5.4	4.1	4.5
915 MHz		20.2		12.8		8.0	8.0			4.2	

Abb.23 Signalverlusttabelle

In Abb. 23 sind einige häufig verwendete Kabelarten für die Antennenverkabelung sowie ihr Signalverlust über 100 ft (ca. 30m) aufgezeigt. Da der im Kabel stattfindende Verlust stark variieren kann ist es wichtig immer zu wissen welches Kabel für welche Strecke verwendet wird. So eignet sich z.B. Ein Kabel des Typs RG-58U nicht für eine Kabelstrecke von 30 Metern, da während des Kabelwegs ein Pegelverlust von 16.9 dB im UHF-Bereich zu erwarten ist. Dies überschreitet den akzeptablen Verlust von fünf dB um ein Vielfaches. Um Kabelstrecken von 30 Metern zu bewältigen ist es folglich sinnvoller ein Kabel des Typs RG-213 zu verwenden. Dies überschreitet zwar auch den auf fünf dB gesetzten Grenzwert, dies lässt sich aber mithilfe eines Antennensignalverstärkers oder einer aktiven Antenne mit eingebautem Signalverstärker ausgleichen.



Antennensignalverstärker dieser Art brauchen keine eigene Stromversorgung, da sie über den typischerweise am Antennenkabel schon anliegenden Strom versorgt werden über den z.B. auch aktive Antennen betrieben werden. Antennenverstärker sollten immer so nah wie möglich an der Antenne eingeschleift werden. Da es nicht möglich ist unendlich viele Verstärker oder aktive Antennen mit dem bereits anliegenden Strom zu versorgen ist es ab einer gewissen Anzahl an

Abb.24 Shure UA834WB
Antennenverstärker

Verstärkern/aktiven Antennen notwendig weiteren Strom in das Kabel einzuspeisen. Dies ist zum Beispiel mit einem BiasT möglich.⁶¹ Die Anzahl der Verstärker die ein Receiver ohne weitere aktive Stromversorgung betreiben kann ist Herstellerabhängig.

Verlust von Signal muss immer über den kompletten Signalweg berechnet werden.

2.4 Antennensplitter/combiner

Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt ist es, um ein Funksystem mit möglichst wenig Fehleranfälligkeit zu konzipieren sinnvoll, die Anzahl der gleichzeitig benutzten Empfangsantennen so weit wie möglich zu reduzieren. Dies gelingt mit Antennensplitttern. Es existieren sowohl passive als auch aktive Antennensplitter, wobei bei den passiven der Signalverlust, der durch das Aufteilen des Antennensignals eintritt, zu beachten ist.

Der Signalverlust, der durch einen passiven Antennensplitter eintritt kann mit ungefähr 3.5dB benannt werden. Daraus folgt, dass das passive Aufteilen von Antennensignalen nicht mit mehr als zwei unterschiedlichen Empfängern sinnvoll ist, da sonst die Verlusttoleranzgrenze überschritten werden würde, wenn keine weitere Signalverstärkung erfolgt.⁶²



Abb.25 Passiver Antennensplitter

Ab drei gleichzeitig aktiven Funkempfängern, die vom gleichen Diversity Antennenpaar gespeist werden sollen, ist es also notwendig, einen aktiven Antennensplitter zu benutzen, um jedem Receiver ein optimales Signal zu liefern. Aktive Antennensplitter verteilen das eingehende Antennensignal nicht nur auf mehrere Ausgänge, sondern führen an jedem Ausgang eine Antennenverstärkung zu, die das durch das Splitting verlorene Signal ausgleicht. Falls der Fall



Abb.26 Aktiver Antennensplitter Shure UA844

⁶¹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Cabling)

⁶²Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Distribution)

eintritt, dass die vom Antennensplitter bereitgestellten Ausgänge nicht ausreichen, ist es möglich, die Ausgänge des Splitters weiteren Splittern zuzuführen, die wiederum mehr Ausgänge zur Verfügung stellen. Bei Aktiven Antennensplitttern gilt es, wie zwischen Antennen und Receivern, darauf zu achten, dass er im selben Frequenzbereich operiert, wie die anderen Bauteile des Funksystems.

Manche Funkreceiver haben außerdem für den Betrieb von nur wenigen Geräten einen Durchschleif(Cascade) -anschluss, an den ein weiterer Receiver ohne Splitter direkt angeschlossen werden kann.⁶³

Bei manchen Anwendungsfällen ist es notwendig einen Receiver mit mehr als einem Antennepaar zu versorgen. Dies ist zum Beispiel bei Veranstaltungsorten mit mehreren Räumen, bei extrem weitläufigem Gelände oder großen Hallen, bei denen ein Paar Antennen keine vollständige Abdeckung erreichen kann, der Fall. In diesen Fällen werden mehrere Antennen durch sogenannte Antennencombiner zusammengeführt, bevor ihr Signal an den Receiver weitergegeben wird.

Um Empfangsantennen zusammenzuführen kann man entweder passive Bauteile oder aktive Antennencombiner verwenden, bei passiven Bauteilen spielt der Signalverlust wieder eine große Rolle. Um nun zwei Antenne miteinander zu „kombinieren“ werden die schon in Abb.25 als Antennensplitter vorgestellten Bauteile umgekehrt verwendet. Trotzdem ist ein Signalverlust von 3.5dB zu beachten.

In Abb.27 ist ein Beispiel eines einfachen Zwei-Raum-Setups mit vier Antennen gezeichnet. Um das Diversity Verfahren über den kompletten Bereich, der abgedeckt werden soll, weiterhin durchzuführen, müssen in jedem Raum je eine A und eine B Antenne platziert werden. Je nach Raumanzahl bzw. Kabellänge kann es hier wieder notwendig sein einen Antennenverstärker in die jeweiligen Signalketten einzuschleifen.

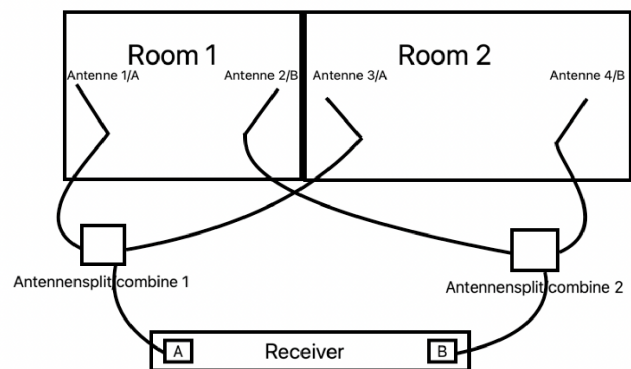


Abb.27 Zwei-Raum-Setup

Umgekehrt kann auch ein IEM System mit ansonsten mehreren Sendeantennen zu einem System zusammengefasst werden, indem die Antennenoutputs in einen aktiven Antennencombiner zusammengeführt und schließlich deren Signale über eine zentrale Sendeantenne ausgestrahlt werden.⁶⁴

⁶³Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Distribution)

⁶⁴Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antenna Distribution)

3. Technische Anforderungen verschiedener Live Events an Drahtlossysteme

Neben den Veranstaltungsspezifischen Anforderungen an Funksysteme lassen sich auch einige allgemeine Anforderungen formulieren.

Generell ist eine Laufzeit von über sechs Stunden für die Audiosender gewünscht, um einen reibungslosen Ablauf der Veranstaltung zu gewährleisten. Weiterhin ist eine Sendeleistung des jeweiligen Transmitter zwischen 10-50mW eine allgemeine Voraussetzung für Funksysteme.

Auch für die Bandbreite des Kanals bei Schmalband-Drahtlossystemen gibt es Anforderungen bzw. Konventionen. Die typischerweise belegte HF- Bandbreite beträgt 200kHz. Um den Anforderungen eines qualitativ hochwertigem Audiosignal zu entsprechen sollte außerdem der Signal-Rauschabstand mindestens 110 dBA betragen. Weiterhin sollten moderne, digitale Mikrofonsysteme eine HF- Nachbarkanalselektion von mindestens 70 dBA aufweisen und eine hohe Immunität gegenüber HF-Blocking besitzen.⁶⁵

3.1 Konzerte

Die Anforderungen die ein Drahtlossystem erfüllen muss stehen in starker Abhängigkeit mit der Größe und Art des Konzerts. Für musikalische Applikationen spielt jedoch die Klangqualität immer eine große Rolle. Ein für den Live-Musik gemachtes Funksystem muss also in der Lage sein den kompletten hörbaren Frequenzbereich zwischen 20-20000Hz mit einem Dynamikumfang von 120 dB unverzerrt zu übertragen. Um dies zu erreichen ist bei digitalen Funksystemen eine 24bit Analog-Digital Wandlung mit einer Abtastrate von 48kHz notwendig.⁶⁶

Weiterhin spielt im Live-Musikbereich Verlässlichkeit eine große Rolle. So sollten Dropouts (kurze Ausfälle des Audiosignal aufgrund von Signalverlust des Funkempfängers) komplett vermieden werden. Deswegen werden im Konzertbereich ausschließlich Systeme eingesetzt, die mindestens ein Diversity-Verfahren aufweisen.

Verlässlichkeit spielt aber auch eine Rolle, wenn es um die Bauart des Equipments geht. Sowohl Sender als auch Empfänger können unter Umständen erheblichen Belastungen ausgesetzt sein. Eine stabile Bauform beider Bauteile ist also für den Live-Betrieb notwendig.⁶⁷

Funksysteme die im Touring-Bereich Anwendung finden sollten aufgrund der ständig wechselnden verfügbaren Funkfrequenzen außerdem einen größeren nutzbaren Frequenzbereich aufweisen, indem sie operieren können. Auch die Anzahl der verfügbaren Kanäle in einem gegebenen Frequenzbereich ist hier oft besonders wichtig, da bei größeren Produktionen eine große Anzahl von Funkkanälen- sowohl Mikrofone als auch IEMs- in einem begrenzten Frequenzbereich Platz

⁶⁵Vgl. Peissig et al. (2023,S.16)

⁶⁶Vgl. Peissig et al. (2023,S.16)

⁶⁷Vgl. Shure Performance & Production(2023)

finden müssen. So besitzen viele Drahtlossysteme im hochpreisigen Bereich, die für Live Applikationen und Turing ausgelegt sind spezielle Modi mit denen die notwendige Kanalbreite oder Schutzzonen verkleinert werden, um mehr Funkkanäle zu ermöglichen. Diese Modi heißen beispielsweise LD(LinkDensity) bei Sennheiser oder HD(HighDensity) bei Shure.⁶⁸⁶⁹

Oft ist auch die Fähigkeit, kritische Einstellungen des Systems aus der Ferne zu Kontrollieren und zu Überwachen ein für auf Konzerten (und eigentlich allen möglichst ausfallsicher zu machenden Events) benutzte Drahtlossysteme wichtiges Feature.

Letztlich ist auch Feedbacksicherheit eine Attribut, das von Livemikrofonen erwartet wird. Obwohl dies nicht direkt den Einsatz von Drahtlossystemen betrifft so ist diese jedoch direkt abhängig von Qualität, Bauform und Richtcharakteristik der verwendeten Mikrofonskapsel. Um deswegen flexibel auf verschiedenste Situationen reagieren zu können, kann ein Drahtlossystem mit Wechselkapselsystem eingesetzt werden, bei dem, wie der Name suggeriert, die Kapsel nicht fest mit dem Funksender verbaut ist, sondern wechselbar ist.⁷⁰

Ein weiteres Merkmal mit dem Funksysteme bewertet und zur Verwendung für verschiedenste Anforderungsstellungen zugeordnet werden können, ist die Latenz des jeweiligen Funksystems.

Digitale Funksysteme weisen- anders als analoge Systeme, eine Latenz auf die je nach ihrer Höhe einen Einsatz in bestimmten Eventsituationen unmöglich macht. Latenzen bei Digitalen Systemen liegen typischerweise bei 2-5ms, können aber stark zwischen den unterschiedlichen Systemen variieren, vor allem, wenn die Funksysteme sich in ihrer Preisklasse unterscheiden.⁷¹ Diese Latenzen werden durch jede Wandlung des Audiosignal von der Digitalen in die Analoge Domäne und umgekehrt erhöht. Dabei muss beachtet werden, dass nicht ausschließlich die Latenz des vorliegenden Funksystems, sondern die Latenz des gesamten Signalweges betrachtet werden muss, da beispielsweise Tonpulte, eingeschliffene Signal-Prozessoren oder ähnliches eigene Systemlatenzen aufweisen, die bei der Berechnung der Gesamt-Latenz beachtet werden müssen. Besonders bei Veranstaltungen, die in den Bereich der Live-Musik fallen ist diese Latenz ein wichtiger Faktor in der Systemauswahl. Dies gilt insbesondere für den Bereich des Monitoring, also dem Signal, dass die Künstler auf der Bühne beschallt. Wenn bei einer Veranstaltung ein drahtloses Monitoring System realisiert werden soll sind dafür die schon vorgestellten IEM-Systeme zuständig. Bei diesen ist auf eine niedrige Latenz besonders Wert zu legen, da das Zusammenspiel von IEM-System und natürlichem Knochenschall bei zu hoher Latenz Audioartefakte auftreten lässt, die deutlich wahrgenommen werden können. ⁷²Typischerweise werden Latenzen vom menschlichen Gehör ab zehn ms wahrgenommen und als störend empfunden, dies wird aber von jedem Musiker unterschiedlich wahrgenommen und bewertet, so dass manche auch höhere oder nur niedrigere Latenzen akzeptieren.⁷³

⁶⁸Vgl. Lorenz, A. (2024)

⁶⁹Vgl. Axient Digital - Digitales Drahtlossystem - ShURe Germany(o. D.)

⁷⁰Vgl. Shure Performance & Production(2023)

⁷¹Vgl. Peissig et al. (2023,S.15)

⁷² Vgl. Peissig et al. (2023,S.15)

⁷³Vgl. Henshall (2015b)

3.2 Firmen/Politische Events

Natürlich gilt für Firmen/Politische Events vieles, dass auch für Konzerte gilt. Vor allem auf Ausfallsicherheit ist bei solchen Events wieder ein besonderes Augenmerk zu legen. Dies geht soweit, dass bei als besonders wichtig angesehenen Events Redner teilweise zwei Mikrofone mit auch zwei Beltpacks tragen, die je auf unterschiedlichen Frequenzen senden.⁷⁴ So kann sichergestellt werden, dass auch bei einer Interferenz auf einer der Frequenzen oder einer anderen Störung in einem der Mikrofone die Veranstaltung ohne Unterbrechung fortgeführt werden kann. Die Klangqualität ist bei solchen Events auch entscheidend, auch wenn es nun nicht mehr um eine Übertragung des gesamten hörbaren Frequenzbereiches, sondern eher um die Sprachverständlichkeit geht, die nun im Zentrum der Anforderungen steht. Die Anforderungen an die Bauform von Bauteilen eines drahtlosen Mikrofonsystems bei Firmen oder Politischen Events unterscheiden sich außerdem in denen von Konzerten dadurch, dass häufig ein möglichst unauffälliges oder kompaktes Design gewünscht wird. Dies gilt sowohl für die verwendeten Headsets, als auch für Beltpacks und dergleichen.

Bei bestimmten Veranstaltungen, bei denen die während der Veranstaltung besprochenen Inhalte nicht für die Allgemeinheit bestimmt sind, ist es zusätzlich notwendig ein Funksystem zu wählen, zu dessen Features die Verschlüsselung des Signals zwischen Sender und Empfänger gehört. So bieten sowohl Sennheiser als auch Shure Funksysteme an, in deren Funktionsumfang 256bit AES(Advanced Encryption Standard) Verschlüsselung beinhaltet ist.⁷⁵ ⁷⁶ Zusätzlich zu diesen Anforderungen gilt es außerdem den jeweiligen Redner oder die Rednerin soweit wie nur möglich durch einfaches Handling aller technischen Geräte zu entlasten. Da in Situationen von Firmen/ Politischen Events oftmals auch unerfahrene Akteure auf der Bühne Reden halten, gilt es hier die Anzahl der möglichen Handling bezogenen Fehlerquellen so weit wie möglich zu eliminieren. Fehler im Handling des Mikrofons können bei Handsendern beispielsweise durch die falsche Positionierung des Mikrofons in Relation mit dem Mund entstehen. Da die Mikrofonkapsel häufig mit zu großer Entfernung oder in einem der Richtcharakteristik abträglichen Winkel in Relation zur Schallquelle gehalten wird müssen hier sowohl eine hohe Feedbacksicherheit als auch eine der Sprechersituation angepasste Richtcharakteristik beachtet werden. Dies ist notwendig um während der Vortragssituation auch unter erschwerten Bedingungen einen angemessen hohen Pegel zu erhalten, der eine adäquate Beschallung ermöglicht.

Eine weitere Fehlerquelle im Bereichs des Handlings ist der oftmals an Handsendern frei zugängliche Off-Button, der den Handsender von seiner Stromversorgung trennt und somit die Audioübertragung unterbricht. Dieser befindet sich bei vielen Handsendermodellen in der Griffregion und kann so versehentlich betätigt werden. Da dies zu einem unerwünschten Audioausfall und im schlimmsten Fall zu einer Unterbrechung der Veranstaltung führen kann gilt es

⁷⁴Vgl. [STERN.de](https://www.stern.de)(2025)

⁷⁵Vgl. EW-DX für Unternehmen | Sennheiser(o. D.)

⁷⁶Vgl. Axient Digital - Digitales Drahtlossystem - ShURe Germany, (o. D.)

diese Fehlerquelle zu beseitigen. Zu diesem Zweck ist es bei den meisten Handsendermodellen möglich den integrierten Aus-Schalter softwareseitig zu deaktivieren. Dies spiegelt sich bei Shure-Handsendern beispielsweise in der Power-Lock Funktion wider. Bei vielen Beltpacks ist diese Power-Lock-Funktion ebenfalls verfügbar, da auch bei diesen der Aus-Schalter versehentlich betätigt werden kann.

3.3 Messen

Da bei Messen oft sehr viele unabhängige Stände auf engstem Raum mit eigener Technik arbeiten, ist bei Drahtlossystemen für diesen Anwendungszweck ein besonderes Merkmal auf die Interferenzsicherheit zu legen. Da Veranstaltungen dieser Art häufig in dicht besiedelten Gebieten stattfinden, ist das das für temporär aufgebaute Funksysteme verfügbare Spektrum meist von zahlreichen Signalen unterschiedlichster Herkunft überfüllt. Um diese Hürden verlässlich überwinden zu können ist es notwendig regelmäßige Überprüfungen des Frequenzspektrum vorzunehmen. Außerdem ist bei Anwendungen, bei denen das Funkfrequenzspektrum stark überfüllt ist, eine hohe spektrale Effizienz des Funksystems wünschenswert.

3.4 Durchsagen auf weitläufigem Gelände

Manche Veranstaltungsarten wie Sportevents oder ähnliches haben spezielle, erhöhte Anforderungen an die Reichweite von den während des Events zu Benutzenden Funksystemen. Diese Anforderungen lassen sich nicht allein durch die Wahl eines Gesamtfunksystems sondern nur durch die richtige Auswahl an Antennen, Verkabelung und einem geeigneten Splitter/Combinersystem erfüllen.

Je nach Größe oder Beschaffenheit der Veranstaltungsfläche kann es möglich sein spezielle Richtantennen oder auch mehrere Antennen zu verwenden. Wie schon in Kapitel 2.3 erwähnt muss bei einer vom Receiver separaten Antennenposition auch die Verkabelung und der damit einhergehende Signalverlust beachtet werden.

3.5 Broadcast und TV-Aufnahmen

Im Bereich des Broadcast und der TV-Aufnahmen können sich für Drahtlossysteme je nach spezifischer Arbeit unterschiedliche Anforderungen ergeben. Die Audioqualität spielt bei Aufnahmen, für Film und Fernsehen natürlich eine große Rolle. Besonders kleine Taschensender um Mikrofone bei Aufnahmen besser verstecken zu können, mobile Kleinstempfängersysteme die direkt mit der aufnehmenden Kamera verbunden werden können oder weitere Spezialteile können im Broadcast Bereich notwendig sein, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Komplette wasserdichte Sender und Mikrofone sind, um ansonsten unmögliche Aufnahmen unter oder nah am Wasser zu realisieren notwendig, was zum Beispiel für einige Reality-TV oder Sportevents Aufnahmen notwendig ist.⁷⁷

⁷⁷Vgl. Mikrofone für den Broadcast-Bereich(o. D.)

Wenn die TV-Übertragung z.B. begleitend zu einer schon laufenden Veranstaltung stattfindet ist außerdem eine umfassende Koordinierung der Funkfrequenzen notwendig um Interferenzen vorzubeugen.

3.6 Übertragung von Messmikrofonen zum Systemtuning

Da das Kabellegen für Messmikrofone, deren Zweck es ist Daten für Systemtuning zu sammeln häufig unpraktikabel und zeitaufwendig ist, werden Drahtlossysteme häufig auch für diesen Zweck eingesetzt. Um die Messmikrofone zu Übertragen werden hierbei Aufstecksender wie die schon vorgestellten Shure AD3 oder Sennheiser SKP eingesetzt. Diese Aufstecksender können an jedem beliebigen Mikrofon mit XLR-Output benutzt werden, im Falle des System Tunings also an Messmikrofonen. Der Receiver ist in ein Messrack eingebaut und leitet das Signal in die Software weiter, in der die Messungen durchgeführt werden. Bei dieser Art der Anwendung ergeben sich spezielle Anforderungen wie ein komplett linearer Frequenzgang und eine unveränderte Übertragung der Phase des Signals. Die Latenz der Funkstrecke, sofern es sich den um eine digitale Funkstrecke handelt, kann hier vernachlässigt werden, da immer nur der relative Versatz von Lautsprechersignalen relevant ist.

3.7 Zusammenfassung

Obwohl die Anforderungen an Funksysteme sich bei jedem Event unterscheiden, kann man bei der Auswahl des Funksystems einige Fragen formulieren, die die Auswahl des Systems sowie seiner Einzelteile erleichtern.

Eine der zentralen Fragen bei der Auswahl eines drahtlosen Mikrofonsystems, ist die Anzahl an Kanälen, die gleichzeitig aktiv sein sollen. Dies bestimmt maßgeblich die Wahl des Funksystems, da z.B. Ein Shure SLX-D System 10 Kanäle pro 6Mhz ein Axient Digital System aber 17 Kanäle in einem gleich großen Frequenzbereich unterstützt.⁷⁸ Die jeweils von einem Funksystem unterstützte Kanalanzahl ergibt sich sowohl aus der Qualität der im Receiver verbauten Komponenten und Software, wie IF-Filter, Bandfilter, Modulationart, Kanalbandbreite, notwendige Schutzabstände zwischen den Kanälen sowie weiteren schon in Kapitel 2.1.5 behandelten Faktoren.

Weiterhin gilt es die Räumliche Situation zu beachten in der das Funksystem spielen soll. Die Größe des Geländes bzw. die Anzahl und Größe der Räume ist eine Information, die bei der Auswahl und Installation der verwendeten Antennen unbedingt beachtet werden sollte.⁷⁹

Insgesamt ist natürlich auch die Art der Veranstaltung ausschlaggebend für die Wahl des Funksystems. Es ist immer vorteilhaft so viele Informationen wie möglich über Einsatzort, Einsatzdauer, Witterungsbedingungen und Anwender zu haben.

⁷⁸Vgl. Shure Incorporated(o. D.)

⁷⁹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Antennas)

4. Frequenzmanagement von Funksystemen

4.1 Notwendigkeit des Frequenzmanagements

Grundlegend wird Frequenzmanagement betrieben um Störungen und Interferenzen innerhalb der Funkkanäle vorzubeugen. Diese können bei einem nicht koordinierten System sowohl innerhalb des Systems, also zwischen den einzelnen Funkkanälen, aber auch durch in der Nähe des Veranstaltungsortes erzeugte, anderweitige RF-Strahlung hervorgerufen werden. Einer der größten potenziellen Interferenzhersteller sind beispielsweise Rundfunkkanäle im TV-UHF Band. Da die Nutzung von Funkkanälen für den PSME-Bereich in den zugewiesenen Bändern nur einer Sekundärnutzung entspricht und es somit auch immer potenziell andere Nutzer in diesen Bereichen gibt, ist es zwingend erforderlich, das Frequenzspektrum an jedem Veranstaltungsort zu überprüfen und seine Funkkanäle auf dementsprechend freie Kanäle zu koordinieren.⁸⁰ Die Notwendigkeit für Frequenzmanagement ist außerdem durch die Digitalen Dividenden, bei denen die für PSME vorgesehenen Frequenzbänder mehrfach verändert und verkleinert wurden, gestiegen.

4.2 Digitale Dividende I und II

Als Digitale Dividende wird im allgemeinen eine Umverteilung der Gebrauchsrechte des Frequenzspektrums beschrieben.

„Man versteht hierunter den Versuch, das aus der Digitalisierung der Übertragungswege resultierende Potential an zusätzlichen Nutzungsmöglichkeiten effizienter auszunutzen.“⁸¹

Durch den neuen DVB-T Standard in der terrestrischen Rundfunkübertragung konnten Übertragungen effizienter gestaltet werden.⁸² Die dadurch freigewordenen Frequenzbereiche wurden im Zuge dieser Entwicklungen von den Regulatorischen Behörden anderen Diensten zugeteilt und versteigert.⁸³ Von dieser Entwicklung waren auch drahtlose Audioübertragungssysteme betroffen, die bis dahin im Rahmen von PSME als Sekundärnutzer die Frequenzbereiche nutzten. Die erste Digitale Dividende, die 2007 auf der ITU World Radiocommunication Conference beschlossen wurde, führte dazu, dass die oberen Anteile des UHF-Bandes den Mobilfunkkommunikationsanbietern zur Verfügung gestellt wurden.⁸⁴ So wurden die vorher im PSME Bereich benutzten Frequenzbereiche 790-814MHz und 838-862MHz nun von den Mobilfunkanbietern Telekom, O2 und Vodafone benutzt und mussten von den PSME-Anwendern geräumt werden.⁸⁵ Die zweite Digitale Dividende wurde 2012 beschlossen und

⁸⁰Vgl. Peissig et al. (2023, S.2)

⁸¹Zagouras (2006)

⁸²Vgl. Dickreiter et al. (2008, S.1129)

⁸³Vgl. Bundesnetzagentur - Mobilfunknetze - Mobilfunknetze(o. D.)

⁸⁴Vgl. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – RADIOCOMMUNICATION SECTOR(2020b)

⁸⁵Vgl. Sennheiser(2018, Digital Dividend I)

umfasst weitere Frequenzbereiche im UHF-Band. Konkret neu zugeteilt wurden dabei die Frequenzbereiche 703-733MHz und 758-821MHz.⁸⁶

Diese regulatorischen Änderungen beschränkten das für Funkmikrofone im PSME Bereich verfügbare Spektrum erheblich.

2020 wurde außerdem der Frequenzbereich von 470-694MHz von der Bundesnetzagentur für die professionelle Nutzung drahtloser Mikrofone allgemeinzuteilt. Dies bedeutete, dass dieser Frequenzbereich ab diesem Zeitpunkt kostenlos und ohne förmliche Beantragung genutzt werden darf.⁸⁷ Dieses Band soll bis 2031 keine Änderungen erfahren, es könnten aber weitere Sekundärdienste zugeteilt werden. Es sind allerdings auch andere Frequenzbänder für drahtlose Audioübertragung verfügbar.

Privaten Anwendern stehen mehrere anmeldefreie Bereiche des Funkspektrums zur Verfügung.

Dazu zählen:

- 174- 230MHz im VHF Band
- 823- 832MHz eine sogenannte LTE Duplex Lücke
- 863- 865MHz EU- Band
- 1785-1805MHz eine weitere LTE Duplex Lücke
- 1880-1900MHz im DECT Band
- 2,4 GHz der weltweit freie WLAN Bereich

Diese Bereiche sind privaten Nutzern von Funksystemen bis 2026 allgemeinzuteilt.

Für professionelle und gewerbliche Nutzung von Funksystemen stehen folgende Frequenzen zur Verfügung:

- 470-608MHz
- 614-698MHz
- 736-753MHz

Diese Frequenzen sind im Bereich der PSME anmeldefrei und allgemein zugeteilt.

1492-1525MHz darf im Gegensatz zu den oben genannten Frequenzen für PSME nur in geschlossenen Räumen und nach Anmeldung und Zuteilung verwendet werden.⁸⁸

4.3 CNR(Carrier to noise ratio)

Ein wichtiges Konzept des Frequenzmanagements ist das der Carrier to noise ratio.

Der Ausfall des Signals eines Funkmikrofons, ein sogenannter „Dropout“, entsteht durch das Fallen des vom Transmitter gesendeten Signals unter den Noise Floor(Grundrauschen).⁸⁹

⁸⁶Vgl. Sennheiser(2018, Digital Dividend II)

⁸⁷Vgl. Bundesnetzagentur - Presse - Allgemeinzuteilung für Drahtlose Mikrofone(2020)

⁸⁸Vgl. Frequenzen(o. D.)

⁸⁹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Introduction to Frequency Coordination)

Der Noise Floor oder auch Grundrauschen, der für das Frequenzmanagement eines Funksystems relevant ist, ist eine Zusammensetzung von allen möglichen vorkommenden elektromagnetischen Strahlungen, die am Ort, an dem das Funksystem in Betrieb genommen werden soll vorhanden sind. Es existieren zahlreiche Arten dieses Grundrauschens, wie atmosphärisches Rauschen, kosmisches Rauschen, thermales Rauschen, von Geräten in unmittelbarer Nähe erzeugtes Rauschen, aber auch künstlich erzeugtes Rauschen wie UHF-TV Kanäle, das zwar kein Rauschen im herkömmlichen Sinne darstellt, aber für die Betrachtung des Noise Floors im Bezug auf Drahtlossysteme im PMSE-Bereich ähnlich betrachtet werden kann.⁹⁰

Allgemein lässt sich bei drahtlosen Audioübertragungsanlagen feststellen, dass ein sogenannter Dropout stattfindet, wenn das zu Empfangende Signal unter den Noise Floor fällt, also das vom Transmitter ausgesendete Signal den Receiver mit geringerem Pegel als das Grundrauschen erreicht.⁹¹ In einem solchen Fall schließt der schon in Kapitel 2.1.5.4 besprochene Squelch den Audioausgang des Receivers, was dazu führt, dass das vom Transmitter aufgenommene Audiosignal nicht mehr zur Beschallung oder anderen Veranstaltungszwecken verwendet werden kann.

Die CNR ist auch maßgeblich bestimmend für die Reichweite eines Funksystems, da das gesendete Signal empfangen und weiterverarbeitet werden kann, solange der Pegel der Trägerwelle am Receiver höher ist als der des Noise Floors. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass eine höhere CNR zu einer erhöhten Reichweite des Funksystems beiträgt, da elektromagnetische Wellen Signalverlust in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sendeantenne aufweisen. Der Signalverlust im freien Raum lässt sich mithilfe von Friis-Übertragungsgleichung berechnen.⁹²

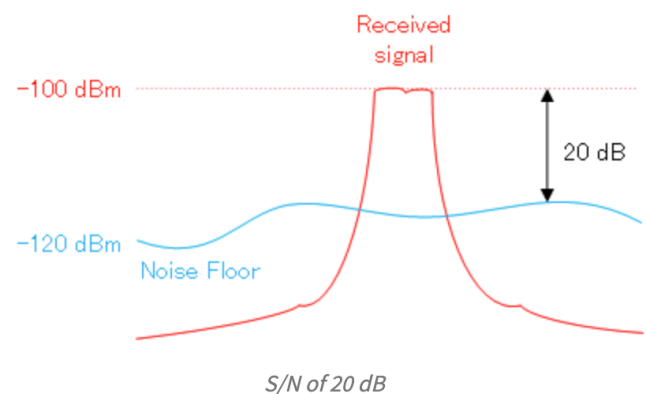


Abb.28 CNR

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot \frac{G_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot L} \quad [W]$$

P_{Tx} = transmitter power

G_{Tx} = transmitter antenna gain

λ = wavelength

G_{Rx} = receiver antenna gain

R = range between Tx and Rx

L = system loss (≥ 1)

Abb.29 Friis-Übertragungsgleichung

⁹⁰Vgl. Radiocommunication Study Group 1(2006)

⁹¹Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Introduction to Frequency Coordination)

⁹²Vgl. Blattenberger, K.(o. D.)

Ziel eines Funkfrequenzmanagements ist es also eine möglichst hohe CNR auf den Funkkanälen zu erhalten um sowohl eine sichere Übertragung als auch eine zufriedenstellend Reichweite des Funksystems sicherzustellen.

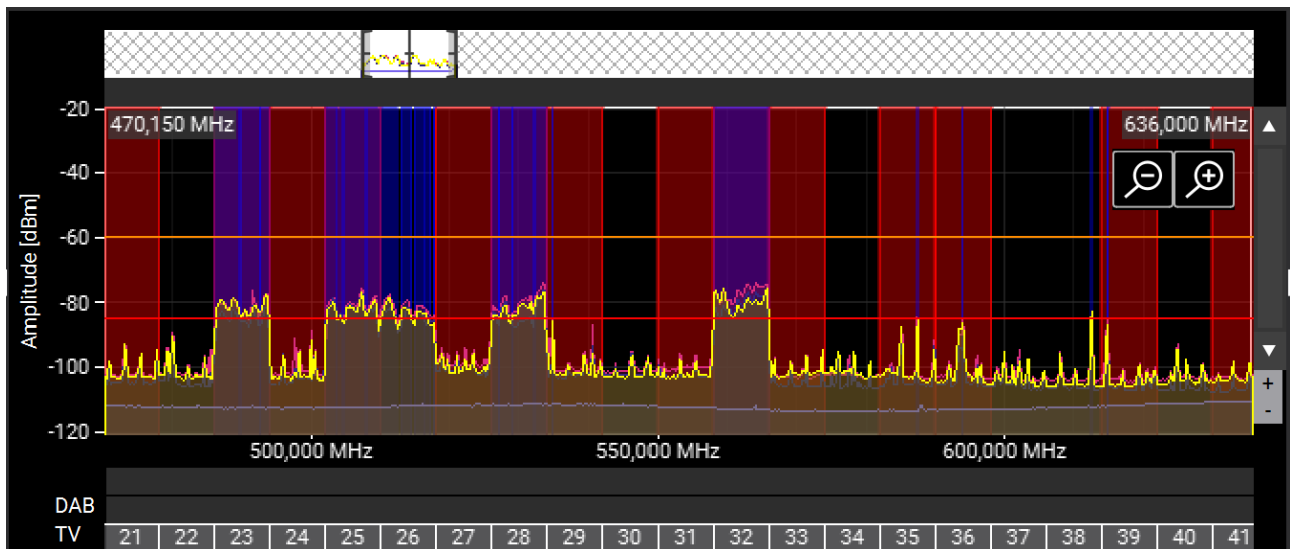


Abb.30 Typischer Noisefloor in Stuttgart, gescannt und visualisiert in Wireless Workbench 7

Um einen realen Noisefloor zur veranschaulichen zeigt Abb. 30 den im G56 Band gescannten Noisefloor in Stuttgart am Nordbahnhof.

Hinzugefügt werden muss, dass dieses Konzept unterschiede bei analogen und digitalen Systemen unterliegt. Bei analogen Audioübertragungen über Funk sind die CNR und die S/N(Signal to noise ratio) des Audiosignals direkt voneinander abhängig. Bei schlechterer CNR verschlechtert sich also auch die S/N des übertragenen Signals und somit die Audioqualität.

Bei digitalen Systemen stehen CNR und S/N aufgrund der digitalen Übertragungsart nicht in Abhängigkeit zueinander, was eine niedrigere CNR zulässt bevor das Audiosignal abbricht.⁹³

4.4 Gründe und Vermeidungsstrategien für Funkstörungen

Eine Vielzahl an Ursachen kann zu Interferenzen auf einem Funkkanal führen. Zu den Ursachen zählen TV-Übertragungen im UHF-Band, LED-Leinwände und alle am Veranstaltungsort aktiven Funkübertragungen die nicht zum Funksystem zählen, dass aufgebaut werden soll. ⁹⁴

Die sicherste Methode zur Vermeidung von Interferenzen auf benutzten Funkkanälen stellt ein Frequenzscan an der Veranstaltunglocation dar. Natürlich kann dies mit einem herkömmlichen Spektrumanalysator geschehen. Die meisten heute auf dem Markt verfügbaren Receiver enthalten allerdings ein Scan-Feature mit dem die Geräte selbstständig einen Frequenzscan in dem ihnen

⁹³Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Digital RF Transmission)

⁹⁴Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Introduction to Frequency Coordination)

verfügbaren Frequenzspektrum durchführen und anschließend die Kanäle auf Frequenzen mit wenig Grundrauschen zuteilen können. Anhand eines durchgeführten Frequenzscans können also Interferenzen die von externer RF-Strahlung erzeugt werden, vermieden werden.

Um Interferenzen zwischen den einzelnen Transmitter des eigenen Funksystems zu vermeiden gilt es für jeden separaten Funkkanal eine eigene Frequenz zu benutzen. Die für die Funkkanäle gewählten Frequenzen müssen außerdem einen Abstand voneinander aufweisen, der von der Bandbreite des Kanals sowie dem benutzten IF Filter im Receiver abhängig ist.⁹⁵ Bei der Benutzung von mehreren, gleichzeitig aktiven Funkstrecken sind auch die Intermodulationsprodukte, die durch deren Gebrauch entstehen zu beachten.

4.5 Intermodulation

Wenn die verschiedenen Trägerfrequenzen der Funkkanäle nicht miteinander abgestimmt sind können Intermodulationsstörungen auftreten. Intermodulation kann sowohl in Sendern als auch Empfängern auftreten. Dabei bilden die Sendefrequenzen wegen der Nicht-Linearen Übertragung der Geräte Mischprodukte der beiden Frequenzen. Diese als Intermodulationsprodukte bezeichneten Störfrequenzen können auf die Frequenz eines anderen Funkkanals fallen, wenn die Intermodulationen bei der Frequenzvergabe nicht beachtet werden. Besonders relevant für die drahtlose Audioübertragung sind dabei Intermodulationsprodukte dritter und fünfter Ordnung, da sie die Intermodulationen mit dem höchsten Pegel innerhalb des Empfangsbereiches darstellen.

Intermodulationsprodukte der dritten Ordnung lassen sich bei nur zwei verwendeten Funkfrequenzen relativ einfach berechnen: $IM3 = 2 \times f1 - f2$.⁹⁶ Da die Berechnung von Intermodulationsprodukten für Funksysteme mit mehr Funkkanälen deutlich komplizierter ist benutzt man für die Berechnung dieser Frequenzmanagementsoftware, die in Kapitel 4.5 näher beschrieben wird. Digitale Funksysteme haben im Bezug auf Intermodulationen und den damit einhergehenden Intermodulationsprodukten einige Vorteile. Digitale Funksysteme vor allem solche, die eine wesentlich linearere Übertragung aufweisen, erzeugen im Vergleich zu analogen Audioübertragungssystemen wesentlich weniger Intermodulationen zwischen den einzelnen Funkkanälen. Auch die Intermodulationen dritter Ordnung die erzeugt werden weisen einen im Vergleich zu analogen Systemen deutlich reduzierten Pegel auf. Somit ist es möglich deutlich mehr Funkkanäle in ein gegebenes Spektrum zu platzieren ohne Interferenzen aufgrund von Intermodulationsprodukten zu erhalten.⁹⁷

⁹⁵Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Introduction to Frequency Coordination)

⁹⁶Vgl. Grzesinski, C. (2020,S.221)

⁹⁷Vgl. Shure Audio Institute(o. D.-b, Introduction to Frequency Coordination)

4.6 Tools für Frequenzmanagement und RF-System Überwachung

Wie schon in Kapitel 4.1 angegeben gibt es bei der Vergabe von Funkfrequenzen an ein System zur drahtlosen Audioübertragung mehrere Faktoren zu beachten. Um diesen Vorgang zu Vereinfachen werden vor allem bei Funksystemen mit einer größeren Anzahl an gleichzeitig aktiven Kanälen Tools zum Frequenzmanagement und zur Überwachung des Spektrums eingesetzt. Als Beispiel für typische Funktionen eines solchen Programms wird an dieser Stelle Wireless Workbench 7 exemplarisch betrachtet, da der Autor persönliche Erfahrungen mit diesem Programm im Zuge seiner Arbeit sammeln konnte.

Wireless Workbench 7 bietet seinen Nutzern diverse Möglichkeiten zum Frequenzmanagement und auch direkten Zugriff auf die Einstellungen des Receivers. Dies wird durch den Aufbau eines Kontrollnetzwerks bewerkstelligt an das alle Receiver, die in einer Konfiguration gemeinsam arbeiten sollen, angeschlossen sein müssen. Über WWB7 kann auch ein das Frequenzspektrum des Receivers umfassender Scan gemacht werden. Dabei werden die Antennen an den Receivern benutzt, um die momentanen spektralen Begebenheiten zu analysieren, die dann in WWB7 graphisch dargestellt werden können. Um Interferenzen von parallel übertragenden UHF TV-Sendern zu vermeiden, bietet Wireless Workbench 7 eine ortsspezifische Datenbank von TV-Sendern. Abhängig von der in die Datenbank eingegebenen Stadt oder Postleitzahl werden einem so in einem einstellbaren Radius operierende TV-Sender im UHF-Band angezeigt und das von ihnen belegte Frequenzspektrum kann von vornherein ausgeschlossen werden. Der in Abbildung 30 schon gezeigt Frequenzscan kennzeichnet solche TV-Sender mit einem roten Block und schließt den Bereich somit von der Frequenzfindung aus. Vor der Frequenzanalyse und Berechnung kann man auch einen sogenannten „Exclusion threshold“ einstellen. Dieser wird in Abbildung 30 als rote Linie, die horizontal im Graphen verläuft, dargestellt. Durch diesen Threshold ist es möglich Frequenzen und größere Frequenzbereiche aufgrund zu hohem Grundrauschens oder auch anderer auftretender Interferenzen von der Frequenzplanung auszuschließen. Die dadurch ausgeschlossenen Frequenzen und Frequenzbereiche werden in Abbildung 30 als Blaue vertikale Linien/Bereiche dargestellt. Im Grunde ist es dank dieser Einstellung möglich eine mindest CNR einzustellen die auf einer Frequenz vorhanden sein muss bevor ihr ein Funkkanal zugewiesen werden kann.

Bekannte Störfrequenzen und Funkstrecken, die nicht zum System gehören, können in eine „Exclusion Liste“ eingetragen werden, damit diese ebenfalls bei der Frequenzplanung nicht berücksichtigt werden. Für den Fall, dass aus koordinations oder rechtlichen Gründen nur bestimmte Bereiche des Spektrums benutzt werden dürfen, ist es möglich verschiedene Inklusionslisten und Bereiche festzusetzen, denen die einzelnen Kanäle des Funksystems zugeordnet werden können. So wird der Bereich in den die Funkfrequenzen fallen beispielsweise auf einzelne TV-Kanäle beschränkt oder Funkmikrofonsysteme spektral von IEM-Systemen getrennt.

Weiterhin existiert in WWB7 eine Monitor Sektion in der jeder anliegende Funkkanal auf verschiedene Werte wie RF-Signalstärke, Verstärkung, Overload Warning, Audiopegel, Batteriestand des Transmitters und Frequenz auf dem der Kanal liegt überprüft werden kann.

Diese Sektion kann benutzt werden um die Funkstrecken während der Show zu überwachen, um so schnell wie möglich auf auftretende Probleme reagieren zu können.

WWB7 bietet außer diesen Grundfunktion noch viele weitere, die ein genaues Frequenzmanagement und Kontrolle über die Benutzten Funkkanäle bieten. ⁹⁸

Ähnliche Software von anderen Anbietern sind zum Beispiel Wireless System Manager, ClearWaves und Soundbase. Die Programme variieren in ihrer Geräteunterstützung und den Funktionen, die sie dem Nutzer bieten, weswegen es wichtig ist je nach vorliegendem Funksystem und notwendigem Funktionsumfang das passende Softwaretool auszuwählen.

5. WMAS

WMAS(Wireless Multichannel Audio Systems) sind eine Neuerung auf dem Gebiet der Drahtlosanlagen für PMSE. WMAS zeichnen sich dadurch aus, dass sie anstatt einer schmalbandigen Übertragung pro Kanal eine Breitbandige Übertragung aufweisen, über die mehrere Kanäle übertragen werden können. Diese Art der Übertragung hat mehrere Vorteile und Nachteile, weswegen sich WMAS für bestimmte Anwendungszwecke besser eignen als Schmalbandübertragungsanlagen und umgekehrt.⁹⁹ Die Entwicklung von breitbandigen Lösungen für den drahtlosen Audiobereich ist auf eine regulatorische Änderung der FCC und CEPT zurückzuführen, die es drahtlosen Systemen erlaubt Frequenzblöcke von mehr als den zuvor erlaubten 200kHz zu nutzen, wenn diese Geräte den größeren Frequenzbereich effizient nutzen.¹⁰⁰

Die Größe der von den WMAS genutzten Frequenzblöcke ist nicht festgelegt oder standardisiert, unterliegt also den Herstellern der einzelnen Geräte. Das kürzlich von Sennheiser vorgestellte WMAS „Spectera“ operiert beispielsweise ortsabhängig auf der spektralen Breite eines TV-Kanals, also 8MHz in Europa und 6MHz in der USA.¹⁰¹

Neuartige Wireless Multichannel Audio Systems wie das Spectera von Sennheiser basieren auf einem speziell für den Breitbandbetrieb ausgelegten Modulationsverfahren namens OFDM(Orthogonal Frequency Division Modulation). Der Grundgedanke von OFDM besteht in der Verlängerung der Symboldauer. Da bei Breitbandverfahren hohe Datenraten versendet werden müssen ist es notwendig die Datenströme zu parallelisieren und auf verschiedene Unterträger zu verteilen. Dadurch transportiert jeder der Unterträger nur noch einen Bruchteil der Daten wodurch die Symboldauer wesentlich vergrößert werden kann. Je nach zu übertragender Datenrate können hierfür einige hundert oder tausend Träger nötig sein.¹⁰²

⁹⁸Vgl. Wireless Workbench 7 - WWB7 - ShuRe Germany(o. D.)

⁹⁹Vgl. Wilzeck, A. (2023)

¹⁰⁰Vgl. Escobedo (2024)

¹⁰¹ Vgl. Wilzeck, A. (2023)

¹⁰² Vgl.Dickreiter et al. (2008, S.1098-1099)

Einer der größten Vorteile von WMAS gegenüber herkömmlichen schmalbandigen Systemen ist die erhöhte spektrale Effizienz. Mit WMAS ist es möglich, wesentlich mehr Funkkanäle in einem Bereich von 8/6MHz zu betreiben als dies vorher der Fall war. Da WMAS also einen ganzen TV-Kanal(bzw. einen durch den Hersteller spezifizierten Frequenzbereich größer als 200kHz) benutzen, jedoch durch effiziente Nutzung des Frequenzblocks eine erhöhte Anzahl an Kanälen unterstützen, lässt sich schlussfolgern, dass WMAS besonders für Live-Veranstaltungen mit einer Anforderung für viele Funkkanäle optimal ist, da sonst der Grundsatz der Frequenzeffizienz nicht erfüllt ist. Eine weitere Änderung zu Schmalbandsystemen ist der Wegfall von Frequenzplanung abgesehen von der Zuweisung des vorher definierten Breitbandblocks. Dadurch kann die Frequenzplanung sowohl einfacher als auch zeiteffizienter gestaltet werden.

Insgesamt stellt WMAS eine weitere Art der Lösung für Veranstaltungen dar, bei denen drahtlose Audioübertragung gewünscht ist.

6. Beispiele

Wie aus den vorherigen Kapiteln hervorgeht können die Komponenten und der Aufbau eines drahtlosen Audiosystems je nach Veranstaltung und Veranstaltungsart stark variieren. Die einzelnen Bauteile wie Receiver, Antennen, Kabel und Transmitter müssen sowohl aufeinander, als auch auf die veranstaltungsspezifischen Begebenheiten angepasst sein. Da jedoch bei Live-Events die Begebenheiten häufig einen optimalen Aufbau des Systems nicht zulassen oder zumindest einige Kompromisse eingegangen werden müssen, folgen nun zur Veranschaulichung einige Beispiele aus der Praxis.

Beispiel 1 Auto-Roadshow:

Als erstes Beispiel wollen wir eine temporäre Ausstellung eines Autoherstellers heranziehen. Die Ausstellung wurde in mehreren Städten veranstaltet, die Veranstaltung auf die wir uns in diesem Praxisbeispiel beziehen war jedoch in Stuttgart. Bei dem genauen Veranstaltungsort handelt es sich um eine Halle im Norden Stuttgarts. Im Rahmen der Veranstaltung wurde die Halle durch aufbauten von Trennwänden mit eigener Lichtinstallation in mehrere Räume aufgeteilt. Der erste Raum bestand aus einem Foyer und Einlassbereich, in dem ausschließlich Hintergrundmusik und spezifische Durchsagen ankommen sollten. Der zweite Raum bestand aus einer Ausstellung die durchgehend geöffnet war und bei der ein separates System mit Funkkopfhörern den Besuchern als Tourguides diente. Außerdem existierte in diesem zweiten Raum durch einen Vorhang abgetrennt ein Vortragsbereich mit LED-Leinwand, vor welcher an unterschiedlichen Tagen Vorträge gehalten wurden. Zu diesem Zweck wurden neben der LED-Leinwand Lautsprecherboxen aufgebaut, die für die Vorträge zur Stimmverstärkung und für den Medienton benutzt wurden. Im dritten Bereich befindet sich eine Art Multimedialer Dinnerbereich, in den Tischen waren 80 Zoll Bildschirme eingelassen, die Wände wurden zum auf den Tischen eingespielten Videos mit einer Timecodeshow passend beleuchtet und Musik wurde über ein

Lautsprechersystem eingespielt. Zum Dinner sollten die verschiedenen Gänge des Menüs über die Lautsprecherboxen angesagt werden. Beim letzten Bereich handelt es sich lediglich um den Außenbereich vor der Halle wo durchgehend Musik abgespielt werden sollte. Die Musik konnte über Funk direkt in die Außenlautsprecher übertragen werden, da es sich um Akkuboxen mit eingebauten Receiver handelte. Abgesehen von dem Funksystem der Kopfhörer und dem Hauptfunksystem für Vorträge und Audioübertragung existierte noch ein Crew Interkom Funksystem. Durch den Aufbau bedingt mussten alle technischen Geräte die für die Veranstaltung verwendet wurden in einer Zentralregie ungefähr in der Mitte der Halle aufgebaut werden. Die Zentralregie war, um sie komplett von Besucherbereichen abzuschirmen von allen Seiten mit den selben Trennwänden umbaut, mit der auch die Halle in mehrere Teile unterteilt worden war. Funkanalseitig waren für den Vortragsbereich zwölf Funkstrecken, unterteilt in sechs Headsets und sechs Handsender, gewünscht. Für den Dinnerbereich waren für die Ansagen zwischen den Gängen lediglich vier Handsender notwendig. Für Ansagen im Einlassbereich lagen zusätzlich immer zwei Handsender bereit und für den Fall eines Ausfalles existierten noch zwei zusätzliche Funkstrecken, die bei Bedarf innerhalb von Minuten in jeder dieser Konfigurationen einsatzbereit sein konnten. Die Außenlautsprecher wurden alle über den selben Transmitter gespeist, dafür war also nur eine Funkfrequenz notwendig. Insgesamt beläuft sich also die Gesamtanzahl an Funkkanälen im Hauptsystem auf 21. Das Funksystem bestand in diesem Fall aus einem Sennheiser ew G4 zur Übertragung der Außenmusik, drei Shure AD4Q Axient Digital und vier Shure AD4D Axient Digital. Zusätzlich war für die Antennenverteilung ein Splitter mit vier Outputs verfügbar, außerdem vier aktive Richtantennen.

Da alle Funkstrecken ausgenommen der Sennheiser Sendestrecke im Zweifelsfall überall in der Halle funktionell sein sollten, musste der komplette Hallenbereich RF seitig abgedeckt sein. Da das Funkrack mit allen Receivern in der Technikzentrale war mussten auch die Signale der Antennen dort mit einem brauchbaren Pegel ankommen. Da die Trennwände die in der Halle durch Truss Konstruktionen aufgebaut worden waren ca. drei-vier Meter hoch waren, mussten die Antennen um eine Sichtlinie zu den jeweiligen Vortrags und Ansageplätzen zu schaffen, mit Stativen über die Höhe dieser Trennwände gebracht werden. Um den kompletten Hallenbereich um die Zentralregie herum abzudecken wurden die vier Richtantennen an den vier Seiten der Regie über der Trennwand angebracht und durch zwei passive Antennencombiner zu einer Art zwei Raum Setup zusammengefasst. Die Antennen hatten durch den Aufbau der Regie bedingt je einen Abstand von vier Metern zueinander und wurden je Diversity Set mit einem 90 Grad Winkel zueinander ausgerichtet um elektromagnetische Wellen jeder Polarisierung optimal empfangen zu können. Anschließend wurden die Antennen noch nach unten gewinkelt, um die Richtwirkung optimal nutzen zu können. Für die Außenlautsprecher wurde das Audiosignal für diese über Versatzkästen per XLR Kabel in einen Kasten an der Außenseite der Halle geschickt, in einen Sennheiser Taschensender umgewandelt, der dann das Signal zu den sich in den Boxen befindlichen Receivern schickte.

Da es sich bei den Antennen innen um aktive Richtantennen handelte konnte der durch den Kabelweg und das passive Bauteil charakteristische Signalverlust, der sich durch das 10 Meter lange Antennenkabel und dem Kombiner auf ca 7.8 dB berechnen lassen konnte, ohne weitere

Bauteile ausgeglichen werden. Alle anderen Antennenkabel sind durch ihre Länge zwischen 50 cm und 100 cm für den Signalverlust nicht beachtet worden. Da nur ein aktiver Antennensplitter vorhanden war und dessen Outputs nicht für alle Receiver ausreichten wurde je ein Receiver direkt an den Splitter angeschlossen und dann aus dessen

Cascade-Antennenoutputs der Receiver direkt unter ihm im Rack mit Antennensignal versorgt. So konnten alle 7 Receiver mit RF-Signal versorgt werden. Die Sennheiser-Funkstrecke war in diesem System nicht mit inbegriffen, da der Transmitter, um eine Sichtlinie mit den Lautsprechern vor der Halle herzustellen an der Außenwand der Halle angebracht wurde.

Um nun ein umfassendes und sicheres Frequenzmanagement sicherzustellen mussten nun diverse Informationen über den Veranstaltungsort und die anderen Funksysteme in Erfahrung gebracht werden. Das Funksystem der Kopfhörer für die Tourguides operierten im 2.4 GHz Bereich, was sie für die Frequenzvergabe des Hauptfunksystems irrelevant macht, da diese im UHF-Spektrum angesiedelt sind. Das Team Interkom operierte im VHF-Spektrum und fiel somit auch nicht auf die gleichen Frequenzen, wie das Hauptfunksystem. Innerhalb von WWB7 wurde nun ein Frequenzscan mit dem schon fertigen Antennensystem durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die LED-Leinwand nicht nur an war, sondern auch Content abgespielt wurde, da dies die RF-Strahlung beeinflussen kann. In der WWB7 internen Datenbank wurden die besetzten TV-Kanäle der Region identifiziert und von der Frequenzplanung ausgeschlossen. Durch den Scan konnten alle anderen Störfrequenzen identifiziert werden und allen 21 Funkkanälen eine sichere interferenzfreie Frequenz zugewiesen werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die sich außen an der Halle befindliche Funkstrecke im Spektrum besonders weit von sendenden TV-Kanälen entfernt war, da sie nicht wie die anderen Funkstrecken durch ihren Aufbau in der Halle von einer natürlichen Dämpfung der von außen einstrahlenden RF-Signale profitieren konnte.

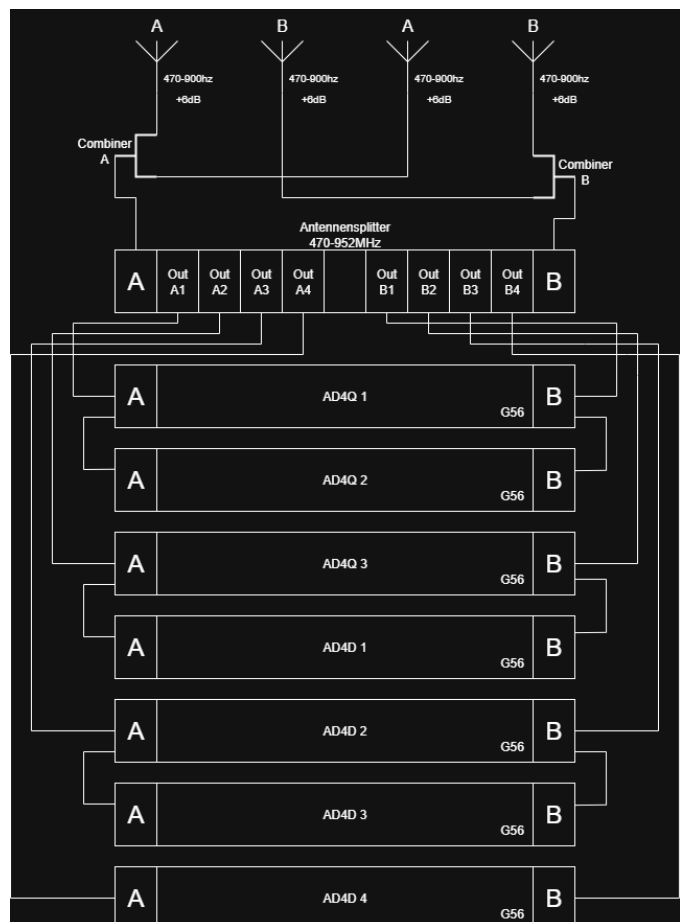


Abb.31 Schaubild zu Beispiel 1

Beispiel 2 Mittelgroße Festival Bühne:

Als zweites Beispiel bedienen wir uns einem Musikfestival Setup mit mehreren Bühnen. Wieder findet die Veranstaltung in Stuttgart statt, der Veranstaltungsort ist allerdings diesmal im Freien auf dem Wasen. In Absprache mit dem Funkkoordinator des Veranstalters ist es möglich TV-Kanal 22 und 30 zu benutzen, diese werden der zu betreuenden Bühne zugewiesen, damit zwischen den Bühnen keine Interferenzen auftreten. Die Funkanforderungen waren, da es sich um eine der kleineren Bühnen auf dem Festival handelt nur 18 Funkkanäle, darunter 14 Hand, Taschen und Aufstecksender je nach Band frei konfigurierbare und vier IEM Strecken. Zwei der 14 Funkkanälen sollten immer für Moderationsmikrofone bereitstehen, die Moderation erfolgte ebenfalls von der Bühne aus. Über zwei Tage Festival spielten auf der Bühne 16 Bands, von denen mehrere eigene IEM Systeme mitbrachten. Hier war es essentiell im Vorhinein mit den Bands in Kontakt zu treten und die genauen Funkanforderungen zu erfahren, da gegebenenfalls je nach System Änderungen im gesamten Funksystem vorgenommen werden mussten. Je nach Tuning Reichweite der IEM Systeme der Bands müssen womöglich weitere Absprachen getroffen werden um Systemkonflikten vorzubeugen. Das Funkenrack wurde Stageright platziert in der Nähe des Bühnenaufgangs um einen schnellen Zugriff bei eventuellen Problemen und Ausfällen zu ermöglichen. Da die Bühnengröße nur 8x6m betrug konnten hier normale Halfwave-Dipolantennen benutzt werden. Das Funksystem bestand aus drei AD4Q und einem AD4D. Zusätzlich wurde außerdem ein Antennensplitter eingesetzt. Da keine Antennenkombiner für die IEM Geräte eingeplant war mussten hier die am Rack eingebauten Antennen benutzt werden. Die Empfangsantennen für das Funksystem konnten aufgrund der Positionierung des Racks direkt an der Vorderseite des Racks am Antennensplitter angebracht werden, wo sie zueinander mit 90 Grad ausgerichtet, eine klare Sichtlinie auf die Bühne hatten. Beim den IEM Geräten handelte es sich um Sennheiser IEM G4. Um einen ausreichend Abstand zwischen die Empfangsantennen und die Sendeantennen zu bekommen wurden die Quarterwave-Dipolantennen die an den IEM Rackgeräten montiert waren gegen Halfwave-Dipolantennen ausgetauscht die mit einigem Abstand vor dem Hauptrack platziert wurden. Mittels WWB7 wurde ein Frequenzscan durchgeführt der mögliche Störfrequenzen innerhalb des gewählten Frequenzbereiches ausfindig machen konnte. Sowohl die Frequenzen der Handfunken als auch der IEMs und mehrere separate Frequenzen zur Vergabe an die Bands für ihre eigenen IEMs wurden in WWB7 berechnet und ausgegeben. Zusätzlichen Funk gab es ob der Größe der Bühne nur wenig, einzig erwähnenswert ist ein Router zur Tonpultsteuerung, der im Frequenzbereich 2.4 GHz operierte.

Beispiel 3 Multiraum Konferenz:

Als drittes Beispiel analysieren wir nun den Aufbau einer Multiraum-Konferenz. Der Veranstaltungsort ist München Innenstadt. Der Veranstaltungsort besteht aus 4 Räumen in denen teilweise gleichzeitig teilweise nacheinander Vorträge, Panel Discussions und Reden stattfinden. Jeder Vortragsraum verfügt über sechs Funkstrecken, davon vier Headsets und zwei Handfunken.

Da die Mikrofone eines Raumes ausschließlich dort benutzt werden sollten wurde kein allumschließendes Antennensystem gebaut, jedes Funksystem besteht je aus einem AD4Q und einem AD4D die über den Cascadeout mit einem paar Antennen betrieben werden. Die Receiver sind an ein Kontroll- und an ein Dantenetzwerk angeschlossen. Über das Kontrollnetzwerk kann von einem Zentralen Computer das vollständige Funksystem überwacht werden und Interferenzen erkannt werden ohne dass es notwendig ist von Raum zu Raum zu laufen. Über das Dantenetzwerk wird der Audiooutput der Receiver an das zentrale Tonpult weitergeleitet, dass die Audiosignale für alle Räume verarbeitet.

Um Interferenzen zwischen den Räumen soweit wie möglich auszuschließen und den bestmöglichen Überblick über die vergebenen Frequenzen zu erhalten wurde jedem Raum ein vier MHz großer Frequenzblock zugeteilt in dem seine Frequenzen liegen sollen. Bei der Aufstellung der Racks in den einzelnen Räumen wurde auf eine Positionierung an der Seite der Bühne mit Sichtlinie geachtet um Absorption der RF-Strahlung durch Veranstaltungsbesucher vorzubeugen. Da die einzelnen Räume relativ klein waren und es ohnehin nicht wünschenswert war, unnötig viel RF-Strahlung aus den anderen Räumen zu empfangen, wurde hier mit Halfwave-Dipolantennen gearbeitet, die direkt am Rack angebracht waren. Diese waren wegen der Polarisationsproblematik in einem 90 Grad Winkel und einem Abstand von einer Standardrackeinheit voneinander angebracht. Von dem zentralen, ans Kontrollnetzwerk angeschlossenen Computer wurde nun in jedem Raum ein Frequenzscan gestartet. Trotz der räumlichen Trennung der einzelnen Funksysteme war es aufgrund der RF-Strahlung, die trotzdem wenn auch zu einem geringeren Anteil, in alle Räume vordrang, notwendig die vier einzelnen Räume als ein großes Funksystem zu betrachten und dementsprechend die Frequenzen so zu rechnen, dass keine Interferenzen zwischen den Funkkanälen auftreten konnten. Mit den abgeschlossenen Frequenzscans und dem Ausschluss der in der Region sendenden TV-Kanälen konnten allen Funkkanälen sichere und interferenzfreie Frequenzen zugeordnet werden. Da weiterhin die Gefahr bestand, dass Transmitter versehentlich durch Mitnahme von Sprechern, die durch die Räume rotierten, den für sie vorgesehenen Raum verließen, wurden alle Transmitter zusätzlich zur spezifischen Benennung, die am Bedienfeld auslesebar war mit einer raumspezifischen Farbe markiert.

7. Fazit

Um eine umfassende Grundlage für die Arbeit mit drahtlosen Anlagen zur Audioübertragung bei Live-Events zu bieten, beschäftigte sich diese Arbeit in großen Teilen mit Grundlagen der Hochfrequenztechnik.

Durch die genauere Untersuchung dieser technischen Grundlagen konnte festgestellt werden, dass die Wahl eines Funksystems von vielen verschiedenen Faktoren abhängig ist und vor allem die verschiedenen Bauteile eines drahtlosen Audioübertragungssystems für dessen Einsatzmöglichkeiten entscheidend sind. Da jedes einzelne Bauteil wie die Antennen, Antennenkabel, Splitter, Combiner, Receiver und Transmitter eigene, je nach Gerät unterschiedliche Funktionsumfänge bieten, ist es unerlässlich, dass jedes einzelne Bauteil während der Zusammenstellung des Funksystems auf Kompatibilität geprüft wird. Der Funktionsumfang der einzelnen Geräte ist ebenso entscheidend zum erfolgreichen Aufbau einer Funkanlage, da die notwendigen Funktionen, die für das jeweilige Event notwendig sind nur durch die korrekte Auswahl aller notwendigen Bauteile erreicht werden können.

Trotz der in dieser Arbeit recht zahlreich genannten Regeln, die von der Wahl des Receivers mit für die Anzahl der Funkkanäle passenden Filtern und der Ausrichtung, dem Abstand und der Platzierung der Antennen sowie deren Verkabelung reichen, ist es durchaus möglich und in den meisten Veranstaltungssituationen auch notwendig, ein Funksystem unter suboptimalen Bedingungen aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Das hier vermittelte Wissen soll dabei helfen, einen Rahmen zu schaffen um zu bestimmen, welche Regeln wegen anderweitiger veranstaltungstechnischer Notwendigkeit missachtet werden können, ohne dass die Funktionsfähigkeit des Funksystems gefährdet wird.

Während es bei vielen kleineren Veranstaltungen aktuell noch möglich ist ohne professionelle Frequenzkoordination drahtlose Mikrofone und IEM Funkstrecken zu verwenden, wird dies in einem zunehmend dichter besetzten Frequenzspektrum immer weniger möglich sein.

Mit einem erhöhten Bedarf an drahtlose Geräte und dem damit einhergehenden immer dichter bevölkerten Funkspektrum wird die effizient Nutzung der noch vorhandenen Bandbreite ein immer größeres Thema. Vor allem Großevents, die mit vielen Funkkanälen gleichzeitig haben, werden in Zukunft auf eine effizienter Spektrale Nutzung achten müssen. Aber ähnlich wie die Anforderungen der Events steigen und diverser werden müssen auch die dafür angebotenen technischen Lösungen sich dementsprechend entwickeln. Da es nicht möglich ist für die Vielzahl an verschiedenen Applikationen, die drahtlose Audioübertragung benötigen einheitliche Lösungen zu finden ist es darum notwendig, anwendungsspezifische Lösungen zu benutzen, sei es wegen dem Thema der Spektralen Effizienz, ungewöhnlichen Künstleranforderungen oder auch nur bedingt durch den physischen Aufbau und die Lage des Funksystems.

8. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: AD2/KSM8 - AD2/KSM8 Handsender - Shure Germany(o. D.-b)
- Abbildung 2: Sennheiser - EW-DX SKM Handsender Q1-9 - 470.2 - 550 MHz | 509412(o. D.)
- Abbildung 3: AD1 - AD1 Taschensender - Shure Germany(o. D.)
- Abbildung 4: Thomann(o. D.a)
- Abbildung 5: AD3 - Axient Digital Aufstecksender - ShuRe Germany(o. D.-b)
- Abbildung 6: Thomann(o. D.b)
- Abbildung 7: Shure Audio Institute(o. D., Processing)
- Abbildung 8: E, D. A. (o. D.)
- Abbildung 9: Mietke (o. D.)
- Abbildung 10: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 11: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 12: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 13: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 14: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 15: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 16: Shure Audio Institute(o. D.-b)
- Abbildung 17: Thomann(o. D.c)
- Abbildung 18: Thomann(o. D.g)
- Abbildung 19: Grzesinski, C. (2020,S.226)
- Abbildung 20: Thomann(o. D.c)
- Abbildung 21: Grzesinski, C. (2020,S.227)
- Abbildung 22: HA-8089 - HA-8089 Helix-Antenne - Shure Germany(o. D.)
- Abbildung 23: McClatchie (2018)
- Abbildung 24:Thomann(o. D.h)
- Abbildung 25: Thomann (o. D.f)
- Abbildung 26: Thomann(o. D.e)
- Abbildung 27: Eigene Abbildung
- Abbildung 28: CIRCUIT DESIGN, INC.(2025)
- Abbildung 29: Blattenberger, K.(o. D.)
- Abbildung 30: Eigene Abbildung
- Abbildung 31: Eigene Abbildung

9. Literaturverzeichnis

50Ω Lernplattform für Amateurfunk. (o. D.). https://50ohm.de/E_antennengewinn.html

Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

AD1 - AD1 Taschensender - Shure Germany. (o. D.). https://www.shure.com/de-DE/produkte/funkmikrofon-systeme/axient_digital/ad1?variant=AD1%253D-G56

Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

AD2/KSM8 - AD2/KSM8 Handsender - Shure Germany. (o. D.). https://www.shure.com/de-DE/produkte/funkmikrofon-systeme/axient_digital/ad2_ksm8?variant=AD2%252FK8B%253D-G56

Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

AD3 - Axient Digital Aufstecksender - ShuRe Germany. (o. D.). https://www.shure.com/de-DE/produkte/funkmikrofon-systeme/axient_digital/ad3?variant=AD3%253D-G55

Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

AM - amplitudenmodulation. (o. D.). <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0401181.htm>

Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Axient Digital - Digitales Drahtlossystem - ShURe Germany. (o. D.). https://www.shure.com/de-DE/produkte/funkmikrofon-systeme/axient_digital

Zuletzt aufgerufen am 12.08.2025

Blattenberger, K. (o. D.). *Free Space Path Loss Frlis Equation Formula*. Kirt Blattenberger, RF Cafe. <https://www.rfcafe.com/references/electrical/path-loss.htm>

Zuletzt aufgerufen am 18.08.2025

Bundesnetzagentur - Mobilfunknetze - mobilfunknetze. (o. D.). <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze.html>

Zuletzt aufgerufen am 22.08.2025

Bundesnetzagentur - Presse - Allgemeinzuteilung für drahtlose Mikrofone. (2020). https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/20200408_Allgemeinzuteilungen.html

Zuletzt aufgerufen am 22.08.2025

CIRCUIT DESIGN, INC. (2025, 5. Juni). *Signal to Noise ratio | RF Design Guide | CIRCUIT DESIGN, INC.* CIRCUIT DESIGN, INC. https://www.cdt21.com/design_guide/signal-to-noise-ratio/

Zuletzt aufgerufen am 18.08.2025

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W. & Wöhr, M. (2008). Handbuch der Tonstudioteknik: Analoge Schallspeicherung, analoge Tonregieanlagen, Hörfunk-Betriebstechnik, digitale Tontechnik, Tonmesstechnik. Bd. 2.

Digital-Coded Squelch (DCS) - Signal Identification Wiki. (2025). [https://www.sigidwiki.com/wiki/Digital-Coded_Squelch_\(DCS\)](https://www.sigidwiki.com/wiki/Digital-Coded_Squelch_(DCS))

Zuletzt aufgerufen am 06.08.2025

Drahtlose Systeme: außergewöhnliche Audioqualität | Sennheiser. (o. D.). <https://www.sennheiser.com/de-de/catalog/products/drahtlossysteme?filtersPage=1>

Zuletzt aufgerufen am 14.08.2025

E, D. A., V. (o. D.-a). DARC-Online-Lehrgang Technik Klasse E Kapitel 8: Elektromagnetisches Feld - DARC. <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e08/>

Zuletzt aufgerufen am 15.08.2025

E, D. A., V. (o. D.). DARC-Online-Lehrgang Technik Klasse E Kapitel 14: Modulation und Demodulation - DARC. <https://www.darc.de/der-club/referate/ajw/lehrgang-te/e14/>

Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Ekwe, O., N, A. E. & CK, O. (2014). Evaluating Multiple Antenna Diversity Techniques for Transmission over Fading Channels. *IOSR Journal Of Dental And Medical Sciences*, 13(8), 77–82. <https://doi.org/10.9790/0853-13817782>

Escobedo, B. E. (2024, 12. September). *WMAS entdecken: Die Zukunft der drahtlosen HF Mikrofontechnologie.* <https://www.shure.com/de-DE/insights/exploring-wmas>

Zuletzt aufgerufen am 20.08.2025

EW-DX für Unternehmen | Sennheiser. (o. D.). <https://www.sennheiser.com/de-de/product-families/ew-dx-unternehmen>

Zuletzt aufgerufen am 12.08.2025

Fette, B. A. (2007). RF and Wireless Technologies: Know It All. Newnes.

Frequenzen. (o. D.). <https://www.shure.com/de-DE/support/frequenzen>

Zuletzt aufgerufen am 23.08.2025

Finde das passende Funkmikrofonsystem. (01.03.2023). Shure Germany. <https://www.shure.com/de-DE/insights/h/finde-das-passende-funkmikrofonsystem>
Zuletzt aufgerufen am 30.07.2025

Grzesinski, C. (2020). *Tontechnik: für Veranstaltungstechniker in Ausbildung und Praxis.*

HA-8089 - HA-8089 Helix-Antenne - Shure Germany. (o. D.). <https://www.shure.com/de-DE/produkte/zubehoer/ha-8089?variant=HA-8089>
Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Henshall, M. (2015). *Das Shure Vagabond - das erste Drahtlosmikrofon der Welt (damals, vor 60 Jahren. . .).* shure.com. von <https://www.shure.com/de-DE/insights/w/das-shure-vagabond-das-erste-drahtlosmikrofon-der-welt-damals-vor-60-jahren>
Zuletzt aufgerufen am 22.08.2025

Henshall, M. (2015b). *Funktechnik: Digital vs. analog.* shure.com. <https://www.shure.com/de-DE/insights/a/funktechnik-digital-vs-analog>
Zuletzt aufgerufen am 29.08.2025

Humans.Txt. (o. D.). *Sennheiser EW-DP SKP (R1-6) - digitaler Aufstecksender mit +48 V-Phantomspeisung.* https://www.prolighting.de/tontechnik/mikrofone/funkmikrofone-und-drahtlose-systeme/kamera-funksysteme/sennheiser-ew-dp-skp-r1-6-digitaler-aufstecksender-mit-48-v-phantomspeisung.html?gad_source=1&gad_campaignid=20962579125&gclid=CjwKCAjwqKzEBhANEiwAeQaPVX0bB7JgsN9wNCRpdFRUk1fd2S39eP5PaoHDGTPrWQ5L-LIM6OJHThoC018QAvD_BwE
Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – RADIOCOMMUNICATION SECTOR. (2020b). *ITU-R FAQ on the DIGITAL DIVIDEND and the DIGITAL SWITCHOVER.* <https://www.itu.int/en/itu-r/documents/itu-r-faq-dd-dso.pdf>

Lorenz, A. (2024, 13. September). *Sennheiser Evolution Wireless Digital.* Sennheiser. <https://newsroom.sennheiser.com/sennheiser-evolution-wireless-digital-1xuesl>
Zuletzt aufgerufen am 12.08.2025

McClatchie, D. (2018, 21. Dezember). *ATTENUATION OF STANDARD COAXIAL CABLE - FM systems.* FM Systems. <https://www.fmsystems-inc.com/attenuation-standard-coaxial-cable/>
Zuletzt aufgerufen am 08.08.2025

Meinke, H. & Gundlach, F. (1986). *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik.* In *Springer eBooks.* <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>

Mietke, D. (o. D.). *Frequenzmodulation*. <https://www.elektroniktutor.de/signalkunde/fm.html>
Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Mikrofone für den Broadcast-Bereich. (o. D.). Shure Germany. <https://www.shure.com/de-DE/anwendungen/broadcast>
Zuletzt aufgerufen am 14.08.2025

Newsdesk. (2024, 19. September). *Funkfrequenzen – Droht die nächste „Digitale Dividende“? – #mothergrid*. Mothergrid. <https://www.mothergrid.de/fachwissen/funkfrequenzen-versteigerung-digitale-dividende-wrc/>
Zuletzt aufgerufen am 22.08.2025

Peissig, J., Schmidt, A., Pérez, M. (2023). Drahtlose Audioübertragung. In: Weinzierl, S. (eds) *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60357-4_39-1

Radiocommunication Study Group 1 (Hrsg.). (2006). Radio noise measurements. In *REPORT ITU-R SM.2055*.

Sennheiser. (2018). *Digitale Dividende I*. https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/9914/Digital_Dividend_I_DE-DE.pdf

Sennheiser.(2018). *Digitale Dividende II*. https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/10171/Digital_Dividend_II_DE-DE_V2.pdf

Sennheiser - EW-DX SKM Handsender Q1-9 - 470.2 - 550 MHz | 509412. (o. D.). Mediatec. https://www.mediatec.de/sennheiser-ew-dx-skm-handsender-q1-9-4702-550-mhz-509412/?gad_source=1&gad_campaignid=21476454365&gclid=CjwKCAjwqKzEBhANEiwAeQaPVa66rMEjDw6t6iqrQ5xHOubg7k0IU0RWUoFXco1hzcnIOGBCWwcExhoCHqUQAuD_BwE
Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Shure Audio Institute. (o. D.). Sai. <https://sai.training.shure.com/unit/view/id:5307>
Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Shure Incorporated. (o. D.). *WIRELESS SYSTEMS COMPARISON GUIDE*. https://content-files.shure.com/Pubs/GLX-D/Wireless_Systems_Comparison_Chart.pdf
Zuletzt aufgerufen am 14.08.2025

Shure Incorporated. (2019). *VHF UND UHF ANTENNEN KONFIGURATION*. <https://content-files.shure.com/Pubs/axt630/antennen-katalog-de.pdf>

Shure Performance & Production. (2023, 7. November). The Path to Extraordinary Sound: Insights from TobyMac's Audio Pros [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=v5w067vPbOs>
Zuletzt aufgerufen am 12.08.2025

STERN.de. (2025, 10. Februar). TV-Duell: Friedrich Merz verlor sein Mikrofon während der Sendung. *stern.de*. <https://www.stern.de/politik/deutschland/tv-duell--friedrich-merz-verlor-sein-mikrofon-waehrend-der-sendung-35452626.html>
Zuletzt aufgerufen am 12.08.2025

Thomann(o. D.a). *Sennheiser EW-DX SK R1-9*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/sennheiser_ew_dx_sk_r1_9.htm?gad_source=1&gad_campaignid=1576042972&gclid=CjwKCAjwqKzEBhANEiwAeQaPVVazgr_x6REf1CHXrYFk20SJz8SAp1mZYhidoFY10DkdAwPdPnA-0hoCuckQAvD_BwE
Zuletzt aufgerufen am 31.07.2025

Thomann(o. D.b). *Sennheiser EW-DP SKP R1-6*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/sennheiser_ew_dp_skp_r1_6.htm?gad_source=1&gad_campaignid=1576042972&gclid=CjwKCAjwqKzEBhANEiwAeQaPVUtlPwm1Mn9yD1plQ52fR1kMHtQnqZRXaYJlfc64ljYvhz_bNWzkhoCkGoQAvD_BwE

Thomann(o. D.c). *Shure UA8 470-636*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/shure_ua8_470_636.htm?gad_source=1&gad_campaignid=1576042972&gclid=CjwKCAjwy7HEBhBJEiwA5hQNojCJeszEnHkT_AZdKQGoQuJoj4CbOdT_LQxpKdNQpta-tGzUb6bIPhoCSNgQAvD_BwE
Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Thomann(o. D.d). *Sennheiser Replacement Antenna 576131*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/sennheiser_replacement_antenna_576131.htm
Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Thomann(o. D.e). *Shure UA844+SWB-LCE*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/shure_ua844_swb_lce.htm?gad_source=1&gad_campaignid=1576042972&gclid=Cj0KCQjwqebEBhD9ARIsAFZMbfbwM9UhYCRkqMtcQiRln7SykLxm5wKC27R1HojEHs26keOdYZ5-WrdMaApdEEALw_wcB
Zuletzt aufgerufen am 11.08.2025

Thomann(o. D.f). *Shure UA 221*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/shure_ua_221.htm

Zuletzt aufgerufen am 11.08.2025

Thomann(o. D.g). *Sennheiser Half wave Dipole Q*. Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/sennheiser_half_wave_dipole_q.htm

Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Thomann(o. D.h). Musikhaus Thomann. https://www.thomann.de/de/shure_ua834wb.htm?gad_source=1&gad_campaignid=1576042972&gclid=Cj0KCQjwndHEBhDVARIsAGh0g3BLB0KvZQYx7IKbH5za8CrRNpjhJ18ApGIH0859NaCmiodmZQCXkccaAmB1EALw_wcB

Zuletzt aufgerufen am 08.08.2025

UA874 - UA874 Aktive Richtantenne - Shure Germany. (o. D.). <https://www.shure.com/de-DE/produkte/zubehoer/ua874#support>

Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Was man über Antennen wissen sollte. (o. D.). Shure Germany. <https://www.shure.com/de-DE/insights/w/was-man-uber-antennen-wissen-sollte>

Zuletzt aufgerufen am 01.08.2025

Wireless Workbench 7 - WWB7 - ShuRe Germany. (o. D.). <https://www.shure.com/de-DE/produkte/software/wwb?variant=WWB>

Zuletzt aufgerufen am 20.08.2025

Wilzeck, A. (2023). *Technical paper*. Sennheiser. <https://newsroom.sennheiser.com/insights-into-frequency-coordination-of-broadband-wireless-multi-channel-audio-systems-wmas-and-narrowband-wireless-equipment>

Zuletzt aufgerufen am 20.08.2025

Zagouras, G. (2006). Digitale Dividende: zwischen Frequenzregulierung und Rundfunkbelangen. *Computer und Recht*, 22(12). <https://doi.org/10.9785/ovs-cr-2006-819>