

Wolfgang Wegst

**Beeinträchtigungen des
Rundfunkempfangs im Kfz:
Neue Bewertungsmethoden**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Beeinträchtigungen des Rundfunkempfangs im Kfz: Neue Bewertungsmethoden

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der
Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

Von:	Dipl.-Ing. Wolfgang Wegst
Aus:	Bietigheim-Bissingen
Eingereicht am:	28.01.2011
Mündliche Prüfung am:	20.05.2011
Referenten:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Achim Enders Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-814-1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

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

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-814-1

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Daimler AG in der Forschung und Vorentwicklung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit an der Technischen Universität Braunschweig.

Für die hochschulseitige Betreuung und die damit verbundenen Anregungen möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Professor Dr. rer. nat. habil. Achim Enders bedanken. Für die Übernahme des Koreferates und dem Interesse an meiner Arbeit möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Tim Fingscheidt danken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Jan Waldmann möchte ich mich besonders für die Betreuung meiner Tätigkeit bei der Daimler AG bedanken. Die Anwerbung als Doktorand bei der Daimler AG kam durch ihn zu Stande. Für das in mich investierte Vertrauen und den Zuspruch während meiner Tätigkeit bin ich überaus dankbar und möchte dies hier zum Ausdruck bringen. Unsere fachlichen Diskussionen haben essentiell zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinem Teamleiter Herrn Dr.-Ing. Martin Aidam (Daimler AG) bin ich für die organisatorische aber auch weitreichende fachliche Unterstützung meiner Tätigkeit und die darüber hinausführenden Unterhaltungen sehr dankbar. Stellvertretend für die Daimler AG möchte ich mich bei meinen Abteilungsleitern, Herrn Dr.-Ing. Dietrich Sahn, Herrn Dr.-Ing. Rainer Uhler und Herrn Thomas Weber, die meine Tätigkeit erst möglich gemacht bzw. stets unterstützt haben, bedanken.

Dank gilt meinen Team-Kollegen, aber auch der gesamten Belegschaft der Abteilung und darüber hinaus allen, die mich fachlich aber auch persönlich unterstützt haben.

Weitere Unterstützung hat diese Arbeit durch die von mir betreuten Praktikanten und Diplomanden erfahren. Hierfür möchte ich mich bei Herrn Serkan Arikan, Herrn Carlos Antonio De Obaldia, Herrn Hakan Esmer, Frau Diana Müller, Herrn Marcus Schmerling und Herrn Henning Steffen bedanken.

Weiterer Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, die mich in meinem Vorhaben bestärkt und unterstützt haben.

Für das Korrekturlesen und Anregungen über Verbesserungen möchte ich allen Korrekturlesern und besonders Herrn Alexander Küllmer und Herrn Dr.-Ing. Jan Waldmann danken.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Methode zur Bewertung von Rundfunkempfangsbeeinträchtigungen auf Grund von Funkstörungen im Kraftfahrzeug (Kfz) vorgestellt. Zunächst wird das Rundfunkempfangssystem im Kfz beschrieben, das den Empfang der Rundfunknutzsignale (Hörfunk und Fernsehen), aber auch der Störsignale ermöglicht. Die Erfassung und Bewertung der vom Kfz selbst verursachten Störsignale erfolgt in einer geschirmten EMV-Prüfumgebung mit Hilfe eines Funkstörmessempfängers. Dabei zeigt sich, dass vor allem für digitale Funkdienste die Bewertung mit einem Funkstörmessempfänger nach etablierten Normen nicht immer mit den wahrnehmbaren Empfangsbeeinträchtigungen übereinstimmt.

Zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen muss ein Rundfunknutzsignal in die Betrachtung mit einbezogen werden. Die für den Empfang im Kfz relevanten Rundfunkdienste und Modulationsarten werden deshalb vorgestellt. Für die Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen wurde ein so genannter AudioVideo-Prüfplatz (AVP) entwickelt. Die Komponenten des AVP dienen zur Erzeugung des Rundfunknutzsignals, der Addition von Nutz- und Störsignal sowie zum Empfang dieser Signale. Der Empfang des Nutzsignals mit aufaddiertem Störsignal erfolgt durch einen Rundfunkempfänger, wie er im Kfz tatsächlich zum Einsatz kommt. Bei dem softwaregesteuerten Prüfablauf wird jeweils das demodulierte, ungestörte Empfangssignal mit dem demodulierten, aber gestörten Empfangssignal verglichen. Für diesen Vergleich werden die instrumentellen Audioqualitätsbewertungsverfahren PESQ und PEAQ zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen bei Hörfunkdiensten eingesetzt. Mit dem AudioVideoPrüfplatz kann zusätzlich zur Qualitätsbewertung die Dämpfung des vorhandenen Störsignals ermittelt werden, für welche eine vorgegebene Empfangsqualität wieder erreicht wird.

Die Bewertung von Störsignalen mit dem AVP wird zunächst mit generischen, mathematisch beschreibbaren Störsignalen evaluiert. Im Weiteren wurden Untersuchungen von tatsächlich im Kfz auftretenden Störsignalen durchgeführt. Bei der Gegenüberstellung der Bewertungen mit dem AVP und dem Funkstörmessempfänger zeigt sich, dass die zu erwartenden Empfangsbeeinträchtigungen nicht für alle Rundfunkdienste mit einer Detektorbewertung nach etablierten Normen sicher ausgeschlossen werden können. Die Empfangsbeeinträchtigungen sind hochgradig von den Störsignalen, aber auch den zu schützenden Rundfunksignalen sowie den Empfangsbedingungen (Empfangspegel) abhängig. Durch Anwendung des AVP als Ergänzung zur Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger kann dieses Problem gelöst werden. Zur Steigerung der Effizienz und Vermeidung langer Prüfdauern auf Grund des zusätzlichen Einsatzes des AVP wurden die Möglichkeiten einer Störsignalaufzeichnung und originalgetreuen Wiedergabe sowie einer Simulation der Empfangsbeeinträchtigungen realisiert.

Abstract

In this thesis a new method for the assessment of broadcast reception disturbances in vehicles is presented. These disturbances in the demodulated broadcast signals (audio and TV) were caused by radio interference emitted by the vehicle itself. Initially the vehicles receiving system, which enables the reception of radio broadcast signals as well as interfering signals, is described. For the acquisition and the assessment of the radio interference caused by the vehicle itself, generally a shielded EMC-test-facility and an EMI receiver is used. Especially for digital broadcast services differences between the assessment of the radio interferences with an EMI receiver according to standards and the perceptible disturbances caused by this interference signal appear.

For the assessment of disturbances the radio broadcast signal is essential. Thus the relevant broadcast services for the reception in vehicles will be presented along with the used modulation types. In this thesis a special test setup called the AudioVideoPrüfplatz (AVP) was developed for the assessment of disturbances. Different parts of the AVP generate the broadcast signal, do the addition of the broadcast signal and the radio interference signal, as well as receive and demodulate the signal. For the reception and demodulation of the radio signal a typical vehicle onboard radio broadcast receiver is used. Within the computer controlled assessment procedure a comparison of the demodulated broadcast signal with and without the added interference signal is done. For the assessment of the disturbances in sound broadcasts the instrumental audio quality assessment methods PESQ and PEAQ were examined. The determination of the needed interferences attenuation to get a certain audio quality in the presence of radio interferences is also possible with the AVP.

As first step the evaluation of the AVP is done with generic, mathematically describable interference signals. As next step the AVP was used to analyse real interference signals generated and received by vehicles. The comparison of the results obtained with the AVP and the measuring receiver show that it is not always possible to assure a disturbance-free reception of radio broadcasts by means of detector measurements. The disturbance depends strongly on the radio interference signal as well as the radio broadcast signal and the conditions of the signal reception (reception level). It's proposed to use the assessment with the AVP in addition to measuring receivers to assure the reception quality for all conditions. To increase the efficiency and reduce the time spend for the additional assessment with the AVP, means for recording interference signals followed by off-line playback of them and also simulations were realised.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung.....	11
2 Empfangssysteme im Kraftfahrzeug.....	13
2.1 Antennen.....	14
2.2 Antennenverstärker.....	17
2.3 Empfänger.....	17
2.4 Maßstäbe für die Empfangsqualität.....	19
2.4.1 Bewertung durch Probanden.....	19
2.4.2 Messtechnische Bewertung.....	19
3 Funkstörungen im Kfz: Erfassung & Bewertung.....	21
3.1 Störaussendungsprüfaufbau.....	21
3.2 Funkstörmessempfänger.....	22
3.2.1 Superheterodynempfänger.....	23
3.2.2 Zeitbereichsmessempfänger.....	24
3.2.3 Bewertung von Störsignalen.....	26
3.2.3.1 Spitzenwertdetektor.....	26
3.2.3.1.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen.....	27
3.2.3.2 Mittelwertdetektor.....	28
3.2.3.2.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen.....	28
3.2.3.3 Quasispitzenwertdetektor.....	29
3.2.3.3.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen.....	30
3.2.3.4 Effektivwertdetektor.....	30
3.2.3.4.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen.....	31

3.2.3.5	Weitere Detektoren	31
3.2.4	Statistische Bewertung mittels APD	32
3.2.4.1	Rauschkurve bei der APD-Bewertung	33
3.3	Störermodelle.....	33
3.3.1	Sinusförmige Störsignale	33
3.3.2	Pulshafte Störsignale.....	34
3.3.3	Middleton-Modelle	35
3.4	Bewertungsverfahren zum Schutz von Rundfunkdiensten.....	37
4	Rundfunksignale	39
4.1	Ausbreitung von Rundfunksignalen	39
4.2	Modulation analoger Signale.....	40
4.2.1	Amplitudenmodulation	40
4.2.2	Frequenzmodulation	42
4.2.3	Analoge Rundfunkdienste.....	44
4.2.3.1	AM-modulierte Rundfunksignale	44
4.2.3.2	FM-modulierte Rundfunksignale	44
4.3	Modulation digitaler Signale	46
4.3.1	Quadratur Amplituden Modulation (QAM)	48
4.3.2	Frequenzmultiplexverfahren (FDM).....	50
4.3.3	Digitale Rundfunkdienste	51
4.3.3.1	Digital Audio Broadcast (DAB).....	51
4.3.3.2	Digital Radio Mondiale (DRM).....	53
4.3.3.3	Digital Video Broadcasting (DVB).....	55
5	Vorstellung der neuen Prüfmethode.....	57
5.1	Bisherige Ansätze	57
5.2	Prüfaufbau.....	58
5.3	Ablauf der Prüfung	59
5.4	Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung mit dem AVP	61
5.4.1	Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung durch Testpersonen	62
5.4.2	Instrumentelle Bewertung der Empfangsqualität.....	63

5.4.2.1	Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)	64
5.4.2.2	Perceptual Evaluation of Audio Quality (PEAQ)	67
5.4.3	Evaluierung der instrumentellen Audiobewertung	69
5.4.4	Signalverlauf und Komponenten des AVP	73
5.4.5	Signaladdition	74
5.4.5.1	Leistungsaddierer	74
5.4.5.2	Widerstandskoppler - PickOffTee.....	76
5.4.6	Verstärkung eines Signals und das Rauschen	77
5.4.7	Übertragungsverhalten realer Koaxialleitungen	79
5.5	Erweiterung (Offline-Bewertung)	80
5.6	Bediensoftware	82
6	Anwendung der neuen Prüfmethode	85
6.1	Empfangspegel des Nutzsignals	85
6.1.1	Pegel der Sendersuchlaufschwelle	85
6.1.2	Mindestempfangspegel	86
6.1.3	Ermittlung realer Empfangspegel im Kraftfahrzeug.....	87
6.2	Untersuchte Störsignale	90
6.2.1	Künstlich erzeugte Störsignale	90
6.2.1.1	Empfangsbeeinträchtigungen analoger Rundfunksignale.....	92
6.2.1.1.1	AM-Rundfunk	92
6.2.1.1.2	FM-Rundfunk.....	97
6.2.1.2	Empfangsbeeinträchtigungen digitaler Rundfunksignale	100
6.2.1.2.1	Digital Audio Broadcasting (DAB)	100
6.2.1.2.2	DVB-T.....	106
6.2.2	Reale Störsignale in Fahrzeugen.....	108
6.2.2.1	Beispiele für AM-Rundfunk	108
6.2.2.2	Beispiele für FM-Rundfunk	112
6.2.2.3	Beispiele für DAB.....	114
6.2.2.4	Beispiele DVB-T.....	117
6.3	Vergleich der Methoden und Ergebnisse für digitalen Rundfunk	120
6.3.1.1	DAB	121

6.3.1.2	DVB-T.....	125
7	Simulation als Alternative.....	129
7.1	Simulation mit realen Störsignalen.....	130
7.1.1	Empfangsbeeinträchtigungen beim AM-Rundfunkempfang.....	130
7.1.2	Empfangsbeeinträchtigungen beim DRM-Rundfunkempfang..	132
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
	Anhang.....	139
	Abkürzungsverzeichnis.....	143
	Abbildungsverzeichnis.....	149
	Tabellenverzeichnis.....	155
	Literaturverzeichnis.....	159

1 Einleitung

In modernen Kraftfahrzeugen kommt eine zunehmende Anzahl elektrischer und elektronischer Systeme zum Einsatz. Dadurch stellt die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ein sehr relevantes Thema bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen dar. Die Elektromagnetische Verträglichkeit ist in [VDE 0870] definiert als die „Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, in ihrer elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässig zu beeinflussen“. Zur Sicherstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit werden daher Prüfungen zur Ermittlung der Störfestigkeit und der Störaussendung an Kraftfahrzeugen durchgeführt. Ziel ist es, Beeinflussungen elektrischer und elektronischer Systeme innerhalb und außerhalb des Kraftfahrzeugs feststellen zu können und entsprechende Abhilfemaßnahmen zu treffen.

Bei einer Störaussendungsprüfung werden zum Einen die gesetzlichen Anforderungen an die Fernerstörung der Kraftfahrzeuge [UN/ECE R10] auf ihre Einhaltung hin geprüft. Des Weiteren wird so sichergestellt, dass der Rundfunkempfang im Kraftfahrzeug nicht durch die eigene Störaussendung des Kraftfahrzeugs beeinträchtigt wird. Um Letzteres sicherzustellen, finden Grenzwerte nach [CISPR 25] oder Derivate davon bei Herstellern von Kraftfahrzeugen Anwendung. Die Erfassung und Bewertung von Rundfunkempfangsbeeinträchtigungen durch Funkstörungen auf Grund elektromagnetischer Unverträglichkeit stellt den Kernpunkt dieser Arbeit dar.

Zum Schutz des Rundfunkempfangs wurden über die Jahre hinweg zahlreiche Prüfverfahren und Messgeräte entwickelt. Zur Bewertung der Störungen in Radioempfängern mit ursprünglicher AM-Modulation wurden speziell an den Störeindruck angepasste Messverfahren und Grenzwerte entwickelt, die in fast jedem Funkstörmessempfänger implementiert sind (sogenannte CISPR-16 EMI-Receiver). Nach der Demodulation liefert ein Funkstörmessempfänger als Anzeige eine bewertete Störspannung. Diese Bewertung durch Funkstörmessempfänger wird seit Jahrzehnten praktiziert und ist in Standards festgeschrieben.

In der jüngsten Vergangenheit kamen immer mehr digitale Rundfunkdienste auf, die sich insbesondere hinsichtlich Modulationsverfahren und Frequenzallokation von analogen Rundfunkdiensten unterscheiden. Damit ändert sich auch die Einflussnahme der Funkstörungen auf den empfangenen Rundfunksignalinhalt. Der klassische Funkstörmessempfänger bzw. seine Bewertung weist deshalb Unterschiede zum Störeindruck beim tatsächlichen Rundfunkempfänger im Fahrzeug auf. Die derzeitige Verwendung des Funkstörmessempfängers und die damit einhergehende Bewertung der Funkstörungen entsprechen häufig nicht mehr den tatsächlich auftretenden Empfangsbeeinträchtigungen.

Als Abhilfe kommt die in dieser Arbeit vorgestellte neue Prüfmethode in Frage, bei der die tatsächlichen Empfangsbeeinträchtigungen auf ein Nutzsignal bewertet werden. Die Bewertung des Rundfunksignals (sowohl Hörfunk als auch Fernsehen) findet nach der Demodulation im Basisband statt. Diese Methode ist damit von der Modulationsart und dem Rundfunkdienst unabhängig, es sind lediglich entsprechende Geräte im Prüfaufbau notwendig. Zusätzlich werden die spezifischen Eigenschaften der im Fahrzeug verwendeten Rundfunkempfänger berücksichtigt.

Zunächst wird das Rundfunkempfangssystem im Kraftfahrzeug, das als Störsekte betrachtet wird, vorgestellt. Im darauf folgenden Kapitel wird auf die Erfassung von Funkstörungen, beginnend beim Prüfaufbau über die Messgeräte bis hin zu Störmodellen und der Bewertung von Störsignalen, eingegangen. Das nächste Kapitel erläutert die Vielfalt zu schützender analoger und digitaler Rundfunksignale. Der Gegenstand dieser Arbeit wird im darauffolgenden Kapitel vorgestellt: eine neue Prüfmethode, bei der die tatsächliche Empfangsbeeinträchtigung eines Rundfunkempfangssignals durch Funkstörungen für prinzipiell alle Rundfunkdienste im Kraftfahrzeug ermittelt werden kann. Dieses Kapitel gliedert sich in die Beschreibung des benötigten Prüfaufbaus, den Ablauf der Prüfung, die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung und der dazu erstellten Bediensoftware. Für digitale und analoge Hörfunksignale wurden die instrumentellen Audioqualitätsbewertungsverfahren PESQ und PEAQ zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen verwendet, während bei digitalen Fernsehsignalen eine effiziente Bewertung durch eine Testperson Anwendung fand. Zusätzlich zur Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung wird mit dem Prüfaufbau eine Störsignaldämpfung ermittelt, die für eine definierte Empfangsqualität angewandt werden muss. Nach der Vorstellung der neuen Prüfmethode werden Beispiele für die Anwendung der Prüfmethode gegeben, bei denen generische aber auch reale Funkstörungen, die in Kraftfahrzeugen auftreten können, untersucht wurden. Zur grafischen Gegenüberstellung der Störsignaldämpfung, die mit dem neuen Prüfaufbau ermittelt wurde, und der Störsignalbewertung durch die Detektoren eines Funkstörmessempfängers werden in dieser Arbeit Scatter-Plots als geeignetes Werkzeug eingeführt. Diese Darstellung ermöglicht neben der Visualisierung vieler einzelner Messwerte zusätzlich eine Hilfestellung zur Definition von Grenzwerten für die unterschiedlichen Detektoren. Als Alternative zur Verwendung der vorgestellten Prüfmethode mit einem Prüfaufbau wird ein Ansatz mittels Softwaresimulation im vorletzten Kapitel vorgestellt. Abschließend wird das Resümee gezogen mit einem möglichen weiteren Zukunftsblick.

2 Empfangssysteme im Kraftfahrzeug

Schon seit den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde begonnen, Kraftfahrzeuge mit Rundfunkempfängern auszurüsten. Zu Beginn des Rundfunks konnten nur amplitudenmodulierte (AM), seit den 40iger Jahren dann auch frequenzmodulierte (FM) Signale gesendet und im Kraftfahrzeug empfangen werden. Heutzutage sind neben den zuvor genannten analogen Rundfunkdiensten digitale Signalübertragungen hinzugekommen [Lin04]. In diesem Kapitel wird zunächst auf die Rundfunkempfangsanlage im Kraftfahrzeug eingegangen.

Die Rundfunkempfangsanlage hat sich von einfachsten zweckmäßigen Antennen und Radioempfängern hin zu hoch komplexen Multimedia-Empfangssystemen entwickelt. Der Empfänger ermöglichte ursprünglich nur den Hörfunkempfang, später dann auch den Fernsehempfang im Kraftfahrzeug. Die Wiedergabe von Audio- und Videodaten von verschiedensten Medien zunächst beginnend mit Tonbändern bis heutzutage hin zu digitalen Speichermedien wird zusätzlich unterstützt. Die Anzeigeeinheiten des ursprünglichen Empfangssystems und der dahinterliegende Computer werden in modernen vernetzten Kraftfahrzeugen auch zur Bereitstellung einer Navigationsfunktion, als Benutzerschnittstelle zum Bordcomputer, der Telefonieanwendung und weiteren denkbaren Anwendungen genutzt. Oft wird diese Vereinigung mehrerer Kommunikationsdienste und Informationen unter dem Begriff Telematik zusammengefasst. Diese Entwicklung ist auf die technischen Fortschritte und die damit einhergehenden Anforderungen von Kundenseite zurückzuführen.

In modernen Kraftfahrzeugen bestehen die Telematiksysteme aus mehreren vernetzten Steuergeräten. Steuergeräte in diesem Sinne können Rundfunkempfänger, Audioverstärker, CD-Spieler, Telefoniesteuergerät, GPS-Antenne für die Navigation oder Ähnliches sein. Die Steuerung des Telematiksystems und der einzelnen vernetzten Steuergeräte sowie der Benutzerführung erfolgt über ein zentrales Steuergerät, das die Anzeigeeinheit und Steuerelemente enthalten kann. Dieses zentrale Steuergerät wird oft als HeadUnit bezeichnet. In Abbildung 1 ist ein Beispiel für ein solches System mit separater Anzeigeeinheit und zwei weiteren Rundfunkempfängern, die über einen optischen Bus an das Telematiksystem angeschlossen werden können, dargestellt.

Zur Übersicht dient das Blockschaltbild in Abbildung 2, bestehend aus einer Antenne, einem Antennenverstärker, dem Empfänger, einer Anzeigeeinheit, einem Audioverstärker und der HeadUnit. Im Weiteren werden die einzelnen Blöcke beginnend mit der Antenne im Detail beschrieben.



Abbildung 1: Telematiksystem bestehend aus mehreren Steuergeräten

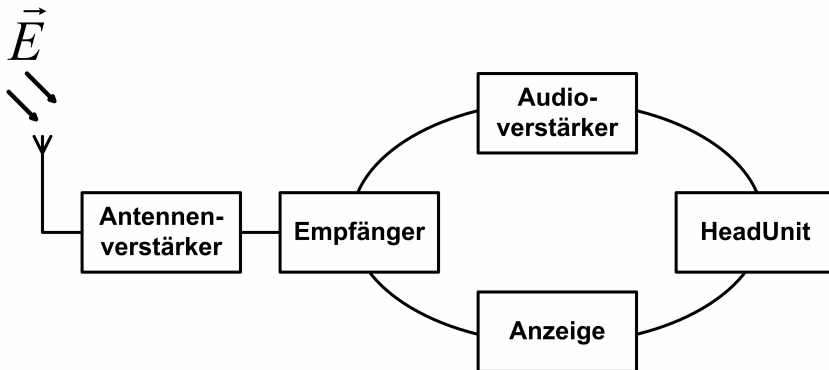


Abbildung 2: Blockschaltbild vom Empfangssystem

2.1 Antennen

Zum Empfang von Rundfunksignalen werden Antennen benötigt, die auf die jeweiligen Frequenzbereiche angepasst sind. Sie wandeln die feldgebundenen elektromagnetischen Wellen in Spannungen und Ströme, die dann einem Empfänger zugeführt werden. In den ersten Fahrzeugen zum Empfang von AM-Signalen wurden Rahmenantennen verwendet. Später wurden diese durch Stabantennen ersetzt [Lin04], wie am Kraftfahrzeug in Abbildung 3 zu sehen ist.

Heutzutage sind in vielen Fahrzeugen Mehrantennensysteme in Form von Scheibenantennen Stand der Technik. Dazu werden leitfähige Empfangsstrukturen in die Scheiben eingebracht oder das Heizfeld in der Heckscheibe als Antenne verwendet. Dabei sind die Kontaktfelder und Antennenabgriffe meist unter einem Schwarzdruck verborgen. Ein Beispiel für Heckscheibenantennenstrukturen ist in Abbildung 4 gegeben.



Abbildung 3: Mercedes-Benz W 115 mit Stabantenne (Foto: Daimler AG)

Eingesetzt werden solche Mehrantennensysteme vorwiegend für frequenzmodulierten Hörrundfunk und den Fernsehroundfunk zur Verbesserung des Empfangs. Ziel ist es, durch mehrere Antennen Empfangseinbußen auf Grund von Mehrwegeempfang und Schwankungen des Empfangspegels zu mindern [Sha07]. Es kommen prinzipiell zwei Methoden zur Nutzung mehrerer Antennen in Frage: „Schaltdiversity“ und „Phasendiversity“.

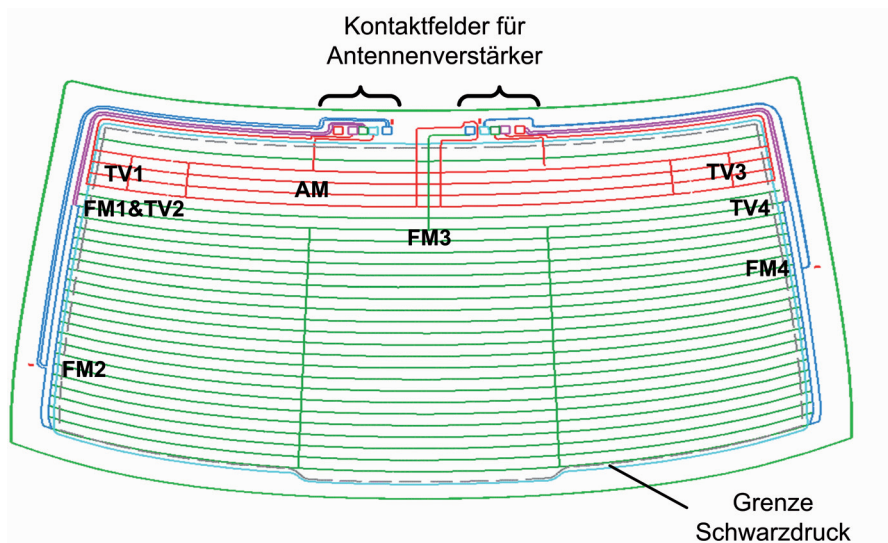


Abbildung 4: Heckscheibenantennenstrukturen für verschiedene Rundfunkdienste

Bei Schaltdiversitysystemen wird über das demodulierte Signal sowie die Einhüllende des Hochfrequenzsignals (HF-Signals) von der Umschaltlogik die Antenne mit den geringsten Verzerrungen ausgewählt [Sha07]. Die so ermittelte Antenne wird dann auf den Ausgang des Diversity-Moduls geschaltet. Es wird nur über diese eine, selektierte Antenne empfangen. In Abbildung 5 ist schematisch ein Diversity-System mit abgesetztem Diversity-Modul und Radioempfänger dargestellt. Hierbei wird das HF-Signal verstärkt und an die Eingangsstufe (Front-End) des Radioempfängers weitergeleitet. Dort wird das HF-Signal zur Demodulation und Rückkopplung an die Umschaltlogik auf eine Zwischenfrequenz (ZF) heruntergemischt. In [Sha09] werden verschiedene Schaltdiversitysysteme und deren Realisierung für den FM-Empfang im Detail beschrieben.

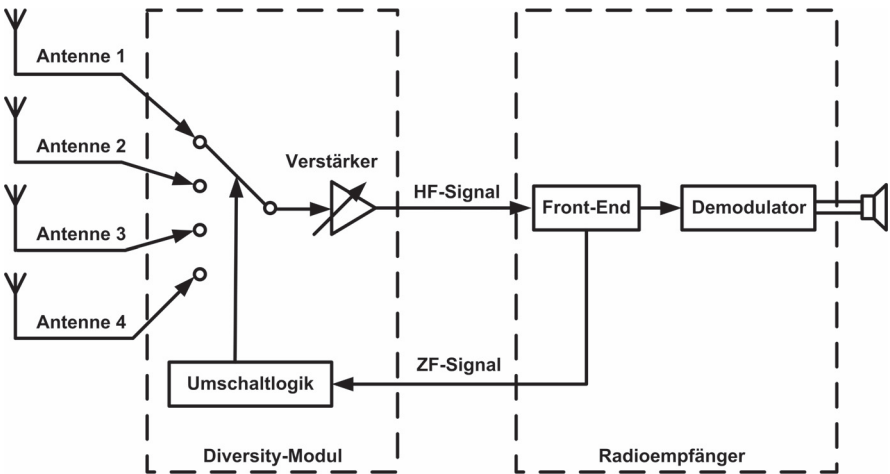


Abbildung 5: Blockschaltbild eines Mehrantennen-Schaltdiversitysystems

Beim Phasendiversity werden die Phasendifferenzen aller Antennenempfangssignale zu einer Bezugsantenne ermittelt. Die ermittelten Differenzen werden dann mit einem Phasenschieber ausgeglichen und anschließend werden die korrigierten Empfangssignale aufsummiert. Bei diesem System werden die Empfangssignale von allen Antennen zusammengefasst und tragen zum Empfang bei. Ein Beispiel für ein Phasendiversitysystem ist in Abbildung 6 für zwei Antennen dargestellt, bei dem die Antenne 1 als Bezug genommen wird und die Phasendifferenz anhand der Empfangssignale der Antennen und des demodulierten Empfangssignals ermittelt wird. Eine Möglichkeit, wie die Phasendifferenz in einer Regelschleife permanent ermittelt und korrigiert werden kann, ist in [Sha07] gezeigt.

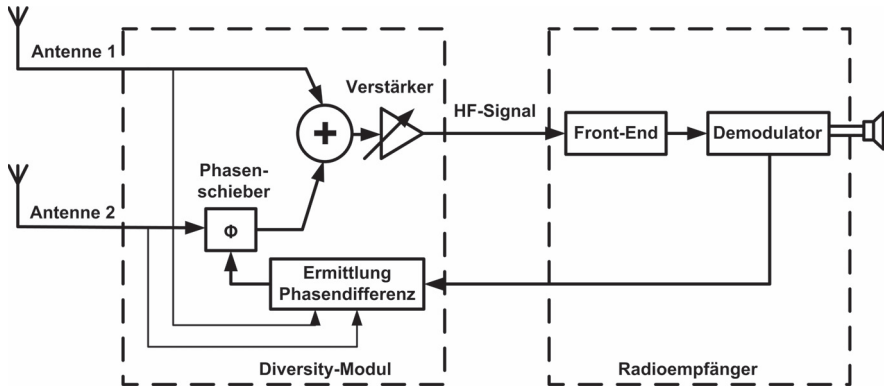


Abbildung 6: Blockschaltbild eines Mehrantennen-Phasendiversitätssystems

2.2 Antennenverstärker

Der Antennenverstärker ist durch eine geringe Rauschzahl gekennzeichnet und passt den Signalpegel kommend von der Antenne an die Eingangsempfindlichkeit des nachfolgenden Empfängers an. Zusätzlich führt er eine Impedanzwandlung von der Antennenimpedanz zur Impedanz des nachfolgenden Empfängers durch. Die Antennenimpedanz ist von der Geometrie und den elektrischen Parametern der jeweiligen Antenne abhängig. Es wird eine bestmögliche Impedanzwandlung über das gesamte, für diesen Antennenverstärker, relevante Rundfunkempfangsband angestrebt.

2.3 Empfänger

Der zu Beginn einfache Empfänger für reinen AM-Rundfunk hat sich zu einem inzwischen hochkomplexen, auf digitaler Signalverarbeitung basierenden hochintegrierten IC-Baustein entwickelt. Der einst rein analoge Rundfunkempfänger, der oft nach dem Überlagerungsprinzip, also der Nutzung einer Zwischenfrequenz (ZF), und analogen Demodulierung (Abbildung 7) aufgebaut ist, findet kaum mehr Anwendung.

Stattdessen werden oft Systeme verwendet, bei denen eine Aufteilung in eine analoge Eingangsstufe und eine digitale Verarbeitungsstufe stattfindet. Die analoge Eingangsstufe (engl. front-end) filtert das Empfangssignal je nach zu empfangendem Frequenzband. Anschließend wird es auf eine Zwischenfrequenz gemischt, bevor in der nächsten Verarbeitungsstufe die Signale digitalisiert und ins komplexe Basisband als IQ-Daten (Inphase, Quadratur) verschoben werden.

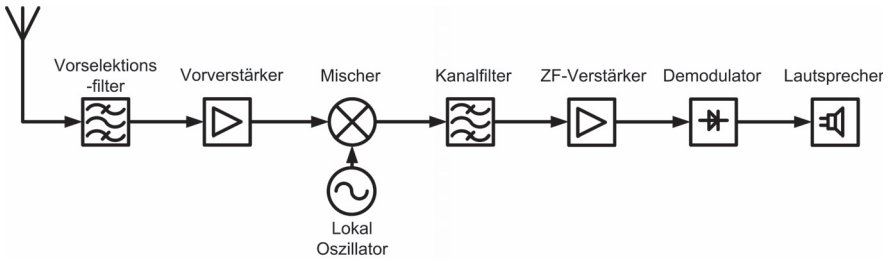


Abbildung 7: Blockschaltbild eines Überlagerungsempfängers

Der Demodulator selbst ist als Software auf einem Digital-Signal-Prozessor (DSP) implementiert. Welche Signale demoduliert werden können ist rein softwareabhängig. In Abbildung 8 ist ein Beispiel für einen solchen Rundfunkempfänger gezeigt. Neben der reinen Demodulierung der Signale sind Zusatzfunktionen enthalten, die den Empfang bei geringen Pegeln verbessern, bestimmte Störungen im Audiosignal entfernen, im Hintergrund einen alternativen Sender suchen und umschalten oder die Ausgabe eines Audiosignals komplett unterdrücken [Lin04]. Solche Zusatzfunktionen sind in einem DSP-basierten Empfänger einfacher zu realisieren als in einem rein analogen Empfänger.

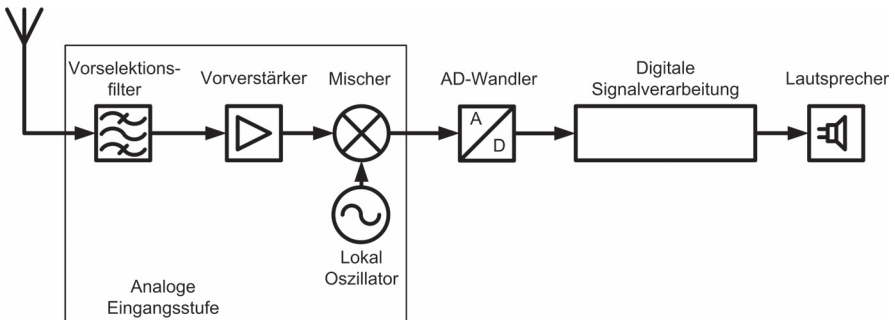


Abbildung 8: Blockschaltbild eines Empfängers mit DSP-basierter Demodulation

Oft ist ein Sendersuchlauf implementiert und wird verwendet. Radiosender werden durch den Suchlauf erst zum Empfang angeboten, wenn der Empfangspegel die Suchlaufschwelle überschreitet. Dies ist ein wichtiger Indikator für die Höhe der Signalpegel, die in der Praxis noch empfangen werden können. Für digitale Dienste ist die Angabe eines Mindestempfangspegels möglich. Der Empfänger enthält einen internen Bitfehlerschätzer, mit dessen Hilfe die Ausgabe des demodulierten Empfangssignals unterbunden wird, wenn die Bitfehlerquote (engl. Bit Error Rate BER) zu hoch ist. Durch die implementierten Fehlerkorrekturmechanismen bedeutet eine BER ungleich Null noch nicht zwangsläufig eine wahrnehmbare Empfangsbeeinträchtigung.

2.4 Maßstäbe für die Empfangsqualität

Die Empfangsqualität ist vom Empfänger, der Modulation und der Übertragung der Signale abhängig. Für die Qualifizierung von Rundfunkempfängern werden häufig ihre Eigenschaften untersucht oder über geeignete Prüfungen nachgewiesen. Hierbei stehen die funktionalen Eigenschaften im Vordergrund. Die Empfangsqualität kann sowohl durch subjektive Bewertungen von Probanden ermittelt werden, wie auch durch den messtechnischen Nachweis physikalischer Eigenschaften des Empfängers erfolgen.

2.4.1 Bewertung durch Probanden

Grundlegende Methoden zur subjektiven Audiobewertung von Empfangssignalen wurden von der ITU in [Rec.BS1284-1] standardisiert. Dazu sind Bewertungsskalen mit fünf bzw. sieben Qualitätsstufen definiert, mit denen die Testpersonen die Audioqualität des Empfangssignals beschreiben. Als Testpersonen sollten geübte Testhörer verwendet werden. Für den eigentlichen Hörtest kommen Einzelbewertungen durch Vergleiche mit und ohne Referenzsignal in Frage. Bei einem Paarvergleich mit dem Referenzsignal sollte abwechselnd das Referenzsignal und das zu bewertende Signal abgespielt werden. Die Signale sollten eine Länge von 15 bis 20 Sekunden besitzen, so dass eine Bewertung aus dem Kurzzeitgedächtnis heraus möglich ist. Neben der allgemeinen Qualitätsbeurteilung wurden zusätzliche Begriffe definiert, die spezielle Qualitätsmerkmale beschreiben.

2.4.2 Messtechnische Bewertung

Unter messtechnischer Bewertung wird die Bewertung der Empfangsqualität auf Basis gemessener physikalischer Größen verstanden. Hierzu sind zunächst die Prüfbedingungen relevant, unter denen das Gerät betrieben wird. Generell werden die Empfänger in einem Prüfaufbau mit einem oder mehreren HF-Signalen beaufschlagt. Die Empfangseigenschaften werden dann mit einem Audio- oder Videosignalanalysator bestimmt. Als Testsignale finden für Hörfunkempfänger einzelne Töne, mehrere Töne sowie unterschiedliche Rauschsignale Anwendung. Es werden Parameter wie das Audio-Signal-Rauschverhältnis (AF-SNR) bei ein oder mehreren Tönen als Nutzsignale ermittelt. Weiterhin kann auch der Leistungsanteil aller harmonischen Anteile der Töne über die Größe „Total Harmonic Distortion“ (THD) mit der Leistung der Grundschiwingung der Töne ins Verhältnis gesetzt werden. Weitere Untersuchungen widmen sich Intermodulationseffekten, Spiegelfrequenzunterdrückung, Nachbarkanalunterdrückung und ähnlichen Größen, die unmittelbaren Einfluss auf die Empfangsqualität haben. Für digitale Signalübertragungen kann zusätzlich die Bitfehlerrate (BER) als Kriterium herangezogen werden. Hierzu muss jedoch auf interne Bitfehlerschätzer des Empfängers zugegriffen werden. Weitere Informationen zu Prüfungen an Rundfunkempfängern können aus [IEC 60315] entnommen werden.

3 Funkstörungen im Kfz: Erfassung & Bewertung

Die Anzahl der elektrischen und elektronischen Systeme, die in modernen Kraftfahrzeugen verbaut werden, steigt immer weiter. Jedes dieser Systeme kann prinzipiell eine elektromagnetische Beeinflussung eines anderen Systems herbeiführen. Um eine unzulässige Beeinflussung ausschließen zu können, existieren Anforderungen an die einzelnen Systeme und das gesamte Fahrzeug selbst. Zur Überprüfung dieser Anforderungen werden im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs die Störaussendung der einzelnen Systeme und des Gesamtfahrzeugs messtechnisch erfasst und geeignet bewertet. In diesem Kapitel wird der etablierte Messaufbau vorgestellt. Anschließend daran wird auf die Bewertung von Störsignalen eingegangen.

In Kraftfahrzeugen können verschiedenste Arten von Funkstörungen durch die unterschiedlichen Subsysteme entstehen. Durch Clock-Takt oder andere Oszillatoren werden sinusförmige Störsignale verursacht, während durch Elektromotoren, etc. breitbandige Störsignale entstehen. Zusätzlich treten stochastische Störsignale auf, die einen nicht deterministischen und pulshaften Charakter besitzen. Die gesamte Störaussendung eines Kraftfahrzeugs ergibt sich als eine Superposition der einzelnen Störformen. Im Kapitel 6.2 werden verschiedene real gemessene Störsignale und deren unterschiedliche Beschreibung als Beispiele zur Anwendung des AudioVideoPrüfplatzes präsentiert.

In diesem Kapitel soll zunächst auf den Prüfaufbau für eine Störaussendungsprüfung, anschließend auf die zur Erfassung von Störsignalen eingesetzten Messgeräte (Funkstörmessempfänger), die Bewertung von Störsignalen und zuletzt auf eine Modellbildung der Störsignale eingegangen werden.

3.1 Störaussendungsprüfaufbau

Zur messtechnischen Erfassung von Störsignalen wird ein Prüfaufbau nach [CISPR 25] bzw. Abbildung 9 verwendet. Das Kraftfahrzeug befindet sich in einer geschirmten und an den Wänden sowie der Decke mit absorbierendem Material ausgestatteten EMV-Prüfumgebung. Die Schirmung verhindert eine Einflussnahme externer elektrischer Felder wie z. B. von Rundfunksendern auf das Messergebnis. Das absorbierende Material verhindert unerwünschte Reflexionen und Resonanzen, die innerhalb der Schirmumgebung sonst entstehen würden. In einer solchen EMV-Prüfumgebung werden dann an den fahrzeugeigenen Antennen nur die vom Fahrzeug selbst emittierten (Stör-)Signale empfangen. Der Spannungspegel am Ausgang des Antennensystems inklusive Antennenverstärker wird einem Messgerät außerhalb der geschirmten EMV-Prüfumgebung über eine geschirmte Leitung zugeführt.

Für die AM-Rundfunkbänder ist im Prüfaufbau eine Trennung der Masse von Fahrzeug und geschirmter EMV-Prüfumgebung vorgeschrieben. Häufig wird dies durch die Nutzung von batteriebetriebenen Messgeräten innerhalb der EMV-Prüfumgebung oder durch die Verwendung einer optischen Übertragungsstrecke erreicht. Eine weitere in [CISPR 25] genannte Möglichkeit ist die Verwendung eines Mantelwellenfilters zur Masse-Isolation, welches für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit Anwendung fand.

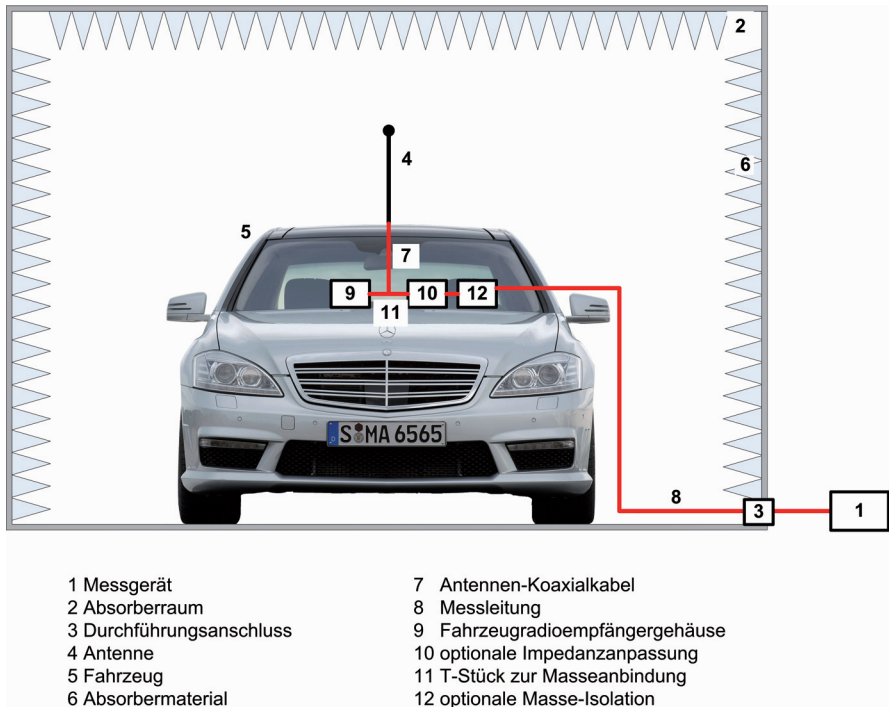


Abbildung 9: Störaussendungsprüfaufbau nach [CISPR 25]

3.2 Funkstörmessempfänger

Die Bewertung der Störsignale wird mit einem frequenzselektiven Messgerät durchgeführt, das einem Rundfunkempfänger ähnlich ist. Das am Ausgang des Antennensystems inklusive Antennenverstärker anliegende Störsignal wird dazu einem Funkstörmessempfänger oder Spektrumanalysator zugeführt. Im nachfolgenden wird der Funkstörmessempfänger genauer vorgestellt. Die Funktionsweise eines Spektrumanalysators ist fast identisch. Im Folgenden sollen die Funktionsweisen und der Aufbau eines Funkstörmessempfängers nach dem Superheterodynprinzip (Überlagerungsprinzip) sowie eines Zeitbereichsmessempfängers vorgestellt werden.

Die Anzeigewerte des Funkstörmesempfängers werden anschließend mit einem empirisch ermittelten Grenzwert, für den keine Beeinflussung des Empfangssignals zu erwarten ist, verglichen. Wird dieser Grenzwert überschritten, erfüllt der Prüfling die an ihn gestellten Anforderungen nicht.

3.2.1 Superheterodynempfänger

Bei einem Funkstörmesempfänger handelt es sich klassisch um einen Superheterodynempfänger, der im Allgemeinen wie nachfolgend beschrieben, aufgebaut ist. In Abbildung 10 ist ein Blockschaltbild eines solchen Funkstörmesempfängers dargestellt. Am Eingang des Funkstörmesempfängers befindet sich ein schaltbares Dämpfungsglied, um die Amplituden des Eingangssignals gegebenenfalls zu vermindern. Im nächsten Schritt durchläuft das Signal eine Vorselektion, die eine Bandbegrenzung darstellt. Dieses Vorselektionsfilter ist für den gesamten Messbereich des Funkstörmesempfängers abstimbar und kalibriert. Optional kann für schwache Signale ein Vorverstärker verwendet werden. Das bereits vorselektierte und in der Amplitude für die nachfolgenden Stufen angepasste Eingangssignal wird dann auf eine Zwischenfrequenz (ZF) gemischt. Auf dieser Zwischenfrequenzebene wird das Signal erneut mit einem Bandpass gefiltert. Für die unterschiedlichen Frequenzbänder und Funkdienste sind die zu verwendenden Zwischenfrequenzbandbreiten durch ihre 6-dB-Filterbandbreite festgelegt [CISPR 25]. Die Bewertung des bandbegrenzten Zwischenfrequenzsignals (ZF-Signal) findet im ersten Schritt durch einen Hüllkurvendetektor statt. Diese so erhaltene Hüllkurve wird bezüglich ihrer Eigenschaften, wie Spitzenwert, Mittelwert, Effektivwert oder über eine Gewichtung bewertet und diese Werte dann angezeigt. Die unterschiedlichen Bewertungen der Signale werden in Kapitel 3.2.3 vorgestellt. Optional kann das Hüllkurvensignal über einen Lautsprecher ausgegeben werden.

Zur Bewertung eines Frequenzbereichs, der größer ist als die Zwischenfrequenzbandbreite, wird das Spektrum des Eingangssignals sequenziell erfasst. Dazu wird die Frequenz des Lokaloszillators beginnend mit f_{Start} jeweils schrittweise um f_{Step} erhöht bis das Ende f_{Stop} des zu prüfenden Frequenzbereichs erreicht ist. Das Vorselektionsfilter wird entsprechend der aktuell eingestellten Frequenz neu abgestimmt. Bei jedem Frequenzschritt wird das Eingangssignal über eine bestimmte Verweilzeit bewertet. In Abbildung 11 ist dieser Zusammenhang zwischen Zeitverlauf der Messung und der ermittelten Spektralanteile dargestellt.

Bei zu kurzen Verweilzeiten und zeitlich nicht konstant auftretenden Störanteilen (z. B. Pulsen) ist es nicht möglich, alle Spektralanteile dieser Störanteile korrekt zu erfassen. Dies kann entweder durch eine hinreichend lange Bewertungszeit (z. B. Verweilzeit > Pulswiederholrate) oder die Verwendung eines Zeitbereichsmessempfängers vermieden werden.

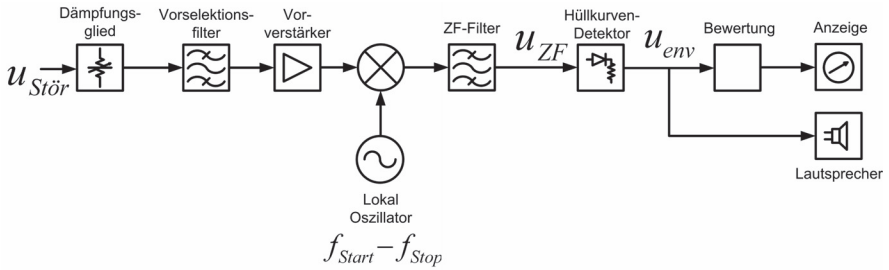


Abbildung 10: Blockschaltbild eines Funkstörmessempefängers (Superheterodynprinzip)

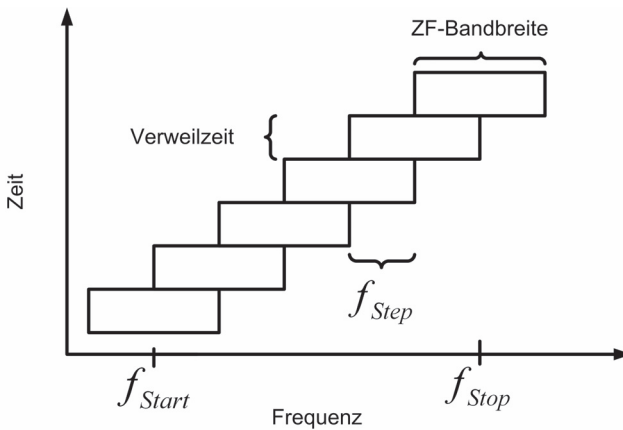


Abbildung 11: Sequentielle Erfassung des Spektrums mit einem Superheterodynempfänger

3.2.2 Zeitbereichsessempefänger

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen klassischen Funkstörmessempefängern nach dem Superheterodynprinzip wird bei einem Zeitbereichsessempefänger keine sequentielle Messung des Spektrums vorgenommen. Die Erfassung des Spektrums erfolgt auf Basis eines im Zeitbereich aufgezeichneten Signals, zu dem alle in ihm enthaltenen Spektralanteile berechnet werden. Graphisch verdeutlicht ist dieser Zusammenhang in Abbildung 12.

Der prinzipielle Aufbau eines Zeitbereichsessempefängers unterscheidet sich von dem eines Superheterodynempfängers und ist in Abbildung 13 dargestellt. Im Folgenden wird die Funktionsweise beschrieben.

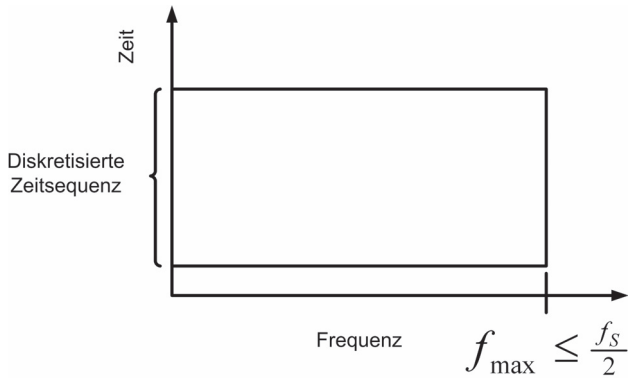


Abbildung 12: Erfassung des Spektrums mit einem Zeitbereichsmessempfänger

Das Eingangssignal $u_{Stör}$ wird in seiner Amplitude über ein Dämpfungsglied oder einen Vorverstärker angepasst. Danach werden die im Signal enthaltenen Spektralanteile durch einen Tiefpassfilter (TP-Filter) auf eine maximale Frequenz f_{\max} begrenzt. Erst jetzt erfolgt eine schnelle Analog-Digital-Wandlung (AD-Wandlung). Bei der Diskretisierung des Signals mit einer Abtastrate f_s muss das Abtasttheorem nach Shannon [Shan49], Gl. (3.1) erfüllt sein, wobei f_{\max} die maximale Frequenz nach der Tiefpassfilterung ist. Andernfalls ist eine korrekte Berechnung der Spektralanteile nicht möglich.

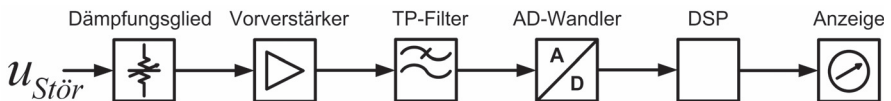


Abbildung 13: Blockschaltbild eines Zeitbereichsmessempfängers

$$f_s > 2 \cdot f_{\max} \quad (3.1)$$

Das Spektrum $X[r]$ des diskretisierten Signals $x[n]$ wird unter Verwendung digitaler Signalverarbeitung (engl. Digital Signal Processing) über die Diskrete-Fouriertransformation (DFT) nach Gl. (3.2) errechnet [Kru03].

$$X[r] = DFT \left\{ x \left(n \frac{1}{f_s} \right) \right\} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{nr}{N}} \quad (3.2)$$

So wird das komplette diskrete Frequenzspektrum zu diesem Zeitsignal ermittelt. Zusätzliche Informationen über zeitliche Änderungen der Spektralanteile können durch die Verwendung von Fensterfunktionen berücksichtigt werden. Die Bewertung des Spektrums, die bei klassischen Funkstörmessempfängern von Detektoren bewerkstelligt wird, erfolgt durch weitere digitale Signalverarbeitungsschritte, die das Bewertungs- und Anzeigeverhalten der Detektoren eines Funkstörmessempfängers entsprechend in Software nachbilden. Über die diskrete Modellierung und Evaluierung des Spitzen- sowie Mittelwertdetektors eines Zeitbereichsmessempfängers kann in [Kru02] nachgelesen werden. Die Modellbildung eines Quasi-spitzenwertdetektors über DSP in einem Zeitbereichsmessempfänger wurde in [Bra04] beschrieben.

3.2.3 Bewertung von Störsignalen

Die Bewertung der Störspannung nach dem Zwischenfrequenzfilter kann durch verschiedene Detektoren erfolgen. Die von den einzelnen Detektoren zu erfüllenden Eigenschaften sind in [CISPR 16-1-1] festgelegt. Die nach [CISPR 25] zu verwendenden Detektoren werden nachfolgend kurz beschrieben. Schaltungen, die den einzelnen Detektoren entsprechen und anschaulich den Spannungsverlauf sowie die Detektoranzeige darstellen sind in [Schw07] zu finden. Für die Bewertung von Störungen mittels Detektoren sei noch erwähnt, dass eine hinreichende Bewertungsdauer, die dem Störerverhalten angepasst ist, verwendet werden muss. Andernfalls wird das Störspektrum nicht korrekt erfasst.

Des Weiteren bildet das Rauschen bei realisierbaren elektrischen Schaltungen, wie bei der hier zur Anwendung kommenden Spannungsmessung oder Abtastung beim Zeitbereichsmessempfänger, eine Einschränkung des Wertebereichs, in dem die Störspannung korrekt angezeigt wird. Für die einzelnen Detektoren wurde das Verhalten bei Annäherung an das Rauschen des Funkstörmessempfängers untersucht und ist jeweils in den folgenden Unterkapiteln gezeigt.

3.2.3.1 Spitzenwertdetektor

Der Spitzenwertdetektor (engl. PK = Peak-Detector) liefert den Maximalwert der Einhüllenden $u_{env}(t)$ der Zwischenfrequenzspannung $u_{zf}(t)$ für die jeweils betrachtete Verweilzeit bzw. Bewertungsdauer t_M . Der Wert des Spitzenwertdetektors U_{PK} ergibt sich nach Gl. (3.3).

$$U_{PK} = \max(u_{env}(t)) \quad (3.3)$$

Einmalereignisse, die innerhalb der Bewertungsdauer auftreten, bestimmen bei hinreichend hohem Pegel den Anzeigewert. Für nicht hinreichend lange Bewertungsdauern werden Einzelereignisse bei Verwendung eines Funkstörmessempfänger

fängers sowohl als Superheterodynempfänger als auch bei Zeitbereichsmess-empfindern nicht zuverlässig erfasst. Dies führt in der Praxis oft zu unterschiedlichen und nicht „stabilen“ Messkurven desselben Prüflings.

3.2.3.1.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen

In der Praxis realisierbare Schaltungen zur Bewertung der Einhüllendenspannung werden in ihrer Empfindlichkeit durch das thermische Rauschen und das zusätzliche Rauschen aktiver Schaltungselemente begrenzt. Bei Annäherung eines zu messenden Signals an den Rauschpegel wird der Anzeigewert durch den Einfluss des Rauschens erhöht und entspricht nicht mehr dem eigentlichen Signalpegel.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 14 für den Spitzenwertdetektor nach [CISPR 16-1-1] bei einer Messbandbreite von 1 MHz gezeigt. Als Signale wurden pulsmodulierte Sinusschwingungen mit den angegebenen Pulswiederholraten bei einer Pulsdauer von 200 ns und eine reine Sinusschwingung in Filtermitte jeweils in ihrem Pegel reduziert. Die sich so ergebenden Anzeigewerte sind auf der Ordinate dargestellt. Für die sehr kurzen Pulse im Vergleich zu der Messbandbreite ergeben sich unterschiedliche Spitzenwertanzeigen für die Sinusschwingung und die pulsmodulierten Sinusschwingungen. Dies hängt mit der Zwischenfrequenzfilterantwort und der Definition der Spitzenwertanzeige unmittelbar zusammen.

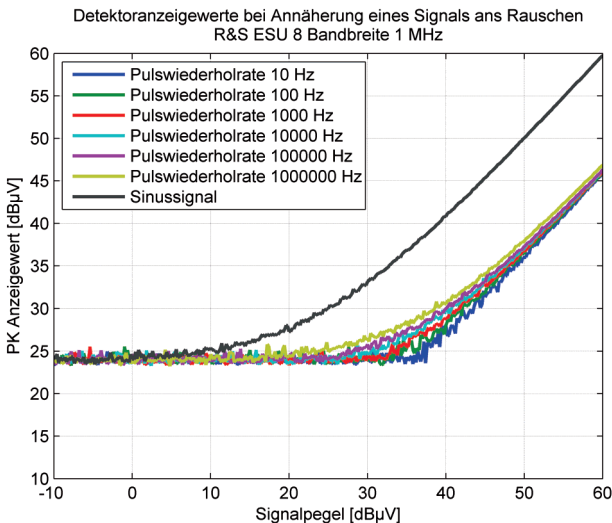


Abbildung 14: Anzeigewerte des Spitzenwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen

3.2.3.2 Mittelwertdetektor

Die Anzeige des Mittelwertdetektors (engl. AV = Average Detector) U_{AV} entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Einhüllenden $u_{env}(t)$ und lässt sich beschreiben durch Gl. (3.4). Abhängig von der Bewertungsdauer t_M werden Einzelereignisse bei der Mittelung gering bewertet. In der Praxis werden oft Bewertungsdauern im Bereich von 10^{-2} s bis zu 1 s verwendet.

$$U_{AV} = \frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_0+t_M} u_{env}(t) dt \quad (3.4)$$

3.2.3.2.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen

In Abbildung 15 ist die Annäherung der Mittelwertdetektoranzeige an das Funkstörmessempfängerrauschen in Abhängigkeit des angelegten Signalpegels für verschiedene Signale dargestellt. Es wurden dieselben Signale wie bei der Rauschannäherungsuntersuchung mit dem Spitzenwertdetektor verwendet. Die Pulsdauer und Pulswiederholrate spielen eine entscheidende Rolle für das Anzeigeverhalten. Mit zunehmender Pulswiederholrate bei jeweils gleichbleibender Pulsdauer steigt der Anzeigewert des Mittelwertdetektors. Bei Annäherung an das Rauschen ist die asymptotische Annäherung ebenfalls vom untersuchten Signal abhängig.

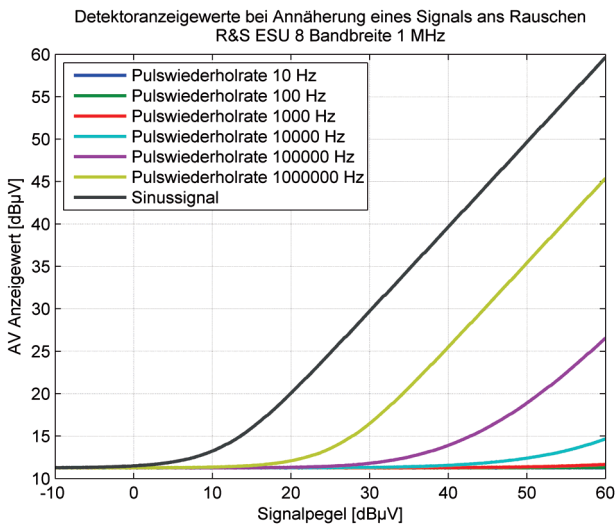


Abbildung 15: Anzeigewerte des Mittelwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen

3.2.3.3 Quasispitzenwertdetektor

Beim Quasispitzenwertdetektor (engl. QP = Quasi Peak Detector) findet eine Gewichtung des Anzeigewertes bezüglich der Pulsfrequenz und der Pulsfläche statt. Die zu verwendenden Pulsbewertungskurven, über die das Anzeigeverhalten dieses Detektors definiert ist, können [CISPR 16-1-1] entnommen werden. Die Pulsbewertungskurve für Band B (150 kHz bis 30 MHz) und Band C (30 MHz bis 300 MHz) sind über die in Tabelle 1 gegebenen Werte definiert. Es werden seltene Pulse geringer bewertet als häufiger auftretende Pulse. Aus Tabelle 1 kann z. B. für Band B entnommen werden, dass ein Puls mit 10 Hz Pulsfrequenz 10 dB bzgl. seiner Impulsfläche größer sein muss als ein Puls mit einer Pulsfrequenz von 100 Hz, damit ein identischer Anzeigewert erreicht wird.

Tabelle 1: Pulsbewertung des Quasispitzenwertdetektors nach [CISPR 16-1-1] für Band B und Band C

Pulsfrequenz [Hz]	0	1	2	10	20	100	1000
Relativer Pegel Band B [dB]	$23,5 \pm 2$	$22,5 \pm 2$	$20,5 \pm 2$	$10 \pm 1,5$	$6,5 \pm 1$	0	$-4,5 \pm 1$
Relativer Pegel Band C [dB]	$31,5 \pm 2$	$28,5 \pm 2$	26 ± 2	$14 \pm 1,5$	9 ± 1	0	-8 ± 1

Die Pulsbewertungskurven legen ein Verhalten des Detektors nach dem Prinzip des schnellen Anstiegs und der langsamen Erholung (engl. rapid-response slow-recovery) des Anzeigewerts fest. Realisiert wird dieses Verhalten durch eine Schaltung wie in Abbildung 16 gezeigt, deren Ladezeitkonstante kleiner als die Entladezeitkonstante gewählt ist. Zusätzlich wird historisch bedingt die mechanische Zeitkonstante eines kritisch gedämpften Anzeigeelements mitberücksichtigt. Der Anzeigewert entspricht dabei dem Belästigungsgrad, den ein Zuhörer erfahren würde. Dies wurde bereits bei den Vorläufern des Quasispitzenwertdetektors, den sogenannten „Radio-Noise-Meters“, untersucht [Bur41], [Bur42].

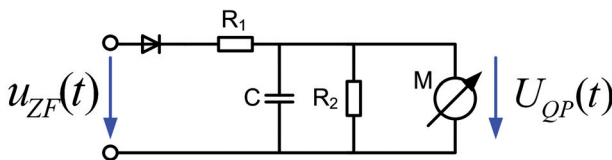


Abbildung 16: Schaltung zur Realisierung eines Quasispitzenwertdetektors

3.2.3.3.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen

Für die Bewertung der pulsmodulierten Sinussignale sowie des nicht modulierten Sinussignals mit dem Quasispitzenwertdetektor in Band C ergeben sich die Kurven nach Abbildung 17 bei Annäherung der Signalpegel an das Rauschen des Funkstörmessempfängers. Als Messbandbreite wurden 120 kHz verwendet, wie für das Band C vorgesehen ist. Die Pulsbewertungseigenschaften sind aus der Kurvenschar für die unterschiedlichen Pulswiederholraten ersichtlich. Selten auftretende Pulse werden geringer bewertet als häufiger auftretende. Die Definition der Pulsbewertung wurde für Pulse mit großen Amplituden vorgenommen, siehe [CISPR 16-1-1]. Bei Annäherung an das Empfängerrauschen ändert sich die Pulsbewertung und asymptotische Annäherung an den Rauschpegel in Abhängigkeit der Pulswiederholrate wie in Abbildung 17 gezeigt.

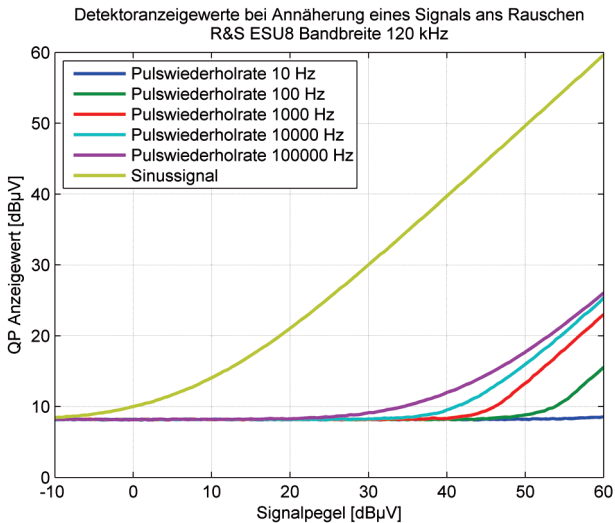


Abbildung 17: Anzeigewerte des Quasispitzenwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen

3.2.3.4 Effektivwertdetektor

Aus der Einhüllenden u_{env} kann deren Effektivwert U_{RMS} (engl. RMS Root-Mean-Square) berechnet werden. Es erfolgt eine Bewertung der im Signal enthaltenen gemittelten Leistung nach Gl. (3.5).

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_M} \int_{t_0}^{t_0+t_M} u_{env}^2(t) dt} \quad (3.5)$$

3.2.3.4.1 Verhalten bei Annäherung an das Rauschen

Zur Untersuchung der Bewertungseigenschaften des Effektivwertdetektors von Signalen, die sich nahe am Rauschpegel des Funkstörmessempfängers befinden, wurden unterschiedliche Signale bei jeweils gleicher Pulsbreite und unterschiedlichen Pulswiederholraten verwendet. Bei Annäherung der Signalpegel an das Funkstörmessempfängerrauschen ergeben sich die in Abbildung 18 dargestellten Bewertungen durch den Effektivwertdetektor. Die Bewertungseigenschaften des Effektivwertdetektors in Abhängigkeit der Pulswiederholrate und des Signalpegels werden hierbei deutlich.

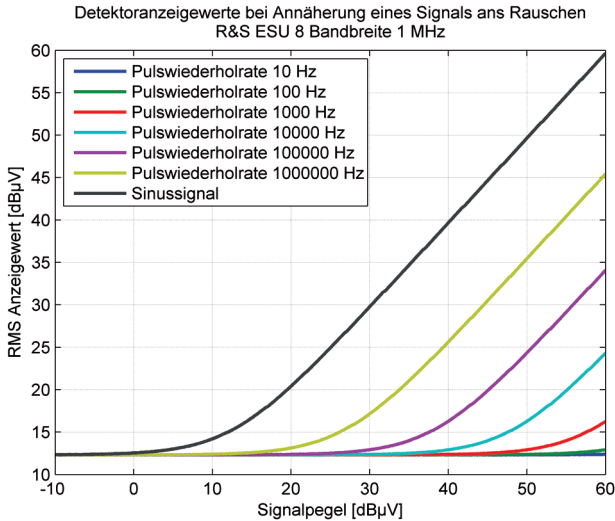


Abbildung 18: Anzeigewerte des Effektivwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen

3.2.3.5 Weitere Detektoren

In modernen Funkstörmessempfängern finden sich noch weitere Detektoren, die eine Signalbewertung ermöglichen. In [CISPR 16-1-1] ist zu den bereits vorgestellten Detektoren noch ein Effektivwert-Mittelwert-Detektor beschrieben, der bis zu einer bestimmten Pulsfrequenz wie ein Mittelwertdetektor und darüber hinaus wie ein Effektivwertdetektor bewertet. Auch ein minimaler Spitzenwertdetektor, der den kleinsten in der Bewertungsdauer auftretenden Pegelwert anzeigt, steht zur Verfügung. Die in diesem Kapitel dieser Arbeit zusammengefassten weiteren Detektoren finden zurzeit kaum Anwendung.

3.2.4 Statistische Bewertung mittels APD

Als Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung (engl.: Amplitude Probability Distribution APD) einer Störspannung wird in [CISPR 16-1-1] die kumulierte Verteilung der „Wahrscheinlichkeit der Zeit, während der die Störgröße einen festgelegten Pegel überschreitet“ definiert. Dies lässt sich durch Gleichung (3.6) ausdrücken, bei der die Einhüllende mit u_{env} und der festgelegte Pegel mit u_{th} bezeichnet sind.

In Abbildung 19 ist eine mögliche Realisierung einer diskreten APD-Bewertung mit einzelnen Vergleichen gezeigt, die zunächst eine diskrete Häufigkeitsverteilung der Eingangspegel erstellen. Unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung und der Bewertungszeit kann die diskretisierte Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden.

$$APD(u_{th}) = P\{u_{env}(t) > u_{th}\} \quad (3.6)$$

Zur Darstellung werden die Wahrscheinlichkeitswerte auf der logarithmischen Ordinate und die Pegelwerte auf der Abszisse aufgetragen. Im Gegensatz zu den zuvor behandelten Detektoren stellt die APD-Bewertung eine zweidimensionale Kurve als Ergebnis dar. Damit ist die einfache Grenzwertbetrachtung, wie bei der Detektorbewertung, so nicht anwendbar.

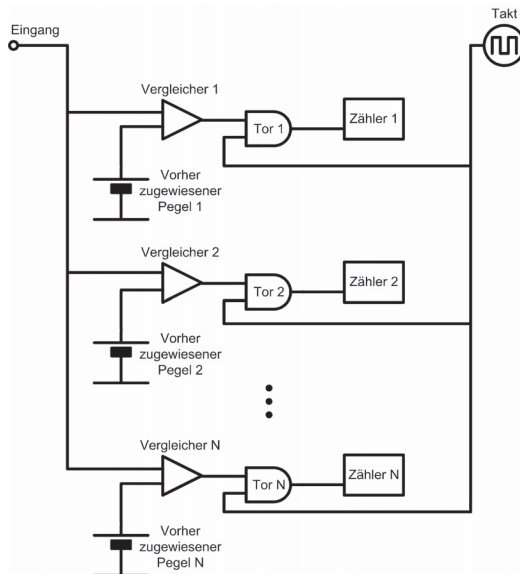


Abbildung 19: Blockschaltbild einer Realisierung der APD-Bewertung

3.2.4.1 Rauschkurve bei der APD-Bewertung

Wie zuvor beschrieben ergibt sich bei einer APD-Bewertung eine zweidimensionale Kurve. In Abbildung 20 ist in grün das Funkstörmessemfängerrauschen bei einer Messbandbreite von 9 kHz eingezeichnet. In dieser Darstellung ist der diskrete Charakter der APD-Kurve nicht zu erkennen. Hierzu sei zum Beispiel auf Abbildung 70 verwiesen. Das Rauschen des Funkstörmessemfängers entspricht einer Gauß-Verteilung. Zusätzlich ist in Abbildung 20 die APD-Kurve einer Fahrzeugstöraussendungsprüfung in blau eingezeichnet.

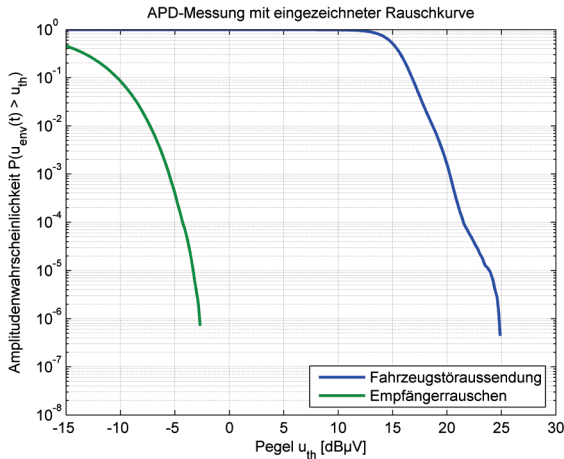


Abbildung 20: Rauschkurve und Fahrzeugstöraussendungskurve bei einer APD-Bewertung

3.3 Störmodelle

Für eine Klassifizierung von Störungen hat sich die Verwendung der zuvor beschriebenen Detektoren als hilfreich erwiesen. Durch Vergleich des Mittelwertdetektoranzeigewertes mit dem des Spitzenwert- oder Quasispitzenwertdetektors kann eine Aussage über das Verhalten des Störsignals getroffen werden. Zusätzlich kann die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens bestimmter Pegel durch APD-Messungen ermittelt werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie sich demgemäß unterschiedliche Arten von Störungen beschreiben und modellieren lassen.

3.3.1 Sinusförmige Störsignale

Für sinusförmige Störsignale ist die Einhüllende $u_{env}(t)$ der Zwischenfrequenzspannung eines Funkstörmessemfängers konstant. Durch Einsetzen von $u_{env}(t) = u_{env} = const$ in die Gleichungen (3.3), (3.4), (3.5) ergibt sich Gleichung (3.7).

$$U_{PK} = U_{AV} = U_{QP} = U_{RMS} = u_{env} = const \quad (3.7)$$

Bei einem sinusförmigen Eingangssignal müssen die Spitzenwert-, Quasispitzenwert-, Effektivwert- und Mittelwertdetektoren identische Anzeigewerte liefern, sofern die Signale einen ausreichenden Abstand zum Rauschen aufweisen. Die Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung besitzt im Idealfall einen Verlauf nach Gleichung (3.8).

$$P\{u_{env}(t) \leq u_{env}\} = 1 \quad \cap \quad P\{u_{env}(t) > u_{env}\} = 0 \quad (3.8)$$

3.3.2 Pulshafte Störsignale

Auf gepulste oder andere nicht sinusförmige Störsignale kann durch unterschiedliche Anzeigewerte der Detektoren geschlossen werden. Für diese gelten die in Gleichung (3.9) gezeigten Zusammenhänge. In Abbildung 21 sind eine APD-Kurve für einen pulsmodulierten Sinus und zusätzlich die Anzeigewerte der einzelnen Detektoren eingezeichnet. Der Sattelpunkt bei dieser Kurve weist auf einen pulshaften Charakter und die Pulswiederholrate hin.

$$U_{PK} > U_{QP} > U_{RMS} > U_{AV} \quad (3.9)$$

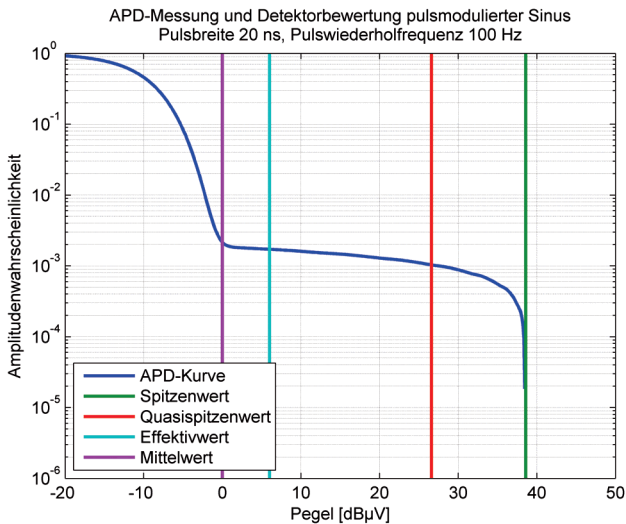


Abbildung 21: APD-Messung und Detektorbewertung eines pulshaften Störsignals

3.3.3 Middleton-Modelle

Oft handelt es sich bei elektromagnetischen Störeinflüssen nicht ausschließlich um Rauschen, das einer Gaußschen Verteilung ähnlich ist. Middleton beschreibt in [Mid77], wie statistische Modelle mit physikalischem Bezug für elektromagnetische Störsignale erstellt werden können. Als Ziel der Modellbildung soll eine realistische, quantitative und analytische Beschreibung von Störsignalen ermöglicht werden. Die Modelle selbst sollen unabhängig von den Störquellen und Mechanismen sein. Die Verifikation durch Messungen ist ebenso eine zentrale Anforderung. Eine Anwendung der Modelle wird in der Auslegung und dem Vergleich der Leistungsfähigkeit von Kommunikationssystemen in ihrer elektromagnetischen Umwelt gesehen. Die elektromagnetischen Störsignale werden für die Modellbildung von Middleton in drei Klassen eingeteilt, die sich auf die Bandbreite des Empfängers beziehen:

- „Class A Interference“: Bandbreite des Störsignals < Bandbreite des Empfängers
- „Class B Interference“: Bandbreite des Störsignals > Bandbreite des Empfängers
- „Class C Interference“: Es treten Störsignale aus Class A und Class B auf

Für die Class A und Class B Störsignale kann die APD in geschlossener Form angegeben und damit das statistische Verhalten der Hüllkurve der Zwischenfrequenzspannung u_{env} im Empfänger beschrieben werden [Mid77]. Für Class C ist in [Mid77] kein separates Modell angegeben.

In Gl. (3.10) wird für ein Störsignal der Class A die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, mit der die normierte Einhüllende ε einen ebenfalls normierten Schwellwert ε_0 überschreitet. Middleton führt zur Beschreibung der APD von Class A-Modellen die drei „globalen“ Parameter A_A , Γ'_A und Ω_{2A} ein, die nachfolgend beschrieben werden.

$$APD(\varepsilon_0) = P(\varepsilon > \varepsilon_0) = e^{-A_A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_A^m}{m!} e^{-\varepsilon_0^2 / 2\hat{\sigma}_{mA}^2} \quad (3.10)$$

Zur Anwendung der Gl. (3.10) wird zusätzlich zu den drei „globalen“ Parametern ($A_A, \Gamma'_A, \Omega_{2A}$) die Größe $2\hat{\sigma}_{mA}^2$ verwendet. Die Größe $2\hat{\sigma}_{mA}^2$, ist über Gl. (3.11) definiert. Sie stellt die Varianz der in Gl. (3.10) beschriebenen APD-Funktion dar und ist von den Parametern A_A und Γ'_A sowie der Laufvariablen m aus Gl. (3.10) abhängig.

$$2\hat{\sigma}_{mA}^2 = \frac{\frac{m}{A_A} + \Gamma'_A}{1 + \Gamma'_A} \quad (3.11)$$

Die Berechnung der normierten Einhüllenden ε ist aus Gl. (3.12) ersichtlich. Dabei wird die Einhüllendenspannung u_{env} auf die „globalen“ Parameter Ω_{2A} und Γ'_A bezogen.

$$\varepsilon = \frac{u_{env}}{\sqrt{2\Omega_{2A}(1 + \Gamma'_A)}} \quad (3.12)$$

Die Ermittlung des normierten Schwellwertes ε_0 erfolgt nach Gl. (3.13). Dazu wird die Schwellwertspannung u_{th} ebenfalls auf die Parameter Ω_{2A} und Γ'_A bezogen analog zu u_{env} in Gl. (3.12).

$$\varepsilon_0 = \frac{u_{th}}{\sqrt{2\Omega_{2A}(1 + \Gamma'_A)}} \quad (3.13)$$

Die bereits zuvor verwendeten „globalen“ Parameter A_A , Γ'_A und Ω_{2A} werden in den nachfolgenden Sätzen kurz beschrieben.

Der Parameter „impulsive index“ A_A beschreibt die durchschnittliche Anzahl an Einzelimpulsen, welche am Empfänger während der durchschnittlichen Dauer einer typischen Störung auftreten. Für kleine A_A treten weniger bzw. zeitlich kürzere Impulse auf, während für große A_A ein Gaußsches Verhalten erreicht wird.

Ω_{2A} steht für die Intensität des impulshaften (nicht Gaußschen) Anteils und steht im Zusammenhang mit $\Gamma'_A = \sigma_G^2 / \Omega_{2A}$, der das Verhältnis der Intensität des unabhängigen Gaußschen Anteils σ_G^2 zur Intensität des impulshaften Anteils Ω_{2A} beschreibt. Der unabhängige Gaußsche Anteil σ_G^2 setzt sich zusammen aus dem Gaußschen Rauschen des Empfängers und dem Gaußschen Anteil durch einzelne, sich überlagernde Störsignale, die auf den Empfänger einwirken.

In [Mid79] werden zwei Möglichkeiten beschrieben, wie die drei „globalen“ Parameter bestimmt werden können:

- Die Parameter A_A und Γ'_A werden unmittelbar graphisch (bei Darstellung nach Middleton [Mid79]) aus dem Verlauf der APD-Kurve ermittelt. Der letzte der drei Parameter (Ω_{2A}) kann über das 2. Moment der erfassten Daten $\langle E^2 \rangle$ und den Zusammenhang $\langle E^2 \rangle = 2\Omega_{2A}(1 + \Gamma'_A)$ berechnet werden.
- Alle drei Parameter werden über die Berechnung des 2. Moments $\langle E^2 \rangle$, des 4. Moments $\langle E^4 \rangle$ und des 6. Moments $\langle E^6 \rangle$ aus den Daten bestimmt. Die komplette Herleitung und die Zusammenhänge der Größen diesbezüglich kann [Mid79] entnommen werden.

Ein Beispiel für Class A-Modelle unter Berücksichtigung verschiedener Werte für deren Parameter können [Mid77] entnommen werden. Die Middleton Class B-Modelle mit 6 Parametern und Class C-Modelle werden sonst in der Literatur nur selten verwendet, zu den Definitionen siehe [Mid77].

3.4 Bewertungsverfahren zum Schutz von Rundfunkdiensten

Zur Bewertung der zuvor beschriebenen Störsignale werden die unter Kapitel 3.2.3 genannten Bewertungsverfahren verwendet. Zum Schutz von analogen Rundfunkdiensten vor Empfangsbeeinträchtigungen hat sich die Verwendung des Quasispitzenwertdetektors etabliert und bewährt. Die Erkenntnisse und Anforderungen zum Schutz von digitalen Rundfunkdiensten sind noch nicht so weit gefestigt. In der Literatur finden sich mehrere Ansätze wie auch diese Dienste unter Zuhilfenahme der vorhandenen Methoden zur Bewertung von Funkstörungen geprüft werden können.

In [Ste98] wurde eine Methode zur Ermittlung neuer Pulsbewertungskurven und deren Anwendung vorgeschlagen, um so dem Verhalten eines digitalen Empfängers gerecht zu werden. Ergebnisse wurden für den digitalen Hörfunkdienst DAB und das digitale Fernsehen DVB präsentiert, die in dieser Arbeit in Kapitel 4.3.3.1 bzw. 4.3.3.3 behandelt werden. Auch Stenumgaard hat sich mit dieser Thematik befasst. In [Sten00] wurde der RMS-Detektor auf seine Eignung hin geprüft und seine Bewertungscharakteristik für die untersuchten digitalen Funkdienste und Störsignale als vielversprechend bezeichnet. Auf Basis verschiedener Untersuchungen wurde in [Ste03] die Hintereinanderschaltung von Effektivwert- und Mittelwertdetektor vorgeschlagen, um eine geeignete Pulsbewertungscharakteristik zu erreichen.

Ein weiterer Ansatz ist die Ableitung von Grenzwerten für digitale Dienste aus APD-Kurven. In [Wik06] wurde ein idealer kohärenter Empfänger für digitale Dienste untersucht. Der Zusammenhang zwischen der APD-Kurve des Störsignals und der Wirkung auf den Empfänger wird mit der Bitfehlerwahrscheinlichkeit abgeschätzt. Für die Ermittlung der APD-Kurven wird ein identisch aufgebauter Empfänger mit derselben Bandbreite wie der Empfänger für den digitalen Dienst benötigt. Das beliebige Störsignal (Hüllkurve) ist vollständig durch Betrag und Phase beschrieben. Die Bitfehlerwahrscheinlichkeit wird über die Signalleistung eines Bits und eines Gaußschen Störanteils hergeleitet. Die maximal auftretende Bitfehlerwahrscheinlichkeit kann unter Annahme der ungünstigsten Phasenlage des Störsignalanteils für verschiedene digitale Modulationen angegeben werden [Wik06].

Die zuvor beschriebene Ableitung der Bitfehlerwahrscheinlichkeit hat nur für nicht fehlergesicherte digitale Dienste Gültigkeit. In [Wik10] wird diese Betrachtung auf digitale Dienste mit Fehlersicherungsmaßnahmen erweitert. Alle digitalen Dienste, die zur Übermittlung von Rundfunksignalen verwendet werden, verfügen über Fehlerkorrekturmaßnahmen. Die quantitative Spezifikation für diese Systeme erfolgt über den Codierungsgewinn. Dieser wird als Differenz der Signal-Störabstände im nicht fehlergesicherten (uncodierten) und fehlergesicherten (codierten) Fall angegeben. In [Wik10] wurde jeweils eine Abschätzung für den Codierungsgewinn bei einem Gaußschen Störsignal und einem gepulsten Störsignal (Middleton Class A-Modell) durchgeführt.

Die zuvor genannten Verfahren sind jeweils stark von den untersuchten Funkdiensten, deren verwendeten Modulationsparametern und Fehlerkorrekturmaßnahmen abhängig. Es besteht immer eine Abhängigkeit vom verwendeten Empfänger, der Codierung und der Modulation. Der unmittelbare Zusammenhang zwischen einer Funkstörung und der Beeinträchtigung des demodulierten Empfangssignals kann so nur abgeschätzt, aber nicht exakt bzw. quantitativ reproduzierbar bestimmt werden.

Nach der Beschreibung diverser Rundfunkdienste im nächsten Kapitel wird in Kapitel 5 eine neue Möglichkeit vorgestellt, die unabhängig von der Modulation und der Codierung eine Empfangsbeeinträchtigung bewerten kann.

4 Rundfunksignale

Die in Kapitel 2 beschriebene Hardware ist in der Regel für den Empfang verschiedener Rundfunksignale ausgelegt, die durch unterschiedliche Modulationsarten realisiert werden. Es existieren analoge Modulationsarten, bei denen ein zeit- und wertkontinuierliches Signal einen sinusförmigen Träger moduliert, während bei digitalen Diensten ein oder mehrere Träger mit digitalen Daten moduliert werden. Die Modulation selbst dient einer bestmöglichen Anpassung der zu übermittelnden Informationen an die Ausbreitungseigenschaften, die durch den Übertragungskanal zwischen Sender und Empfänger gegeben sind.

4.1 Ausbreitung von Rundfunksignalen

Die Rundfunksignale werden von Rundfunksendeanlagen als elektromagnetische Wellen abgestrahlt. Jede Sendeanlage besitzt ein Versorgungsgebiet, in dem sie einen ausreichend guten Empfang gewährleistet. Die Größe des Versorgungsgebiets ist abhängig von der Sendeleistung, der Antennencharakteristik, der Topographie sowie den vorhandenen Kanalstörungen. In der Netzplanung werden Mindestempfangsfeldstärken zugrunde gelegt. Bei ihrer Definition wurden bereits Rauscheinträge und gemittelte Umweltstöreinflüsse (man-made-noise) miteinbezogen.

Ein weiterer Aspekt ist die Art der Funkwellenausbreitung (aus [Mein92]) in den verschiedenen Frequenzbereichen (Tabelle 26 im Anhang), die für Rundfunkübertragungen genutzt werden. Für die Ausbreitung von Rundfunksignalen in den Bereichen Langwelle (LW), Mittelwelle (MW) und Kurzwelle (KW) ist die Ausbreitung über eine Bodenwelle und eine Raumwelle relevant. Bei der Bodenwelle erfolgt eine Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen entlang der Krümmung der Erdoberfläche. Die Raumwelle wird an der Ionosphäre der Erde gebrochen und zur Erde zurück geworfen, so kann sie sehr große Distanzen überwinden. Die Ausbreitung ist jedoch von den Eigenschaften der Ionosphäre abhängig, die sich mit der Tageszeit ändern. Für höhere Frequenzen, die zur Übertragung von Rundfunksignalen in den Bändern I bis V (47 bis 790 MHz) verwendet werden, findet die Ausbreitung durch Brechung in der Troposphäre (unterste Schicht der Erdatmosphäre) und Reflexion sowie Streuung an der Erdoberfläche statt. So wird ein Empfang selbst an abgeschatteten Empfangsorten möglich.

Nach [Mein92] kann der Feldstärkepegel am Empfangsort für die Bänder I bis V grob mit dem Freiraumwert nach Gl. (4.1) abgeschätzt werden. Dazu ist die Entfernung vom Sender d , die Sendeleistung P_s und die sendeseitige Antennencharakteristik (Antennengewinn G_s) zu berücksichtigen.

$$\frac{E_0}{dB(\mu V/m)} = 10 \lg\left(\frac{P_S}{W}\right) + 10 \lg(G_S) - 20 \lg\left(\frac{d}{km}\right) + 74,8 \quad (4.1)$$

Für die Ausbreitung über ebener Erde ergibt sich unter Berücksichtigung der Frequenz f und den Antennenhöhen von Sende- und Empfangsantenne h_s und h_e die Empfangsfeldstärke E nach Gl. (4.2).

$$\begin{aligned} E &= E_0 && \text{für } A_{Ebene} > 0 \\ E &= E_0 - A_{Ebene} && \text{für } A_{Ebene} > 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$A_{Ebene} = 20 \lg\left(\frac{d}{km}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_s}{m}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_e}{m}\right) + 87,6$$

Bessere Empfangsprognosen können über Ausbreitungskurven vorhergesagt werden, denen Messwerte zu Grunde liegen und bei denen eine statistische Berücksichtigung der Topographie erfolgt. Zusätzliche Übertragungseigenschaften wie Mehrwegeempfang können über statistische Kanalmodelle berücksichtigt werden.

4.2 Modulation analoger Signale

Im Allgemeinen lässt sich ein sinusförmiger Träger, der mit einem analogen Signal moduliert wurde, im Zeitbereich durch Gl. (4.3) beschreiben. Hierbei ist $s(t)$ der modulierte Träger, $\hat{s}(t)$ die Momentanamplitude, $\varphi(t)$ die Momentanphase mit $\Omega(t)$ als Momentanfrequenz und φ_0 als Anfangsphase. Nach [Mein92] gilt:

$$s(t) = \hat{s}(t) \cdot \cos(\varphi(t)) \quad (4.3)$$

$$\text{mit } \varphi(t) = \Omega t + \Delta\varphi(t) + \varphi_0 \quad \text{und} \quad \Omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

4.2.1 Amplitudenmodulation

Bei einer Amplitudenmodulation bleibt die Momentanfrequenz $\Omega(t)$ konstant. Die übertragenen Informationen (niederfrequentes Signal s_{NF}) werden ausschließlich in der Änderung der Trägeramplitude $\hat{s}(t)$ übertragen. Für $\Omega(t) = const$ ergibt sich aus Gleichung (4.4) eine Zweiseitenband-Amplitudenmodulation (Double Sideband Amplitude Modulation – DSB-AM), wie sie durch Gleichung (4.4) in

ihrem zeitlichen Verlauf beschrieben wird. Der Modulationsgrad m ist bei einer Amplitudenmodulation definiert durch $m = \frac{\hat{s}_{NF}}{\hat{s}_T}$.

$$s_{AM}(t) = \hat{s}(t) \cdot \cos(\Omega t + \varphi_0) \quad (4.4)$$

mit $\hat{s}(t) = \hat{s}_T + s_{NF}(t)$

Für das spezielle Signal $s_{NF}(t) = \hat{s}_{NF} \cos(\omega_{NF} t)$ können die Spektralanteile des modulierten Signals $s_{AM}(t)$ über das trigonometrische Additionstheorem $\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta))$ nach [Bro01] hergeleitet werden. Mit Gl. (4.4) und zur Vereinfachung $\varphi_0 = 0$ gesetzt ergibt sich das modulierte Signal $s_{AM}(t)$ zu Gl. (4.5).

$$s_{AM}(t) = \hat{s}_T \cos(\Omega t) + \frac{\hat{s}_{NF}}{2} (\cos((\Omega - \omega_{NF})t) + \cos((\Omega + \omega_{NF})t)) \quad (4.5)$$

Die Spektralanteile sind bei den Frequenzen $\pm \Omega$, $\pm(\Omega - \omega_{NF})$ und $\pm(\Omega + \omega_{NF})$ vorhanden. In Abbildung 22 ist das gemessene Spektrum einer Amplitudenmodulation eines Tons mit 1 kHz bei einem Modulationsgrad von 30 % abgebildet.

Der allgemeine Zusammenhang zwischen Gl. (4.4) und der Darstellung im Frequenzbereich wird über die Fouriertransformation durch Gl. (4.6) gegeben.

$$S_{AM}(j\omega) = F\{s_{AM}(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{AM}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.6)$$

Die Hochfrequenz-(HF)-Bandbreite entspricht der doppelten Bandbreite des niederfrequenten Signals $s_{NF}(t)$, das den Träger moduliert. Spektral betrachtet wird die Information redundant im oberen Seitenband (OSB) und unteren Seitenband (USB) übertragen wie in Abbildung 23 zu sehen ist.

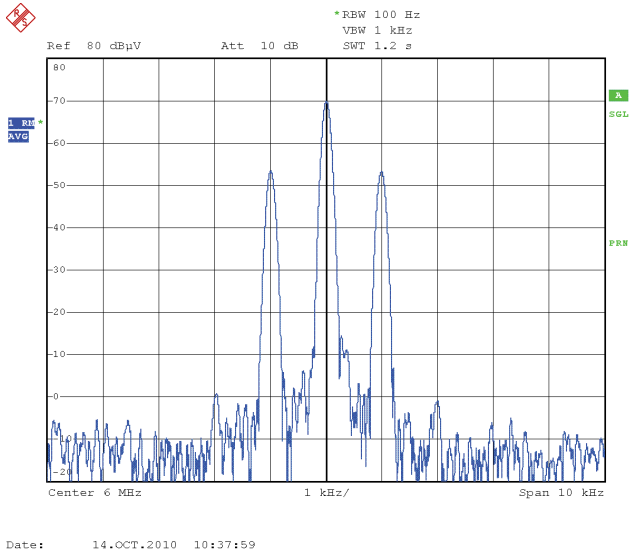


Abbildung 22: Gemessene Spektralanteile eines amplitudenmodulierten 1 kHz-Tons

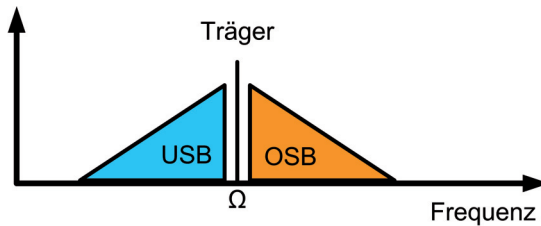


Abbildung 23: Oberes und unteres Seitenband bei einem amplitudenmodulierten Signal

4.2.2 Frequenzmodulation

Bei einer Frequenzmodulation wird die Momentanfrequenz $\Omega(t)$ entsprechend des modulierenden Signals geändert. Damit ergibt sich die Momentanphase zu

$$\varphi(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau = \Omega t + \alpha_F \int_0^t s_{NF}(\tau) d\tau \quad \text{nach [Kam96]}. \text{ Die Amplitude bleibt}$$

konstant mit \hat{s}_T . Das frequenzmodulierte Signal $s_{FM}(t)$ wird nach Einsetzen der Momentanphase $\varphi(t)$ in Gl. (4.3) im Zeitbereich durch Gl. (4.7) beschrieben:

$$S_{FM}(t) = \hat{s}_T \cdot \cos\left(\Omega t + \alpha_F \int_0^t s_{NF}(\tau) d\tau\right) \quad (4.7)$$

Die Darstellung des frequenzmodulierten Signals ergibt sich aus Gl. (4.8):

$$S_{FM}(j\omega) = F\{s_{FM}(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{FM}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4.8)$$

Aus der sogenannten Carson-Formel Gl. (4.9) ergibt sich die HF-Bandbreite, in der 99 % der übertragenen Leistung liegen, zu B_{HF} mit Modulationshub ΔF und Modulationsindex η nach [Kam96].

$$B_{HF} = 2 f_{\max,NF} (2 + \eta) = 2(2 f_{\max,NF} + \Delta F) \quad (4.9)$$

Das Spektrum eines frequenzmodulierten Tons mit einer Audiofrequenz von 1 kHz, welches in Abbildung 24 dargestellt ist, wurde durch eine Messung ermittelt. Als Frequenzhub wurde bei dieser Modulation ein Wert von 75 kHz verwendet.

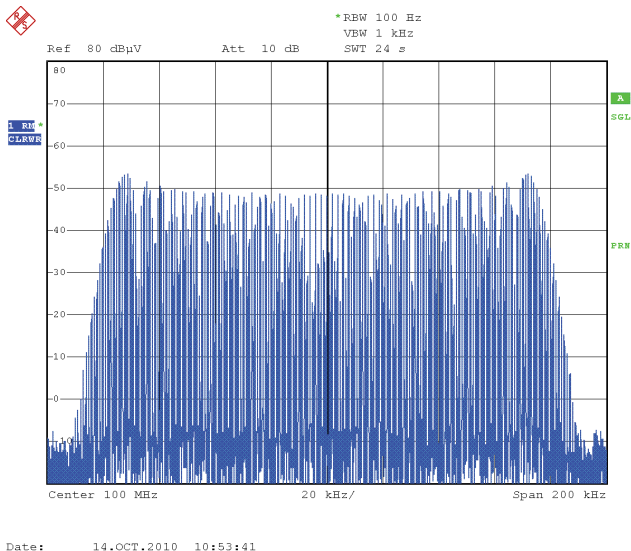


Abbildung 24: Gemessene Spektralanteile eines frequenzmodulierten 1 kHz-Tons

4.2.3 Analoge Rundfunkdienste

Auf die bereits in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen analogen Modulationsarten bauen die analogen Rundfunkdienste auf, die in diesem Kapitel erläutert werden.

4.2.3.1 AM-modulierte Rundfunksignale

Die Amplitudenmodulation findet in Europa in nachfolgenden Frequenzbereichen für Rundfunkdienste Anwendung: Langwelle (LW), Mittelwelle (MW) und Kurzwelle (KW). Es werden monophone Audiosignale mit einer maximalen Bandbreite von 4,5 kHz übertragen. Das Nutzsignal $s_{NF}(t)$ wird vor der Modulation bandbegrenzt, um Nachbarkanalstörungen zu vermeiden. Dadurch ergibt sich für Europa eine benötigte HF-Bandbreite von 9 kHz. Eine HF-Bandbreite von 10 kHz wird z. B. in den USA verwendet. Die Festlegung bezüglich der Bandbreite wird durch die nationalen Netzregulierungsbehörden getroffen.

4.2.3.2 FM-modulierte Rundfunksignale

Im Frequenzbereich der Ultrakurzwelle (UKW) wird die Frequenzmodulation für Rundfunkdienste eingesetzt. Hierbei können einkanalige (monophone) und zweikanalige (Stereo-) Audiosignale übertragen werden. Die Audiosignale s_{Links} und s_{rechts} sind auf jeweils eine Bandbreite von 15 kHz begrenzt [Rec.BS450-3]. Üblicherweise werden Stereo-Signale in Form von Summen- (Links + Rechts) und Differenzsignalen (Links - Rechts) übertragen. Sie werden einzeln, ggf. auch um Zusatzdienste (RDS [Rec.BS643-2]) erweitert, zunächst mit Hilfsträgern amplitudenmoduliert. Der so erstellte Frequenzmultiplex zur Übertragung der unterschiedlichen Signale ist in Abbildung 25 dargestellt.

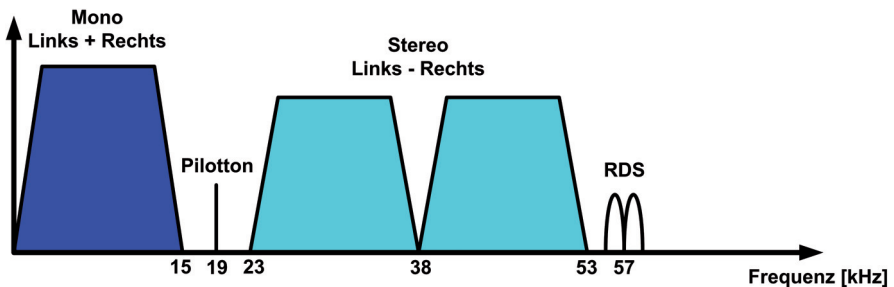


Abbildung 25: Spektrum eines Stereo-FM-Signals mit Hilfsträgern

Dieser Frequenzmultiplex wird dann als s_{NF} bezeichnet und im Folgenden der eigentlichen Frequenzmodulation zugeführt. Das Summensignal wird im Basisband (0 – 15kHz) der Amplitudenmodulation zugeführt. Zur (Amplituden-)Modulation und Demodulation des Differenzsignals wird ein Pilotton bei 19 kHz (Abbildung 25) zur Erzeugung eines unterdrückten Hilfsträgers bei 38 kHz verwendet. Das Differenzsignal wird über eine Zweiseitenbandamplitudenmodulation auf den unterdrückten Hilfsträger bei 38 kHz moduliert. Bei geringen Empfangspegeln wird vom Empfänger nur das Summensignal ausgewertet und so auf Grund der geringeren Bandbreite eine bessere Qualität erreicht.

Der Frequenzhub ΔF beträgt für den UKW-Hörfunk in Europa 75 kHz und in den USA 50 kHz [Rec.BS450-3]. Die benötigte HF-Bandbreite kann mit Gl. (4.9) (Carson-Formel) ermittelt werden. Für ein einkanaliges Nutzsignal mit Frequenzanteilen bis 15 kHz, also nur der Übertragung des Summensignals aus Abbildung 25, beträgt die maximale Frequenz im Frequenzmultiplex $f_{\max,NF}$ auch 15 kHz. Dadurch ergibt sich bei einem Frequenzhub von 75 kHz nach Gl. (4.10) eine benötigte HF-Bandbreite von 210 kHz.

$$\begin{aligned} B_{HF} &= 2(2 f_{\max,NF} + \Delta F) \\ &= 2(2 \cdot 15 \text{ kHz} + 75 \text{ kHz}) = 210 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Wenn unter denselben Bedingungen ein Stereo-Signal ohne Zusatzdienste übertragen werden soll, steigt der Bandbreitenbedarf nach Gl. (4.11) auf 362 kHz. In diesem Fall beträgt die maximale Frequenz des Frequenzmultiplexes $f_{\max,NF}$ 53 kHz, wie aus Abbildung 25 entnommen werden kann. Wenn zusätzlich zu einem Stereo-Signal Zusatzdienste übertragen werden sollen, steigt der Bandbreitenbedarf noch weiter an.

$$\begin{aligned} B_{HF} &= 2(2 f_{\max,NF} + \Delta F) \\ &= 2(2 \cdot 53 \text{ kHz} + 75 \text{ kHz}) = 362 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.3 Modulation digitaler Signale

Im Gegensatz zu analogen Rundfunkdiensten werden digitale Informationen zur Modulation verwendet. In Abbildung 26 ist das Blockschaltbild eines digitalen Übertragungssystems dargestellt. Die einzelnen Schritte werden beginnend mit dem analogen Nutzsignal $s_{NF}(t)$ nachfolgend beschrieben.

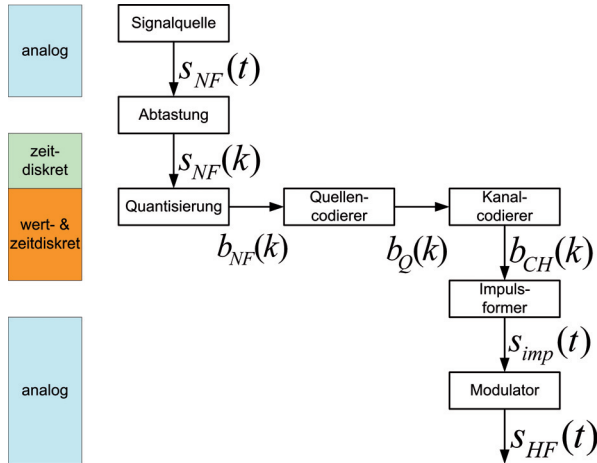


Abbildung 26: Blockschaltbild eines digitalen Übertragungssystems

Den ersten Schritt zu einem digitalen Signal stellt die Abtastung des analogen Nutzsignals $s_{NF}(t)$ nach Gl. (4.12) dar. Hierzu wird die Ausblendeigenschaft der Dirac-Distribution verwendet. Die Dirac-Distribution wird periodisch um die Abtastrate T_A verschoben. Das so entstandene Signal $s_A(t)$ enthält nur an den Stellen kT_A die Funktionswerte von $s_{NF}(t)$ mit k als ganzer Zahl. Vom ursprünglich kontinuierlichen Zeitmaßstab t wird für das nun zeitdiskrete Signal $s_A(t)$ auf eine diskrete Zeitdarstellung in k übergegangen. Die Werte des abgetasteten Nutzsignals zu den diskreten Zeitpunkten werden mit $s_{NF}(k)$ bezeichnet.

$$s_A(t) = s_{NF}(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_A) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_{NF}(kT_A) \delta(t - kT_A) \quad (4.12)$$

Zur Erfüllung des Abtasttheorems nach Shannon [Shan49], Gl. (4.13), muss das analoge Signal auf die Bandbreite b begrenzt und mit einer Abtastrate T_A bzw. Abtastfrequenz f_A abgetastet werden. Nur so ist eine fehlerfreie Rekonstruktion des ursprünglichen Signals möglich.

$$2b < \frac{1}{T_A} = f_A \quad (4.13)$$

Das zeitdiskrete, aber noch wertkontinuierliche Signal $s_{NF}(k)$ wird im nächsten Schritt quantisiert und geht somit in ein wert- und zeitdiskretes Signal $s_q(k)$ über. Bei einer Quantisierung zu einer binären Darstellung mit ℓ Bit wird der Wertebereich in 2^ℓ Stufen unterteilt. Jedem Wert des Quantisierers wird so ein eindeutiges Codewort zugeordnet. Das ursprünglich analoge Signal $s_{NF}(t)$ wird jetzt durch eine Bitfolge $b_{NF}(k)$ dargestellt.

Durch den Quellencodierer (Abbildung 26) werden die Informationen, die in dem Signal enthalten sind, komprimiert. Hierzu sind Kenntnisse zum Informationsgehalt des Signals bzw. der in ihm enthaltenen einzelnen Zeichen hilfreich. Bereits 1948 hatte sich C. E. Shannon ([Shan48], [Shan49]) mit der mathematischen Beschreibung des Informationsgehaltes von Signalen bzw. einzelner Zeichen auseinandergesetzt. Bei einer verlustfreien Codierung werden redundante Signalanteile entfernt, der ursprüngliche Informationsgehalt aber nicht geändert. Von einer verlustbehafteten Codierung wird hingegen gesprochen, wenn für die Senke irrelevante Signalanteile entfernt werden. Zur Reduzierung der Datenmenge werden bei digitalen Rundfunkdiensten meist verlustbehaftet codierte Audio- und Bilddaten gesendet, bei denen die Informationen auf den für die menschliche Wahrnehmung relevanten Anteil reduziert sind.

Durch den Kanalcodierer (Abbildung 26) werden dem eigentlichen Nachrichtensignal Zusatzinformationen zur Fehlerkorrektur hinzugefügt. Mit Hilfe der so gezielt eingefügten Redundanz wird es dem Empfänger möglich, Übertragungsfehler zu korrigieren, die bei der Informationsübertragung über einen nicht idealen Kanal auftreten können. Für Rundfunkdienste wird das Prinzip der Vorwärtsfehlerkorrektur verwendet, bei der dem Empfänger nur das empfangene, möglicherweise mit Übertragungsfehlern behaftete Signal, das ausser der hinzugefügten Redundanz keine weiteren Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur bietet, zur Verfügung steht. Rundfunksignale stellen eine unidirektionale Verbindung vom Sender zum Empfänger dar. Deshalb ist es nicht möglich Übertragungsfehler durch das erneute Anfordern von Informationen zu kompensieren. Der Empfänger ist damit auf eine wirksame Vorwärtsfehlerkorrektur angewiesen. Das Ausgangssignal des Kanalcodierers $b_{CH}(k)$ wird anschließend dem Impulsformer zugeführt.

Der Impulsformer erstellt aus seinem digitalen Eingangssignal $b_{CH}(k)$ ein analoges Ausgangssignal, das über den analogen (Funk-)Kanal übertragen werden kann. Das analoge Ausgangssignal $s_{imp}(t)$ setzt sich aus den einzelnen Sendepulsen $g(t)$ zusammen, die bipolar je nach Bit-Wert gewichtet werden. Der

Sendepuls $g(t)$ ist idealerweise so gewählt, dass er bei einer erneuten Abtastung nur zu einem Abtastpunkt den Wert 1 und bei allen anderen Abtastpunkten den Wert 0 liefert. Durch die Erfüllung dieser ersten Nyquist-Bedingung [Nyq28] werden Intersymbolinterferenzen (ISI) bei ideal bandbegrenzten Systemen und einer Anregung mit der Dirac-Distribution vermieden.

Bei realen Systemen, bei denen eine ideale Bandbegrenzung nicht möglich ist, sollte für eine geringe ISI die zweite Nyquist-Bedingung [Nyq28] erfüllt werden. Sie stellt die Forderung an den Sendepuls, dass seine Flanke im Frequenzbereich betrachtet symmetrisch zum halben Amplitudenwert verläuft. Der zugehörige Frequenzwert wird Nyquist-Frequenz f_N genannt.

Das Signal wird anschließend einem Modulator zugeführt, der es auf eine geeignete Trägerfrequenz aufmoduliert. Die einzelnen Sendepulse, in denen das Nutzsignal jetzt codiert ist, können durch den Modulator in einen für die Übertragung geeigneten Frequenzbereich verschoben und geeignet moduliert werden.

4.3.1 Quadratur Amplituden Modulation (QAM)

Zur Übertragung von digitalen Daten wird häufig die Quadratur Amplituden Modulation (QAM) verwendet. Sie bietet den Vorteil, zwei unabhängige Signale mit einem Träger übertragen zu können. Dies führt zu einer höheren Bandbreiteneffizienz als bei anderen Modulationsformen, da sich die benötigte Bandbreite nicht vergrößert.

Bei einer QAM wird das Sendesignal über eine Änderung der Phasen- und Amplitudenlage im Signalraum dargestellt. Modulationsarten, bei denen nur die Phase oder nur die Amplitude moduliert werden, lassen sich hieraus ableiten. Allgemein wird ein Punkt im Signalraum durch Gl. (4.14) beschrieben und ist in Abbildung 27 dargestellt.

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (4.14)$$

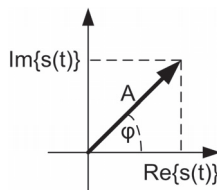


Abbildung 27: Darstellung eines Punktes im komplexen Signalraum

Zur Übertragung von zwei unabhängigen Signalen wird Gl. (4.14) umgeschrieben und die komplexe Amplitude A in ihre Inphase- A_I und Quadraturkomponente A_Q aufgeteilt. Die beiden Signalkomponenten sind orthogonal zueinander und somit unabhängig. Das Blockschaltbild des QAM-Modulators lässt sich aus Gl. (4.15) ableiten und ist in Abbildung 28 dargestellt.

$$s_{QAM}(t) = A_I \cos(2\pi f_c t) - A_Q \sin(2\pi f_c t)$$

$$\text{mit } A_I = A \cos(\varphi) \text{ und } A_Q = A \sin(\varphi) \quad (4.15)$$

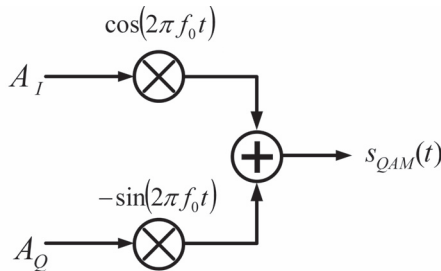


Abbildung 28: Blockschaltbild QAM-Modulator

Die Beschreibung des QAM-Signals als komplexe Zeitfunktion ist in Gl. (4.16) wiedergegeben.

$$s_{QAM}(t) = \text{Re}\{A_I + jA_Q\}e^{j2\pi f_c t} \quad (4.16)$$

Für digitale Signale wird entsprechend dem vorhergehenden Kapitel die binäre Datenfolge als komplex aufgefasst und jeweils getrennt für die Inphase- und Quadraturkomponente ein Impulsformer verwendet. Die einzelnen binären Zustände werden zu Symbolen zusammengefasst. Jedem Symbol wird ein Punkt im Signalraum (Constellation Diagram) zugeordnet. Die Anzahl der Punkte im Signalraum entspricht Zweierpotenzen zur Darstellung der binären Daten.

Abbildung 29 zeigt die Zuordnung eines Gray codierten 16 QAM-Signals im Signalraum bei einer Anordnung nach Campopiano und Glazer [Cam62]. Bei der Codierung nach Gray [Gra53] unterscheiden sich benachbarte Codewörter jeweils nur in einer Stelle. Die Entscheidungsschwellen, bei deren Überschreitung es

beim Empfang zu Symbolfehlern kommt, sind durch die Linien in Abbildung 29 dargestellt.

Aus den Abweichungen der gesendeten zur empfangenen Bitfolge ergeben sich die Bitfehler. Die Bitfehlerrate (BER) als das Verhältnis aus der Anzahl der fehlerhaften Bits zur Anzahl der gesendeten Bits wird häufig als Qualitätsmaß für die Übertragungsqualität verwendet.

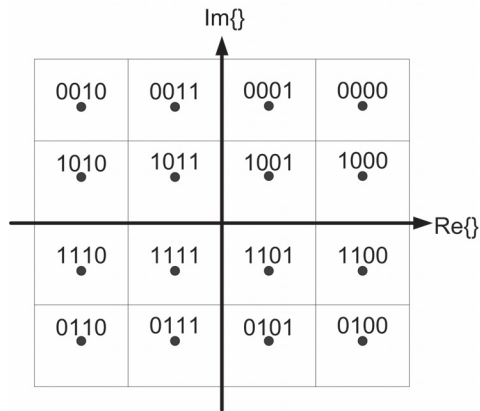


Abbildung 29: Signalraumdarstellung eines Gray codierten 16 QAM-Signals

Eine detaillierte Beschreibung der QAM ist unter anderem in [Xio06] und [Kam96] zu finden.

4.3.2 Frequenzmultiplexverfahren (FDM)

Zur Steigerung der Übertragungsrates werden die digitalen Daten auf mehrere Träger, auch Subträger genannt, moduliert; es findet ein Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiplex) statt. Der Datenstrom wird zunächst in parallele Datenströme für die einzelnen Subträger aufgeteilt. Die anschließenden Verarbeitungsschritte der Codierung und Impulsformung werden in jedem Zweig mit identischen Einheiten durchgeführt. Zur Frequenzverschiebung wird in jedem Zweig eine komplexe Multiplikation zur Verschiebung des Signals auf die jeweilige Subträgerfrequenz durchgeführt. Nach einer Summation entsteht so das komplexe Mehrträgersignal im Basisband, das durch einen IQ-Modulator in den Hochfrequenzbereich verschoben wird. In Abbildung 30 ist der schematische Aufbau eines solchen FDM-Verfahrens gezeigt, bei dem die Bitfolge in je m Bit unterteilt auf $2N+1$ Subträger moduliert wird.

Neben einer zeitlichen Beeinflussung der einzelnen Sendeimpulse kann es auch zu Beeinflussungen im Spektralbereich kommen. Zur Vermeidung eines solchen Überschneidens sind die Subträger orthogonal zueinander und unabhängig voneinander. Man spricht dann von einem OFDM-Signal (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Ein OFDM-Signal lässt sich durch die Anwendung der inversen diskreten Fouriertransformation (IDFT) erzeugen, die die geforderte Orthogonalität als Eigenschaft besitzt.

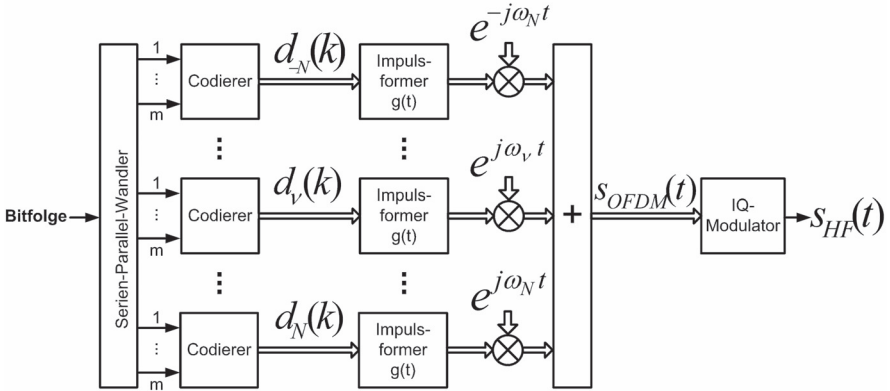


Abbildung 30: Blockschaltbild des Frequenzmultiplexverfahrens

4.3.3 Digitale Rundfunkdienste

Die zuvor beschriebenen Grundlagen zur Modulation digitaler Daten finden bei den digitalen Rundfunkdiensten Anwendung. Im Folgenden werden die derzeit relevantesten im Fahrzeug verwendeten Rundfunkdienste vorgestellt.

4.3.3.1 Digital Audio Broadcast (DAB)

Digital Audio Broadcast (DAB) wurde in den 1990er Jahren als digitaler Rundfunkstandard für die terrestrische Ausstrahlung digitaler Hörfunkprogramme und von zusätzlichen Datendiensten entwickelt. Genutzt werden vorwiegend Frequenzen im Band III für die terrestrische und Frequenzen im L-Band für die Satellitenübertragung. Das Spektrum eines DAB-Signals benötigt eine Bandbreite von ca. 1,5 MHz. DAB ist durch das „European Telecommunications Standards Institute“ (ETSI) im ETSI-Standard [ETSI EN 300 401] festgelegt.

Das DAB-Signal selbst besteht aus einem Multiplex verschiedener Hörfunkprogramme und Datendiensten wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Diese werden jeweils zu einem sogenannten Ensemble zusammengefasst und über einen ETI-Datenstrom (Ensemble Transport Interface) zum DAB-Sender übermittelt.

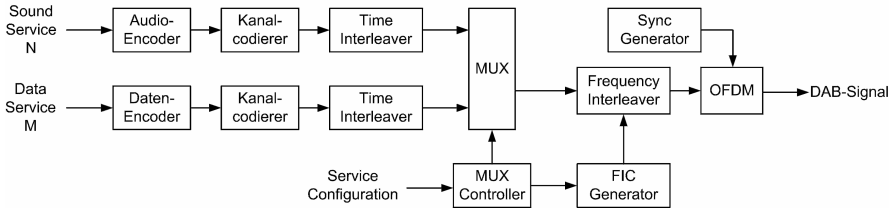


Abbildung 31: Blockschaltbild eines DAB-Senders

DAB-Signale werden als OFDM-Signale ausgestrahlt, bei denen die Subträger jeweils mittels D-QPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) moduliert werden. Die Subträger werden zur Darstellung der einzelnen Symbole im Signalraum jeweils nur in ihrer Phasenlage geändert, während bei einer QAM sowohl die Phasen- als auch die Amplitudenlage geändert werden.

Das DAB-Signal ist in eine zeitliche Rahmenstruktur gegliedert. Die sogenannten Transmission Frames setzen sich aus drei Kanälen zusammen, die unterschiedliche Informationen des DAB-Signals beinhalten: Der Synchronisation Channel (SC) zur Synchronisation des Empfängers, der Fast Information Channel (FIC) liefert Informationen für den Empfänger sowie den Main Service Channel (MSC), der die (Audio-)Nutzdaten enthält.

In Abbildung 32 ist der zeitliche Aufbau eines Transmission Frames dargestellt. Jeder der Transmission Frames beginnt mit der Übertragung des SC und startet mit einem Null-Symbol, durch das die Amplituden des Spektrums zu Null gesetzt werden. Gefolgt wird das Null-Symbol jeweils von einem Synchronisationsymbol (Phase Reference Symbol). Dieses dient zur Synchronisation der einzelnen Subträger und setzt diese auf definierte Phasenwerte.

Im Anschluss an den SC wird der FIC übertragen. Die Informationen im FIC werden durch einen gleichmäßigen Fehlerschutz (equal Forward Error Correction) geschützt.

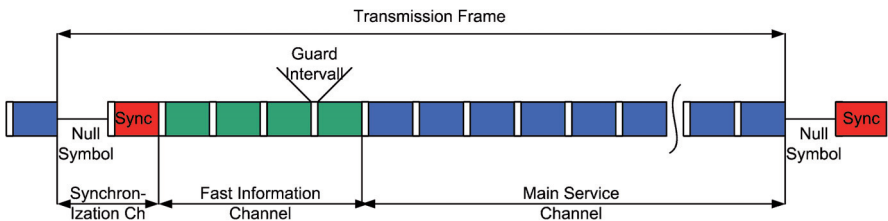


Abbildung 32: DAB-Transmission Frame

Nach der Übertragung des FIC folgt die Übertragung des MSC und damit der eigentlichen Nutzdaten. Die Nutzdaten verfügen über einen ungleichen Fehlerschutz (unequal Forward Error Correction). So ist es möglich, wichtigere Informationen besser gegen Fehler zu schützen. Die Audiodaten werden zunächst über die Verwendung einer MPEG Audio Layer II Codierung [ISO/IEC 11172-3] komprimiert, bevor sie in DAB-Datensymbole codiert werden.

Zur Übertragung der DAB-Signale existieren vier verschiedene Modi, die in Tabelle 27 im Anhang aufgelistet sind. Die Struktur der Transmission Frames bleibt jedoch immer erhalten. Für den Einsatz im Kraftfahrzeug spielt besonders die terrestrische Übertragung im Band III im Transmission Mode 1 eine große Rolle. In [Fis09] wird DAB vertieft behandelt.

4.3.3.2 Digital Radio Mondiale (DRM)

Digital Radio Mondiale (DRM) wurde als digitaler Rundfunkdienst ursprünglich für den Frequenzbereich der AM-Rundfunkdienste unterhalb von 30 MHz entwickelt. Die HF-Bandbreiten eines DRM-Signals sind so gewählt, dass das bestehende Kanalaraster weiterhin verwendet werden kann. Es besteht die Möglichkeit in einem halben Kanal (4,5 kHz), einem Standardkanal (9 kHz in Europa) und zwei benachbarten Kanälen (18 KHz) Informationen zu übertragen. DRM ist im ETSI-Standard [ETSI ES 201 980] spezifiziert. Für DRM-Signale ist derzeit kein Fahrzeugradioempfänger zu Vergleichszwecken verfügbar, deshalb wird dieser Rundfunkdienst nur anhand von Simulationen (Kapitel 7.1.2) untersucht.

Zur effizienten Nutzung der Übertragungsbandbreite und Kapazität werden die Audio- und Zusatzdaten entsprechend komprimiert. Für Audiodaten wird eine MPEG-4 Kompression [ISO/IEC 14496-3] verwendet. Ein DRM-Signal wird wie in Abbildung 33 dargestellt erzeugt.

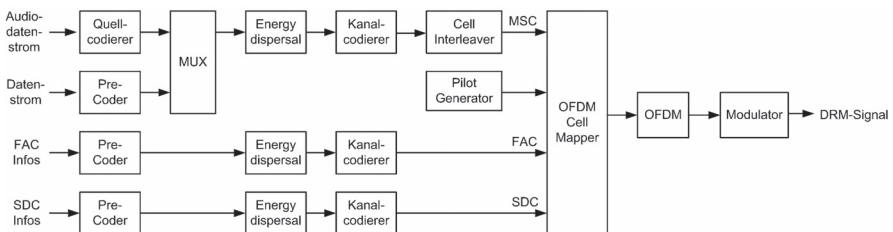


Abbildung 33: Blockschaltbild eines DRM-Senders

Über das Energy Dispersal findet eine Verwürfelung des Datenstroms statt, um systematische Muster im Sendesignal zu vermeiden. Der Kanalcodierer fügt dem bisher erstellten Signal jeweils Redundanz zur Fehlerbehebung hinzu, während ein Cell Interleaver die Sendesymbole quasi zufällig bzgl. Zeit und Frequenz ver-

teilt. Zu den eigentlichen Nutzdaten werden an dieser Stelle Zusatzinformationen und Pilotsymbole hinzugefügt. Erst dann findet die Zuordnung der Sendesymbole zu Zuständen im Signalraum statt. Abschließend wird das Sendesignal auf die Subträger moduliert und ausgestrahlt.

Bei DRM erfolgt die Übertragung der Informationen ebenfalls framebasiert. Die unterschiedlichen Daten sind wiederum auf drei Kanäle verteilt. Basisinformationen für den Empfänger liefert der Service Description Channel (SDC), während die Informationen für den Empfänger im Fast Access Channel (FAC) und die (Audio-)Nutzdaten im Main Service Channel (MSC) übertragen werden.

Die Rahmenstruktur fasst wie in Abbildung 34 gezeigt jeweils drei Transmission Frames zu einem Transmission Superframe mit entsprechender Verteilung der drei Kanäle bzw. deren Symbole zusammen.

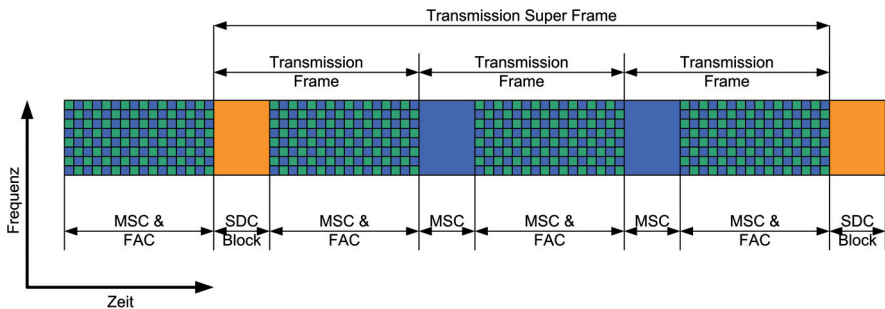


Abbildung 34: DRM-Transmission Super Frame

Die einzelnen Subträger werden je nach der zu übertragenden Information unterschiedlich robust moduliert. Für SDC-Daten wird eine 4 QAM verwendet, während die FAC-Daten auch 4 QAM oder 16 QAM moduliert werden können. Für einen höheren Datendurchsatz wird für die MSC-Daten entweder eine 16 QAM oder eine 64 QAM verwendet. Die Anzahl der Subträger und weitere Übertragungsparameter sind vom Robustness Mode der Übertragung abhängig. Die Übertragungsmodi und -parameter können für DRM aus Tabelle 28 im Anhang entnommen werden. Bei den Übertragungsmodi steigt die Robustheit der Übertragung gegenüber Störungen von A bis D an, wobei der Datendurchsatz entsprechend abnimmt. Zusätzliche Informationen zu DRM sind in [EBU Tech 3330], [Fis09] und [Ari10] zusammengefasst.

4.3.3.3 Digital Video Broadcasting (DVB)

Zur terrestrischen Übertragung von digitalen Fernsehsignalen wird in Europa der Standard Digital Video Broadcasting (DVB-T) nach [ETSI EN 300 744] verwendet. Die Übertragung findet in den Frequenzbändern I und III jeweils mit einer Kanalbandbreite von 7 MHz sowie in den Frequenzbändern IV und V mit einer Kanalbandbreite von 8 MHz statt.

In Abbildung 35 ist das Blockschaltbild eines DVB-T-Senders dargestellt. Die einzelnen Verarbeitungsschritte werden anhand dieses Blockschaltbildes erklärt: Bei DVB-T können mehrere Programme in einem Kanal übertragen werden. Dazu werden die einzelnen Programme (Bild und Ton) zunächst MPEG-2 komprimiert und als Multiplex in einem entsprechenden Transport Stream (TS) nach [ISO/IEC 13818] zusammengefasst.

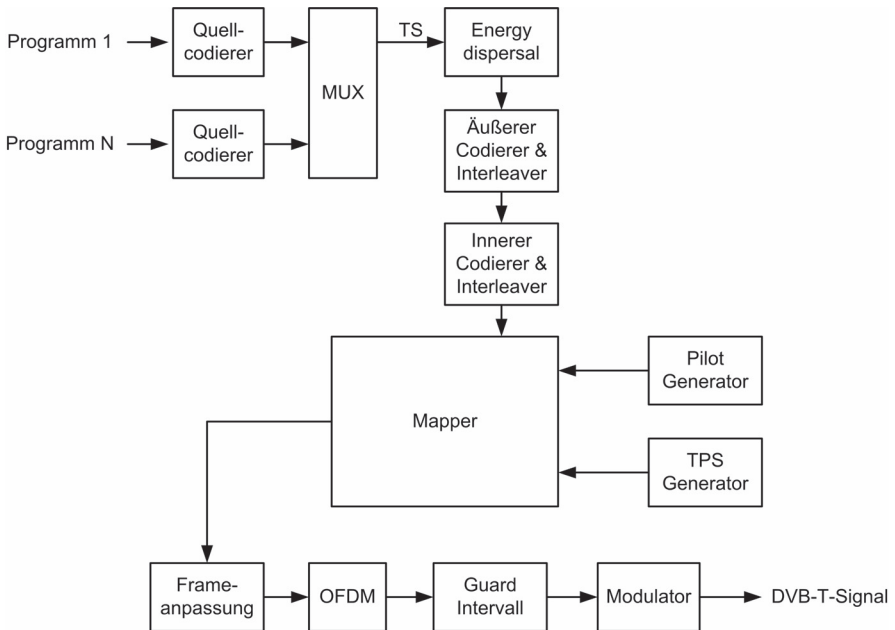


Abbildung 35: Blockschaltbild eines DVB-T-Senders

Bevor der Datenstrom einer sogenannten äußeren Codierung unterzogen wird, wird über das Energy Dispersal eine zufällige Verwürfelung der Daten durchgeführt. Die äußere Codierung beruht auf einer Reed-Solomon-Codierung, nach der die einzelnen Datenpakete durch den äußeren Interleaver neu geordnet werden. Als innere Codierung wird eine Faltungscodierung mit einer Punktierung in Abhängigkeit der verwendeten Codierungsrate durchgeführt. Abschließend wer-

den die Daten durch den inneren Interleaver noch bitweise verwürfelt. Der jetzt über die Fehlerkorrektur geschützte Datenstrom wird anschließend samt zusätzlichen Pilotträgern und Zusatzinformationen für den Empfänger (Transmission Parameter Signaling TPS) einzelnen Sendesymbolen zugewiesen.

Der gesendete Datenstrom ist auch bei DVB-T in eine Rahmenstruktur gegliedert, in diesen Transmission Frame werden wieder unterschiedliche Daten übertragen. Neben dem eigentlichen Nutzsignal werden über die TPS-Träger Informationen für den Empfänger übertragen, während die verteilten und kontinuierlichen Pilotträger der Synchronisation und Kanalschätzung dienen.

Ein Transmission Frame, wie in Abbildung 36 schematisch dargestellt, besteht aus 68 Symbolen. Bei jedem 4. Symbol überschneiden sich die auf verschiedene Subträger verteilten Pilotträger mit den kontinuierlichen Pilotträgern. Die TPS-Zusatzinformationen werden permanent auf bestimmte Träger mittels Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) moduliert. Dies entspricht einer differenziellen QAM, die nur zwei Zustände kennt. Subträger, auf die Nutzdaten moduliert wurden, werden häufig mit einer 16 QAM oder 64 QAM oder in sehr seltenen Fällen auch mit einer 4 QAM moduliert.

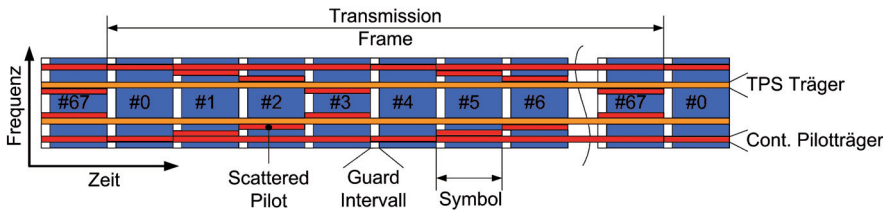


Abbildung 36: DVB-T-Transmission Frame

Für die Übertragung von DVB-T-Signalen kommen maßgeblich zwei Modi in Frage. Unterschiede sind bei der Anzahl der Subträger wie auch den Guardintervall-Längen und damit den Transmission Frame-Längen zu finden. Die Unterschiede zwischen den Modi sind in Tabelle 29 im Anhang für Signal-Bandbreiten von 8 MHz und 7 MHz aufgelistet.

Informationen zu den tatsächlich in Deutschland verwendeten DVB-T Parametern werden von den Landesmedienanstalten veröffentlicht. Häufig findet eine 16 QAM oder 64 QAM mit einer Guardintervalllänge von $\frac{1}{4}$ der inversen Trägerabstände Anwendung. Es werden aber auch andere Kombinationen der Parameter genutzt.

5 Vorstellung der neuen Prüfmethode

Bei der gegenwärtig eingesetzten Bewertung von empfangenen Störsignalen wie in Kapitel 3.4 beschrieben, werden die Störsignale meist nur mittels Funkstörmessempfängern systematisch charakterisiert. Die Bewertung der Störung selbst und der möglichen Beeinflussung des Rundfunkempfangs werden durch Vergleich des Messwertes einer oder mehrerer Detektoren mit entsprechenden Grenzwerten durchgeführt. Es werden die Empfangsbedingungen lediglich bei der Definition der Grenzwerte und der Festlegung der Gewichtungsfunktion der Detektoren berücksichtigt.

Eine Prüfung in direkter Abhängigkeit von verschiedenen Empfangsbedingungen ist nicht vorgesehen. Zusätzlich bezieht sich die Beschreibung des Störsignals immer auf einen Funkstörmessempfänger, dessen Signalbewertung nach [CISPR 16-1-1] standardisiert ist, sich jedoch von den tatsächlich im Kraftfahrzeug verwendeten Rundfunkempfängern immer mehr unterscheidet. In der vorliegenden Arbeit wird zum Empfang des Rundfunksignals deshalb ein typischer Fahrzeugrundfunkempfänger anstatt eines Funkstörmessempfängers verwendet. Hierdurch werden die Empfängerbandbreite sowie die weiteren Eigenschaften des Empfängers mit in die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigungen einbezogen.

Zur realistischen Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen durch elektromagnetische Störaussendungen des Fahrzeugs ist es zusätzlich notwendig, ein Rundfunksignal unter definierten Empfangsbedingungen in die Betrachtung mit einzubeziehen. Hierdurch wird eine möglichst genaue Aussage über die Beeinträchtigung eines Empfangssignals unter definierten Randbedingungen mit dem im Fahrzeug verwendeten Empfänger möglich. Für diese Bewertung muss der bereits in Abbildung 9 vorgestellte, etablierte Störaussendungsprüfaufbau erweitert werden.

5.1 Bisherige Ansätze

An anderer Stelle wie z. B. [May01], [Moh00] wurden Prüfaufbauten beschrieben, bei denen das Nutzsignal innerhalb der geschirmten EMV-Prüfumgebung abgestrahlt und von der Fahrzeugantenne empfangen wird. So wird ein Funkkanal innerhalb der EMV-Prüfumgebung berücksichtigt, der sich jedoch von den realen Gegebenheiten beim Rundfunkempfang im Fernfeld eines Senders unterscheidet. Für diese Prüfaufbauten muss der Störaussendungsprüfaufbau nach [CISPR 25] um mindestens eine Sendeantenne für das Nutzsignal erweitert werden. Da meist ein großer Frequenzbereich abgedeckt werden muss (von Langwelle bis TV-Band V), fallen zusätzliche Umbauzeiten für die Sendeantenne an. Weiterhin muss sehr großer Wert auf die Platzierung von Sendeantenne und Fahrzeugantenne gelegt werden, um eine Wiederholbarkeit der Messungen sicherstellen zu

können. Bei diesem Verfahren ist eine Berechnung des Nutzsignalempfangspegels am Rundfunkempfängereingang durch den unbekanntem Funkkanal problematisch. Es wurden darüber hinaus in den genannten Stellen die Fahrzeugradioempfänger innerhalb der EMV-Prüfumgebung betrieben, was eine Fernsteuerung oder Herausführung der demodulierten Empfangssignale notwendig macht. Zusätzlich führt dies zu Problemen, wenn sich der Empfänger selbst noch in der Entwicklung befindet und nur die Eigenschaften hinsichtlich seiner Funktion, aber nicht hinsichtlich seiner eigenen Störaussendung erfüllt.

5.2 Prüfaufbau

Außerhalb einer geschirmten EMV-Prüfumgebung können durch die Fahrzeugantennen Nutz- und Störsignale empfangen werden. Innerhalb einer geschirmten EMV-Prüfumgebung zur Störaussendungsmessung muss dem Fahrzeuggrundfunkempfänger zunächst ein geeignetes Nutzsignal zugeführt werden. Erst dann wird die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigungen, die beim Empfang eines Nutzsymbols auftreten, möglich.

Zur Vermeidung der zuvor genannten Nachteile der bisherigen Ansätze wurde hier ein Prüfaufbau in Anlehnung an [Bur42] verwendet, bei dem das Nutz- und das Störsignal leitungsgeführt addiert wird. Damit innerhalb der EMV-Prüfumgebung keine Änderungen im Vergleich zu einer Störaussendungsprüfung durchgeführt werden müssen, sind die Nutzsignalerzeugung, die Addition des Nutz- und des Störsignals, der Fahrzeuggrundfunkempfänger und die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung außerhalb der EMV-Prüfumgebung zu dem so genannten AudioVideoPrüfplatz (AVP) nach Abbildung 37 zusammengefasst. Damit ist ein Einsatz dieses Prüfplatzes mit jeder zur Störaussendungsprüfung geeigneten EMV-Prüfumgebung möglich. Zusätzlich kann ohne großen Aufwand zwischen der Bewertung mit einem Funkstörmessempfänger und der Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen durch den AudioVideoPrüfplatz gewechselt werden.

Durch das im AudioVideoPrüfplatz enthaltene Dämpfungsglied lässt sich das Störsignal zusätzlich bedämpfen, um die Empfangsbeeinträchtigung zu verringern. Die so ermittelte notwendige zusätzliche Stördämpfung ist entscheidend für die Definition von Abhilfemaßnahmen. In den nachfolgenden Kapiteln wird der AudioVideoPrüfplatz detaillierter beschrieben.

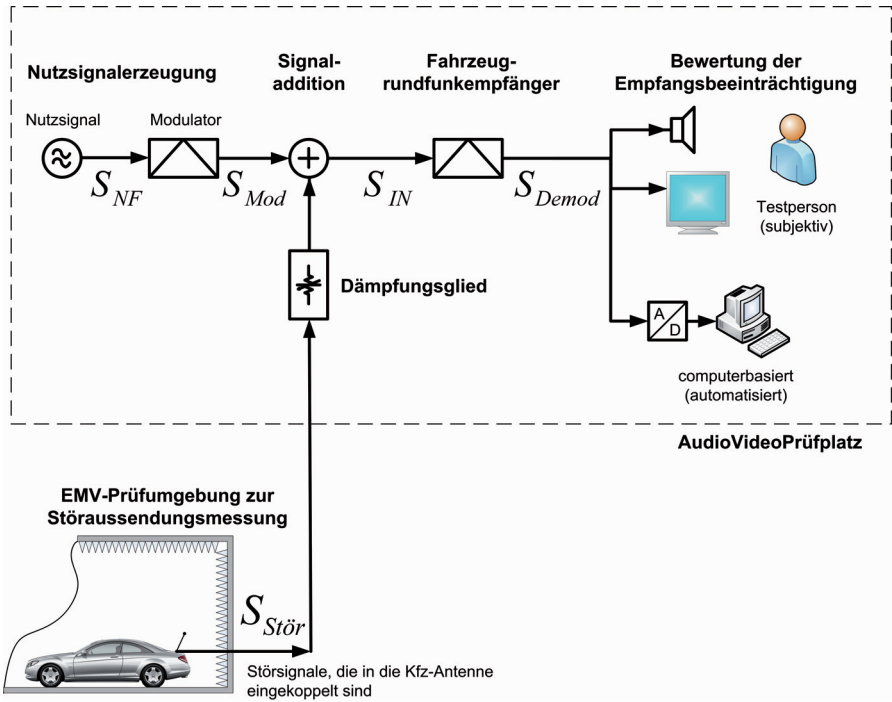


Abbildung 37: Prüfaufbau mit AudioVideoPrüfplatz (AVP)

5.3 Ablauf der Prüfung

Der Ablauf einer Prüfung mit dem AudioVideoPrüfplatz ist softwaregesteuert und definiert dem Benutzer einen festen Prüfablauf. Dies beugt einer fehlerhaften Verwendung vor und macht diese Prüfmethode auch für Nicht-Experten anwendbar. Der Prüfablauf wird im Folgenden erläutert und ist an den bereits in [Weg09] vorgestellten Ablauf angelehnt. Der Prüfablauf gliedert sich in mehrere Schritte, wie in Abbildung 38 dargestellt.

Zu Beginn wird ein Kanal (bzw. eine Nutzsignalfrequenz) ausgewählt, auf dem die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung stattfinden soll. Hilfreich ist es zunächst, eine Störaussendungsmessung mit einem Funkstörmessempefänger durchzuführen und auf Basis der Detektorbewertung eine Kanalauswahl zu treffen. Eine sequenzielle Bewertung aller Rundfunkkanäle benötigt sehr viel Zeit, daher werden nur Kanäle ausgewählt, bei denen eine Empfangsbeeinträchtigung zu erwarten ist.

Nach der Kanalauswahl wird ein Referenzlauf durchgeführt, bei dem kein Stör-signal zum Nutzsignal addiert wird. Die Modulationsart, -parameter, der Nutz-signalinhalt sowie der Empfangspegel werden bei diesem Schritt festgelegt. Die Qualität des so erzielten, demodulierten Empfangssignals wird als Vergleichsgrundlage für die nachfolgende Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung durch das Störsignal verwendet.

Nach Abschluss der Nutzsignaleinstellungen und des Referenzlaufs wird das Stör-signal über die zuvor beschriebene Addition dem Nutzsignal überlagert und anschließend dem Rundfunkempfänger zugeführt. Optional kann ein Vorverstärker zugeschaltet werden, falls das Störsignal durch die realisierte Signaladdition zu stark bedämpft wird.

Anschließend wird das empfangene und demodulierte Signal hinsichtlich seiner Empfangsqualität im Vergleich zum Referenzsignal bewertet. Es kommt eines der in Kapitel 5.4 vorgestellten Bewertungsverfahren zum Einsatz. Spätestens wenn die Empfangsqualität des Referenzlaufs erreicht wird, ist die Prüfung beendet. Solange die gewünschte Empfangsqualität nicht erreicht ist, wird die Störung schrittweise mit dem schaltbaren Dämpfungsglied gedämpft und erneut bewertet.

Nach Abschluss dieser Iteration kann die Prüfung mit einem neuen Referenzlauf, z. B. unter Verwendung eines anderen Empfangspegels oder Nutzsignals, erneut durchgeführt werden oder ein neuer Kanal gewählt werden.

Als wesentliches Resultat aus einem Prüfablauf ergibt sich die für das gegebene Störsignal notwendige Dämpfung, um unter den eingestellten Randbedingungen eine vordefinierte Empfangsqualität zu erreichen. Das Ergebnis aus einer Iteration über die Stördämpfung lässt sich als Audioqualität über der Stördämpfung darstellen. Zusätzlich können die Ergebnisse aus der Bewertung der Empfangsqualität unmittelbar zur detaillierteren Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen durch dieses Störsignal verwendet werden.

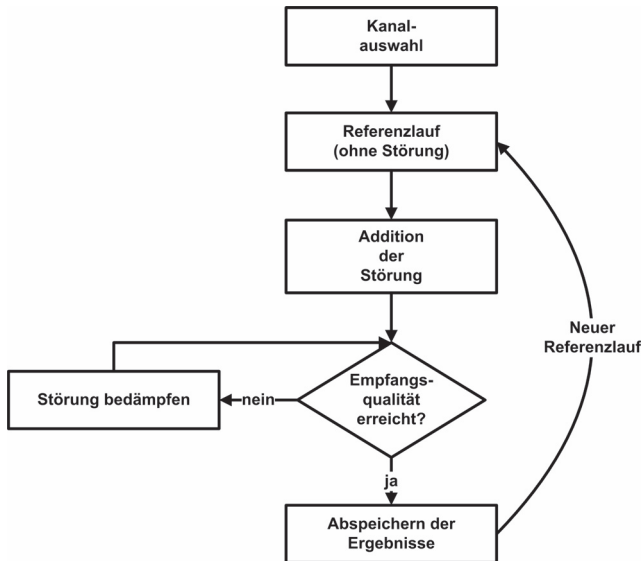


Abbildung 38: Prüfablauf zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen mit dem AudioVideoPrüfplatz

5.4 Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung mit dem AVP

Am Eingang des Rundfunkempfängers im AVP liegt das Nutzsignal mit überlager-tem Störsignal an. Die Empfangsbeeinträchtigung wird nach der Demodulation im Basisband bewertet. Physikalische Parameter wie der Signal-Stör-Abstand (SIR) bzw. Signal-Rausch-Abstand (SNR) können als Bewertungsmaßstab heran-gezogen werden. Die menschliche Wahrnehmung einer Empfangsbeeinträch-tigung ist jedoch vielschichtiger und soll am Beispiel von Empfangsbeeinträch-tigungen von Hörfunksignalen vertieft erläutert werden.

Zur Bewertung einer Empfangsbeeinträchtigung auf Grund einer elektro-magnetischen Beeinflussung wird die Bewertung stets als Relativvergleich von zwei Signalen durchgeführt, dem empfangenen Nutzsignal ohne und mit auf-addiertem Störsignal. Der Relativvergleich ist notwendig, da die maximal erziel-bare Empfangsqualität vom Nutzsignalpegel und -parametern abhängig ist. Bei geringen Pegeln kann bereits ohne ein aufaddiertes Störsignal ein Qualitäts-unterschied zwischen dem ursprünglich gesendeten und dem empfangenen Nutz-signal aufgrund von Rauschen auftreten. Die Bewertung der Empfangsqualität kann zum Einen durch Testpersonen oder durch computerbasierte, instrumentelle Verfahren realisiert werden.

5.4.1 Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung durch Testpersonen

Als subjektive Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung wird die Bewertung des Empfangssignals durch eine oder mehrere Testpersonen verstanden. Technisch ist eine Bewertung durch Testpersonen einfach zu bewerkstelligen, wobei das gesamte auditive bzw. visuelle Wahrnehmungssystem bis hin zum subjektiven Qualitätseindruck einfließt.

Bei der auditiven Wahrnehmung durchlaufen die Schallwellen zunächst das Gehör, bis die Information in Nervensignale gewandelt und zur Verarbeitung durch das menschliche Gehirn weitergeleitet wird. Dort findet die eigentliche Wahrnehmung der Schallereignisse statt. Bereits das Ohr führt eine Frequenzselektion durch. Später bei der Übertragung der Schallsignale in Nervensignale kommen zusätzlich Verdeckungseffekte auf Grund der zur Schwingung angeregten Haare an den Nervenzellen des primären Hörapparates (Hörschnecke) zum Tragen. Die visuelle Wahrnehmung beginnt mit der Erfassung von Bildern durch das menschliche Auge. Dazu werden Lichtsignale durch die Photorezeptoren auf der Netzhaut in Nervensignale umgesetzt. Diese Signale werden dann vom menschlichen Gehirn weiterverarbeitet und bilden den visuellen Wahrnehmungseindruck. Abhängig von der Wiederhol- bzw. Änderungsgeschwindigkeit aufeinanderfolgender Bilder, entsteht der Eindruck eines bewegten Bildes. Die Wahrnehmung visueller Reize und die Interpretation durch das menschliche Gehirn stellen einen hochkomplexen Prozess dar. Als weiterführende Literatur zum Aufbau des auditiven sowie des visuellen Wahrnehmungssystems des Menschen und der Wahrnehmung selbst können [Schm07] und [Fas07] genannt werden.

Für die Qualitätsbewertung von Empfangsbeeinträchtigungen muss der Testperson eine problemgerechte Fragestellung mitgeteilt werden, unter deren Gesichtspunkten die Bewertung durchgeführt werden soll. Abhängig von der Formulierung und des Verständnisses der Fragestellung unterscheiden sich die so erzielten Ergebnisse. Fragestellungen, die sich bei Verwendung des AudioVideoPrüfplatzes eignen, sind folgende:

- Kann eine Abweichung im demodulierten Empfangssignal wahrgenommen werden im Vergleich zum ungestörten Referenzsignal?
- Kann eine störende Abweichung im demodulierten Empfangssignal wahrgenommen werden im Vergleich zum ungestörten Referenzsignal?
- Ist das demodulierte Empfangssignal akzeptabel?

Die Fragestellungen sollten jeweils eindeutige Antworten liefern: ja oder nein. Bei der ersten Frage ist die Entscheidung nur von der Wahrnehmbarkeit abhängig. Für die anderen beiden Fragen hat das Qualitätsempfinden der Versuchsperson einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis, das von vielen Faktoren abhängig ist. Als die wichtigsten sollen die Vorkenntnisse, die persönlichen Erfahrungen, Interesse oder Desinteresse, Sympathie oder Empathie für den Signalinhalt und die Tages-

form genannt werden. Diese Faktoren bedingen eine unterschiedliche Bewertung durch unterschiedliche Personen. Die Abweichungen zwischen einzelnen Personen können durch geschulte Testpersonen oder eine große Anzahl an Probanden verkleinert werden. Dadurch wird diese Bewertungsmethode sehr aufwändig.

5.4.2 Instrumentelle Bewertung der Empfangsqualität

Die Verwendung von computerbasierten, instrumentellen Verfahren, die ein Qualitätsmaß entsprechend der menschlichen Wahrnehmung aus ihren Eingangssignalen errechnen, wären in dieser Hinsicht geeigneter. In [Cam09] und [DeLi08] werden die derzeitig zur Qualitätsbewertung von Audiosignalen geeigneten und standardisierten Verfahren vorgestellt. Zur Qualitätsbewertung von Sprachsignalen ist das PESQ-Verfahren (ITU-T P.862: Perceptual Evaluation of Speech Quality) [Rec.P862] und für allgemeine Audiosignale das PEAQ-Verfahren (ITU-R BS.1387-1: Perceptual Evaluation of Audio Quality) [Rec.BS1387-1] als Stand der Technik bezeichnet und allgemein als objektivierbar nachgewiesen worden. Für die Audiobewertungen im Rahmen dieser Arbeit sollen deshalb die beiden Qualitätsbewertungsverfahren PESQ und PEAQ zunächst vorgestellt und später zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen verwendet werden.

Die beiden Verfahren führen jeweils eine Relativbewertung von Audiosignalen durch. Hierzu werden jeweils die demodulierten Empfangssignale im ungestörten Fall ohne Addition eines Störsignals und im gestörten Fall das Nutzsignal mit addiertem Störsignal als Eingangssignale verwendet. Die analogen Audiosignale werden im AVP durch einen A/D-Wandler, der durch eine professionelle Soundkarte („RME Multiface II“) realisiert ist, mit einer Abtastrate von 48 kHz digitalisiert. So ist sichergestellt, dass alle für den Menschen wahrnehmbaren Signalanteile enthalten sind. Die wert- und zeitdiskreten Audiosignale werden unkomprimiert gespeichert und den instrumentellen Verfahren, die als Software-routinen auf einem Computer ablaufen, zur Verfügung gestellt.

In [Weg10] wurden erstmals die instrumentellen Audiobewertungsverfahren PESQ und PEAQ zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen im Kraftfahrzeug auf Grund elektromagnetischer Beeinflussung des Empfangssignals vorgestellt.

Zur Bewertung der Empfangsqualität von digitalen Fernsehsignalen wurden im Rahmen dieser Arbeit keine instrumentellen Bewertungsverfahren angewendet. Wahrnehmbare Empfangsbeeinträchtigungen treten als Blocking-Effekte, bei denen Bereiche des Bildes auf Grund der Störeinflüsse nicht korrekt angezeigt werden oder als Bildausfall auf. Für den Fernsehempfang ist die Qualitätsanforderung im Kfz, immer einen störungsfreien Empfang gewährleisten zu können. Das Vorhandensein von Blocking-Effekten oder eines Bildausfalls kann durch eine Testperson zuverlässig und effizient bewertet werden. Zur instrumentellen Bewertung von Fernsehsignalen wird an dieser Stelle auf [Gau10] verwiesen.

5.4.2.1 Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)

Zur Qualitätsbewertung von Sprachsignalen für Telefonieanwendungen hat der Telecommunication Standardization Sektor der ITU das Bewertungsverfahren PESQ standardisiert. Anwendbar ist die Bewertung sowohl auf Sprachcodierer als auch zur Bewertung einer Übertragung von analogen und digitalen Sprachsignalen. Die ursprüngliche PESQ Implementierung nach [Rec.P862] ist lediglich für schmalbandige Sprachsignale bis 3,1 kHz und der Wiedergabe über einen Telefonhörer geeignet. Erst mit der Erweiterung von PESQ auf die Bandbreite von 50 bis 7000 Hz in [Rec.P862.2] wird eine für den AM-Rundfunkempfang hinreichende Audiobandbreite bewertet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die C-Code-Referenzimplementierung der ITU, die Teil von [Rec.P862Amendm.2] ist, verwendet. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich jeweils auf die Implementierung nach [Rec.P862.2].

Das Ablaufdiagramm des PESQ-Bewertungsverfahrens ist in Abbildung 39 dargestellt und wird im Weiteren erläutert: Die Verarbeitung der Eingangssignale findet jeweils in zeitlichen Fenstern statt. Der Pegel der beiden Audiosignale wird auf dieselbe Signalleistung skaliert. Dies entspricht einem Hörtest mit konstantem Abhörpegel. Im nächsten Schritt werden die Signale gefiltert. Das Filter modelliert die Frequenzcharakteristik bei Wiedergabe der Signale mit breitbandigen Kopfhörern. Nach dieser Skalierung und Bandbegrenzung findet eine Zeitdifferenzermittlung und -anpassung statt. Es werden zunächst via Kreuzkorrelation die Signale auf ihrer vollen Länge angepasst und anschließend wird eine feinere Zeitdifferenzermittlung für jeweils kleine Signalabschnitte durchgeführt. Ziel ist eine auf den Abtastwert genaue Zeitdifferenzanpassung.

Nach diesen notwendigen Vorverarbeitungsschritten werden die Signale jetzt durch das eigentliche wahrnehmungsgerechte Modell weiterverarbeitet. Die Signale werden dazu via Kurzzeitfouriertransformation unter Verwendung von Hann-Fenstern in den Spektralbereich abgebildet. Als nächstes findet eine Transformation der Frequenzachse auf eine psychoakustische Skala (Bark-Skala) statt. So werden die Spektralanteile in Frequenzgruppen zusammengefasst, wie es bei der Wahrnehmung des Menschen auch geschieht. Im Anschluss an die Zusammenfassung in Frequenzgruppen werden Kompensationsberechnungen zum Ausgleich der Systemübertragungsfunktion und Tonhöhe durchgeführt.

Die Signale werden, bevor die Differenzbildung stattfindet, auf eine Lautheitsskala (Sone) transformiert. Es folgt dann die Abschätzung der Störung über eine Gewichtung der abschnittsweise gebildeten Differenzen nach ihrer Größe und zeitlichen Länge. Für aufeinanderfolgend auftretende Zeitsegmente mit einer schlechten Bewertung wird ab Erreichen eines Schwellwertes eine erneute Zeitanpassung der Signale vorgenommen und die gesamte Bewertung wiederholt. Es wird eine Überprüfung auf den Fall hin, dass Rauschen gegen Rauschen

korreliert wird, durchgeführt und wenn das der Fall ist, eine erneute Zeitanpassung verhindert. Die Bewertungen der einzelnen Zeitfenster werden abschließend mittels L_p -Normen nach Gl. (5.1) zu einem einzelnen Qualitätswert zusammengefasst.

$$L_p = \left(\sum_{n=1}^N |x_n|^p \right)^{1/p} \quad (5.1)$$

Dieser Qualitätswert wird mit MOS-LQO (Mean Opinion Score – Listening Quality Objective) nach [Rec.P800.1] bezeichnet. Die MOS-LQO Werte beziehen sich auf die Bewertungsskala nach [Rec.P800], die eine fünfstufige Einteilung bei der Beurteilung von Hörtests vorsieht. Sie ist in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Zuordnung der Qualitätsbeschreibung zu den MOS-LQO-Werten wurde bei der Entwicklung von PESQ durch zahlreiche Vergleiche mit subjektiven Tests ermittelt. In [Rec.P862] ist die Rede von 22 Testreihen, bei denen ein Korrelationskoeffizient von 0,935 zwischen den subjektiven Bewertungen und den Bewertungen mit dem PESQ-Verfahren ermittelt wurde.

Tabelle 2: PESQ-Bewertungsskala

MOS-LQO-Wert	Qualitätsbeschreibung
5	Ausgezeichnet (engl. excellent)
4	Gut (engl. good)
3	Ausreichend (engl. fair)
2	Mangelhaft (engl. poor)
1	Schlecht (engl. bad)

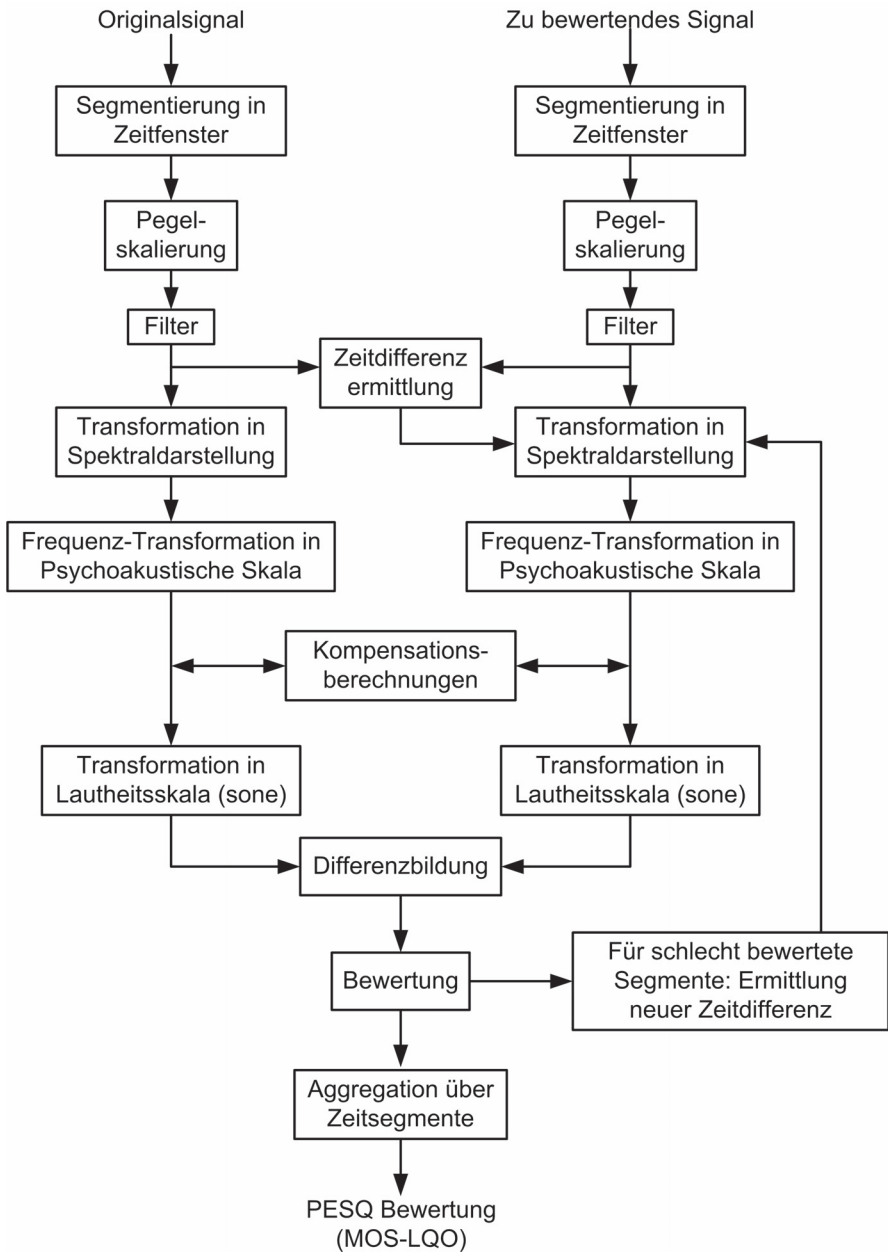


Abbildung 39: Ablaufdiagramm PESQ-Bewertungsverfahren nach [Rec.P862]

5.4.2.2 Perceptual Evaluation of Audio Quality (PEAQ)

Mit PEAQ hat die ITU ein Verfahren zur Qualitätsbewertung von Audiosignalen, die digitale oder analoge Verarbeitungsschritte durchlaufen, in [Rec.BS1387-1] standardisiert. Das Verfahren ist zur Bewertung von Audiocodierern sowie Audiogeräten, aber auch zur Überwachung von Audiosignalübertragungen geeignet. Hierzu wird der für die menschliche Geräuschwahrnehmung relevante Frequenzbereich von 80 Hz bis 18 kHz einer Bewertung unterzogen.

Das Verfahren nach [Rec.BS1387-1] benötigt synchronisierte Eingangssignale, die eine Genauigkeit von 24 Abtastwerten einhalten müssen. Wie diese Zeitdifferenzanpassung erfolgen soll, ist in [Rec.BS1387-1] nicht näher spezifiziert. Die Zeitdifferenzermittlung und anschließende Zeitanpassung der Signale wurde für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit unter Zuhilfenahme der Kreuzkorrelation der beiden Eingangssignale durchgeführt.

In [Rec.BS1387-1] sind zwei Versionen (Basic und Advanced) des PEAQ-Verfahrens beschrieben. Die beiden Versionen unterscheiden sich bei der Modellierung des Ohrs. In der Basic Version wurde eine FFT basierte Variante und in der advanced Version wurde eine filterbankbasierte Modellierung gewählt. Die Basic-Version wird in [Rec.BS1387-1] als effizient und zur Anwendung in Echtzeit beschrieben. Zur Minimierung der Bewertungsdauer wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit nur noch die Basic-Version weiterbeschrieben und verwendet. In [Rec.BS1387-1] ist das PEAQ-Verfahren beschrieben, jedoch keine Referenzimplementierung angegeben. Kabal hat in [Kab03] seine Implementierung des PEAQ-Verfahrens beschrieben und auf nicht hinreichend genaue Definitionen in [Rec.BS1387-1] hingewiesen. Die Implementierung nach [Kab03] wurde auch an anderer Stelle [DeLi08] verwendet und erfolgreich evaluiert. Für die vorliegende Arbeit wurde daher die Implementierung von Kabal ([Kab03]) verwendet, die lediglich um die vorher genannte Zeitdifferenzanpassung der Signale erweitert wurde.

In Abbildung 40 ist das Ablaufdiagramm des PEAQ-Bewertungsverfahrens dargestellt. Auch bei PEAQ werden die Eingangssignale in Zeitfenster aufgeteilt und dann mittels Kurzzeitfouriertransformation in den Frequenzbereich transformiert. Es erfolgt wie bei PESQ eine Normierung auf einen einheitlichen Abhörpegel. Als nächster Schritt werden die frequenzselektiven Eigenschaften des Außen- und Innenohrs berücksichtigt, bevor die Abbildung auf die gehörangepasste Bark-Skala erfolgt. Die so in die Frequenzgruppen unterteilten gewichteten Eingangssignale werden unter Berücksichtigung des internen Rauschens des Gehörs über die Frequenzgruppen hinweg und zusätzlich zeitlich verschmiert, um so die Zeit-Frequenzcharakteristik wie Verdeckungseffekte (Maskierung) bei der Wahrnehmung zu modellieren.

Aus den bereits durch das Gehörmodell verarbeiteten Signalen werden weitere Kenngrößen ermittelt, die Auskunft zur Lautheit, Modulation und Maskierung der Signale geben. Während bei PESQ die Differenzbildung maßgeblich auf der Lautheitsdarstellung beruht, werden bei PEAQ die zuvor genannten Kenngrößen der Signale zusätzlich in die Bewertung mit einbezogen. Die Signaleigenschaften und Kenngrößen werden zu 11 psychoakustischen Qualitätsparametern (Model Output Variables) als gewichtete Mittelwerte über die Zeitfenster zusammengefasst.

Abschließend dienen die 11 Qualitätsparameter als Eingangsgrößen für ein künstliches Neuronales Netz. Als Ausgabewert liefert das Neuronale Netz einen Qualitätswert mit der Bezeichnung ODG (Objective Differenz Grade). Diese Bewertungsskala ist in Tabelle 3 dargestellt und wird so auch für Hörtests nach [Rec.BS1116-1] verwendet. In [Rec.BS1387-1] sind die Datensätze, die zur Evaluierung des PEAQ-Verfahrens und dem Vergleich mit subjektiven Hörtests herangezogen wurden, genannt und die Vergleichbarkeit wurde nachgewiesen.

Tabelle 3: PEAQ-Bewertungsskala

ODG-Wert	Qualitätsbeschreibung
0	Nicht wahrnehmbare Beeinträchtigung (engl. imperceptible)
-1	Wahrnehmbar aber nicht störend (engl. perceptible but not annoying)
-2	Leicht störend (engl. slightly annoying)
-3	Störend (engl. annoying)
-4	Sehr störend (engl. very annoying)

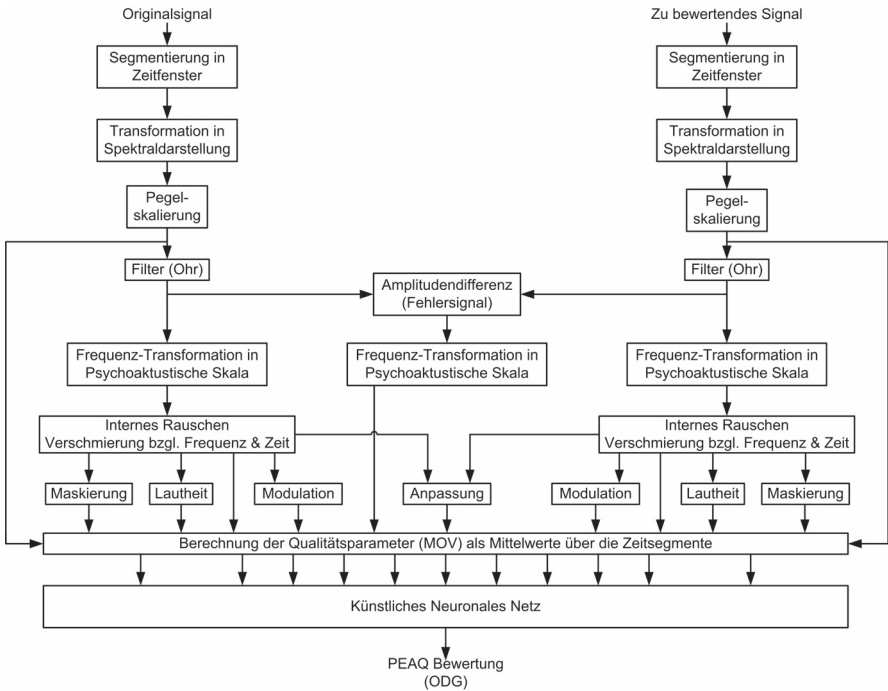


Abbildung 40: Ablaufdiagramm des PEAQ-Bewertungsverfahrens nach [Rec.BS1387-1]

5.4.3 Evaluierung der instrumentellen Audiobewertung

Vor einer Anwendung der instrumentellen Audioqualitätsbewertung sollen die zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen vorgesehenen Verfahren PESQ und PEAQ auf ihre Bewertungseigenschaften hin untersucht werden. Für diese und spätere Untersuchungen wurden die in Tabelle 30 im Anhang genannten Audio-Titel der SQAM CD [SQAM05] verwendet. Diese Auswahl enthält Audiomaterial mit sehr unterschiedlichen Audioinhalten aus verschiedenen Genres, bei denen sich auf Grund des unterschiedlichen Audioinhaltes, die Einflüsse eines Störsignals auf die wahrnehmbaren Empfangsbeeinträchtigungen unterscheiden können.

Als erstes Experiment werden beiden Verfahren Audiodaten der SQAM CD [SQAM05] als Eingangssignale übergeben. Dabei werden alle Kombinationen der fünf verschiedenen Audio-Titel bewertet. Eine maximale Korrelation und damit bestmögliche Qualitätsbewertung ist zu erwarten, wenn beide Eingangssignale identische Audio-Titel aufweisen. Bei allen anderen Fällen werden zwei unkorrelierte Audio-Titel gegeneinander bewertet. Dies sollte einer minimalen Qualitätsbewertung entsprechen.

Für das PESQ Verfahren lassen sich somit die in Tabelle 4 dargestellten Bewertungsergebnisse erzielen. Die Maximalbewertung liegt bei 4,64, während die Minimalbewertung für unkorrelierte Signale zwischen 1,02 und 1,77 liegt.

Für das PEAQ Verfahren wurde dasselbe Experiment durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt. Die Maximalbewertung für identische Signale liegt bei 0,2 während die Minimalbewertung einen einheitlichen Wert von -3,9 aufweist. Beide Verfahren wichen nur unwesentlich von den in [Rec.BS1387-1] für PEAQ und in [Rec.P862.2] für PESQ beschriebenen Wertebereichen ab.

Tabelle 4: Maximal- und Minimalbewertung durch PESQ [MOS-LQO]

Ref./Test	Titel 53	Titel 60	Titel 61	Titel 65	Titel 69
Titel 53	4,64	1,19	1,07	1,29	1,02
Titel 60	1,25	4,64	1,77	1,09	1,53
Titel 61	1,04	1,05	4,64	1,05	1,07
Titel 65	1,08	1,06	1,05	4,64	1,05
Titel 69	1,20	1,04	1,02	1,02	4,64

Tabelle 5: Maximal- und Minimalbewertung durch PEAQ [ODG]

Ref./Test	Titel 53	Titel 60	Titel 61	Titel 65	Titel 69
Titel 53	0,21	-3,91	-3,45	-3,90	-2,73
Titel 60	-3,91	0,18	-3,91	-3,87	-3,90
Titel 61	-3,91	-3,91	0,21	-3,91	-3,90
Titel 65	-3,91	-3,91	-3,91	0,20	-3,91
Titel 69	-3,91	-3,91	-3,90	-3,90	0,21

Als zweites Experiment wird ein Audiodatensatz exemplarisch $s_{Titel53}(t)$ (Sprache) jeweils mit einem Sinusstörton nach Gl. (5.2) überlagert. Hierbei findet die Bewertung jeweils mit Sinusstörtönen bei verschiedenen Frequenzen und unterschiedlichen Amplituden in aufeinanderfolgenden Bewertungen statt. Die Amplitudenangabe ist jeweils relativ zur maximal im Audiodatensatz auftretenden Amplitude.

$$s_{gestört}(t) = a \max(s_{Titel53}(t)) \cdot \sin(2\pi f) + s_{Titel53}(t) \quad (5.2)$$

Die Audioqualitätsbewertung des Sprachsignals $s_{Titel53}(t)$ mit den überlagerten Sinusstörtönen wurde durch PESQ und PEAQ vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Aus diesem Experiment kann auf die Frequenzselektivität der Qualitätsbewertung geschlossen werden. Die Frequenzselektivität von PESQ und PEAQ zeigt prinzipiell einen der Frequenzselektivität der menschlichen Geräuschwahrnehmung ([Fas07]) ähnlichen Verlauf.

Für die Audioqualitätsbewertung mit PESQ (Abbildung 41) zeigt sich, dass die Frequenzselektivität der PESQ-Bewertung auf den Audiofrequenzbereich bis maximal 8 kHz begrenzt ist. Störsignale mit höheren Frequenzen führen zu keiner Beeinträchtigung der Audioqualität bei der Bewertung mit PESQ. Das PESQ-Bewertungsverfahren wurde ursprünglich zur Bewertung von Sprachsignalen entwickelt. Die Frequenzselektivität spiegelt den für die menschliche Sprache relevanten Audiofrequenzbereich wieder. Beim AM-Hörfunk werden die Frequenzanteile von den Audiosignalen auf eine maximale Frequenz von 4,5 kHz vom Sender und Empfänger begrenzt. Dieser Audiofrequenzbereich fällt komplett in den Bereich der menschlichen Sprache, für dessen Bewertung PESQ entwickelt wurde. Bei der Bewertung von Sinusstörtönen mit sehr hohen Amplituden zeigen sich Abweichungen von der zu erwartenden Bewertungskurve, die sich jedoch in tolerablen Grenzen halten.

Die PEAQ-Bewertung kann zur Bewertung von Audiosignalen verwendet werden, die im kompletten hörbaren Audiofrequenzbereich liegen. Die Bewertungskurven in Abbildung 42 weisen einen erwartungsgemäßen Verlauf auf, der sich an der Frequenzselektivität des menschlichen Ohrs orientiert. Bei Sinusstörtönen mit sehr hohen Frequenzen (>20 kHz) kann es zu nicht erwartungsgemäßen Abweichungen in der Bewertung kommen. Für die Bewertung von Rundfunkempfangssignalen spielen die Frequenzbereiche, in denen diese Abweichungen auftreten, jedoch keine Rolle. Sie werden durch den Empfänger bereits herausgefiltert.

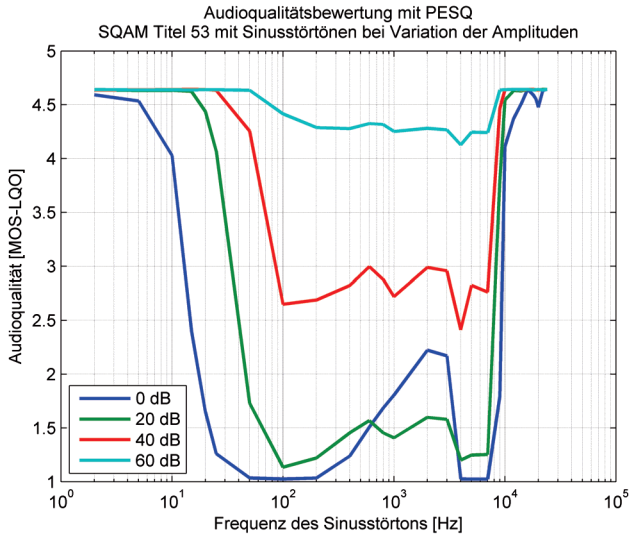


Abbildung 41: Audioqualitätsbewertung mit PESQ bei Überlagerung des SQAM Titels 53 mit Sinusstörungen

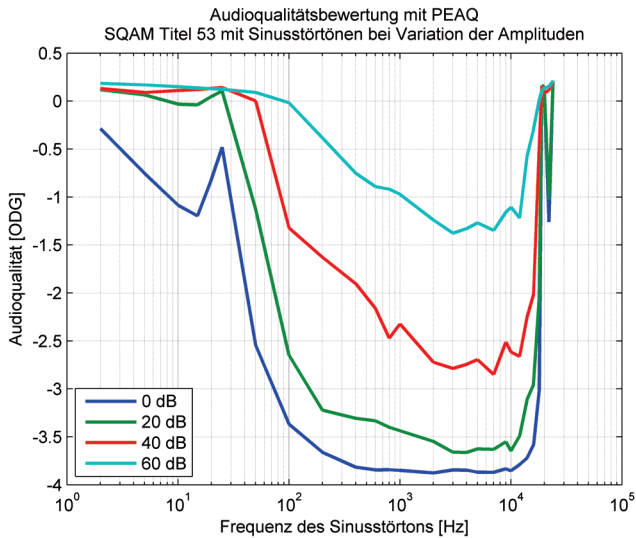


Abbildung 42: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ bei Überlagerung des SQAM Titels 53 mit Sinusstörungen

5.4.4 Signalverlauf und Komponenten des AVP

Ausgehend von der Übersichtsdarstellung in Abbildung 37 wird ein Signalflussdiagramm entwickelt, das in Abbildung 43 zu sehen ist. Die einzelnen Komponenten des Prüfaufbaus werden in best möglicher Leistungsanpassung betrieben. Es wird ein 50-Ohm-System verwendet, im optimalen Fall treten so keine Reflexionen auf. Generell gilt die Konvention, dass Eingangsgrößen mit IN und Ausgangsgrößen mit OUT bezeichnet werden.

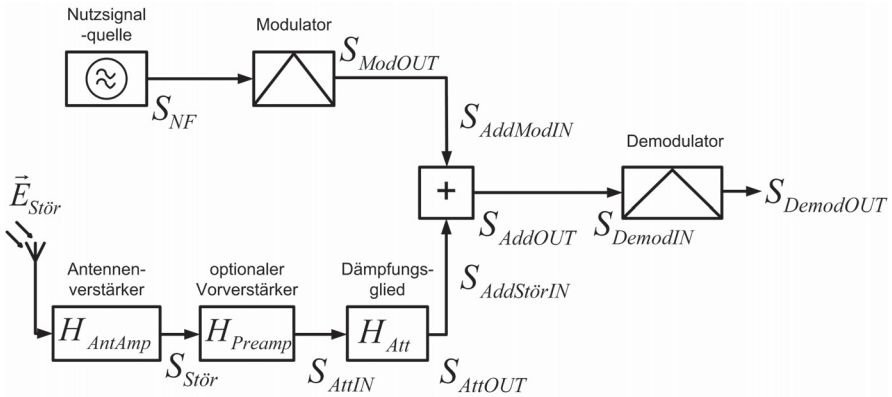


Abbildung 43: Signalflussdiagramm für den AVP

Das Eingangssignal am Rundfunkempfänger (Demodulator) $S_{DemodIN}(f)$ ohne Berücksichtigung einer Empfangsbeeinträchtigung lässt sich durch Gl. (5.3) beschreiben. Hierzu ist der am Addierer nicht verwendete Anschluss mit passendem Wellenwiderstand (50 Ohm) abgeschlossen. Aus Gl. (5.3) kann unmittelbar das am Modulatorausgang benötigte Signal S_{ModOUT} ermittelt werden. Die Übertragungsfunktion des Addierers für das modulierte Nutzsignal wird mit H_{AddMod} bezeichnet, während die Übertragungseigenschaften der Koaxialleitungen zu H_{LtgMod} zusammengefasst sind. Die Nutzsignalübertragung vom Modulatorausgang zum Demodulatoreingang wird durch die Übertragungsfunktion $H_{SignalMod}$ beschrieben, die sich aus den beiden Übertragungsfunktionen H_{AddMod} und H_{LtgMod} zusammensetzt.

$$S_{DemodIN}(f) = S_{ModOUT}(f) \cdot \underbrace{H_{AddMod} \cdot H_{LtgMod}}_{H_{SignalMod}} \quad (5.3)$$

für $S_{AddStörIN} = 0$

Für das Störsignal gilt Gl. (5.4) für den Fall, dass kein Nutzsignal vorhanden ist und der entsprechende Anschluss am Addierer wellenwiderstandsrichtig (mit 50 Ohm) abgeschlossen ist. Die Übertragungsfunktion des zuschaltbaren Vorverstärkers ist mit H_{PreAmp} , die des schaltbaren Dämpfungsglieds mit H_{Att} , die des Addierers mit $H_{AddStör}$ und die der Leitungen mit $H_{LigStör}$ bezeichnet. Wenn kein Vorverstärker verwendet wird, ist $H_{PreAmp} = 1$. Das Eingangssignal am Rundfunkempfänger $S_{DemodIN}(f)$ ergibt sich ohne ein Nutzsignal nach Gl. (5.4). Die Übertragungsfunktionen der einzelnen HF-Komponenten im Störsignalpfad werden zu $H_{Stör}$ zusammengefasst.

$$S_{DemodIN}(f) = S_{Stör}(f) \cdot \underbrace{H_{PreAmp} \cdot H_{Att} \cdot H_{AddStör} \cdot H_{LigStör}}_{H_{Stör}} \quad (5.4)$$

für $S_{AddModIN} = 0$

Zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen eines Rundfunksignals liegen am Addierer beide Signale an. Das Empfangssignal $S_{DemodIN}$ wird dann durch Gl. (5.5) beschrieben. Auf die Realisierung der Addition und die Problematik der Impedanzanpassung wird im folgenden Kapitel eingegangen.

$$S_{DemodIN}(f) = S_{ModOUT}(f) \cdot H_{SignalMod} + S_{Stör}(f) \cdot H_{Stör} \quad (5.5)$$

Im Weiteren sollen die Signaladdition und die Übertragungsfunktion des Stör- sowie Nutzsignals im Detail betrachtet werden.

5.4.5 Signaladdition

Die im vorherigen Kapitel dargestellte Signaladdition, welche bislang durch eine verlustfreie Addition und jeweils eine Übertragungsfunktion (H_{AddMod} bzw. $H_{AddStör}$) dargestellt ist, kann durch die nachfolgend beschriebenen Möglichkeiten realisiert werden. Die ersten beiden Möglichkeiten fanden für die später in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse Anwendung.

5.4.5.1 Leistungsaddierer

Zur Addition zweier Signale kann ein Leistungsaddierer aus Widerständen verwendet werden. Die Eingangsimpedanz des Addierers muss an die Leitungsimpedanz Z_L angepasst werden, um Reflexionen zu vermeiden. Realisieren lässt sich die Schaltung mit drei Widerständen. Nach [Mein92] ergibt sich die beste An-

passung allgemein für i Ausgänge nach Gl. (5.6). Nach Abbildung 44 ergibt sich die Übertragungsfunktion eines solchen Leistungsaddierers zu $\frac{U_2}{U_1} = \frac{U_3}{U_1} = \frac{1}{2}$. Seine Übertragungsfunktion (Gl. (5.7)) reduziert sich dann auf eine Einfügedämpfung von 6 dB zwischen jeweils zwei Anschlüssen. Es handelt sich um ein symmetrisch aufgebautes Bauteil.

$$R = Z_L \frac{i-1}{i+1} \xrightarrow{i=2} R = \frac{Z_L}{3} \quad (5.6)$$

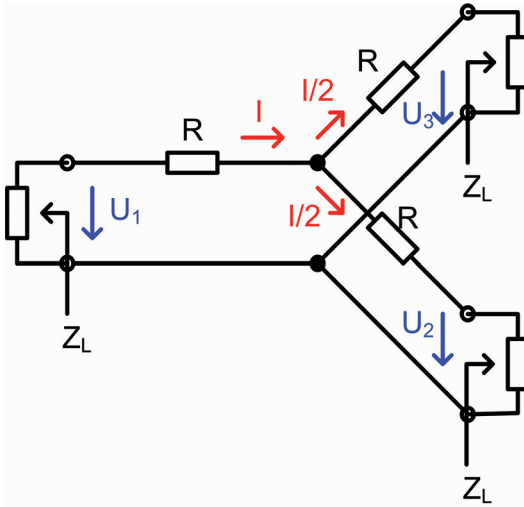


Abbildung 44: Symmetrisch aufgebauter Leistungsaddierer

Damit ist eine Bewertung der auftretenden Empfangsbeeinträchtigung nur mit einem bereits bedämpften Störsignal möglich. Um dieser unerwünschten Dämpfung entgegenzuwirken, kann das Störsignal vor dem Leistungsaddierer verstärkt werden. Durch einen nicht idealen Verstärker werden zusätzliche Rauschanteile erzeugt. Das Rauschen soll später betrachtet werden. Für das Nutzsignal, das über den Modulator im Pegel einstellbar ist, kann die Übertragungsfunktion des Leistungsaddierers nach Gl. (5.7) mit berücksichtigt werden.

$$H_{AddMod} = H_{AddStör} = \frac{1}{2} \quad (5.7)$$

5.4.5.2 Widerstandskoppler - PickOffTee

Wie im Kapitel zuvor dargestellt, tritt bei einem angepassten Leistungsaddierer eine nicht gewünschte Dämpfung beider Signale auf. Dieser Effekt kann durch die Verwendung eines anderen breitbandigen Widerstandskopplers verhindert werden. Eine ideale Anpassung kann so aber nicht mehr erreicht werden. Das Schaltbild ist in Abbildung 45 dargestellt und enthält für den Einkoppelwiderstand den im Prüfaufbau verwendeten Wert.

Die Eingangsreflexionsfaktoren ergeben sich für die Tore 1-1' und 2-2' im Idealfall, d. h. keine weiteren Leitungsverluste und Abschluss aller Tore mit 50 Ohm, zu dem mit Gl. (5.8) ermittelten Wert. Für das Tor 3-3' ergibt sich eine größere Fehlanpassung durch den inneren Aufbau, der nur in einem der Pfade einen höheren Einkoppelwiderstand besitzt. Diese Fehlanpassung wird durch Gl. (5.9) bestimmt. Das Bauteil weist keine Symmetrie bezüglich aller Anschlüsse auf. Es wird so eingesetzt, dass das Störsignal die minimal mögliche Dämpfung erfährt.

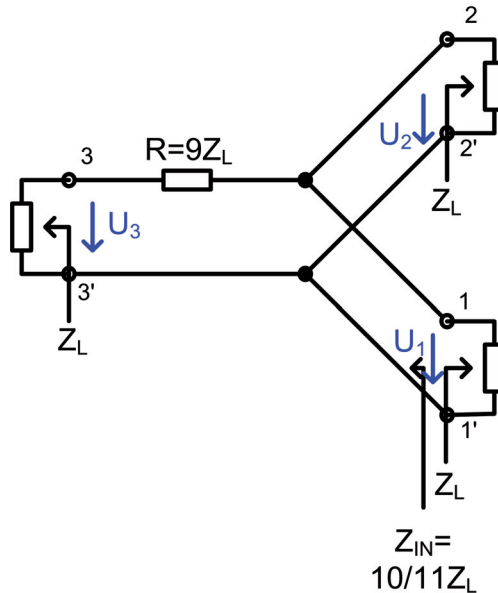


Abbildung 45: Widerstandskoppler – PickOffTee

$$r_1 = r_2 = \frac{Z_{IN} - Z_L}{Z_{IN} + Z_L} \xrightarrow{R=9 \cdot Z_L} r_1 = r_2 = -\frac{1}{21} \approx -61 \text{ dB} \quad (5.8)$$

$$r_3 = \frac{Z_{IN} - Z_L}{Z_{IN} + Z_L} \xrightarrow{R=9 \cdot Z_L} r_3 = \frac{17}{21} \approx -4 \text{ dB} \quad (5.9)$$

Die Übertragungsfunktion $H_{AddStör}$ zwischen Tor 1-1' und Tor 2-2' weist im Idealfall keine Dämpfung auf Gl. (5.10). In Realität tritt eine Leitungsdämpfung auf, die bei einem kleinen Bauteil (kurze Leitungslängen) wie diesem, gering ist.

$$H_{AddStör} = 1 \quad (5.10)$$

Die Einfügedämpfung für das Nutzsinal weist einen höheren Wert auf, der sich durch die Fehlanpassung und Aufteilung der Leistung nach Gl. (5.11) ergibt. Durch Berücksichtigung der Übertragungsfunktion kann die Einfügedämpfung, die das Nutzsinal erfährt, durch eine Pegelanpassung am Modulator kompensiert werden.

$$H_{AddMod} \approx \frac{1 - r_3}{2} = \frac{2}{21} \approx -20,4 \text{ dB} \quad (5.11)$$

5.4.6 Verstärkung eines Signals und das Rauschen

Das Störsignal kann im AVP durch einen Vorverstärker in seinem Pegel erhöht werden, um die Einfügedämpfung des Addierers zu kompensieren. Bereits im Fahrzeug wird das von der Antenne empfangene Signal verstärkt. Hierzu soll zunächst ein rauschender Vierpol nach Abbildung 46 und im nächsten Schritt eine Hintereinanderschaltung von mehreren rauschenden Vierpolen betrachtet werden. In [Lan91] und [Mein92] wird das Rauschen vertieft behandelt.

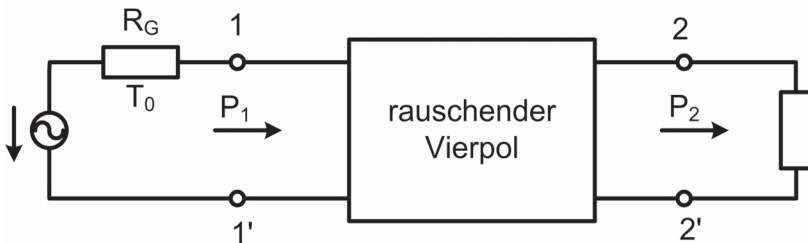


Abbildung 46: Rauschender Vierpol

Das Rauschverhalten eines Vierpols kann durch seine Rauschzahl F beschrieben werden. Die Rauschzahl F ist durch Gl. (5.12) definiert.

$$F = \frac{\text{Signal-Rausch-Abstand am Eingang}}{\text{Signal-Rausch-Abstand am Ausgang}} = \frac{SNR_{IN}}{SNR_{OUT}} = \frac{P_{1,s}/P_{1,n}}{P_{2,s}/P_{2,n}} \quad (5.12)$$

Der Lastwiderstand an Tor 2-2' wird als rauschfrei angenommen. Es herrscht Leistungsanpassung. Bei P_1 und P_2 handelt es sich um Wirkleistungen. Die Verstärkung des Vierpols ist definiert als $g = \frac{P_2}{P_1}$. Für einen rauschfreien Vierpol ergibt sich die Ausgangsleistung des Signals zu $P_2 = g \cdot P_1$ und der Rauschanteil durch das thermische Rauschen des Generatorinnenwiderstands R_G zu $P_{R2} = gkT_0\Delta f$. Für einen rauschenden Vierpol entsteht im Vierpol selbst die zusätzliche Rauschleistung ΔP_{R2} . Am Ausgang des rauschenden Vierpols ergibt sich die Rauschleistung in diesem Fall zu $P_{R2} = gkT_0\Delta f + \Delta P_{R2}$. Die Rauschzahl F lässt sich über die zusätzliche Rauschzahl F_Z mit Gl. (5.13) herleiten. Die Rauschzahl F wird oft auch in dB dargestellt. Die Umrechnung dieser Leistungsgröße erfolgt mit $F_{dB} = 10 \cdot \log(F)$.

$$F = 1 + F_Z = 1 + \frac{\Delta P_{R2}}{g k T_0 \Delta f} \quad (5.13)$$

Für eine Kettenschaltung von rauschenden Vierpolen lässt sich die zusätzliche Rauschzahl der gesamten Kette $F_{Z,Kette}$ und die Gesamtrauschzahl F_{Kette} aus den einzelnen zusätzlichen Rauschzahlen nach Gl. (5.14) berechnen.

$$F_{Kette} = 1 + F_{Z,Kette} = 1 + F_{Z1} + \frac{F_{Z2}}{g_1} + \dots + \frac{F_{Zn}}{g_1 g_2 \dots g_{n-1}} \quad (5.14)$$

Durch die Reihenfolge der in Reihe geschalteten Vierpole wird die Gesamtrauschzahl der Kette bestimmt. Ein Optimum wird erreicht, wenn der erste Vierpol eine geringe Rauschzahl und hohe Verstärkung besitzt.

Für das Störsignal im AVP ergibt sich dann die Rauschbetrachtung nach Gl. (5.15) am Eingang des Empfängers, bei der die Leitungen als verlustfrei angenommen sind. Dämpfungen werden als negative Verstärkungen verrechnet. Es gilt $g_{PreAmp} = H_{PreAmp}$ und $g_{Att} = H_{Att}$. Für das demodulierte Empfangssignal muss

zusätzlich der nicht ideale Empfänger mit seinem Eigenrauschen in die Rauschbetrachtung aufgenommen werden.

$$F_{ges} = 1 + F_{Z,ges} = 1 + F_{Z,PreAmp} + \frac{F_{Z,Att}}{g_{PreAmp}} + \frac{F_{Z,Add}}{g_{PreAmp} g_{Att}} \quad (5.15)$$

5.4.7 Übertragungsverhalten realer Koaxialleitungen

Eine allgemeine Leitung wie auch eine Koaxialleitung lässt sich über ihre Leitungsparameter durch die Leitungstheorie beschreiben. Zu den Leitungsparametern zählen der Widerstandsbelag R' , der Ableitungsbelag G' , Kapazitätsbelag C' sowie der Induktivitätsbelag L' . Das komplexe Ausbreitungsmaß γ ist durch Gl. (5.16) über die Leitungsbeläge definiert und lässt sich in das Phasenmaß β und Dämpfungsmaß α aufteilen.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (5.16)$$

Die Übertragungsfunktion H_{Ltg} bei Anpassung am Eingang und Ausgang der Leitung ergibt sich dann nach Gl. (5.17).

$$H_{Ltg} = e^{-\gamma l} = e^{-\alpha l} e^{-j\beta l} \quad (5.17)$$

5.5 Erweiterung (Offline-Bewertung)

Die Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen benötigt im Vergleich zur Bewertung eines Störsignals mit einem Funkstörmessempfänger mehr Zeit. Über eine Aufzeichnung des Störsignals kann dieser Nachteil insofern vermieden werden, als dass das Störsignal dann später ohne das Fahrzeug und ohne eine EMV-Prüfumgebung mit dem AVP offline bewertet werden kann. In Abbildung 47 ist die Messanordnung zur Aufzeichnung von Störsignalen dargestellt. Das Störsignal wird z. B. mit einem Realtime-Spektrumanalysator (Tektronix RSA3308A) digitalisiert und in das komplexe Basisband als IQ-Daten (I: Inphase, Q: Quadratur) verschoben, damit es anschließend von einem Computer zur digitalen Speicherung ausgelesen werden kann. In Abbildung 48 ist ein prinzipielles Blockschaltbild einer geeigneten IQ-Datenaufzeichnung dargestellt. Unter Zuhilfenahme eines hinreichend schnellen Analog-Digital-Wandlers besteht die Möglichkeit, ein Störsignal zu digitalisieren. Die digitalisierten Störsignale können, wie nachfolgend beschrieben, offline mit dem AVP bewertet oder für Simulationen, wie in Kapitel 7.1, verwendet werden.

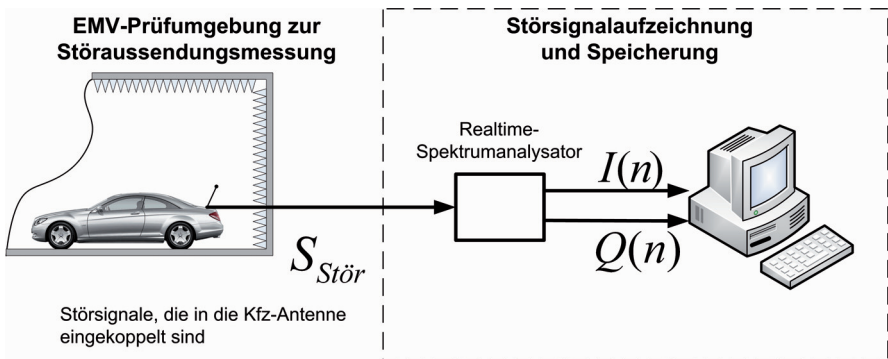


Abbildung 47: Aufzeichnung von Störsignalen

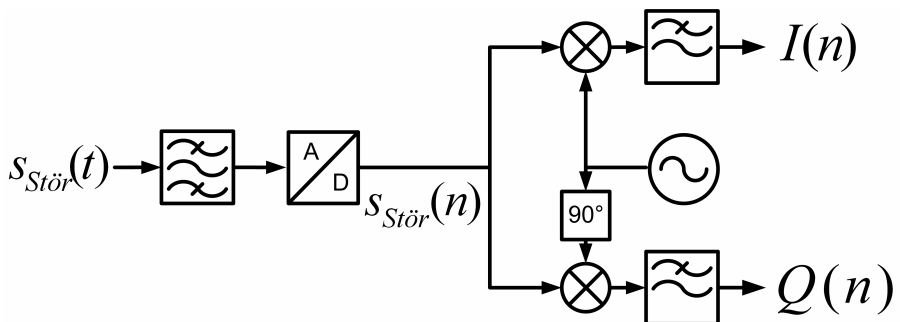


Abbildung 48: Prinzipielle IQ-Datenaufzeichnung

Das digitalisierte Störsignal kann mit einer Anordnung nach Abbildung 49 wiedergegeben und mit dem AVP bewertet werden. Es ist auf die Verwendung eines Analog-Digital-Wandlers mit einem ausreichend hohen Dynamikbereich zu achten. Zur Signalwiedergabe eignen sich IQ-Modulatoren mit einem prinzipiellen Blockschaltbild wie in Abbildung 50 gezeigt, mit denen die pegel- und phasenrichtige Wiedergabe eines Signals ermöglicht wird.

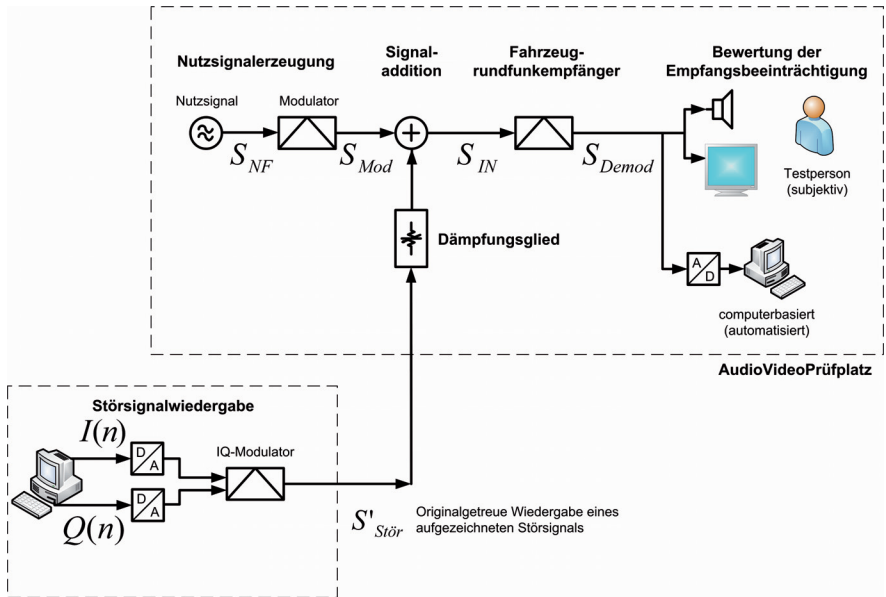


Abbildung 49: Offline Bewertung eines aufgezeichneten Störsignals

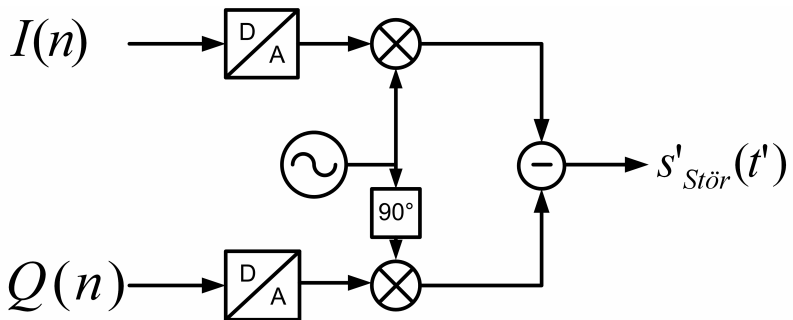


Abbildung 50: Prinzipielle IQ-Datenwiedergabe

Für eine korrekte Wiedergabe des ursprünglichen (Stör-)Signals gilt $s'_{Stör}(t') = s_{Stör}(t)$, wobei $s'_{Stör}(t')$ das wiedergegebene (Stör-)Signal ist und $s_{Stör}(t)$ das Original(stör)signal vor der Aufzeichnung ist. Zur Erfüllung der zuvor genannten Bedingung müssen bei der Signalaufzeichnung und -wiedergabe Einflüsse durch die Aufzeichnung und die Wiedergabe vermieden bzw. kompensiert werden.

Neben einer Frequenzabhängigkeit weist ein IQ-Modulator zusätzlich eine Abhängigkeit vom Pegel an seinem Lokalszillator auf. Für Signale mit einer geringen HF-Bandbreite $\Delta f_{Stör}$ in Bezug auf die maximale Bandbreite des IQ-Modulators kann die Frequenzselektivität vernachlässigt werden. Über eine entsprechende Anpassung der Signalaussteuerung am Modulatoreingang und der Pegelein-
stellung am Lokalszillator wird eine bestmögliche Signalwiedergabe erreicht.

5.6 Bediensoftware

Zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen mit dem AudioVideoPrüfplatz wird dieser über eine speziell entwickelte Software angesteuert. Ursprünglich wurde diese zur Interaktion mit einem Benutzer, der auch die Bewertung der Signale vornimmt, entwickelt und anschließend auf die Möglichkeit zur instrumentellen Bewertung erweitert. Die einzelnen Geräte, aus denen der AudioVideoPrüfplatz besteht, werden über diese einheitliche in MATLAB erstellte Bediensoftware angesteuert. Die Software ist wie in Abbildung 51 gezeigt in ein Schichtenmodell gegliedert.

In diesem Schichtenmodell befindet sich unterhalb der Bedienoberfläche die Callback & Funktionalebene. Hier werden die Eingaben durch den Benutzer auf der Bedienoberfläche (Abbildung 52) verarbeitet, die Übertragungsfunktionen der Signale berücksichtigt und die instrumentellen Bewertungsalgorithmen ausgeführt. Die anzusteuern-
den Geräte sind als generische Objekte im Hauptprogramm möglichst hardwareunabhängig implementiert worden. Dies ermöglicht die Verwendung verschiedener Geräte und Ausprägungen der vorgestellten Prüfmethode. Erst die unterste Schicht bewerkstelligt die hardwareabhängige Geräteansteuerung. In der Bediensoftware lassen sich verschiedene Konfigurationsdateien laden, damit unterschiedliche Geräte und Korrekturen verwendet werden können.

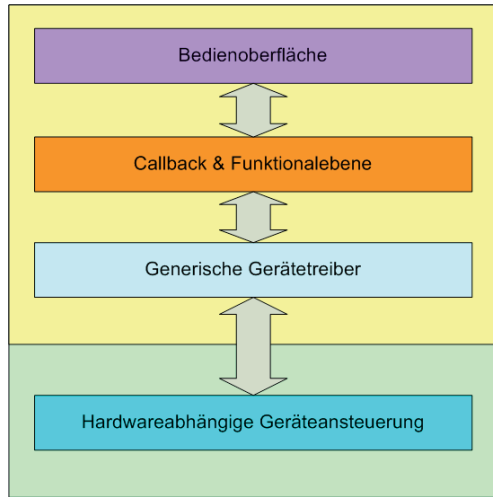


Abbildung 51: Schichtenmodell der Bediensoftware des AVP

Die Software stellt eine grafische Bedienoberfläche zur Verfügung, wie in Abbildung 52 gezeigt. Durch sie wird der Prüfablauf, wie schon zuvor beschrieben, vorgegeben. Der Benutzer wird in einzelnen Schritten durch den Prüfvorgang geleitet. Dadurch werden konsistente Ergebnisse erzielt und Fehler in der Bedienung bestmöglich vermieden.

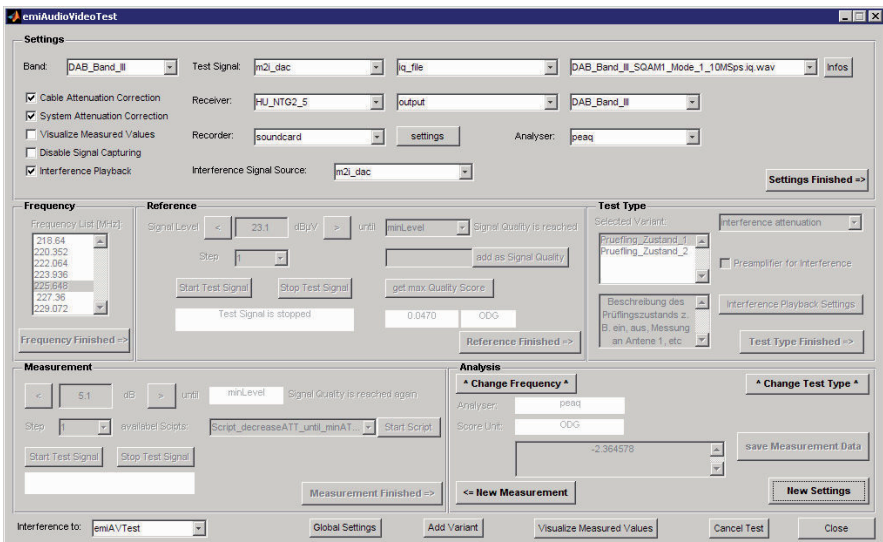


Abbildung 52: Grafische Bedienoberfläche zur Ansteuerung des AVP

Erste Einstellungen werden bezüglich des zu prüfenden Rundfunkdienstes und des Nutzsinalinhaltes sowie der verwendeten Geräte getätigt. Gefolgt werden diese generellen Einstellungen von der Wahl der Sendefrequenz bzw. des Kanals, auf den das Nutzsinal moduliert werden soll.

Anschließend wird der Empfangspegel im Rahmen des Referenzlaufs festgelegt. Daraufhin können Varianten, zur Dokumentation des Prüflingszustands angelegt, die Benutzung des Vorverstärkers oder die Wiedergabe von aufgezeichneten Störsignalen ausgewählt werden. Im nächsten Schritt wird das Störsignal hinzugeschaltet und optional bedämpft. Anschließend findet die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung statt, die dann als Signalbewertung mit den in der Software eingestellten Parametern zusammen gespeichert wird. Zur Iteration über die Dämpfung besteht die Möglichkeit verschiedenste Skripte auszuwählen, die dann eine Automatisierung des Prüfvorgangs ermöglichen.

6 Anwendung der neuen Prüfmethode

In den vorhergehenden Kapiteln wurde der AudioVideoPrüfplatz (AVP) und die Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen vorgestellt. In diesem Kapitel werden Ergebnisse aus der Anwendung des AVP und der Bewertungsverfahren präsentiert und diskutiert.

6.1 Empfangspegel des Nutzsymbols

Zur Untersuchung von Empfangsbeeinträchtigungen sollen Nutzsymbols mit definiertem Empfangspegel verwendet werden. Für ein gegebenes Störsymbol wird durch einen hinreichend hohen Empfangspegel des Nutzsymbols eine Beeinflussung geringer oder ist praktisch auszuschließen. Für Empfangsbeeinträchtigungen auf Grund von Funkstörungen sind somit niedrige Empfangspegel von besonderem Interesse.

6.1.1 Pegel der Sendersuchlaufschwelle

In nahezu allen modernen Rundfunkempfängern besteht die Möglichkeit einen automatischen Sendersuchlauf durchzuführen. Als Ergebnis des Sendersuchlaufs werden alle Sender zur Auswahl angeboten, deren Empfangspegel die Sendersuchlaufschwelle überschreitet. In der Praxis dürfte es selten vorkommen, dass ein Bediener manuell einen Sender unterhalb dieses Pegels auswählt. Dennoch ist die Betrachtung von Empfangspegeln unterhalb der Sendersuchlaufschwelle notwendig. Das Szenario hierzu entspricht einer Senderwahl und anschließender Veränderung der Empfangsposition und damit verbundener Reduzierung des Empfangspegels.

In nachfolgender Tabelle 6 sind Werte für die Sendersuchlaufschwellen angegeben, die messtechnisch an verschiedenen, sich im Einsatz befindenden Kraftfahrzeug-Rundfunkempfängern mit Hilfe eines Spektrumanalysators und Signalgenerators ermittelt wurden. Dazu wurde zunächst der Signalgenerator mit dem Rundfunkempfänger verbunden und der Sendersuchlaufschwellenpegel ermittelt. Anschließend wurde der Signalgenerator bei identischen Einstellungen mit dem Spektrumanalysator verbunden und der zur Kanalleistung äquivalente Empfangs(spannungs)pegel gemessen.

Die so ermittelten Werte für die Sendersuchlaufschwelle bieten einen Anhaltspunkt, welcher Empfangspegelbereich für die Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz geeignet erscheint.

Tabelle 6: Sendersuchlaufschwellen

Rundfunkdienst	Sendersuchlaufschwelle [dB μ V]
LW, MW, KW	10 - 14
UKW	12 - 21

6.1.2 Mindestempfangspegel

Analoge Rundfunksignale können auch unter schlechten Empfangsbedingungen, wenn auch mit verminderter Qualität, empfangen werden. Über das Signal-zu-Rausch-Verhältnis kann auch für analoge Rundfunkdienste eine Schwelle (Mindestempfangspegel) definiert werden, ab der der Empfänger kein Signal wiedergibt. Oft tritt jedoch zunächst eine deutlich wahrnehmbare Verschlechterung der Empfangsbedingungen ein.

Bei digitalen Rundfunkdiensten hingegen existiert ein Mindestempfangspegel, der für eine Demodulation und Decodierung erreicht werden muss. Dies stellt eine harte Schwelle zwischen unbeeinträchtigtem und gar keinem Empfang dar. Für die Decodierung ist eine hinreichende Anzahl korrekt übertragener Symbole notwendig, andernfalls ist eine Decodierung gar nicht oder in seltenen Fällen nicht fehlerfrei möglich. Für diesen Fall bietet der Empfänger dem Sender nicht zum Empfang an oder, wenn der Sender zuvor selektiert wurde, wird die Bild- bzw. Tonwiedergabe unterbrochen. Im Gegensatz zu analogen Rundfunkdiensten ist die langsam eintretende Verschlechterung der Empfangsbedingungen bei geringen Empfangspegeln so zunächst nicht wahrnehmbar.

Für den im AVP enthaltenen DAB- und DVB-T-Rundfunkempfänger wurden jeweils die Mindestempfangspegel ermittelt, die für einen störungsfreien Empfang ohne Berücksichtigung eines Störsignals notwendig sind. Hierzu wurde das Rundfunknutzsignal mit einem Signalgenerator erzeugt und dessen Pegel solange verringert, bis am untersuchten Rundfunkempfänger gerade noch ein störungsfreier Empfang möglich war. In Tabelle 7 sind die so mit einem Spektrumanalysator zur Kanalleistung äquivalenten Empfangs(spannungs)pegel aufgelistet. Bei DVB-T wurden zusätzlich die Messungen des Mindestempfangspegels in allen TV-Frequenzbändern durchgeführt.

Tabelle 7: Mindestempfangspegel

Rundfunkdienst	Mindestempfangspegel [dB μ V]
DVB-T	30 - 35
DAB	13

6.1.3 Ermittlung realer Empfangspegel im Kraftfahrzeug

Die zuvor genannten Empfangspegel, die der Sendersuchlaufschwelle oder dem Mindestempfangspegel entsprechen, sind allein vom Rundfunkempfänger abhängig. Äußere Einflussfaktoren auf reale Empfangspegel sind der Abstand zum Sender, die Topographie des Geländes, aber auch Kanalstörungen, die durch Mehrwegeempfang oder Abschattungen zustande kommen können. Exemplarisch wurden die Empfangspegel, wie sie in der Region Stuttgart an verschiedenen Orten mit einem Fahrzeug gemessen werden können, aufgezeichnet. Dies wurde teils auf subjektiver Hörbasis durchgeführt, um Anhaltspunkte für die relevanten Testpegel bei den automatisierten Tests zu gewinnen.

Dazu wurde jeweils ein Funkstörmessempfänger anstatt bzw. parallel zu dem Fahrzeugradioempfänger an den Ausgang des im Fahrzeug integrierten Antennenverstärkers angeschlossen. Für den Fall, dass Funkstörmessempfänger und Fahrzeugradioempfänger parallel betrieben wurden, wurde das Empfangssignal zunächst verstärkt und dann über eine Leistungsverzweigung beiden Empfängern gleichzeitig zugeführt. Neben einer einfachen Bestimmung des Empfangspegels wurde zusätzlich eine Statistik über seine Änderungen während der Beobachtungszeit durch eine Messung der Amplitudenwahrscheinlichkeit (APD) erstellt. Für analoge Rundfunkdienste wurde das demodulierte Empfangssignal parallel zur APD-Messung aufgezeichnet.

In Abbildung 53 ist die APD der Empfangssignalpegel beim FM-Rundfunkempfang im Fahrzeug dargestellt. Die Statistik über die Empfangspegel bezieht sich hierbei auf eine Beobachtungszeit von 15 Sekunden und wurde bei einer Empfängerbandbreite von 120 kHz ermittelt. Das Fahrzeug befand sich an einem Standort, wobei lediglich das Empfangssystem des Fahrzeugs aktiv war. Die Schwankungsbandbreite nimmt mit zunehmendem Empfangspegel ab. Bei sehr niedrigen Empfangspegeln und damit verbundener sehr schlechter Empfangsqualität erhöht sich der Rauschanteil im Audiosignal. Bei der Pegelmessung ist dann auch ein rauschähnliches Verhalten und eine größere Varianz des Empfangspegels zu beobachten.

Zusätzlich zu den Messkurven aus dem Fahrzeug wurde die APD eines mit dem AudioVideoPrüfplatz (AVP) erzeugten Rundfunknutzsignals in Abbildung 53 eingezeichnet. Für dieses Signal wurde ein Nutzsignalpegel von 20 dB μ V eingestellt, was bei einer Bewertung durch PEAQ ohne Störsignaleinflüsse eine Qualitätsstufe von -1 ergibt. Im Vergleich zu den im Fahrzeug gemessenen Rundfunkempfangssignalen ist der Empfangspegel hier konstant. Die zuvor genannten äußeren Einflussfaktoren werden nicht berücksichtigt. Mit dem AVP sollen nur die Einflüsse des Störsignals auf den Rundfunkempfang bewertet werden.

Die Bewertung der Rundfunkempfangsqualität wurde subjektiv durchgeführt, da die instrumentellen Bewertungsverfahren PEAQ bzw. PESQ unter Verwendung des im Fahrzeug und des aus einem Webradio zeitgleich aufgezeichneten Referenz-Audiosignals auf Grund des fehlenden Grundrauschens im Webradiosignal immer zu sehr schlechten und damit nicht verwertbaren Bewertungen führen.

Für den DAB-Empfang im Fahrzeug wurden dieselben Messungen wie für den FM-Rundfunkempfang wiederholt, wobei hier eine auf den Dienst angepasste Empfängerbandbreite von 1 MHz zur Erfassung der Empfangspegelstatistik verwendet wurde. Als Beobachtungszeitraum wurden wieder 15 s verwendet. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 54 dargestellt. Zwischen den unterschiedlichen Empfangssituationen ändert sich der Kurvenverlauf qualitativ kaum. Der Unterschied zwischen störungsfreiem Empfang und Wiedergabe des gesendeten Audiosignals bei geringen Pegeln und Empfang mit hörbaren Empfangsbeeinträchtigungen ist sehr gering. Unter hörbare Empfangsbeeinträchtigungen fällt zeitweises Stummschalten des Empfängers sowie Störgeräusche (z. B. Gluckern), wie sie durch Codierungsartefakte hervorgerufen werden. In Abbildung 54 ist zusätzlich zu den Messkurven aus dem Fahrzeug eine Vergleichsmessung eines DAB-Nutzsignals eingezeichnet, das mit dem AVP generiert wurde. Dazu wurde am AVP der bereits zuvor ermittelte Mindestempfangspegel, ab dem ein störungsfreier Empfang möglich ist, eingestellt und die APD aufgezeichnet. Bei den DAB-Signalen sind ebenfalls Unterschiede der APD-Kurven zwischen den Messungen im Fahrzeug und dem vom AVP erzeugten Signal zu erkennen, die jedoch geringer ausfallen als bei den betrachteten FM-Rundfunksignalen.

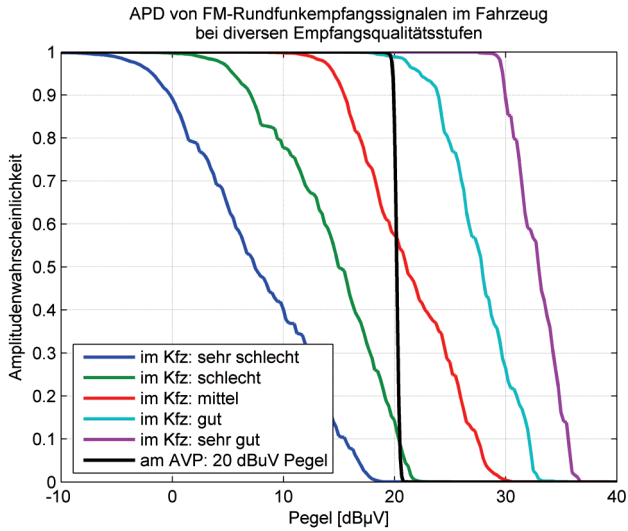


Abbildung 53: APD von FM-Rundfunkempfangssignalen im Fahrzeug

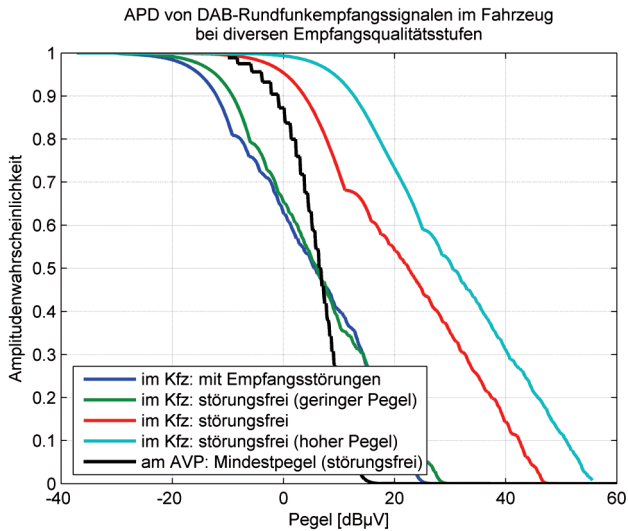


Abbildung 54: APD von DAB-Rundfunkempfangssignalen im Fahrzeug

6.2 Untersuchte Störsignale

Im ersten Schritt werden Empfangsbeeinträchtigungen durch künstlich erzeugte Störsignale untersucht. In diesem Spezialfall sind die Störsignaleigenschaften exakt definiert und können beeinflusst sowie problemlos reproduziert werden. Unter diesen kontrollierten Bedingungen lassen sich Vergleiche zwischen verschiedenen Bewertungsverfahren am besten durchführen.

Im darauffolgenden Schritt werden die Untersuchungen auf real im Fahrzeug gemessene Störsignale ausgedehnt. Hierbei sind beliebige Störsignale möglich, die in ihrer Form und Amplitude als aus der Messung vorgegeben betrachtet werden.

6.2.1 Künstlich erzeugte Störsignale

Unter künstlich erzeugten Störsignalen sind generische Signale zu verstehen, die sich durch einen Signalgenerator erzeugen lassen. Ihre Zeitfunktion und das zugehörige Frequenzspektrum sind analytisch beschreibbar. Beispielhaft werden Untersuchungen mit Pulsfolgen durchgeführt. Diese lassen sich durch ihre Puls wiederholfrequenz $f_p = \frac{1}{T_p}$, Pulsweite T_w und Amplitude A vollständig beschreiben. Die analytische Beschreibung eines solchen mittelwertfreien Signals liefert Gl. (6.1).

$$s_{Puls} = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left(t + n \underbrace{\frac{1}{f_p}}_{T_p} \right) - \frac{A}{2} \quad (6.1)$$
$$\text{mit } \text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } |t| \leq \frac{T_w}{2} \\ 0 & \text{für } |t| > \frac{T_w}{2} \end{cases}$$

Die Berechnung der Spektralanteile für diese periodische und symmetrische Funktion erfolgt über die Entwicklung in eine Fourier-Reihe nach Gl. (6.2), siehe auch [Bro01].

$$s_{Puls}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jk2\pi ft} \quad (6.2)$$

Das diskrete Linienspektrum wird durch die komplexen Fourier-Koeffizienten c_k beschrieben. Für die in Gl. (6.3) beschriebene Funktion gilt:

$$c_k = \frac{1}{2} a_k = \frac{1}{2} a_{-k} = \frac{2}{T_p} \int_0^{T_p} s_{Puls}(t) \cos(k 2\pi f) dt \quad (6.3)$$

Die Einhüllende des Linienspektrums besitzt einen $\frac{\sin x}{x}$ Verlauf. Die Spektrallinien treten jeweils bei Vielfachen der Pulswiederholfrequenz $f_p = \frac{1}{T_p}$ auf, während durch die Pulsweite T_w die Nullstellen des $\frac{\sin x}{x}$ Verlaufs festgelegt sind. In Abbildung 55 ist das diskrete Linienspektrum dieser Pulsfolge mit Normierung der maximalen im Spektrum auftretenden Amplitude auf 1 und Normierung der Frequenz auf $\frac{1}{T_w}$ dargestellt.

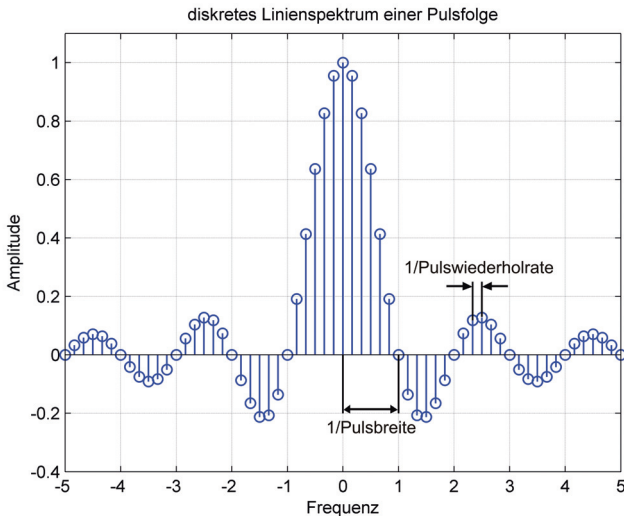


Abbildung 55: Diskretes Linienspektrum einer Pulsfolge

Zur Erzeugung eines sehr breitbandigen Störsignals mit näherungsweise konstanter Amplitude auch für höhere Frequenzen sind sehr kurze Pulse notwendig. Eine Alternative bietet die Multiplikation der Pulsfolge mit einer sinusförmigen Schwingung. Dadurch werden die Spektralanteile um die Frequenz der sinusförmigen Schwingung verschoben. Die Zeitfunktion eines solchen Signals ist in Abbildung 56 für eine Pulsperiode dargestellt. Das Spektrum ändert sich im Vergleich zu Abbildung 55 nicht. Es besitzt dann nur eine neue Mittenfrequenz.

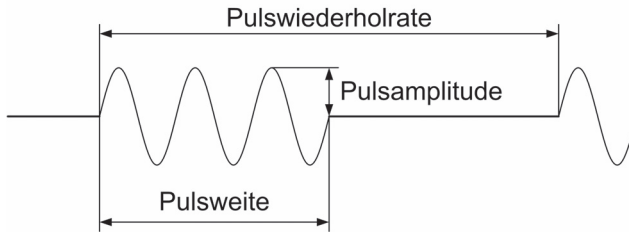


Abbildung 56: Zeitverlauf einer pulsmodulierten Sinusschwingung

6.2.1.1 Empfangsbeeinträchtigungen analoger Rundfunksignale

Zunächst sollen der vorgestellte AudioVideoPrüfplatz und die instrumentelle Audioqualitätsbewertung auf analoge Rundfunkdienste angewendet werden. Durch den unmittelbaren Vergleich zum bereits etablierten und anerkannten Bewertungsverfahren mit Hilfe des Quasispitzenwertdetektors soll die neue Prüfmethode evaluiert werden.

6.2.1.1.1 AM-Rundfunk

Erste Untersuchungen fanden mit amplitudenmodulierten Nutzsignalen statt. Der Empfangspegel wurde auf einen Wert von $30 \text{ dB}\mu\text{V}$ gesetzt, welcher deutlich über der in Kap. 6.1.1 ermittelten Suchlaufpegelschwelle des Rundfunkempfängers liegt. Als Nutzsignalinhalte wurden verschiedene Audiosignalinhalte aus Tabelle 30 im Anhang herangezogen.

Als Störsignal wurde ein pulsmoduliertes sinusförmiges Signal mit unterschiedlichen Puls wiederhol frequenzen und konstanter Pulsbreite verwendet. Die Untersuchungen wurden im Mittelwellenband bei 1080 kHz mit den Parametern nach Tabelle 8 durchgeführt. Die Pulsamplitude wurde so gewählt, dass trotz unterschiedlicher Puls wiederhol frequenzen eine annähernd identische Bewertung durch einen Quasispitzenwertdetektor erfolgt, soweit dies mit den restlichen Parametern vereinbar war.

Tabelle 8: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die AM-Untersuchungen

Parameter	Werte		
Pulswiederholffrequenz	1 Hz	100 Hz	1000 Hz
Pulsweite	20 ns		

Für die Bewertung mit dem Funkstörmessempefänger wurde für alle Störsignale eine konstante und hinreichend lange Bewertungsdauer sowie als Empfängerbandbreite 9 kHz (nach [CISPR 25]) eingestellt. Die ermittelten Anzeigewerte der verschiedenen Detektoren sind in Tabelle 9 wiedergegeben. Das Störsignal überschreitet jeweils die Grenzwerte für die Störaussendung nach [CISPR 25].

Tabelle 9: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die AM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempefängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte			Grenzwerte [CISPR 25]			Grenzwert-überschreitung		
	PK	QP	AV	PK	QP	AV	PK	QP	AV
1 Hz Pulsrate	31	15	15	20	7	0	11	8	15
100 Hz Pulsrate	29	19	5	20	7	0	9	12	5
1000 Hz Pulsrate	24	20	5	20	7	0	4	13	5

Schrittweise wurde das Störsignal bedämpft und die jeweilige Audioqualität ermittelt. Für den AM-Rundfunk wurde dazu das PESQ-Verfahren verwendet. In Abbildung 57 sind die Ergebnisse für eines der untersuchten Nutzsingale (Titel 60) für den störungsfreien Fall und unter Beaufschlagung der Störsingale mit drei verschiedenen Pulswiederholraten dargestellt.

Der Verlauf der Audioqualitätsbewertungskurven ändert sich in Abhängigkeit der Pulswiederholrate. Besonders der Gradient und die asymptotische Annäherung an die Bewertungskurve ohne Störsingal weisen deutliche Unterschiede auf. Die ma-

ximal mögliche Bestbewertung wird durch den Einfluss des Rauschens bei den gewählten geringen Empfangspegeln nicht erreicht.

Für eine gute Empfangsqualität nach den Maßstäben der ITU sollte das PESQ-Verfahren eine Bewertung von größer 4 liefern. Die benötigten Dämpfungswerte für das Nutzsignal (Titel 60) können Abbildung 57 entnommen werden. Für weitere Nutzsignale wurde dieselbe Untersuchung durchgeführt und die in Tabelle 10 gezeigten Werte ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die Nutzsignale unter identischen Randbedingungen unterschiedlich beeinträchtigt werden und für eine gleichbleibende Audioqualität das Störsignal um einen individuellen Wert gedämpft werden muss. Über alle untersuchten Nutzsignale wurden der Mittelwert und die Standardabweichung als statistische Auswertung über die unterschiedlichen Nutzsignale ermittelt.

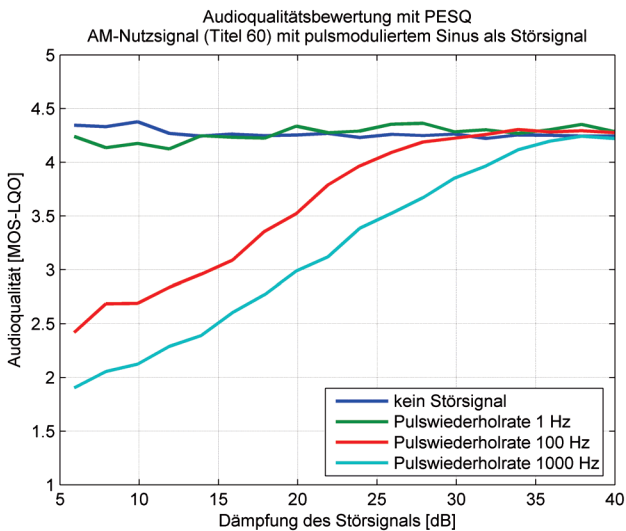


Abbildung 57: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals

Beim Vergleich der Detektorbewertung mittels Grenzwertbetrachtung mit den Werten aus [CISPR 25] (Tabelle 9) und der Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen mit dem AudioVideoPrüfplatz (Tabelle 10) kommt es zu Abweichungen. Die Definition des Quasispitzenwertdetektors in [CISPR 16-1-1] erfolgt über seine Eigenschaft, wie Pulsfolgen bewertet werden (siehe Kapitel 3.2.3.3) und wurde an Hand von AM-Empfängern festgelegt, wobei die genauen Randbedingungen der damals durchgeführten Untersuchungen nicht angegeben sind.

Tabelle 10: Notwendige Dämpfung der Störsignale bei verschiedenen Nutzsignalen für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PESQ

Nutzsignale Störsignale	T53	T60	T61	T65	T69	Mittelwert	Standardabw.
1 Hz Pulsrate	12	6	6	6	14	9	3,9
100 Hz Pulsrate	28	25	26	26	30	27	2,0
1000 Hz Pulsrate	36	32	36	32	36	34	2,2

Im Folgenden werden deshalb exemplarisch für das zuvor untersuchte Nutzsignal (Titel 60) analog zur Definition des Quasispitzenwertdetektors die entsprechenden Pulsbewertungen bei verschiedenen Nutzsignalpegeln als Randbedingung ermittelt. Diese Untersuchungen wurden bei einer Trägerfrequenz des Nutzsignals von 1080 kHz durchgeführt. Die Ermittlung erfolgt in Anlehnung an [CISPR 16-1-1]. Die Pulse wurden im Basisband erzeugt und genügen hinsichtlich ihrer spektralen Ausdehnung der Definition. Die Impulsfläche und damit die Spannungsamplitude wurden zum Schutz des Fahrzeugradioempfängers verkleinert. Zur Reduzierung der spektralen Leistung wurde ein Bandpass verwendet, der das Pulssignal auf den für den Rundfunkempfänger relevanten Bandpassbereich reduziert.

Mit denselben Pulssignalen wurden die Pulsbewertungen zusätzlich mit einem Funkstörmessempfänger nach [CISPR 16-1-1] messtechnisch ermittelt. Diese Vergleichsmessung dient zur Überprüfung, ob die Verringerung der Impulsfläche eine relevante Abweichung zur Folge hat.

In Tabelle 11 sind die ermittelten Pulsbewertungen und der vorgegebene Toleranzbereich aus [CISPR 16-1-1] angegeben. In Abhängigkeit der Pulsfrequenz werden Pulse stärker oder geringer bewertet. Der Bezugswert für die Pulsbewertung liegt jeweils bei einer Pulswiederholfrequenz von 100 Hz. Alle Angaben beziehen sich auf diesen Wert. Mit dem AudioVideoPrüfplatz (AVP) wurden die notwendigen Dämpfungswerte des Störsignals bei verschiedenen Nutzsignalpegeln (30 dB μ V, 50 dB μ V, 65 dB μ V) ermittelt, für die eine gute Audioqualität nach PESQ (≥ 4) erreicht wird.

Für hinreichend hohe Nutzsignalpegel wird durch den vorgestellten AudioVideo-Prüfaufbau mit instrumenteller Audibewertung eine einem Quasispitzenwertdetektor (QP) entsprechende Bewertung der Störsignale durchgeführt. Bei geringen Nutzsignalempfangspegeln und sehr seltenen Pulsen kommt es zu Unter-

schieden zwischen der Audibewertung und der Quasispitzenwertbewertung des Störsignals. Zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen, wie sie bei sehr geringen Empfangspegeln auftreten, liefert der AudioVideoPrüfplatz eine genauere Aussage. Zusätzlich wird der Einfluss des Nutzsignalinhalts in die Bewertung mit einbezogen, was wie in Tabelle 10 gezeigt, einen zusätzlichen Einfluss auf die wahrnehmbaren Empfangsbeeinträchtigungen hat. Das Abbilden verschiedener Nutzsignale und Empfangspegel ist bei der Definition des Quasispitzenwertdetektors nach [CISPR 16-1-1] nicht vorgesehen. Aus den hier ermittelten Ergebnissen erscheint es naheliegend, dass zur Definition des Quasispitzenwertdetektors hohe Nutzsignalpegel verwendet wurden und/oder die Rundfunkempfänger in der Zwischenzeit empfindlicher geworden sind.

Tabelle 11: Pulsbewertung in dB relativ zur Bewertung des Pulses mit 100 Hz Pulsfrequenz durch den AVP bei unterschiedlichen Nutzsignalpegeln, Funkstörmessempfänger ESU 8 (QP) und [CISPR 16-1-1] im Vergleich

Pulsfrequenz [Hz]	Nutzsignalpegel 30 dB μ V	Nutzsignalpegel 50 dB μ V	Nutzsignalpegel 65 dB μ V	ESU 8 QP	CISPR 16-1-1
1	33	33	19	23,6	22,5 \pm 2
2	19	17	16	21,3	20,5 \pm 2
10	5	7	8	10,9	10 \pm 1,5
20	3	5	6	6,6	6,5 \pm 1
60	2	2	1	1,6	1,6 \pm 0,2
100	0	0	0	0	0
200	-2	-3	-2	-1,7	-1,7 \pm 0,3

6.2.1.1.2 FM-Rundfunk

Für FM modulierte Rundfunksignale erfolgt die Übertragung des Nutzsymbols über die Änderung der Momentanfrequenz und nicht wie bei einer AM in der Amplitudenänderung. Analog zu den Untersuchungen für AM werden auch für FM zunächst Untersuchungen mit künstlich erzeugten Störsignalen durchgeführt.

Die pulsmodierte Sinusschwingung wird durch die in Tabelle 12 genannten Parameter festgelegt. Die Trägerfrequenz des Nutzsymbols (97,7 MHz) und die des pulsmodulierten sinusförmigen Störsymbols sind identisch. Die Pulsamplitude wurde jeweils so gewählt, dass für die Störsymbole mit unterschiedlichen Puls wiederhol frequencies annähernd identische Bewertungen durch einen Quasispitzenwertdetektor erfolgen. Das Spektrum des Störsymbols wird zunächst wieder mit einem Funkstörmessempfänger bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 für eine Messbandbreite von 120 kHz, wie in [CISPR 25] vorgesehen, dargestellt.

Tabelle 12: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsymbole für die FM-Untersuchungen

Parameter	Werte		
Pulswiederhol frequency	1 Hz	100 Hz	1000 Hz
Pulsweite	20 ns		

Das Störsymbol überschreitet bei einer Quasispitzenwertbewertung die Grenzwerte für die Störaussendung nach [CISPR 25] um ca. 10 dB. Beim Spitzenwert- und Mittelwertdetektor sind die Grenzwertüber-/unterschreitung von der Pulsrate des Störsymbols abhängig. Die Unterschiede bei den gemessenen Detektorwerten im Vergleich zu den AM-Untersuchungen sind durch die jetzt größere Bandbreite und höhere Trägerfrequenz zu erklären.

Tabelle 13: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die FM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

	Messwerte			Grenzwerte [CISPR 25]			Grenzwert- überschreitung		
	PK	QP	AV	PK	QP	AV	PK	QP	AV
Störsignale									
1 Hz Pulsrate	63	22	11	26	13	6	37	9	5
100 Hz Pulsrate	37	25	0	26	13	6	11	12	-6
1000 Hz Pulsrate	30	25	1	26	13	6	4	12	-5

Zur Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung, die durch das Störsignal verursacht wird, wird der AudioVideoPrüfplatz verwendet und das PEAQ-Verfahren zur Bewertung der Audioqualität herangezogen.

In Abbildung 58 wird das zuvor bereits betrachtete Nutzsinal (Titel 60) erneut als Beispiel verwendet. Es wurde ein Empfangspegel für das Nutzsinal von 24 dB μ V eingestellt, was einen Pegel knapp über der Suchlaufschwelle darstellt. Die Kurve stellt die Audioqualitätsbewertung mit dem PEAQ-Verfahren über der auf das Störsignal angewendeten Dämpfung dar. Abhängig von den Pulswiederholungsfrequenzen ändert sich der Kurvenverlauf qualitativ deutlicher als bei der Bewertung eines AM-Rundfunksignals. Der asymptotische Verlauf bleibt, wie zu erwarten war, erhalten. Die Bewertung für ein gutes Audiosignal wird auf den PEAQ Wert -1 oder alternativ auf den Übergang zum flachen asymptotischen Verlauf gesetzt. Die maximal mögliche Audioqualitätsbewertung wird auf Grund des Rauschens auch ohne Störsignal nicht erreicht.

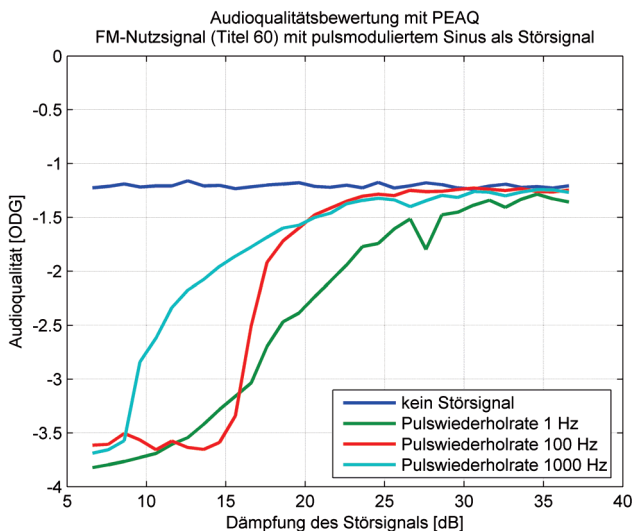


Abbildung 58: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines FM-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals

In Tabelle 14 sind die mittels Audiobewertung festgestellten Dämpfungswerte für das jeweilige Störsignal aufgelistet und über alle Nutzsignale der Mittelwert sowie die Standardabweichung angegeben. Beim Vergleich der Detektorbewertungen mit der Audiobewertung für FM-Signale ist eine bessere Übereinstimmung der Bewertung durch den Quasispitzenwertdetektor und das PEAQ-Verfahren festzustellen als für die AM-Rundfunksignale.

Tabelle 14: Notwendige Dämpfung der Störsignale bei verschiedenen Nutzsignalen für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PEAQ

Störsignale	T53	T60	T69	Mittelwert	Standardabw.
1 Hz Pulsrate	23	27	23	22	6,1
100 Hz Pulsrate	18	20	18	18	2,0
1000 Hz Pulsrate	20	20	20	19	2,3

6.2.1.2 Empfangsbeeinträchtigungen digitaler Rundfunksignale

Die Einflussnahme eines Störsignals auf ein digitales Rundfunksignal unterscheidet sich von analogen Rundfunksignalen. Bei digitalen Rundfunksignalen (Kapitel 4.3) werden die Nutzsignalinhalte als digitale Daten verarbeitet und übertragen. Diese digitalen Daten werden codiert und um Fehlersicherungsmaßnahmen ergänzt, bevor sie den Sendesymbolen zugeordnet werden. Erst jetzt erfolgt der Übergang der digitalen Daten zu analogen Signalfolgen, die vom Sender an den Empfänger übermittelt werden. Der unmittelbare Zusammenhang zwischen dem Nutzsignalinhalt und dem modulierten HF-Rundfunksignal zu einem Zeitpunkt ist so nicht mehr gegeben. Bei analogen Rundfunkdiensten ist ein direkter Zusammenhang zwischen dem Nutzsignalinhalt und dem modulierten HF-Rundfunksignal zu einem Zeitpunkt stets gegeben. Empfangsbeeinträchtigungen digitaler Systeme sind deshalb auch nicht mehr unmittelbar abzuschätzen. Daher gestaltet sich die geeignete Bewertung von Störsignalen schwieriger.

6.2.1.2.1 Digital Audio Broadcasting (DAB)

Auch für erste Untersuchungen zu Empfangsbeeinträchtigungen von DAB-Rundfunksignalen werden definierte Störsignale verwendet. Auf Grund der größeren Übertragungsbandbreite und zusätzlicher Fehlerkorrekturmechanismen wurden für die DAB-Untersuchungen pulsmodierte Sinusschwingungen mit höheren Pulswiederholfrequenzen als Störsignale verwendet. Selten auftretende Störsignaleanteile werden durch die Fehlerkorrekturmechanismen behoben. Für die Untersuchungen wurden Nutzsignale mit drei verschiedenen Empfangspegeln (Tabelle 15) verwendet. Der kleinste Pegel entspricht dabei dem Mindestempfangspegel, der für einen fehlerfreien Empfang ohne Störsignaleinfluss notwendig ist. Die Fehlerkorrekturmechanismen sind in diesem Fall bereits durch den Einfluss des Empfängerrauschens ausgelastet. Bei höheren Empfangspegeln werden die kompletten Möglichkeiten der Fehlerkorrektur auf die Einflüsse der Störsignale angewendet. Diesem Sachverhalt wird Rechnung getragen, indem die Untersuchungen auch mit höheren Nutzsignalempfangspegeln durchgeführt werden. Die Untersuchungen wurden an einem DAB-Nutzsignal unter Verwendung des Transmission Mode 1 (Kap. 4.3.3.1) in Band III durchgeführt.

Tabelle 15: Nutzsignalpegel für die DAB-Untersuchungen

Bezeichnung	Pegelwert
Mindestempfangspegel	14 dB μ V
Mindestempfangspegel + 3 dB	17 dB μ V
Mindestempfangspegel + 12 dB	26 dB μ V

Das Störsignal lässt sich wieder als pulsmodierte Sinusschwingung beschreiben. Die notwendigen Parameter können Tabelle 16 entnommen werden. Die Kanalmittenfrequenz ist identisch mit der Frequenz der im Störsignal enthaltenen Sinusschwingung. Die Pulsamplitude wurde nicht variiert. Das Störsignal wurde durch einen Signalgenerator erzeugt, der nicht mit der Nutzsignalquelle gekoppelt oder synchronisiert ist. Ein DAB-Transmission-Frame besitzt bei dem untersuchten DAB-Nutzsignal eine zeitliche Ausdehnung von 96 ms (Kap. 4.3.3.1). Über die Pulswiederholrate und die Pulsweite lässt sich die zeitliche Überdeckung eines Transmission-Frames und des Störsignals bestimmen.

Tabelle 16: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die DAB-Untersuchungen

Parameter	Werte		
Pulswiederholfrequenz	10 kHz	100 kHz	1000 kHz
Pulsweite	200 ns		
Zeitliche Überdeckung eines Frames	0,2 %	2 %	20 %
Pulsamplitude	65 dB μ V		

Als Anzeigewerte ergeben sich auf einem Funkstörmessempfänger bei der festgelegten Messbandbreite (BW) von 1 MHz die in nachfolgender Tabelle 17 präsentierten Anzeigewerte der Detektoren. Der aufgelistete Grenzwert ist der derzeit bei der Daimler AG gültige Störaussendungsgrenzwert, der empirisch ermittelt wurde und als notwendig erachtet wird. Die Bandbreite eines DAB-Empfängers entspricht 1,536 MHz.

Der Zusammenhang zwischen Störsignal und wahrnehmbarer Empfangsbeeinträchtigung wurde mit dem PEAQ-Verfahren untersucht. Das Störsignal wurde schrittweise bedämpft und jeweils die Audioqualität instrumentell bewertet. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden hinsichtlich der verschiedenen Störsignale und der charakteristischen Eigenschaften bei den unterschiedlichen Empfangspegeln in den folgenden Abschnitten ausgewertet und dargestellt. Für die oben beschriebenen Störsignale ergeben sich bei einem DAB-Nutzsignalpegel von 3 dB über dem Mindestempfangspegel die in Abbildung 59 dargestellten Audioqualitätswerte.

Tabelle 17: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die DAB-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte BW = 1 MHz			Grenzwerte BW = 1 MHz		Überschreitung BW = 1 MHz	
	PK	AV	RMS	PK	AV	PK	AV
10 kHz Pulsrate	51	12	29	20	10	31	2
100 kHz Pulsrate	51	31	39	20	10	31	21
1000 kHz Pulsrate	51	50	50	20	10	31	40

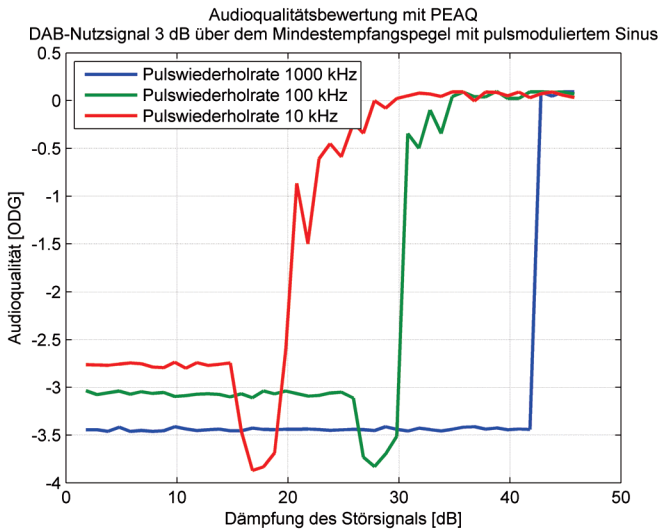


Abbildung 59: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus bei verschiedenen Pulswiederholraten als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals

Die in Abbildung 59 gezeigten Kurven stellen die Audioqualität des DAB-Empfangssignals unter Einfluss der bereits beschriebenen Störsignale in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals dar. Für eine geringe Dämpfung der Störsignale liefert der DAB-Empfänger kein Audiosignal an seinem Ausgang. Er schaltet stumm, da es ihm nicht möglich ist das empfangene Signal zu demodulieren. Für

das Störsignal mit einer Pulswiederholrate von 10 kHz in Abbildung 59 erstreckt sich dieser Bereich, in dem kein Audiosignal ausgegeben wird, bis zu einem Dämpfungswert von 15 dB. Dieser Bereich wird von PEAQ als weniger schlecht bewertet als eine teilweise bzw. fehlerhafte Demodulierung, wie sie bei dem beispielhaft genannten Signal zwischen 15 dB und 25 dB Dämpfung vorherrscht. Diese Teildemodulation findet erst bei einer hinreichend hohen Dämpfung, die vom Störsignal und dem untersuchten Nutzsignalpegel abhängig ist, statt. Bei einer bruchstückhaften Teildemodulation wird die Audioqualität durch das PEAQ-Verfahren am schlechtesten bewertet. Anschließend an den Bereich, in dem eine Teildemodulation stattfindet, steigt die Audioqualität des Empfangssignals bei geringfügiger Erhöhung der Dämpfung des Störsignals deutlich an. Mit zunehmender Dämpfung werden die wahrnehmbaren Empfangsbeeinträchtigungen dann geringer, bis die Wiedergabe eines ungestörten Empfangssignals möglich ist. Die empfangenen Nutzsignalinhalte sind für DAB-Rundfunkübertragungen im fehlerfreien Fall nahezu identisch mit den gesendeten Nutzsignalinhalten. Abweichungen entstehen durch die nicht ideale und rauschbehaftete Audioaufzeichnung und Digitalisierung der analogen Audiosignale am DAB-Rundfunkempfänger im AVP. Abhilfe würde lediglich eine digitale Schnittstelle zu den empfangenen und demodulierten Audiosignalen bringen, die jedoch bei einem Fahrzeugrundfunkempfänger so nicht vorhanden ist.

In Abbildung 59 wurde dasselbe DAB-Nutzsignal mit verschiedenen Störsignalen beaufschlagt. Die Störsignale, die sich nur bzgl. der Pulswiederholfrequenzen unterscheiden, verursachen unterschiedlich starke Empfangsbeeinträchtigungen. Störsignale mit höheren Pulswiederholfrequenzen, also häufiger auftretenden Pulsen, wirken sich negativer aus und führen zu schwerwiegenderen Empfangsbeeinträchtigungen als Pulse, die mit geringen Pulswiederholraten auftreten. Dies wird durch die unterschiedlich hohe Dämpfung, die für ein störungsfreies Empfangssignal aufgebracht werden muss, deutlich.

Mit zunehmender Pulswiederholrate ändert sich der Kurvenverlauf qualitativ. Während für die untersuchte geringste Pulswiederholrate von 10 kHz ein größerer Übergangsbereich von Dämpfungswerten zwischen einer schlechten und guten Audioqualitätsbewertung festgestellt werden konnte, ist für höhere Pulswiederholraten der Übergangsbereich deutlich kleiner. Damit sind für Pulse mit schnellen Pulswiederholraten seltener wahrnehmbare Empfangsbeeinträchtigungen zu erwarten. Das Empfangssignal bewegt sich dann nur zwischen den Extremen kein Empfang (Empfänger schaltet stumm) und fehlerfreiem Empfang ohne wahrnehmbare Beeinflussungen.

Die Auswertung derselben Untersuchung erfolgt zusätzlich bezüglich des Nutzsignalempfangspegels. Dazu werden die Störsignale mit der geringsten und höchsten Pulswiederholrate im Detail betrachtet. Hierzu sind die Ergebnisse der Audiobewertungen der Störsignale in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt. Es bestätigen sich die zuvor abgeleiteten Erkenntnisse auch durch die neu hinzugekommenen Kurven.

Für geringe Pulswiederholraten (Abbildung 60) ergibt sich bereits bei einem Nutzsignalempfangspegel von 3 dB über dem Mindestempfangspegel eine deutliche Verminderung der notwendigen Dämpfung des Störsignals um ca. 8 dB im Vergleich zum Mindestempfangspegel. Diese Verbesserung der wahrgenommenen Empfangsbeeinträchtigung korreliert in diesem Fall nicht mit der Änderung des Empfangspegels, die lediglich 3 dB beträgt (vgl. grüne und blaue Kurve in Abbildung 60). Bei weiterer Erhöhung des Empfangspegels verhält sich die notwendige Stördämpfung proportional zur Änderung des Empfangspegels (vgl. rote und grüne Kurve in Abbildung 60).

In Abbildung 61 sind die Empfangsbeeinträchtigungen durch das Störsignal mit einer Pulswiederholrate von 1000 kHz für drei verschiedene Nutzsignalempfangspegel dargestellt. In diesem Fall ist eine Korrelation zwischen der Verbesserung des Nutzsignalempfangspegels und der Verminderung der benötigten Dämpfung des Störsignals deutlich zu erkennen. Ein Verhalten wie für die Pulswiederholrate von 10 kHz konnte nicht festgestellt werden.

Bei den zuvor durchgeführten DAB-Untersuchungen mittels instrumenteller Audiobewertung durch das PEAQ-Verfahren ergeben sich passend zu den Audioqualitätswerten die nachfolgend aufgelisteten subjektiven Beschreibungen des Audiosignals:

- ODG > -3: starke Störungen, Empfänger schaltet nicht mehr stumm
- ODG > -2: starke Störungen
- ODG > -1: gluckern hörbar
- ODG > -0,5: Störung noch hörbar
- ODG > -0,25: keine/vernachlässigbare Störung wahrnehmbar

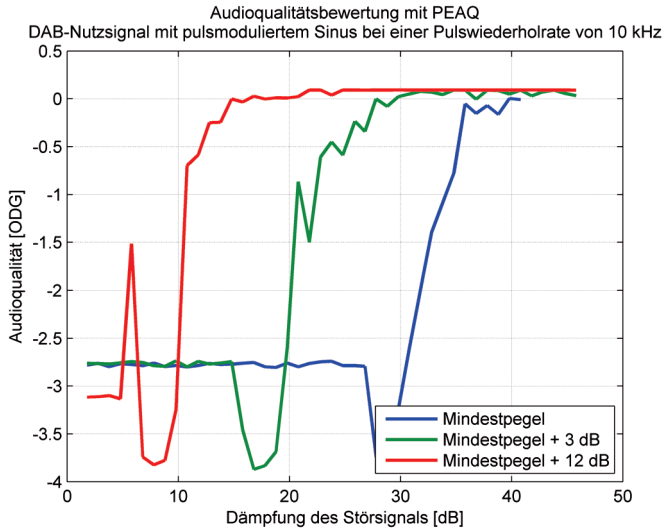


Abbildung 60: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus mit 10 kHz bei verschiedenen Empfangspegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals

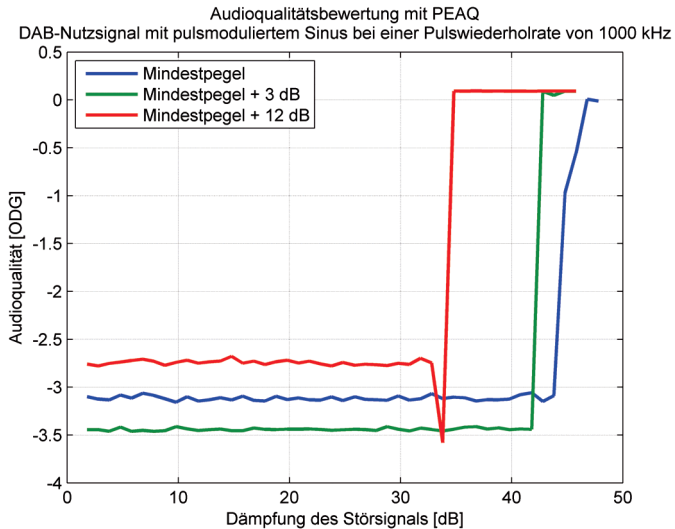


Abbildung 61: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus mit 1000 kHz bei verschiedenen Empfangspegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals

6.2.1.2.2 DVB-T

Die Untersuchungen mit DVB-T-Fernsehsignalen und künstlich erzeugten Störsignalen wurden im Band III unter Verwendung einer 16 QAM und einer 64 QAM des DVB-T-Signals durchgeführt. Die Datenrate wurde jeweils auf die verwendete Modulation angepasst. Alle anderen Parameter bleiben unverändert. Als Empfangspegel wurden wie bei den DAB-Untersuchungen jeweils drei verschiedene Pegel untersucht: Mindestempfangspegel, 3 dB über dem Mindestempfangspegel und 12 dB über dem Mindestempfangspegel. Der Mindestempfangspegel liegt bei dem untersuchten 16 QAM-Signal 5 dB unterhalb des Mindestempfangspegels des 64 QAM-Signal.

Als Störsignale wurden ein Sinussignal in der Kanalmitte sowie pulsmodierte sinusförmige Signale mit den in Tabelle 18 aufgelisteten Parametern untersucht. Der zur Störleistung äquivalente Spannungspegel in einem 50-Ohm-System wurde für die Kanalbandbreite von 7 MHz ermittelt. Aufgrund der Pulsweite ist die Amplitude des Spektrums der Störsignale nicht konstant über den gesamten Kanal.

Tabelle 18: Parameter der Störsignale für die DVB-T-Untersuchungen

Parameter	Werte				
Pulswiederholfrequenz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	2 MHz	Sinus
Pulsweite	200 ns				
Pulsamplitude	85 dB μ V				
Störleistung (7 MHz) äquiv. Spannungspegel	59 dB μ V	68 dB μ V	77 dB μ V	80 dB μ V	85 dB μ V

Die Bewertung des Störsignals mit einem Funkstörmessempegel findet nach der hausinternen Norm der Daimler AG mit einer Bandbreite von 1 MHz durch den Spitzenwert- und Mittelwertdetektor statt. Eine Bewertung mit der TV-Kanalbandbreite ist bei Funkstörmessempegeln nach [CISPR 16-1-1] nicht vorgesehen, die maximal zur Verfügung stehende Bandbreite ist 1 MHz. Je geringer die Bandbreite gewählt wird, desto empfindlicher kann gemessen werden, jedoch ist für einen großen Frequenzbereich, wie er für DVB-T verwendet wird, aus zeitlichen Gründen eine geringe Bandbreite nicht das Optimum, bezüglich Bandbreite und Prüfdauer. Für die untersuchten Störsignale ergeben sich damit die in

Abbildung 62 gezeigten Messkurven für den Mittelwertdetektor bei einer Schrittweite von 500 kHz. Die Anzeigewerte sind über die Kanalbandbreite nicht konstant. Der derzeit gültige Grenzwert für Störaussendungen eines Kraftfahrzeugs der Daimler AG ist zusätzlich in Abbildung 62 eingezeichnet.

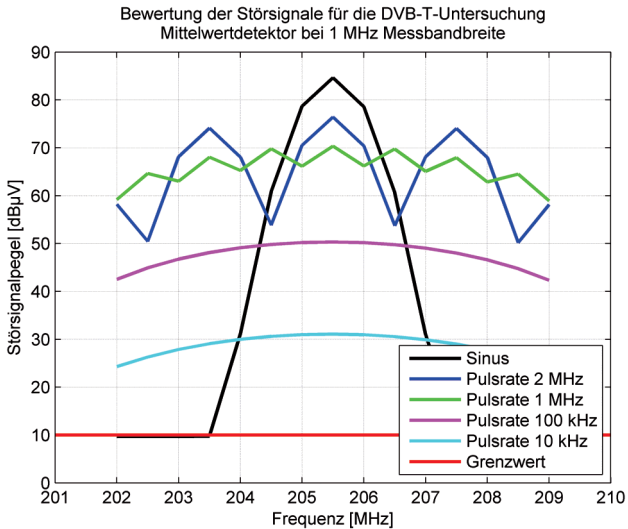


Abbildung 62: Bewertung der Störsignale für die DVB-T-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempefänger mit dem Mittelwertdetektor bei 1 MHz Bandbreite

Die notwendigen Dämpfungswerte für die Störsignale wurden jeweils über eine subjektive Bewertung der Empfangsqualität ermittelt. Fehler im Bild können bei DVB-T-Empfangssignalen und geeigneten Nutzsignalinhalten durch eine Testperson sehr effizient bewertet werden. Hierbei wurde eine Beobachtungszeit von 30 Sekunden verwendet und auf das Auftreten von Blocking-Artefakten hin bewertet. Die in Tabelle 19 angegebenen Dämpfungswerte ermöglichen bei Beaufschlagung mit den zuvor beschriebenen Störsignalen einen komplett störungsfreien Empfang.

Aus den Ergebnissen in Tabelle 19 ist zu entnehmen, dass die Empfangsbeeinträchtigungen und damit die notwendige Dämpfung der Störsignale für 16 QAM und 64 QAM-DVB-T-Signale kaum Unterschiede aufweisen. Lediglich bei Pulsen mit geringen Wiederholraten ist das 64 QAM-Signal tendenziell empfindlicher. Die Ursache dafür ist in der Pegeldifferenz des Mindestempfangspegels und den Unterschieden in der Datenrate zu sehen. Das 64 QAM-Signal benötigt einen höheren Mindestempfangspegel und verwendet eine nur geringfügig höhere Datenrate. Im Weiteren werden die Untersuchungen nur noch mit 64 QAM-DVB-T-Signalen durchgeführt.

Tabelle 19: Notwendige Dämpfung der Störsignale in dB für ein störungsfreies Bild bei verschiedenen Nutzsignalempfangspegeln bei 16 QAM und 64 QAM-DVB-T-Signalen.

	16 QAM Min	64 QAM Min	16 QAM Min + 3dB	64 QAM Min + 3dB	16 QAM Min + 12dB	64 QAM Min + 12dB
10 kHz	-	52	-	38	-	-
100 KHz	57	56	43	47	25	31
1 MHz	54	62	43	43	30	30
2 MHz	54	55	43	43	31	30
Sinus	58	59	47	45	34	33

6.2.2 Reale Störsignale in Fahrzeugen

In der Praxis treten die zuvor betrachteten künstlichen Störsignale nicht ausschließlich oder nur näherungsweise in diesen Formen auf. Bei einer Störaussendungsprüfung eines Kraftfahrzeugs sind oft mehrere Subsysteme aktiv, die unterschiedliche Arten von Störsignalen erzeugen können. Relevant für die Empfangsbeeinträchtigung ist somit das in Summe an der Fahrzeugantenne anliegende Störsignal bei den relevanten Betriebszuständen.

Eine analytische Beschreibung der Zeitfunktion von realen Störsignalen ist nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Es erfolgt eine abstrakte Beschreibung der Eigenschaften des gemessenen Störsignals unter Zuhilfenahme des Funkstörmessempfängers und des AudioVideoPrüfplatzes.

6.2.2.1 Beispiele für AM-Rundfunk

Zunächst werden exemplarisch verschiedene Störsignale näher betrachtet, welche bei einer Störaussendungsprüfung an der Fahrzeugantenne gemessen und zur genaueren Untersuchung aufgezeichnet werden konnten. Dabei handelt es sich um Störsignale, die schmalbandige und breitbandige Störanteile unterschiedlicher Größe beinhalten. Die verschiedenen Bewertungen der Störsignale wurden damit jeweils auf das identische „Referenz“-Störsignal bezogen.

Zunächst erfolgte eine Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger. Die für diesen Frequenzbereich gültigen Grenzwerte sind neben den Anzeigewerten eines Funkstörmessempfängers in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte			Grenzwerte [CISPR 25]			Grenzwert- überschreitung		
	PK	QP	AV	PK	QP	AV	PK	QP	AV
Störsignal 1	18	10	0	20	7	0	(-2)	3	0
Störsignal 2	25	20	8	20	7	0	5	13	8
Störsignal 3	25	17	15	20	7	0	5	10	15

Die von den Störsignalen 2 und 3 hervorgerufenen Anzeigewerte des Spitzenwertdetektors unterscheiden sich nicht. Das Störsignal 1 besitzt einen um 7 dB geringeren Spitzenwert. Im Allgemeinen weisen hohe Spitzenwertanzeigen und geringe Mittelwertanzeigen des selben Störsignals auf breitbandige Störsignalanteile hin, die im Fahrzeug z. B. durch die Zündanlage, Elektromotoren oder gepulste Leistungsregler entstehen können. Eine größere Abweichung zwischen den Störsignalen kann bei der Bewertung mit dem Quasispitzenwert- und Mittelwertdetektor festgestellt werden. Störsignal 3 weist den höchsten Mittelwertdetektoranzeigewert auf, es besitzt die meisten schmalbandigen Störsignalanteile, die z. B. durch Oszillatoren verursacht werden. Die Grenzwerte aus [CISPR 25] wurden von den Störsignalen bei fast allen Detektorbewertungen überschritten.

Als weiteres Beschreibungsmerkmal dienen die in Abbildung 63 dargestellten APD-Kurven, die die Unterschiede zwischen den einzelnen Störsignalen verdeutlichen. Zusätzlich zu den Messkurven ist das thermische Rauschen des Empfängers eingezeichnet. Die APD-Kurven der Störsignale unterscheiden sich deutlich voneinander, was nach den zuvor beschriebenen Detektoranzeigewerten zu erwarten war. Als weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Störsignale wurden diese als Einhüllende der Zwischenfrequenzspannung im ZeroSpan-Modus mit einem Spektrumanalysator aufgezeichnet. In Abbildung 64 sind die so ermittelten Zeitverläufe dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 s hat die ZeroSpan-Aufzeichnung begonnen, während die Störsignalwiedergabe erst ungefähr 4 s später gestartet wurde. Die Zeitverläufe spiegeln die Amplitudenwahrscheinlichkeitskurven wider. Die Unterschiede der maximal auftretenden Störsignalpegel (Spitzenwerte) und der im Mittel auftretenden Störsignalpegel sind aus den ZeroSpan-Aufzeichnungen deutlich zu erkennen. Auch die Unterschiede bei der Auftrittswahrscheinlichkeit hoher Störsignalpegel sind in Abbildung 64 erkennbar.

Als Beispiel können die Unterschiede bei der Häufigkeit von sehr hohen Pegeln zwischen den Störsignalen 2 und 3 genannt werden.

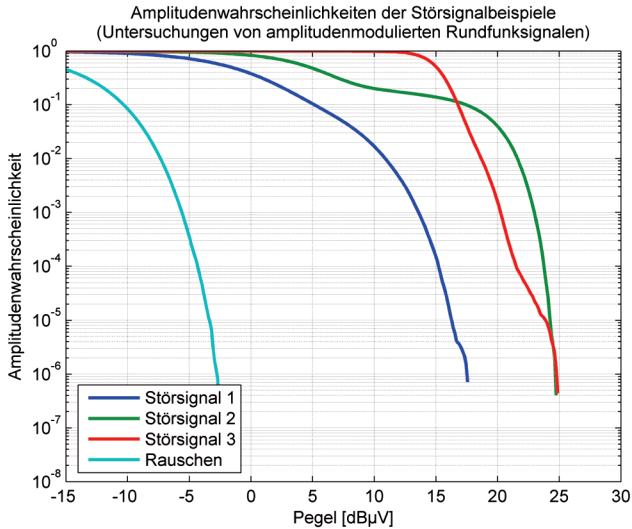


Abbildung 63: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger

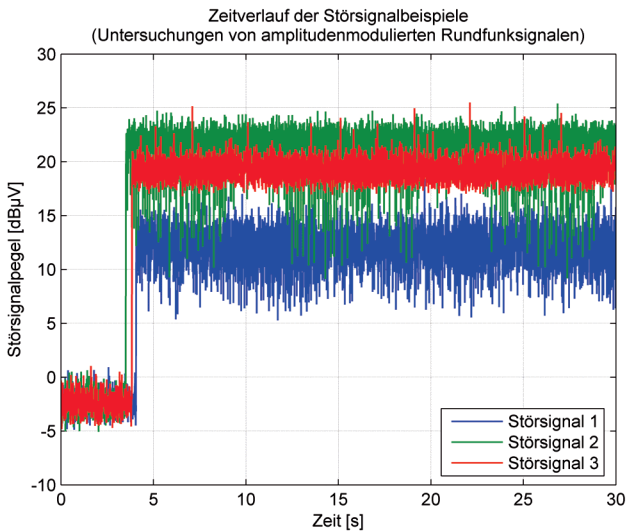


Abbildung 64: Zeitverlauf der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen bei einer ZeroSpan-Messung

Als weiteres Beschreibungsmerkmal der Störsignale wurden mit dem Audio-VideoPrüfplatz die Empfangsbeeinträchtigungen unter Zuhilfenahme der PESQ-Bewertung abgeschätzt. In Abbildung 65 ist die Empfangsqualität für ein amplitudenmoduliertes Rundfunksprachsignal (Titel 53, Tabelle 30) bei zwei verschiedenen Empfangspegeln, die sich um 10 dB unterscheiden, dargestellt. Ohne zusätzliche Dämpfung des Störsignals ist jeweils mit einer schlechten Empfangsqualität zu rechnen. Erst ab einer hinreichend hohen Dämpfung des Störsignals kann ein Empfangssignal mit einer guten bis ausreichenden Empfangsqualität erzielt werden. Abhängig vom Empfangspegel und somit vom Abstand des Nutzsignals zum Rauschen des Empfängers ergibt sich der Wert der erreichbaren Bestbewertung, an den sich die PESQ-Bewertungen mit zunehmender Dämpfung des Störsignals asymptotisch annähern.

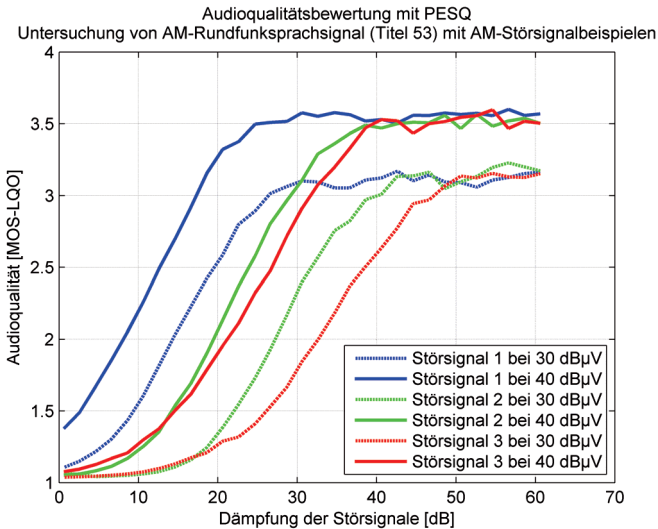


Abbildung 65: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Rundfunksprachsignals (Titel 53) bei je zwei Nutzsignalpegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignale

6.2.2.2 Beispiele für FM-Rundfunk

Als Beispiele für Empfangsbeeinträchtigungen beim Empfang frequenzmodulierter Rundfunksignale wurden zwei verschiedene Störsignale untersucht. Die Störsignale wurden an Fahrzeugen mit den fahrzeugeigenen Antennen im UKW-Band gemessen und bewertet. In Tabelle 21 ist die Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger und den verschiedenen Detektoren aufgelistet.

Aus Tabelle 21 ist zu erkennen, dass das Störsignal 1 lediglich beim Spitzenwert eine Überschreitung des gültigen Grenzwertes aufweist, während beim Störsignal 2 alle Grenzwerte überschritten werden. Beide Störsignale weisen einen hohen breitbandigen Störsignalanteil auf, was aus den hohen Spitzenwerten und weitaus geringeren Mittelwerten zu erkennen ist. Als typische breitbandige Störquellen sind auch in diesem Frequenzbereich die Zündanlage, Elektromotoren, ... zu nennen. Wobei im Störsignal 2 zusätzlich schmalbandige, sinusförmige Störsignalanteile enthalten sind, was durch den höheren Mittelwert angezeigt wird.

Tabelle 21: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die FM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte			Grenzwerte [CISPR 25]			Grenzwert- überschreitung		
	PK	QP	AV	PK	QP	AV	PK	QP	AV
Störsignal 1	32	12	-1	26	13	6	6	(-1)	(-7)
Störsignal 2	40	24	8	26	13	6	14	11	2

Aus den Unterschieden in der Bewertung durch die verschiedenen Detektoren und die in Abbildung 66 gezeigten APD-Messungen werden die Unterschiede der Signalverläufe und Auftrittswahrscheinlichkeiten der Störsignalpegel zwischen den beiden Störsignalen deutlich.

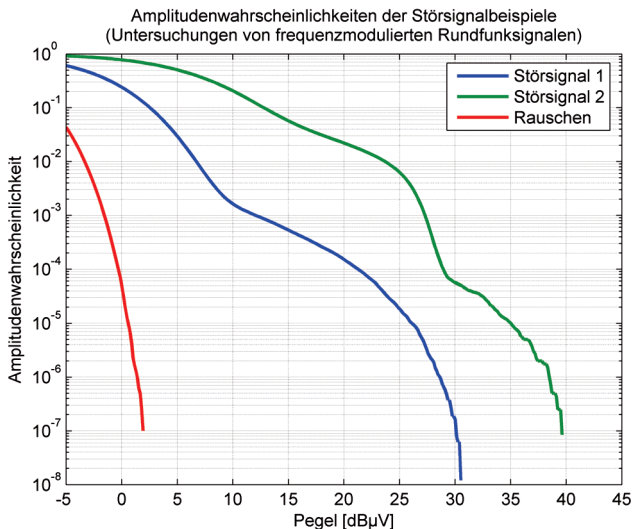


Abbildung 66: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die FM-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger

Für beide Störsignale wurden Audioqualitätsbewertungen in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals durchgeführt, die in Abbildung 67 dargestellt sind. Für das Störsignal 1 wurden zwei sehr geringe Empfangspegel für die Untersuchung zugrunde gelegt. Dabei ist festzustellen, dass selbst bei hohen Dämpfungswerten durch den Einfluss des Rauschens die maximal mögliche Audioqualität von PEAQ nicht erreicht werden kann. In diesem Fall kann der Dämpfungswert an der Knickstelle der Kurve abgelesen werden, an der mit zunehmender Dämpfung keine nennenswerte Verbesserung der Audioqualität eintritt.

Das Störsignal 2 wurde bei einem deutlich höheren Empfangspegel untersucht. Damit werden auch die Bewertungsergebnisse bei hinreichend hoher Dämpfung deutlich besser, da der Einfluss durch das Rauschen geringer ist. Aus diesen beispielhaften Untersuchungen wird zusätzlich zu den unterschiedlichen Störsignalen der Einfluss des Nutzsignalpegels auf die Empfangsqualität deutlich.

Die zur Sicherstellung einer bestimmten Audioqualität notwendige Dämpfung des Störsignals kann für die genannten Randbedingungen und untersuchten Störsignale aus Abbildung 67 entnommen werden. Für die einzelnen Fälle unterscheiden sich die Kurvenverläufe deutlich voneinander.

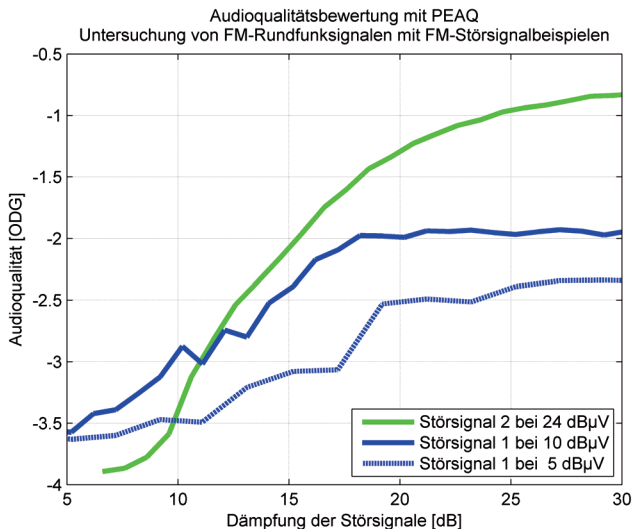


Abbildung 67: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ von FM-Rundfunksignalen bei unterschiedlichen Nutzsignalpegeln in Abhängigkeit der Dämpfung der Störsignale

6.2.2.3 Beispiele für DAB

In diesem Kapitel werden Ergebnisse zu Untersuchungen von Empfangsbeeinträchtigungen beim DAB-Empfang vorgestellt. Die drei verschiedenen Störsignale wurden jeweils bei Störaussendungsprüfungen von Kraftfahrzeugen an den fahrzeugeigenen DAB-Antennen aufgezeichnet. Zur Untersuchung und dem Vergleich der Prüfmethode wurde eine originalgetreue Wiedergabe dieser Störsignale untersucht.

Das Störsignal 1 stammt aus einer Störaussendungsprüfung, bei der sich das Fahrzeug in einem definierten Betriebszustand befunden hat. Das an der DAB-Antenne anliegende Störsignal 1 trat so im DAB Band III auf. Am selben Fahrzeug wie zuvor wurde in einem anderen Betriebszustand das Störsignal 2 gemessen und aufgezeichnet. Auch das Störsignal 3 konnte im DAB Band III an einem Fahrzeug gemessen werden. Die Eigenschaften der drei Störsignale wurden zunächst mit einem Funkstörmessempfänger bewertet und in Tabelle 22 aufgelistet. Die Bewertung der Störsignale fand mit dem Spitzenwert-, Mittelwert- und Effektivwertdetektor auf der Kanalmittenfrequenz bei einer Bandbreite von 1 MHz und einer Messzeit von 20 s statt. Der Grenzwert ist der derzeit bei der Daimler AG gültige.

Für das Störsignal 1 wird der Grenzwert jeweils für den Spitzenwertdetektor um 10 dB sowie der des Mittelwertdetektors um 1 dB überschritten, beim Störsignal 2 hingegen für beide Detektoren um mehr als 10 dB. Das letzte Störsignal (Nr. 3) weist den größten Unterschied zwischen Spitzenwert und Mittelwert von ca. 30 dB auf. Die Grenzwertüberschreitung fällt hierbei für den Spitzenwert am drastischsten aus, während der Mittelwert-Grenzwert unterschritten wurde. Alle Störsignale weisen einen hohen breitbandigen Störsignalanteil auf, der z. B. durch Elektromotoren, die Zündanlage oder ähnliche Subsysteme verursacht werden kann. Der hohe Mittelwert beim Störsignal 2 wird durch schmalbandige, sinusförmige Störsignale verursacht, wie sie durch Clock-Signale verursacht werden können.

Tabelle 22: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DAB-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte			Grenzwert		Grenzwert- überschreitung	
	PK	AV	RMS	PK	AV	PK	AV
Störsignal 1	30	11	12	20	10	10	1
Störsignal 2	35	21	22	20	10	15	11
Störsignal 3	36	5	6	20	10	16	(-5)

Zur weiteren Beschreibung der Störsignale wurden jeweils APD-Messungen durchgeführt. In Abbildung 68 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt. Die Störsignale 1 und 2 zeigen ein ähnliches Verhalten, jedoch unterschiedliche maximal auftretende Pegel. Das dritte Störsignal unterscheidet sich durch seinen pulshaften Charakter deutlich von den anderen beiden Störsignalen.

Diese Pulshaftigkeit kann in einer Zero-Span-Messung mit einem Spektrumanalysator am Zeitverlauf des Störsignals 3 verdeutlicht werden. Dargestellt ist der Zeitverlauf von Störsignal 3 in Abbildung 69. Nach Beginn der Störsignal- und Nutzsignalwiedergabe wurde erst verzögert die Audioaufzeichnung und Audibewertung gestartet. Diese Aufnahmeverzögerung ermöglicht dem DAB-Empfänger, sich mit dem Nutzsignal zu synchronisieren. Eine Audioaufnahmeverzögerung von 8 s hat sich für den verwendeten DAB-Empfänger als nützlich erwiesen.

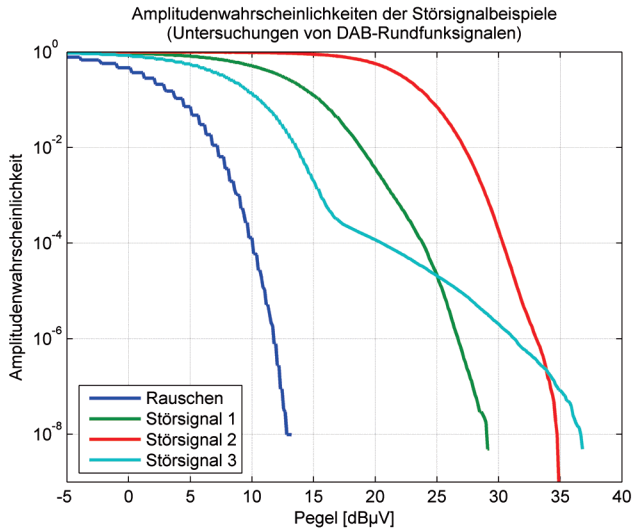


Abbildung 68: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DAB-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger

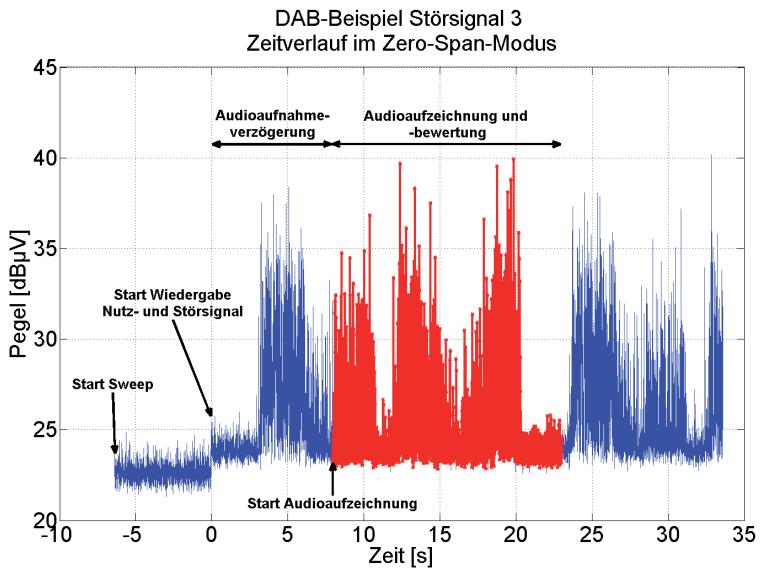


Abbildung 69: Zeitverlauf des Störsignalbeispiels Nr. 3 für die DAB-Untersuchungen bei einer ZeroSpan-Messung

Zur Untersuchung der Empfangsbeeinflussungen von DAB-Rundfunksignalen durch die Störsignale wurde der AudioVideoPrüfplatz verwendet. Das DAB-Nutzsignal wurde mit dem für Band III vorgesehenen Transmission Mode 1 erzeugt und die Untersuchungen bei verschiedenen Empfangspegeln durchgeführt. Zunächst wurde beim Mindestempfangspegel die Empfangsqualität mit dem PEAQ-Verfahren in Abhängigkeit der iterativ erhöhten Dämpfung des Störsignals ermittelt. In Tabelle 23 sind die Stördämpfungswerte aufgelistet, bei denen ein ODG-Wert $\geq -0,25$ erreicht wird und somit Empfangsbeeinträchtigungen auf Grund der Störsignale ausgeschlossen werden können. Die Dämpfungswerte für die Störsignale wurden jeweils bei sieben verschiedenen Empfangspegeln beginnend mit dem Mindestempfangspegel (Min) und bei schrittweise höheren Empfangspegeln ermittelt.

Tabelle 23: Notwendige Dämpfung der DAB-Störsignalbeispiele bei verschiedenen Nutzsignalpegeln für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PEAQ. Angaben in dB.

Empfangspegel	Min	Min+1	Min+2	Min+3	Min+4	Min+5	Min+10
Störsignal 1	17	15	13	10	9	8	0
Störsignal 2	23	20	18	16	14	13	7
Störsignal 3	13	9	7	5	3	0	0

Für das in diesem Beispiel untersuchte Störsignal 2 ist selbst bei höheren Empfangspegeln eine Stördämpfung um mehrere dB notwendig. Bei den anderen beiden untersuchten Störsignalen sind geringere Dämpfungswerte hinreichend. Trotz der erheblichen Grenzwertüberschreitung bei Bewertung mit dem Spitzenwertdetektor wurden beim Störsignal 3 durch die Audibewertungsmethode verhältnismäßig geringe Stördämpfungswerte ermittelt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit der Empfangsbeeinträchtigungen von hohen Anzeigewerten des Mittelwertdetektors. Die Auswirkungen der Auftrittshäufigkeit von Störsignalen wurde bereits in Kapitel 6.2.1.2.1 beschrieben.

6.2.2.4 Beispiele DVB-T

Zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen von DVB-T-Signalen wurden an Fahrzeugen in diversen Betriebszuständen Messungen durchgeführt. Als Beispiel für die Empfangsbeeinträchtigungen, die beim DVB-T-Empfang auftreten können, wurde die Störaussendung eines Gesamtfahrzeugs mit laufendem Verbrennungsmotor und den dazu notwendigen aktiven elektrischen Subsystemen untersucht.

Beide Störsignale wurden im selben Betriebszustand gemessen, sie traten jedoch bei unterschiedlichen Frequenzen auf (Störsignal 1 in Band III und Störsignal 2 in Band IV).

Die Anzeigewerte, die mit einem Funkstörmessempfänger ermittelt wurden, sind in Tabelle 24 dargestellt. Die eingestellte Bandbreite beim Funkstörmessempfänger betrug jeweils 1 MHz, wie in der hausinternen Norm der Daimler AG vorgesehen ist. Um alle Störsignale innerhalb der Kanalbandbreite zu erfassen, wurde an mehreren Frequenzpunkten innerhalb des Kanals gemessen.

Die in Tabelle 24 dargestellten Werte bilden die Spitzen- bzw. Mittelwerte aus den verschiedenen Messwerten, die in der Kanalbandbreite gemessen wurden. Als Grenzwert wurde wieder der bei der Daimler AG gültige Störaussendungsgrenzwert verwendet. Beide Störsignale weisen eine sehr große Überschreitung des Spitzenwertgrenzwertes auf, während der Mittelwertgrenzwert nur leicht überschritten wurde. Der Unterschied der beiden Störsignale liegt hauptsächlich bei der Bewertung mit dem Mittelwertdetektor, die beim Störsignal 2 höher ausfällt, obwohl der Spitzenwert geringer ist. Die Detektorwerte weisen auf breitbandige Störsignalanteile hin, wie sie von verschiedenen Subsystemen wie der Zündanlage, Elektromotoren oder gepulsten Leistungsreglern, die zum Betrieb des Fahrzeugs notwendig sind, verursacht werden.

Tabelle 24: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DVB-T-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.

Störsignale	Messwerte			Grenzwerte		Grenzwert- überschreitung	
	PK	AV	RMS	PK	AV	PK	AV
Störsignal 1	59	13	15	25	10	34	3
Störsignal 2	49	18	19	25	10	24	8

Die Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung, wie sie jeweils in der Kanalmitte auftritt, kann Abbildung 70 entnommen werden. Die Messkurven weisen jeweils einen deutlichen Sattelpunkt auf, bis zu dem das Verhalten ähnlich dem des Gaußschen Rauschens ist. Das spätere Verhalten weist auf eine große Pulshaftigkeit des Störsignals hin, bei dem sehr hohe Amplitudenwerte erreicht werden.

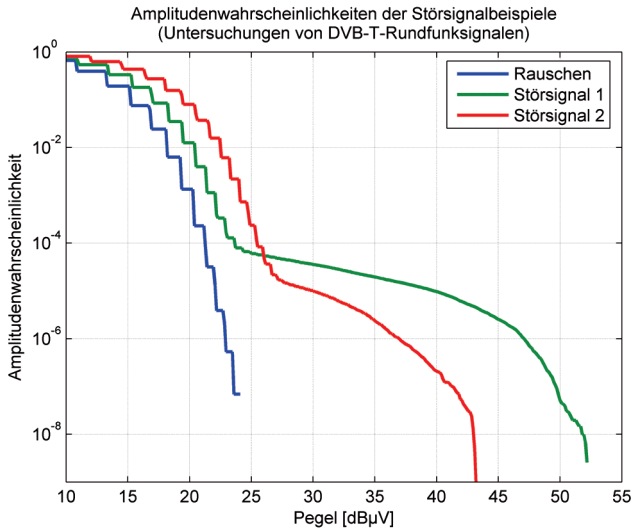


Abbildung 70: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DVB-T-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger

Für die Bewertung der Empfangsbeeinträchtigungen wurde der AudioVideo-Prüfplatz verwendet. Die Bewertung des Fernsehsignals wurde durch eine Testperson durchgeführt. Für die Angabe „fehlerfreies Bild“ sind in einem Beobachtungszeitraum von 30 s keine Bildfehler (Artefakte oder Bildausfall) aufgetreten. Als Nutzsignal wurde jeweils ein DVB-T-Signal erzeugt, das mit einer 64 QAM moduliert wurde. Als Guardintervall wurde der gebräuchliche Wert $\frac{1}{4}$ verwendet. Als Signalinhalt wurden Filmszenen mit schnellen sowie langsamen Bewegungen und sich in der Farbe ändernden Bildinhalten gewählt. Bei der Untersuchung der Empfangsbeeinträchtigungen haben sich trotz der hohen Grenzwertüberschreitungen des Spitzenwertmessergebnisses relativ geringe Werte für die benötigte Dämpfung der Störsignale ergeben. In Tabelle 25 sind die notwendigen Dämpfungswerte der Störsignale für unterschiedliche Empfangspegel aufgelistet.

Tabelle 25: Notwendige Dämpfung der DVB-T-Störsignalbeispiele bei verschiedenen Nutzsignalpegeln für fehlerfreien Empfang. Angaben in dB.

Empfangspegel	Min	Min+1	Min+2	Min+3	Min+6	Min+10
Störsignal 1	14	10	10	9	3	0
Störsignal 2	20	17	14	11	7	1

6.3 Vergleich der Methoden und Ergebnisse für digitalen Rundfunk

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Beispiele haben zum Teil erhebliche Unterschiede in der Bewertung durch einen Funkstörmessempfänger und die neue Bewertungsmethode mit dem AudioVideoPrüfplatz aufgezeigt. Die Zusammenhänge der Empfangsbeeinflussung und Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger werden in diesem Kapitel für digitale Rundfunkdienste gegenübergestellt. Um die Abhängigkeiten der Detektoranzeigewerte und der benötigten Stördämpfungswerte für einen störungsfreien Empfang zu vergleichen, werden diese jetzt als Scatter-Plots dargestellt. Der Scatter-Plot wird in dieser Arbeit als geeignetes Werkzeug zur übersichtlichen, grafischen Darstellung der Störsignalbewertungen neu eingeführt. Er bietet die Möglichkeit eine Vielzahl an Messungen, die jeweils durch zwei Detektorwerte (gleich ein Punkt im Scatter-Plot) und die ermittelte Störsignaldämpfung, die der Verschiebung des Punktes entspricht, übersichtlich zu visualisieren. Auf eine nähere Beschreibung der jeweiligen Störsignale, abgesehen von den Detektoranzeigewerten, wird verzichtet. Es sollen die Unterschiede in den Bewertungsmethoden und die daraus resultierenden Möglichkeiten aufgezeigt werden. Die Schwierigkeiten bei der Definition von Grenzwerten können selbst mit wenigen unterschiedlichen Störsignalen deutlich gemacht werden.

In den Scatter-Plots wird jeder Punkt durch die Anzeigewerte von zwei verschiedenen Detektoren beschrieben. Die ursprünglichen Störsignale werden so jeweils durch diese Detektorbewertung als mit „*“ markierter Punkt im Scatter-Plot dargestellt. Für dieses Störsignal wurde die notwendige Stördämpfung unter Verwendung des AudioVideoPrüfplatzes ermittelt. Wenn diese Dämpfung dann auf das Störsignal angewandt wird, ergibt sich bei einer Bewertung mit einem fiktiven, rauschfreien Detektor der zweite Punkt, der mit „o“ markiert ist. Die beiden zusammengehörenden Punkte, die das ursprüngliche und zugehörige bedämpfte Störsignal beschreiben, sind jeweils über eine Linie miteinander verbunden. In Realität sind die Anzeigeeigenschaften der Detektoren in der Nähe des Rauschens zu berücksichtigen. Untersuchungen hierzu wurden bereits in Kapitel 3.2.3 vorgestellt.

Informativ sind die derzeit bei der Daimler AG gültigen Störaussendungsgrenzwerte für Gesamtfahrzeug-Störaussendungsprüfungen eingezeichnet. Die Darstellung vieler Messwerte in einem solchen Scatter-Plot kann als Hilfsmittel zur Gestaltung neuer Grenzwerte bzw. Überprüfung bestehender Grenzwerte eingesetzt werden. Als zusätzlichen Bereich wurden die Anzeigeeigenschaften der Detektoren und die damit verbundenen nicht möglichen Bereiche eingezeichnet. Eine weitere Einschränkung stellt das Eigenrauschen von realisierbaren Detektorschaltungen dar. Daher ist der durchschnittliche Rauschpegel eines aktuellen Funkstörmessempfängers unter Verwendung seines eingebauten Vorverstärkers ebenfalls eingezeichnet. Damit ergeben sich die in Abbildung 71 schematisch dargestellten und entsprechend beschrifteten Bereiche.

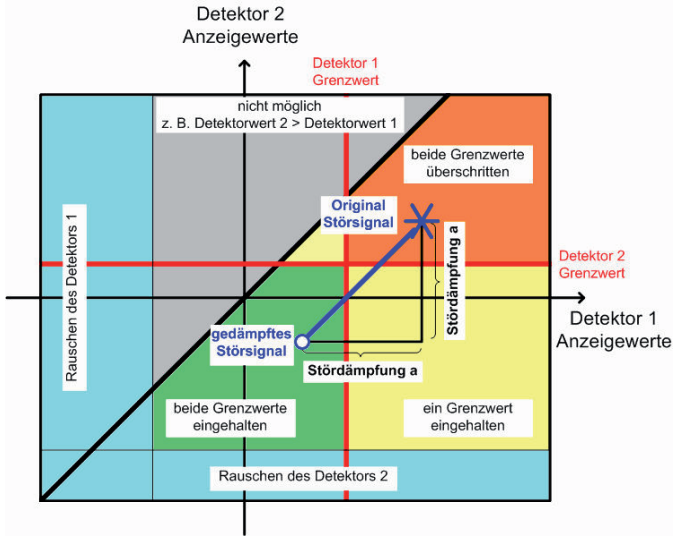


Abbildung 71: Schematische Darstellung eines Scatter-Plots zur Gegenüberstellung von zwei Detektoranzeigewerten und der ermittelten Stördämpfung

6.3.1.1 DAB

Zunächst werden die für DAB gängigen Detektorbewertungen (Spitzenwert als Abszisse und Mittelwert als Ordinate) für unterschiedliche Störsignale gegenüber gestellt. Der entsprechende Scatter-Plot ist zunächst für den Mindestempfangspegel des DAB-Empfängers in Abbildung 72 dargestellt.

Bei den betrachteten Störsignalen wurden zumeist beide Grenzwerte oder zumindest der Spitzenwertgrenzwert überschritten. Nach Umsetzung der ermittelten Stördämpfung, die für einen störungsfreien Empfang notwendig ist, wird der Mittelwertgrenzwert voraussichtlich eingehalten, jedoch der Grenzwert für den Spitzenwertdetektor noch verletzt. Die fiktiven Detektoranzeigewerte befinden sich unterhalb oder am Rauschpegel des Funkstörmessempfängers und können somit praktisch nicht erfasst werden bzw. der Nachweis für eine erfolgreiche Entstörung nicht oder nur schwer erbracht werden. Bei realen Detektorbewertungen muss der Einfluss des Rauschens in Betracht gezogen werden; siehe Kapitel 3.2.3.

Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge haben Gültigkeit für Empfangsbeeinträchtigungen von DAB-Rundfunksignalen am Mindestempfangspegel des DAB-Empfängers. Für einen um 3 dB höheren Nutzsignalempfangspegel ergibt sich der in Abbildung 73 dargestellte Scatter-Plot. Dabei sind die Ausgangspunkte des ursprünglichen Störsignals identisch, jedoch unterscheidet sich die ermittelte Störsignaldämpfung für störungsfreien Empfang auf Grund des erhöhten Nutzsignalempfangspegels.

Bis auf einige Ausnahmen können die bedämpften Störsignale jetzt durch Messungen mit einem Funkstörmessempfänger beschrieben werden. Sie befinden sich über dem Rauschpegel des Funkstörmessempfängers. Abhängig vom Störsignal ist eine Einhaltung beider Grenzwerte oder lediglich des Mittelwertgrenzwertes Bedingung zur Vermeidung von Empfangsbeeinträchtigungen bei Betrachtung der fiktiven, rauschfreien Detektoranzeige.

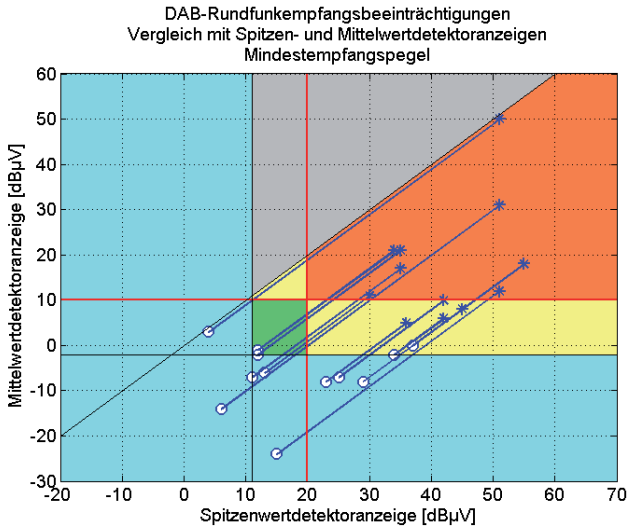


Abbildung 72: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor

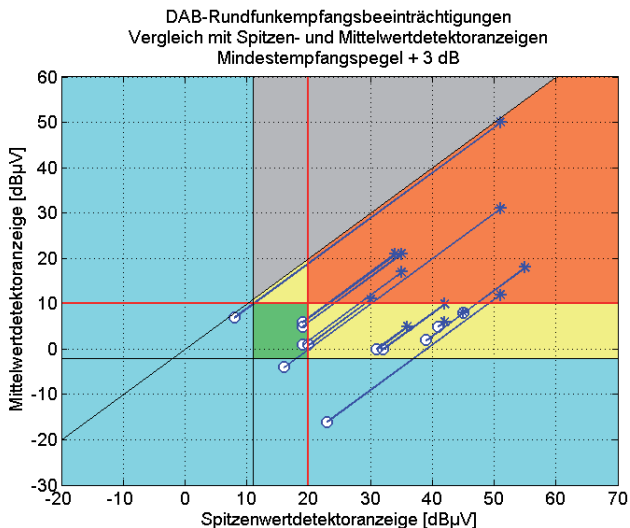


Abbildung 73: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor

In Abbildung 74 sind die Zusammenhänge zwischen der energetischen Bewertung des Effektivwertdetektors und des Spitzenwertdetektors dargestellt. Die Verwendung des Effektivwertdetektors zum Schutz von DAB-Signalen ist bisher unüblich. Auf Basis der hier untersuchten Störsignale ist ein Grenzwert vorstellbar, dessen Einhaltung einen störungsfreien Empfang gerade noch empfangbarer Nutzsingalempfangspegel gewährleistet. Dieser Grenzwert lässt sich jedoch praktisch nicht messtechnisch überprüfen oder einhalten, da er sich unterhalb des Rauschpegels eines Funkstörmesempfängers befindet.

Für einen geringfügig höheren Empfangspegel, wie in Abbildung 75 dargestellt, könnte der Rauschpegel des Funkstörmesempfängers als Grenzwert in Frage kommen. Für einzelne Störsignale, die mit Stördämpfung deutlich über dem Grenzwert liegen, bedeutet die strikte Grenzwertbetrachtung eine Übererbstörung. Dies ist bereits bei den wenigen untersuchten Störsignalen dadurch ersichtlich, dass sich die fiktiven Detektoranzeigewerte des Effektivwertdetektors für den störungsfreien Fall um bis zu 10 dB unterscheiden.

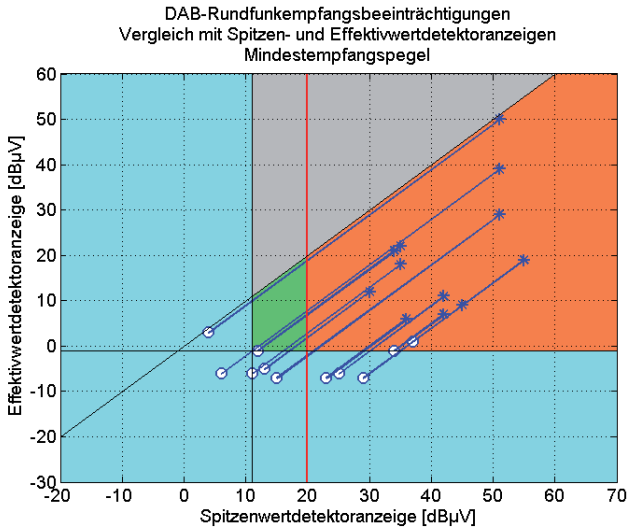


Abbildung 74: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor

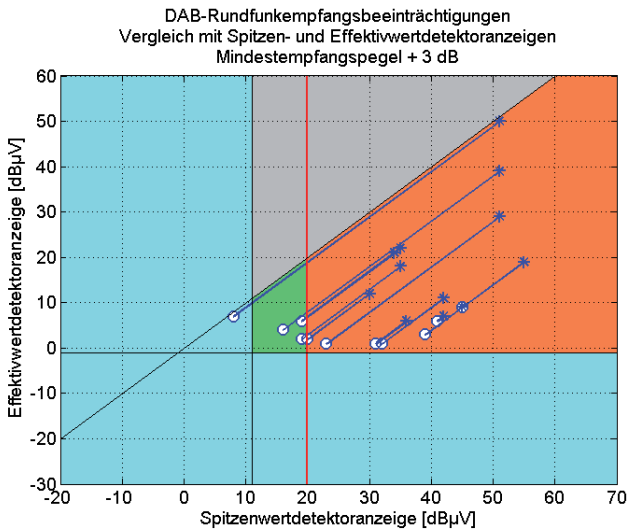


Abbildung 75: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor

6.3.1.2 DVB-T

Die Zusammenhänge zwischen den Anzeigewerten des Spitzenwert- und Effektivwertdetektors sowie der notwendigen Stördämpfung für einen fehlerfreien Empfang sind zunächst für Nutzsignale mit dem notwendigen Mindestempfangspegel in Abbildung 76 dargestellt. Diese Konstellation weist die größte Datenbasis auf. Es ist zu erkennen, dass die Störsignale sehr unterschiedlich gedämpft werden müssen. Es treten alle Kombinationen bezüglich Grenzwertüberschreitung, Grenzwertunterschreitung und dem Auftreten von Empfangsbeeinträchtigungen auf. Für die meisten Störsignale liegen die fiktiven Anzeigewerte nach Umsetzung der ermittelten Störsignaldämpfung unterhalb des Rauschpegels eines Funkstörmessempfängers. Eine Grenzwertdefinition, die Empfangsbeeinträchtigungen sicher ausschließt und gleichzeitig eine massive Übererentstörung vermeidet, scheint nicht möglich zu sein. Die fiktiven Detektoranzeigewerte für einen störungsfreien Empfang unterscheiden sich hierfür zu stark voneinander. Eine sinnvolle Alternative stellt eine Grenzwertdefinition dar, die die häufigsten Fälle abdeckt, wie sie bereits bei der Daimler AG (Verwendung von Spitzenwert- und Mittelwertgrenzwerten) angewendet wird. Zur absoluten Vermeidung von Empfangsbeeinträchtigungen sind die Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz unabdingbar.

Für einen leicht höheren Empfangspegel von 3 dB sind die Bewertungen der Störsignale durch den Spitzen- sowie Mittelwertdetektor sowie die mit dem AudioVideoPrüfplatz für fehlerfreien Empfang ermittelten Stördämpfungen in Abbildung 77 dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Anzeige des Mittelwertdetektors eine sinnvolle Möglichkeit zur Grenzwertdefinition darstellt. Eine absolute Aussage ist mit dieser einfachen Grenzwertbetrachtung aber immer noch nicht möglich. DVB-T-Signale werden bei einem Empfangspegel, der sich 3 dB über dem Mindestempfangspegel befindet, deutlich fehlertoleranter. Das heißt, die notwendige Dämpfung eines Störsignals wird geringer und die gedämpften Störsignale liegen über dem Rauschpegel des Funkstörmessempfängers - wieder ohne Berücksichtigung des Rauschens an einem realen Funkstörmessempfänger.

Für DAB-Signale ist eine Grenzwertdefinition über den Effektivwertdetektor auf Grund der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sinnvoll. Im Gegensatz dazu trifft das für DVB-T-Signale nach den Ergebnissen aus den Untersuchungen in der Abbildung 78 und Abbildung 79 nicht zu. Der Effektivwertdetektor bietet bei DVB-T-Signalen für die untersuchten Störsignale keinen Vorteil. Für weitere Schlussfolgerungen ist jedoch eine größere Datenbasis sinnvoll.

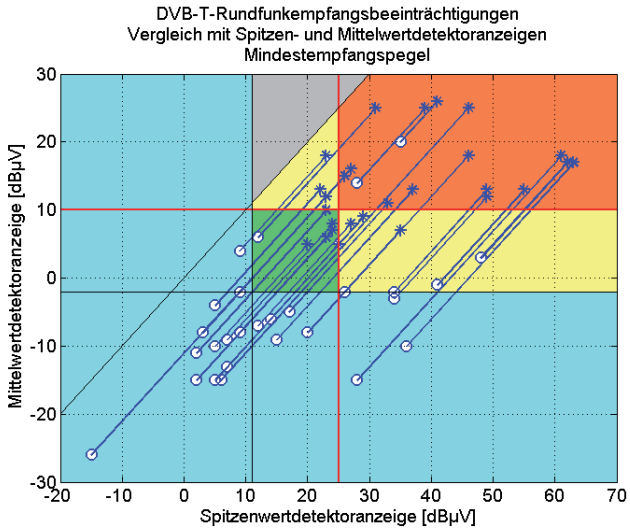


Abbildung 76: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor

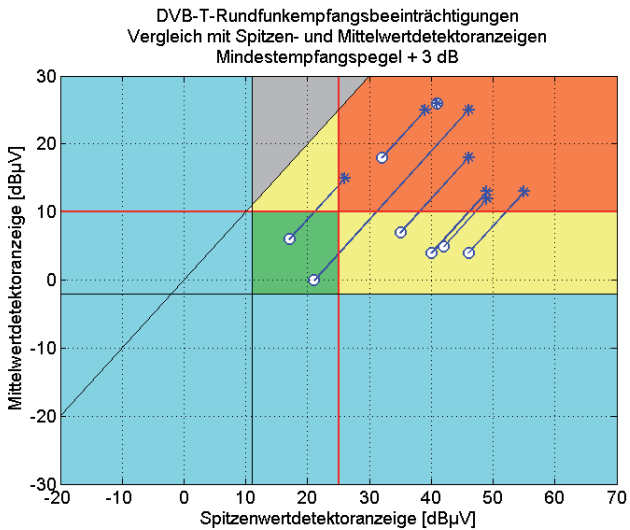


Abbildung 77: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor

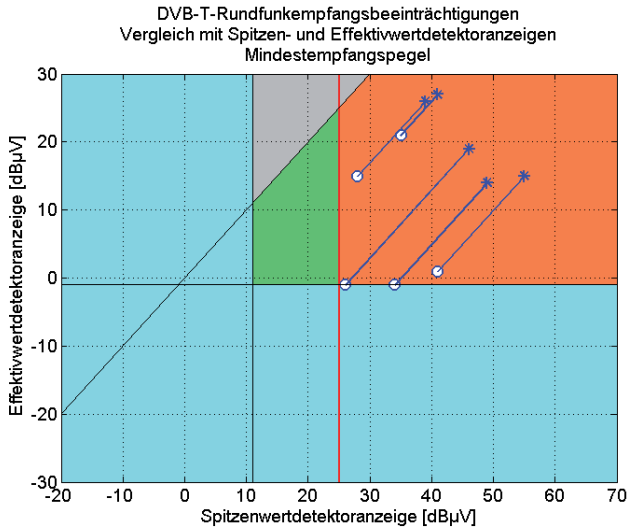


Abbildung 78: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor

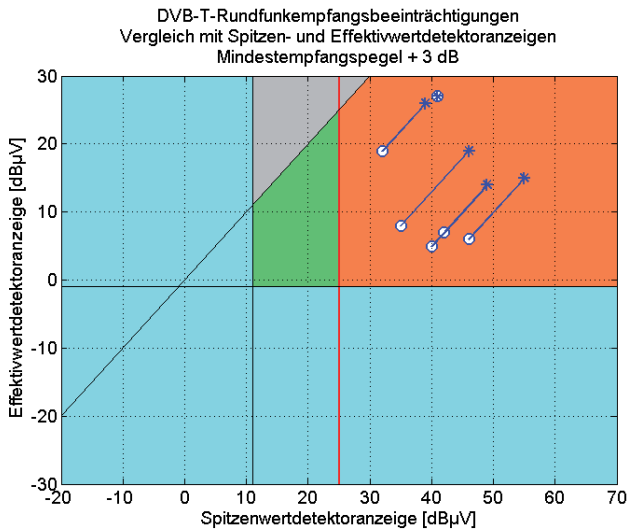


Abbildung 79: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor

7 Simulation als Alternative

Als Alternative zu einem realen Prüfaufbau, wie er zuvor beschrieben wurde, kann eine Bewertung der Empfangsbeeinträchtigung als reine Softwaresimulation, wie in den im Rahmen dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten [Ari10] und [Ste10] gezeigt wurde, durchgeführt werden.

Die in [Ste10] erstellte Simulationsumgebung wird nachfolgend vorgestellt. Für die Implementierung und den Ablauf wurde ein modulbasierter Ansatz gewählt, bei dem jeder Verarbeitungsschritt durch ein eigenständiges Modul abgedeckt ist. Der in Abbildung 80 dargestellte Signalfluss und damit die Hintereinanderschaltung der einzelnen Softwaremodule entsprechen maßgeblich dem Blockschaltbild des AudioVideoPrüfplatzes. Durch den modulbasierten Ansatz ist eine Erweiterung der Simulation durch Hinzufügen von Softwaremodulen oder Änderungen bzw. Erweiterungen der bestehenden Module einfach möglich.

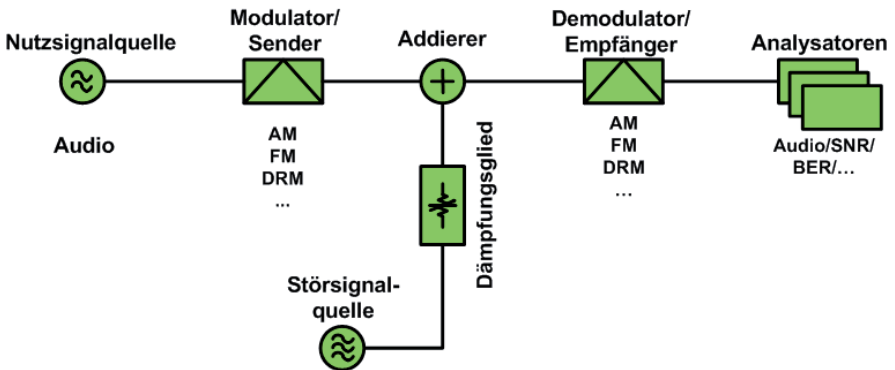


Abbildung 80: Blockschaltbild zur Simulation von Empfangsbeeinträchtigungen aus [Ste10]

Als Eingangssignal für die Nutzsinalerzeugung dienen der Simulationsumgebung Audiosignale, die nach den Vorgaben in den Simulationseinstellungen moduliert werden. Die Verarbeitung erfolgt anschließend in Form komplexer Basisbanddaten (IQ-Daten). Als Störsignale können reale an Fahrzeugen aufgezeichnete Störsignale wie auch computergenerierte Störsignale, die ebenfalls als komplexe Basisbanddaten vorliegen, verwendet werden. Die Addition des Nutzsignals mit dem Störsignal ist als Vektoraddition der komplexen Daten ausgeführt und beinhaltet somit keine Einfügedämpfung, wie es bei realen Bauteilen der Fall sein kann (siehe Kap. 5.4.5). Es werden die digitalen Nutz- und Störsignalwerte abtastwertgenau addiert. Passend zur Simulationsumgebung wurden in [Ste10] Module zur AM- und FM-Modulation und Demodulation entwickelt, die die Grundfunktionalität der Modulationsarten darstellen. In [Ari10] wurden ein Modulator und Demodulator für Digital Radio Mondiale (DRM) an die Simulationsumgebung

angepasst. Zur besseren Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messdaten, die mit dem AudioVideoPrüfplatz ermittelt wurden, können für die Software-Empfänger jeweils thermisches Rauschen sowie ein reales, aus Messdaten konstruiertes EingangsfILTER verwendet werden. Zur Bewertung des Empfangssignals werden in der Simulation die Audioqualitätsbewertungsverfahren PESQ (Kap. 5.4.2.1) und PEAQ (Kap. 5.4.2.2), sowie zur Bewertung von digitalen Daten ein Bitfehleranalysator (BER) aus [Ari10] eingesetzt.

Die Simulation von Empfangsbeeinträchtigungen wurde in [Ari10] und [Ste10] anhand einfacher generischer Störsignale getestet und die Ergebnisse wurden dokumentiert. Beim Vergleich dieser Simulationsergebnisse mit realen Messdaten kommt es bei der AM- und FM-Simulation zu Abweichungen. Der Grund für die Abweichungen der Simulationsergebnisse liegt in der Implementierung von einfachen Demodulatoren. Die im Fahrzeug eingesetzten Empfänger weisen über die reine Demodulation hinaus noch weitere Eigenschaften zur Signalaufbereitung auf, die so einfach nicht modelliert werden können. Für DRM-Signale existiert kein Fahrzeugradioempfänger, der zum Vergleich mit der Simulation verwendet werden kann.

7.1 Simulation mit realen Störsignalen

Anhand einer reinen Softwaresimulation soll das Störsignal 2, das bereits im Beispiel für AM-Untersuchungen in Kapitel 6.2.2.1 verwendet wurde, erneut untersucht werden. Mit Hilfe dieser Simulation werden die Empfangsbeeinträchtigungen auf ein amplitudenmoduliertes Rundfunksignal sowie auf ein digitales Rundfunksignal (DRM) ermittelt.

7.1.1 Empfangsbeeinträchtigungen beim AM-Rundfunkempfang

Bei der Simulation der Empfangsbeeinträchtigungen beim AM-Rundfunkempfang wurden zur Modulation des Nutzsignals identische Werte eingestellt, wie sie bei den Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz verwendet wurden. Mit Hilfe der Simulation wurde bei jeweils zwei unterschiedlichen Empfangspegeln (30 dB μ V und 40 dB μ V) die Empfangsqualität in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals ermittelt. Die Dämpfung des Störsignals wurde bis 60 dB Dämpfung schrittweise erhöht, wie bei den Messungen mit dem realen AudioVideoPrüfplatz. Die gesamte Simulation benötigt auf einem aktuellen Desktop Computer ca. 7 Minuten. Die Prüfdauer ist lediglich von der Rechengeschwindigkeit des Computers abhängig. Bei den bisher gezeigten Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz werden die Nutzsignale in Echtzeit abgespielt, was bei den Vergleichsmessungen zur Simulation bereits 15 Minuten benötigt. Hinzu kommt die Zeit, die für Umschaltvorgänge am AudioVideoPrüfplatz und die instrumentelle Bewertung benötigt wird. Durch die Simulation ist eine deutliche Verkürzung der Zeit erreichbar, die zur Ermittlung der hinreichenden Dämpfung des Störsignals benötigt wird.

In Abbildung 81 sind die Ergebnisse aus der Simulation und den Vergleichsmessungen mit dem AudioVideoPrüfplatz als Audioqualität des Empfangssignals über der Dämpfung des Störsignals dargestellt. Die Bewertung der Empfangsqualität des AM-Rundfunksignals wurde jeweils mit dem PESQ-Verfahren durchgeführt. In der Simulation wurden höhere Dämpfungswerte ermittelt als bei den Vergleichsmessungen, damit ist der modellierte AM-Rundfunkempfänger empfindlicher gegenüber Störsignalen als der reale Fahrzeuggrundfunkempfänger, der im AudioVideoPrüfplatz verwendet wird. Bei realen Empfängern für den AM-Rundfunk kommen bei schwachen Nutzsignalen Algorithmen zur Signalverbesserung, wie z. B. die Verkleinerung der Bandbreite oder Nutzung des zweiten Seitenbandes, zum Einsatz. Auch das Rauschen, welches bei der Simulation als reines thermisches Rauschen an 50 Ohm angenommen wurde, wird bei einem realen Empfänger durch sein zusätzliches Eigenrauschen höher liegen. Durch das Rauschen wird der maximal erreichbare Audioqualitätswert bei einer instrumentellen Bewertung beeinflusst. Es konnte durch die Simulation gezeigt werden, dass qualitativ aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können, diese sich jedoch quantitativ von den Messergebnissen unterscheiden. Eine deutlich bessere Modellierung des Verhaltens des AM-Empfängers, das über die reine Demodulation hinaus geht, sollte die Korrelation deutlich verbessern.

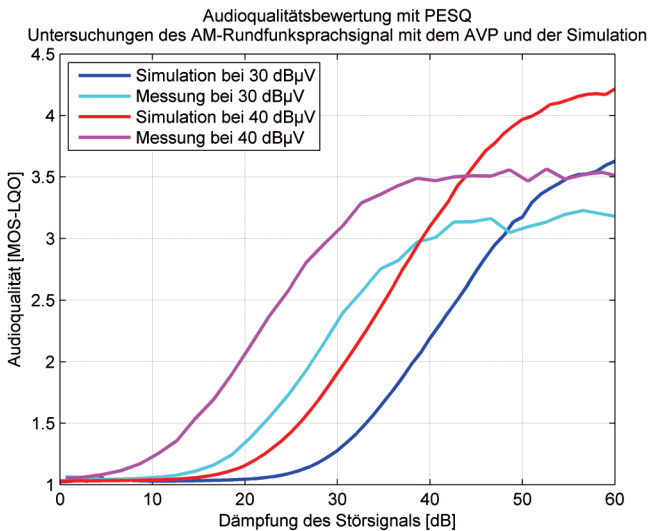


Abbildung 81: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Rundfunksignals mit Stör-signal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals durch den AudioVideoPrüfplatz (Messung) und die Simulation

7.1.2 Empfangsbeeinträchtigungen beim DRM-Rundfunkempfang

Für den digitalen Rundfunkstandard DRM, der als Ersatz für die analogen AM-Rundfunkdienste vorgesehen ist, werden Simulationen zur Untersuchung von Empfangsbeeinträchtigungen durchgeführt. Bisher hat sich dieser neue digitale Rundfunkstandard aber nicht soweit durchgesetzt, dass Endgeräte in Form von Fahrzeugrundfunkempfängern vorhanden sind. Deshalb werden die zu erwartenden Rundfunkempfangsbeeinträchtigungen nur anhand einer Simulation untersucht. Dazu wird wieder ein reales Störsignal verwendet, das bereits im vorhergehenden Kapitel für die AM-Simulationen Verwendung fand. Als Nutzsignal wurde ein DRM-Signal (Kapitel 4.3.3.2) mit folgenden Parametern verwendet: Bandbreite von 9 kHz, Robustness Modes A, 64 QAM für die MSC-Daten, 16 QAM für die SDC-Daten. Als Nutzsignalinhalt wurde abermals die bereits verwendete Sprachdatei (Titel 53 aus Tabelle 30) gewählt. Die Simulation fand zunächst bei verschiedenen Nutzsignalempfangspegeln, beginnend beim Mindestempfangspegel, statt. Die Bewertung der Empfangsqualität erfolgte mit dem PEAQ-Verfahren, da die übertragene Audiofrequenzbandbreite höher ist als bei einem analogen AM-modulierten Rundfunksignal. Die Ergebnisse der Audioqualitätsbewertung bei den unterschiedlichen Empfangspegeln, beginnend beim Mindestempfangspegel, sind in Abbildung 82 in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals dargestellt.

Bei der Simulation der DRM-Signale zeigt sich dasselbe Verhalten wie bei den Messungen, die mit dem AudioVideoPrüfplatz an DAB- und DVB-T-Signalen durchgeführt wurden. Eine Erhöhung des Empfangspegels bei geringem Abstand zum Rauschen weist dabei nicht denselben Wert auf wie die benötigte Dämpfung des Störsignals, um dieselbe Empfangsqualität sicherstellen zu können. Bei geringen Empfangspegeln ist der Übergangsbereich, in dem ein wahrnehmbar beeinträchtigtes Signal empfangen werden kann, deutlich größer als bei höheren Empfangspegeln.

Zusätzlich zu der Empfangsqualität wurde die Bitfehlerrate des demodulierten Audiosignals in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 83 dargestellt. Diese Bitfehlerrate bezieht sich auf die binär übertragenen Audiodaten. Die so bestimmte Bitfehlerrate stimmt mit der Audioqualitätsbewertung durch das PEAQ-Verfahren sehr gut überein. Oft wird die Bitfehlerrate über die gesamten übertragenen Daten angegeben, wobei dann eine Korrelation zu den tatsächlich vorhandenen Empfangsbeeinträchtigungen schwierig ist.

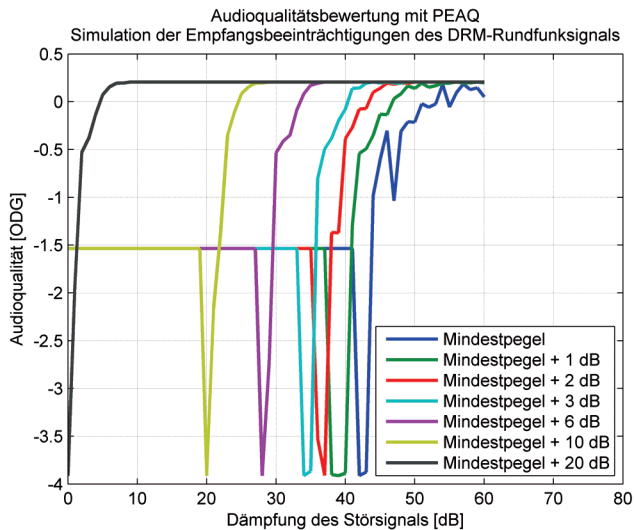


Abbildung 82: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DRM-Rundfunksignals mit Stör-signal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals durch Simulationen bei verschiedenen Empfangspegeln

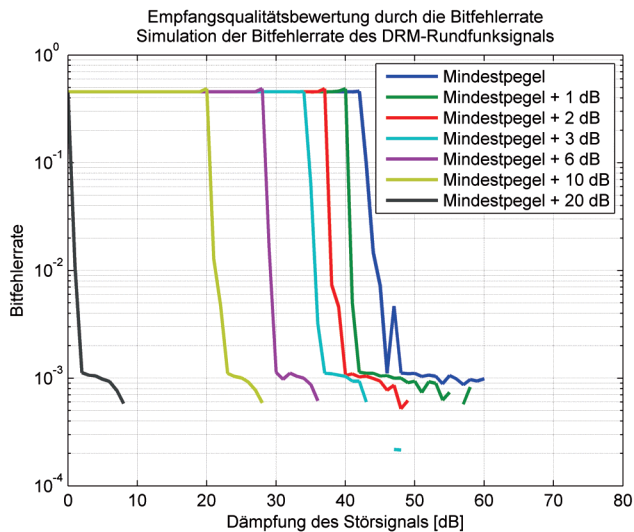


Abbildung 83: Bitfehlerrate der demodulierten DRM-Empfangssignale in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals bei Simulationen mit verschiedenen Empfangspegeln.

Als letztes Beispiel für die Anwendung der Simulation von Empfangsbeeinträchtigungen bei DRM-Signalen wird das Störsignal jeweils zeitlich verzögert auf das DRM-Nutzsignal addiert. Diese Untersuchung soll den Einfluss des Zeitpunktes, zu dem das Nutzsignal und das Störsignal aufeinander treffen, verdeutlichen. Als Nutzsignal und Störsignal werden die bereits zuvor verwendeten Signale herangezogen. Für das Störsignal wurde eine gleichbleibende Dämpfung von 48 dB verwendet, wodurch bei einem Nutzsignal mit Mindestempfangspegel eine durchschnittliche Audioqualität von -0,25 nach dem PEAQ-Verfahren auftritt. Dies entspricht nach den bisherigen Untersuchungen einer gerade nicht beeinträchtigten Empfangsqualität. Unter diesen Randbedingungen sind größere Schwankungen der Empfangsqualität in Abhängigkeit des Zeitversatzes zu erwarten, als bei höheren Nutzsignalpegeln oder bei besser bewerteten Empfangsqualitäten. In Abbildung 84 ist die Audioqualität über dem Zeitversatz zwischen dem Störsignal und dem Nutzsignal dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei dieser Untersuchung die erzielte Audioqualität vom Zeitpunkt abhängig ist, zu welchem das Nutzsignal auf das Störsignal trifft. Es kommt zu Abweichungen, die auf Beeinträchtigungen der Empfangsqualität hinweisen. Durch eine Simulation lässt sich für die untersuchten Nutzsignal- und Störsignalsequenzen die Schwingungsbreite der Empfangsqualität angeben. Bei den Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz, wie auch beim Rundfunkempfang eines Kraftfahrzeugs außerhalb der EMV-Prüfumgebung ist der Zeitpunkt, zu dem das Rundfunknutzsignal von einem Störsignal überlagert wird, nicht vorhersehbar.

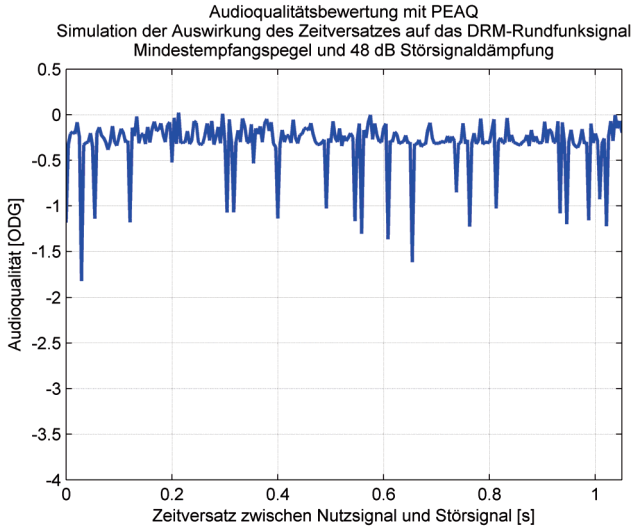


Abbildung 84: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ des demodulierten DRM-Empfangssignals in Abhängigkeit des Zeitversatzes mit dem das Störsignal auf das Nutzsignal addiert wird

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn der Arbeit wurden zunächst die Empfangssysteme vorgestellt, wie sie im Kraftfahrzeug zum Rundfunkempfang verwendet werden. Über diese werden zusätzlich zu den Rundfunknutzsignalen Störsignale, die vom Kraftfahrzeug selbst stammen, empfangen, was Empfangsbeeinträchtigungen zur Folge hat. Auf die Erfassung solcher Störsignale und deren etablierte Bewertung nach standardisierten Normen wurde deshalb im Weiteren näher eingegangen. Dazu erfolgte zunächst die Beschreibung des Störaussendungsprüfaufbaus sowie der zum Einsatz kommenden Funkstörmessempfänger inklusive deren Bewertungsmöglichkeiten von Störsignalen. In diesem Zusammenhang wurden Ansätze zur Modellierung von Störsignalen vorgestellt, die den Charakteristika der Bewertung mit einem Funkstörmessempfänger entsprechen. Zur Untersuchung von Empfangsbeeinträchtigungen und dem Schutz von Rundfunkempfangssignalen im Kraftfahrzeug sind Kenntnisse über die Rundfunksignale selbst unerlässlich. Für die derzeit im Kraftfahrzeug empfangbaren Rundfunksignale kommen verschiedene Modulationsarten zum Einsatz. Die theoretischen Grundlagen zu diesen Modulationsarten und den darauf aufbauenden unterschiedlichen Rundfunkdiensten wurden in dem Maße vorgestellt, wie es zum Verständnis von EMV-Störeinflüssen und der in dieser Arbeit entwickelten Prüfmethode notwendig ist.

Diese neue Prüfmethode basiert auf einem speziellen Prüfaufbau, dem sogenannten AudioVideoPrüfplatz (AVP). Der AudioVideoPrüfplatz ermöglicht die Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen und die Ermittlung einer gegebenenfalls notwendigen oder als Spezifikation zu ermittelnden Dämpfung des Störsignals. Der Aufbau des AudioVideoPrüfplatzes selbst wurde im Detail vorgestellt. Zusätzlich dazu wurden für einige Komponenten, wie z. B. für die Signaladdition, unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung untersucht und beschrieben. Zur Bewertung der Empfangsqualität wurden für Hörfunkdienste instrumentelle Bewertungsverfahren eingesetzt, während bei Fernsehsignalen die Bewertung effizient durch eine Testperson erfolgte. Durch die Einführung einer instrumentellen Bewertung der Audioempfangsqualität mit den Verfahren PESQ und PEAQ kann der Prüfablauf automatisiert werden. Dadurch wurde die Abhängigkeit von subjektiven Bewertungen durch Testpersonen vermieden und eine nachvollziehbare sowie reproduzierbare Methode angewendet. Die instrumentelle Audioqualitätsbewertung weist unter denselben Eingangsbedingungen eine identische Qualitätsbewertung auf. Damit wird die Forderung der Reproduzierbarkeit durch diese Prüfmethode erfüllt.

Als Beispiele für die Anwendung des AudioVideoPrüfplatzes wurden zunächst einfache, künstlich erzeugte Störsignale, aber auch tatsächlich an Kraftfahrzeugen gemessene Störsignale untersucht. Die Bewertung der Störsignale fand zusätzlich zum AudioVideoPrüfplatz mit einem klassischen Funkstörmessempfänger nach etablierten Normen statt. Hierbei ergaben sich Unterschiede bei den Bewer-

tungsergebnissen. Zur Vermeidung von Empfangsbeeinträchtigungen und der Sicherstellung des Qualitätsmerkmals EMV im Kraftfahrzeug sind Bewertungen mit einem Funkstörmessempfänger nicht immer hinreichend, was Ausgangspunkt für diese Arbeit war und im Detail untersucht wurde. Der Funkstörmessempfänger führt selbst lediglich eine gewichtete Bewertung des Störsignals durch, ohne die tatsächliche Empfangssituation, insbesondere die absoluten Nutzsignalpegel, zu berücksichtigen. Die tatsächlich zu erwartenden Rundfunkempfangsbeeinträchtigungen können nur durch die Verwendung des AudioVideoPrüfplatzes bestimmt werden. Die schnelle und unproblematische Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger stellt jedoch die zeitlich effizientere Bewertungsmethode dar. Als sinnvoll erweist sich die Durchführung einer Störaussendungsprüfung mit einem Funkstörmessempfänger und eine anschließende Bewertung kritischer Störsignalpegel durch den AudioVideoPrüfplatz. Durch dieses Vorgehen kann eine definierte Empfangsqualität sichergestellt und ein zügiger Prüfablauf gewährleistet werden. Der Fokus dieser Arbeit bestand in der Entwicklung des AudioVideoPrüfplatzes und der vorgestellten Prüfmethode. In Zukunft soll die Datenbasis durch den konsequenten Einsatz des AudioVideoPrüfplatzes deutlich erweitert und damit ein besserer Vergleich zu anderen Prüfmethoden hergestellt werden.

Als technisch und wirtschaftlich sinnvoll hat sich die möglichst hochauflösende Aufzeichnung von Störsignalen erwiesen. Die technische Notwendigkeit zur Aufzeichnung von Störsignalen liegt im häufig zeitlich nicht konstanten oder nicht periodischen Verhalten der Störsignale im Kraftfahrzeug und der Aufwändigkeit entsprechender Störaussendungsmessungen am Kfz-Gesamtsystem. Ein aussagekräftiger Vergleich von Prüfmethoden ist nur möglich, wenn die Prüfmethoden identische Störsignale bewerten. Deshalb wurden für Vergleiche der Prüfmethoden die Störsignalaufzeichnungen originalgetreu wiedergegeben und nur in wenigen Ausnahmefällen die Störsignale nacheinander mit verschiedenen Prüfmethoden bewertet. Bei der sequenziellen Bewertung mit mehreren Prüfmethoden wurde auf eine geeignete Wahl der Bewertungsdauer geachtet. Durch die Aufzeichnung und Wiedergabe von Störsignalen ist es möglich, die Zeitdauer für die Störaussendungsprüfung in einer EMV-Prüfumgebung nicht länger als unbedingt notwendig zu gestalten. Die aufgezeichneten realen Störsignale stehen auch für andere Untersuchungen zur Verfügung. Es kann über eine Modellbildung von häufig im Kraftfahrzeug auftretenden Störsignalen und eine entsprechende Kompensation der Störsignale durch den Rundfunkempfänger nachgedacht werden.

Zur instrumentellen Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen wurden die von der ITU standardisierten Verfahren PESQ und PEAQ verwendet, die nicht speziell zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen auf Grund von Funkstörungen angepasst wurden. Um diese Anpassung vornehmen zu können, ist die Erfassung repräsentativer Störsignale und ein erheblicher Aufwand an subjektiven Hörtests

notwendig. Die Bewertungseigenschaften des PESQ-Verfahrens wurden mit der Pulsbewertung durch den Quasispitzenwertdetektor nach [CISPR 16-1-1] verglichen. Für hinreichend hohe Nutzsignalpegel liefert die instrumentelle Audibewertung des AudioVideoPrüfplatzes unter Verwendung von PESQ eine dem Quasispitzenwertdetektor entsprechende Störsignalbewertung. Zur Bewertung von Fernsehsignalen kam im AudioVideoPrüfplatz bisher kein instrumentelles Verfahren zum Einsatz. Untersuchungen zur Bewertung von Fernsehempfangssignalen können in [Gau10] nachgelesen werden. Eine Prüfung der instrumentellen Bewertung von Fernsehsignalen auf ihre Eignung hin zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen auf Grund von Funkstörungen sollte im Rahmen von Erweiterungen des AudioVideoPrüfplatzes nachgedacht werden.

Die Erweiterung des AudioVideoPrüfplatzes zur Untersuchung von neuartigen Rundfunkdiensten ist ohne Einschränkungen möglich, sobald eine Nutzsignalquelle und ein Empfänger verfügbar sind. Der bisher dargestellte Aufbau deckt die Bewertung der aktuell im Kraftfahrzeug relevanten Rundfunkdienste ab. Durch den modularen Aufbau ist die Erweiterung auf zukünftige Rundfunkdienste wie beispielsweise die Übertragung der Rundfunksignale über Ultra Wideband (UWB) Kommunikation möglich. Aus den Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz an neuen Rundfunkdiensten können Störaussendungsgrenzwerte für die Bewertung der Störsignale mit einem Funkstörmessempfänger unter Verwendung der bekannten oder zur Definition neuer Detektoren abgeleitet werden. Hierzu wurden in dieser Arbeit Scatter-Plots eingeführt, die eine grafische Darstellung von Detektorbewertungen sowie Empfangsbewertungen über viele Messwerte ermöglichen und als geeignetes Hilfsmittel zur Grenzwertdefinition herangezogen werden können.

Ein zusätzlicher, denkbarer Ansatz zur Erweiterung des AudioVideoPrüfplatzes könnte die Berücksichtigung eines Antennendiversity-Systems darstellen, bei dem der Empfänger das Nutzsignal sowie das Störsignal mit mehreren Antennen empfängt. Bei dieser Erweiterung ist die Berücksichtigung verschiedener Laufzeiten für die unterschiedlichen Signale notwendig. Die Implementierung des Diversity-Systems kann dann zusätzlichen Einfluss auf die Empfangsqualität haben und zu Problemen mit der Reproduzierbarkeit führen.

Der gezeigte Ansatz, die Empfangsbeeinträchtigungen durch eine Simulation abzuschätzen, weist relevante Abweichungen zu den Untersuchungen mit dem AudioVideoPrüfplatz auf. Eine Verbesserung der Simulationsmodelle zur besseren Nachempfindung realer Rundfunkempfänger stellt hier ein wichtiges, noch weitgehend in den Kinderschuhen steckendes Betätigungsfeld dar. Dennoch können grundlegende Untersuchungen zu Empfangsbeeinträchtigungen, vor allem auch zu neuen Rundfunkdiensten, zu denen noch keine Geräte verfügbar sind, an Hand von Simulationen durchgeführt werden.

Anhang

Tabelle 26: Frequenzbereiche

Bezeichnung	Frequenzbereich
Langwelle (LW)	148,5 kHz bis 283,5 kHz
Mittelwelle (MW)	526,5 kHz bis 1606,5 kHz
Kurzwelle (KW) 49-Band	5,9 MHz bis 6,2 MHz
Fernsehen Band I	47 MHz bis 68 MHz
Ultrakurzwelle (UKW) Band II	87,5 MHz bis 108,0 MHz
Fernsehen / DAB Band III	174 MHz bis 230 MHz
Fernsehen Band IV/V	470 MHz bis 862 MHz

Tabelle 27: Übertragungsmodi und -parameter bei DAB

Transmission Mode	I	II	III	IV
Anwendung	Band III (VHF)	L-Band (<1.5 GHz)	L-Band (<3 GHz)	L-Band (<1.5 GHz)
Anzahl Subträger	1536	384	192	768
Trägerabstand [kHz]	1	4	8	2
Framelänge	96 ms 76 Symbole	24 ms 76 Symbole	24 ms 152 Symbole	48 ms 76 Symbole
Guardintervall	246 µs	62 µs	31 µs	123 µs

Tabelle 28: Übertragungsmodi und -parameter bei DRM

Robustness Mode	A	B	C	D
Anwendung	LW, MW Bodenwelle	MW, KW Raumwelle	KW Raumwelle	KW Raumwelle
Anzahl Subträger bei 9 kHz (10 kHz)	202 (226)	182 (206)	- (138)	- (88)
Trägerabstand [kHz]	0,042	0,047	0,068	0,107
Transmission Frame Länge	400 ms 15 Symbole	400 ms 15 Symbole	400 ms 20 Symbole	400 ms 24 Symbole
Guardintervall	2667 μ s	5333 μ s	5333 μ s	7333 μ s

Tabelle 29: Übertragungsmodi und -parameter bei DVB-T

Mode Bandbreite	8 k bei 8 MHz	2 k bei 8 MHz	8 k bei 7 MHz	2 k bei 7 MHz
Anwendung	Band IV/V	Band IV/V	Band I & III	Band I & III
Anzahl Subträger	6817	1705	6817	1705
Trägerabstand [kHz]	1,116	4,464	0,977	3,906
Transmission Frame Länge	63 - 76 ms 68 Symbole	16 - 19 ms 68 Symbole	72 - 87ms 68 Symbole	18 - 22 ms 68 Symbole
Guardintervall	1/32 - 1/4 28 - 224 μ s	1/32 - 1/4 7 - 56 μ s	1/32 - 1/4 32 - 256 μ s	1/32 - 1/4 8 - 64 μ s

Tabelle 30: Auswahl an Audio-Titeln aus [SQAM05]

Titel	Audioinhalt	Interpret	Genre
53	Weibliche Stimme, Deutsch	-	Sprache
60	Klavier	Schubert	Klassik - Soloinstrument
61	Sopran	Mozart	Klassik - Gesang & Orchester
65	Orchestra	R. Strauss	Klassik - Orchester
69	Pop-Musik	ABBA	Pop-Musik

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A	Amplitude
A_A	“Impulsive Index” des Middleton Class A-Modells
AD	Analog-Digital
AF	Audiofrequenz
α	Dämpfungsmaß
AM	Amplitudenmoduliert
APD	Amplitude Probability Distribution engl. für Amplitudenwahrscheinlichkeitsverteilung
AV	Average engl. für Mittelwert
AVP	AudioVideoPrüfplatz
b	Bandbreite
BER	Bit Error Ratio engl. für Bitfehlerrate
β	Phasenmaß
CD	Compact Disk, optisches Speichermedium
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques franz. für Internationaler Sonderausschuß für Funkstörungen
DAB	Digital Audio Broadcasting, digitaler Rundfunkdienst
dB	Dezibel, logarithmisch dargestellte Größe

DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing, engl. für digitale Signalverarbeitung
ΔF	Frequenzhub
DRM	Digital Radio Mondiale
DVB-T	Digital Video Broadcasting, terrestrischer digitaler Fernsehrundfunk
\mathcal{E}	Normierte Einhüllende für Middleton Class A-Modell
\mathcal{E}_0	Normierter Schwellwert für Middleton Class A-Modell
$\langle E^X \rangle$	x. Moment
EBU	European Broadcasting Union
EMC	Electromagnetic Compatibility, engl. für EMV
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ETI	Ensemble Transport Interface bei DAB
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F	Rauschzahl
f_x	Frequenz mit der Bezeichnung x
FAC	Fast Access Channel bei DRM
FDM	Frequency Devision Multiplex, engl. für Frequenzmultiplexverfahren
FIC	Schneller Informations Kanal bei DAB
FM	Frequenzmoduliert

$g(t)$	Sendeimpuls
g	Verstärkung
γ	komplexes Ausbreitungsmaß
Γ'_A	Verhältnis der Intensität des unabhängigen Gaußschen Anteils σ_G^2 Intensität des impulshaften Anteils Ω_{2A}
$H(f)$	Übertragungsfunktion
HF	Hochfrequenz
IC	Integrated Circuit, engl. für Integrierter Schaltkreis
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IQ	Inphase und Quadratur, Bezeichnung für komplexe Daten
ISI	Intersymbolinterferenz
ITU	International Telecommunication Union
Kfz	Kraftfahrzeug
m	Modulationsgrad
MOS-LQO	Mean Opinion Score – Listening Quality Objective
MPEG	Moving Pictures Experts Group, u. a. Bezeichnung für eine spezielle Datenkompression
MSC	Main Service Channel bei DAB und DRM
ω	Kreisfrequenz
Ω	Trägerkreisfrequenz

Ω_{2A}	Intensität des impulshaften (nicht Gaußschen) Anteils
ODG	Objective Differenz Grade
OSB	Oberes Seitenband
$P\{ \}$	Probability engl. für Wahrscheinlichkeit
P_x	Leistung mit Bezeichnung x
PEAQ	Perceptual Evaluation of Audio Quality
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
φ	Phase
PK	Peak, engl. für Spitzenwert
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
QP	Quasi Peak, engl. für Quasispitzenwert
r	Flankenfaktor
r_x	Reflexionsfaktor an der Stelle x
RMS	Root Mean Square, engl. für Effektivwert
s_x	Signal mit Bezeichnung x im Zeitbereich
S_x	Signal mit Bezeichnung x im Frequenzbereich
SC	Synchronisations Kanal bei DAB
SDC	Service Description Channel bei DRM

SIR	Signal Interference Ratio, engl. für Signal-Stör-Abstand
SNR	Signal Noise Ratio, engl. für Signal-Rausch-Abstand
SQAM	Sound Quality Assessment Material, Testsignale von der EBU
σ_G^2	Unabhängiger Gaußsche Anteil bei Middleton Class A-Modellen
t	Zeit
T_0	(Rausch)Temperatur
THD	Total Harmonic Distortion, engl. für Klirrfaktor
TP	Tiefpass
TPS	Transmission Parameter Signaling bei DVB
TS	Transportstream bei DVB
TV	Television, engl. für Fernsehen
U_x	Spannung mit Bezeichnung x
USB	Unteres Seitenband
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker
v_s	Schrittgeschwindigkeit
ZF	Zwischenfrequenz
Z_L	Leitungsimpedanz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Telematiksystem bestehend aus mehreren Steuergeräten.....	14
Abbildung 2: Blockschaltbild vom Empfangssystem	14
Abbildung 3: Mercedes-Benz W 115 mit Stabantenne (Foto: Daimler AG).....	15
Abbildung 4: Heckscheibenantennenstrukturen für verschiedene Rundfunkdienste	15
Abbildung 5: Blockschaltbild eines Mehrantennen-Schaltdiversitysystems	16
Abbildung 6: Blockschaltbild eines Mehrantennen-Phasendiversitysystems	17
Abbildung 7: Blockschaltbild eines Überlagerungsempfängers	18
Abbildung 8: Blockschaltbild eines Empfängers mit DSP-basierter Demodulation	18
Abbildung 9: Störaussendungsprüfaufbau nach [CISPR 25]	22
Abbildung 10: Blockschaltbild eines Funkstörmessempfängers (Superheterodynprinzip).....	24
Abbildung 11: Sequentielle Erfassung des Spektrums mit einem Superheterodynempfänger.....	24
Abbildung 12: Erfassung des Spektrums mit einem Zeitbereichsmessempfänger	25
Abbildung 13: Blockschaltbild eines Zeitbereichsmessempfängers.....	25
Abbildung 14: Anzeigewerte des Spitzenwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen.....	27
Abbildung 15: Anzeigewerte des Mittelwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen.....	28
Abbildung 16: Schaltung zur Realisierung eines Quasispitzenwertdetektors.....	29

Abbildung 17: Anzeigewerte des Quasispitzenwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen.....	30
Abbildung 18: Anzeigewerte des Effektivwertdetektors bei Annäherung ans Rauschen.....	31
Abbildung 19: Blockschaltbild einer Realisierung der APD-Bewertung	32
Abbildung 20: Rauschkurve und Fahrzeugstöraussendungskurve bei einer APD-Bewertung	33
Abbildung 21: APD-Messung und Detektorbewertung eines pulshaften Störsignals	34
Abbildung 22: Gemessene Spektralanteile eines amplitudenmodulierten 1 kHz-Tons	42
Abbildung 23: Oberes und unteres Seitenband bei einem amplitudenmodulierten Signal	42
Abbildung 24: Gemessene Spektralanteile eines frequenzmodulierten 1 kHz-Tons	43
Abbildung 25: Spektrum eines Stereo-FM-Signals mit Hilfsträgern	44
Abbildung 26: Blockschaltbild eines digitalen Übertragungssystems	46
Abbildung 27: Darstellung eines Punktes im komplexen Signalraum.....	48
Abbildung 28: Blockschaltbild QAM-Modulator	49
Abbildung 29: Signalraumdarstellung eines Gray codierten 16 QAM-Signals	50
Abbildung 30: Blockschaltbild des Frequenzmultiplexverfahrens	51
Abbildung 31: Blockschaltbild eines DAB-Senders	52
Abbildung 32: DAB-Transmission Frame.....	52
Abbildung 33: Blockschaltbild eines DRM-Senders.....	53

Abbildung 34: DRM-Transmission Super Frame	54
Abbildung 35: Blockschaltbild eines DVB-T-Senders.....	55
Abbildung 36: DVB-T-Transmission Frame	56
Abbildung 37: Prüfaufbau mit AudioVideoPrüfplatz (AVP).....	59
Abbildung 38: Prüfablauf zur Bewertung von Empfangsbeeinträchtigungen mit dem AudioVideoPrüfplatz	61
Abbildung 39: Ablaufdiagramm PESQ-Bewertungsverfahren nach [Rec.P862]..	66
Abbildung 40: Ablaufdiagramm des PEAQ-Bewertungsverfahrens nach [Rec.BS1387-1]	69
Abbildung 41: Audioqualitätsbewertung mit PESQ bei Überlagerung des SQAM Titels 53 mit Sinusstörtönen	72
Abbildung 42: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ bei Überlagerung des SQAM Titels 53 mit Sinusstörtönen	72
Abbildung 43: Signalflussdiagramm für den AVP	73
Abbildung 44: Symmetrisch aufgebauter Leistungsaddierer	75
Abbildung 45: Widerstandskoppler – PickOffTee.....	76
Abbildung 46: Rauschender Vierpol	77
Abbildung 47: Aufzeichnung von Störsignalen.....	80
Abbildung 48: Prinzipielle IQ-Datenaufzeichnung	80
Abbildung 49: Offline Bewertung eines aufgezeichneten Störsignals.....	81
Abbildung 50: Prinzipielle IQ-Datenwiedergabe	81
Abbildung 51: Schichtenmodell der Bediensoftware des AVP	83
Abbildung 52: Grafische Bedienoberfläche zur Ansteuerung des AVP	83

Abbildung 53: APD von FM-Rundfunkempfangssignalen im Fahrzeug	89
Abbildung 54: APD von DAB-Rundfunkempfangssignalen im Fahrzeug	89
Abbildung 55: Diskretes Linienspektrum einer Pulsfolge	91
Abbildung 56: Zeitverlauf einer pulsmodulierten Sinusschwingung	92
Abbildung 57: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals	94
Abbildung 58: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines FM-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals	99
Abbildung 59: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus bei verschiedenen Pulswiederholraten als Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals	102
Abbildung 60: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus mit 10 kHz bei verschiedenen Empfangspegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals	105
Abbildung 61: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DAB-Nutzsignals mit pulsmoduliertem Sinus mit 1000 kHz bei verschiedenen Empfangspegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals	105
Abbildung 62: Bewertung der Störsignale für die DVB-T-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger mit dem Mittelwertdetektor bei 1 MHz Bandbreite	107
Abbildung 63: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger	110
Abbildung 64: Zeitverlauf der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen bei einer ZeroSpan-Messung	110
Abbildung 65: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Rundfunksprachsignals (Titel 53) bei je zwei Nutzsignalpegeln in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignale	111

Abbildung 66: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die FM-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger	113
Abbildung 67: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ von FM-Rundfunksignalen bei unterschiedlichen Nutzsignalpegeln in Abhängigkeit der Dämpfung der Störsignale	114
Abbildung 68: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DAB-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger.....	116
Abbildung 69: Zeitverlauf des Störsignalbeispiels Nr. 3 für die DAB-Untersuchungen bei einer ZeroSpan-Messung	116
Abbildung 70: APD-Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DVB-T-Untersuchungen mit einem Funkstörmessempfänger	119
Abbildung 71: Schematische Darstellung eines Scatter-Plots zur Gegenüberstellung von zwei Detektoranzewerten und der ermittelten Stördämpfung	121
Abbildung 72: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor	122
Abbildung 73: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor	123
Abbildung 74: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor	124
Abbildung 75: Scatter-Plot der DAB-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor	124
Abbildung 76: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor	126
Abbildung 77: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Mittelwertdetektor	126
Abbildung 78: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen beim Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor	127

Abbildung 79: Scatter-Plot der DVB-T-Empfangsbeeinträchtigungen bei 3 dB über dem Mindestempfangspegel mit Spitzen- und Effektivwertdetektor.....	127
Abbildung 80: Blockschaltbild zur Simulation von Empfangsbeeinträchtigungen aus [Ste10]	129
Abbildung 81: Audioqualitätsbewertung mit PESQ eines AM-Rundfunksignals mit Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals durch den AudioVideoPrüfplatz (Messung) und die Simulation	131
Abbildung 82: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ eines DRM-Rundfunksignals mit Störsignal in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals durch Simulationen bei verschiedenen Empfangspegeln	133
Abbildung 83: Bitfehlerrate der demodulierten DRM-Empfangssignale in Abhängigkeit der Dämpfung des Störsignals bei Simulationen mit verschiedenen Empfangspegeln.	133
Abbildung 84: Audioqualitätsbewertung mit PEAQ des demodulierten DRM-Empfangssignals in Abhängigkeit des Zeitversatzes mit dem das Störsignal auf das Nutzsignal addiert wird.....	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pulsbewertung des Quasispitzenwertdetektors nach [CISPR 16-1-1] für Band B und Band C	29
Tabelle 2: PESQ-Bewertungsskala	65
Tabelle 3: PEAQ-Bewertungsskala	68
Tabelle 4: Maximal- und Minimalbewertung durch PESQ [MOS-LQO]	70
Tabelle 5: Maximal- und Minimalbewertung durch PEAQ [ODG]	70
Tabelle 6: Sendersuchlaufschwelle	86
Tabelle 7: Mindestempfangspegel	87
Tabelle 8: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die AM-Untersuchungen	93
Tabelle 9: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die AM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmesempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	93
Tabelle 10: Notwendige Dämpfung der Störsignale bei verschiedenen Nutzsignalen für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PESQ	95
Tabelle 11: Pulsbewertung in dB relativ zur Bewertung des Pulses mit 100 Hz Pulsfrequenz durch den AVP bei unterschiedlichen Nutzsignalpegeln, Funkstörmesempfänger ESU 8 (QP) und [CISPR 16-1-1] im Vergleich	96
Tabelle 12: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die FM-Untersuchungen	97
Tabelle 13: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die FM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmesempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	98

Tabelle 14: Notwendige Dämpfung der Störsignale bei verschiedenen Nutzsignalen für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PEAQ	99
Tabelle 15: Nutzsignalpegel für die DAB-Untersuchungen.....	100
Tabelle 16: Parameter der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die DAB-Untersuchungen	101
Tabelle 17: Bewertung der pulsmodulierten sinusförmigen Störsignale für die DAB-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	102
Tabelle 18: Parameter der Störsignale für die DVB-T-Untersuchungen	106
Tabelle 19: Notwendige Dämpfung der Störsignale in dB für ein störungsfreies Bild bei verschiedenen Nutzsignalempfangspegeln bei 16 QAM und 64 QAM-DVB-T-Signalen.	108
Tabelle 20: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die AM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	109
Tabelle 21: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die FM-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Quasispitzenwert- (QP-) und Mittelwertdetektor (AV-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	112
Tabelle 22: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DAB-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	115
Tabelle 23: Notwendige Dämpfung der DAB-Störsignalbeispiele bei verschiedenen Nutzsignalpegeln für eine gute Empfangsqualität bei einer Bewertung mit PEAQ. Angaben in dB.....	117
Tabelle 24: Bewertung der Störsignal-Beispiele für die DVB-T-Untersuchungen mit dem Spitzenwert- (PK-), Mittelwert- (AV-) und Effektivwertdetektor (RMS-Detektor) eines Funkstörmessempfängers. Alle Angaben sind in dB μ V bzw. dB.	118

Tabelle 25: Notwendige Dämpfung der DVB-T-Störsignalbeispiele bei verschiedenen Nutzsignalpegeln für fehlerfreien Empfang. Angaben in dB.	119
Tabelle 26: Frequenzbereiche.....	139
Tabelle 27: Übertragungsmodi und -parameter bei DAB.....	139
Tabelle 28: Übertragungsmodi und -parameter bei DRM.....	140
Tabelle 29: Übertragungsmodi und –parameter bei DVB-T	140
Tabelle 30: Auswahl an Audio-Titeln aus [SQAM05]	141

Literaturverzeichnis

- Ari10 S. Arikan: Simulation der Auswirkungen von EMV-Störungen auf digitale Funkdienste. Hrsg.: Universität Bremen: Diplomarbeit. 2010.
- Bra04 S. Braun, F. Krug, P. Russer: A novel automatic Digital Quasi-Peak Detector for a Time Domain Measurement System. Proc. Internat. Sym. on Electromagnetic Compatibility 2004. 2004, S. 919 - 924, ISBN: 0-7803-8443-1.
- Bro01 I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: Taschenbuch der Mathematik. 5. Auflage, Thun, Frankfurt a. M., Verlag Harri Deutsch. 2001, ISBN: 3-8171-2005-2.
- Bur41 C. M. Burrill: Progress in the Development of Instruments for Measuring Radio Noise. Proceedings of the IRE. 1941, *Vol. 29, Issue 8*, S. 433 – 442.
- Bur42 C. M. Burrill: An Evaluation of Radio-Noise-Meter Performance in Terms of Listening Experience. Proceedings of the IRE. 1942, *Vol. 30, Issue 10*, S. 473 – 478.
- Cam09 D. Campbell, E. Jones, M. Glavin: Audio quality assessment techniques - A review, and recent developments. Signal Processing. 2009, *Vol. 89, Issue 8*, S. 1489 – 1500.
- Cam62 C. Campopiano, B. Glazer: A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme. IRE Transactions on Communication Systems. 1962, *Vol. 10, Issue 1*, S. 90 - 95, ISSN: 0096-2244.
- CISPR 16-1-1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus. Hrsg.: International Electrotechnical Commission (IEC): Edition 3.0. 2010, ISBN 2-8318-1071-8.
- CISPR 25 Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. Hrsg.: International Electrotechnical Commission (IEC): Edition 3.0. 2008, ISBN: 2-8318-9664-9.

- DeLi08 A. A. De Lima, F. P. Freeland, R. A. de Jesus, B. C. Bispo, L. W. P. Biscainho, S. L. Netto, A. Said, A. Kalker, R. Schafer, B. Lee, M. Jam: On the Quality Assessment of Sound Signals. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, 2008, S. 416 - 419, ISBN: 978-1-4244-1683-7.
- EBU Tech 3330 Technical Bases for DRM Services Coverage Planning. Hrsg.: European Broadcasting Union (EBU): EBU Tech 3330. 2008, <http://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3330.pdf>.
- ETSI EN 300 401 Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. Hrsg.: European Telecommunications Standards Institute (ETSI): European Standard (EN) 300 401 V1.4.1, 2006.
- ETSI EN 300 744 Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. Hrsg.: European Telecommunications Standards Institute (ETSI): European Standard (EN) 300 744 V1.6.1, 2009.
- ETSI ES 201 980 Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification. Hrsg.: European Telecommunications Standards Institute (ETSI): ETSI Specification ES 201 980 V3.1.1, 2009.
- Fas07 H. Fastl, E. Zwicker: Psychoacoustics Facts and Models. Third Edition. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2007, ISBN: 3-540-23159-5.
- Fis09 W. Fischer: Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, ISBN: 978-3-540-88195-7.
- Gau10 S. Gauss, T. Müller, T. Roll, J. Wünschmann, A. Rothermel: Objective video quality assessment of mobile television receivers. Proc. IEEE 14th Int. Consumer Electronics (ISCE) Symp. Braunschweig, 2010, S. 1 - 6, ISBN: 978-1-4244-6671-9, DOI: 10.1109/ISCE.2010.5523722.
- Gra53 F. Gray: Pulse Code Communication. Hrsg.: United States Patent Office: U.S. Patent 2,632,058. 1953.

- IEC 60315 Methods of measurement on radio receivers for various classes of emission. Hrsg.: International Electrotechnical Commission: IEC International Standard IEC 60315, Second Edition, 1988.
- ISO/IEC 11172-3 Information technology - Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 MBit/s - Part 3: Audio. Hrsg.: International Organization for Standardization/ International Electrotechnical Commission: ISO/IEC International Standard ISO/IEC 11172-3, First Edition, 1993.
- ISO/IEC 13818-1 Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information. Hrsg.: International Organization for Standardization/ International Electrotechnical Commission: ISO/IEC International Standard ISO/IEC 13818-1, Third Edition, 2007.
- ISO/IEC 14496-3 Information technology - Coding of audio-visual objects - Part 3: Audio. Hrsg.: International Organization for Standardization/ International Electrotechnical Commission: ISO/IEC International Standard ISO/IEC 14496-3, Fourth Edition, 2009.
- Kab03 P. Kabal: An Examination and Interpretation of ITU-R BS.1387: Perceptual Evaluation of Audio Quality. Hrsg.: Dept. Electrical & Computer Engineering, McGill University: MMSP Lab Technical Report. 2003, <http://www-mmssp.ece.mcgill.ca/documents/Reports/index.html>.
- Kam96 K. D. Kammeyer: Nachrichtenübertragung. 2. Auflage, Stuttgart, B. G. Teubner-Verlag, 1996, ISBN: 3-519-16142-7.
- Kru02 F. Krug, P. Russer: Ultra-fast broadband EMI measurement in time domain using FFT and Periodogram. 2002 IEEE International Symposium On Electromagnetic Compatibility. Minneapolis, USA, 2002, S.577-582, ISBN: 0-7803-7264-6, DOI: 10.1109/IEMC.2002.1032655.
- Kru03 F. Krug, T. Hermann, P. Russer: A Novel EMC Testing Technique based on Time Domain Methods. 19th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics. Monterey, 2003 S.716-723.
- Lan91 F. Landstorfer, H. Graf: Rauschprobleme der Nachrichtentechnik. 2. Korrigierte Auflage, München, Oldenbourg Verlag, 1991.

- Lin04 R. C. Lind, H. W. Yen, D. L. Welk: Evolution of the CarRadio: From VacuumTubes to Satellite and Beyond. Hrsg.: Convergence Transportation Electronics Association, USA: Convergence 2004 Vehicle Electronics to Digital Mobility. Detroit, Michigan, USA, 2004.
- May01 M. O. Mayer, T. Hirschberg: Verfahren für eine akustische Beurteilung von Störungen im Kraftfahrzeug. Elektromagnetische Verträglichkeit in der KFZ-Technik. GMM-Fachbericht 35. Berlin, Offenbach, VDE Verlag, 2001, ISBN: 3-8007-2633-5.
- Mein92 H. Meinke, F. W. Gundlach: Hrsg.: K. Lange, K.-H. Löcherer: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1992. ISBN: 3-540-54716-9.
- Mid77 D. Middleton: Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1977, Vol. EMC-19, Issue: 3, S. 106 - 127, ISSN: 0018-9375, DOI: 10.1109/TEMC.1977.303527.
- Mid79 D. Middleton: Procedures for Determining the Parameters of the First-Order Canonical Models of Class A and Class B Electromagnetic Interference [10]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1979, Vol. EMC-21, Issue: 3, S. 190 - 208, ISSN: 0018-9375, DOI: 10.1109/TEMC.1979.303731.
- Moh00 P. V. Mohan, J. J. Yuzwalk, R. S. Odrakiewicz, G. G. Goodman, D. E. Wright, D. A. Skop, A. Xiong, D. L. McMillian: Vehicle audio distortion measurement system. Hrsg.: United States Patent Office: U.S. Patent 6 137 992, 2000.
- Nyq28 H. Nyquist: Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. Transactions on the American Institute of Electrical Engineers. 1928, Vol. 47, Issue 2, S. 617 - 644, ISSN: 0096-3860, DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024.
- Rec.BS1116-1 Methods for the Subjective Assessment of small Impairments in Audio Systems including Multichannel Sound Systems. Hrsg.: International Telecommunications Union (ITU) – Radio Communications Sector: ITU-R Recommendation BS.1116-1. 1997.

- Rec.BS1284-1 General methods for the objective assessment of sound quality. Hrsg.: Hrsg.: International Telecommunications Union (ITU) – Radio Communications Sector: ITU-R Recommendation BS.1284-1. 2003.
- Rec.BS1387-1 Method for objective measurements of perceived audio quality. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU) – Radio Communications Sector: ITU-R Recommendation BS.1387-1. 2001.
- Rec.BS450-3 Transmission standards for FM sound broadcasting at VHF. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU) – Radio Communications Sector: ITU-R Recommendation BS.450-3, 2001.
- Rec.BS643-2 System for automatic tuning and other applications in FM radio receivers for use with the pilot-tone system. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU) – Radio Communications Sector: ITU-R Recommendation BS.643-2, 1995
- Rec.P800 Methods for subjective determination of transmission Quality. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU) - Telecommunication Standardization Sector: ITU-T Recommendation P.800. 1996
- Rec.P800.1 Mean Opinion Score (MOS) terminology. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU), - Telecommunication Standardization Sector. ITU-T Recommendation P.800.1. 2006.
- Rec.P862 Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU), - Telecommunication Standardization Sector. ITU-T Recommendation P.862. 2001.
- Rec.P862.2 Wideband extension to Recommendation P.862 for the assessment of wideband telephone networks and speech codecs. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU), - Telecommunication Standardization Sector. ITU-T Recommendation P.862.2, 2007.
- Rec.P862Amendm.2 Amendment 2: Revised Annex A – Reference implementations and conformance testing for ITU-T Recs P.862, P.862.1 and P.862.2. Hrsg.: International Telecommunication Union (ITU), - Telecommunication Standardization Sector. ITU-T Recommendation P.862, 2005. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200511-I!Amd2>.

- Schm07 U. Eysel, H.-P. Zenner: Kap. 16 Die Kommunikation des Menschen Hören und Sprechen bzw. Kap. 18 Sehen und Augenbewegung. Hrsg.: R. F. Schmidt, F. Lang, Physiologie des Menschen, Band: III Allgemeine und Spezielle Sinnesphysiologie, 30. Auflage, Heidelberg, Springer Medizin Verlag, 2007, ISBN: 978-3-540-32908-4.
- Schw07 A. J. Schwab, W. Kürner: Elektromagnetische Verträglichkeit. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, ISBN: 978-3-540-42004-0.
- Sha07 R. S. Shatara, J. J. Marrah: Automotive FM Diversity Systems, Part II: Analog Systems. Hrsg.: SAE International, SAE 2007 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 2007, DOI: 10.4271/2007-01-1732.
- Sha09 R. S. Shatara, S. S. Langston, D. G. Morris, N. Bally, M. A. Boytim: Low Cost Switched Diversity System, Hrsg.: SAE International, SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems, 2009, *Vol. 2 Issue 1*, S. 328 – 335, ISSN: 1946-4622
- Shan48 C. E. Shannon: A Mathematical Theory of Communication. Hrsg.: Bell Laboratories, The Bell System Technical Journal, 1948, *Vol. 27*, S. 379 – 423, 623 – 656.
- Shan49 C. E. Shannon: Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IRE, 1949, *Vol. 37, Issue 1*, S. 10 - 21, ISSN: 0096-8390, DOI: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
- SQAM05 Sound Quality Assessment Material - Users' handbook for EBU SQAM CD. Hrsg.: European Broadcasting Union (EBU), EBU - Tech. 3253, 2005.
- Ste98 M. Stecher: Weighting of interference according to its effect on digital communication services. 1998 IEEE International Symposium on EMC, *Vol. 1*, 1998, S. 69 – 73, ISBN: 0-7803-5015-4, DOI: 10.1109/ISEMC.1998.750062.
- Ste03 M. Stecher: A weighting detector for the effect of interference on digital radiocommunication services. IEEE International Symposium on EMC, Istanbul, 2003, S. 449 – 452, ISBN: 0-7803-7779-6, DOI: 10.1109/ICSMC2.2003.1428288.

- Ste10 H. Steffen: Analyse von elektromagnetischen Störaussendungen eines KFZs auf dessen analogen Radioempfang. Fachhochschule Bielefeld, Diplomarbeit, 2010.
- Sten00 P. F. Stenumgaard: Using the Root-Mean-Square Detector for Weighting of Disturbances According to Its Effect on Digital Communication Services. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, *Vol. 42 Issue 4*, S. 368 – 375, ISSN: 0018-9375, DOI: 10.1109/15.902306.
- UN/ECE R10 Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit. Hrsg: Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), Revision 3, 2010.
- VDE 0870 Elektromagnetische Beeinflussungen (EMB), Hrsg.: Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE), Berlin, VDE-Verlag, 1984.
- Weg09 W. Wegst, J. Waldmann, A. Enders: Audio Test Setup for EMC Interference Assessment by Listeners. 20th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, 2009, S. 205 – 208, ISBN: 978-3-9523286-4-4, DOI: 10.1109/EMCZUR.2009.4783426.
- Weg10 W. Wegst, J. Waldmann, M. Aidam, A. Enders: Untersuchungen zur automatisierten Audiobewertung von EMV-Störungen. EMV 2010 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, VDE Verlag, 2010, S. 711 – 718, ISBN: 978-3-8007-3206-7.
- Wik06 K. Wiklundh: Relation between the amplitude probability distribution of an interfering signal and its impact on digital radio receivers, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, *Vol. 48, Issue 3*, S 537 – 544, ISSN: 0018-9375, DOI: 10.1109/TEMC.2006.877782.
- Wik10 K. C. Wiklundh: An Approach to Using Amplitude Probability Distribution for Emission Limits to Protect Digital Radio Receivers Using Error-Correction Codes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, *Vol. 52, Issue 1*, S. 223 – 229, ISSN: 0018-9375, DOI: 10.1109/TEMC.2009.2037217.
- Xio06 F. Xiong: Digital Modulation Techniques. Second Edition, Norwood, MA, USA, Artech House Verlag, 2006, ISBN: 1-58053-863-0.

