Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Nachrichtentechnik
Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Entwicklung und Fertigung eines portablen Hörfunksenders zur Ausstrahlung von DAB und DRM+ im VHF-Band III

Abschlussbericht
von

Michael Kröger

Betreut durch:

Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky (TU-KL)
Dipl.-Ing. Joachim Lehnert (LMK)
Dipl.-Ing. Mark Rosenbaum (TU-KL)
Dr.-Ing. Wolfgang Sauer-Greff (TU-KL)

Kaiserslautern, den 27. August 2014

Zusammenfassung

Zu den vielfältigen Gründen, weshalb insbesondere lokale Hörfunkanbieter einen Einstieg in den digitalen terrestrischen Rundfunk mit den digitalen Systemen DAB und DAB+ oder auch mit Digital Radio Mondiale (im Mode E „DRM+“) scheuen, gehören auch die hohen finanziellen Aufwendungen für den Senderbetrieb. Motiviert durch positive Erfahrungsberichte aus der Schweiz über kostengünstige Sender unter Verwendung eines von opendigitalradio.org weiterentwickelten Software Defined Radio (SDR) wurde ein Kooperationsvorhaben initiiert, um aus verfügbarer Standardhardware und dieser sowie anderer OpenSource-Software einen standardkonformen portablen Hörfunksender zu realisieren, der mit ca. 100 W Sendeleistung eine lokale Programmversorgung mit DAB gewährleisten kann. Im Auftrag der Landeszentrale für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz und mit Unterstützung der FH Kaiserslautern sowie des Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen wurde dieses Projekt am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Kaiserslautern im Rahmen einer Studienarbeit realisiert.

In diesem Bericht werden die Motivation, das Konzept, der Aufbau, die Funktionen von Hard- und Software sowie die Ergebnisse der Labormessungen mit dem Hörfunksender vorgestellt. Insbesondere wird auf die Problematik von Leistungsverstärkern bei der Einhaltung regulatorischer Vorgaben wie die Spektralmaske eingegangen. Auch wird aufgezeigt, wie die als „mmbTools“ bezeichnete OpenSource-Software von opendigitalradio.org für DAB und als Ergänzung hierzu die DRM-Software „SPARK“ in den Sender eingebunden sind. Im Detail ist dokumentiert, wie die Einzelkomponenten und das Gesamtsystem durch Laboruntersuchungen auf ihre Eignung hin getestet und die erzielten Messergebnisse bewertet wurden. Die Standardkonformität des Gesamtsystems bezüglich seiner HF-Eigenschaften wurde von der BNetzA bestätigt.

Um eine leichte Transportierbarkeit sowie geringe Distanzen des Sendeverstärkers zur Antenne einerseits und der DAB-Multiplexerzeugung zu einem Rundfunkstudio andererseits zu ermöglichen, wurde das aus der Multiplex- und der HF-Sendeeinheit bestehende Gesamtsystem in zwei rollbaren Flightcases untergebracht, die über ein Ethernetkabel miteinander verbunden sind. Zur Stromversorgung genügt je eine haushaltsübliche Steckdose.

In der Multiplexeinheit sind das Audio-Interface sowie Analog-, Digital- und Netzwerkanschlüsse, die Bedienkonsole mit Tastatur und Monitor sowie ein Linux-Server untergebracht, auf dem u.a. die Audio-Mischer und die SDR-Software ausgeführt werden. Für DAB generieren die Programme „DABMux“ der „mmbTools“ den standardkonformen Multiplex-Datenstrom und „DABMod“ die Werte des DAB-Basisbandsendesignals, das als IP-Datenstrom an den DA-Wandler und Aufwärtsmischer in der HF-Sendeeinheit übertragen werden. Diese Aufgabe übernimmt ein Universal Software Radio Peripheral (USRP) von ETTUS Research/National Instruments. Das USRP-Sendesignal gelangt auf einen in seiner Leistung per Softwareinterface einstellbaren Linearverstärker mit entsprechenden Mess- und Schutzschaltungen. Zur Einhaltung der Spektralvorgaben ist vor dem Antennenkabel und dem Sendedipol ein auf den verwendeten Kanal abgestimmtes Maskenfilter eingeschleift. Entsprechendes gilt für den DRM-Datenstrom mit der SDR-Software „SPARK“. Sowohl der Leistungsverstärker als auch die einzelnen Softwarekomponenten sind über die Konsole der Multiplexeinheit bedien- und überwachbar.

In dem Projekt wurde nachgewiesen, dass durch das hier verwendete SDR-Konzept ein standardkonformes DAB-Signal generiert werden kann. Für den Linux-Server wurde auf eine Consumer-CPU (z.B. Intel Core i5/i7) mit leistungsfähigem integriertem Grafikprozessor zurückgegriffen, um die Erzeugung der Multiplexsignale nicht durch die Grafikausgabe der Bediensoftware zu beeinträchtigen. Wesentliche Erkenntnis bezüglich des Linearverstärkers war, dass auf alle Fälle ein qualitativ hochwertiger Leistungsverstärker und ein nachfolgendes Maskenfilter eingesetzt werden müssen, um die regulatorischen Vorgaben für das HF-Signal einzuhalten. Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit müssen geeignete Schutzschaltungen für den Leistungsverstärker ebenso wie eine ausreichend dimensionierte Sendeantenne vorgesehen werden.

Mit den eingesetzten Bauteilen konnte gezeigt werden, dass ein standardkonformer 100 W DAB-Sender mit Netto-Hardware-Kosten von ca. 10.000 € realisierbar ist. Durch Verzicht auf nicht zwingend benötigte Komponenten, z.B. hochwertige Audiointerfaces, lassen sich die Kosten im Bereich des Multiplexgenerators weiter senken, jedoch können die Kosten der VHF-Sendeeinheit nicht vermindert werden, da bei Einsatz von minderwertigerem HF-Equipment die Gefahr besteht, die erforderliche Qualität des Sendesignals nicht zu erreichen.

Das Gesamtsystem des digitalen Hörfunksenders wurde im Zuge des Symposiums „Einstieg in die digitale Verbreitung über DAB und DRM+ für den lokalen Hörfunk und Bürgermedien - Meilensteine aus Rheinland-Pfalz, Deutschland und Europa“ am 03.07.2014 als Demonstrator betrieben und zuverlässig DAB und DRM+ verbreitet.

Somit wurde das wesentliche Projektziel erreicht. Lediglich die Nutzung von Datendiensten wie MOT-Slideshow oder Dynamic Label konnten zum Zeitpunkt der Laboruntersuchungen nicht erfolgreich implementiert werden. Zwischenzeitlich sind jedoch entsprechende Erweiterungen der „mmbTools“ durch opendigitalradio.org weit fortgeschritten. Da das Fehlen einer einheitlichen grafischen Oberfläche zur Senderbedienung Detailwissen erfordert, sollte eine solche Oberfläche in einem Folgeprojekt realisiert werden. Auch ist die grundsätzliche Unterstützung des Gleichwellennetzbetriebs in den „mmbTools“ bereits enthalten, sodass diese Funktionalität in einem Folgeprojekt implementiert und erprobt werden könnte. Des Weiteren erlaubt das hier realisierte SDR-Konzept mit vergleichsweise wenig Aufwand weitere softwarebasierte Rundfunksysteme wie FM-Radio in den portablen Hörfunksender zu integrieren.

Inhaltsverzeichnis

1. KONZEPT 3

1.1. PROJEKTZIEL 3

1.2. VORGABEN FÜR DAS GERÄT 3

1.3. KONZEPTION 5

2. SYSTEMBESCHREIBUNG 7

2.1. HARDWAREKOMPONENTEN 7

2.1.1. MULTIPLEXGENERATOR 7

2.1.2. VHF-SENDEEINHEIT 10

2.2. SOFTWARE 13

2.2.1. BETRIEBSSYSTEM 13

2.2.2. AUDIOSOFTWARE 14

2.2.3. DAB-SOFTWARE 16

2.2.4. DRM+-SOFTWARE: SPARK 17

2.2.5. CDM20830 18

2.2.6. SOFTWAREAUFBAU 18

2.3. AUFBAU 20

2.3.1. MULTIPLEXGENERATOR 20

2.3.2. VHF-SENDEEINHEIT 22

2.4. SCHNITTSTELLEN 23

2.4.1. AUDIOSCHNITTSTELLE 23

2.4.2. DATENSCHNITTSTELLE 25

2.4.3. KONFIGURATIONSSCHNITTSTELLE 25

2.4.4. SCHNITTSTELLE ZWISCHEN MULTIPLEXGENERATOR UND VHF-SENDEEINHEIT 25

2.4.5. SENDERAUSGANG 26

2.5. BENUTZEROBERFLÄCHE 26

2.5.1. AUDIOSOFTWARE 26

2.5.2. STEUERUNG DER ODR-MMBTOOLS MITTELS SKRIPT 26

3. LABORUNTERSUCHUNGEN 37

3.1. KONZEPT 38

3.2. MESSHARDWARE 39

3.2.1. DAB-SCOUT 2 39

3.2.2. SDB601 39

3.2.3. FHG CONTENTSERVER 39

3.2.4. ETL 39

3.2.5. SMBV 100A 39

3.2.6. SMU 200A 39

3.2.7. FSV 7 39
3.2.8. FSP 30 40
3.3. MESSUNGEN 41
3.3.1. MULTIPLEXGENERATOR 41
3.3.2. VHF-SENDEEINHEIT 43
3.3.3. MULTIPLEXGENERATOR UND VHF-SENDEEINHEIT 56

4. BEWERTUNG 74
4.1. ERFÜLLUNG DER VORGABEN 74
4.2. KOSTEN 77
4.3. PROBEABSTRAHLUNG UND GESAMTSYSTEMTEST 78

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 79
5.1. FAZIT 79
5.2. AUSBLICK 79

1 PRÜFUNGSINHALT 89

2 SENDERAUFBAU, EINSATZZWECK 89

3 VORGEHENSWEISE BEI DER MESSUNG 91

4 MESSAUFBAUTEN 91
4.1 BESTIMMUNG DER SENDERAUSGANGSLEISTUNG 91
4.2 BESTIMMUNG DER SEITENBANDSPEKTREN 91

5 DAB 92
5.1 SENDERAUSGANGS- BZW. STRAHLUNGSLEISTUNG 92
5.2 SPEKTRUMSMASKE 93
5.3 SONSTIGES 94

6 DRM 95
6.1 SENDERAUSGANGSLEISTUNG 95
6.2 SPEKTRUMSMASKE 96
6.3 SONSTIGES 97

7 BETEILIGTE PERSONEN 99

8 LISTE DER VERWENDETEN MESSGERÄTE 99

Einleitung

Für einen Umstieg von der analogen UKW- auf eine digitale Verbreitung ist es wichtig, alle Hörfunkveranstalter in ihren unterschiedlichen, medienpolitisch vorgegebenen Verbreitungsgebieten zu berücksichtigen. Zur technischen Umsetzung stehen die digitalen Rundfunksysteme Digital Audio Broadcasting (DAB/DAB+) [1] im VHF Band III und Digital Radio Mondiale (DRM im Mode E / DRM+), das im VHF-Band II (UKW-Bereich) und im VHF Band III gemeinsam mit DAB nutzbar ist, zur Verfügung. DAB ist das geeignete System zur digitalen Verbreitung vieler Programme in einem identischen, großräumigen Verbreitungsgebiet. Allerdings ist DAB für eine Abbildung der bestehenden lokalen Verbreitungsgebiete nicht optimal, da die geringe Programmanzahl im lokalen Gebiet den Einsatz unwirtschaftlich und frequenzunökonomisch macht und der hierfür auch keine ausreichenden Frequenzressourcen im VHF-Band III zur Verfügung stehen [1]. Dahingegen eignet sich DRM+ gut zur digitalen Verbreitung regionalisierter und lokaler Angebote und könnte perspektivisch, zusätzlich zu den nationalen, landesweiten und regionalen DAB-Angeboten, eine Chance für den lokalen Hörfunk und von Bürgermedien zum Umstieg in die digitale Verbreitung eröffnen.

Die positiven Erfahrungen aus Dänemark [2] und der Schweiz [3] mit der lokalen Ausstrahlung von DAB und erfolgreichen Testausstrahlungen mit DRM+ [4] führten zu der Zielsetzung, aus verfügbarer Standardhardware und OpenSource-Software einen standardkonformen portablen Hörfunksender preiswert für DAB zu entwickeln, der leicht auf weitere Rundfunksysteme wie DRM+ zu erweitern ist. Insbesondere im Hinblick auf die Hardware soll durch hochwertige Komponenten eine gute Qualität erreicht (z.B. Audiointerfaces) und durch ein leistungsfähiges Rechnersystem auch eine Erweiterung und Fortentwicklung ermöglicht werden.

Zum anderen soll ausgehend von dem Projekt „Entwicklung und Fertigung eines Multinorm-Empfängers zum Empfang von DRM im Mode E (DRM+) gemeinsam mit DAB+ und UKW-FM und von weiteren Hörfunksystemen“ an der TU Kaiserslautern aus den Jahren 2012/2013 [5] ein DRM+-Sender als Demonstrator implementiert werden.

Diese Arbeit wurde als Kooperationsprojekt der TU Kaiserslautern, der Landeszentrale für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz sowie der FH Kaiserslautern umgesetzt. Unterstützt wurden die Projektpartner dabei von Rohde & Schwarz, dem Institut für Rundfunktechnik, dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, der Firma Spinner, der Bundesnetzagentur sowie von Michael Feilen und Opendigitalradio.org.

[1] Die Bezeichnung DAB beinhaltet im Folgenden sowohl das klassische DAB-System mit MPEG1-Audio als auch die Erweiterung DAB+ mit MPEG4-Audio

Die Bearbeitungszeit des Gesamtprojekts belief sich auf den Zeitraum vom 14.10.2013 bis zum 29.08.2014. Es war dabei, wie in Tabelle 1 zu sehen, in vier Arbeitspakete aufgeteilt:

Tabelle 1: Arbeitsaufteilung des Projekts

AP	Aufgabe	Zeitdauer
1	Erstellung eines Konzepts	14.10.13 - 12.11..13
2	Versuchsaufbau des Senders und Labormessungen	04.11.13 – 16.04.14
3	Aufbau des Hörfunksenders als Demonstrator	25.11.13 - 07.03.14
4	Abschlussbericht	bis 27.08.14

Der Abschlussbericht zu diesem Projekt gliedert sich in die folgenden fünf Kapitel:

Kapitel 1 dieses Dokuments erläutert das Konzept für den Aufbau des Multiplexgenerators und der VHF-Sendeeinheit für DAB einschließlich der Option für DRM+ und FM.

Kapitel 2 zeigt davon ausgehend auf, welche Komponenten erforderlich sind, um den DAB-Sender zu realisieren und welche optional für DRM+ und FM benötigt werden. Des Weiteren werden der Aufbau des Demonstrators sowie die zum Betreiben des Hörfunksenders nötigen Arbeitsschritte beschrieben.

Kapitel 3 erläutert die Vorgehensweise und die erforderlichen Messaufbauten zur funktionstechnischen Überprüfung des Demonstrators hinsichtlich einschlägiger Normen und Empfehlungen. Die Ergebnisse der entsprechenden Laboruntersuchungen werden vorgestellt und diskutiert.

Kapitel 4 beschreibt die Ergebnisse des Projekts und gibt eine Bewertung des realisierten Demonstrators.

Kapitel 5 fasst die wichtigsten Punkte des Projekts zusammen und gibt einen Ausblick auf Aspekte, die in zukünftigen Projekten bearbeitet werden sollten.

1. Konzept

Ausgehend von den Projektvorgaben wird in diesem Kapitel die Konzeption des portablen Senders für DAB erläutert. Hieraus leiten sich die konkreten Vorgaben für das Gerät ab, das detailliert im zweiten Kapitel beschrieben wird.

1.1. Projektziel

Ziel dieses Projekts ist es, einen Hörfunksender mit Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit auf Basis von auf dem Markt erhältlichen Komponenten zu entwickeln, labortechnisch zu vermessen und betriebssicher als Demonstrator zu bauen, mit dem Hörfunkprogramme und Zusatzdienste folgender Hörfunksysteme normgerecht ausgestrahlt werden können:

- DAB im VHF-Band III (174 - 230 MHz), nach Verfügbarkeit einer Encoder-Software auch DAB+

Der Hörfunksender ist so zu konzeptionieren, dass eine Erweiterung zu einem späteren Zeitpunkt für die Ausstrahlung folgender Hörfunksysteme machbar ist:

- DRM im Mode E (DRM+) im VHF-Band III (174 - 230 MHz)
- DRM im Mode E (DRM+) im VHF-Band II (87,5 - 108 MHz)
- UKW-FM mit RDS im VHF-Band II (87,5 - 108 MHz)

Die Komponenten des Hörfunksenders (Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit) sollen in transportablen Einheiten eingebaut werden, um eine Inbetriebnahme für eine Hörfunkausstrahlung an verschiedenen Orten bei besonderen Veranstaltungen zu ermöglichen.

Der Multiplexgenerator für DAB soll auf Basis von verfügbarer OpenSource-Software (mmbTools der CRC in Kanada, die bereits von nichtkommerziellen Radios in Dänemark und künftig auch in der Schweiz eingesetzt werden) realisiert werden, der die Multiplex-Signale an eine kompakten VHF-Sendeeinheit mit Signalgenerator (USRP), Linearverstärker, ggf. Antennenfilter und Antenne zur Ausstrahlung für eine lokale Versorgung übergibt.

1.2. Vorgaben für das Gerät

An den transportablen DAB-Sender sind folgende Vorgaben gestellt, die sich gliedern in Anforderungen zu der verwendeten Hardware, sowie in Vorgaben zu Untersuchungen, die mit dem Sender durchgeführt werden sollen.

Die Vorgaben an die Hardware sind:

a) Bis zu 8 Stereo-Audiokanäle sollen im DAB-Multiplexer verarbeitet werden. Für die Audio-Schnittstelle soll optional ein mehrkanaliger Audio-Mischer mit Effektgerät (Limiter u.ä.) zur Anpassung der Eingangssignale genutzt werden. Für die Eingangssignale sind analoge und digitale Anschlüsse gem. AES/EBU vorzusehen. Auch ist optional die Messung und Anpassung der Audiosignale nach der EBU-Richtlinie R 128 aufzunehmen.

b) Im Multiplexgenerator sollen Datendienste verwaltet und verarbeitet werden, die auf den DAB/DRM-Standards basieren, sofern mit der verwendeten Software umsetzbar. Ein Datenimport über RSS Newsfeed u.ä. sollte optional möglich sein.

c) Der Multiplexgenerator für DAB soll auf Basis eines Linux-Computers im 19 Zoll-Format mit den mmB-Tools der CRC und weiterer Software für die Signalverarbeitung aufgebaut werden. Optional ist eine Weboberfläche für die Anzeige von Zuständen und Bedienereingaben vorzusehen.

d) Für die Leistungsdimensionierung des VHF-Band III-Senders ist zu berücksichtigen, dass die Sendeeinheit mit USRP, Linearverstärker und weiteren Kleingeräten (z.B. Netzteile) an einer haushaltsüblichen Netzversorgung mit einer maximalen Absicherung von 10 A betrieben werden soll.

e) Der Linearverstärker soll eine Absicherung gegen Überlastung bei Fehlanpassung der Antenne beinhalten.

f) Die Sendeleistung soll variabel einstellbar sein.

g) Der Linearverstärker ist so auszuwählen, dass die Spektralmasken der genannten Hörfunksysteme am Ausgang eingehalten und somit auf ein Antennenfilter verzichtet werden kann. Sofern doch ein Antennenfilter eingesetzt werden muss, ist ein DAB-Block zu definieren (nach Absprache mit der BNetzA der DAB-Block 12A).

h) Zwischen Linearverstärker und Antenne ist ein Richtkoppler für Messzwecke einzubauen. Ein Messgerät für die Anzeige der Anpassung (VSWR) und der Ausgangsleistung ist vorzusehen.

i) Der Multiplexgenerator und die abgesetzte VHF-Sendeeinheit sollen in transportable Flightcases untergebracht werden. Es ist zu prüfen, ob für die VHF-Sendeeinheit eine Belüftung vorgesehen werden muss.

j) Für die Ausführung der Senderantenne und der Kabelzuführung von der VHF-Sendeeinheit zur Antenne (z.B. Länge, Beschaffung, Transport, Sicherung) sind Vorschläge zu unterbreiten.

An den Komponenten sind folgende Arbeiten vorzunehmen:

a) Zu beschreiben und festzulegen sind die Einstellmöglichkeiten der DAB-Übertragungsraten, des Fehlerschutzes u.ä. in den mmB-Tools für die Ausstrahlung eines DAB-Signals (Audio in MPEG-1 Layer II) und für die Ausstrahlung eines DAB+-Signals (Audio in MPEG-4-AAC).

b) Die Schnittstelle zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendereinheit ist mit der erforderlichen Übertragungsrate zu spezifizieren. Wünschenswert ist eine Datenübergabe über das Ethernet-Protokoll. Die Möglichkeit einer Anbindung über WLAN ist optional aufzunehmen.

c) Die technischen Spezifikationen des USRP sind zu benennen.

d) Einzuhalten ist die Standardkonformität für Ausstrahlung der in Anlage 1 genannten Hörfunksysteme in den jeweiligen VHF-Bereichen. Einschlägige ETSI-Normen und ITU-Empfehlungen für die Übertragung der oben genannten Hörfunksysteme und insbesondere für die Anforderungen an VHF-Sender zur Ausstrahlung der genannten Hörfunksysteme sind in **Anlage 1** genannt.

1.3. Konzeption

Zweck des zu entwickelnden DAB-Senders ist es, eine lokale Versorgung mit digitalem Radio zu ermöglichen, insbesondere im Hinblick auf Veranstaltungsrundfunk. Dies erfordert keine großen Sendeleistungen, allerdings ist es erforderlich, das Signal möglichst hoch abzustrahlen, um das Empfangsgebiet großflächig versorgen zu können. Um jedoch die Verluste im Antennenkabel gering zu halten, sollte der Leistungsverstärker möglichst nahe an der Antenne platziert sein, beispielsweise unter dem Dach eines hohen Gebäudes. Nun ist es aber nicht praktikabel, die gesamte Übertragungstechnik im Dachgeschoss dieses Gebäudes aufzubauen. Deshalb wird der DAB-Sender auf zwei separate Gehäuse verteilt, den Multiplexgenerator und die VHF-Sendeeinheit (Bild 1).

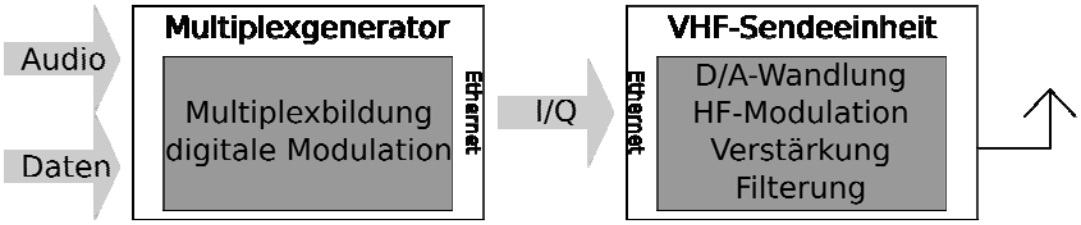


Bild 1: Aufteilung des Systems in Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit

Der Multiplexgenerator enthält die notwendige Hard- und Software zur Entgegennahme der Dienstedaten (Audio, Bilder etc.), die Audiocodierung, die Multiplexbildung, die Kanalcodierung, die OFDM-Signalgenerierung und die Berechnung der diskreten I- und Q-Werte des Basisbandsignals (Basisbandsamples), wohingegen die VHF-Sendeeinheit die Hardware zur Erzeugung der analogen Basisbandsignale und deren Hochmischen in den Sendefrequenzbereich sowie die Leistungsverstärkung beinhaltet. Die Übergabe der Basisbandsamples an die VHF-Sendeeinheit erfolgt über Gigabit-Ethernet, was eine robuste und zuverlässige Signalübertragung gewährleistet.

Der Einsatz des Senders bei Veranstaltungsrundfunk erfordert ein hohes Maß an Transportstabilität und Stabilität gegen mechanische und Witterungseinflüsse. Der Einsatz von Flightcases im 19 Zoll-Format bietet daher beides, Montagemöglichkeiten der Komponenten für einen einfachen und geschützten Transport sowie mechanischer Schutz am Veranstaltungsort. Das 19 Zoll-Format ist außerdem weit verbreitet, so sind beispielsweise viele Audiogeräte und Server in diesem Format verfügbar.

Kernstück des Multiplexgenerators soll ein Server im 19 Zoll-Format sein, auf dem ein Linux-Betriebssystem installiert ist. Die ODR-mmbTools sind OpenSource-Software und können daher kostenfrei verwendet werden. Sie übernehmen dabei die Multiplexgenerierung und Berechnung der Basisbandsamples.

Die optionale Abstrahlung von DRM oder UKW/FM kann mit der Software SPARK realisiert werden. An der Hardware des Multiplexgenerators ist hierfür keine Änderung nötig.

Bedient wird der Multiplexgenerator mittels Monitor, Tastatur sowie Trackpad, die in einer versenkbaren Konsole im 19 Zoll-Format integriert sind. Der Server kann über Patch-Kabel mit dem Internet verbunden werden, hierüber weiter Daten beziehen (Live-Stream, RSS News Feed etc.) sowie fernbedient werden. Die Audiodaten werden über ein Audiointerface entgegengenommen.

Im Flightcase der VHF-Sendeeinheit wird die Signalerzeugung durch einen USRP N200 gewährleistet. Dies ist ein kleiner, hochwertiger und vergleichsweise günstiger D/A-Wandler und Modulator, der in Software Defined Radio (SDR) Anwendungen weit verbreitet ist. Ein ähnliches Modell, der USRP B100, wurde an der TU Kaiserslautern in einem Vorgängerprojekt mit der LMK zum Aufbau eines portablen Multinorm-Empfängers für DAB/DAB+, DRM+ und FM genutzt. Der verwendete USRP N200 besitzt einen Ethernetanschluss zur Entgegennahme der Basisbandsamples. Es wäre auch möglich, die ETI–Multiplexdaten an einen zweiten Server zu übermitteln, der aus diesen zunächst die Basisbandsamples berechnet und diese per USB an den USRP B100 überträgt. Jedoch sind die Kosten für einen weiteren Server höher als die Zusatzkosten des USRP N200; außerdem hätte diese Variante keine weiteren Vorteile gegenüber dem direkten Anschluss des USRP über Ethernet.

Das HF-Ausgangssignal des USRP wird von einem Leistungsverstärker verstärkt und durch ein Stehwellenmessgerät zur Kontrolle der Impedanzanpassung geleitet. Sollten aufgrund der Nichtlinearität des Leistungsverstärkers oder aufgrund anderer Ursachen die vorgeschriebenen Spektralmasken des jeweiligen Rundfunksystems nicht eingehalten werden, so muss ein geeignetes Antennenfilter hinter den Leistungsverstärker geschaltet werden. Die Erweiterung des Systems um einen anderen Hörfunkstandard erfordert grundsätzlich eine zweite VHF-Sendeeinheit in getrenntem Flightcase. Alternativ zu zwei getrennten Gehäusen kann die zusätzliche Hardware auch in ein einziges Gehäuse integriert werden. In beiden Fällen wird nur eine Ethernetverbindung zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit/en benötigt, denn ein Sendeeinheit-seitiger Ethernet-Switch ermöglicht das Anschließen weiterer Komponenten.

Eine über das Antennenkabel angeschlossene Rundstrahl-Antenne strahlt das VHF-Sendesignal ab. Dieser Antennentyp besitzt eine omnidirektionale Abstrahlcharakteristik, was der beabsichtigten Nutzung im Veranstaltungsrundfunk zuträglich ist, da dort das Sendegebiet meist kreisförmig um den Veranstaltungsort liegt.

Bild 2 stellt den Aufbau des Systems als Schaubild dar.

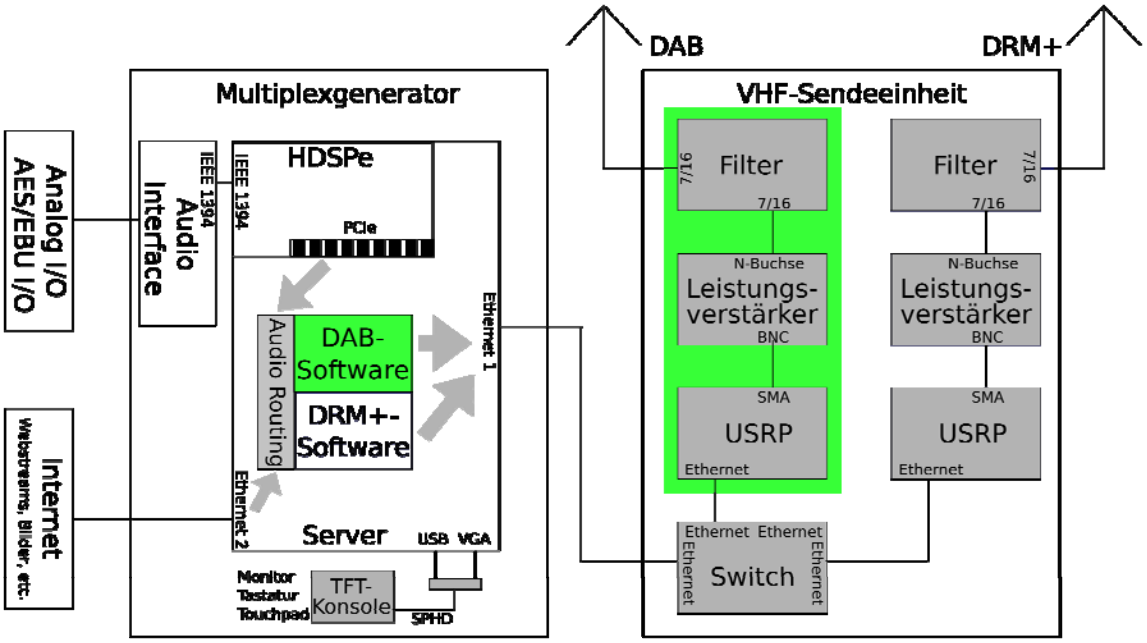


Bild 2: Konzept des Aufbaus

2. Systembeschreibung

In diesem Kapitel werden, ausgehend von dem soeben vorgestellten Konzept, die einzelnen Komponenten, die zur Realisierung benötigt werden, näher betrachtet. Die wichtigsten Eigenschaften werden kurz beschrieben und die Nettopreise ausgewiesen. Danach wird der Aufbau der beiden Teilgeräte aus den Einzelteilen beschrieben und auf nötige Erweiterungen zur Implementierung anderer Rundfunksysteme, insbesondere DRM+, eingegangen. Abschließend werden die Bedienmöglichkeiten zur Steuerung des Systems erläutert. Eine detaillierte Produktliste findet sich in der **Anlage 3**.

2.1. Hardwarekomponenten

Im Folgenden sind die Hard- und Softwarekomponenten beschrieben, die benötigt werden, um die Anforderungen an das Projekt zu erfüllen. Sie sind dabei gegliedert in Komponenten für den Multiplexgenerator sowie für die VHF-Sendeeinheit.

2.1.1. Multiplexgenerator

Der Multiplexgenerator besteht aus den nachfolgend beschriebenen Hardwarekomponenten.

2.1.1.1. Gehäuse

Für den Multiplexgenerator wird das Flightcase Thon Rack 8U Live 50 Wheels der Firma Thomann genutzt (Bild 3). Es stellt 8 Höheneinheiten (35,56 cm Höhe) Platz in einem 19 Zoll-Rack (48,26 cm Breite) zur Verfügung. Die maximale Einbautiefe für Geräte beträgt 50 cm. Durch Rollen an der Unterseite lässt sich das Case einfach transportieren.

Preis: 198,32 €

Bild 3: Thon Rack 8U Live 50 Wheels

2.1.1.2. Rack-Steckdosenleisten

Die Stromversorgung innerhalb des Racks wird mit einer Rack-Steckdosenleiste realisiert. Dazu wird eine RCS-85/SW Rack-Steckdosenleiste von Monacor verwendet (Bild 4). Sie bieten neben 8 Schutzkontaktsteckdosen auf der Rückseite einen beleuchteten Schalter auf der Vorderseite der Leiste.

Preis: 57,06 €

Bild 4: RCS-85/SW

2.1.1.3. 19 Zoll-Server

Der 19 Zoll-Server stellt das Herzstück des Multiplexgenerators dar. Er verarbeitet die Eingangsdatenströme (Audio und Zusatzdienste), codiert diese, bildet den Multiplex und berechnet die Basisbanddaten für den Signalgenerator. Der 19 Zoll-Server der Firma Junge Software (Bild 5) belegt 3 Höheneinheiten (HE) und ist mit einer Einbautiefe von 30 cm sehr kurz. Dadurch kann ein handelsübliches Flightcase verwendet werden und es muss keine Sonderanfertigung genutzt werden. Ausgestattet ist er mit einer CPU von Intel, der Core i7 4770. Sie hat 4 Kerne, die mit 3,4 GHz takten, sowie einen leistungsfähigen integrierten Grafikchip. Der Server beinhaltet 8 GB Arbeitsspeicher und zwei 128 GB SSD. Ein PCI-Express-Steckplatz ermöglicht den Einbau der HDSPe-Karte zum Betrieb des Audiointerface. Außerdem ist eine Intel Netzwerkkarte integriert, die 2 Gigabit-Ethernet-Anschlüsse bereitstellt und die CPU bei der Netzwerkanbindung entlastet. Dieser Server genügt den Leistungsanforderungen der Software und bietet genügend Reserven, um auch für spätere Erweiterungen gerüstet zu sein.

Preis: 730,00 €

Bild 5: 19 Zoll-Server

2.1.1.4. TFT-Konsole

Die Steuerung und Überwachung des Multiplexgenerators und der VHF-Sendeeinheit wird durch eine ausziehbare TFT-Konsole ermöglicht. Die TFT Console CL1000 Slideaway von Aten (Bild 6) beinhaltet einen 17 Zoll TFT-Monitor sowie Tastatur und Touchpad in einer 1 HE 19 Zoll-Rackschublade. Als Anschluss stellt die Konsole einen SPHD-Anschluss bereit, der Tastatur-, Maus- und Monitoranschluss vereint. Während des Transports ist sie komplett im Rack versenkbar, wodurch ein kompakter Aufbau erreicht wird.

Preis: 479,00 €

Bild 6: CL1000 Slideaway

2.1.1.5. Adapterkabel SPHD zu USB

Der Anschluss der TFT-Konsole erfolgt mittels des Adapterkabels 2L-5202UP von Aten (Bild 7). Dies ist ein 1,8 m langes Konverterkabel, das den Anschluss des SPHD-Steckers der TFT-Konsole an einen Standard-VGA-Monitoranschluss sowie eine USB-Buchse ermöglicht.

Preis: 11,10 €

Bild 7: Adapterkabel SPHD zu VGA / USB

2.1.1.6. Audio-Interface

Das Audio-Interface soll acht Stereo-Eingangskanäle bereitstellen. Diese sollen analog und digital gemäß AES/EBU ausgeführt sein. Diese Anforderung wird von zwei Teilinterfaces sowie einer PCI-Express-Steckkarte erfüllt. Die Aufteilung in zwei Teilinterfaces ist nötig, da kaum Interfaces erhältlich sind, die AES/EBU mit analogen Schnittstellen kombinieren, oder nur zu einem sehr hohen Preis. Die Auswahl wird zudem dadurch eingeschränkt, dass die Interfaces mit Linux kompatibel sein müssen. Wenngleich die verwendeten Geräte der Firma RME keinen offiziellen Support unter Linux erhalten, werden sie dennoch in dem Audiomodul ALSA unterstützt und können problemlos eingesetzt werden.

2.1.1.6.1. RME HDSPe PCIe

Die HDSPe PCI-Express-Steckkarte von RME (Bild 8) ermöglicht den Anschluss des Interface Multiface II derselben Firma. Sie wird in einen PCI-Express-Kartenslot des Servers eingesteckt und führt einen proprietären Anschluss, der durch einen IEEE 1394-Stecker zugänglich gemacht wird, nach außen.

Preis: 268,07 €

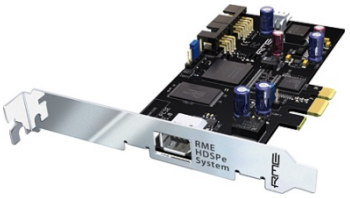


Bild 8: RME HDSPe

2.1.1.6.2. RME Multiface II

Das Multiface II von RME (Bild 9) stellt die analogen Eingänge bereit. Es bietet vier analoge Stereo-Ein- sowie Ausgänge mit einer Abtastrate von bis zu 96 kHz bei 24 bit Auflösung. Zum Anschluss eines weiteren Interfaces steht eine ADAT-Digitalschnittstelle (sowohl ADAT-Eingang, als auch ADAT-Ausgang) bereit, die zwei Stereo-Ein- und -Ausgänge bei 96 kHz, oder vier Stereo-Ein- und Ausgänge bei 48 kHz übertragen kann. An den Server wird das Multiface II mit einem IEEE 1394-Kabel über die HDSPe PCI-Express-Karte angeschlossen. Es hat eine Bauhöhe von 1 HE und eine Breite von 9,5 Zoll (halbe Rackbreite).

Preis: 532,93 €

Bild 9: RME Multiface II

2.1.1.6.3. RME ADI 4 DD

Das ADI 4 DD Interface von RME (Bild 10) wandelt je vier Stereo AES/EBU-Ein- und Ausgänge in vier Stereo ADAT-Aus- und Eingänge um. Bei Abtastraten von bis zu 48 kHz mit einer Auflösung bis zu 24 bit wird dabei nur eine ADAT-Schnittstelle gebraucht, bei höheren Abtastraten werden zwei Schnittstellen benötigt. Die AES/EBU-Ein- und Ausgänge sind an eine 25 polige D-SUB-Buchse angeschlossen. Das „ADI 4 DD“ hat eine Bauhöhe von 1 HE und eine Breite von 9,5 Zoll (halbe Rackbreite).

Preis: 486,55 €

Bild 10: RME ADI 4 DD

2.1.1.6.4. RME Uni-Rack

Das Uni-Rack von RME ermöglicht den Einbau von Multiface II und ADI 4 DD nebeneinander, sodass beide zusammen nur 1 HE Platz benötigen.

Preis: 37,82 €

2.1.1.7. 19 Zoll Steckfeld

Es werden zwei Stück 19 Zoll Stecker-Panel 2U von DAP Audio benötigt, um die Audio- und Ethernetverbindungen an der Rückseite des Racks auf die entsprechenden Stecker aufzulegen. Sie stellen jeweils 24 Bohrungen zu Verfügung.

2.1.2. VHF-Sendeeinheit

Nachfolgend sind die Einzelkomponenten zum Bau der VHF-Sendeeinheit beschrieben.

2.1.2.1. Gehäuse

Für den Multiplexgenerator wird ein Flightcase genutzt, das von der Firma DE Casebuilder.com GmbH auf Kundenwusch gebaut wurde. Es stellt 8 Höheneinheiten (35,56 cm Höhe) Platz in einem 19 Zoll-Rack (48,26 cm Breite) zur Verfügung. Die maximale Einbautiefe für Geräte beträgt 90 cm. Durch Rollen an der Unterseite lässt sich das Case einfach transportieren.

Preis: 358,31 €

2.1.2.2. Rack-Steckdosenleiste

Die Stromversorgung innerhalb des Racks wird mit einer Rack-Steckdosenleiste realisiert. Dazu wird eine RCS-85/SW Rack-Steckdosenleiste von Monacor verwendet. Sie bieten neben acht Schutzkontaktsteckdosen auf der Rückseite einen beleuchteten Schalter auf der Vorderseite der Leiste.

Preis: 57,06 €

2.1.2.3. USRP

Als D/A-Wandler und HF-Modulator wird ein „Universal Software Radio Peripheral“ (kurz USRP) genutzt. Es gibt verschiedene Modelle, die sich hinsichtlich ihrer Ausstattung und Fähigkeiten unterscheiden. Hier werden zwei Varianten näher betrachtet.

2.1.2.3.1. USRP N200 + WBX 50-2200 MHz Rx/Tx

Der USRP N200 der Firma Ettus Research (Bild 11) ist ein D/A-Wandler und Modulator, der die vom Multiplexgenerator berechneten I/Q-Basisband-Daten in analoge HF-Signale wandelt. Die Erweiterung durch das Daughterboard WBX 50-2200 MHz Rx/Tx ermöglicht den Betrieb im Frequenzbereich von 50 MHz bis 2,2 GHz. Die Eingangsdaten bezieht der USRP über eine Gigabit-Ethernet Schnittstelle mit einer Datenrate bis zu 50 MS/s, und die Ausgangssignale werden über eine SMA-Buchse bereitgestellt. Die Abtastrate des D/A-Wandlers beträgt für I/Q jeweils 400 MS/s. Außerdem lässt er sich um ein GPDSO Modul erweitern, um die Referenzfrequenz mit dem GPS-Standard zu synchronisieren. Die Breite des Geräts beträgt 16,0 cm und die Höhe beträgt 5,0 cm.

Bild 11: USRP N200

Preis: 1566,00 €

2.1.2.3.2. USRP B100 + WBX 50-2200 MHz Rx/Tx

Der USRP B100 der Firma Ettus Research (Bild 12) ist ein D/A-Wandler und Modulator, der die vom Multiplexgenerator berechneten I/Q-Basisband-Daten in analoge HF-Signale wandelt. Die Erweiterung durch das Daughterboard WBX 50-2200 MHz Rx/Tx ermöglicht den Betrieb im Frequenzbereich von 50 MHz bis 2,2 GHz. Die Eingangsdaten bezieht der USRP über eine USB-Schnittstelle mit einer Datenrate bis zu 16 MS/s, und die Ausgangssignale werden über eine SMA-Buchse bereitgestellt. Die Abtastrate des D/A-Wandlers beträgt für I/Q jeweils 128 MS/s. Außerdem verfügt der USRP B100 über Eingänge für einen 10 MHz-Referenztakt und einen Sekundenimpuls-Eingang zum Synchronisieren. Die Breite des Geräts beträgt 16,0 cm und die Höhe beträgt 5,0 cm.

Bild 12: USRP B100

Preis: 925,00 €

2.1.2.4. Leistungsverstärker

Der Leistungsverstärker ist eine Komponente, die für die Qualität des Ausgangssignals sehr entscheidend ist. Zunächst wurde der Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver von PCS Electronics HQ beschafft, welcher sich jedoch als nicht ausreichend betriebssicher für einen unbeaufsichtigten Betrieb herausstellte. In der Folge wurde der 3B0K1A der Firma Electrolink beschafft, der 100W RMS DAB-Leistung bereitstellt und die nötige Betriebssicherheit gewährleistet.

2.1.2.4.1. Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver

Der Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver von PCS Electronics (Bild 13) ist ein 50 W Analogverstärker für das VHF Band III (170-230 MHz). Bei einem Betrieb mit DAB-Signalen erzeugt er eine Ausgangsleistung von 10 W RMS DAB bei einer Verstärkung von 40 dB. Er ist 7,6 cm breit und 2,8 cm hoch. Dieser Leistungsverstärker ist allerdings ein reines Verstärkermodul und verfügt über keinerlei Schutzschaltungen oder Leistungsregelung. Deshalb ist er nicht betriebssicher und muss zunächst um zusätzliche Kontrollinstrumente und Sicherungen ergänzt werden.

Bild 13: PCS Verstärker

Im weiteren Verlauf des Projekts stellte sich heraus, dass der Verstärker auch bei geringen Fehlanpassungen am Ausgang eine starke Schwingneigung zeigt. So verschlechtern sich die an einem 50 Ω Abschlusswiderstand gemessenen guten Werte bei Anschluss einer 50 Ω Antenne massiv. Dieser Verstärker ist so nicht als Leistungsendverstärker einsetzbar.

Preis: 539,99 €

2.1.2.4.2. Leistungsverstärker VHF Band III „3B0K1A“

Der 3B0K1A (Bild 14) ist ein Leistungsverstärker von Electrolink Srl, der für DAB-Signale im VHF Band III (170-230 MHz) konzipiert ist. Er stellt 100 W RMS DAB-Leistung bereit und ist mit den erforderlichen Schutzschaltungen und Leistungsregelungen ausgestattet, die einen sicheren Betrieb auch ohne intensive Überwachung ermöglichen. Er kann über eine mitgelieferte Software eingestellt und überwacht werden. Auch ohne Softwareanbindung lässt er sich mit den zuletzt aktiven Einstellungen betreiben. Der Verstärker ist im 19 Zoll Format gebaut; er ist 2 HE hoch und besitzt eine Einbautiefe von 62 cm.

Bild 14: 3B0K1A

Preis: 3900,00 €

2.1.2.5. Raspberry Pi

Der Raspberry Pi ist ein Einplatinencomputer der Größe einer Kreditkarte. Er wird von einem ARM-Prozessor betrieben und nutzt ein Linux-Betriebssystem. In der VHF-Sendeeinheit ist er verbaut, um die USB-Schnittstelle des 3B0K1A, über die der Verstärker gesteuert werden kann, über Ethernet an den Server in dem Multiplexgenerator weiterzureichen.

Preis: 25,17 €

2.1.2.6. VHF Band III-Sendefilter

Das DAB BIII Band Pass Filter der Firma Electrolink Srl (Bild 15) ist ein DAB-Maskenfilter für das VHF Band III. Es ist auf Kanal 12A gestimmt, da die Frequenzzuteilung der BNetzA für diesen Block erfolgte. Das Filter ist im 19 Zoll-Format gebaut, 2 HE hoch, und hat eine Einbautiefe von 76 cm bei vollständig herausgezogenen Stimmstäben. Es weist -1,08 dB Durchgangsdämpfung auf. Dieses Filter darf mit maximal 200 W RMS belastet werden. Es ist ein sechskreisiges Filter mit zwei Kerbfiltern.

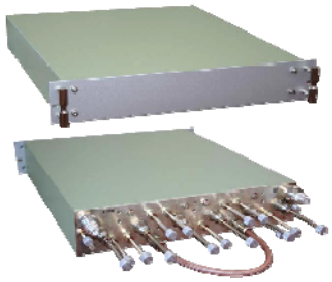


Bild 15: DAB-Maskenfilter

Preis: 1700,00 €

2.1.2.7. Antennenkabel

Zum Anschluss der Antenne an den Leistungsverstärker sind 20 m Antennenkabel der Typs Ecoflex 15 der Firma Kabel-Kusch. Es bietet ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis bei geringer Dämpfung (typische Dämpfung von 4 dB / 100 m bei 200 MHz und 20° C). Als Stecker an den Kabelenden sind N-Stecker vorgesehen.

Preis: 117,65 €

2.1.2.8. Blitzschutz

An dem Antennenkabel ist eine Erdungsschelle KMT-11 der Firma Kabel-Kusch angebracht, um die Sendeinfrastruktur vor Überspannungen durch Blitzschlag zu schützen.

Preis: 22,52 €

2.1.2.9. VHF Band III-Antenne

Als Antenne wird die CXL 230-1LW/DAB der Firma Procom A/S verwendet. Sie ist ein λ/2 Dipol, hat 0 dBd Antennengewinn und ist 126 cm lang. Diese Antenne ist für den Frequenzbereich von 223 – 240 MHz ausgelegt und daher nicht im gesamten VHF Band III nutzbar. Bei einem Betrieb auf Block 12A ist der Antennengewinn mit -1 dB negativ. Auch ist die maximale Belastbarkeit der Antenne von 150 W Spitzenleistung zu beachten. Bei einem Crestfaktor des DAB-Signals von 10 dB entspricht dies einer effektiven Leistung von 15W.

Preis: 120,08 €

2.2. Software

Im folgenden Teil wird die Software beschrieben, die auf dem 19 Zoll Server installiert wird, um die erforderliche Signalverarbeitung ausführen zu können. Dabei sind die Hauptbestandteile wie in Bild 16 dargestellt, die Audiocodierung, Multiplexbildung und die digitale Modulation.

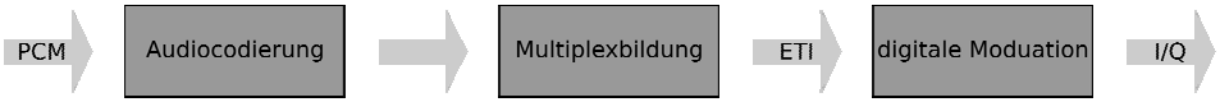


Bild 16: Signalverarbeitung im Multiplexgenerator

Zunächst wird auf die Softwarebestandteile eingegangen, die unabhängig von dem benutzten Rundfunksystem eingesetzt werden. Im Anschluss wird die Software zur Erzeugung eines DAB-Signals beschrieben, die aus keinem monolithischen Programm, sondern aus sinnvoll verschalteten Einzeltools besteht. Schließlich wird auch auf Spark als Software für DRM+ eingegangen.

2.2.1. Betriebssystem

Ubuntu ist eine freie und kostenlose Linux-Distribution, die auf der ebenfalls weit verbreiteten Debian-Distribution basiert. Sie beinhaltet alle wichtigen Programme und Treiber, die zum Betrieb des Multiplexgenerators notwendig sind. Hier wird die aktuelle Version 14.04 eingesetzt. Ergänzt werden die schon enthaltenen Programme durch Software, die für den Betrieb als DAB-Sender notwendig ist. Hauptgrund für die Wahl von Ubuntu als Betriebssystem ist, dass die mmbTools zur Generierung des Multiplexes auf Ubuntu entwickelt wurden und somit ein stabiler Betrieb erwartet werden kann. Als grafische Nutzeroberfläche wird Unity, die Standardoberfläche von Ubuntu, genutzt.

2.2.1.1. screen

screen ist ein Programm, das es ermöglicht, in einer Shell mehrere Programme gleichzeitig auszuführen, indem sie in verschiedenen virtuellen Shells, den sogenannten screens ausgeführt werden.

2.2.1.2. FiFo / named Pipe

Eine Pipe bzw. Pipeline wird in unixoiden Betriebssystemen verwendet, um mehrere unterschiedliche Prozesse parallel auszuführen und dabei die Ausgabe eines Prozesses für einen anderen als Eingabe zu benutzen.

Beispiel: Befehl1 | Befehl 2

Die Daten werden nach dem FiFo-Prinzip (First in, First out) gespeichert. Named Pipes sind Dateien, die sich genauso verhalten wie Pipes. Diese dienen dazu, die Ausgabe eines Prozesses als Eingabe des darauf folgenden zu nutzen. Im Gegensatz zu klassischen Pipes müssen diese nicht hintereinander in der Kommandozeile stehen, sondern können auch in mehreren Shells verwendet werden.

2.2.2. Audiosoftware

Damit der Multiplexgenerator die Audiosignale verarbeiten kann, ist spezielle Software notwendig, die das Entgegennehmen, Weiterreichen und Bearbeiten der Signale ermöglicht.

2.2.2.1. ALSA

Die Advanced Linux Sound Architecture, kurz ALSA ist eine freie Soundarchitektur für Linux und wird in Ubuntu standardmäßig genutzt. Sie stellt eine Vielzahl an Treibern für unterschiedliche Audiointerfaces bereit, so auch für die genutzte HDSPe-Karte. Zusätzlich ist eine Oberfläche zum Bedienen des in diesem Interface integrierten Hardwaremischers (Bild 17) enthalten, sodass beispielweise die Audioeingänge ohne Rechenaufwand des Servers abgehört und kontrolliert werden können.

Bild 17: hdspmixer - Bedienoberfläche zur Steuerung des Hardwaremischers

2.2.2.2. JACK

JACK ist ein Audioserver für Linux und andere unixoide Betriebssysteme. Als Kernfeatures bietet er niedrige Latenzzeiten und Synchronität aller mit ihm verbundenen Programme. Für die Echtzeitfähigkeit wird der Realtime-Modus des Betriebssystems vorausgesetzt. Verschiedene Programme lassen sich mittels JACK beliebig miteinander verbinden, auch ist beispielsweise der Abgriff des Ausgangssignals einer Anwendung und Benutzen als Eingangssignal in mehreren anderen Programmen möglich. Das Programm QjackCtl (Bild 18) stellt eine grafische Benutzeroberfläche für JACK bereit, mit der Einstellungen oder auch Audioverbindung einfach geändert werden können.

Bild 18: Transportfenster von QJackCtl

2.2.2.3. Jack-stdio

jack-stdio ist ein Programm, das die Möglichkeit bietet, Standardein- und -ausgaben als Schnittstelle in JACK zu integrieren. Der Befehl jack-stdin stellt eine Standardausgabe als Eingang zur Verfügung, wohingegen jack-stdout einen JACK-Ausgang als Eingang für einen Prozess ohne JACK-Unterstützung bereitstellen kann.

2.2.2.4. MPlayer

MPlayer ist ein Open-Source Multimediaplayer, der auf verschiedenen Betriebssystemen verfügbar ist. Er wird dazu genutzt, um Internetstreams, die meist MP3-codiert sind, zu decodieren und anschließend als zusätzliches Programm in den Multiplex aufnehmen zu können. MPlayer decodiert alle gängigen Audioformate, die vier wichtigsten sind: MPEG I (Layer 1,2,3), AAC, AC3, OGG Vorbis. Die Ausgabe des MPlayer kann direkt in den JACK Audioserver erfolgen.

2.2.2.5. Ebumeter

Das Paket ebumeter (Bild 19) ermöglicht das Messen der Lautheit von Audiosignalen nach EBU-Empfehlung R 128. Es bietet Momentan-, Kurzzeit- und über die Gesamtzeit integrierte Lautheitsberechnung. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Dynamik der Lautheit möglich, wodurch über die Notwendigkeit einer Komprimierung entschieden werden kann.

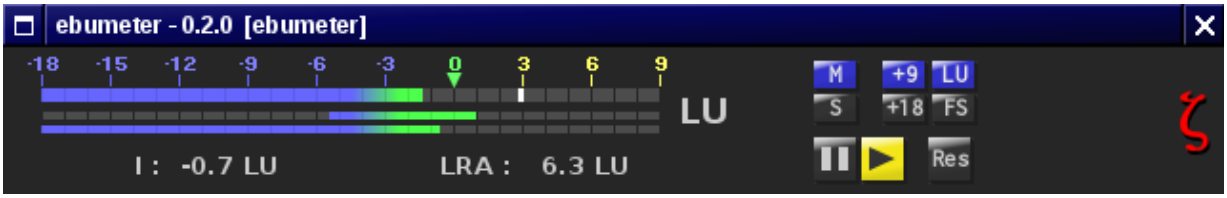


Bild 19: ebumeter

2.2.2.6. Calf Studio Gear

Calf Studio Gear (Bild 20) ist eine Open-Source Studioeffekt-Sammlung für Linux. Sie lässt sich unabhängig von einer Digital Audio Workstation, kurz DAW betreiben, und direkt mittels JACK einbinden. Dadurch sind Korrekturen der Eingangssignale möglich, insbesondere eine Korrektur des Dynamikumfangs und der Lautheit.

Bild 20: Einige Plugins aus Calf Studio Gear

2.2.3. DAB-Software

Im Folgenden wird die Software, die für die Erzeugung eines DAB-Signals notwendig ist, beschrieben.

2.2.3.1. Quellcodierung

Der DAB-Standard sieht zwei unterschiedliche Verfahren zur Quellcodierung der Audiodaten vor.

Dies sind:

- MPEG 1 Layer 2 (Musicam) für DAB klassisch [6]
- MPEG 4 Part 3 (AAC) für DAB+ [7]

Da verschiedene Implementierungen dieser Audiocodecs existieren, können unterschiedliche Encoder, eventuell auch ergänzend, verwendet werden. Im Folgenden werden die im Projekt genutzten Encoder beschrieben.

2.2.3.1.1. tooLAME

tooLAME ist ein Programmpaket, das einen Codierer nach MPEG 1 Layer 2 (Musicam) bereitstellt. Es ist Open-Source und der Codec unterliegt keinem Patentschutz mehr. Dies bietet den Vorteil, dass keine Lizenzkosten anfallen. Darüber hinaus ist die Empfangbarkeit des Radioprogramms auch mit älteren DAB-Radios möglich. Die Ausgangsbitrate ist zwischen 32 und 384 kbit/s einstellbar, wobei die niedrigsten nur für Mono-Programme und die höchsten Bitraten nur für Stereo-Programme nutzbar sind. Außerdem kann dieser Codierer zusätzliche, im DAB-Standard vorgeschriebene, PAD-Bytes zu den eigentlichen MPEG-Frames hinzufügen. In diesen „Programm Associated Data“ können verschiedene zum Radioprogramm gehörende Zusatzinformationen übertragen werden.

2.2.3.1.2. fdk-aac-dabplus

Bei fdk-aac-dabplus handelt es sich um eine Quellcode-Bibliothek, die den Fraunhofer AAC-Codec beinhaltet. Die Bibliothek stammt aus dem Quellcode des Smartphonebetriebssystems Android. Die einstellbare Ausgangsbitrate liegt zwischen 8 und 192 kbits.

In diesem Paket ist das Programm dabplus-enc-file enthalten, das für die AAC-Kodierung genutzt werden kann.

Bei der Nutzung dieses Codecs können Lizenzgebühren anfallen.

2.2.3.2. DAB Mutiplexer: ODR-DabMux

Als Software zur DAB-Multiplexbildung wird ODR-DabMux genutzt. Sie ist eine Weiterentwicklung von Matthias Brändli der Open-Source Software CRC-DABMUX des CRC. Folgende Eingangsdaten lassen sich je nach gewünschter DAB-Service-Componente übergeben:

- Audio:
  - DAB
  - DAB+
- Daten:
  - DLS
  - MOT (PAD und N-PAD)
  - Packet Mode
  - Enhanced Packet Mode
- DMB Service

Diese Eingangsdatenströme werden in einen MSC-Multiplex gebündelt und als standardisierter Ensemble Transport Interface-kompatibler Datenstrom (ETI) ausgegeben. Die Eingangsdaten nimmt ODR-DabMux als Dateien oder über TCP\IP Ports entgegen und gibt den Multiplex als Datei, über TCP\IP Ports oder ein G.703-Interface aus. Auch die EInstellungen für Fehlerschutz und die FIC-Daten werden in ODR-DabMux generiert. Die Bedienung des Programms erfolgt über die Befehlszeile bzw. ein Shell-Skript sowie eine Konfigurationsdatei.

2.2.3.3. DAB Modulator: ODR-DabMod

Der Softwaremodulator für DAB wird durch das Programm ODR-DabMod bereitgestellt. Es ist eine Weiterentwicklung von Matthias Brändli der Open-Source Software CRC-DABMOD des CRC. Sie nimmt als Eingangsdaten einen ETI-kompatiblen Datenstrom entgegen und berechnet Basisband-I/Q-Samples. Diese werden anschließend durch den integrierten USRP Hardware Driver (UHD) an den USRP zur anschließenden D/A-Wandlung übergeben. Zusätzlich übernimmt es die Weitergabe der nötigen HF-Parameter wie Sendefrequenz, DAB-Mode und Gain zum Betrieb an den USRP. Gleichwellennetze werden grundsätzlich unterstützt. Diese benötigen eine zusätzliche GPS-Synchronisation aller Transmitter.

2.2.4. DRM+-Software: SPARK

SPARK ist eine Software von Michael Feilen, die einen kompletten Multiplexgenerator unter anderem für DRM (DRM30 und DRM+) und UKW/FM beinhaltet. SPARK nimmt Audiodaten von Hardware-Eingängen oder als wav- und mp3-Dateien entgegen. Zusätzlich lässt sie sich über das Dbus-Plugin in Jack einbinden. Als Audiocodecs für DRM+ können AAC, AAC+ und CELT genutzt werden. Als Datendienste für DRM+ sind MOT-Slideshow, MOT-Website und PRBS möglich. Die Ausgabe der DRM+-Signale erfolgt in diesem Projekt über einen USRP. Durch die Schmalbandigkeit von DRM+ kann aber auch eine Audio-Soundkarte oder eine DRM-MDI Netzwerkschnittstelle benutzt werden

2.2.5. CDM20830

CDM20830 ist die Kontroll- und Steuersoftware für den HF-Verstärker 3B0K1A von Elektrolink. Sie erlaubt die Einstellung und Überwachung der Ausgangs- und reflektierten Leistung sowie der Temperaturen und Stromaufnahme des Verstärkers.

2.2.6. Softwareaufbau

Wie bereits vorher erwähnt, besteht die Software des Multiplexgenerators nicht aus einem einheitlichen Programm, sondern aus verschiedenen Programmen, die jeweils einen Aspekt der Signalverarbeitung übernehmen. In Bild 21 sind ist die Verknüpfung der einzelnen Programme dargestellt, sodass die Erzeugung eines standardkonformen DAB-Signals möglich ist. Dazu stehen sowohl die physischen Eingangskanäle als auch die durch den MPlayer bereitgestellten Webstreams und Playlists in Jack bereit. Diese können mit Calf Studio Gear und dem Ebumeter beurteilt und bearbeitet werden, bevor sie mittels jack-stdout in die beiden Quellcodierer eingespeist werden. Nach einer Pufferung durch den MBuffer erzeugt ODR-DabMux den Multiplex und ODR-DabMod berechnet die Basisbandsamples und steuert den USRP an.

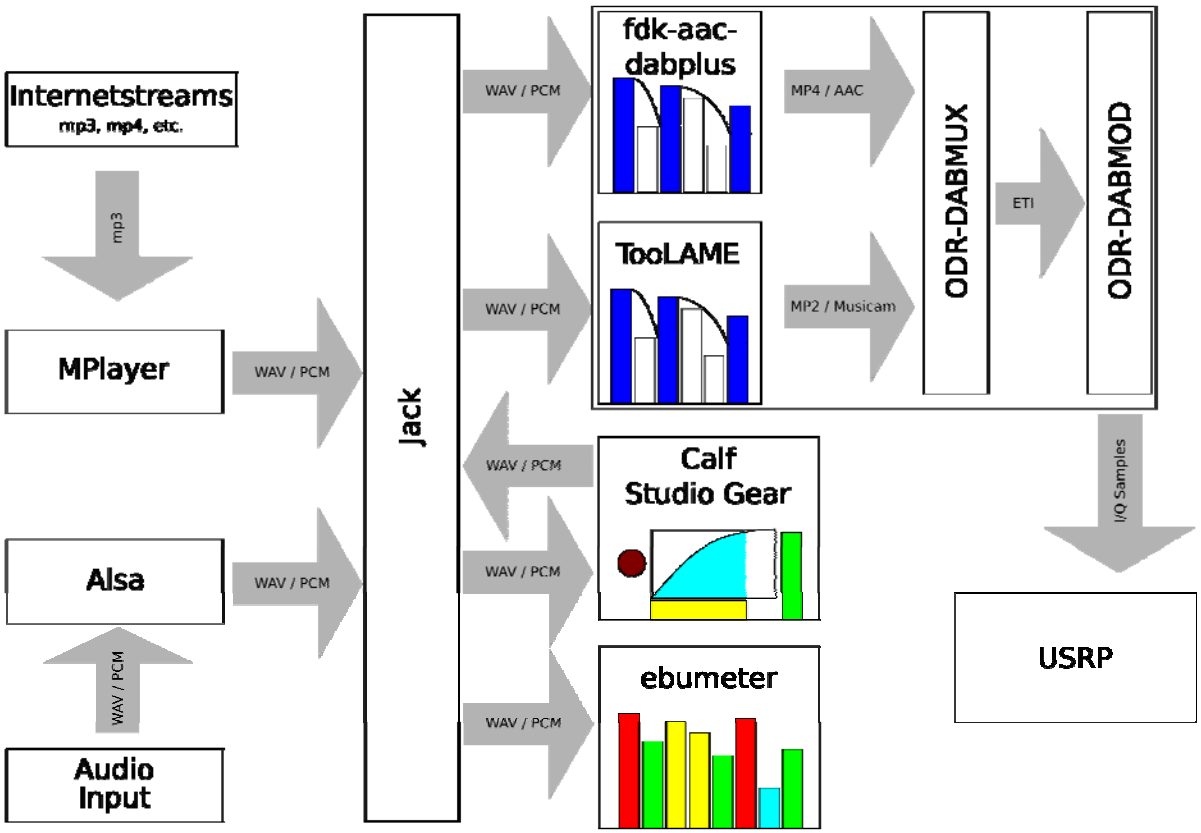


Bild 21: Signalfluss in der Software bei DAB-Betrieb

Bei DRM(+)-Betrieb ersetzt Spark, wie in Bild 22 zu sehen, die Programme zu Quellcodierung, der Multiplexgenerierung sowie der Modulation.

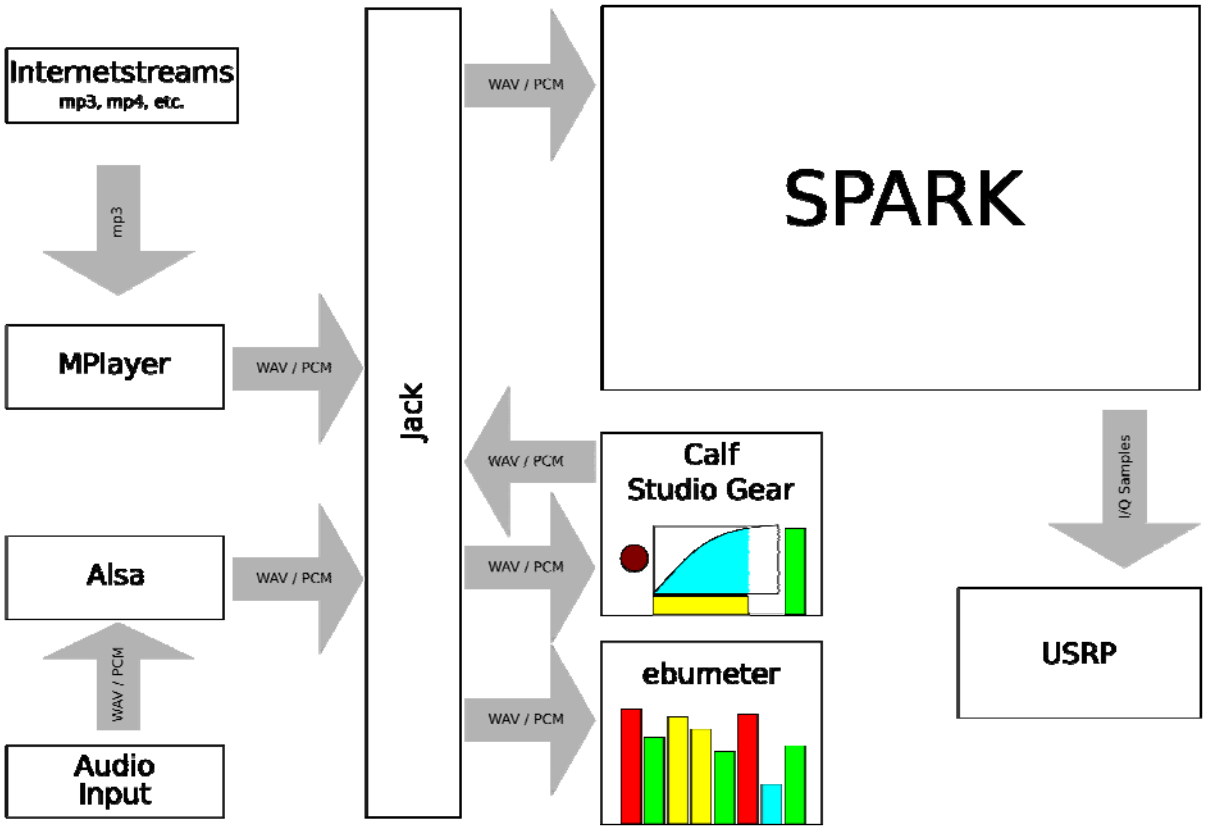


Bild 22: Signalfluss in der Software bei DRM(+)-Betrieb

2.3. Aufbau

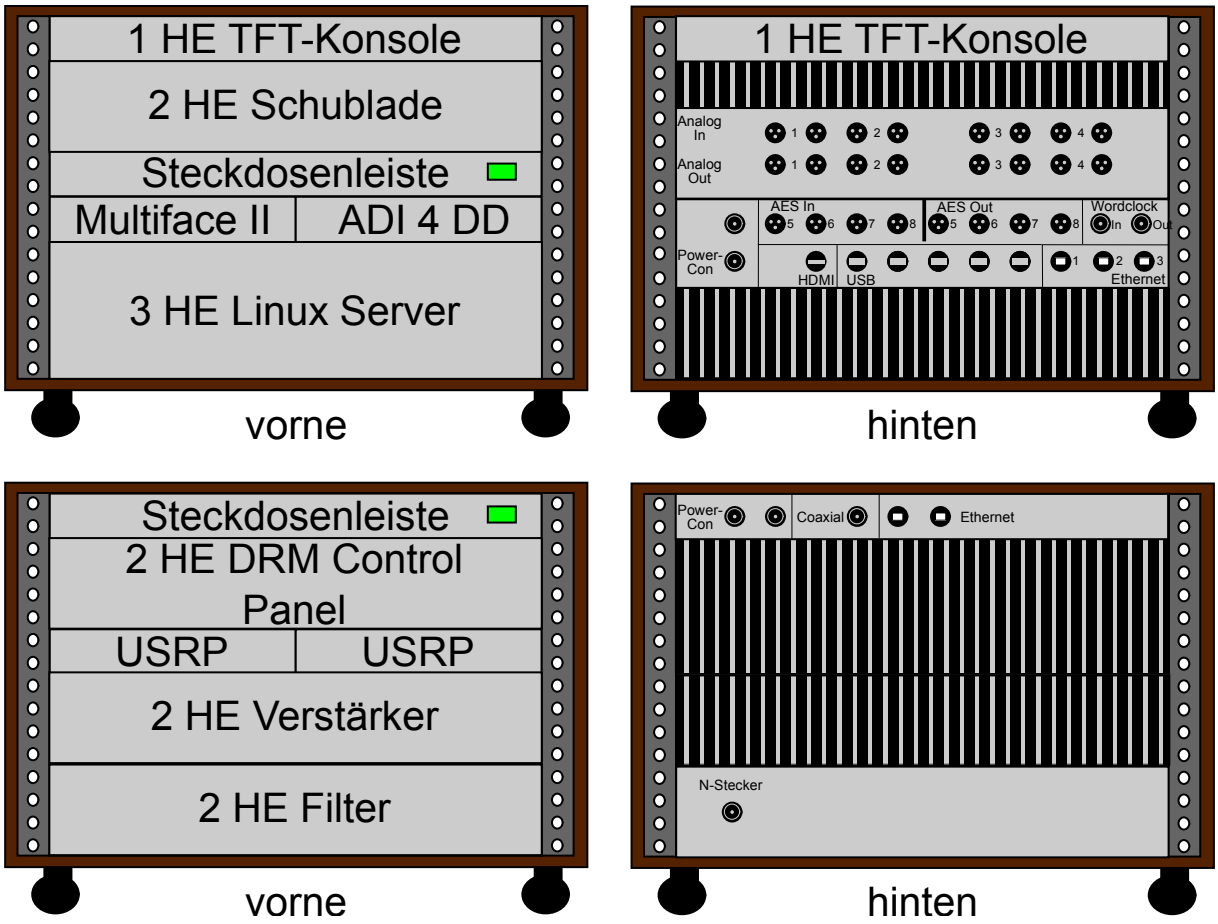


Bild 23: Multiplexgenerator (oben) und VHF-Sendeeinheit (unten)

Wie Bild 23 zeigt, ist der Aufbau des DAB-Senders in zwei Teile getrennt - ein Multiplexgenerator-Rack und ein Verstärker-Rack. Das Multiplexgenerator-Rack enthält alle notwendigen Teile, um die Eingangsdaten entgegenzunehmen und zu verarbeiten, wohingegen das Verstärker-Rack die nötige Hardware zur Signalerzeugung und Leistungsverstärkung umfasst.

2.3.1. Multiplexgenerator

Das Multiplexgenerator-Rack ist ein 8 HE hohes 19 Zoll-Flightcase. Darin enthalten ist die nötige Hardware zur Entgegennahme der Eingangssignale und zur Signalverarbeitung. Die Geräte sind von vorne in das Gehäuse geschraubt. Auf der Rückseite ist ein Steckfeld angebracht, das alle relevanten Anschlüsse zugänglich macht.

Wie in Bild 24 zu sehen ist, befindet sich unten im Gehäuse der 3 HE hohe Linux-Server. In einem PCI-Express-Kartenslot sind die HDSPe- sowie die Intel-Ethernetkarte eingesteckt. Die insgesamt drei Ethernetschnittstellen sind auf das rückseitige Steckfeld aufgelegt.

Die darüber liegende 4. Höheneinheit wird durch die beiden Interfaces Multiface II und ADI 4 DD belegt, welche durch das Uni-Rack nebeneinander montiert werden können. Die Audioschnittstellen sind auf das rückseitige Steckfeld aufgelegt. Das ADI 4 DD wird mittels eines ADAT-Lichtwellenleiters an das Multiface II angeschlossen, welches wiederum mit einem IEEE 1394-Kabels an die HDSPe-Karte angeschlossen ist.

In der 5. Höheneinheit befindet sich die Rack-Steckdosenleiste. Sie hat an der Vorderseite einen Schalter, womit die Stromversorgung aller Geräte vom Netz getrennt werden kann. Auf der Rückseite befinden sich acht Schutzkontaktsteckdosen zum Anschließen der Geräte. Die Zuleitung wird auf das Steckfeld an der Rückseite aufgelegt.

Die 2 HE darüber werden für eine Rackschublade genutzt, in der beispielsweise das Powercon-Kabel zur Stromzuführung verstaut werden kann.

Oben im Flightcase befindet sich die ausziehbare TFT-Konsole. Sie ist über ein Adapterkabel am VGA-Monitoranschluss und an einem USB-Port des Servers angeschlossen.

Auf der Rückseite befindet sich auf den unteren 2 HE eine Frontplatte mit Lüftungslöchern, sodass eine ausreichende Wärmeabfuhr für das Rack sichergestellt ist (Bild 25). Auch wird dadurch ein Hineingreifen in das Multiplexgenerator-Rack verhindert.

Die darüber liegenden 4 HE bilden das Steckfeld, das alle Audio-Ein- und Ausgänge zugänglich macht. Zusätzlich ist je eine Powercon-Buchse zum Anschluss an das Stromnetz sowie zur Stromversorgung weiterer Geräte vorhanden. Auch sind drei Ethernet-, fünf USB- sowie eine HDMI-Buchse/n angebracht.

In der oberen Höheneinheit ist die Rückseite der TFT-Konsole festgeschraubt, die auf Grund ihres hohen Gewichts und ihrer Größe auf beiden Seiten des Racks verschraubt werden muss. Die darunter liegende HE wird durch eine Bürstenblende verschlossen, durch die die Anschlusskabel für die TFT-Konsole hindurchgeführt werden.

Mit der Hardware des Multiplexgenerator-Racks können auch andere Rundfunksysteme wie DRM und UKW/FM lediglich durch Einsatz zusätzlicher Software generiert werden.

Bild 24: Multiplexgenerator Frontansicht

Bild 25: Multiplexgenerator Rückansicht

2.3.2. VHF-Sendeeinheit

Bild 26 zeigt noch einmal den Aufbau von Multilexgenerator sowie VHF-Sendeeinheit und verdeutlicht, dass die Signalwege von DAB und DRM+ in der VHF-Sendeeinheit getrennt sind.

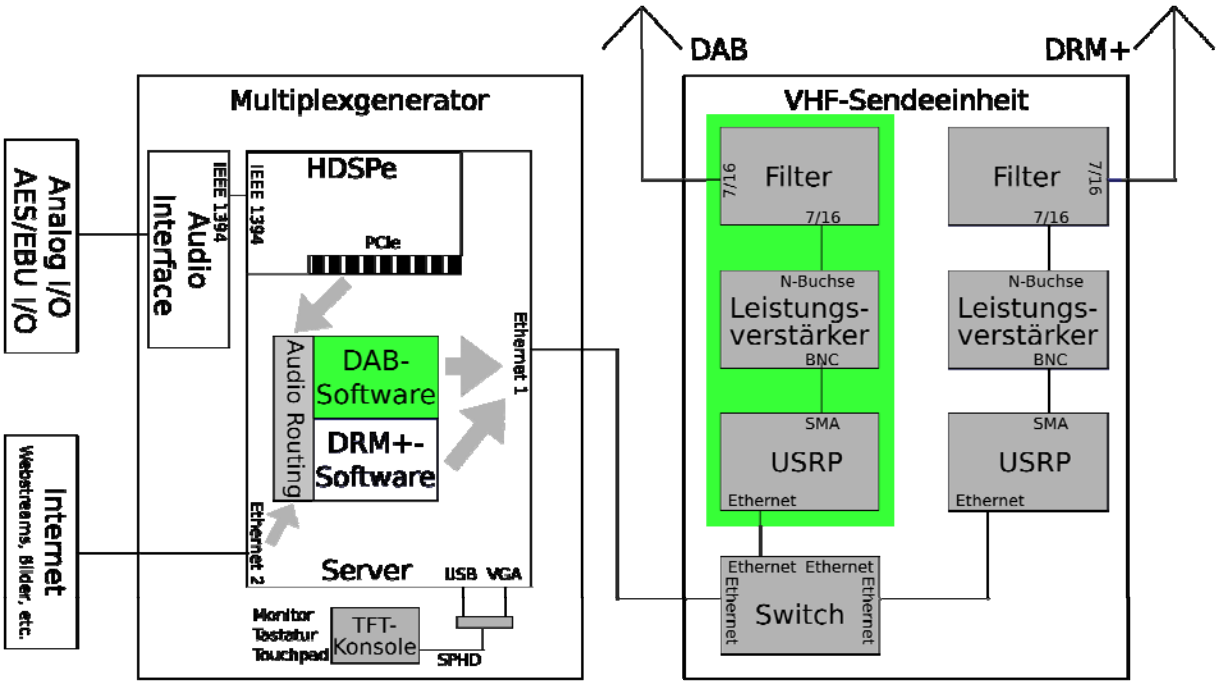


Bild 26: Konzept des Aufbaus

Das Verstärker-Rack ist 8 HE hoch sowie 95 cm lang und beinhaltet alle notwendigen Geräte zur Erzeugung und Verstärkung der HF-Signale (Bild 27).

In den unteren 2 HE ist das DAB-Maskenfilter für Block 12A der Firma Electrolink eingebaut, das die Einhaltung der DAB-Spektralmaske gewährleistet.

Darüber befindet sich der 2 HE hohe 100W-Leistungsverstärker der Firma Electrolink. Diese beiden Geräte sind auf Grund ihres hohen Gewichts ganz unten im Rack montiert.

In der 5. HE sind die beiden USRP N200 an einer Rackwanne aufgehängt. Zur Belüftung und zum Vermeiden des Hineingreifens ist diese HE mit einer Lüfterblende verschlossen.

Darüber befindet sich eine 2 HE hohe Rackblende, in die ein Strommessgerät, Schalter und eine Sicherung für den 10W-Leistungsverstärker der Firma PCS Electronics HQ eingebaut sind. Diese sollen die Betriebssicherheit bei DRM+-Ausstrahlung gewährleisten.

Oben im Rack ist die Steckdosenleiste montiert, die auf der Vorderseite einen Schalter aufweist und auf der Rückseite acht Schutzkontaktsteckdosen bereitstellt.

Auf der Rückseite des Verstärker-Racks (Bild 28) befindet sich in den unteren beiden HE eine Frontplatte, in die auf der linken Seite eine N-Buchse zum Anschluss der Antenne für DAB eingebaut ist.

Die darüber liegenden 5 HE werden durch Lochblenden verschlossen, um die Lüftung des Racks zu gewährleisten und gleichzeitig das Hineingreifen zu verhindern.

Unter diesen Lochblenden sind in der 5. HE auf einer Rackwanne der 10 W-Leistungsversärker für DRM(+) auf dem Lüftermodul sowie das Netzteil für den Verstärker montiert.

Oben im Rack ist ein 1 HE Steckfeld angebracht, an dem je eine Powercon Eingangs- sowie Ausgangsbuchse, eine Koaxialbuchse für DRM+ sowie 2 Netzwerkbuchsen eingebaut sind.

Auf dem rückseitigen Boden des Racks sind ein Raspberry Pi Kleincomputer, der Steuersignale des Multiplexgenerators an den 100W Verstärker via Ethernet weiterleitet, sowie ein Netzwerkswitch montiert.

Bild 27: VHF-Sendeeinheit Frontansicht

Bild 28: VHF-Sendeeinheit Rückansicht

2.4. Schnittstellen

Im Folgenden wird näher auf die Schnittstellen zwischen den Geräten, aber auch zwischen den Softwarebestandteilen eingegangen, die es ermöglichen, Inhalte bereitzustellen, die Geräte zu überwachen und die HF-Sendeleistung abzustrahlen.

2.4.1. Audioschnittstelle

Zum Übergeben von Audiosignalen stehen mehrere Schnittstellen zu Verfügung.

Auf dem rückseitigen Steckfeld des Multiplexgenerators sind je acht symmetrische XLR-Buchsen als analoge Ein- und Ausgänge angebracht. Die Abtastrate des Interface sollte auf 48 kHz eingestellt werden, um Probleme mit der Synchronisierung der verschiedenen Audiogeräte und -software zu vermeiden.

Auch je vier Digitalschnittstellen nach dem AES/EBU-Standard, die jeweils zwei Audiokanäle beinhalten, sind über symmetrische XLR-Buchsen verfügbar. Zur Synchronisierung der Digitalgeräte steht sowohl ein Word Clock-Ein- als auch -Ausgang zur Verfügung. Wird mehr als ein Gerät digital per AES/EBU angebunden, so müssen diese Geräte zwingend untereinander synchronisiert werden. Die Einstellungen bezüglich Abtastrate etc. sind in Bild 29 dargestellt.

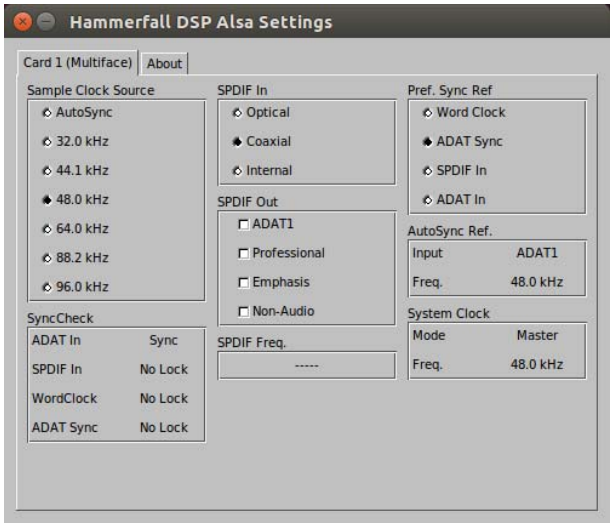


Bild 29: HDSPConf - Einstellungen des HDSPe

Internet-Audiostreams können abgespielt und in den Multiplex aufgenommen werden, wenn der Multiplexgenerator über einen Ethernet-Port eine Netzwerkverbindung an das Internet aufweist.

Bild 30: Statusfenster von „QjackCtl“

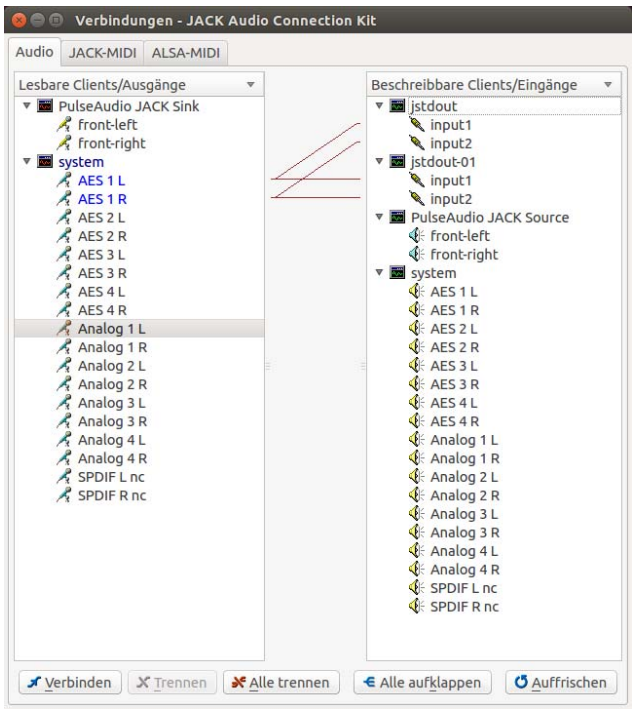


Bild 31: Verbindungsfenster von „QjackCtl“

Die Audioschnittstellen in „QjackCtl“ (Bild 30, Bild 31) lassen sich zur besseren Übersicht anschaulich benennen. Möchte man diese jedoch per Skript verbinden, so muss der generische Name verwendet werden. Dazu ist die Zuordnung in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Zuordnung der Audioschnittstellen in "QjackCtl"

Eingänge		Ausgänge	
Gerätname: system		Gerätname: system	
Generische Benennung	Anschauliche Benennung	Generische Benennung	Anschauliche Benennung
capture_1	Analog 1 L	playback_1	Analog 1 L
capture_2	Analog 1 R	playback_2	Analog 1 R
capture_3	Analog 2 L	playback_3	Analog 2 L
capture_4	Analog 2 R	playback_4	Analog 2 R
capture_5	Analog 3 L	playback_5	Analog 3 L
capture_6	Analog 3 R	playback_6	Analog 3 R
capture_7	Analog 4 L	playback_7	Analog 4 L
capture_8	Analog 4 R	playback_8	Analog 4 R
capture_9	AES 1 L	playback_9	AES 1 L
capture_10	AES 1 R	playback_10	AES 1 R
capture_11	AES 2 L	playback_11	AES 2 L
capture_12	AES 2 R	playback_12	AES 2 R
capture_13	AES 3 L	playback_13	AES 3 L
capture_14	AES 3 R	playback_14	AES 3 R
capture_15	AES 4 L	playback_15	AES 4 L
capture_16	AES 4 R	playback_16	AES 4 R
capture_17	SPDIF 1 L (nicht heraus-geführt)	playback_17	SPDIF 1 L (nicht heraus-geführt)
capture_18	SPDIF 1 R (nicht heraus-geführt)	playback_18	SPDIF 1 R (nicht heraus-geführt)

2.4.2. Datenschnittstelle

Zur Übernahme von anderen als Audiodaten stehen zwei Schnittstellen zur Verfügung. Über eine der USB-Schnittstellen kann auf Daten, die auf externen Speichermedien abgelegt sind, zugegriffen werden. Alternativ können Daten über die Netzwerkverbindung von anderen PCs oder aus dem Internet auf den Multiplexgenerator gelangen.

2.4.3. Konfigurationsschnittstelle

Sowohl ODR-DabMux als auch ODR-DabMod stellen eine Wartungsschnittstelle über einen Telnet Port zur Verfügung. ODR-DabMux bietet den Telnet Port 12721 an, über den die Labels und Shortlabels für die DAB-Services und -Components geändert werden können. ODR-DabMod bietet den Telnet Port 2121 an, über den neue FIR-Filterkoeffizienten geladen, der USRP-Gain gesetzt sowie der USRP-Ausgang abgeschaltet werden können.

2.4.4. Schnittstelle zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit

Die Verbindung zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit wird mittels eines Gigabit-Ethernet-Kabels hergestellt. Darüber wird der I/Q-Sample-Datenstrom und die Senderdaten für den 3B0K1A-Verstärker übertragen.

2.4.5. Senderausgang

Als HF-Schnittstellen sind auf der Rückseite der VHF-Sendeeinheit eine N-Buchse für DAB und eine Koaxial-Buchse für DRM+ vorhanden. Um Schäden an den Leistungsverstärkern zu vermeiden, darf die VHF-Sendeeinheit nie ohne Antenne oder geeigneten Lastwiederstand (Impedanz von 50 Ohm) unter Beachtung der zulässigen HF-Leistung betrieben werden.

2.5. Benutzeroberfläche

Eine einheitliche grafische Benutzeroberfläche (GUI) für die gesamte Signalverarbeitung gibt es zurzeit nicht. Im Folgenden werden die Bedienmöglichkeiten von Audiosoftware, den ODR-mmbTools und von Spark erläutert.

Sowohl die Bedienung über die Kommandozeile als auch der grafischen Benutzeroberfläche können mit Standardtools aus der Ferne durchgeführt werden, sofern der Multiplexgenerator am Internet angeschlossen ist. Dafür können die Protokolle ssh (Kommandozeile) und vnc (GUI) genutzt werden.

2.5.1. Audiosoftware

Die verschiedenen Softwaretools zur Audiobearbeitung können über eine graphische Benutzeroberfläche bedient werden. Die Hardwareeinstellungen für die Audiointerfaces lassen sich mit den in ALSA integrierten Programmen hdsp-conf und hdsp-mixer (Abschnitt 2.2.2.1) setzte. Der Soundserver JACK kann mit dem Programm QJackCTL (Abschnitt 2.2.2.2) gesteuert werden. Auch die Pluginsammlung Calf Studio Gear verfügt über ein eigenes GUI.

2.5.2. Steuerung der ODR-mmbTools mittels Skript

Die einzelnen Programme können mit einem Shell-Skript angesprochen und in der passenden Reihenfolge mit den richtigen Parametern ausgeführt werden. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde das Skript in zwei Teile aufgeteilt.

Das erste Skript sorgt für die Entgegennahme und das Einbinden von Audiodatenströmen wie Internetstreams oder auf dem Multiplexgenerator abgelegte Playlists und startet anschließend das zweite Skript.

Das zweite Skript startet die Quellcodierung und die Multiplexbildung sowie die Modulation.

Die Skripte werden in einem Texteditor erstellt, weisen die Dateiendung „.sh“ auf und müssen die Dateiberechtigung „ausführbar“ erhalten, damit sie gestartet werden können.

Zur Beschreibung werden im Folgenden Skripte in Anlehnung an diejenigen, die für RadioEIT (ein studentisches Veranstaltungsradio an der TU Kaiserslautern anlässlich der „Nacht, die Wissen schafft“ am 25.04.2014) genutzt wurden, erläutert.

2.5.2.1. Ausführbare Konfigurations-Skripte

Nachfolgend ist das erste Kommandozeilenskript abgebildet, das JACK startet und die Webstreams einbindet.

Tabelle 3: radioEIT.sh

```
1   #!/bin/bash
2
3   #First kill any eventual old instances of the software
4
5   killall -9 jack-stdout
6   killall -9 jack-stdin
7   killall -9 odr-dabmux
8   killall -9 odr-dabmod
9   killall -9 toolame
10  killall -9 mbuffer
11  killall -9 screen
12  sleep 1
13
14  #start Jack
15  screen -dm -S jack -p 0 /usr/bin/qjackctl -s
16  sleep 3
17
18  #start Webradio1
19  screen -dm -S Web1 -p 1 /usr/bin/mplayer -ao jack:name=Webradio1 -playlist http://demoadresse.de/webradio1.m3u
20
21  #start Webradio2
22  screen -dm -S Web2 -p 2 /usr/bin/mplayer -ao jack:name=Webradio2 -playlist http://demoadresse.de/webradio2.m3u
23
24  #start audioloop
25  screen -dm -S audioloop1 -p 3 /usr/bin/mplayer -ao jack:name=audioloop:port=jstdout-03 -loop 0 ./audio/*
26  #sleep 3
27
28  #Start the encoder
29  nice -n -11 screen -dm -S MMB -p 4 /home/dab/DAB/DAB/mux_radioEIT.sh
```

Zeilen, die mit einer Rauten (#) beginnen, dienen als Kommentar und werden nicht ausgeführt.

In Zeile 1 wird angegeben, dass es sich um ein ausführbares Shellskript handelt.

In Zeilen 5-11 werden alte Softwareinstanzen beendet, um Kompatibilitätsprobleme zu vermeiden.

Zeile 12 bewirkt eine Sekunde Pause, bevor das Skript weiter ausgeführt wird.

Die folgenden Programme werden in verschiedenen Screens ausgeführt, um zu vermeiden, dass ein Programm die Ausführung des Skripts unterbricht, weil es nicht im Hintergrund ausgeführt werden kann.

Zeile 15 startet QjackCtl und damit auch den JACK-Server.

In Zeile 19 und 22 werden Webstreams empfangen und in JACK eingebunden. Dies geschieht mit Hilfe des MPlayer, der als Ausgangsoption einen JACK-Port benutzten kann. Mit dem Parameter „name“ kann ein nachvollziehbarer Name vergeben werden (hier nicht genutzt).

In Zeile 25 werden die sich im untergeordenten Ordner „./audio“ befindenden Audiodateien abgespielt. Sollten diese Dateien alle abgespielt werden, so wird das Ganze wiederholt („loop 0“).

In Zeile 29 wird das Skript „mux_radioEIT.sh“ (Tabelle 4) gestartet. Der Parameter „nice -n -11“ erhöht die Priorität der Ausführung, sodass bei Engpässen der Rechnerleistung diese Prozesse bevorzugt ausgeführt werden.

Weitere Informationen sind im Handbuch zu finden.

In Tabelle 4 ist das Skript für die Audiocodierung, Multiplexbildung sowie Modulation aufgeführt.

Tabelle 4: mux_radioEIT.sh

```
1   #!/bin/sh
2
3   #fifo erstellen
4
5   rm -f fifoer/fifo*
6   for id in 1 2 3 4; do
7     [ -e fifo$id ] || mkfifo fifoer/fifo$id
8   done
9
10
11  #Start the encoders
12
13  jack-stdout system:capture_9 system:capture_10 |toolame -s 48 -D 4 -b 192 /dev/stdin /dev/stdout | mbuffer -q -m 100k -P 100 -s 2160 > fifoer/fifo1 &
14  sleep 1
15  jack-stdout Web1:out_0 Web1:out_1 |dabplus-enc-file -a -f raw -c 2 -r 48000 -b 128 -i /dev/stdin -o /dev/stdout | mbuffer -q -m 100k -P 100 -s 1920 > fifoer/fifo2 &
16  sleep 1
17  jack-stdout Web2:out_0 Web2:out_1 |toolame -s 48 -D 4 -b 192 /dev/stdin /dev/stdout | mbuffer -q -m 100k -P 100 -s 2160 > fifoer/fifo3 &
18  sleep 1
19  jack-stdout audioloop:out_0 audioloop:out_1 |dabplus-enc-file -a -f raw -c 2 -r 48000 -b 128 -i /dev/stdin -o /dev/stdout | mbuffer -q -m 100k -P 100 -s 1920 > fifoer/fifo4 &
20
21  sleep 2
22  #Start the multiplexer, and modulator
23
24  odr-dabmux -e radioEIT.mux | odr-dabmod -C dabmod.ini
25
26  wait
```

In Zeile 5 werden eventuell noch im Unterordner „/fifoer“ befindende fifo-Dateien gelöscht.

In Zeile 6 bis 8 werden entsprechend der benötigten Anzahl neue fifo-Dateien erstellt.

In Zeile 13 und 17 wird je ein MP2-Datenstrom erstellt. Dazu wird zunächst der gewünschte Audioeingang, in Zeile 13 AES 1 (links und rechts), mit Hilfe des Programms jack-stdout von JACK als Standardausgabe für den nachfolgenden Prozess bereitgestellt. Anschließend wird der Datenstrom an toolame übergeben.

Die relevanten Parameter sind:

-s 48 Samplerate 48 kHz

-D 4 Hinzufügen von 4 PAD Bytes, die DAB benötigt

-b 192 Bitrate 192 kbit/s

Es folgen daraufhin Eingangs- und Ausgangsport, hier die Standardports.

Der MP2-Datenstrom wird dann in einem mbuffer gepuffert und in eine fifo-Datei geschrieben.

Das Zeichen „&“ weist das Betriebssystem an, die Operationen in den Hintergrund zu verschieben, sodass sie die Kommandozeile nicht blockieren.

In Zeile 15 geschieht das Gleiche mit dem Unterschied, dass eine AAC-Codierung verwendet wird. Die wichtigen Parameter für „dabplus-enc-file“ sind:

-a „afterburner“ erhöht die Audioqualität

-f raw Datenformat (wav, raw)

-c 2 Anzahl der Kanäle

-r 48000 Samplerate 48 kHz

-b 128 Bitrate 128 kbit/s

-i Eingang, Standardeingabe

-o Ausgang, Standardausgabe

In Zeile 21 wird der Multiplexer mit dem Configfile („-e“) „radioEIT.mux“ (Tabelle 5) und der Modulator mit dem Configfile („-C“) „dabmod.ini“ (Tabelle 6) gestartet.

Weitere Informationen sind auch hier Handbuch verfügbar.

2.5.2.2. Konfigurationsdateien

Im Gegensatz zu Kommandozeilenskripten enthalten Konfigurationsdateien keine ausführbaren Befehle, sondern speichern nur Parameter. Für den Multiplexer und den Modulator gibt es je eine eigene Konfigurationsdatei, in denen die programmspezifischen Parameter abgelegt sind.

2.5.2.2.1. ODR-DabMux Config-File

ODR-DabMux bündelt die verschiedenen Audio- und Datendienste in einen Multiplex. Der Aufbau des Multiplex wird dabei in einer Konfigurationsdatei definiert. Die Struktur dieser Konfigurationsdatei lehnt sich dabei an die Struktur des DAB-Multiplex an. Nachfolgend ist in Bild 32 ein Beispiel für eine solche Multiplexstruktur abgebildet.

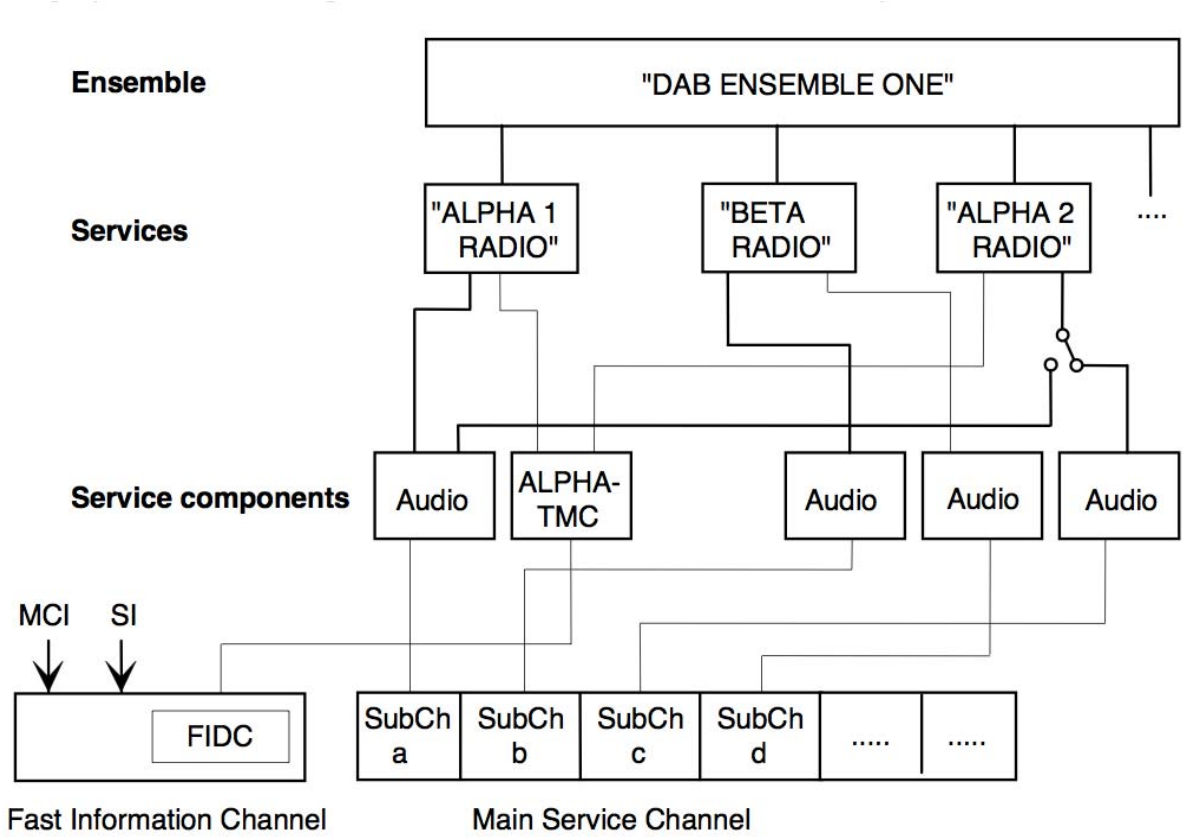


Bild 32: Beispiel einer DAB Servicestruktur [6]

Ein Multiplex – das Ensemble – beinhaltet mehrere Services. Diese Services sind die mit einem Radiogerät auswählbaren und anhörbaren Programme. Jeder Service besitzt mindestens eine Service Component, die die Services mit den jeweiligen Daten in den Subchannels des Main Service Channel oder des Fast Information Channel verknüpft. Dabei kann eine Service Component auch mehreren Services zugeordnet werden, um beispielsweise einen Verkehrsinformationsdienst mit anderen Komponenten in mehreren Services zu verwenden und die Daten nicht mehrfach übertragen zu müssen.

Im Folgenden zeigt **Tabelle 5** die Datei, die beispielhaft den Multiplex von „RadioEIT“ beschreibt, der zwei Services verbreitet.

Tabelle 5: radioEIT.mux

```
; This is the official configuration file example that
; serves as documentation for the config file reader.
;
; As you can see, comments are defined by semicolons.
;
; The format is called INFO format, and defined by boost property_tree:
;http://www.boost.org/doc/libs/1_41_0/doc/html/boost_propertytree/parsers.html#boost_propertytree.parsers.info_parser

; It consists of six mandatory sections, whose relative order in this
; file are of no importance.

; In case of questions or ambiguities, the documentation for the
; command-line configuration interface still mostly applies.

; The general section defines global multiplex parameters.
```

```
general {
    ; the DAB Transmission mode (values 1-4 accepted)
    dabmode 1

    ; the number of ETI frames to generate (set to 0 to get an unlimited number)
    nbframes 0


    ; boolean fileds can accept either false or true as values:

    ; Enable logging to syslog
    syslog true

    ; Write the SCCA field useful for the Factum ETI analyser
    writescca false

    ; Enable timestamp definition necessary for SFN
    ; This also enables time encoding using the MNSC.
    tist false

    ; The statsserver is a simple TCP server that can present
    ; statistics data (buffers, overruns, underruns, etc)
    ; which can then be graphed a tool like Munin
    ; The doc/stats_dabmux_multi.py tool is a suitable
    ; plugin for that.
    ; If the port is zero, or the line commented, the server
    ; is not started.
    statsserverport 12720
}

remotecontrol {
    ; enable the telnet remote control server on the given port
    ; This server allows you to read and define parameters that
    ; some features export
    ; Set the port to 0 to disable the server
    telnetport 12721
}

; Some ensemble parameters
ensemble {
    id 0xD101
    ecc 0xe0 ; Extended Country Code
    label "Radio EIT"
    shortlabel "RE"
    local-time-offset 4
    international-table 1
}

; Definition of DAB services
services {
    ; Each service has it's own unique identifier, that is
    ; only used throughout the configuration file
    haupt1 {
        label "Radio EIT MP2"
        shortlabel "RadioEIT"
        pty 3
        language 8
        id 1; also supports id
    }
    web1 {
        label "Webradio 1"
        shortlabel "Web1"
        pty 3
        language 8
        id 2; also supports id
    }
    web2 {
        label "Webradio 2"
        shortlabel "Web2"
        pty 3
        language 8
        id 3; also supports id
    }
    audioloop {
```

```
        label "Playlist"
        shortlabel "Plst"
        pty 3
        language 8
        id 4; also supports id
    }

}

; The subchannels are defined in the corresponding section.
; supported types are : audio, bridge, data, enhancedpacket,
;                       dabplus, dmb, packet, test
subchannels {
    sc1 {
        type audio
        inputfile "fifoer/fifo1"
        nonblock true
        bitrate 192
        id 10
        protection 1
    }

    sc2 {
        type dabplus
        inputfile "fifoer/fifo2"
        nonblock true
        bitrate 128
        id 13
        protection 1
    }
    sc3 {
        type audio
        inputfile "fifoer/fifo3"
        nonblock true
        bitrate 192
        id 10
        protection 1
    }

    sc4 {
        type dabplus
        inputfile "fifoer/fifo4"
        nonblock true
        bitrate 128
        id 13
        protection 1
    }

}

; For now, each component links one service to one subchannel
components {
    ; the component unique identifiers are not used anywhere, but
    ; are useful to disambiguate different components.
    haupt1_co {
        label "radioEIT MP2"
        shortlabel "radioEIT"
        service haupt1
        subchannel sc1
    }

     web1_co {
        label "Webradio 1"
        shortlabel "Web1"
        service web1
        subchannel sc2
    }
    web2_co {
        label "Webradio 2"
        shortlabel "Web2"
        service web2
        subchannel sc3
    }
```

```
    audioloop_co {
      label "Playlist"
      shortlabel "Plst"
      service audioloop
      subchannel sc4
    }

}

; A list of outputs, in the format
; unique_id "uri"
outputs {
   foobar "fifo:///dev/stdout?type=raw"

; ZeroMQ output example
;    zmq  "zmq+tcp://*:8080"
;    test "simul://dev/null"
}
```

In den Konfigurationsdateien werden Kommentare durch ein Semikolon gekennzeichnet.

Die Multiplexkonfigurationsdatei besteht aus sieben Abschnitten. Sie beginnen und enden jeweils mit einer geschweiften Klammer nach der entsprechenden Kennung (general{ ... }). Dies sind:

- general
- remotecontrol
- ensemble
- services
- subchannels
- components
- outputs

Bis auf den Abschnitt remotecontrol müssen alle Abschnitte in der Konfigurationsdatei vorhanden sein, wobei die Reihenfolge der Abschnitte irrelevant ist.

general:

Im Abschnitt **general** werden grundsätzliche Parameter des Multiplexes definiert. Dies sind zum einen die DAB-bezogenen Parameter wie der Dabmode (1-4), die Anzahl der zu erzeugenden DAB-Frames (0 für Dauerbetrieb), einen Zeitstempel für SFN und das Setzen des SCCA-Feld für diverse ETI-Analysatoren. Zum Anderen werden auch softwarespezifische Parameter definiert, die beispielsweise das Debuggen erleichtern. Dies sind das Loggen im Systemlog oder das Bereitstellen eines Statistikservers.

remotecontrol:

Hier kann ein Telnetport für den Fernzugriff auf einige Multiplexparameter, wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, definiert werden.

ensemble:

Im Abschnitt **ensemble** werden die Parameter für den gesamten Multiplex definiert. Dies sind die Ensemble Id, der Extended Country Code ECC, das Label und Shortlabel des Multiplex, die lokale Zeitzone und die internationale Tabelle für programmspezifische Parameter. Bei dem Shortlabel ist zu beachten, dass die technische Realisierung eine Bitmaske ist, die Buchstaben aus dem Label ein- und ausblendet. Deshalb kann das Shortlabel nur Buchstaben aus dem Label enthalten, die in der richtigen Reihenfolge angegeben sein müssen. Die Parameter ECC und Id müssen nach Vorgabe der BNetzA eingestellt werden.

services:

Der Abschnitt **services** definiert die DAB-Services in einem Multiplex. Dabei wird jeder Service in einem eigenen Unterabschnitt definiert. Ein Unterabschnitt beginnt mit einer für jeden Service individuellen Kennung. Diese Kennung wird nur innerhalb von ODR-DabMux benutzt und beeinflusst nicht das Label. Ein Unterabschnitt beginnt und endet jeweils mit einer geschweiften Klammer (service1{ ... }). Für einen Service wird muss ein Label definiert werden. Optional kann ein zusätzliches Shortlabel, eine Id und eine Programmsprache angegeben werden. Auch ein PTY zur Kennzeichnung der Programmart wird unterstützt.

subchannels:

Im Abschnitt **subchannels** werden die Subchannels des DAB-Multiplex in jeweils einem eigenen Unterabschnitt beginnend mit einer individuellen Kennung definiert. Zunächst muss der Datentyp des Subchannels definiert werden. Für Audiodaten wird Audio (MP2) oder Dabplus (AAC) gesetzt. Der Typ DMB übergibt einen Videostream nach dem DMB-Standard. Daten lassen sich als Data, Packet oder Enhancedpacket übergeben, je nachdem, was der entsprechende Datendienst benötigt. Auch einer der Typen Bridge und Test lässt sich verwenden. Als Eingangsdatei wird der Pfad zu dem FiFo-File (0) oder einer Datei übergeben. Die Bitrate des Subchannels muss eingestellt werden und auch der Schutzlevel (Protection) wird für jeden Subchannel einzeln eingestellt. Neben der Id des Subchannels muss bei Datendiensten auch zusätzlich der Datendiensttyp angegeben werden.

components:

Im Abschnitt **components** werden die Subchannel mit den Services durch die Service Components verknüpft. Auch hier beschreibt ein Unterabschnitt eine Service Component. Zwingend erforderlich ist die Übergabe eines Service und des zu verbindenden Subchannel mittels ihrer Kennungen. Optional können auch Label vergeben werden.

outputs:

Im Abschnitt **outputs** wird die Ausgabe des ETI-Datenstroms festgelegt. Die Ausgangsdaten lassen sich über eine Datei ausgeben, dann muss der Dateipfad und das Format (raw, framed, streamed) angegeben werden, oder über einen zmq+tcp Port unter Angabe des Ports. Außerdem kann ein simulierter Ausgang und eine Farsync ETI-Karte genutzt werden.

Weitere Informationen sind im Handbuch zum DAB-Sender verfügbar.

2.5.2.2.2. ODR-DabMod Configfile

Alle Parameter für den Modulator werden in dem Configfile „dabmod.ini“ gesetzt. In Tabelle 6 ist beispielhaft die Datei für „RadioEIT“ beschrieben.

Tabelle 6: dabmod.ini

```
; Sample configuration file for CRC-DABMOD
[remotecontrol]
; enable the telnet remote control on localhost:2121
; Since this is totally unsecure telnet, the software
; will only listen on the local loopback interface.
; To get secure remote access, use SSH port forwarding
telnet=1
telnetport=2121

[log]
; Write to a logfile or to syslog.
; Setting filename to stderr is very useful during tests and development
syslog=1
```

```
filelog=0
filename=/dev/stderr

[input]
; A file or fifo input is using transport=file
transport=file
source=/dev/stdin

; When recieving data using ZeroMQ, the source is the URI to be used
;transport=zeromq
;source=tcp://localhost:8080
loop=1

[modulator]
; Gain mode: 0=FIX, 1=MAX, 2=VAR
gainmode=2

; Transmission mode
; If not defined, take the mode from ETI
;mode=2

; Set to 0 to disable CicEqualiser
dac_clk_rate=0

digital_gain=1.0

; Output sample rate
rate=5000000

[firfilter]
enabled=1
filtertapsfile=filtertaps.txt

[output]
; choose output: possible values: uhd, file
output=uhd

[fileoutput]
filename=/dev/stdout

[uhdoutput]
device="ip-addr=192.168.10.3"
#frequency=223936000
channel=12A
txgain=18

; possible values : internal, external, MIMO
refclk_source=internal

; possible values : none, external, MIMO
pps_source=none

; behaviour when external clock reference lock lost
; possible values: ignore, crash
behaviour_refclk_lock_lost=ignore


; Used for SFN with the UHD output
[delaymanagement]
synchronous=0

; whether to mute the TX when incoming frames have no timestamp
mutenotimestamps=0

; choose between fixed and dynamic offset definition
management=dynamic

fixedoffset=0.002
dynamicoffsetfile=modulator_offset
```

In den Konfigurationsdateien werden Kommentare durch ein Semikolon gekennzeichnet.

Die Multiplexkonfigurationsdatei besteht aus verschiedenen Abschnitten. Sie beginnen jeweils mit der Bezeichnung des Abschnitts in eckigen Klammern ([remotecontrol]). Anschließend werden die Parameter der entsprechenden Funktion definiert.

remotecontrol:

In diesem Abschnitt kann die Fernwartung aktiviert werden und der Telnetport definiert werden.

log:

Im Abschnitt **log** kann die Protokollierung im Systemlog und in eine Datei aktiviert werden. Zusätzlich muss bei einer Protokolldatei der Pfad angegeben werden.

input:

Im Abschnitt **input** wird die Schnittstelle für die Modutatoreingangsdaten definiert. Es kann eine Datei oder ein zmq+tcp Port genutzt werden. Wird eine Datei genutzt, so muss der Pfad angegeben werden. Zusätzlich kann das File wiederholt werden, falls es endet. Für einen zmq+tcp-Eingang muss die passende URL übergeben werden.

modulator:

Im Abschnitt **modulator** werden die Parameter der digitalen Modulation gesetzt. Der Parameter Gainmode bestimmt die Normalsierung der OFDM-Symbole, wobei zwischen einer Multiplikation mit einem festen Wert, einer Normalisierung auf den Spitzenwert eines jeden Frames oder einer speziellen Methode nach ETSI 300 798 [9] zu wählen ist. Es kann ein DAB-Mode definiert werden, der den im ETI-Stream definierten Mode überschreibt. Außerdem kann eine Digitalverstärkung und die Ausgangssamplerate gesetzt werden.

firfilter:

Ein FIR-Filter kann aktiviert und die Koeffizienten für das Filter übergeben werden.

output:

Im Abschnitt **output** kann zwischen einer Ausgabedatei (file) und dem uhd-Ausgang (uhd) für den USRP umgeschaltet werden.

fileoutput:

Wenn die Option File gewählt ist, wird der Ausgangsdatenstrom in die angegebene Datei geschrieben.

uhdoutput:

Die Parameter für den USRP werden im Abschnitt **uhdoutput** angegeben. Zunächst wird das Gerät anhand der IP-Adresse spezifiziert. Anschließend wird die Sendefrequenz oder der DAB-Block definiert und eine USRP-interne HF-Verstärkung angegeben. Schließlich werden noch Parameter definiert, die für einen SFN-Einsatz relevant sind.

Weitere Informationen sind im Handbuch des DAB-Senders verfügbar.

3. Laboruntersuchungen

In dem folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die einzelnen Komponenten alleine und als Gesamtsystem darauf überprüft wurden, ob sie dem Ziel genügen, eine standardkonforme Hörfunkübertragung mit DAB und DRM+ gewährleisten zu können. Damit lassen sich auch eventuelle Änderungen evaluieren, mit denen dieses Ziel gegebenenfalls erreicht werden kann.

Zunächst wird das Konzept für die Laboruntersuchungen vorgestellt. Anschließend wird die erforderliche und benutzte Messhardware beschrieben. Schließlich werden auch die Messaufbauten beschrieben, die dahinterstehende Theorie kurz erläutert und die Ergebnisse vorgestellt.

Insgesamt ist für den **Multiplexgenerator** folgendes durchzuführen:

- Festlegung von technischen Werten zur Übernahme von Audiosignalen (analog und digital, von externen Geräten und über abgelegte Dateien) und Empfehlungen für die Einstellungen
- Festlegung der Bedingungen zur Übernahme von Zusatzinformationen (von externen Geräten und über abgelegte Dateien)
- Prüfung der Einhaltung der erforderlichen ETSI-Normen
- Prüfung der Betriebssicherheit für einen Dauereinsatz
- Einstellungen der Audio-Encoder und des Multiplexers mit Empfehlungen für eine Standardeinstellung
- Prüfung der Ausgabe des Datenstroms zur Übergabe an die VHF-Sendeeinheit
- Vergleich der Qualität der Ausgangssignale mit denen, die mit dem DAB-Contentserver des Fraunhofer IIS und des Modulators von Rohde & Schwarz erzeugt werden

Mit der **VHF-Sendeeinheit** sind folgende Laboruntersuchungen mit einem DAB-Signal und für verschiedene HF-Sendeleistungen durchzuführen:

- Messung der Spektren am Ausgang des USRP und des Linearverstärkers
- Festlegung von geeigneten Einstellungen des USRP, um ein optimales OFDM-Sendesignal an den Ausgängen des USRP und des Linearverstärkers zu erzeugen
- Messungen über die Einhaltung der DAB-Spektralmaske am Ausgang des Antennenfilters
- Soweit es machbar ist, sollen obige Messungen auch mit einem DRM+-Signal durchgeführt werden. Basis hierzu wäre u.a. die Inbetriebnahme der DRM-Software SPARK mit Ansteuerung des USRP.

Soweit machbar, sollen diese Messungen auch mit einem DAB- und DRM+-Signal im Nachbarkanal durchgeführt werden.

3.1. Konzept

Die Labormessungen teilen sich in zwei unterschiedliche Bereiche auf. Zum einen soll mit geeigneter Hard- und Software der Ausgangsdatenstrom des Multiplexgenerators untersucht und zum anderen sollen die HF-Eigenschaften der beteiligten Komponenten ermittelt werden.

Zur Untersuchung des Ausgangsdatenstroms wird die Software „DAB-Scout.2“ des Institut für Rundfunktechnik (IRT) genutzt. Sie wird auf einem PC mit Windows 7 Betriebssystem installiert und empfängt mit einem vom IRT zur Verfügung gestellten DAB-Empfänger das DAB-Signal. Auch ist es möglich, vorher gespeicherte ETI-Dateien in die Software einzulesen und zu untersuchen.

Die HF-Eigenschaften der VHF-Sendeeinheit bzw. des Linearverstärkers müssen mit passendem Testequipment ausgemessen werden, da hierzu keine adäquaten Datenblattangaben zur Verfügung stehen. Durch die Messung der Nichtlinearitäten des Verstärkers, genauer des Intercept-Punkts dritter Ordnung, kann schon frühzeitig abgeschätzt werden, ob ein Antennenfilter zum ordnungsgemäßen Betrieb notwendig ist. Diese Messungen werden mit zwei Signalgeneratoren und einem Signalanalysator der Firma Rohde & Schwarz durchgeführt.

Auch die HF-Eigenschaften des USRP werden überprüft. Dazu wird der USRP an einen Signalanalysator angeschlossen und mit geeigneten Testsignalen betrieben. So werden die Nichtlinearitäten (Schulterabstand) in Abhängigkeit von der Verstärkung des internen HF-Verstärkers gemessen.

Zusätzlich wird der zu erwartende Crestfaktor des OFDM-Ausgangssignals am USRP geschätzt, indem das Ausgangssignal über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet wird, eine Amplitudendichtefunktion bestimmt und daraus Effektiv- und Spitzenwert sowie Crestfaktor berechnet werden. Dies kann bei der Aussteuerung des HF-Verstärkers hilfreich sein, um zu vermeiden, dass Signalspitzen in den nichtlinearen Arbeitsbereich hineinragen und es zu großen Signal- und Nachbarkanalstörungen durch Intermodulationsprodukte kommt.

Durch den gleichzeitigen Betrieb von USRP mit dem HF-Verstärker wird das Sendesignal auf Einhaltung der DAB-Spektralmaske und auf weitere Nebenaussendungen überprüft. Dabei wird der Schulterabstand des Ausgangssignals ermittelt. Dies geschieht in Abhängigkeit von der einstellbaren Verstärkung im USRP und gegebenenfalls der Leistungsverstärker.

Durch Nutzung eines Analysers für digitale Rundfunksysteme werden auch Signaleigenschaften betrachtet, die mit Standardanalysern nicht ohne weiteres betrachtet werden können. Dies sind insbesondere Modulations-, Phasen- und IQ-Ungleichgewichtsfehler.

Die rundfunksystembezogenen Messungen werden sowohl für DAB- als auch für DRM+-Signale durchgeführt.

3.2. Messhardware

Zur Durchführung der Labormessungen wird das nachfolgend aufgeführte Equipment verwendet.

3.2.1. DAB-Scout 2

Die Software DAB-Scout.2 des IRT wird auf einem Windows PC ausgeführt und erlaubt das Analysieren eines DAB-Multiplex. Sie nimmt die Daten mittels eines DAB-Sticks oder als ETI-Datei entgegen. Es lassen sich der Multiplexaufbau, die Datenraten und die diversen Informationen im „Fast Information Channel“ (FIC) auswerten.

3.2.2. SDB601

Der Testsender SDB601 ist ein Exciter von Rohde & Schwarz für DAB. Er nimmt ETI-Daten über einen Koaxialschluss entgegen, führt die digitale Modulation durch und moduliert die Basisbandsignale auf die gewünschte Trägerfrequenz auf.

3.2.3. FhG Contentserver

Der DAB-Contentserver des Fraunhofer IIS wurde genutzt, um zusammen mit dem Testsender SDB601 von Rohde & Schwarz einen Vergleichssender betreiben zu können. Der FhG Contentserver ist standardkonform und kann neben Audiodaten verschiedene Zusatzdatendienste bereitstellen. Er lässt sich über ein Webinterface bedienen und weist dadurch eine vollständige grafische Benutzeroberfläche auf.

3.2.4. ETL

Der ETL von Rohde & Schwarz ist ein Analyser, der hauptsächlich für die Analyse von analogen und digitalen TV-Signalen entwickelt wurde. Er verfügte jedoch auch über die Möglichkeit, DAB-Signale zu überprüfen. Dies ermöglicht die tiefergehende Betrachtung der Signale, als es durch gewöhnliche Spektrumanalysatoren möglich ist.

3.2.5. SMBV 100A

Der SMBV 100A ist ein Vektorsignalgenerator von Rohde & Schwarz. Er lässt sich im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3,2 GHz betreiben und ermöglicht die Erzeugung einer Vielzahl von Signalen.

3.2.6. SMU 200A

Der SMU 200A ist ein Vektorsignalgenerator von Rohde & Schwarz. Er lässt sich im Frequenzbereich von 100 kHz bis 2,2 GHz betreiben und ermöglicht die Erzeugung einer Vielzahl von Signalen. Außerdem verfügt er über Fadingprofile, die eine Simulation unterschiedlicher Funkkanäle ermöglichen.

3.2.7. FSV 7

Der FSV 7 ist ein Universalspektrumanalysator von Rohde & Schwarz. Er kann den Frequenzbereich von 9 kHz bis 7 GHz mit einer Bandbreite von 28 MHz analysieren. Es lassen sich schnelle Spektrumsmessungen durchführen, da der FSV hauptsächlich FFT-Analysen durchführt.

Er weist allerdings folgendes unerwartetes IP3-Verhalten auf:

Bei zunächst steigender Dämpfung des Eingangssignals werden die vom Analyser intern erzeugten IP3-Verzerrungsprodukte nicht wie erwartet schwächer, sondern zunächst stärker.

In den Bildern 34 bis 37 ist ein Zweitonsignal mit je -15 dBm Pegel bei einem Abstand der Töne von 10 kHz bei verschiedener Eingangsdämpfung zu sehen.

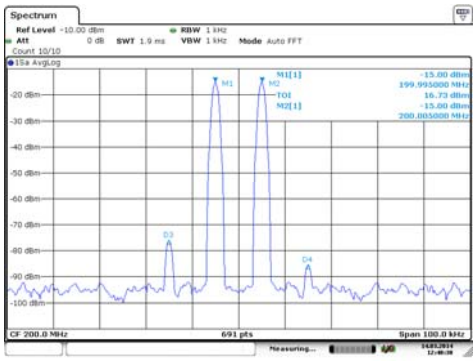


Bild 33: FSV 0 dB Eingangsdämpfung

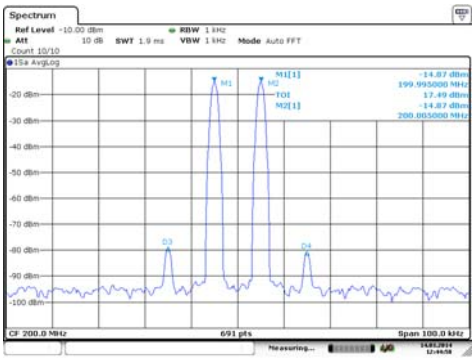


Bild 34: 10 dB Eingangsdämpfung

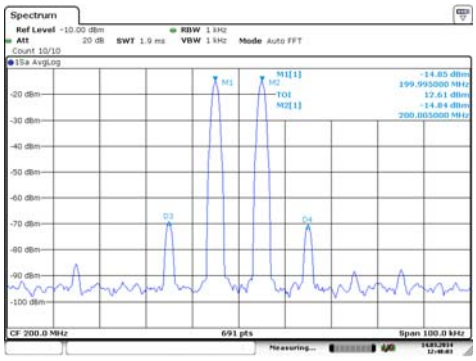


Bild 35: FSV 20 dB Eingangsdämpfung

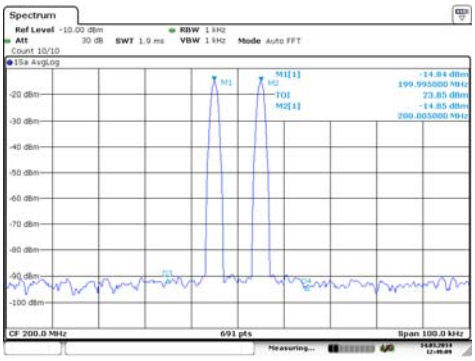


Bild 36: FSV 30 dB Eingangsdämpfung

Wie zu erkennen ist, kommen die IP3-Verzerrungen erst bei 30 dB Eingangsdämpfung unterhalb des FSV-Eigenrauschpegels zu liegen. Dies liegt am technischen Aufbau des FSV und ist eine systembedingte Schwäche von allen Analysern, die auf breitbandiger FFT-Analyse basieren und dafür hochdynamische A/D-Wandler benutzen. Durch eine starke Eingangsdämpfung wird jedoch die Messdynamik stark herabgesetzt und es besteht die Möglichkeit, dass auch bei anderen Pegeln die A/D-Wandler des Analysers ungünstig ausgesteuert werden und anstatt der Intermodulations-Produkte des Messobjekts vor allem die Verzerrungen des Analysers bestimmt werden. Um dies zu vermeiden, wurde für die Messung der Intermodulationsprodukte der nicht auf FFT-Analyse basierende und dadurch nicht von diesem Problem betroffene FSP 30 benutzt.

3.2.8. FSP 30

Der FSP 30 ist ein Universalspektrumanalysator und das direkte Vorgängermodell des FSV. Er ist im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 GHz einsetzbar. Da der FSP ein klassischer Analyser ist, der die Frequenzanalyse durch Mischer zum Verschieben des Spektrums und durch schmalbandige Filter erstellt, treten die IP3-Verzerrungen hauptsächlich am 1. Mischer auf. Dies führt dazu, dass eventuell auftretende IP3-Produkte mit steigender Signaldämpfung wie erwartet schwächer werden. Durch dieses vorhersagbare Verhalten ist der FSP besser für Nichtlinearitätsmessungen geeignet als der FSV.

3.3. Messungen

Nachfolgend werden die Messergebnisse zum Multiplexgenerator und der VHF-Sendeeinheit vorgestellt. Zusätzlich werden die Versuchsaufbauten und bei einigen Messungen die zugrunde liegende Theorie erläutert.

3.3.1. Multiplexgenerator

3.3.1.1. Ermittlung der „Perceptual Evaluation of Audio Quality (PEAQ)“ nach ITU-R BS.1387

Die Software PQevalAudio der McGill University Kanada implementiert die PEAQ-Messung nach dem Standard ITU-R BS.1387. Sie produziert keine exakt standardkonformen Ergebnisse, jedoch wären diese hinreichend genau, um für die Zwecke dieses Projekts eine Aussage über die Qualität der komprimierten Musik bei verschiedenen Bitraten zu treffen. Dazu werden die Testdateien der Software übergeben, die eine Bewertung von 0 (keine Qualitätsverschlechterung) bis -4 (sehr schlecht) errechnet.

Leider ist es nicht gelungen mit PQevalAudio nachvollziehbare Ergebnisse zu ermitteln. Bei Tests konnten selbst bei Dateien mit hohen Bitraten und hörbar guter Qualität nur sehr schlechte Bewertungen gewonnen werden. Deshalb wurde dieser Test nicht durchgeführt.

Um dennoch zu einer relativen Bewertung der Encoder und Bitraten zu gelangen, wurden folgende nicht standardkonforme Hörtests durchgeführt.

3.3.1.2. Audioqualität der beiden Codecs bei verschiedenen Bitraten

Zur Bewertung der Audioqualität der beiden Quellencoder (TooLame, fdk-aac-dabplus) wurden unterschiedliche Testdateien mit beiden Encodern in verschiedenen Bitraten codiert. Diese Dateien wurden dann auf einem hochwertigen Audiosystem standardkonform dekodiert und miteinander und dem unkomprimierten Ausgangsmaterial verglichen. Dabei wurden je eine Aufnahme von klassischer, Pop- sowie Rockmusik verwendet. Als D/A-Wandler wurde ein Orpheus von Prismsound genutzt und als Abhörmonitore kam ein Paar MSC1 von Manger zum Einsatz.

Die Hörversuche wurden in den verschiedenen Genres durchgeführt, die Beurteilung erfolgte nach subjektiven Kriterien, wie Hörbarkeit von Codierartefakten, Rauheit, Klarheit, Räumlichkeit, die von Person zu Person unterschiedlich gehört und bewertet werden. Deshalb handelt es sich hierbei um einen subjektiven Test, der in Zusammenarbeit mit dem Tonmeister Manfred Stöckl[2] durchgeführt wurde.

- Bitraten, bei denen mit den gewählten Einstellungen Codierartefakte sehr deutlich zu hören sind, werden als schlechte Qualität bewertet. Dabei fehlt es an Klarheit und Deutlichkeit.
- Bei Bitraten, die zu einer akzeptablen Audioqualität führen, sind Codierartefakte zwar noch zu hören, allerdings beeinträchtigten sie das Hörempfinden nicht mehr so stark, wie in der ersten Kategorie.
- Bei Bitraten, die zu einer guten Audioqualität führen, sind Codierartefakte nahezu unhörbar und die Musik klingt nicht mehr rau und war klar zu hören. Auch die Räumlichkeit der Aufnahmen ist deutlich zu hören.

[2] Manfred Stoeckl Digitale Musikproduktion, Brotstaße 6, 54290 Trier, digitalemusikproduktion.de

- Hohe Bitraten ermöglichen sehr gute Audioqualität. Codierartefakte sind nun unhörbar und die Rauheit ist aus dem Signal verschwunden. Die Musik klingt klar und die Räumlichkeit ist sehr ausgeprägt. Es lassen sich selbst im direkten Vergleich zwischen unkomprimierter und komprimierter Musik nur geringfügige Unterschiede wahrnehmen.

Der AAC-Codec erreicht mit deutlich geringerer Bitrate vergleichbare Resultate wie der MP2-Codec. Mit Spectral Band Replication (SBR) und Parametric Stereo (PS) (AAC-v2) lassen sich meist noch weitere 8 kbit/s an Bitrate einsparen. Außerdem ist die Räumlichkeit und Klarheit generell etwas besser als ohne diese Erweiterungen. Die gegen Codierartefakte anfälligste Musikrichtung ist klassische Musik, während Rockmusik relativ unempfindlich ist und somit auch mit vergleichsweise geringen Bitraten noch in akzeptabler Qualität wiedergegeben werden kann. Um in allen Genres eine gute Qualität gewährleisten zu können, sollte man mit diesen Codecs eine Bitrate von 96 kbit/s AAC oder 256 kbit/s MP2 nicht unterschreiten. Sollen viele Services in einem Multiplex ausgestrahlt werden so reicht auch eine Bitrate von 64 kbit/s AAC oder 160 kbit/s MP2 für eine akzeptable Audioqualität aus.

Wenn keine klassische Musik verbreitet wird, so kann die Bitrate bei akzeptabler Audioqualität auf 48 kbit/s AAC und 128 kbit/s MP2 sinken.

Da wie bei vielen Codecs auch bei MP2 und AAC nur die Ausgangsdatenströme standardisiert sind, ist es möglich, dass verschiedene Codecs bei gleicher Bitrate eine unterschiedliche Audioqualität bereitstellen können. Deshalb ist es denkbar, dass andere Codecs die hier subjektiv ermittelten Ergebnisse hinsichtlich der benötigten Bitrate unterbieten und hinsichtlich der Audioqualität überbieten können. Auf Grund des modularen Softwareaufbaus sollte es im Allgemeinen möglich sein, auch einen effizienteren Codec in den Multiplexgenerator integrieren zu können.

3.3.1.3. DAB-Scout Multiplex-Aufbau

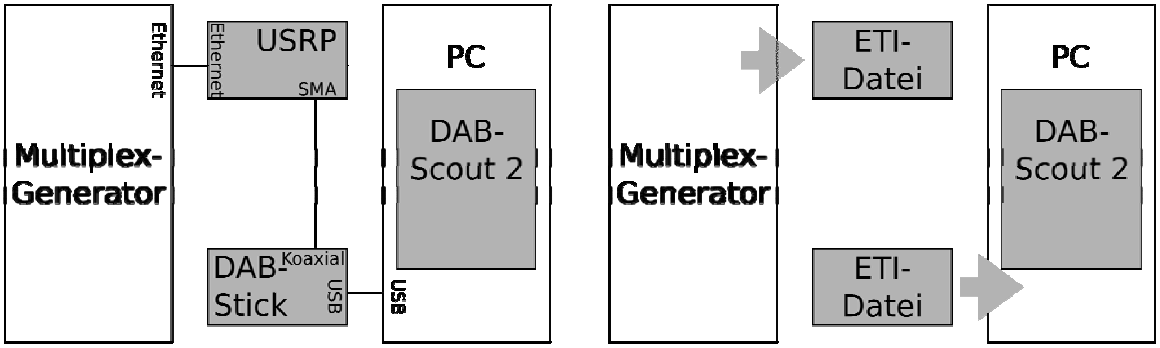


Bild 37: Überprüfen des Ausgangsdatenstroms , Empfang mittels DAB-Stick (links) und über aufgezeichnete ETI-Datei (rechts)

Der Ausgangsdatenstrom des Multiplexgenerators wird mit der Software DAB-Scout.2 des IRT überprüft. Dazu wird der Multiplexgenerator an den USRP angeschlossen und das DAB-Signal mit einem DAB-Stick empfangen (Bild 37). Anschließend kann der empfangene Datenstrom analysiert werden. Alternativ kann im Multiplexgenerator eine ETI-Datei erstellt werden, die direkt in der Software geöffnet werden kann, um Bitfehler beim Empfangen zu vermeiden.

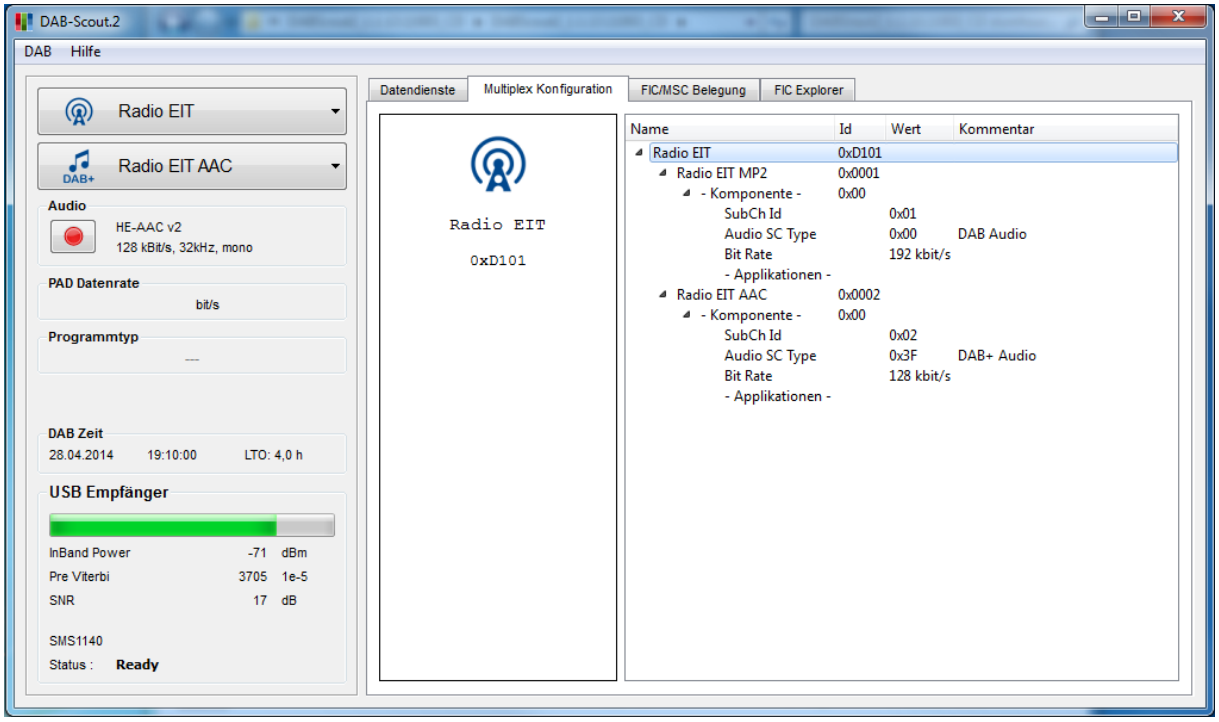


Bild 38: Multiplexaufbau DAB-Scout.2

Der DAB-Scout.2 zeigt die beiden Services des Multiplex und andere Daten an (siehe Bild 38). Außerdem lassen sich die FIC-Daten anzeigen. Die Analyse des mit den ODR-mmB-Tools erzeugten DAB-Stroms ergab, dass sich die Audiodienste empfangen lassen. Standardkonforme Datendienste ließen sich mit der zum Zeitpunkt des Tests verwendeten Version der Multiplex-Software nicht erfolgreich implementieren.

Auch der Contentserver des Fraunhofer IIS wurde mit DAB-Scout.2 untersucht. Ein Datendienst mit MOT-Slideshow ließ sich erfolgreich erzeugen. Auf Grund der beschränkten Zeit konnten jedoch nicht alle implementierten Funktionen des Contentservers des getestet werden.

3.3.2. VHF-Sendeeinheit

Für die Messungen an der VHF-Sendeeinheit wurden die beiden verfügbaren HF-Verstärker bezüglich verschiedener Eigenschaften überprüft. Dazu wurden mit den beiden Signalgeneratoren SMBV und SMU sowie dem USRP Testsignale erzeugt, bei Bedarf mit einem Combiner addiert und in einen der Verstärker eingespeist. Dessen Ausgangssignal wird mit einem Abschlusswiderstand mit Messausgang um 30 dB gedämpft und mit dem Spektrumanalyser ausgewertet.

Jede Messung erfolgte mit dem Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics mit 10 W Ausgangsleistung ebenso wie für den 3B0K1A von Electrolink.

Es war beabsichtigt, den Verstärker 3B0K1A von Electrolink mit 100W Ausgangsleistung zu testen. Die Ausgangsleistung ist über die in Abschnitt 0 beschriebene Software mittels eines Software-Schiebereglers einstellbar. Bei Rechtsanschlag dieses Reglers liegt die Ausgangsleistung jedoch nicht bei der maximalen Nennleistung von 100 W, sondern der Verstärker gibt bis zu 120 W Ausgangsleistung ab. Dies wurde erst bei der Abnahmemessung des Hörfunksenders durch die BNetzA festgestellt. Dies wurde korrigiert, sodass die Ausgangsleistung für die Abnahmemessungen 100 W betrug. Zu diesem Zeitpunkt waren aber notwendige Messgeräte nicht mehr ver-

fügbar, sodass die Nichtlinearitätsmessungen für 100W Ausgangsleistung nicht wiederholt werden konnte. Diese Messwerte beziehen sich wie angegeben auf 120 W Ausgangsleistung.

Den einzelnen Kapiteln ist eine kurze Übersicht über die für diese Messungen relevante Theorie vorangestellt. Diese soll die Zusammenhänge erläutern und orientiert sich an dem Buch von Christoph Rauscher: Grundlagen der Spektrumanalyse [8].

3.3.2.1. 1 dB – Kompressionspunkt

3.3.2.1.1. Theoretische Vorüberlegungen

Ein ideales nachrichtentechnisches System überträgt Signale vom Eingang zum Ausgang, ohne sie zu verzerren. Die Spannungsübertragungsfunktion eines solchen Systems ist

$$u_a(t) = G_u \cdot u_e(t) \quad (1)$$

mit $u_a(t)$ Spannung am Ausgang des Systems
$u_e(t)$ Spannung am Eingang des Systems
G_u Spannungsverstärkung des Systems

Solche idealen Systeme lassen sich in der Praxis nur mit passiven Bauelementen realisieren. So können z.B. resistive Dämpfungsglieder als ideal angenommen werden.

Hingegen weisen Systeme, die Halbleiterbauelemente enthalten, Nichtlinearitäten auf. Das Übertragungsverhalten lässt sich in diesem Fall durch eine Potenzreihe annähern. Es gilt:

$$u_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot u_e^n(t) = a_1 \cdot u_e(t) + a_2 \cdot u_e^2(t) + a_3 \cdot u_e^3(t) + \cdots \quad (2)$$

mit $u_a(t)$ Spannung am Ausgang des Systems
$u_e(t)$ Spannung am Eingang des Systems
a_n Koeffizient des jeweiligen nichtlinearen Elements der Spannungsverstärkung

In den meisten Fällen genügt die Betrachtung des quadratischen sowie kubischen Glieds, sodass die Potenzreihe nach Gl. 2 nur bis $n = 3$ entwickelt werden muss.

Bei vielen Komponenten, so z.B. Mischern, ist das nichtlineare Verhalten sogar erwünscht. Verstärker hingegen sollen Eingangssignale möglichst verzerrungsfrei verstärken. Die Linearität ist daher ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung eines Verstärkers.

Die Auswirkungen von Nichtlinearitäten eines nachrichtentechnischen Systems auf dessen Ausgangsspektrum hängen vom Eingangssignal ab.

Der 1 dB-Kompressionspunk eines Systems markiert nun den Punkt seines Aussteuerbereichs, an dem seine Verstärkung aufgrund von Sättigung um 1 dB gegenüber dem linearen Anstieg zurückgeht (siehe Bild 39). Der 1 dB-Kompressionspunkt kann sowohl auf den Eingangspegel als auch auf den Ausgangspegel bezogen werden. Bei Leistungsverstärkern gibt man meist den Ausgangspegel an, bei dem die 1 dB-Kompression eintritt.

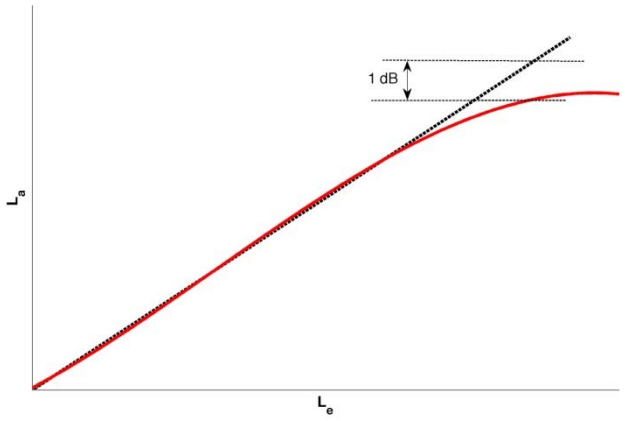


Bild 39: 1 dB - Kompressionspunkt

Wenngleich im Allgemeinen eine Kompression des Ausgangssignals festgestellt werden kann, so gibt es dennoch Verstärker, die so wenig komprimieren, dass kein 1 dB-Kompressionspunkt zu ermitteln ist. Es kann vorkommen, dass ein Verstärker vor dem Eintreten einer ausreichenden Kompression überlastet und dadurch thermisch zerstört wird.

3.3.2.1.2. Laboraufbau

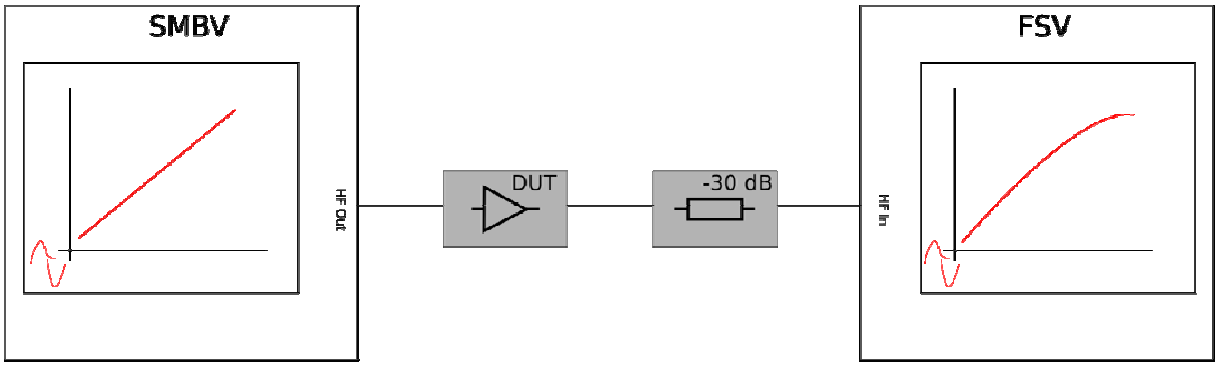


Bild 40: Messung des 1 dB-Kompressionspunkt

Um den 1 dB-Kompressionspunkt des HF-Verstärkers zu ermitteln, wird wie in Bild 40 dargestellt mit Hilfe des Signalgenerators ein Sinussignal mit definierter Leistung erzeugt und mit dem Spektrumanalysator die Ausgangsleistung gemessen. Die Eingangsleistung des Sinussignals wird schrittweise so lange erhöht, bis die gemessene Ausgangsleistung des „Device under Test“, kurz DUT, 1 dB unter der linearen Interpolation der Ausgangsleistung liegt. Dieser Punkt ist der 1dB-Kompressionspunkt. Er trennt den sogenannten linearen vom nichtlinearen Arbeitsbereich des Verstärkers. Durch Protokollierung der Zwischenwerte beim Aussteuern des Verstärkers kann gleichzeitig eine Kennlinie ermittelt werden.

3.3.2.1.3. Messergebnisse

Der 1dB-Kompressionspunkt konnte bei beiden Verstärkern aus unterschiedlichen Gründen nicht ermittelt werden.

Der 3B0K1A von Electrolink verfügt über eine Ausgangsleistungsregelung und benötigt einen Eingangspegel von -6 dBm ± 3 dBm. Deshalb ist es auch nicht möglich, eine Aussteuerungskennlinie zu bestimmen.

Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics ist ein einfaches Verstärkermodul ohne Leistungsregelungen. Zwar ist es möglich die Kennlinie aufzunehmen, jedoch wird die Ausgangsleistung zu groß, bevor die Verstärkung um 1 dB absinkt. Dies hat zur Folge, dass die Ausgangsstufe des Verstärkers thermisch zerstört wird, bevor der 1 dB-Kompressionspunkt erreicht ist.

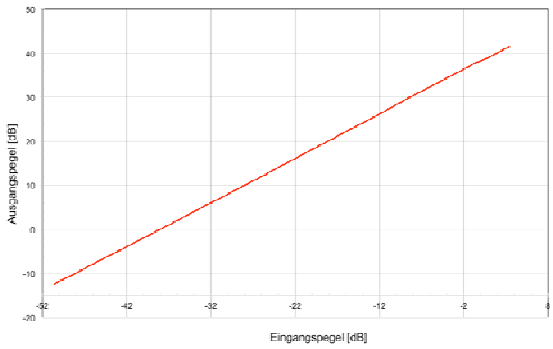


Bild 41: Kennlinie PCS

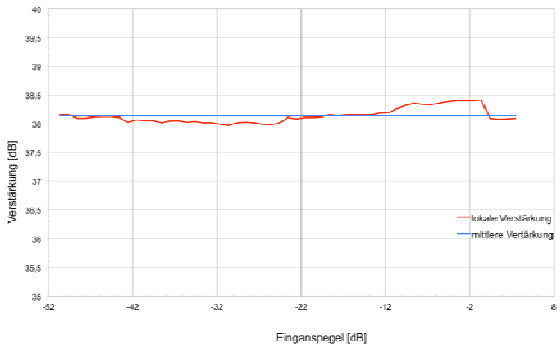


Bild 42: Verstärkung PCS

Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier weist eine sehr lineare Kennlinie auf (siehe Bild 41). Mit einer Abweichung um nur ± 0,25 dB von der mittleren Verstärkung von 38,14 dB über den gesamten Arbeitsbereich schwankt diese nur sehr begrenzt (Bild 42).

3.3.2.2. Intercept – Punkte

3.3.2.2.1. Theoretische Vorüberlegungen

Liegt am Eingang des Systems ein einzelnes sinusförmiges Signal $u_e(t)$ an mit

$$u_e(t) = \hat{U}_e \cdot \sin\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right) \tag{3}$$

mit $\hat{U}_e$ Spitzenwert von $u_e(t)$

$f_{e,1}$ Frequenz von $u_e(t)$,

so spricht man von Einton-Aussteuerung. Durch Einsetzten von Gl.3 in Gl.2 und bei Abbruch nach dem 3. Glied ergibt sich

$$u_a(t) = a_1 \cdot u_e(t) + a_2 \cdot u_e^2(t) + a_3 \cdot u_e^3(t)$$

$$= a_1 \cdot \hat{U}_e \cdot \sin\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right) + a_2 \cdot \hat{U}_e^2 \cdot \sin^2\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right) + a_3 \cdot \hat{U}_e^3 \cdot \sin^3\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right)$$

$$= a_1 \cdot \hat{U}_e \cdot \sin\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right) + a_2 \cdot \hat{U}_e^2 \cdot \frac{1}{2}\left(1 - \cos\left(2 \cdot 2\pi f_{e,1} \cdot t\right)\right)$$

$$+a_3 \cdot \hat{U}_e^3 \cdot \frac{1}{4}\left(3\sin\left(2\pi f_{e,1} \cdot t\right) + \sin\left(3 \cdot 2\pi f_{e,1} \cdot t\right)\right) \tag{4}$$

Der durch die geraden Exponenten auftretende Gleichanteil kann wegen der bei Verstärkern üblichen Gleichanteilsunterdrückung vernachlässigt werden.

Die Pegel der Spektrallinien ergeben sich zu

$$A_1 = a_1 \cdot \hat{U}_e + \frac{3}{4} a_3 \cdot \hat{U}_e^3 = 10 \cdot \log\left(a_1 \cdot \hat{U}_e + \frac{3}{4} a_3 \cdot \hat{U}_e^3\right)\ dB$$

$$A_2 = \frac{1}{2} a_2 \cdot \hat{U}_e^2 = 2 \cdot 10 \cdot \log\left(\sqrt{\frac{1}{2} a_2} \cdot \hat{U}_e\right)\ dB$$

$$A_3 = \frac{1}{4} a_3 \cdot \hat{U}_e^3 = 3 \cdot 10 \cdot \log\left(\sqrt[3]{\frac{1}{4} a_3} \cdot \hat{U}_e\right)\ dB$$

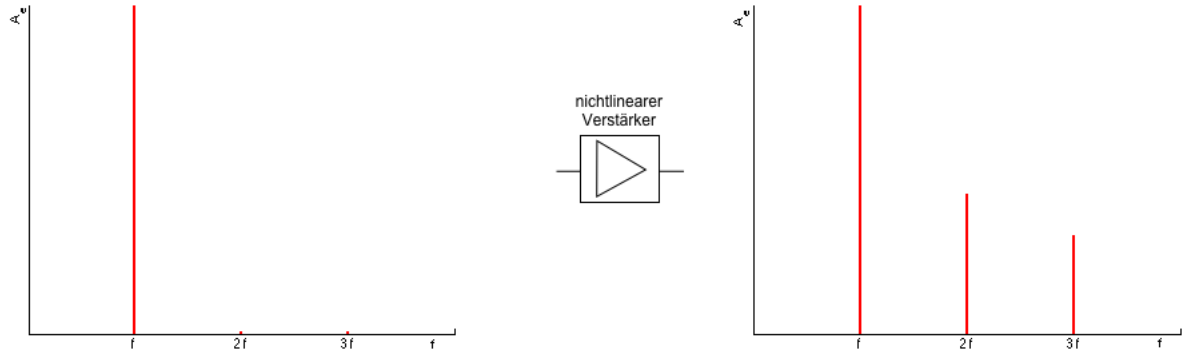


Bild 43: Spektrum vor und nach einem nichtlinearen System

Es ist in Bild 43 zu erkennen, dass durch die Nichtlinearitäten Harmonische des Eingangssignals mit den Frequenzen $f_{n-1.H} = n \cdot f_1$ entstehen.

Der Pegel dieser Harmonischen hängen von den Koeffizienten a_n in Gl. 2 ab. Es besteht aber auch eine Abhängigkeit von der Ordnung n der jeweiligen Harmonischen sowie vom Eingangspegel. Bei Erhöhen des Eingangspegels steigen die Pegel der Harmonischen überproportional mit ihrer Ordnung, d.h. eine Änderung des Eingangspegel um Δ dB führt zu einer Änderung des Harmonischenpegels um $n \cdot \Delta\ dB$.

Der Klirrfaktor bildet nun das Verhältnis zwischen Oberwellen- und Gesamtsignalleistung.

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}} \qquad (5)$$

mit U_n Effektivwert der n-1-ten Hanmonischen

Er ist wie die Harmonischen selbst abhängig vom Eingangspegel L_e. Daher ist bei der Angabe eines Klirrfaktors stets der Eingangspegel anzugeben. Bei vielen Systemen wird ein maximaler Eingangspegel angegeben, bei dem ein maximal zulässiger Klirrfaktor nicht überschritten wird.

Im Vergleich zum Klirrfaktor wesentlich günstiger ist eine pegelunabhängige Angabe, die mit Hilfe der Intercept-Punkte gemacht werden kann. Diese werden entsprechend ihrer Ordnung als Intercept-Punkte k n-ter Ordnung, oder kurz als IPkn-Punkt (z.B. IPk2-Punkt) angegeben. Der IPk2-Punkt entspricht demjenigen fiktiven Eingangs- oder Ausgangspegel, bei dem am Ausgang des nachrichtentechnischen Systems die erste Harmonische des Eingangssignals den gleichen Pegel wie die Grundwelle aufweist.

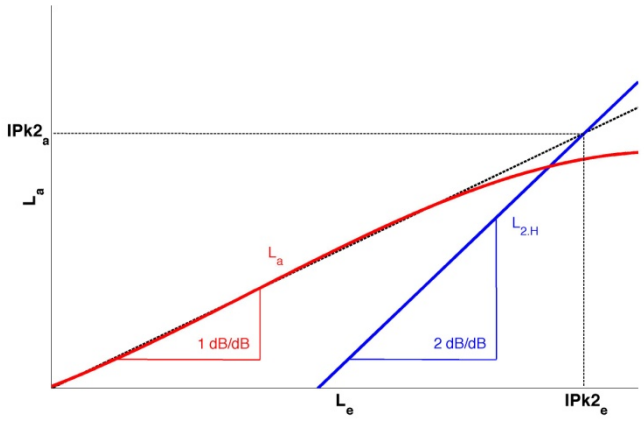


Bild 44: Intercept-Punkt k2

Der Intercept-Punkt kann in der Praxis nie erreicht werden, da ein System wie in Bild 44 bereits bei niedrigeren Eingangspegeln komprimiert. Der Intercept-Punkt kann sowohl auf den Eingangs- als auch auf den Ausgangspegel bezogen werden, man spricht daher von Eingangs- bzw. Ausgangs-Intercept-Punkt (hier mit $IPk2_e$ bzw. $IPk2_a$ bezeichnet).

Bei gegebenem Eingangspegel L_e und Harmonischenabstand a_2 der zweiten Harmonischen lässt sich dieser wie folgt berechnen:

$$IPk2_e = a_2 + L_e \quad (6)$$

mit $IPk2_e$ Eingangs-Intercept-Punkt k2 in dBm

a_2 Pegeldifferenz zwischen Oberwelle 2. Ordnung und der Grundwelle des Eingangssignals

L_e Pegel eines der beiden Eingangssignale in dBm

Für den auf den Ausgang bezogenen $IPk2_a$ gilt

$$IPk2_a = IPk2_e + g \quad (7)$$

mit g Leistungsverstärkung des Systems

Im Folgenden wird am Eingang des Systems ein Zweitonsignal $u_e(t)$ bestehend aus 2 sinusförmigen Signalen gleicher Amplitude angelegt. Für das Eingangssignal gilt:

$$u_e(t) = \hat{U}_e \cdot \sin(2\,\pi\, f_{e,1} \cdot\, t) \;+\; \hat{U}_e \cdot \sin(2\pi\, f_{e,2} \cdot\, t) \quad (8)$$

mit $\hat{U}_e$ Spitzenwert der beiden sinusförmigen Signale

$f_{e,1}, f_{e,2}$ Signalfrequenzen

durch Einsetzen von Gl. 8 in die nichtlineare Übertragungsfunktion nach Gl. 2 erhält man u.a. die in Tabelle 7 aufgeführten Mischprodukte am Ausgang des Systems.

Tabelle 7: Mischprodukte an einem nichtlinearen System

Gleichspannungsanteil	$a_2 \cdot \frac{1}{2} \, (\widehat{U}_{e,1}^2 \, + \, \widehat{U}_{e,2}^2 \,)$
Grundwellen (1. Harmonische)	$a_1 \cdot \widehat{U}_{e,1} \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t)$ $a_1 \cdot \widehat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi f_2 \cdot t)$
2. Harmonische	$a_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \widehat{U}_{e,1}^2 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi f_1 \cdot t)$ $a_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \widehat{U}_{e,2}^2 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi f_2 \cdot t)$
Intermodulationsprodukte 2. Ordnung	$a_2 \cdot \widehat{U}_{e,1} \cdot \widehat{U}_{e,2} \cdot \cos(2\pi(f_1 - f_2) \cdot t)$ $a_2 \cdot \widehat{U}_{e,1} \cdot \widehat{U}_{e,2} \cdot \cos(2\pi(f_1 + f_2) \cdot t)$
3. Harmonische	$a_3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \widehat{U}_{e,1}^3 \cdot \sin(3 \cdot 2\pi f_1 \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \widehat{U}_{e,2}^3 \cdot \sin(3 \cdot 2\pi f_2 \cdot t)$
Intermodulationsprodukte 3. Ordnung	$a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \widehat{U}_{e,1}^2 \cdot \widehat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi(2f_1 + f_2) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \widehat{U}_{e,1} \cdot \widehat{U}_{e,2}^2 \cdot \sin(2\pi(2f_2 + f_1) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \widehat{U}_{e,1}^2 \cdot \widehat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi(2f_1 - f_2) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \widehat{U}_{e,1} \cdot \widehat{U}_{e,2}^2 \cdot \sin(2\pi(2f_2 - f_1) \cdot t)$

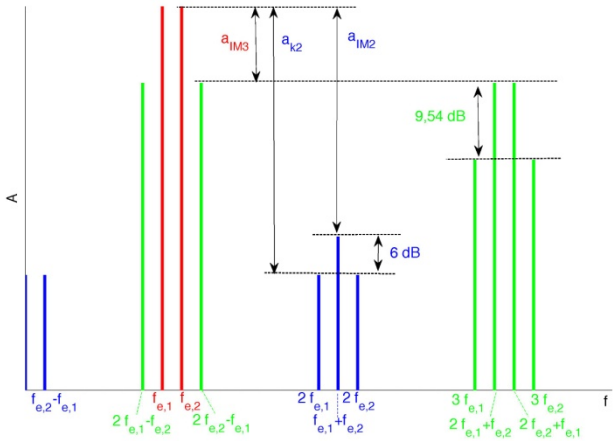


Bild 45: Ausgangsspektrum eines nichtlinearen Systems bei Zweitonaussteuerung

Neben Harmonischen entstehen noch zusätzlich Intermodulationsprodukte, auch Differenztöne genannt (Bild 45). Die Ordnung von Intermodulationsprodukten entspricht der Summe der Ordnungszahlen der beteiligten Komponenten. Für das Produkt bei $2 \cdot f_{e,1} \, + 1 \cdot f_{e,2}$ ergibt sich z.B. die Ordnung $2 + 1 = 3$. In Tabelle 7 sind nur Produkte bis zur 3. Ordnung berücksichtigt.

Während geradzahlige Intermodulationsprodukte weitab von den beiden Eingangssignalen liegen, treten ungeradzahlige Intermodulationsprodukte niedriger Ordnung (z.B. 3. oder 5. Ordnung) immer in unmittelbarer Umgebung der Eingangssignale auf.

Je nach Anwendung können sich Produkte sowohl geradzahliger als auch ungeradzahliger Ordnung störend auswirken. Im konkreten Fall sind bei dem Einsatz eines HF-Verstärkers für den DAB-Betrieb hauptsächlich die ungeradzahligen Intermodulationsprodukte niedriger Ordnung interessant, weil diese aufgrund der Vielzahl der Träger im Signal nahe am und im Nutzband auftreten und somit nicht herausgefiltert werden können. Die weiter entfernt liegenden Intermodulationsprodukte sowie Oberwellen werden durch ein steiles DAB-Maskenfilter sehr stark bedämpft.

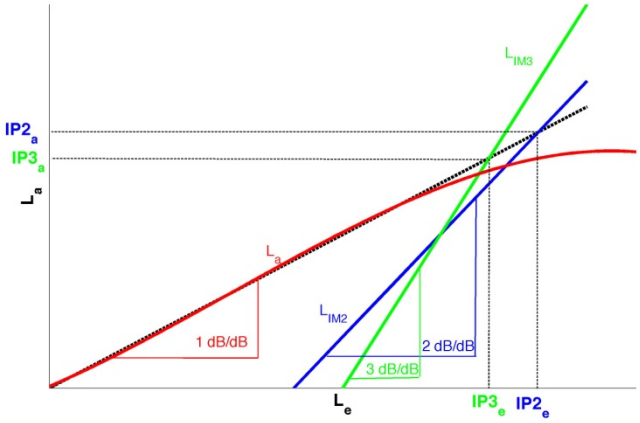


Bild 46: Intercept-Punkt 2. und 3. Ordnung

Wie bei den Harmonischen höherer Ordnung führt auch bei den Intermodulationsprodukten eine Pegeländerung beider Sinusträger am Eingang um Δ dB zu einer Pegeländerung des jeweiligen Intermodulationsprodukts um $n \cdot \Delta\, dB$. Angaben über die Pegeldifferenzen zwischen Intermodulationsprodukten und den Grundwellen der Sinusträger erfordern daher stets die Angabe des Eingangspegels, da sonst keine Aussage über die Linearität getroffen werden kann. Es ist daher auch hier vorteilhaft, den sogenannten Intercept-Punkt n-ter Ordnung zu berechnen (Bild 46). Für den auf den Eingang bezogenen Intercept-Punkt n-ter Ordnung gilt:

$$IPn_e = \frac{a_{IMn}}{n-1} + L_e \qquad (9)$$

mit IPn_e Eingangs-Intercept-Punkt n-ter Ordnung in dBm

a_{IMn} Pegeldifferenz zwischen Intermodulationsprodukt n-ter Ordnung und der Grundwelle des Eingangssignals

L_e Pegel eines der beiden Eingangssignale in dBm

Für den auf den Ausgang bezogenen $IP2_a$ gilt

$$IPn_a = IPn_e + g \qquad (10)$$

mit g Leistungsverstärkung des Systems

In den meisten Fällen werden die Intercept-Punkte 2. und 3. Ordnung angegeben. Für die Eingangs-Intercept-Punkte 2. bzw. 3. Ordnung gilt:

$$IP2_e = a_{IM2} + L_e \quad (11)$$

bzw.

$$IP3_e = \frac{a_{IM3}}{2} + L_e \quad (12)$$

Sowohl die Intermodulationsprodukte 2. Ordnung bei Zweiton-Aussteuerung als auch die 2. Harmonische bei Einton-Aussteuerung entstehen aufgrund des quadratischen Glieds der nichtlinearen Übertragungskennlinie. Zwischen IP2 und IPk2 bzw. IP3 und IPk3 besteht ein fester Zusammenhang (siehe auch Tabelle 7):

$$IPk2 = IP2 + 6dB \quad (13)$$

$$IPk3 = IP3 + 9{,}54dB \quad (14)$$

Die Interceptpunkte dienen in erster Linie zum Vergleich der Linearität verschiedener Verstärker. Die eingangsbezogenen Interceptpunkte können direkt miteinander verglichen werden, wohingegen die ausgangsbezogenen Interceptpunkte nur bei gleicher Ausgangsleistung vergleichbar sind. Wie in einem nachfolgenden Kapitel noch gezeigt wird, lassen sich jedoch über eine Schätzfolge aus den ausgangsbezogenen Interceptpunkte die zu erwarteten Schulterabstände abschätzen.

3.3.2.2.2. Laboraufbau

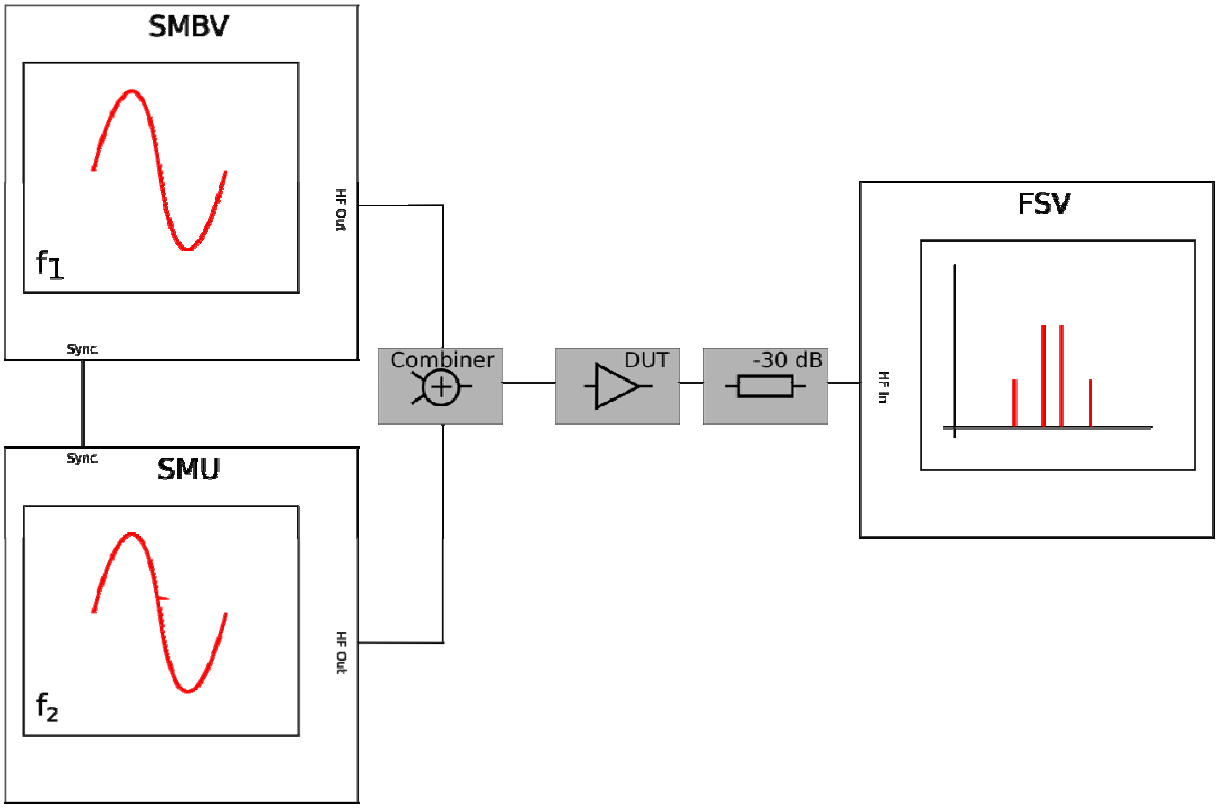


Bild 47: Messung des IP3-Punkt

Um den Intercept-Punkt 3. Ordnung zu ermitteln wird der Verstärker mit zwei Sinustönen, die sich nur wenig in ihrer Frequenz unterscheiden, angeregt (Bild 47). Ausgangsseitig erscheinen nun neben den Grundschwingungen die IM 3. Ordnung. Sie sind bei den Frequenzen $f_{IP3} = 2 \cdot f_1 - f_2$ sowie $f_{IP3} = 2 \cdot f_2 - f_1$ zu finden. Durch Abzug der Verstärkung können aus den so bestimmten ausgansseitigen Intercept-Punkten die eingangsseitigen Intercept-Punkte angegeben werden.

3.3.2.2.3. Messergebnisse

Die verwendeten Einzeltöne weisen einen Abstand von 1 kHz zueinander auf.

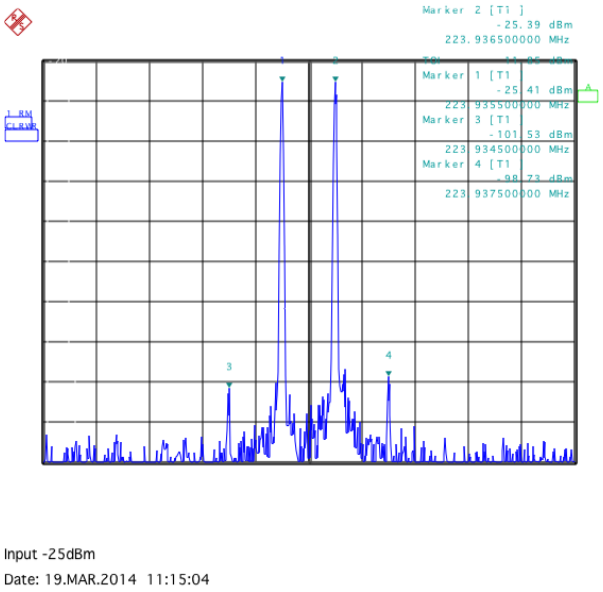


Bild 48: IP3-Messung des PCS-Verstärkers 10 W Ausgangsleistung

Die beiden Töne hatten jeweils einen Pegel von -25 dBm. Der ausgangsbezogene IP3-Punkt des Verstärkers von PCS ergibt sich damit nach dem Aufaddieren der Gesamtdämpfung des Messsystems zu $IP_{3,a} = 60\ dBm$ (Bild 48).

$$IPn_e = \frac{a_{IMn}}{n-1} + L_e \quad (9)$$

$$IPn_a = IPn_e + g \quad (10)$$

Nach Abzug der Verstärkung von 38,14 dB (3.3.2.1.3) ergibt sich der eingangsbezogene IP3-Punkt zu $IP_{3,e} = 21{,}86\ dBm$ Durch bislang nicht eindeutig geklärte Umstände erhöht sich der IP3-Punkt bei steigenden Eingangssignalpegeln um wenige dB. Vermutlich liegt dies an einer internen Biasstromkompensation des Verstärkers.

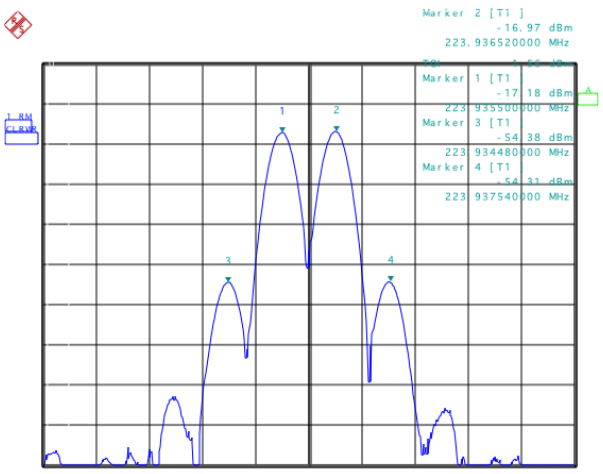


Bild 49: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 10W Ausgangsleistung

Bei einer eingestellten Ausgangsleistung von $10\ W$ beträgt der ausgangsseitige IP3-Punkt des Electrolink Verstärkers $IP_{3,a} = 55{,}7\ dBm$ (siehe Bild 49). Die Abbildung unterscheidet sich von Bild 48 weil bei der Messung eine andere Auflösebandbreite genutzt wurde. Der eingangsbezogene IP3-Punkt beträgt $IP_{3,e} = 9{,}7\ dBm$.

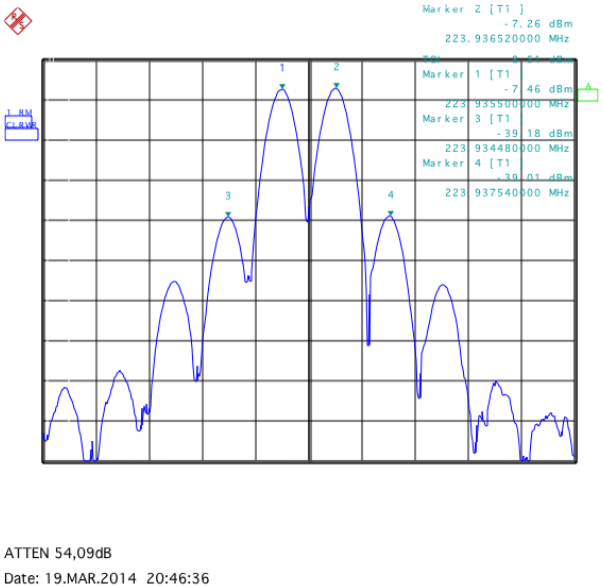


Bild 50: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 120W Ausgangsleistung

Bei einer eingestellten Ausgangsleistung von 120 W beträgt der ausgangsseitige IP3-Punkt $IP_{3,a} = 62{,}6\ dBm$ (siehe Bild 50). Der eingangsbezogene IP3-Punkt beträgt $IP_{3,e} = 5{,}8\ dBm$.

Im Vergleich der eingangsbezogenen IP3-Punkte zeigt sich, dass der Verstärker von PCS Electroniks einen höheren IP3-Punkt aufweist. Dass der eingangsbezogene IP3-Punk des Verstärkers von Electrolink bei verschiedenen Ausgangsleistungen unterschiedlich ist, liegt daran, dass die Verstärkung dieses Verstärkers nicht fest ist, sondern eingestellt werden kann. Dabei

muss der Eingangspegel konstant bleiben. Dies bedingt den niedrigeren IP3-Punkt bei 120 W Ausgangsleistung.

3.3.2.3. Frequenzgang

3.3.2.3.1. Laboraufbau

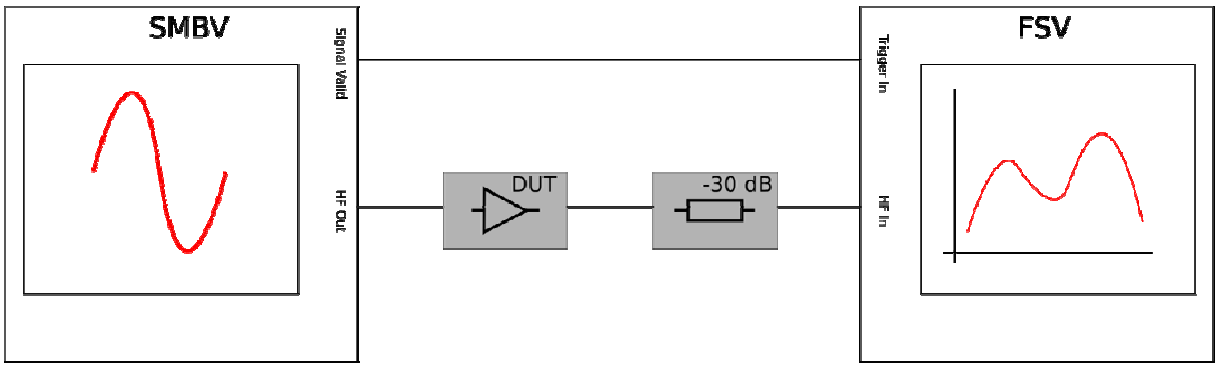


Bild 51: Messung des Frequenzgangs

Zum Messen des Frequenzgangs des HF-Verstärkers wird die „Max-Hold“-Funktion des Spektrumanalysators genutzt. Dabei zeigt der Analysator nur den maximalen Wert für eine Frequenz an. Im Signalgenerator wird für die klassische Frequenzgangmessung eine Sinusschwingung erzeugt und in kurzen Zeitabständen deren Frequenz erhöht (Bild 51). Dadurch wird der Frequenzgang des Verstärkers abgetastet. Da davon auszugehen ist, dass bei sinnvoller Aussteuerung eine Grundschwingung stets größer ist als eine von niedrigeren Frequenzen verursachte Oberschwingung, wird nur der lineare Anteil erfasst.

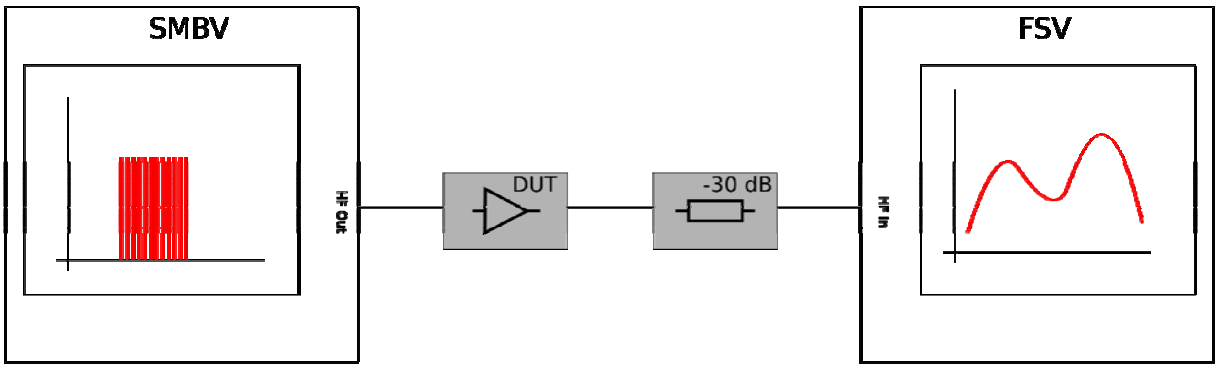


Bild 52: Messung des Frequenzgangs mit Multicarrier-Signal

Der Electrolink Verstärker 3B0K1A verfügt über eine Ausgangsleistungsregelung, die aufgrund des frequenzabhängigen Verhaltens des dafür benötigten Richtkopplers die Messung stark verfälscht. Daher wird für diesen Verstärker das Messprinzip geändert. Es wird ein das gesamte VHF Band III abdeckende 60 MHz breites Multicarriersignal konstanter Leistungsdichte erzeugt (Bild 52). Auch wenn diese Sinusschwingungen nicht gleichzeitig erzeugt werden, so wechseln die einzelnen Träger dennoch so schnell, dass die Leistungsregelung nicht im Eingriff ist. Das Leistungsspektrum am Ausgang des Verstärkers spiegelt dann den Frequenzgang wider.

3.3.2.3.2. Ergebnisse

Bild 53: Frequenzgang „PCS“

Der Frequenzgang des Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS fällt im VHF Band III leicht ab. Mit ± 1,5 dB ist er relativ glatt, wie Bild 53 zeigt.

Bild 54: Frequenzgang Electrolink

Der Frequenzgang des 3B0K1A von Elektrolink hat in der Mitte des VHF Band III einen leichten Einbruch (siehe Bild 54). Mit ± 1 dB kann er jedoch als glatt bezeichnet werden.

3.3.3. Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit

Nachfolgend sind die Messungen beschrieben, die in Kombination von Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit durchgeführt werden. Neben der Betrachtung des Ausgangssignals mit dem ETL wird auch auf die Abnahmemessung durch die BNetzA sowie auf einen Dauertest eingegangen.

3.3.3.1. Überprüfen der Ausgangssignale mit dem ETL

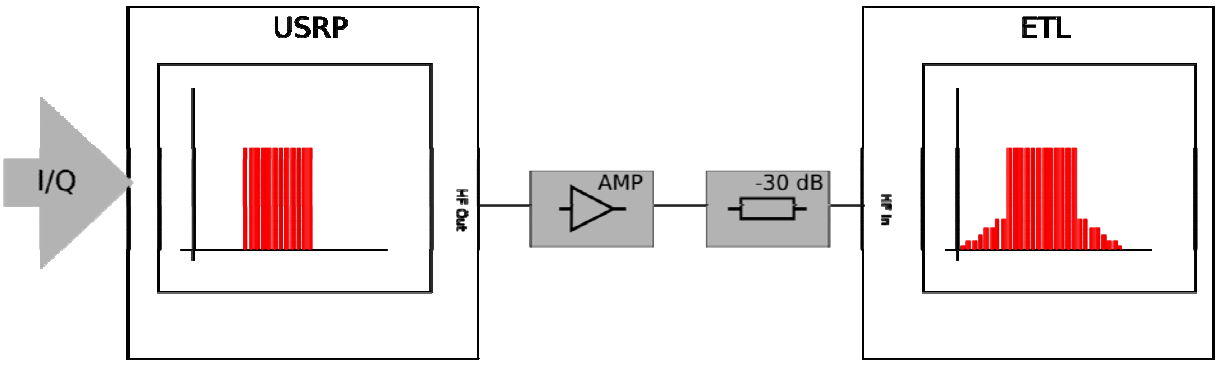


Bild 55: Messung über die Qualität der HF-Signale

Um die Qualität der modulierten Signalen tiefergehend als durch die bisherigen Messungen möglich beurteilen zu können, wird das DAB-Signal mit dem ETL von Rohde & Schwarz genauer analysiert (Bild 55). Dazu werden folgende Messungen sowohl für den USRP alleine, den USRP in Kombination mit beiden Verstärkern sowie für den USRP mit beiden Verstärkern und mit Maskenfilter durchgeführt. Zusätzlich wird zum Vergleich auch der Contentserver des Fraunhofer IIS in Kombination mit dem DAB-Testsender SDB601 von Rohde & Schwarz betrachtet.

Für die folgenden Messungen wird ein Multiplex in DAB Mode I auf Block 12A (223,936 MHz) erzeugt. Die Abtastrate des USRP beträgt 5 MS/s und die Verstärkung ist auf 18 eingestellt, was eine Ausgangsleistung von 1,1 dBm bewirkt. Der „gainmode“ ist auf 2 gesetzt. Dies entspricht der Normalisierung der OFDM-Symbole nach der in ETSI 300 798 [9] beschriebenen Methode, die es bei nur leichten Verzerrungen ermöglicht, einen geringen Crestfaktor zu erzielen.

3.3.3.1.1. Spektrum

3.3.3.1.1.1. Theoretische Vorüberlegungen

Wird nun als Eingangssignal kein Zweiton-Signal genutzt sondern ein breitbandiges Mehrträgersignal, bei DAB Mode I 1536 Träger im 1kHz-Abstand, so lassen sich keine diskreten Intermodulationslinien erkennen, sondern das Intermodulationsspektrum tritt kontinuierlich auf. Es ergeben sich sowohl Oberwellen als auch Intermodulationsprodukte zwischen den einzelnen Trägern des Signals. Die Intermodulationsprodukte ungeradzahliger Ordnung treten in und nahe des Nutzsignals auf, sodass die Signalqualität im entscheidenden Maß durch den Intermodulationsabstand geprägt wird. Der Abstand zwischen Nutzsignal und den gerade außerhalb des Nutzbandes liegenden Intermodulationsverzerrungen wird Schulterabstand genannt.

Es existiert eine Schätzformel, die bei bekanntem IP3-Punkt und gegebener Sendeleistung einen Richtwert für den zu erwartenden Schulterabstand angibt [10]:

$$S \approx 2 \cdot (IP3_O - P_o) - 2.5\,dB \quad (15)$$

mit S Schulterabstand in dB

$IP3_O$ Ausgangsbezogener IP3-Punkt in dBm

P_o Ausgangsleistung in dBm

Durch die in Abschnitt 3.3.2.2.3 ermittelten ausgangsbezogenen IP3-Punkte sind folgende Schulterabstände zu erwarten:

PCS Verstärker 10 W: 37,5 dB

Electrolink Verstärker 10 W: 28,9 dB

Electrolink Verstärker 120 W: 21,1 dB

3.3.3.1.1.2. Laboraufbau

Das DAB- und das DRM+- System sind OFDM-Übertragungssysteme und nutzen ein breites Spektrum mit vielen orthogonalen Trägern. Wie in Abschnitt 3.3.3.1.1.1 ausgeführt entstehen durch Nichtlinearitäten und die Vielzahl der Träger viele der Intermodulationsprodukte, die so dicht liegen, dass sie faktisch nicht mehr separierbar sind und ein rauschähnliches Spektrum zeigen. Deshalb ist es sinnvoll, den Schulterabstand des Multicarrier-Signals anzugeben, der beschreibt, wie weit der Pegel der Intermodulationsprodukte unterhalb des Nutzsignals liegt. Am Spektrumanalysator kann der Schulterabstand abgelesen werden. Dabei ist es unerheblich wie das Testsignal im Detail aufgebaut ist.

Im Folgenden wird mit dem USRP ein DAB-Signal erzeugt und mit dem HF-Verstärker verstärkt. Das synthetische Multicarriersignal des SMBV kann nicht verwendet werden, da der Signalgenerator nur wenige Träger gleichzeitig ausgibt.

Das Spektrum des DAB-Signals wird durch den verwendeten ETL dargestellt und entsprechend aufgezeichnet.

3.3.3.1.1.3. Ergebnisse

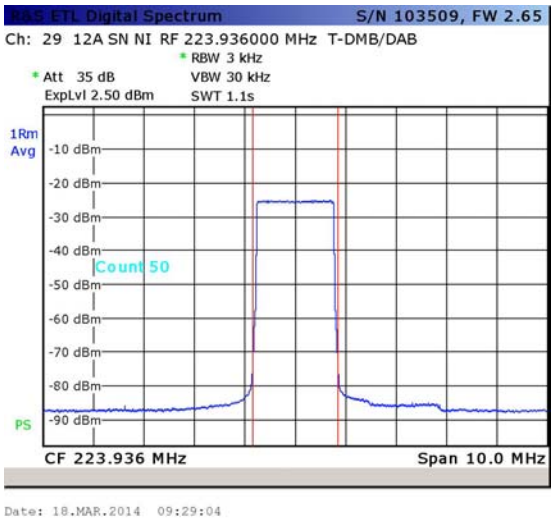


Bild 56: Spektrum des DAB-Signals des USRP

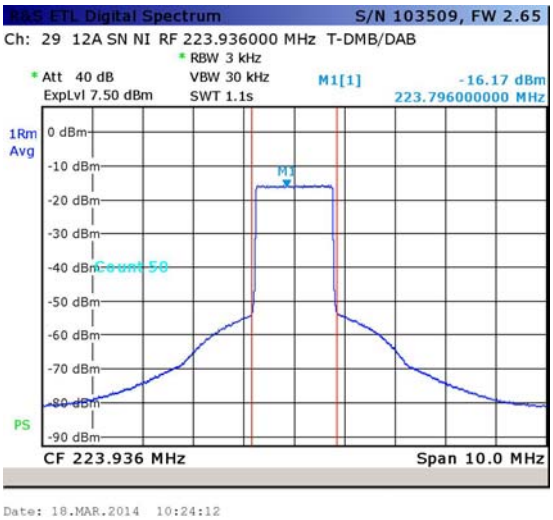


Bild 57: Schulterabstand PCS 10 W DAB-Signal

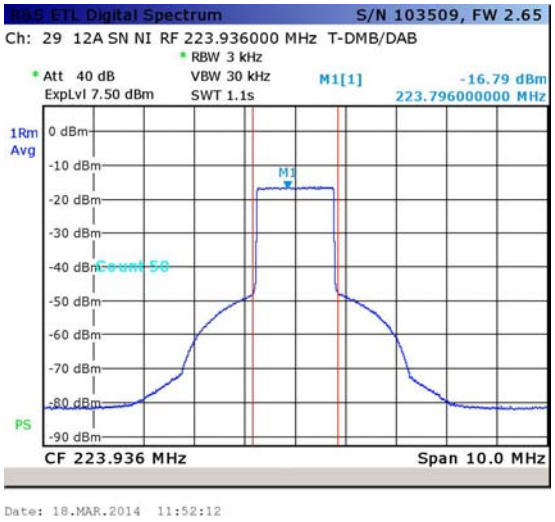


Bild 58: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers 10 W DAB-Signal

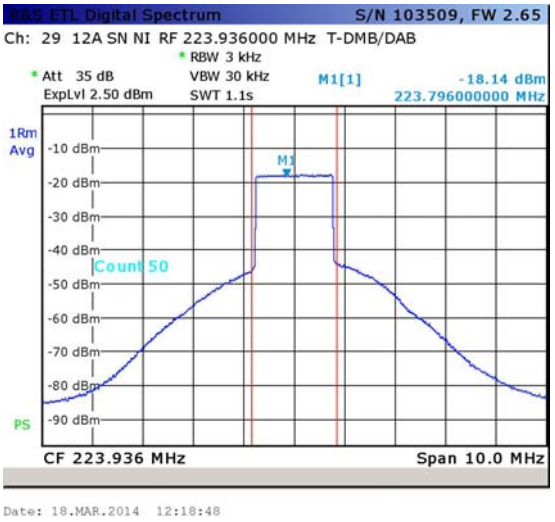


Bild 59: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers bei 120 W DAB-Signal

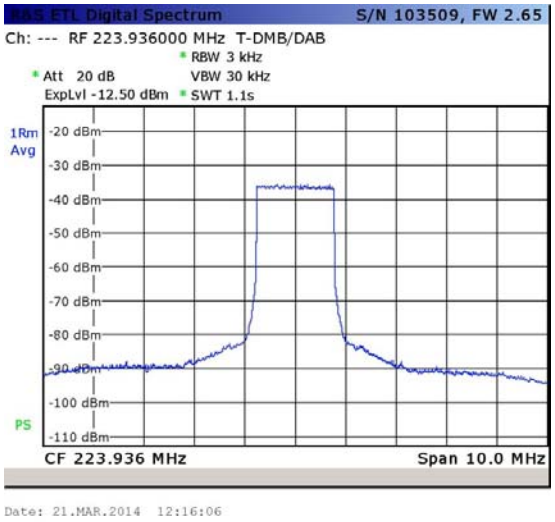


Bild 60: Spektrum des DAB-Signals des SDB 601

Das in Bild 56 dargestellte Spektrum des DAB-Signals am Ausgang des USRP ist innerhalb des Nutzbandes sehr gleichmäßig und gerade. Das Signal weist einen starken Abfall auf. Der Schulterabstand beträgt mindestens 55 dB, schwächere Signalanteile lassen sich im Eigenrauschen des ETL nicht mehr detektieren. Dies zeigt, dass der im USRP enthaltene Ausgangsverstärker sehr linear arbeitet.

Mit dem Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics ist bei 10 W Ausgangsleistung ein Schulterabstand von 40 dB erzielbar, wie Bild 57 zeigt. Außerdem ist das Spektrum auf beiden Seiten symmetrisch.

Der 3B0K1A von Electrolink erreicht bei 10 W Ausgangsleistung einen Schulterabstand von 32 dB (Bild 58). Bei dieser Ausgangsleistung ist auch das Spektrum des 3B0K1A symmetrisch.

Bei einer Ausgangsleistung von 120 W erreicht der 3B0K1A nur noch einen Schulterabstand von 25 dB. Das Spektrum ist verzerrt. Wie Bild 59 zeigt, ist bei höheren Frequenzen oberhalb des Nutzbands deutlich mehr Störpegel enthalten als bei niedrigeren Frequenzen unterhalb des Nutzbands. Der Unterschied im Störpegel beträgt ca. 5 dB zwischen 2 MHz über und unter der Mittenfrequenz von 223,936 MHz.

Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics ist deutlich linearer als der 3B0K1A von Electrolink. Aus den in Kapitel 2.1.2.4 genannten Gründen wird dennoch der 3B0K1A als DAB-Verstärker eingesetzt. Die gemessenen Werte der Schulterabstände liegen in etwa bei den in Abschnitt 3.3.3.1.1.1 geschätzten Werten.

Die Verzerrungen außerhalb des Nutzbandes sind für den DAB-Betrieb nicht kritisch, da sie mit Hilfe des Maskenfilters unterdrückt werden können.

Das Spektrum des DAB-Signals am Ausgang des SDB601 ist innerhalb des Nutzbandes gleichmäßig und gerade. Wie Bild 60 zeigt, fallen die Signalflanken nicht so steil ab, wie bei dem USRP. Außerdem werden Intermodulationsprodukte erzeugt, sodass sich ein Schulterabstand von 45 dB ergibt.

3.3.3.1.2. Konstellationsdiagramm

Ein Leistungsverstärker fügt dem Signal Rauschen hinzu. Dadurch werden die vier Konstellationspunkte des QPSK-modulierten DAB-Signals durch nichtlineare Verzerrungen zu Wolken verformt.. Dies ist in einem Konstellationsdiagramm grafisch dargestellt, mit dessen Hilfe die Signalqualität beurteilt werden kann.

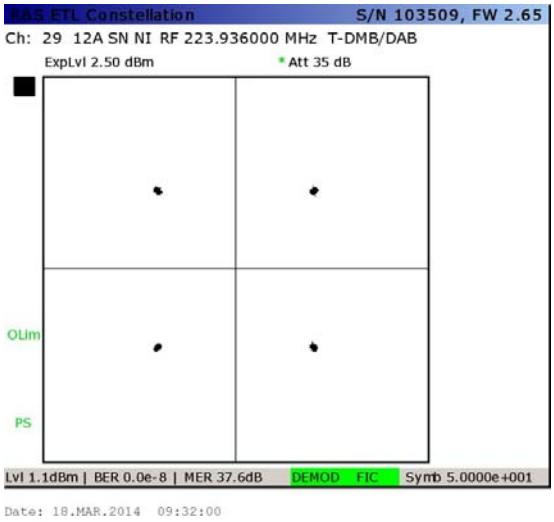


Bild 61: Konstellationsdiagramm am Ausgang des USRP

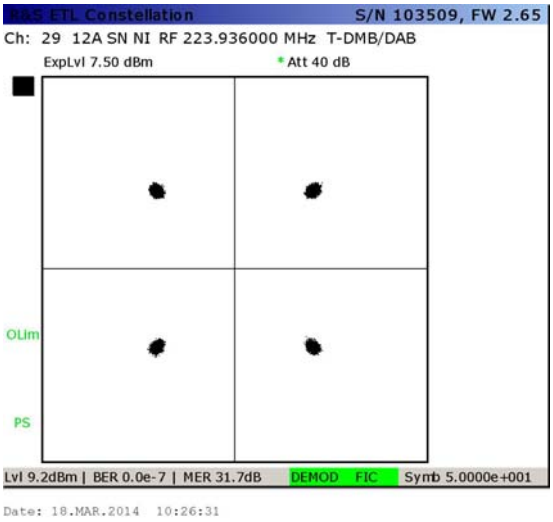


Bild 62: Konstellationsdiagramm am Ausgang des PCS Verstärker mit 10 W

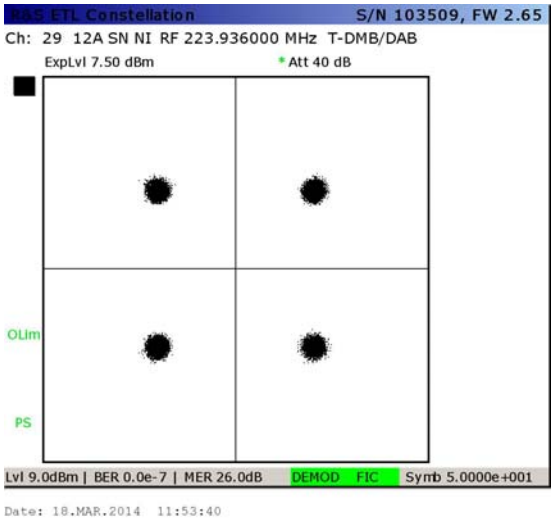


Bild 63: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 10 W

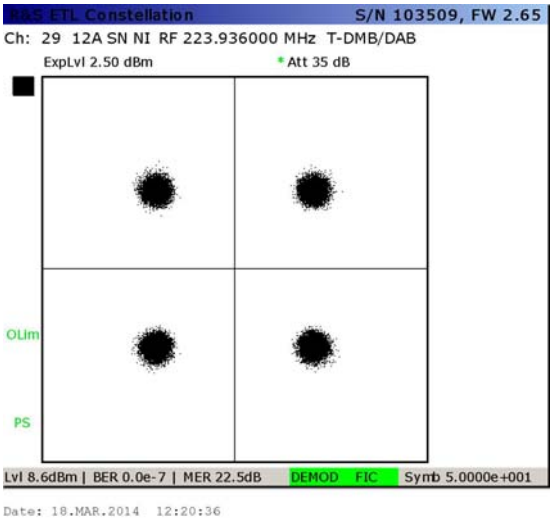


Bild 64: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electolink Verstärkers 120 W

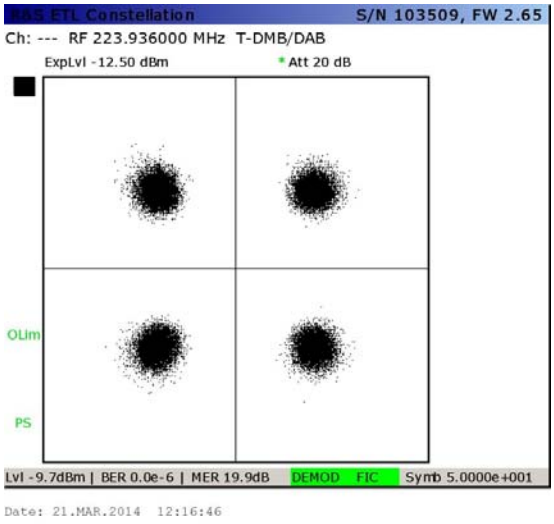


Bild 65: Konstellationsdiagramm des SDB 601

Das Konstellationsdiagramm in Bild 61 zeigt nur kleine Signalwolken um die idealen Konstellationspunkte herum. Dies bedeutet, dass die Signale im USRP sehr rauscharm erzeugt und intern verstärkt werden. Die Signalflächen sind auch nicht perimetrisch verzerrt, was auf ein geringes Phasenrauschen schließen lässt.

Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier (Bild 62) von PCS Electronics weist bei gleicher Leistung kleinere Signalwolken als der 3B0K1A (Bild 63, Bild 64) von Electrolink auf (siehe Bilder 69 - 72). Er fügt dem Signal also weniger Eigenrauschen hinzu als letzterer.

Das Konstellationsdiagramm des SDB 601 (Bild 65) ist schlechter als das des USRP nach der Verstärkung auf 120 W Ausgangsleistung durch den 3B0K1A. Dies deutet auf ein sehr starkes Eigenrauschen des SDB 601 hin.

3.3.3.1.3. Amplitude und Phase

Dieses eigentlich für Kanalvermessungen gedachte Diagramm zeigt über der Frequenz aufgetragene Amplituden- und Phasenschwankungen.

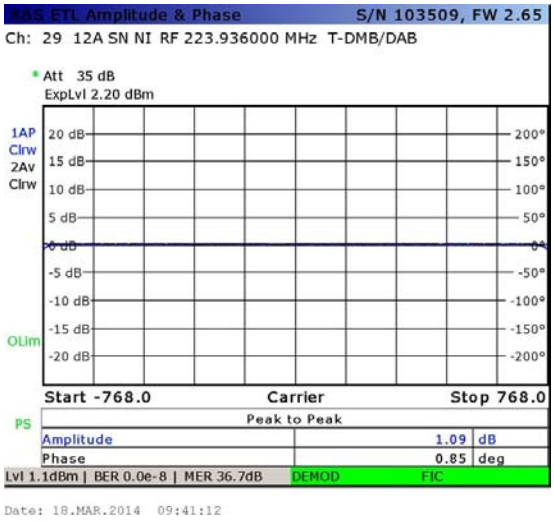


Bild 66: Amplitude & Phase am Ausgang des USRP

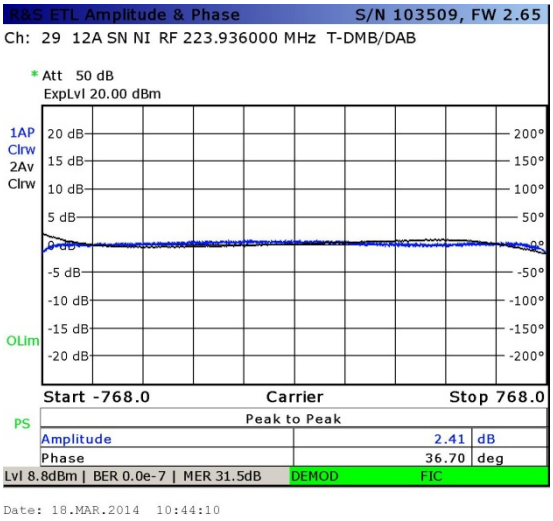


Bild 67: Amplitude & Phase PCS 10W + Filter

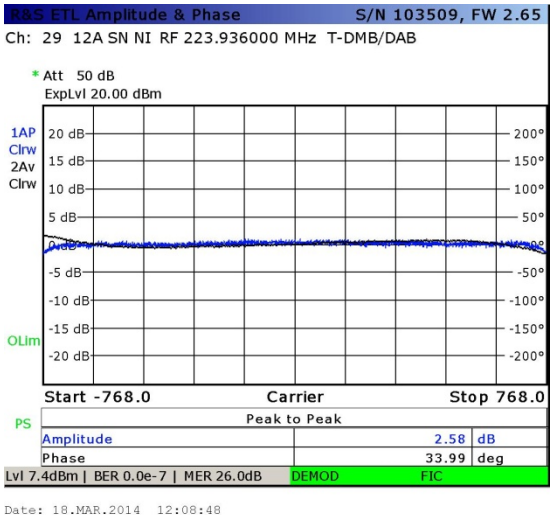


Bild 68: Amplitude & Phase Electrolink 10 W + Filter

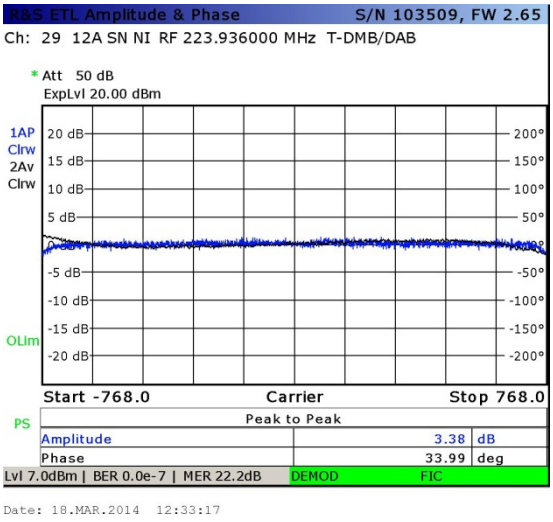


Bild 69: Amplitude & Phase Electrolink 120 W + Filter

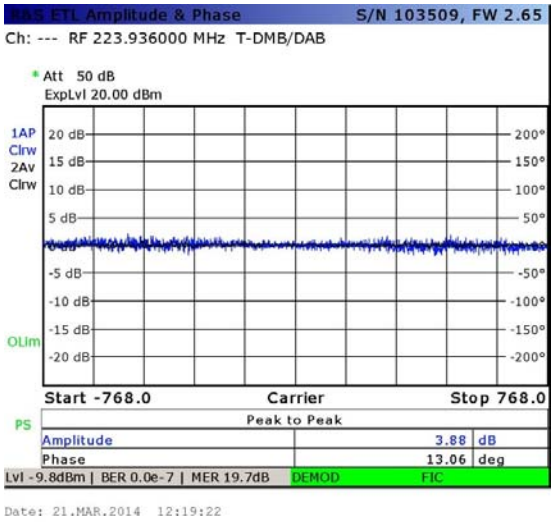


Bild 70: Amplituden- und Phasenverzerrungen des SDB 601

Die Übersicht in Bild 66 zeigt, dass die einzelnen Träger des OFDM-Signals in der Amplitude maximal um 1,09 dB und in der Phase maximal um 0,85° voneinander abweichen. Dies bestätigt, dass der USRP sehr rauscharm arbeitet.

Von dem glatten Amplituden- und Phasenfrequenzgang des USRP ausgehend, sieht man bei den weiteren Frequenzgängen in Bild 67 bis Bild 69, wie die beiden Verstärker dem Signal Rauschen hinzufügen. Außerdem ist erkennbar, wie das Maskenfilter das Signal an den Rändern des Nutzbands um wenige dB verformt.

In Bild 70 ist zu sehen, dass am Ausgang des SDB 601 die einzelnen Träger des OFDM-Signals in der Amplitude bis zu 3,88 dB und in der Phase bis zu 13,06° voneinander abweichen.

3.3.3.1.4. CCDF und Crestfaktor

3.3.3.1.4.1. Laboraufbau

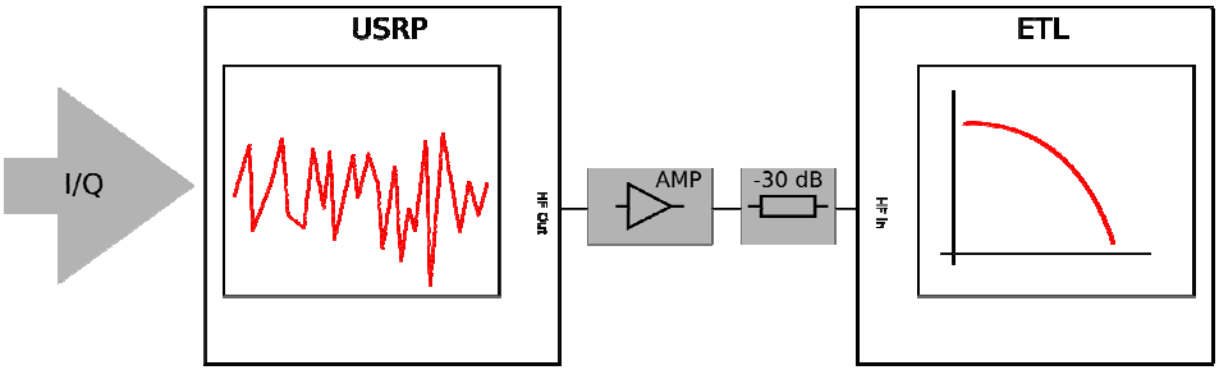


Bild 71: Messung der CCDF und des Crestfaktors (andere Grafik)

Kurzzeitige Signalspitzen, die in den nichtlinearen Arbeitsbereich des HF-Verstärkers hineinragen, verursachen sehr hohe Intermodulationsprodukte. Daher ist es wichtig zu wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit Spannungsspitzen auftreten und wie groß der Crestfaktor ist.

Messtechnisch wird die komplementäre Amplitudenverteilung („Complementary Cumulative Density Function“, CCDF) des Signals ermittelt. Dazu wird der USRP mit einem DAB-Signal gespeist, das erzeugte HF-Signal wird aufgenommen und die Häufigkeit der Pegel aller Abtastwerte bestimmt. Durch Berechnung des Quotienten aus Spitzenwert zu Effektivwert bestimmt sich der Crestfaktor.

3.3.3.1.4.2. Ergebnisse

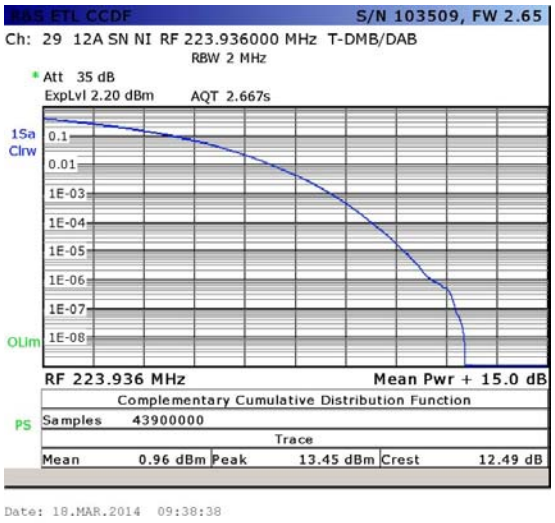


Bild 72: CCDF und Crestfaktor am Ausgang des USRP

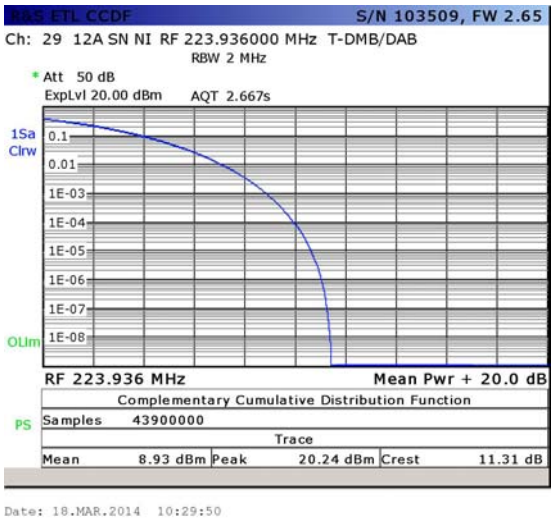


Bild 73: CCDF und Crestfaktor nach dem PCS Verstärker 10 W

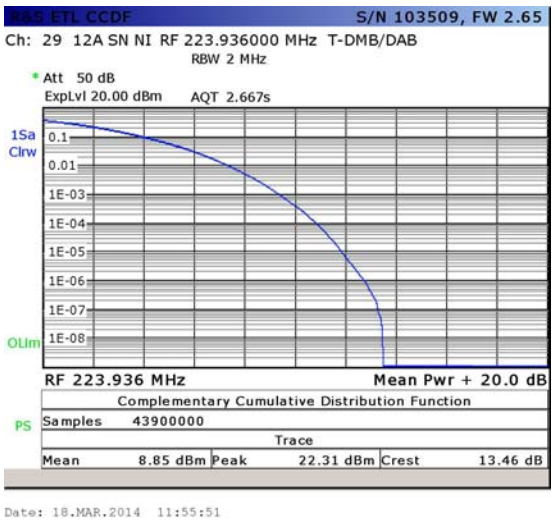


Bild 74: CCDF und Crestfaktor nach dem Electrolink Verstärker 10 W

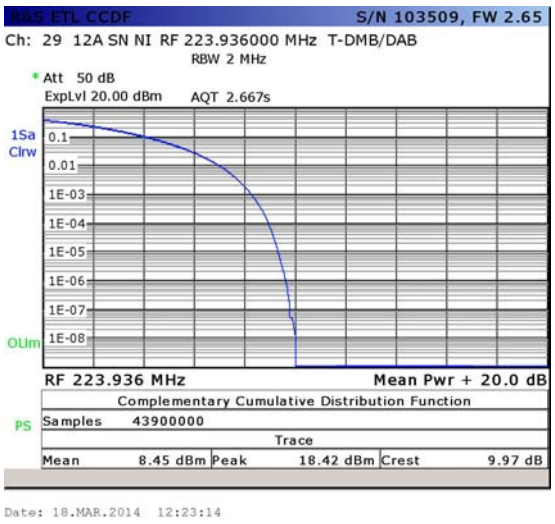


Bild 75: CCDF und Crestfaktor nach dem Elektrolink Verstärker 120 W

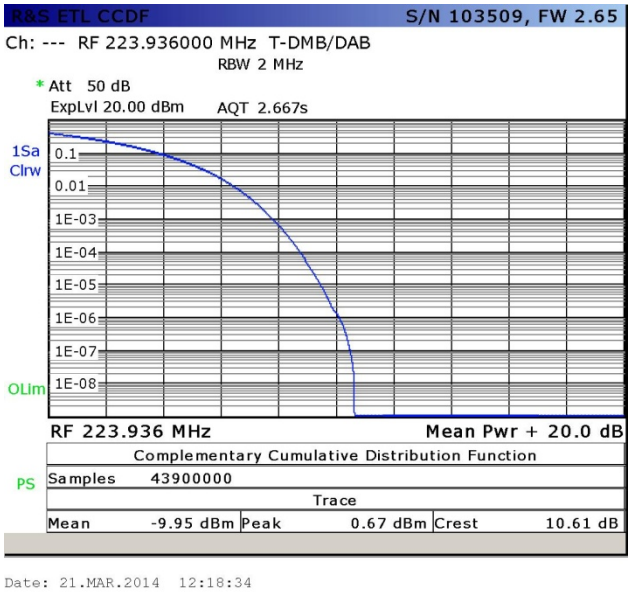


Bild 76: CCDF und Crestfaktor des SDB 601

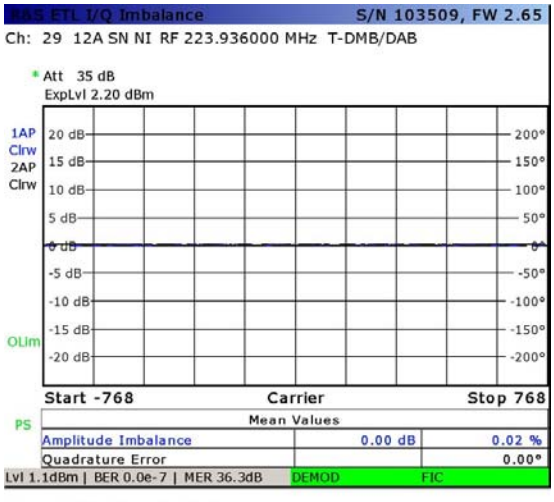
Die CCDF des Ausgangssignals des USRP in Bild 72 weist eine für OFDM-Signale typische Verteilung auf. Der Crestfaktor beträgt 12,49 dB.

Bild 73 bis Bild 75 zeigen wie die Verstärker das Signal komprimieren. Der Verstärker von PCS weist noch 11,31 dB auf. Der Crestfaktor am Ausgang des Elektrolink Verstärkers beträgt bei 10 W Ausgangsleistung 13,46 dB und bei 120 W 9,97 dB. Dies zeigt, dass beide Verstärker das Signal komprimieren, der Elektrolink Verstärker bei hohen Leistungen besonders stark.

Die CCDF des Ausgangssignals des SDB 601 in Bild 76 weist ebenfalls die für OFDM-Signale typische Verteilung auf. Der Crestfaktor beträgt nur 10,61 dB. Ob dies an einer guten Methode zur Reduzierung des Crestfaktors bei der OFDM-Signalgenerierung oder an einer komprimierenden Ausgangsstufe liegt, konnte nicht ermittelt werden.

3.3.3.1.5. IQ-Ungleichgewicht

Das IQ-Ungleichgewicht der OFDM-Unterträger zeigt, inwieweit Inphasal- und Quadraturanteil dieses QPSK-Signals von dem idealen Gleichgewicht abweichen.



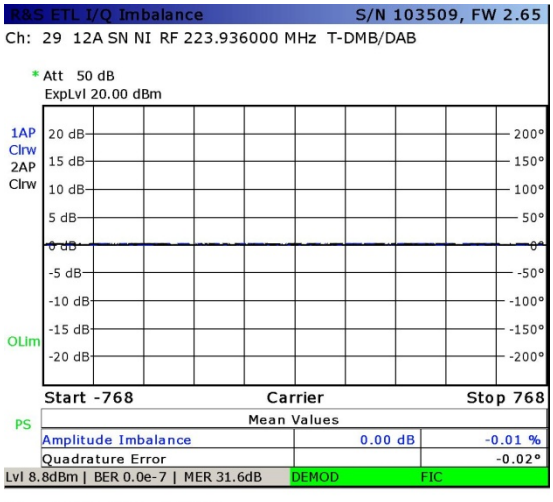


Bild 77: I/Q-Ungleichheit am Ausgang des USRP

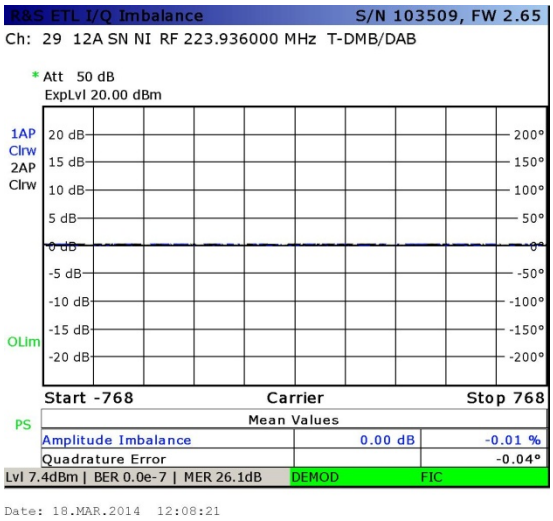


Bild 78: I/Q-Ungleichgewicht PCS 10 W + Filter

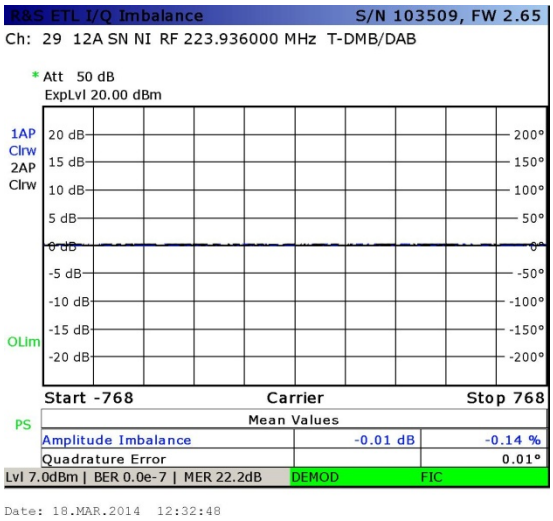


Bild 79: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 10 W + Filter

Bild 80: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 120 W + Filter

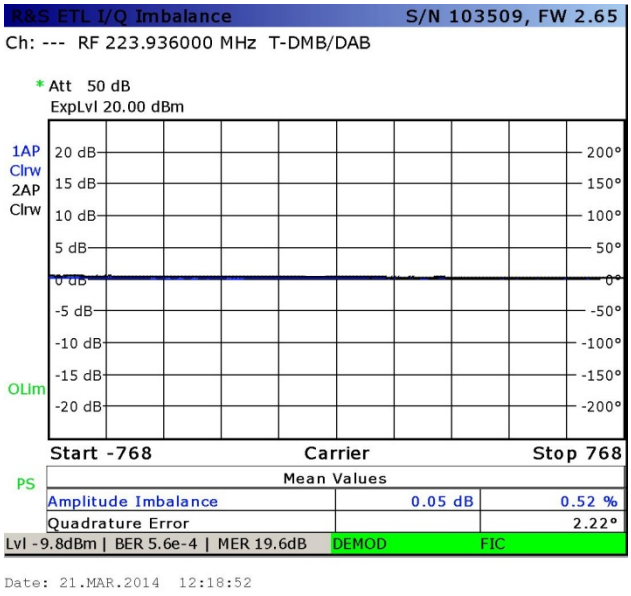


Bild 81: I/Q-Ungleichheit des SDB 601

Das Ungleichgewicht zwischen Inphasal- und Quadraturanteil des Signals am Ausgang des USRP fällt sehr gering aus. So betragen die Amplitudenfehler im Schnitt nur 0,2 % und die Phasenfehler zwischen I/Q sind nicht auflösbar (Bild 77). Dies lässt auf eine hohe Qualität der digitalen Modulation schließen.

Wie Bild 78 bis Bild 80 zeigen, wird das sehr geringe IQ-Ungleichgewicht durch beide Verstärkern auch mit Maskenfilter nur sehr wenig beeinträchtig.

Das Ungleichgewicht zwischen Inphasal- und Quadraturanteil des Signals am Ausgang des SDB 601 fällt weniger gering aus. So betragen nach Bild 50 die Amplitudenfehler im Schnitt nur 0,52 % und die Phasenfehler zwischen I- und Q-Anteil 2,22°.

3.3.3.1.6. Modulationsfehlerrate über die Frequenz

Die Modulationsfehlerrate (MER) ist das logarithmierte Verhältnis zwischen Signal- und Fehlervektor in der komplexen IQ-Ebene. Es bezieht sich auf die Signal-/Fehlerleistung und wird in dB angegeben. Aufgetragen wird die MER für jeden Unterträger über die Frequenz.

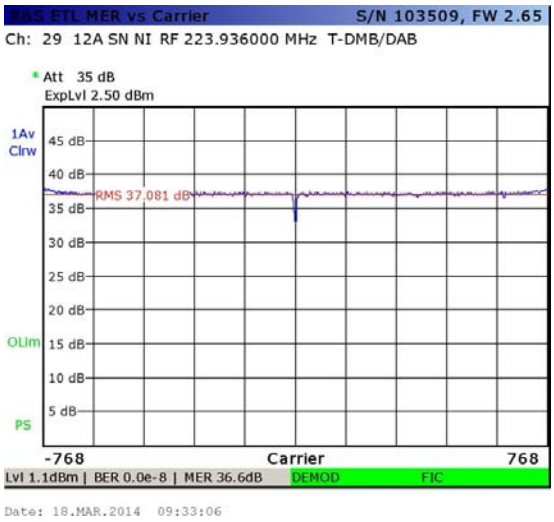


Bild 82: MER(f) des USRP

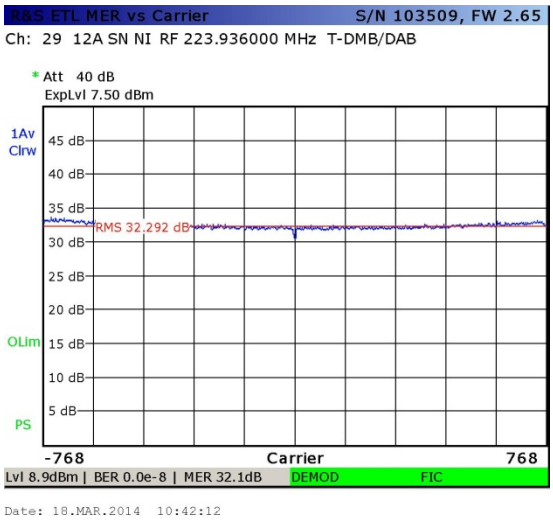


Bild 83: MER(f) PCS 10 W + Filter

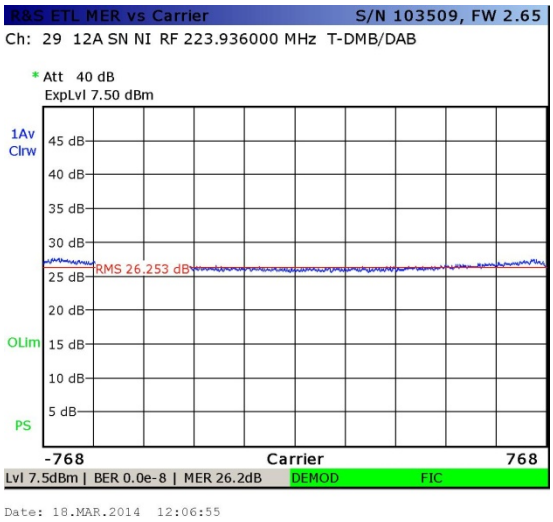


Bild 84: MER(f) USRP + Electrolink 10 W + Filter

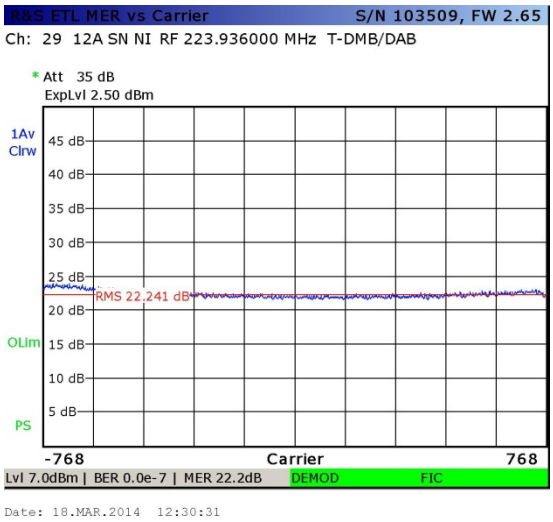


Bild 85: MER(f) USRP + Electrolink 120 W + Filter

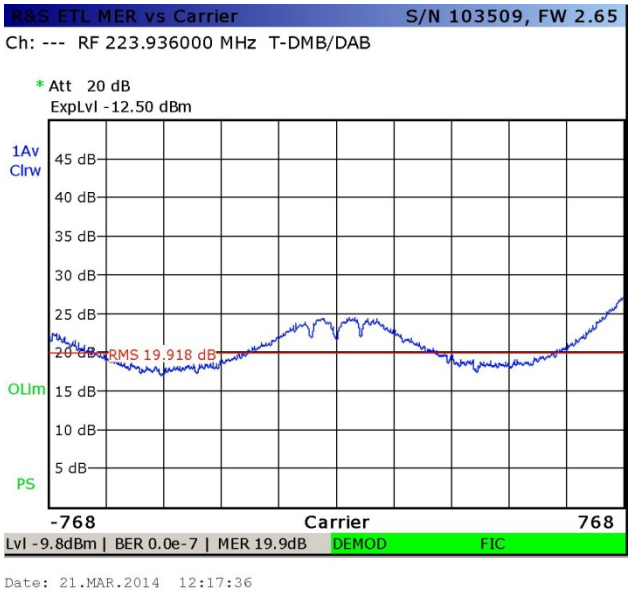


Bild 86: MER(f) des SDB 601

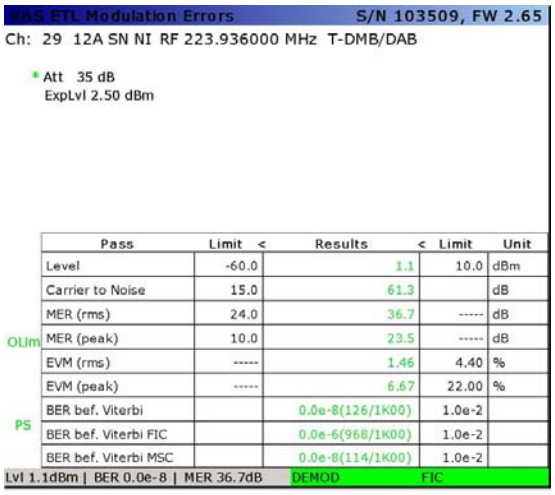
Die Modulationsfehlerrate des USRP ist für alle Unterträger nahezu konstant gut und liegt für den quadratischen Mittelwert aller Träger bei 37,08 dB RMS (siehe Bild 82). Bei den äußeren Trägern ergeben sich etwas bessere Werte, wohingegen sie nahe der Mittenfrequenz um 3 dB darunter liegt. Letztere Werte konnten durch eine DC-Offset-Korrektur des USRP erreicht werden, sodass der verbleibende Einbruch auch auf nicht weiter korrigierbare Gleichspannungsfehler zurückzuführen sein dürfte.

Beide Verstärker verschlechtern die Modulationsfehlerrate des Signals deutlich (Bild 83 bis Bild 85). Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics weist bei gleicher Ausgangsleistung von 10 W jedoch eine um 6 dB höhere MER im Vergleich zum 3B0K1A auf. Der durch einen DC-Offset verursachte Einbruch der MER des USRP-Ausgangssignals bei der Mittenfrequenz ist bei der schlechteren MER des 3B0K1A nicht mehr zu erkennen. Generell nimmt die MER zu den Rändern des Nutzbands zu.

Wie Bild 86 zeigt, ist die Modulationsfehlerrate des SDB 601 stark abhängig von der Frequenz der einzelnen Träger. So liegen bis zu 10 dB Differenz in der MER zwischen einem Träger mit guter und mit schlechter MER. Dies zeigt auf, dass die Qualität der Modulation des SDB verbesserungswürdig ist.

3.3.3.1.7. Modulationsfehler

Die Modulationsfehler stellt der „ETL“ in einer Tabelle zusammengefasst dar.

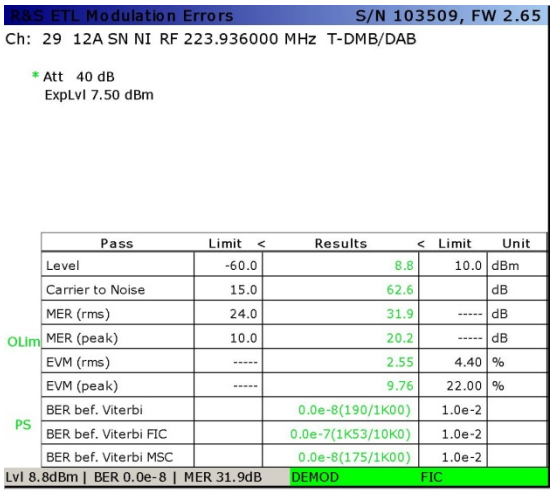

R&S ETL Modulation Errors S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 35 dB
ExpLvl 2.50 dBm

	Pass	Limit <	Results	< Limit	Unit
	Level	-60.0	1.1	10.0	dBm
	Carrier to Noise	15.0	61.3		dB
	MER (rms)	24.0	36.7	-----	dB
OLim	MER (peak)	10.0	23.5	-----	dB
	EVM (rms)	-----	1.46	4.40	%
	EVM (peak)	-----	6.67	22.00	%
	BER bef. Viterbi		0.0e-8(126/1K00)	1.0e-2	
PS	BER bef. Viterbi FIC		0.0e-6(968/1K00)	1.0e-2	
	BER bef. Viterbi MSC		0.0e-8(114/1K00)	1.0e-2	

Lvl 1.1dBm | BER 0.0e-8 | MER 36.7dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 09:32:18

Bild 87: Modulationsfehler am Ausgang des USRP

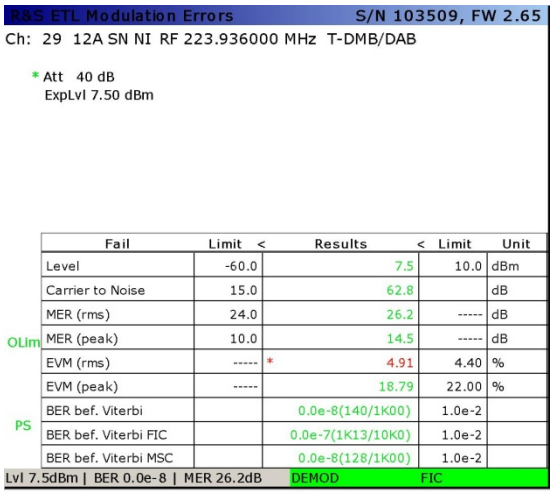

R&S ETL Modulation Errors S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 40 dB
ExpLvl 7.50 dBm

	Pass	Limit <	Results	< Limit	Unit
	Level	-60.0	8.8	10.0	dBm
	Carrier to Noise	15.0	62.6		dB
	MER (rms)	24.0	31.9	-----	dB
OLim	MER (peak)	10.0	20.2	-----	dB
	EVM (rms)	-----	2.55	4.40	%
	EVM (peak)	-----	9.76	22.00	%
	BER bef. Viterbi		0.0e-8(190/1K00)	1.0e-2	
PS	BER bef. Viterbi FIC		0.0e-7(1K53/10K0)	1.0e-2	
	BER bef. Viterbi MSC		0.0e-8(175/1K00)	1.0e-2	

Lvl 8.8dBm | BER 0.0e-8 | MER 31.9dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 10:41:43

Bild 88: Modulationsfehler PCS 10 W + Filter

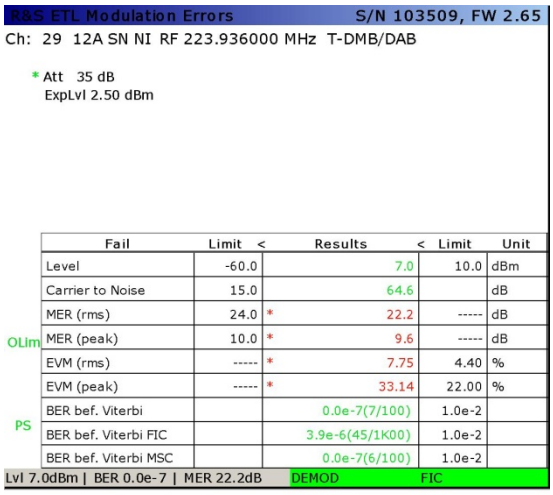

R&S ETL Modulation Errors S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 40 dB
ExpLvl 7.50 dBm

	Fail	Limit <	Results	< Limit	Unit
	Level	-60.0	7.5	10.0	dBm
	Carrier to Noise	15.0	62.8		dB
	MER (rms)	24.0	26.2	-----	dB
OLim	MER (peak)	10.0	14.5	-----	dB
	EVM (rms)	----- *	4.91	4.40	%
	EVM (peak)	-----	18.79	22.00	%
	BER bef. Viterbi		0.0e-8(140/1K00)	1.0e-2	
PS	BER bef. Viterbi FIC		0.0e-7(1K13/10K0)	1.0e-2	
	BER bef. Viterbi MSC		0.0e-8(128/1K00)	1.0e-2	

Lvl 7.5dBm | BER 0.0e-8 | MER 26.2dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 12:06:35

Bild 89: Modulationsfehler Electrolink 10 W + Filter

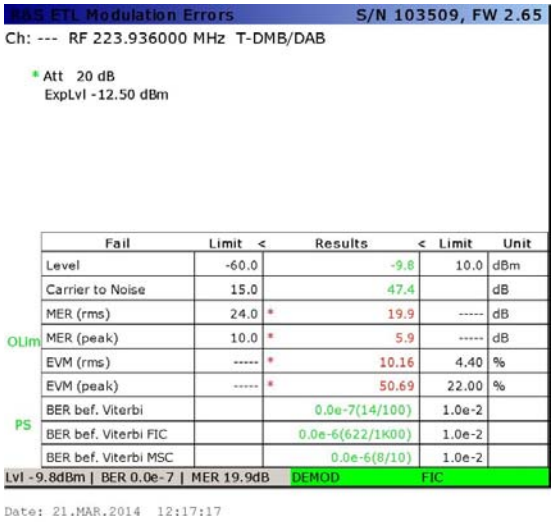

R&S ETL Modulation Errors S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 35 dB
ExpLvl 2.50 dBm

	Fail	Limit <	Results	< Limit	Unit
	Level	-60.0	7.0	10.0	dBm
	Carrier to Noise	15.0	64.6		dB
	MER (rms)	24.0 *	22.2	-----	dB
OLim	MER (peak)	10.0 *	9.6	-----	dB
	EVM (rms)	----- *	7.75	4.40	%
	EVM (peak)	----- *	33.14	22.00	%
	BER bef. Viterbi		0.0e-7(7/100)	1.0e-2	
PS	BER bef. Viterbi FIC		3.9e-6(45/1K00)	1.0e-2	
	BER bef. Viterbi MSC		0.0e-7(6/100)	1.0e-2	

Lvl 7.0dBm | BER 0.0e-7 | MER 22.2dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 12:30:10

Bild 90: Modulationsfehler Electrolink 120 W + Filter


R&S ETL Modulation Errors S/N 103509, FW 2.65
Ch: --- RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 20 dB
ExpLvl -12.50 dBm

	Fail	Limit	<	Results	<	Limit	Unit
	Level	-60.0		-9.8		10.0	dBm
	Carrier to Noise	15.0		47.4			dB
	MER (rms)	24.0	*	19.9		-----	dB
OLim	MER (peak)	10.0	*	5.9		-----	dB
	EVM (rms)	-----	*	10.16		4.40	%
	EVM (peak)	-----	*	50.69		22.00	%
	BER bef. Viterbi			0.0e-7(14/100)		1.0e-2	
PS	BER bef. Viterbi FIC			0.0e-6(622/1K00)		1.0e-2	
	BER bef. Viterbi MSC			0.0e-6(8/10)		1.0e-2	

Lvl -9.8dBm | BER 0.0e-7 | MER 19.9dB DEMOD FIC

Date: 21.MAR.2014 12:17:17

Bild 91: Modulationsfehler des SDB 601

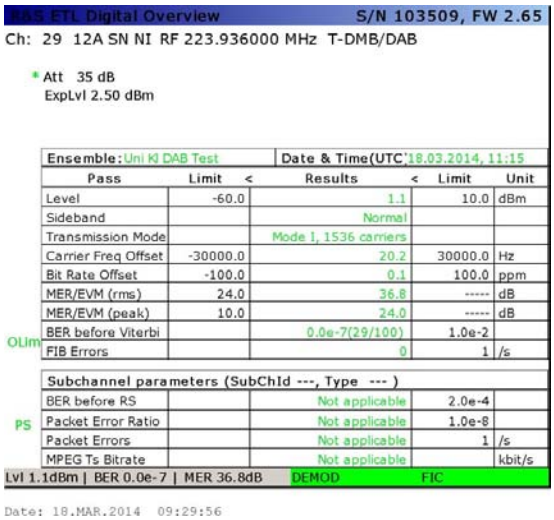
Die Modulationsfehler des USRP sind tabellarisch in Bild 87 aufgeführt und deutlich besser als die Minimalgrenzen, die im ETL hinterlegt sind. Auch konnten keine Bitfehler ermittelt werden, sodass die BER mit 0 angegeben ist.

Die Übersichten über die Modulationsfehler in Bild 88 bis Bild 90 bestätigen das sich schon in den vorherigen Messungen gezeigte Bild. Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS ist deutlich linearer als der 3B0K1A von Electrolink und übertrifft die im ETL hinterlegten Grenzwerte deutlich. Bei 10 W Ausgangsleistung übertrifft der 3B0K1A die Grenzwerte etwas, nur beim Spitzenwert der Fehlervektoramplitude EVM (peak) liegt der Wert knapp über dem Grenzwert. Bei 120 W Ausgangsleistung verfehlt er die Grenzen bezüglich EVM und MER teilweise deutlich.

In der tabellarischen Aufstellung in Bild 91 wird deutlich, dass der SDB 601 alle Grenzen für die Modulationsfehler verfehlt. Im realen Betrieb wäre ein DAB-Sender so nicht sinnvoll einsetzbar, da diese Werte durch einen Leistungsverstärker weiter verschlechtert werden.

3.3.3.1.8. Gesamtübersicht über die Parameter

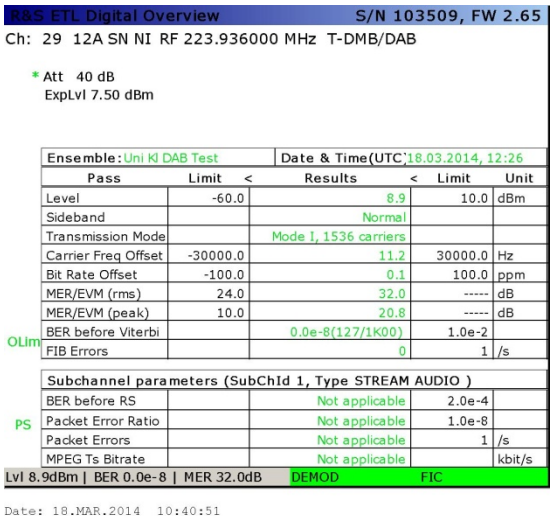
Die wichtigen Parameter des DAB-Signals gibt der „ETL“ tabellarisch zusammengefasst aus.


R&S ETL Digital Overview S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 35 dB
ExpLvl 2.50 dBm

Ensemble: Uni Kl DAB Test			Date & Time(UTC) 18.03.2014, 11:15		
Pass	Limit	<	Results	< Limit	Unit
Level	-60.0		1.1	10.0	dBm
Sideband			Normal		
Transmission Mode			Mode I, 1536 carriers		
Carrier Freq Offset	-30000.0		20.2	30000.0	Hz
Bit Rate Offset	-100.0		0.1	100.0	ppm
MER/EVM (rms)	24.0		36.8	-----	dB
MER/EVM (peak)	10.0		24.0	-----	dB
OLim BER before Viterbi			0.0e-7(29/100)	1.0e-2	
FIB Errors			0	1	/s
Subchannel parameters (SubChId ---, Type ---)					
BER before RS			Not applicable	2.0e-4	
PS Packet Error Ratio			Not applicable	1.0e-8	
Packet Errors			Not applicable	1	/s
MPEG Ts Bitrate			Not applicable		kbit/s

Lvl 1.1dBm | BER 0.0e-7 | MER 36.8dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 09:29:56


R&S ETL Digital Overview S/N 103509, FW 2.65
Ch: 29 12A SN NI RF 223.936000 MHz T-DMB/DAB
* Att 40 dB
ExpLvl 7.50 dBm

Ensemble: Uni Kl DAB Test			Date & Time(UTC) 18.03.2014, 12:26		
Pass	Limit	<	Results	< Limit	Unit
Level	-60.0		8.9	10.0	dBm
Sideband			Normal		
Transmission Mode			Mode I, 1536 carriers		
Carrier Freq Offset	-30000.0		11.2	30000.0	Hz
Bit Rate Offset	-100.0		0.1	100.0	ppm
MER/EVM (rms)	24.0		32.0	-----	dB
MER/EVM (peak)	10.0		20.8	-----	dB
OLim BER before Viterbi			0.0e-8(127/1K00)	1.0e-2	
FIB Errors			0	1	/s
Subchannel parameters (SubChId 1, Type STREAM AUDIO)					
BER before RS			Not applicable	2.0e-4	
PS Packet Error Ratio			Not applicable	1.0e-8	
Packet Errors			Not applicable	1	/s
MPEG Ts Bitrate			Not applicable		kbit/s

Lvl 8.9dBm | BER 0.0e-8 | MER 32.0dB DEMOD FIC

Date: 18.MAR.2014 10:40:51

Bild 92: Gesamtübersicht USRP

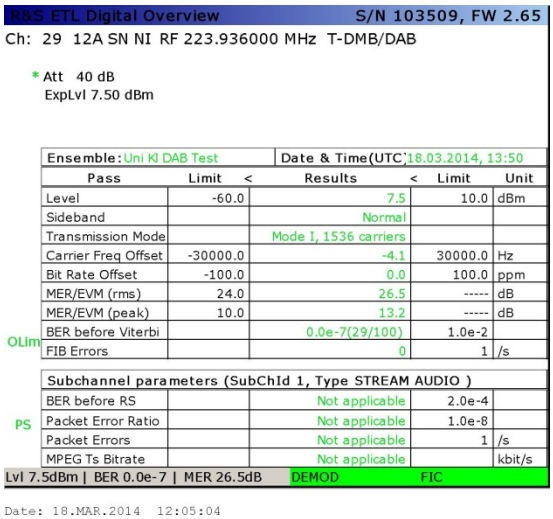


Bild 93: Gesamtübersicht PCS 10 W + Filter

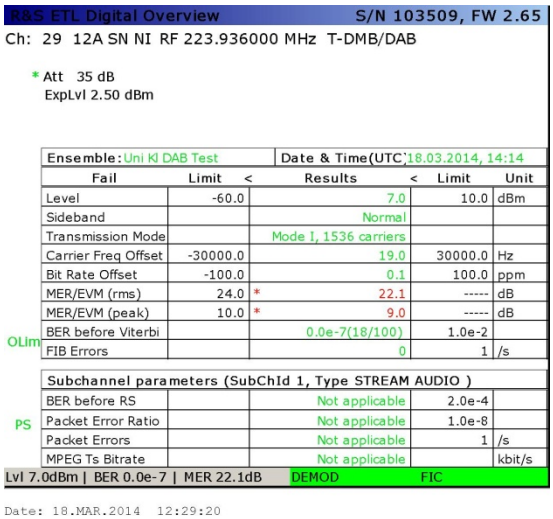


Bild 94: Gesamtübersicht Electrolink 10 W + Filter

Bild 95: Gesamtübersicht Electrolink 120 W + Filter

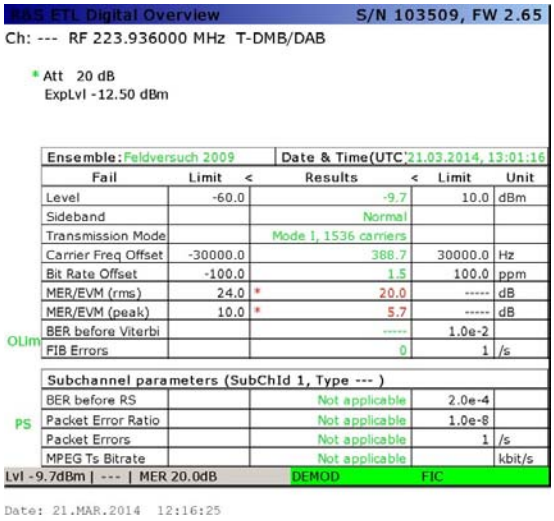


Bild 96: Gesamtübersicht SDB 601

Die Gesamtübersicht über die wesentlichen Signalparameter am Ausgang des USRP in Bild 92 ergänzt den positiven Eindruck der vorherigen Messungen um einen geringen Trägerfrequenzoffset von 20 Hz bei 223,936 MHz Trägerfrequenz sowie einen Bitratenversatz von 0,1 ppm. Man kann erkennen, dass das Ausgangssignal des USRP von guter Qualität ist und mit großen Reserven innerhalb des Toleranzbereichs liegt.

In Bild 93 bis Bild 95 sind die wesentlichen Signalparameter im Überblick aufgetragen. Für 10 W Ausgangsleistung stellt der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics zwar die lineare Verstärkung zur Verfügung. Wie bereits ausgeführt, wird auf Grund der höheren Ausgangsleistung und der höheren Betriebssicherheit jedoch der 3B0K1A von Electrolink für die DAB-Ausstrahlung genutzt.

Aus Budgetgründen musste der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics für DRM+ im VHF Band III genutzt werden. Erst durch den Einbau einer Feinsicherung sowie eines Strommessgerät zur Überwachung konnte ein sicherer Betrieb ermöglicht wer-

den. Damit ließen sich im DRM+-Betrieb an einem Abschlusswiderstand 20 W Ausgangsleistung bei $2\,A$ Stromaufnahme aus dem PCS Verstärker abgeben. Dabei wurde die DRM-Spektralmaske auch ohne Maskenfilter eingehalten. Diese Messungen wurden bei Abschluss mit einem 50 Ω Abschlusswiderstand durchgeführt. Bei minimaler Fehlanpassung, wie sie beispielsweise durch den Betrieb an einer Antenne entsteht, fängt der Verstärker allerdings von PCS zu schwingen an. Deshalb ist er für den realen Einsatz als Leistungsendverstärker nicht benutzbar.

Die Gesamtübersicht über die wesentlichen Signalparameter am Ausgang des SDB 601 in Bild 96 bestätigt das wenig positive Gesamtbild. Dieser Modulator ist für den Produktivbetrieb nicht geeignet. Es ist unklar, ob diese Messergebnisse ein Problem an der Modellreihe aufzeigen oder ob ein Defekt an dem getesteten Gerät der Grund für diese Werte ist.

3.3.3.2. Einhalten der jeweiligen Spektralmaske

3.3.3.2.1. Laboraufbau

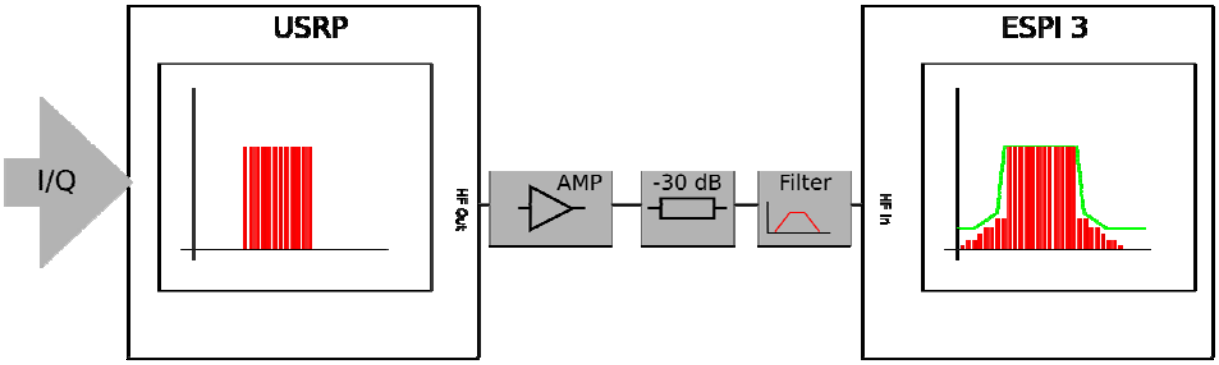


Bild 97: Messung über das Einhalten der Spektralmaske

Für jedes Rundfunk-Übertragungssystem ist eine Spektralmaske festgelegt, die eingehalten werden muss, damit die Störwirkungen auf andere Systeme außerhalb des Rundfunk-Kanals vernachlässigbar sind. Daher muss überprüft werden, ob das Gesamtübertragungssystem die für DAB vorgeschriebene Spektralmaske einhält. Ist dies für das Verstärker-Ausgangssignal nicht gewährleistet, muss dem HF-Verstärker zwingend ein Bandpassfilter für den jeweiligen DAB-Block nachgeschaltet werden, um die Einhaltung der Maske zu gewährleisten.

Die Spektralmaske stellt nur Forderungen an einen engen Frequenzbereich um die Trägerfrequenz. Darüber hinaus dürfen jedoch keine weit abliegenden Spektralanteile ausgesendet werden. Hierzu werden die Maximalforderungen der Spektralmaske auch für den restlichen Frequenzbereich angewendet.

Für die Messung über die Einhaltung der DAB-Spektralmaske wird mit dem USRP ein DAB-Signal erzeugt und mit dem entsprechenden HF-Verstärker auf die beabsichtigte Ausgangleistung verstärkt (Bild 97). Ein typischer Spektrumanalysator erreicht die hohe Messdynamik, die die Spektralmaske vorgibt, jedoch nicht. Deshalb wird das Signal zuerst durch ein Bandpassfilter so gefiltert, dass das leistungsstarke Signal im Nutzband geschwächt wird, die Störanteile außerhalb des Nutzbandes jedoch ungeschwächt durchgelassen werden. Anschließend wird das Spektrum mit einem selektiven Pegelmesser, dem Messempfänger ESPI 3 von Rohde & Schwarz, ausgemessen.

Diese Messungen wurden am 15./16. April 2014 von Herrn Felix Schad von der BNetzA im Rahmen der Abnahme des Senders durchgeführt. Das Messprotokoll befindet sich in Anlage 5.

3.3.3.2.2. Ergebnisse

In Bild 98 sind die Spektralverläufe des oberen und unteren Seitenbands für die realisierte DAB-Sendekette zu sehen. Diese besteht aus USRP, dem 3B0K1A von Electrolink sowie dem Maskenfilter von Elektrolink. Die Ausgangsleistung beträgt gemessene 100 W.

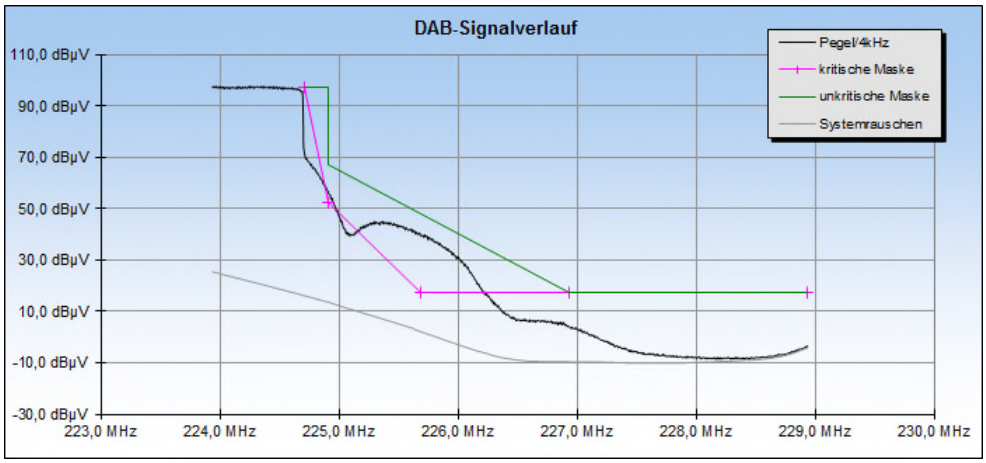


Bild 98: DAB-Signalverlauf (oberes Seitenband)

Wie zu sehen ist, hält der Sender im DAB-Betrieb die unkritische Spektralmaske für DAB ein. Durch die Verwendung des Maskenfilters werden auch eventuelle Oberwellen zuverlässig unterdrückt. Somit ist die Einhaltung der spektralen Vorgaben für DAB durch die BNetzA bestätigt.

In Bild 99 ist der Spektralverlauf des oberen Seitenbands für die realisierte DRM+-Sendekette zu sehen. Diese besteht aus USRP und dem Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver von PCS Electronics. Die Ausgangsleistung beträgt 22 W.

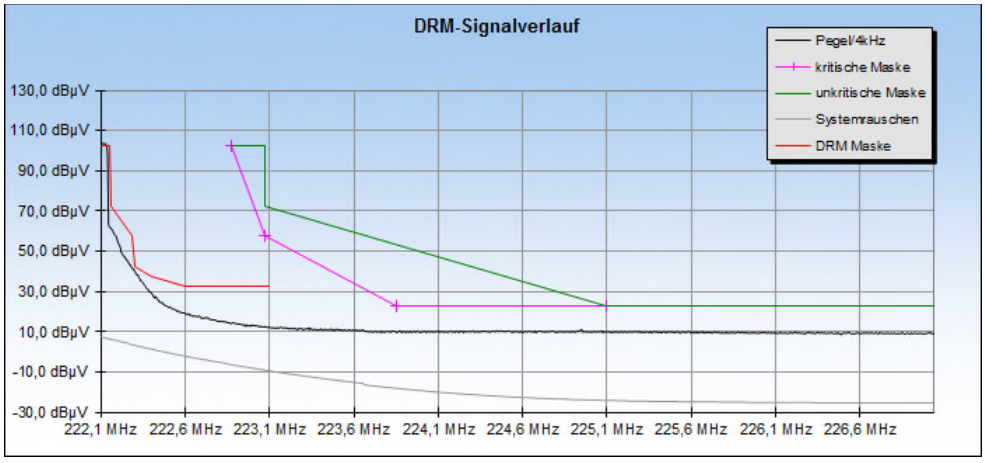


Bild 99: DRM-Signalverlauf (oberes Seitenband)

Auf Grund der Schmalbandigkeit von DRM+ wird die Spektralmaske für DAB mit großem Abstand eingehalten. Zusätzlich ist in Bild 99 die Spektralmaske aus ITU-R BS.1660-6 [11] für DRM+ eingeblendet, die ebenfalls eingehalten wird. Auf Grund von Oberwellen, die durch den USRP erzeugt und vom Verstärker nicht unterdrückt werden, wird seitens der BNetzA für den Betrieb im DRM+-Modus ein Bandpassfilter für das entsprechenden Band dringend empfohlen.

Die Messungen an der DRM+-Sendekette wurden an einem 50 Ω Abschlusswiderstand durchgeführt. Durch die große Schwingneigung des Verstärkers bei minimaler Fehlanpassung ist der Verstärker von PCS nicht für den Produktivbetrieb geeignet und muss durch ein betriebssicheres Modell ersetzt werden.

3.3.3.3. Maximale Stromaufnahme

Die maximale Stromaufnahme des Gesamtsystems wurde durch ein Ampère-Meter ermittelt wobei sowohl der Multiplexgenerator als auch die VHF-Sendeeinheit an die gleiche Steckdose angeschlossen wurden. Dabei wurde unter Volllast eine maximale Stromaufnahme von 2,8 A und somit eine maximal aufgenommene Leistung von 644 W gemessen.

4. Bewertung

In diesem Kapitel wird zunächst darauf eingegangen, ob und in wie weit die an das System gestellten Vorgaben erfüllt werden können. Anschließend werden die Kosten des Systems beleuchtet. Danach wird über den Einsatz des Gesamtsystems in einem Praxistest berichtet. Abschließend wird ein Fazit gezogen.

4.1. Erfüllung der Vorgaben

Der Multiplexgenerator und die VHF-Sendeeinheit sollen dazu fähig sein, DAB/DAB+ einschließlich der Option DRM+ und FM auszustrahlen. Dazu wurden die folgenden Anforderungen gestellt.

a) *Bis zu acht Stereo-Audiokanäle sollen im DAB-Multiplexer verarbeitet werden. Für die Audio-Schnittstelle soll optional ein mehrkanaliger Audio-Mischer mit Effektgerät (Limiter u.ä.) zur Anpassung der Eingangssignale genutzt werden. Für die Eingangssignale sind analoge und digitale Anschlüsse gem. AES/EBU vorzusehen. Auch ist optional die Messung und Anpassung der Audiosignale nach der EBU-Richtlinie R 128 aufzunehmen.*

   Es lassen sich vier analoge sowie vier digitale AES/EBU Stereo-Audiokanäle – sowohl Ein- als auch Ausgänge – anschließen. Zur Messung der Lautheit nach EBU-Richtlinie R 128 ist die Software ebumeter vorhanden. Die Anpassung und Bearbeitung der Signale kann mit der Software Calf Studio Gear erfolgen.

b) *Im Multiplexgenerator sollen Datendienste verwaltet und verarbeitet werden, die auf den DAB/DRM-Standards basieren, sofern mit der verwendeten Software umsetzbar. Ein Datenimport über RSS u.ä. sollte optional möglich sein.*

   Bis zum Projektabschluss gab es noch keine OpenSource-Software, die zuverlässig einen MOT-Slideshow-Dienst bereitstellen kann und sich in den Multiplexgenerator integrieren lässt. Allerdings befinden sich die erforderlichen Programme in Entwicklung, sodass diese sich in naher Zukunft zuverlässig in den Multiplexgenerator integrieren lassen sollten.

c) *Der Multiplexgenerator für DAB soll auf Basis eines Linux-Computers im 19 Zoll-Format mit den mmB-Tools der CRC und weiterer Software für die Signalverarbeitung aufgebaut werden. Optional ist eine Weboberfläche für die Anzeige von Zuständen und Bedienereingaben vorzusehen.*

   Der Multiplexgenerator ist auf einem PC im 19 Zoll-Format aufgebaut und wird mit Ubuntu, einer Linux Distribution, betrieben. Die Programme ODR-DabMux und ODR-DabMod sind Weiterentwicklungen der ursprünglichen mmB-Tools, die offensichtlich nicht mehr gepflegt werden.

   Eine Weboberfläche ist zurzeit nicht implementiert. Dies war auf Grund der begrenzten Bearbeitungszeit für dieses Projekt und fehlender Expertise nicht möglich. Basierend auf der Steuerung des Multiplexgenerators per Skript sollte es jedoch möglich sein, eine solche zu implementieren.

d) *Zu beschreiben und festzulegen sind die Einstellmöglichkeiten der DAB-Übertragungsraten, des Fehlerschutzes u.ä. in den mmB-Tools für die Ausstrahlung eines DAB-Signals (Audio in MPEG-1 Layer II) und für die Ausstrahlung eines DAB+-Signals (Audio in MPEG-4-AAC).*

Diese Einstellmöglichkeiten wurde im Abschnitt **2.5 Benutzeroberfläche** beschrieben.

e) *Die Schnittstelle zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendereinheit ist mit der erforderlichen Übertragungsrate zu spezifizieren. Wünschenswert ist eine Datenübergabe über das Ethernet-Protokoll. Die Möglichkeit einer Anbindung über WLAN ist optional aufzunehmen.*

Die Schnittstelle zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit besteht aus einer Gigabit-Ethernet Schnittstelle. Eine Anbindung per WLAN ist prinzipiell möglich, jedoch ist auf Grund der damit erreichbaren Datenrate und der Betriebssicherheit dringend davon abgeraten diese wichtige Verbindung über WLAN zu realisieren.

f) *Die technischen Spezifikationen des USRP sind zu benennen.*

Diese sind in Abschnitt 2.1.2.3 USRP angegeben.

g) *Für die Leistungsdimensionierung des VHF-Band III-Senders ist zu berücksichtigen, dass die Sendeeinheit mit USRP, Linearverstärker und weiteren Kleingeräten (z.B. Netzteile) an einer haushaltsüblichen Netzversorgung mit einer maximalen Absicherung von 10 A betrieben werden soll.*

Der Multiplexgenerator und die VHF-Sendeeinheit lassen sich an einer haushaltsüblichen Netzversorgung mit einer maximalen Absicherung von 10 A betreiben. Sie nehmen unter Volllast gemeinsam maximal 644 W an Leistung auf und benötigt einen maximalen Strom von 2,8 A.

h) *Der Linearverstärker soll eine Absicherung gegen Überlastung bei Fehlanpassung der Antenne beinhalten.*

Der 3B0K1A von Electrolink verfügt über eine entsprechende Schutzschaltung.

Der Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics ist mit einer Feinsicherung gegen zu hohe Stromaufnahme gesichert. Bei minimaler Fehlanpassung fängt der Verstärker zu schwingen an und ist damit nicht sinnvoll betreibbar.

i) *Die Sendeleistung soll variabel einstellbar sein.*

Der 3B0K1A von Electrolink verfügt über eine per Steuersoftware einstellbare Ausgangsleistungsregelung.

Die Ausgangsleistung des Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier von PCS Electronics ist über die USRP-Ausgangsleistung einstellbar.

j) *Der Linearverstärker ist so auszuwählen, dass die Spektralmasken der genannten Hörfunksysteme am Ausgang eingehalten und somit auf ein Antennenfilter verzichtet werden kann. Sofern doch ein Antennenfilter eingesetzt werden muss, ist ein DAB-Block zu definieren (Nach Absprach mit der BNetzA wird der DAB-Block 12A verwendet).*

Auf Grund der großen Leistung und der Gefahr der Kreuzmodulation ist zwingend ein Antennenfilter zu benutzen. Dieses ist für DAB in die VHF-Sendeeinheit integriert und auf DAB-Block 12A abgestimmt. Mit dem Antennenfilter wird die DAB-Spektralmaske eingehalten. Ohne ein Antennenfilter hält das DAB-Signal die DAB-Spektralmaske nicht ein.

k) *Zwischen Linearverstärker und Antenne ist ein Richtkoppler für Messzwecke einzubauen. Ein Messgerät für die Anzeige der Anpassung (VSWR) und der Ausgangsleistung ist vorzusehen.*

   Im 3B0K1A von Electrolink ist ein Richtkoppler eingebaut, der die gemessenen Werte an die Steuersoftware weitergibt.

l) *Der Multiplexgenerator und die abgesetzte VHF-Sendeeinheit sollen in transportable Flightcases untergebracht werden. Es ist zu prüfen, ob für die VHF-Sendeeinheit eine Belüftung vorgesehen werden muss.*

   Sowohl Multiplexgenerator als auch VHF-Sendeeinheit sind in je einem 8HE Flightcase mit Rollen untergebracht.

   Die VHF-Sendeeinheit wird durch die in den einzelnen Geräten eingebauten Lüfter ausreichend belüftet, sodass kein zusätzlicher Gehäuselüfter vorgesehen werden muss. Beide Geräte dürfen jedoch nicht mit geschlossenem Deckel betrieben werden.

m) *Für die Ausführung der Senderantenne und der Kabelzuführung von der VHF-Sendeeinheit zur Antenne (z.B. Länge, Beschaffung, Transport, Sicherung) sind Vorschläge zu unterbreiten.*

   Als Antenne wurde die CXL 230-1LW/DAB von Procom beschafft. Der Dipol weist 0 dB Antennengewinn auf. Es kann allerdings jede andere Antenne mit einem Wellenwiderstand von $50\ \Omega$ angeschlossen werden. Eine Spitzenleistung von 150 W sollte nicht überschritten werden.

   Als Antennenkabel stehen 20 m Ecoflex 10 von Kabel Kusch mit Erdungsschelle auf einer Kabeltrommel aufgewickelt zur Verfügung.

n) *Einzuhalten ist die Standardkonformität für Ausstrahlung der in Anlage 1 genannten Hörfunksysteme in den jeweiligen VHF-Bereichen.*

   Die Einhaltung der Standardkonformität der in **Anlage 1** genannten Hörfunksysteme in dem jeweiligen VHF-Bereich wurde durch eine Abnahmemessung durch die Bundesnetzagentur bestätigt.

4.2. Kosten

Durch den Einsatz von OpenSource Software beschränken sich die Kosten des DAB-Systems auf die Beschaffungskosten für die Hardwarekomponenten.

Tabelle 8: Kosten für DAB-Komponenten (Nettopreise)

Flighcases	597,81 €
Server	730,00 €
Bedienkonsole	490,10 €
Audio-Geräte	1.334,37 €
USRP N200 + WBX 50-2200 MHz Rx/Tx	1.566,00 €
Verstärker (Electrolink) 100 W RMS	3.900,00 €
DAB Maskenfilter	1.700,00 €
Antenne, Kabel, Blitzschutz	760,25 €
Kleinteile	614,12 €
Gesamt	10.126,65 €

In Tabelle 8 sind die Kosten für den Aufbau des Multiplexgenerators und der VHF-Sendeeinheit für den DAB-Betrieb in Funktionseinheiten zusammengefasst angegeben. Diese Kosten beliefen sich auf 10.126,65 €. Dabei ist es nicht zwingend notwendig, dass bei einer Umsetzung dieses Konzepts alle Komponenten wie hier beschrieben zu beschaffen. Beispielsweise könnte auf das Audiointerface ADI 4 DD von RME verzichtet werden, wenn keine AES/EBU-Ein- und Ausgänge benötigt werden.

Insgesamt ist es gelungen, ein kostengünstiges System für die lokale Verbreitung von DAB und DRM+ zu realisieren. Je nach Anwendungsfall ist sowohl die Erweiterung auf andere Rundfunksysteme möglich, als auch die Reduzierung auf die im Einzelnen benötigten Funktionen für eine weitere Kostenreduktion.

4.3. Probeabstrahlung und Gesamtsystemtest

Bei der „Nacht, die Wissen schafft“ am 25.04.2014 wurde an der TU Kaiserslautern der in diesem Projekt realisierte Sender zur Ausstrahlung des Uni-Veranstaltungsradios RadioEIT genutzt. Er erzeugte einen DAB-Multiplex auf Block 12 A und sorgte mit den von der BNetzA zugelassenen 9 W abgestrahlter Leistung zuverlässig für die Verbreitung auf dem Campus. Zusätzlich verbreitete der Multiplexgenerator mit Hilfe der Software „Darkice“ und „Darksnow“ das Radioprogramm als MP3-Internetstream.

Im Vorfeld des Symposiums „Einstieg in die digitale Verbreitung über DAB und DRM+ für den lokalen Hörfunk und Bürgermedien - Meilensteine aus Rheinland-Pfalz, Deutschland und Europa“ am 03.07.2014 im Fritz-Walter-Stadion Kaiserslautern wurde der Sender über den Zeitraum von einer Woche testweise betrieben. Der Sender befand sich auf dem Hochhaus der Hochschule Kaiserlautern und strahlte dabei einen DAB-Multiplex mit 100 W Ausgangsleistung ab. Während dieser Zeit verbreitete er stabil und zuverlässig den DAB-Multiplex.

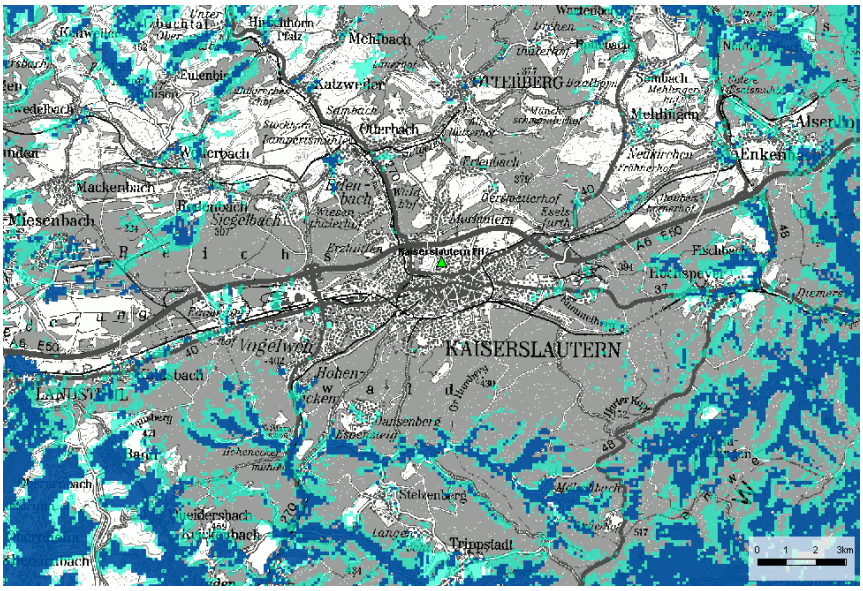


Bild 100: Ausbreitungssimulation für DAB und DRM+

Bild 100 zeigt eine Ausbreitungssimulation der LMK für den Testbetrieb im Vorfeld des Symposiums. Die Simulation wurde mit FRANSY durchgeführt. Die Parameter sind im Folgenden aufgelistet.

Sender „Am Kaiserberg“ FH Kaiserslautern, 07E 46 49 / 49N 27 10 [PD], 260 m ü.N.N,
Antenne 30 m ü.Gr., Vertikal, ND

- DAB Mode I, 100 W RMS (ERP), 223,936 MHz (12A)
- DRM+ 4QAM 10 W RMS (ERP), 222,064 MHz (11D)
- Versorgung mobil 99%
- DAB: 61 dBµV/m, DRM+: 44 dBµV/m
- Klar: versorgt mit DAB und DRM+, Cyan: versorgt nur mit DRM+, Blau: unversorgt

Während des Symposiums wurde über den Sender gleichzeitig DAB und DRM+ abgestrahlt. Die Betriebsparameter entsprachen denen der Simulation.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Fazit

In diesem Projekt ist es gelungen, einen kostengünstigen portablen DAB-Sender zu realisieren. Hierzu wurde in zwei rollbaren Flightcases ein als Software-Defined-Radio konzipierter Sender für DAB und DRM+ im VHF-Band III aus einem Multiplexgenerator und einer VHF-Sendeeinheit mit 100 W Linearverstärker entworfen und aufgebaut. Er verwendet preisgünstige Standardkomponenten sowie die OpenSource-Software mmbTools. Außerdem umfasst der Sender einen Demonstrator für DRM+ im VHF-Band III, der auch für weitere DRM+-Projekte genutzt werden kann. Im Auftrag der Landeszentrale für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz und mit Unterstützung der FH Kaiserslautern sowie des Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen wurde dieses Projekt am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Kaiserslautern im Rahmen dieser Studienarbeit realisiert.

Wenn auch im Bezug auf Datendienste die ursprünglichen Vorgaben noch nicht erfüllt werden konnten, so ist dennoch ein universell einsetzbares Broadcastsystem entstanden, das den einschlägigen Standards genügt. Im Bezug auf die Qualität der HF-Signale hat die BNetzA die Einhaltung der spektralen Vorgaben bestätigt. Aufgrund der regen Weiterentwicklung der mmB-Tools durch opendigitalradio.org ist eine weitere Zunahme der verfügbaren Funktionen wie MOT-Slideshow oder Dynamic Label zu erwarten.

5.2. Ausblick

Zurzeit steht zur Senderbedienung für die Signalstrecke von den Audioeingängen bis hin zum HF-Verstärker keine einheitliche grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung, die es auch Personen ohne tiefgreifende Linuxkenntnisse ermöglichen würde, den Sender zu bedienen. Daher wäre es wünschenswert, eine solche Oberfläche in einem Folgeprojekt zu realisieren. Denkbar wäre sowohl eine Implementierung als lokal lauffähiges Programm mit GUI als auch eine Weboberfläche zur Steuerung, die sich auch aus der Ferne nutzen ließe.

Die Nutzung von Datendiensten wie MOT-Slideshow oder Dynamic Label konnten zum Zeitpunkt der Laboruntersuchungen nicht erfolgreich implementiert werden. In der Zwischenzeit gab es jedoch Fortschritte bei opendigitalradio.org in der Entwicklung, sodass diese Dienste nun nutzbar sein sollten. Dies wäre in einem weiteren Projekt ebenfalls zu untersuchen und umzusetzen.

Die Ausweitung auf ein SFN könnte betrachtet werden. Dazu sollten die zusätzlichen Anforderungen für den Gleichwellennetzbetrieb untersucht und das Konzept dahingehend erweitert werden. Die grundsätzliche Unterstützung von SFN ist in den mmb-Tools schon enthalten, sodass diese Funktionalität ausgetestet werden könnte. Dazu müssten mehrere Modulatoren betrieben werden. Außerdem ist die Taktgewinnung über GPS zu implementieren.

Als Vergleichssystem zu den mmb-Tools könnte auch der Fraunhofer Contentserver in einer virtuellen Maschine auf dem Multiplexgenerator installiert werden. Dies hätte den Vorteil, dass ein kommerzielles, erprobtes System zur DAB-Verbreitung als Referenz herangezogen werden könnte. Um den Fraunhofer Contentserver mit dem Modulator ODR-DabMod zu verbinden, müsste jedoch noch ein Formatkonverter von EDI auf ETI programmiert werden, weil keines der beiden Tools das jeweils andere Format unterstützt.

Die Qualität des DAB-Signals wird durch den Leistungsverstärker zwangsweise signifikant verschlechtert. Durch Precorrection ließen sich die Verstärkernichtlinearitäten zum Teil kompensieren und ein deutlich besseres Signal erzeugen. Die Precorrection könnte beispielsweise auf dem FPGA innerhalb des USRP gerechnet werden. Alternativ könnte auch ein anderer Exciter eingesetzt werden, der Precorrection schon unterstützt.

Anlage 1 - Technische Normen und Empfehlungen

Einschlägige Standards und ETSI-Normen für die Übertragung der in Ziffer 1 genannten Hörfunksysteme und insbesondere für die Anforderungen an VHF-Sender zur Ausstrahlung der genannten Hörfunksysteme sind:

Für DAB:

- ETSI TR 101 495 V1.4.1 (2012-03) Digital Audio Broadcasting (DAB); Guide to DAB standards; Guidelines and Bibliography
- ETSI EN 300 401 V1.4.1 (2006-06): Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers
- ETSI TR 101 496-1 V1.1.1 (2000-11) Digital Audio Broadcasting (DAB); Guidelines and rules for implementation and operation; Part 1: System outline
- ETSI TR 101 496-2 V1.1.2 (2001-05) Digital Audio Broadcasting (DAB); Guidelines and rules for implementation and operation; Part 2: System features
- ETSI TR 101 496-3 V1.1.2 (2001-05) Digital Audio Broadcasting (DAB); Guidelines and rules for implementation and operation; Part 3: Broadcast network
- ETSI EN 302 077-1 V1.1.1 (2005-01): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Terrestrial - Digital Audio Broadcasting (T-DAB) service; Part 1: Technical characteristics and test methods
- ETSI EN 302 077-2 V1.1.1 (2005-01): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Terrestrial - Digital Audio Broadcasting (T-DAB) service; Part 2: Harmonized EN under article 3.2 of the R&TTE Directive
- EN 300 798 V1.1.1 (1998-03) Digital Audio Broadcasting (DAB); Distribution interfaces; Digital baseband In-phase and Quadrature (DIQ) interface
- ETSI EN 300 797 V1.2.1 (2005-05) Digital Audio Broadcasting (DAB); Distribution interfaces; Service Transport Interface (STI)
- ETSI TS 102 693 V1.1.2 (2009-11) Digital Audio Broadcasting (DAB); Encapsulation of DAB Interfaces (EDI)
- ETSI TS 102 563 V1.2.1 (2010-05) Digital Audio Broadcasting (DAB); Transport of Advanced Audio Coding (AAC) audio
- Recommendation ITU-R BS.1114-7 (12/2011) Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3 000 MHz
- Recommendation ITU-R BS.1660-6 (08/2012) Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band

Für DRM:

- ETSI ES 201 980 V3.2.1 (20129-06): Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification
- ETSI TS 102 820 V3.1.1 (2010-12): Digital Radio Mondiale (DRM); Multiplex Distribution Interface (MDI)
- ETSI TS 102 358 V1.1.1 (2005-01): Digital Radio Mondiale (DRM); Specific Restrictions for the use of the Distribution and Communication Protocol (DCP)

- Recommendation ITU-R BS.1114-7 (12/2011) Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3 000 MHz
- Recommendation ITU-R BS.1660-6 (08/2012) Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band

Für FM:

- ETSI EN 302 018-2 V1.2.1 (2006-03):, Candidate Harmonized European Standard (Telecommunications series) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Frequency Modulated (FM) sound broadcasting service; Part 2: Harmonized EN under article 3.2 of the R&TTE Directive
- Recommendation ITU-R BS.412-9 (12/1998) Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF

Anlage 2 - Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Aufteilung des Systems in Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit 5
Bild 2: Konzept des Aufbaus 6
Bild 3: Thon Rack 8U Live 50 Wheels 7
Bild 4: RCS-85/SW 7
Bild 5: 19 Zoll-Server 8
Bild 6: CL1000 Slideaway 8
Bild 7: Adapterkabel SPHD zu VGA / USB 8
Bild 8: RME HDSPe 9
Bild 9: RME Multiface II 9
Bild 10: RME ADI 4 DD 9
Bild 11: USRP N200 10
Bild 12: USRP B100 11
Bild 13: PCS Verstärker 11
Bild 14: 3B0K1A 12
Bild 15: DAB-Maskenfilter 12
Bild 16: Signalverarbeitung im Multiplexgenerator 13
Bild 17: hdspmixer - Bedienoberfläche zur Steuerung des Hardwaremischers 14
Bild 18: Transportfenster von QJackCtl 15
Bild 19: ebumeter 15
Bild 20: Einige Plugins aus Calf Studio Gear 16
Bild 21: Signalfluss in der Software bei DAB-Betrieb 18
Bild 22: Signalfluss in der Software bei DRM(+)-Betrieb 19
Bild 23: Multiplexgenerator (oben) und VHF-Sendeeinheit (unten) 20
Bild 24: Multiplexgenerator Frontansicht 21
Bild 25: Multiplexgenerator Rückansicht 21
Bild 26: Konzept des Aufbaus 22
Bild 27: VHF-Sendeeinheit Frontansicht 23
Bild 28: VHF-Sendeeinheit Rückansicht 23
Bild 29: HDSPConf - Einstellungen des HDSPe 24
Bild 30: Statusfenster von „QjackCtl“ 24
Bild 31: Verbindungsfenster von „QjackCtl“ 24
Bild 32: Beispiel einer DAB Servicestruktur [6] 30
Bild 33: FSV 0 dB Eingangsdämpfung 40
Bild 34: 10 dB Eingangsdämpfung 40
Bild 35: FSV 20 dB Eingangsdämpfung 40
Bild 36: FSV 30 dB Eingangsdämpfung 40

Bild 37: Überprüfen des Ausgangsdatenstroms , Empfang mittels DAB-Stick (links) und über aufgezeichnete ETI-Datei (rechts) ... 42
Bild 38: Multiplexaufbau DAB-Scout.2 ... 43
Bild 39: 1 dB - Kompressionspunkt ... 45
Bild 40: Messung des 1 dB-Kompressionspunkt ... 45
Bild 41: Kennlinie PCS ... 46
Bild 42: Verstärkung PCS ... 46
Bild 43: Spektrum vor und nach einem nichtlinearen System ... 47
Bild 44: Intercept-Punkt k2 ... 48
Bild 45: Ausgangsspektrum eines nichtlinearen Systems bei Zweitonaussteuerung ... 49
Bild 46: Intercept-Punkt 2. und 3. Ordnung ... 50
Bild 47: Messung des IP3-Punkt ... 51
Bild 48: IP3-Messung des PCS-Verstärkers 10 W Ausgangsleistung ... 52
Bild 49: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 10W Ausgangsleistung ... 53
Bild 50: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 120W Ausgangsleistung ... 53
Bild 51: Messung des Frequenzgangs ... 54
Bild 52: Messung des Frequenzgangs mit Multicarrier-Signal ... 54
Bild 53: Frequenzgang „PCS“ ... 55
Bild 54: Frequenzgang Electrolink ... 55
Bild 55: Messung über die Qualität der HF-Signale ... 56
Bild 56: Spektrum des DAB-Signals des USRP ... 57
Bild 57: Schulterabstand PCS 10 W DAB-Signal ... 57
Bild 58: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers 10 W DAB-Signal ... 58
Bild 59: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers bei 120 W DAB-Signal ... 58
Bild 60: Spektrum des DAB-Signals des SDB 601 ... 58
Bild 61: Konstellationsdiagramm am Ausgang des USRP ... 59
Bild 62: Konstellationsdiagramm am Ausgang des PCS Verstärker mit 10 W ... 59
Bild 63: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 10 W ... 60
Bild 64: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electolink Verstärkers 120 W ... 60
Bild 65: Konstellationsdiagramm des SDB 601 ... 60
Bild 66: Amplitude & Phase am Ausgang des USRP ... 61
Bild 67: Amplitude & Phase PCS 10W + Filter ... 61
Bild 68: Amplitude & Phase Electrolink 10 W + Filter ... 61
Bild 69: Amplitude & Phase Electrolink 120 W + Filter ... 61
Bild 70: Amplituden- und Phasenverzerrungen des SDB 601 ... 62
Bild 71: Messung der CCDF und des Crestfaktors (andere Grafik) ... 62
Bild 72: CCDF und Crestfaktor am Ausgang des USRP ... 63
Bild 73: CCDF und Crestfaktor nach dem PCS Verstärker 10 W ... 63

Bild 74: CCDF und Crestfaktor nach dem Electrolink Verstärker 10 W 63
Bild 75: CCDF und Crestfaktor nach dem Elektrolink Verstärker 120 W 63
Bild 76: CCDF und Crestfaktor des SDB 601 64
Bild 77: I/Q-Ungleichheit am Ausgang des USRP 65
Bild 78: I/Q-Ungleichgewicht PCS 10 W + Filter 65
Bild 79: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 10 W + Filter 65
Bild 80: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 120 W + Filter 65
Bild 81: I/Q-Ungleichheit des SDB 601 65
Bild 82: MER(f) des USRP 66
Bild 83: MER(f) PCS 10 W + Filter 66
Bild 84: MER(f) USRP + Electrolink 10 W + Filter 66
Bild 85: MER(f) USRP + Electrolink 120 W + Filter 66
Bild 86: MER(f) des SDB 601 67
Bild 87: Modulationsfehler am Ausgang des USRP 68
Bild 88: Modulationsfehler PCS 10 W + Filter 68
Bild 89: Modulationsfehler Electrolink 10 W + Filter 68
Bild 90: Modulationsfehler Electrolink 120 W + Filter 68
Bild 91: Modulationsfehler des SDB 601 69
Bild 92: Gesamtübersicht USRP 70
Bild 93: Gesamtübersicht PCS 10 W + Filter 70
Bild 94: Gesamtübersicht Electrolink 10 W + Filter 70
Bild 95: Gesamtübersicht Electrolink 120 W + Filter 70
Bild 96: Gesamtübersicht SDB 601 70
Bild 97: Messung über das Einhalten der Spektralmaske 71
Bild 98: DAB-Signalverlauf (oberes Seitenband) 72
Bild 99: DRM-Signalverlauf (oberes Seitenband) 72
Bild 100: Ausbreitungssimulation für DAB und DRM+ 78

Anlage 3: Produktliste

Artikel	Anzahl	Preis netto	Bezugsquelle
Thon Rack 8U Live 50 Wheels	1	198,32 €	http://www.thomann.de/de/thon_rack_8he_live_50_mit_rollen.htm
8 HE Flightcase	1	358,31 €	http://www.casebuilder.com
RCS-85/SW Rack-Steckdosenleiste	2	57,06 € 114,12 €	http://www.ltt-versand.de/Ton/Cases-Racks-und-Taschen/Case/Rack-Zubehoer/Rack-Steckdosenleiste/RCS-85-SW-Rack-Steckdosenleiste::61204.html
19 Zoll-Server	1	730 €	Junge Software: Christoph Giebel • Rainer Haag • Kay Jennrich • Matthias Zwirnlein GbR Ludwigstraße 42 + 44 • 67657 Kaiserslautern
TFT Konsole CL1000 Slideway	1	479 €	http://www.ute.de/produkte/kvm/tft-schubladen/tft-schublade-ohne-kvm-switch/tft-konsole-cl1000-slideway-von-aten.html
2L-5202UP - 1,8 m USB KVM Kabel	1	11,10 €	http://www.ute.de/produkte/kvm/kvm-zubehoer/2l-5202up-1-8-m-usb-kvm-kabel-von-aten.html
RME HDSPe PCIe	1	268,07 €	http://www.thomann.de/de/rme_hdsp_pcie.htm
RME Multiface II	1	531,93 €	http://www.thomann.de/de/rme_multiface_ii.htm
RME ADI 4 DD	1	486,55 €	http://www.thomann.de/de/rme_adi_4_dd.htm
RME Uni-Rack	1	37,82 €	http://www.thomann.de/de/rme_halterung_19.htm
DAP 19 Zoll Stecker-Panel 2U	2	3,53 € 7,06 €	http://www.ltt-versand.de/Ton/Cases-Racks-und-Taschen/Rackwagen-und-Stahlschraenke/DAP-19-Zoll-Stecker-Panel-2U-fuer-16-XLR-Stecker-D-Si-ze::64707.html?utm_source=shoppingcom&utm_medium=cpc
Rackschublade	1	41,18 €	http://www.thomann.de/de/thon_rackschublade_2he.htm
USRP N200	1	1188 €	https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT
WBX 50-2200 MHz Rx/Tx	1	378 €	https://www.ettus.com/product/details/WBX
SNT HRP 300 48	1	71,85 €	http://www.reichelt.com/Schaltnetzteile-Case-geschlossen/SNT-HRP-300-48/3/index.html?&ACTION=3&LA=446&ARTICLE=108273&GROUPID=4959&artnr=SNT+HRP+300+48

Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver	1	539,99 €	http://www.pcs-electronics.com/high-gain-band-boxed-amplifier-p-2181.html?osCsid=0369fece4e3c5f1f793ca38185f73c62
LA 9/200 24V	1	114,86 €	http://de.farnell.com/fischer-elektronik/la-9-200-24v/kuhlkorper-lufter-24v/dp/1222517
3B0K1A	1	3900 €	http://electrolink.com
VHF Band II Filter	1	1700 €	http://electrolink.com
Ecoflex 10	20 m	117,65 €	http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/Ecoflex-10.htm
KMT-11	1	22,52 €	http://www.kabel-kusch.de/ERDUNG/erdung.htm
CXL 230-1LW/DAB	1	120,08 €	http://www.procom.dk/ger/produkte/feststationsantennen/175-470-mhz/rundstrahlantennen/cxl-230-1lw-dab

Anlage 4: Softwareverzeichnis

Software	**Bezugsquelle**
Ubuntu 14.04	http://www.ubuntu.com/download
JACK	http://jackaudio.org/download
jack-stdio	http://packages.ubuntu.com/de/saucy/jack-stdio
MPlayer	http://www.mplayerhq.hu/design7/dload.html
ebumeter	http://packages.ubuntu.com/de/saucy/ebumeter
Calf Studio Gear	http://calf.sourceforge.net/download.html
tooLAME	http://sourceforge.net/projects/toolame/files/
fdk-aac-dabplus	https://github.com/Opendigitalradio/fdk-aac-dabplus
ODR-DabMux	https://github.com/Opendigitalradio/ODR-DabMux
ODR-DabMod	https://github.com/Opendigitalradio/ODR-DabMod
Spark	http://www.drm-sender.de

Anlage 5: Abnahmemessung der BNetzA vom 15./16.04.2014

Bundesnetzagentur

Senderüberprüfung V 191/00170/14

Demonstrationssender Band III der TU Kaiserslautern

BNetzA DLZ 8 München
Betzenweg 32
81247 München

Felix Schad, Augs8-10

1 Prüfungsinhalt

Vorliegender Bericht beschreibt die Messungen zur Prüfung der Nebenaussendungen zweier Versuchsfunksender der Technischen Universität Kaiserslautern mit der Mittenfrequenz 223,936 MHz (T-DAB Block 12A). Aufgrund der geringen Leistung von ca. 20 dBW ist die unkritische Maske gem. RRC06 anzuwenden.

Die Messungen wurden am 15. Und 16.4.2014 an der TU Kaiserslautern, Geb. 11 durchgeführt.

2 Senderaufbau, Einsatzzweck

Das auf Einzelmodulen basierte System besteht aus zwei USRP-B100-Geräten, welche über eine Ethernet-Verbindung die jeweiligen I/Q-Datenströme im digitalen Basisband von einem Computer geliefert bekommen und daraus das HF-Signal erzeugen.

Für den DAB-Sender wird das HF-Signal am Ausgang des USRP in einen Verstärker geleitet, welche auf eine Ausgangsleistung von 100 W konfiguriert ist. Diesem nachgeschaltet ist ein DAB-Maskenfilter. Der Verstärker verfügt über einen internen Vorverzerrer, der für DAB-Signale konfiguriert ist.

Für den DRM-Zweig wird ein separater Verstärker betrieben, welcher ungefiltert auf die Sendeantenne geschaltet werden soll.

Beide Systeme sind in einem Rollwagen montiert, s. Abbildung 1. Ein separater Betrieb der Sender ist möglich.

In dem momentanen Arbeitsstadium sind die Antennen resp. Antennenträger noch nicht beschafft. Für den DAB-Sender ist die Antenne „Procom CXL 230-1/DAB“ geplant, welche auf dem Dach des Gebäudes 11 der TU montiert werden soll.
Der Antennenstandort für den DRM-Sender ist noch nicht endgültig festgelegt; dieser wird entweder die Fachhochschule Kaiserslautern, Campus Morlauterer Straße oder ebenfalls das Geb. 11 sein. Zur Entkopplung in diesem Fall ist vorgesehen, die vorhandenen Blechkästen bzw. Verbauungen auf dem Gebäudedach zu nutzen. Hierbei wurde von mir angeraten, jeweils die gegenseitig über den Antennenpfad eingekoppelte Antennenspannung, welche als Rücklauf in den jeweils anderen Sender laufen könnte, auf ihren Pegel zu prüfen und auf eine signifikante Änderung des Senderverhaltens zu achten.

Haupteinsatzzweck ist eine Vorstellung im Rahmen eines Symposiums im Fritz-Walter-Stadion, Kaiserslautern Anfang Juli 2014. Umfangreiche Versuche mit Empfängern, Stör- und Versorgungsszenarien sind nicht geplant.

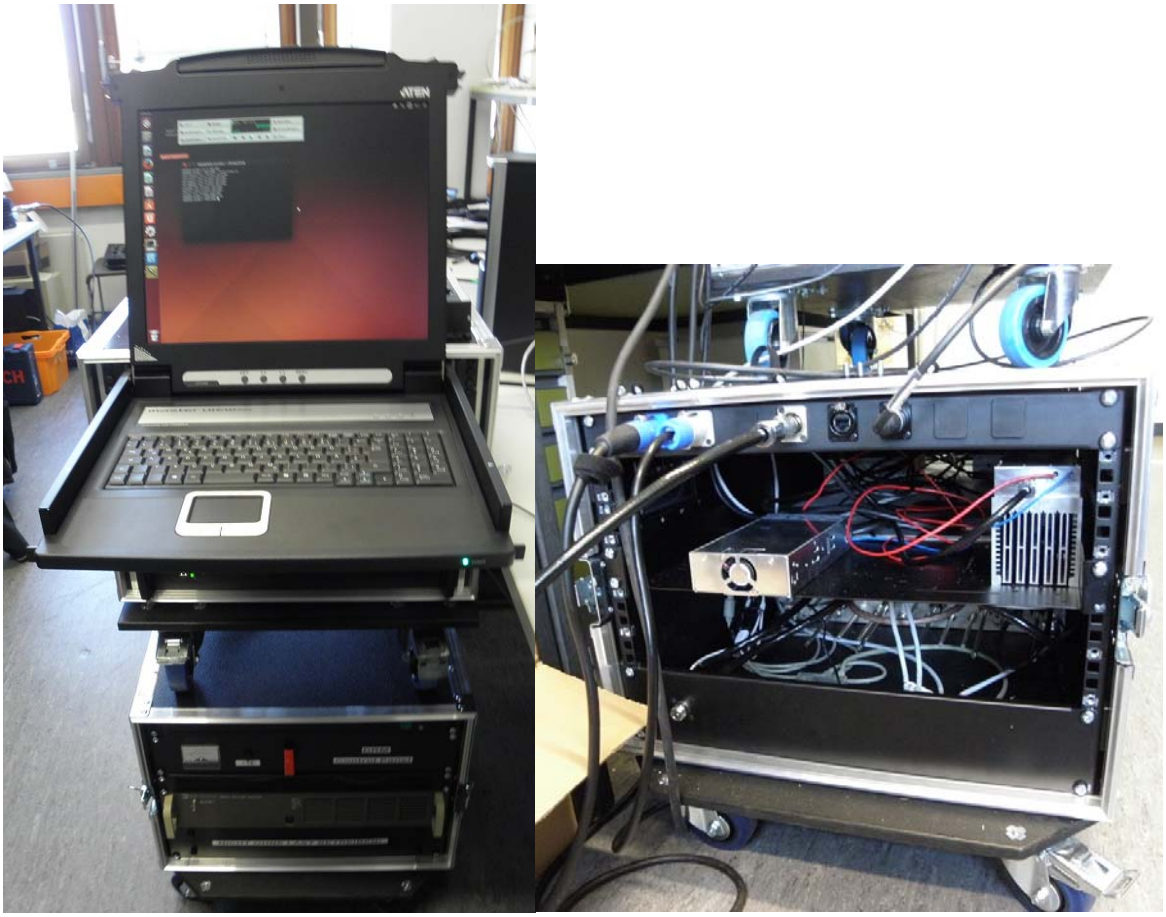


Abbildung 1: Vor- und Rückansicht des Sendergestells

3 Vorgehensweise bei der Messung

Nach Betrachtung der Sendeanlage wurden die Sender getrennt nach dem DAB bzw. DRM-Signal untersucht. Nach Messung der eingestellten Senderausgangsleistungen wurden die Seitenbandspektren aufgenommen. Sofern notwendig, wurden die Ausgangsleistungen soweit reduziert, bis keine Überschreitungen der Sendemasken mehr erkennbar waren. Im Anschluss wurden die endgültig eingestellten Senderausgangsleistungen erneut festgehalten.

4 Messaufbauten

4.1 Bestimmung der Senderausgangsleistung

Zur Bestimmung der Senderausgangsleistungen wurden die Senderausgänge separat über ein von der Fachhochschule Kaiserslautern gestelltes 30 dB Dämpfungsglied vor einen ESPI3 geschaltet. Die Messleitungen inkl. des Dämpfungsgliedes haben eine Durchgangsdämpfung von 30,7 dB (vor Ort gemessen).

4.2 Bestimmung der Seitenbandspektren

Der Messaufbau ist in der untenstehenden Abbildung 2 dargestellt. Zur Optimierung des Empfängereingangspegels wurde der dargestellten Messstrecke je nach Bedarf ein variables Dämpfungsglied zwischen dem 30 dB-Glied (s.o.) vorgeschaltet.
Das Messprinzip ist wie folgt: die Nutzaussendung wird über ein abstimmbares Filter unterdrückt. Dies ermöglicht, im Frequenzbereich der Nebenausendungen mit einer -- entsprechend der Filterdämpfung – höheren Empfindlichkeit als ohne das Filter zu messen. Anschliessend wird der Dämpfungsverlauf des Filters gewobbelt und mit den gemessenen Pegeln überlagert, so dass das ungefilterte Spektrum rekonstruiert werden kann.

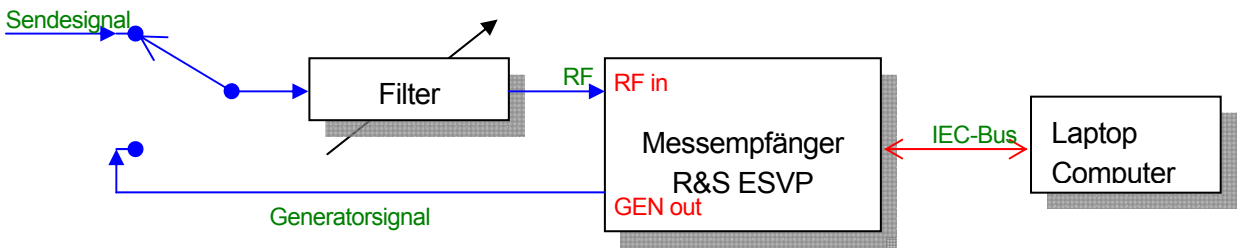


Abbildung 2: Messaufbau zur Seitenbandmessung mit hoher Dynamik

Die resultierenden Diagramme enthalten neben dem Spektrumsverlauf auch die einschlägigen Sendermasken gem. RRC06. Des Weiteren ist mittels einer grauen Linie die Systemempfindlichkeit eingezeichnet, welche die Empfindlichkeitsgrenze des Messsystems darstellt.

5 DAB

5.1 Senderausgangs- bzw. Strahlungsleistung

Die endgültige Leistung des Senders ergibt sich wie folgt, s. auch Abbildung 3:

Senderausgangsleistung	18 dBW
Kabeldämpfung zum Gebäudedach	2,4 dB (gem. Angaben TU Kaiserslautern)
Antennengewinn	0 dBd
Strahlungsleistung	**15,6 dBW ERP bzw. 36 W**

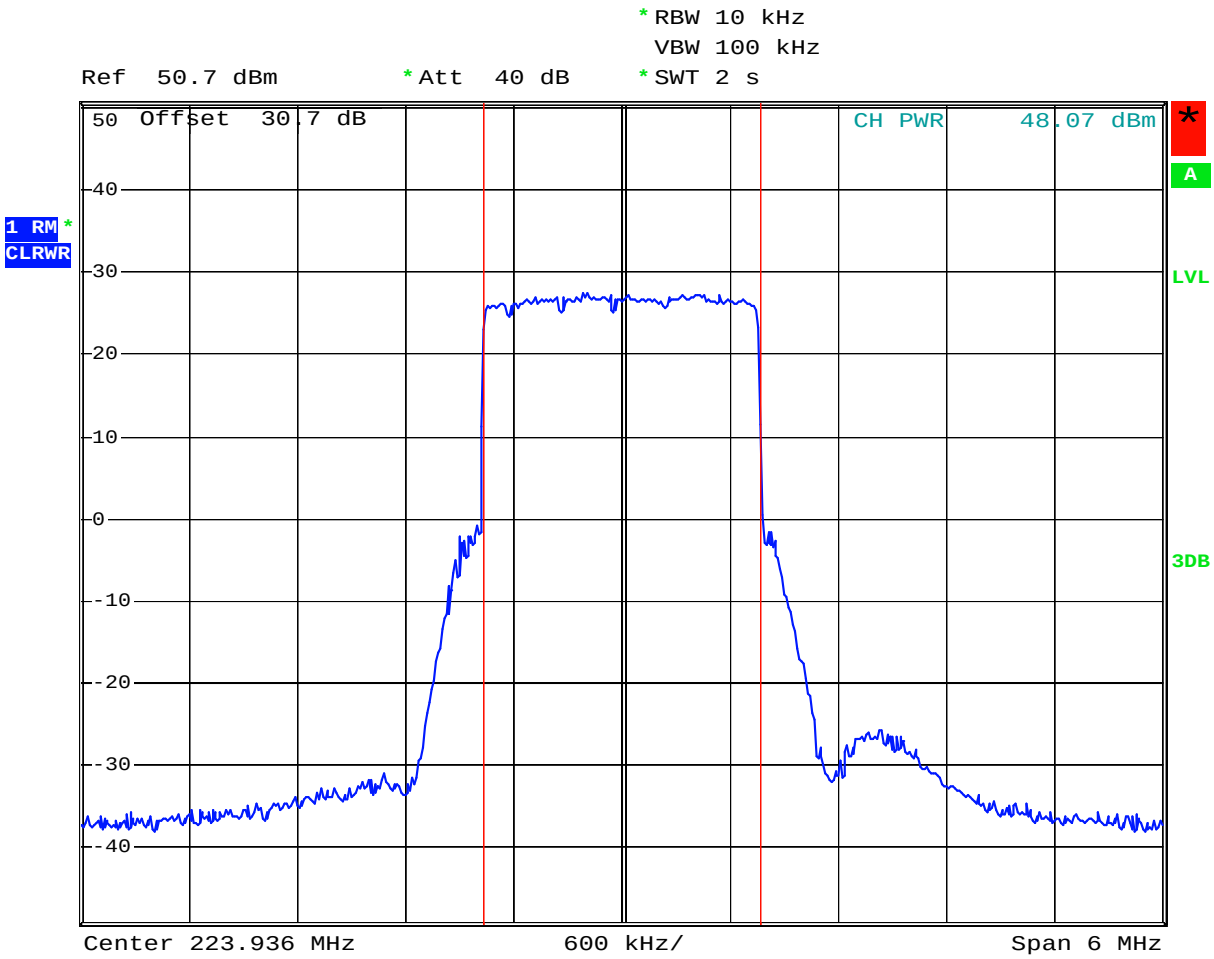


Abbildung 3: Messung der DAB-Senderausgangsleistung (Vorgeschaltete Dämpfungen sind bereits in den Zahlenwerten berücksichtigt)

5.2 Spektrumsmaske

Abbildung 4 und Abbildung 5 stellen die gemessenen Spektren in einer Bandbreite von 4 kHz dar. Man kann erkennen, dass in beiden Bereichen die unkritische Maske nicht überschritten wird.

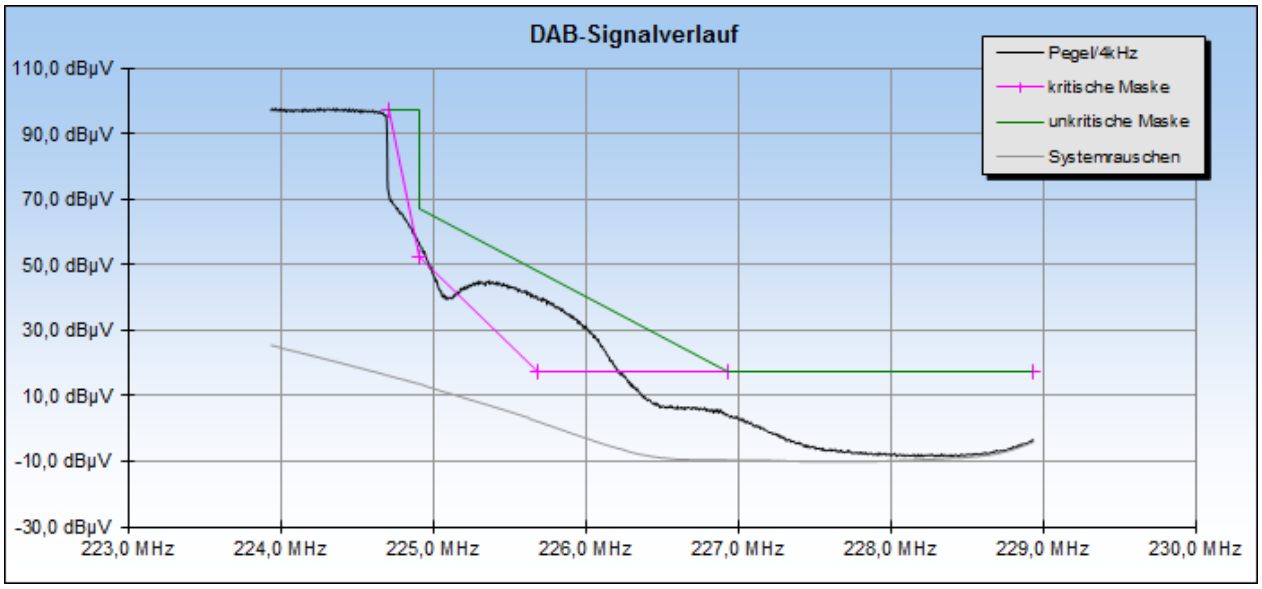


Abbildung 4: DAB-Signalverlauf (oberes Seitenband)

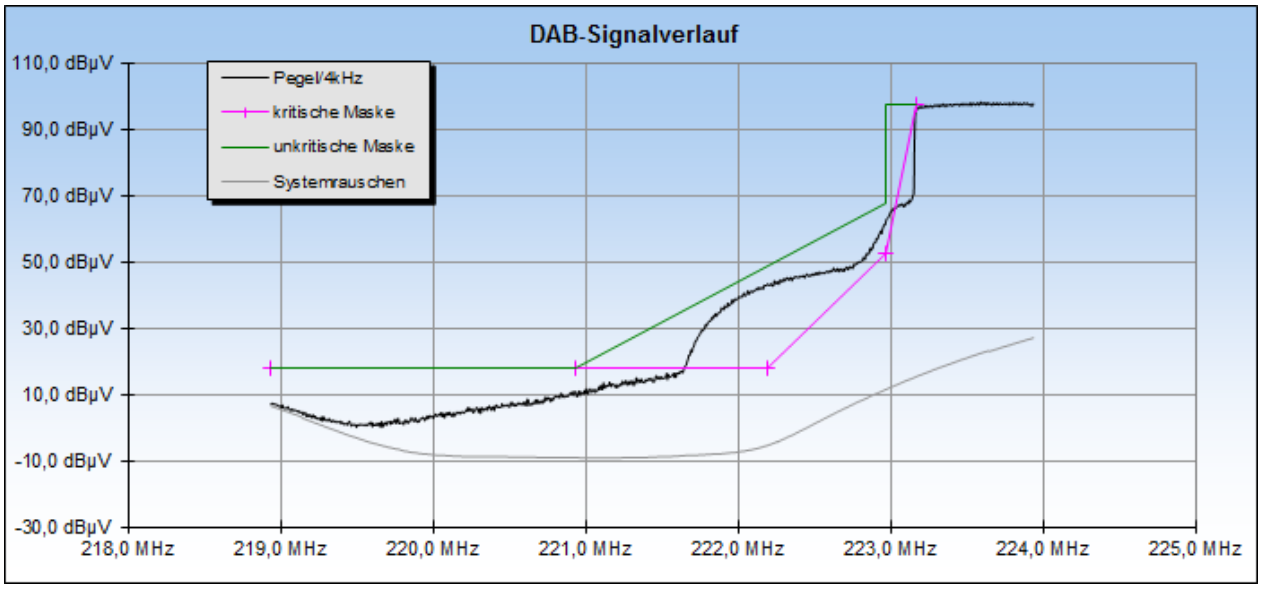


Abbildung 5: DAB-Signalverlauf (unteres Seitenband)

Das Maskenfilter hat hierbei einen erheblichen Einfluss auf die endgültige Form des Spektrums, wie die untenstehende Abbildung 6 illustriert.

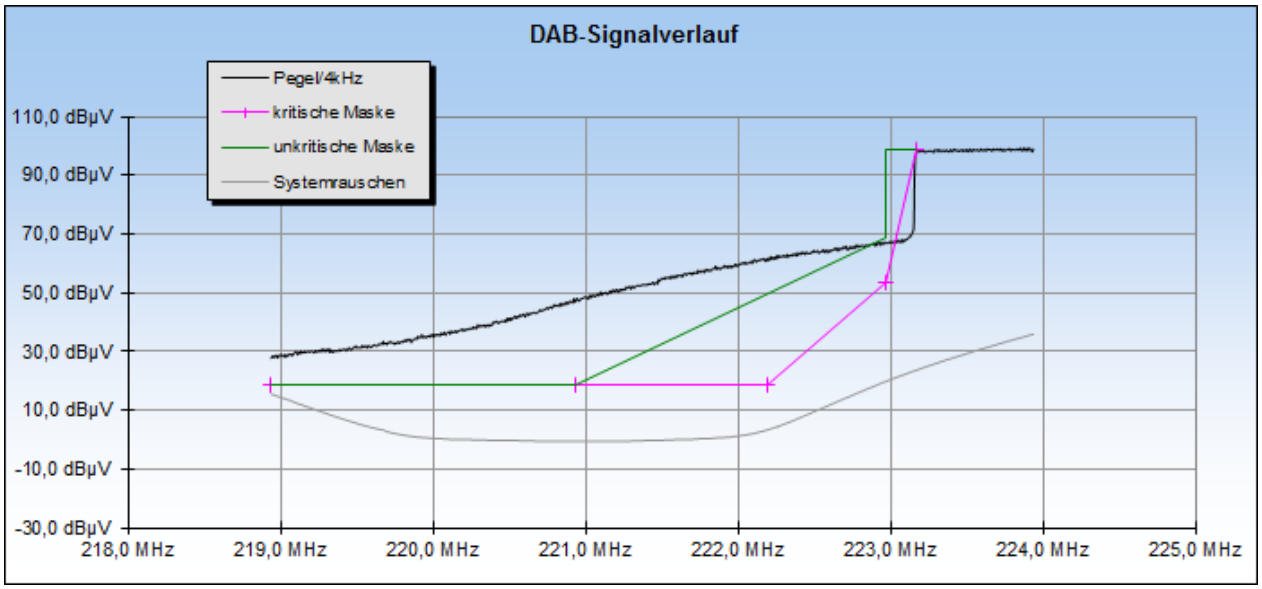


Abbildung 6: unteres DAB-Seitenband ohne Maskenfilter

5.3 Sonstiges

Im Rahmen der Messungen hat sich gezeigt, dass speziell der DAB-Verstärker bei seiner maximalen Nennleistung von 120 W trotz seiner internen Vorverzerrungsstrategie erheblich zu einer Verschlechterung des Signals beigetragen hat. Dieser Effekt tritt besonders bei einer Leistungseinstellung von mehr als 100 W auf, bei der endgültig die Übersteuerungsgrenze des Verstärkers erreicht war.
Ebenso wird bereits von dem USRP auf den ungeradzahligen Nebenwellen (z.B. der 3fachen Grundfrequenz) ein nennenswertes Signal erzeugt, dass nur ca. 10 dB gegenüber dem Nutzsignal abgesenkt ist. Auf den geradzahligen Nebenwellen waren die Pegel in der Größenordnung von ca. 60 dB gegenüber dem Nutzsignal abgesenkt. Diese sind durch das Maskenfilter allerdings auf jeden Fall ausreichend unterdrückt.

6 DRM

Aufgrund des noch unklaren Standortes für den Versuchsbetrieb ist noch keine endgültige Frequenz festgelegt. Da das Signal leidglich 100 kHz Bandbreite belegt, ist eine Verschiebung innerhalb des DAB-Blocks 12A möglich. Über eine noch bestehende DAB-Frequenzzuteilung der FH Kaiserslautern wäre die Nutzung des dort zugeteilten Blocks möglich.

6.1 Senderausgangsleistung

Für diesen Sendezweig ist noch keine Antenne / Kabelweg festgelegt. Die Senderausgangsleistung ergibt sich wie folgt, s. auch Abbildung 7:

Messwert	7,5 dBm
Vordämpfung zwischen ESPI und Senderausgang	36 dB
dBm → dBW	30 dB
Senderausgangsleistung	**13,5 dBW bzw. 22 W**

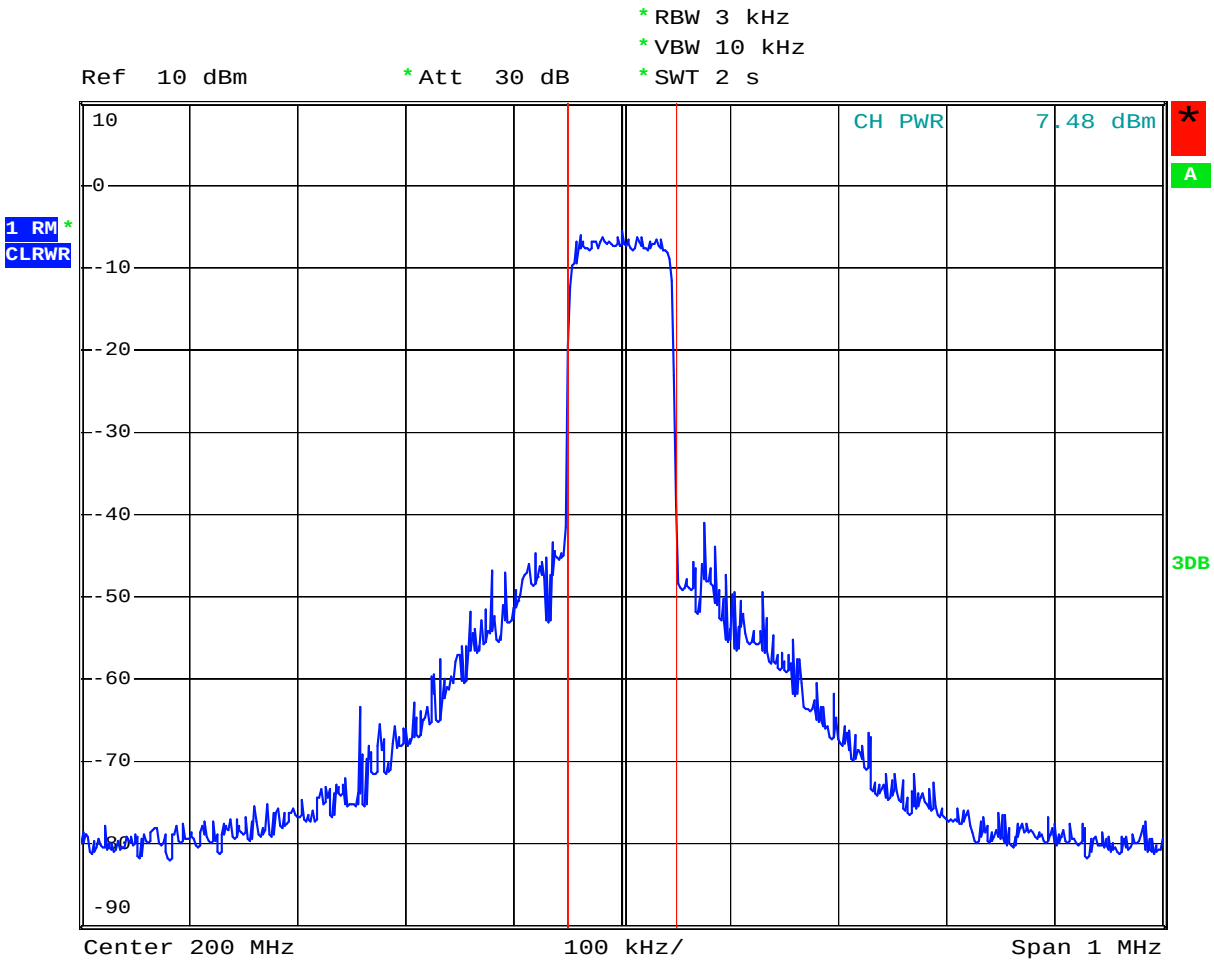


Abbildung 7: Messung der DRM-Senderausgangsleistung (Werte exkl. Vordämpfungen)

6.2 Spektrumsmaske

Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen die gemessenen Spektren in einer Bandbreite von 4 kHz dar. Man kann erkennen, dass die DAB-Masken nicht überschritten werden.

Zusätzlich ist in den Diagrammen die von der deutschen DRM-Plattform vorgeschlagene DRM-Maske eingezeichenet, s.: „German DRM Platform, DRM+ Technical Expert Group: Planning Parameters for DRM Mode E („DRM+“) concering the use in VHF Band I,II,III. V3.0 – 04/05/2011“.

Bezogen auf diese Maske sind ebenfalls keine Überschreitungen erkennbar.

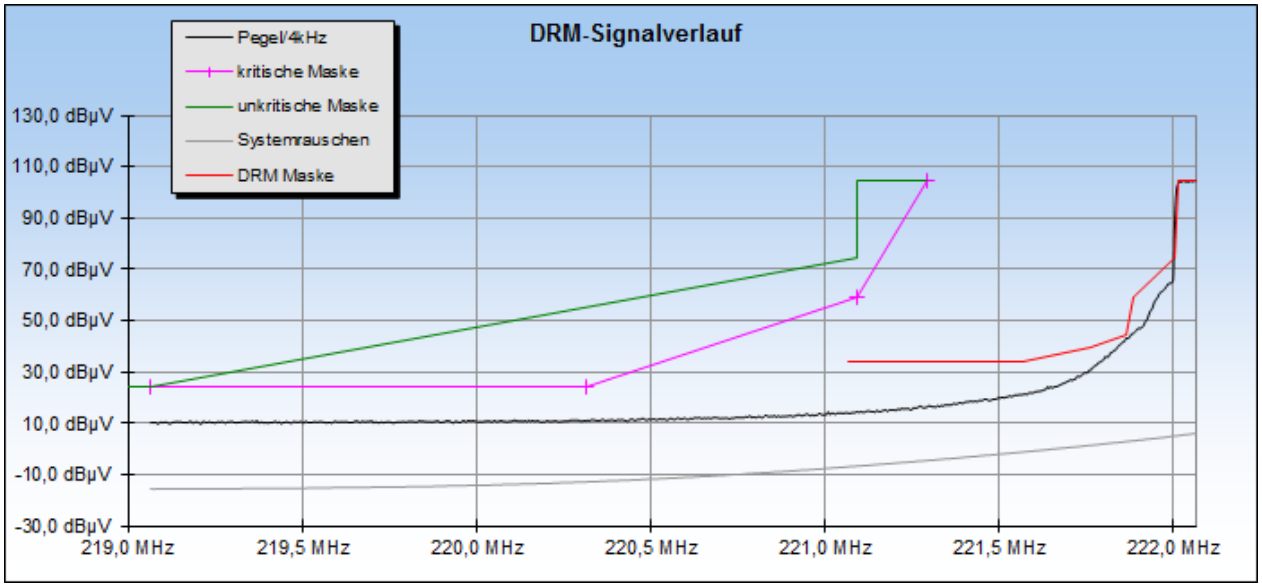


Abbildung 8: DRM-Signalverlauf (unteres Seitenband)

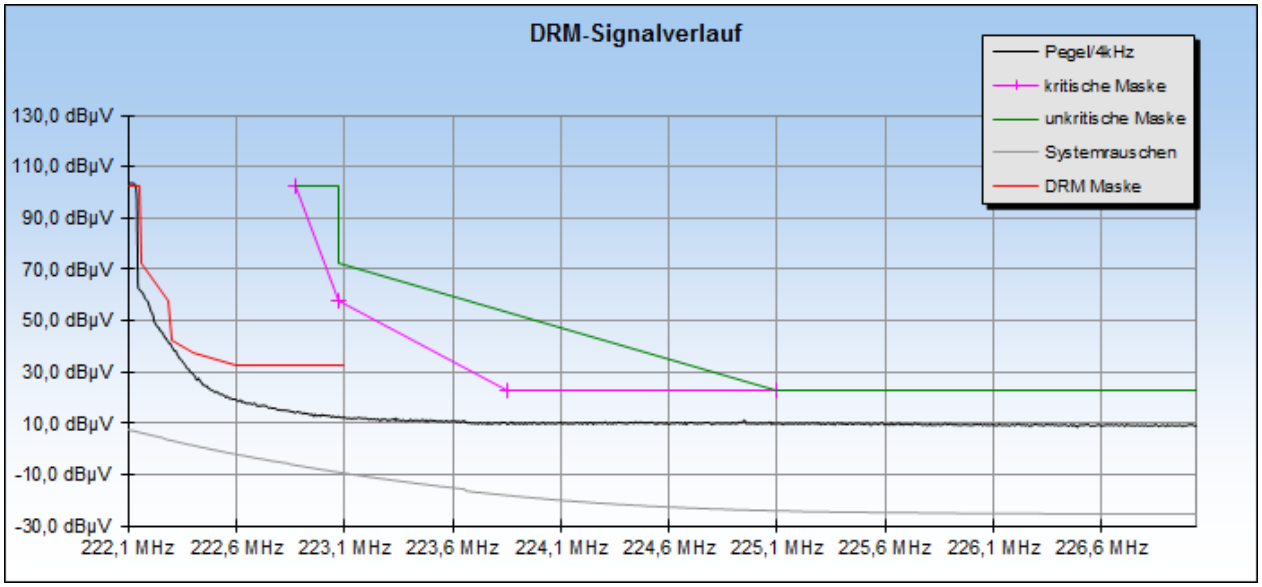


Abbildung 9: DRM-Signalverlauf (oberes Seitenband)

6.3 Sonstiges

Auf den Oberwellen sind Signalanteile aufnehmbar, die die der Größenordnung von bis zu ca. -60 dBc liegen. Dies ist in Abbildung 10 (-60 dBc) und Abbildung 11 (-91 dBc) illustriert. Aussendungen in dieser Art konnten bis zur 5ten Oberwelle (1,11 GHz) aufgenommen werden. Diese unerwünschten Aussendungen sind die Folge einer ständigen Übersteuerung der Endstufe durch die hohen Signalspitzen, welche zu quasi rechteckförmigen Ausgangssignalen führen („Clipping“).
Aus diesem Grunde wurde empfohlen, auf eine Filterung am Senderausgang nicht zu verzichten. Vor Ort wurde durch eine Suche in einschlägigen Katalogen ein Modell gewählt, dass bei ausreichender Güte mit ca. 0.1 dB Einfügedämpfung in den Sendepfad eingeschleift werden könnte.

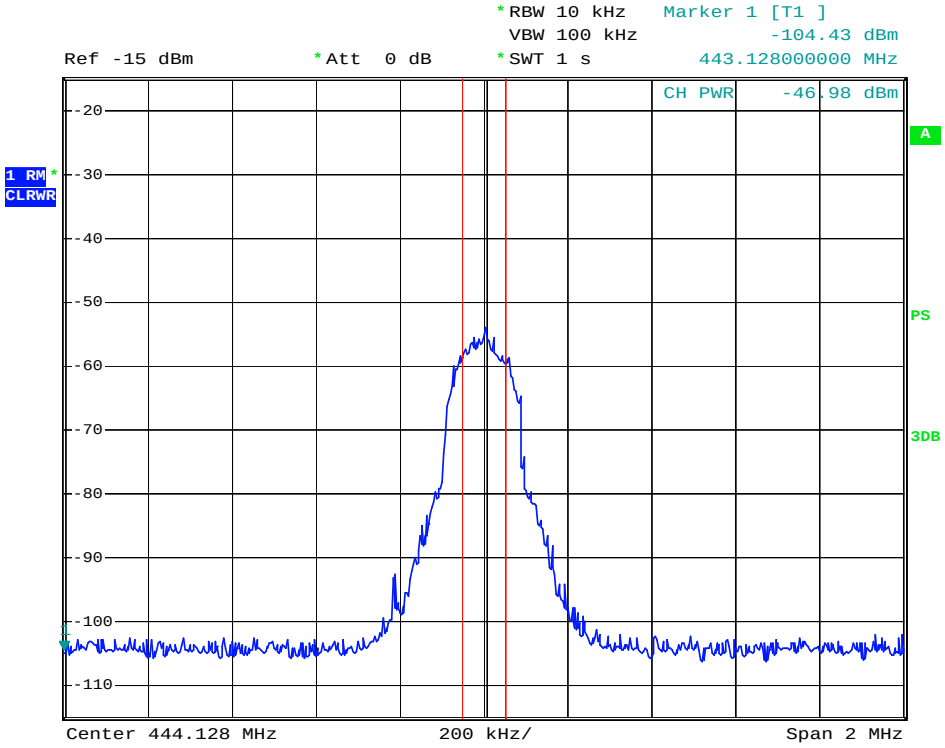


Abbildung 10: erste Oberwelle des DRM-Senders

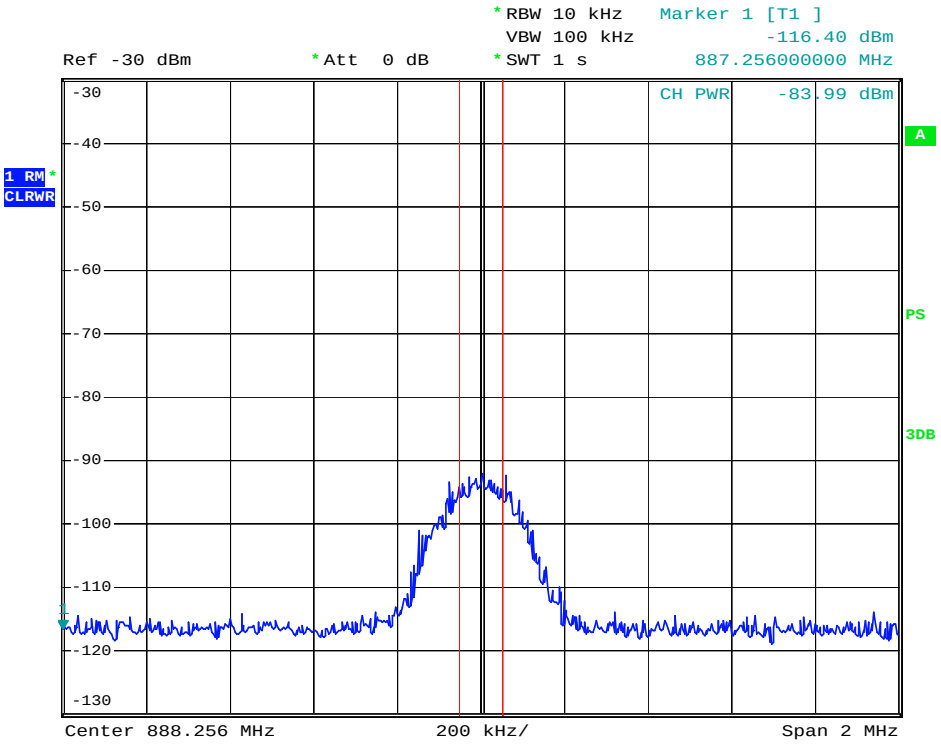


Abbildung 11: zweite Oberwelle des DRM-Senders

7 Beteiligte Personen

Folgende Personen waren an der Messung beteiligt bzw. mitunter aufgrund einer vorhergehenden Besprechung zwischen TU/FH Kaiserslautern und der LMK anwesend:

Name	Organisation
Hr. Schad	BNetzA
Hr. Rosenbaum	TU Kaiserslautern
Hr. Kröger	TU Kaiserslautern
Hr. Steil	FH Kaiserslautern
Hr. Sauer-Greff*	TU Kaiserslautern
Hr. Lehnert*	LMK Rheinland-Pfalz
Hr. Runge*	LMK Rheinland-Pfalz
Hr. Urbansky*	TU Kaiserslautern

Tabelle 9: Liste der anwesenden Personen; die Markierung ‚*' deutet an, dass diese Personen nur kurzzeitig anwesend waren.

8 Liste der verwendeten Messgeräte

Bezeichnung	Inv.Nr.
Messempfänger ESPI 3	11006147
Messempfänger ESVP	06028197
Einstellbares Dämpfungsglied, 6 – 60 dB	16003452
Abstimmbarer Bandpass, 150 – 300 MHz, 1%	05012404
Laptop	16009852
div. Messleitungen	

Felix Schad, TRAm

Quellenverzeichnis

[1] Lehnert, J.; Pagel, D.; Zink, A.: „Überlegungen zum digitalen Umstieg für den lokalen und regionalisierten terrestrischen Hörfunk in Deutschland“, Positionspapier des Deutschen DRM-Forum, Ludwigshafen/Hannover/Erlangen, September 2013

[2] http://www.kanalplus.fm/site/index.php?side=frekvenser.php, August 2014

[3] http://www.bakom.admin.ch/themen/radio_tv/01214/02292/04351/index.html?lang=de, August 2014

[4] Steil, A.; Schad, F.; Köhler, M.: „Summary Report DRM+-field trial Kaiserslautern, Germany VHF-Band III, Trial period: January – May 2010“, Oktober 2011, http://www.drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/feldversuch_2010/report_field-trial_DRMplus_VHF-band-III_2010.pdf, August 2014

[5] Knodt, B.; Schimmele, L.: „Entwicklung und Fertigung eines Multinorm-Empfängers zum Empfang von DRM im Mode E (DRM+) gemeinsam mit DAB+ und UKW-FM und von weiteren Hörfunksystemen“, Kaiserlautern, Januar 2014, http://www.drm-radio-kl.eu/berichte_vortraege/drmplus-hdradio/Bericht_TU_KL-DRMplus_Demonstrator.pdf, August 2014

[6] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): „Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers”, EN 300 401 V1.4.1, Juni 2006

[7] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): „Digital Audio Broadcasting (DAB); Transport of Advanced Audio Coding (AAC) audio”, TS 102 563 V1.2.1, Mai 2010

[8] Rauscher, C.: „Grundlagen der Spektrumanalyse“, 2. Auflage, Rohde & Schwarz, München, 2004

[9] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): „Digital Audio Broadcasting (DAB); Distribution interfaces; Digital baseband In-phase and Quadrature (DIQ) interface“, EN 300 798 V1.1.1, März 1998

[10] Steil, A; Schad, F.; Feilen, M.; Kohler, M.; Lehnert, J.; Hedrich, E.; Kilian, G.: „Digitising VHF FM sound broadcasting with DRM+ (DRM mode E)“, Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB '09, 2009

[11] International Telecommunication Union (ITU-R): “Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band”, Recommendation ITU-R BS.1660-6, August 2012