

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

**Vorläufiger Abschlussbericht  
vom 30. Juni 2014**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. KONZEPT</b> .....	<b>6</b>
1.1. PROJEKTZIEL .....	6
1.2. KONZEPTION .....	6
1.3. VORGABEN FÜR DAS GERÄT .....	9
<b>2. SYSTEMBESCHREIBUNG</b> .....	<b>11</b>
2.1. HARDWAREKOMPONENTEN .....	11
2.1.1. MULTIPLEXGENERATOR .....	11
2.1.2. VHF-SENDEEINHEIT .....	14
2.2. SOFTWARE .....	17
2.2.1. BETRIEBSSYSTEM .....	17
2.2.2. AUDIOSOFTWARE .....	18
2.2.3. DAB-SOFTWARE .....	20
2.2.4. DRM+-SOFTWARE: SPARK+ .....	21
2.2.5. CDM20830 .....	21
2.2.6. SOFTWAREAUFBAU .....	22
2.3. AUFBAU .....	24
2.3.1. MULTIPLEXGENERATOR .....	24
2.3.2. VHF-SENDEEINHEIT .....	26
2.4. SCHNITTSTELLEN .....	27
2.4.1. AUDIOSCHNITTSTELLE .....	27
2.4.2. DATENSCHNITTSTELLE .....	29
2.4.3. KONFIGURATIONSSCHNITTSTELLE .....	29
2.4.4. SCHNITTSTELLE ZWISCHEN MULTIPLEXGENERATOR UND VHF-SENDEEINHEIT .....	30
2.4.5. SENDERAUSGANG .....	30
2.5. BENUTZERBEREICH .....	30
2.5.1. AUDIOSOFTWARE .....	30
2.5.2. STEUERUNG DER ODR-MMBTOOLS MITTELS SKRIPT .....	30
<b>3. LABORUNTERSUCHUNGEN</b> .....	<b>38</b>
3.1. KONZEPT .....	39
3.2. MESSHARDWARE .....	40
3.2.1. DAB-SCOUT 2 .....	40
3.2.2. SDB601 .....	40

3.2.3.	FHG CONTENTSERVER.....	40
3.2.4.	ETL .....	40
3.2.5.	SMBV 100A .....	40
3.2.6.	SMU 200A .....	40
3.2.7.	FSV 7 .....	40
3.2.8.	FSP 30 .....	41
<b>3.3.</b>	<b>MESSUNGEN .....</b>	<b>42</b>
3.3.1.	MULTIPLEXGENERATOR .....	42
3.3.2.	VHF-SENDEEINHEIT .....	44
3.3.3.	MULTIPLEXGENERATOR UND VHF-SENDEEINHEIT .....	56
<b>4.</b>	<b>BEWERTUNG.....</b>	<b>76</b>
4.1.	ERFÜLLUNG DER VORGABEN .....	76
4.2.	KOSTEN .....	79
4.3.	PROBEABSTRAHLUNG UND GESAMTSYSTEMTEST .....	79
4.4.	VORLÄUFIGES FAZIT .....	80

## Vorwort

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. Für lokale Rundfunkbetreiber oder für Veranstaltungsrundfunk erscheint DAB jedoch nicht optimal, da die geringe Programmzahl im lokalen Verbreitungsgebiet in keinem Verhältnis zu den hohen Kosten des kommerziell verfügbaren DAB-Sendeequipments steht. 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 [1] und der Schweiz [2] mit der lokalen Ausstrahlung von DAB und erfolgreichen Testausstrahlungen mit DRM+ führten zu der Zielsetzung, aus verfügbarer Standardhardware und OpenSource-Software einen Standard-konformen portablen Hörfunksender für DAB zu entwickeln, der leicht auf weitere Rundfunksysteme wie DRM+ zu erweitern ist. Dabei soll nicht nur das Minimalziel einer funktionalen Hörfunkaussendung erreicht werden. 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.

Daher soll zum einen ein portabler und kostengünstiger DAB-Sender für die lokale Versorgung und für Veranstaltungsrundfunk realisiert 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 ein DRM+-Sender als Demonstrator implementiert werden.

Diese Arbeit wird als Kooperationsprojekt der TU Kaiserslautern, der Landeszentrale für Medien und Kommunikation Rheinland-Pfalz sowie der FH Kaiserslautern umgesetzt. Unterstützt werden die Projektpartner dabei von Rohde & Schwarz, dem Institut für Rundfunktechnik, dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, 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 beläuft 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 29.08.14

Der vorläufige Abschlussbericht zu diesem Projekt gliedert sich in die folgenden vier 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 funktions-technischen Überprüfung des Demonstrators hinsichtlich einschlägiger Normen und Empfehlungen. Die Ergebnisse der entsprechenden Laboruntersuchungen werden vorgestellt und diskutiert.

**Kapitel 4** fasst die Ergebnisse des Projekts zusammen und gibt eine Bewertung des realisierten Demonstrators.

## 1. Konzept

Ausgehend von den Projektvorgaben wird in diesem Kapitel die Konzeption des portablen Senders für Digitalradio 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-Sendeinheit 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-Sendeinheit) sollen in transportablen Einheiten eingebaut werden, um eine Inbetriebnahme für eine Hörfunkausstrahlung an verschiedenen Orten bei besonderen Veranstaltungen zu ermöglichen.

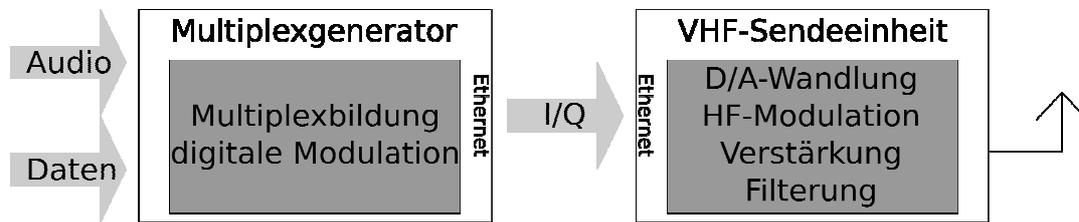
Der Multiplexgenerator für DAB soll auf Basis von verfügbarer OpenSource-Software (mmbTools der CRC in Kanada, die bereits von nichtkommerziellen Radios in Dänemark und künftig auch in der Schweiz eingesetzt werden) realisiert werden, der die Multiplex-Signale an eine kompakten VHF-Sendeinheit mit Signalgenerator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

### 1.2. 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, vielmehr ist es vorteilhafter, das Funksignal mit großer Antennenhöhe abzustrahlen, um das Empfangsgebiet möglichst flächendeckend versorgen zu können. Um jedoch die Verluste im Antennenkabel gering zu halten, sollte der Leistungsverstärker möglichst nahe an der Antenne platziert sein. Dies wäre beispielsweise das Dach eines hohen Gebäudes. Nun ist es aber nicht praktikabel, das gesamte Rundfunkstudio im Dachgeschoss dieses Gebäudes aufzubauen. Deshalb wird der DAB-Sender auf zwei separate Gehäuse verteilt, den Multiplexgenerator und die VHF-Sendeinheit.

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-Sendeinheit die Hardware zur Erzeugung der analogen Basisbandsignale und deren Hochmischen in den Sendefrequenz-

bereich sowie die Leistungsverstärkung beinhaltet. Die Übergabe der Basisbandsamples an die VHF-Sendeeinheit erfolgt über Gigabit-Ethernet, was eine robuste und zuverlässige Signalübertragung gewährleistet.



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

Diese Unterteilung in zwei unterschiedliche Funktionseinheiten ermöglicht, wie in Bild 1 dargestellt, die räumliche Trennung von Radiostation und Leistungsverstärker, sodass die VHF-Sendeeinheit beispielsweise im Dachgeschoss stehen könnte, wohingegen der Multiplexgenerator im Rundfunkstudio oder in einem Zelt direkt am Ort des Geschehens positioniert sein könnte.

Der Einsatz des Senders zur Digitalradioversorgung 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 auch Server in diesem Format verfügbar.

Kernstück des Multiplexgenerators soll ein Server im 19-Zoll-Format sein, auf dem ein Linux-Betriebssystem installiert ist. Diese Software ist OpenSource und kann daher kostenfrei verwendet werden. Sie übernimmt 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“-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. Das verwendete Modell 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“, und diese Variante hätte keine weiteren Vor-

teile gegenüber dem direkten Anschluss eines „USRP“ an den Server mit „ODR-DabMod“-Software über Ethernet.

Das HF-Ausgangssignal des „USRP“ wird von einem Leistungsverstärker verstärkt und durch ein Stehwellenmessgerät zur Kontrolle der Impedanzanpassung geleitet. Die Erweiterung des Systems um einen anderen Hörfunkstandard erfordert eine zweite VHF-Sendeeinheit. Alternativ kann die zusätzliche Hardware auch in das selbe Gehäuse integriert werden. In beiden Fällen wird nur eine Ethernetverbindung zwischen Multiplexgenerator und VHF-Sendeeinheit/en, denn ein Sendeeinheit-seitiger Ethernet-Switch ermöglicht das Anschließen weiterer Komponenten. 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. Dieses hat die Einhaltung der jeweiligen Spektralmaske zu gewährleisten.

Eine über das Antennenkabel angeschlossene Groundplane-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.

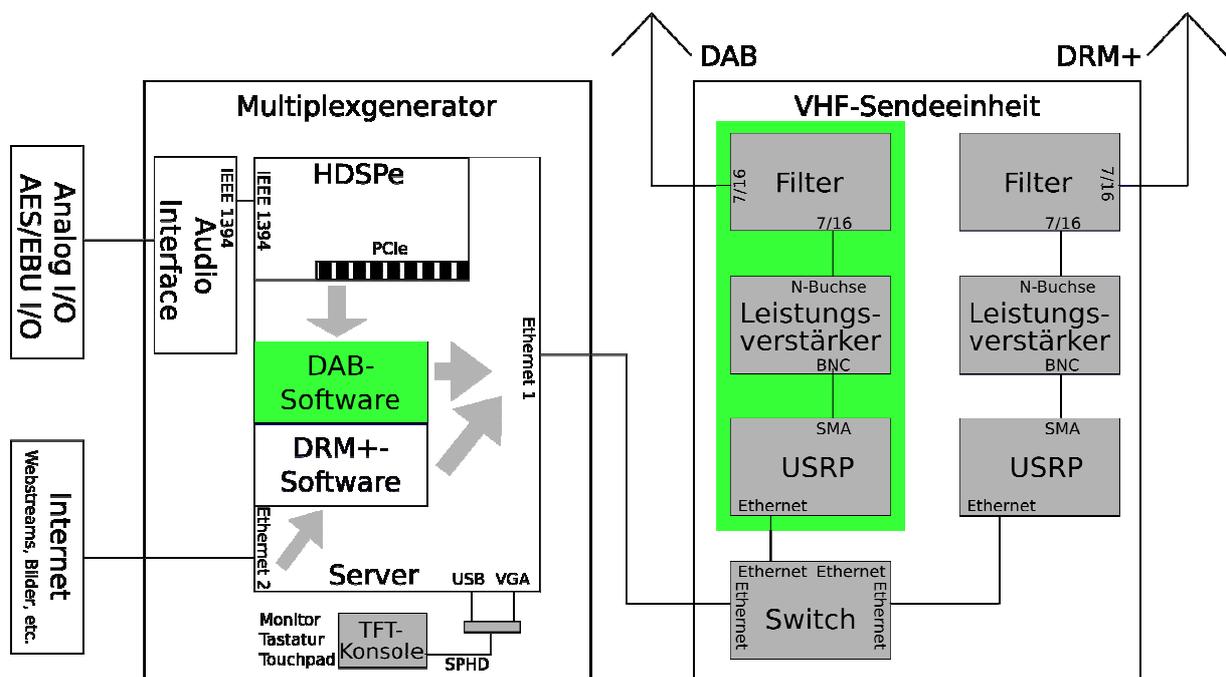


Bild 2: Konzept des Aufbaus

### 1.3. Vorgaben für das Gerät

Aus dem im letzten Abschnitt erläuterten Konzept des transportablen DAB-Senders für die lokale Versorgung leiten sich folgende Vorgaben an das Gerät ab. Diese gliedern sich 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 Bedieneingaben 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.

## 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 sind 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 Thon 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 Höheneinheit und ist mit einer Einbautiefe von 30 cm sehr kurz. Dadurch kann ein verfügbares Flightcase verwendet werden und es muss nicht als Einzelstück gefertigt 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 2 128 GB SSDs. 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 8 Stereo Eingangskanäle bereitstellen. Diese sollen analog und digital gemäß AES/EBU ausgeführt sein. Diese Anforderung wird von 2 Teilinterfaces sowie einer PCI-Express-Steckkarte erfüllt. Die Aufteilung in 2 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, sind 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 4 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 2 Stereo Ein- und Ausgänge bei 96 kHz, oder 4 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 4 Stereo AES/EBU Ein- und Ausgänge in 4 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 2 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 2 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 Kundenwunsch 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 8 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 soll ein „Universal Software Radio Peripheral“ (kurz USRP) genutzt werden. 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 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 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.

Preis: 925,00 €



Bild 12: USRP B100

#### 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 analog Verstärker 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.

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

Preis: 539,99 €



Bild 13: PCS Verstärker

#### 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

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 Frequenzuteilung 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 sechs-kreisiges 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 / 100m 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 Sendeeinfrastruktur 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  $\lambda/2$  Dipol, hat 0 dBd Antennengewinn und ist 126 cm lang. Diese Antenne ist für den Frequenzbereich von 223 – 240 MHz ausgelegt und daher im gesamten VHF Band III nur eingeschränkt 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.

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 sind. 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 Benutzeroberfläche 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 auch 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. Hier wird er 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, hier seien die 4 wichtigsten genannt: 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.

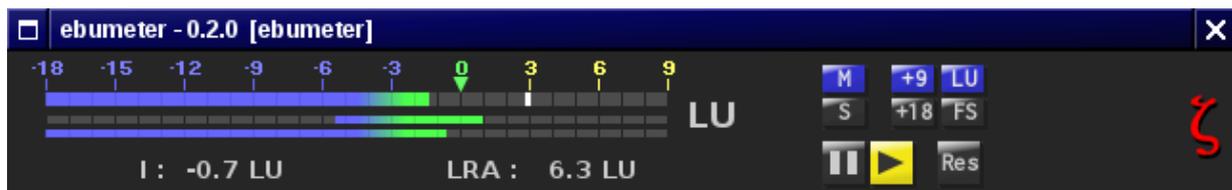


Bild 19: ebumeter

### 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 mittel „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

Nun folgt die Beschreibung der Software, die für die Erzeugung eines DAB-Signals notwendig ist.

#### 2.2.3.1. Quellcodierung

Der DAB-Standard sieht zwei unterschiedliche Verfahren zur Quellcodierung der Audiodaten vor. Zum Einen ist dies ein nach dem Standard „MPEG 1 Layer 2“ (Musicam) „DAB klassisch“ (ETSI EN 300 401), zum Anderen ein nach Standard „MPEG 4 Part 3“ (AAC) codierter Audiodatenstrom „DAB+“ (ETSI TS 102 563). Da verschiedene Implementierungen dieser Standards existieren, ergibt sich die Möglichkeit verschiedene Encoder, eventuell auch ergänzend, zu verwenden. Im Folgenden werden die 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 Kosten 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“, das für die AAC-Kodierung genutzt werden kann.

Die Lizenzlage für den AAC-Codec ist unklar. Bei der Nutzung dieses Codecs können Lizenzgebühren anfallen.

### **2.2.3.2. DAB Multiplexer: 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“. Als Eingangsdaten lassen sich je nach gewünschtem Dienst verschiedene übergeben:

Audio (DAB klassisch oder DAB+)

Data Service (z.B. für MOT-Slideshow)

Packet Service

Enhanced Packet Service

DMB Service

Diese Eingangsdatenströme werden in einen Multiplex gebündelt und als standardisierten „Ensemble Transport Interface“-, kurz ETI-kompatiblen Datenstrom 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. Die Bedienung des Programms erfolgt über die Befehlszeile bzw. einem 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, Gain zum Betrieb an den USRP.

### **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 Audiocodex 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 Steuerungssoftware 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 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.

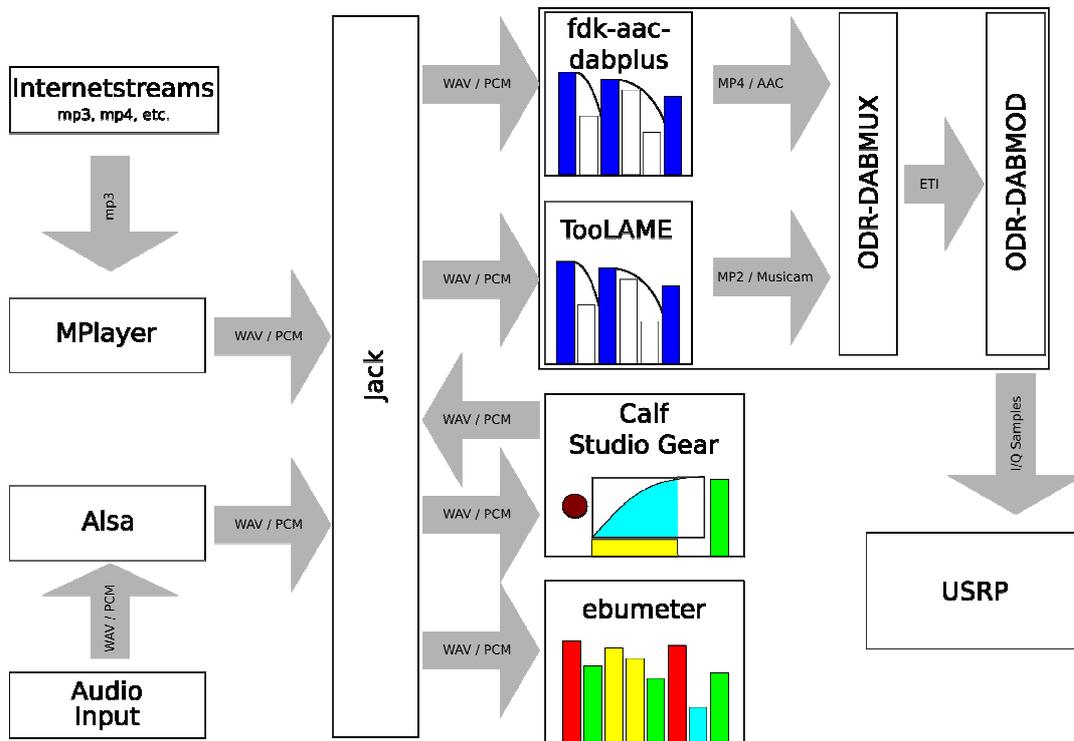


Bild 21: Signalfluss in der Software bei DAB-Betrieb

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

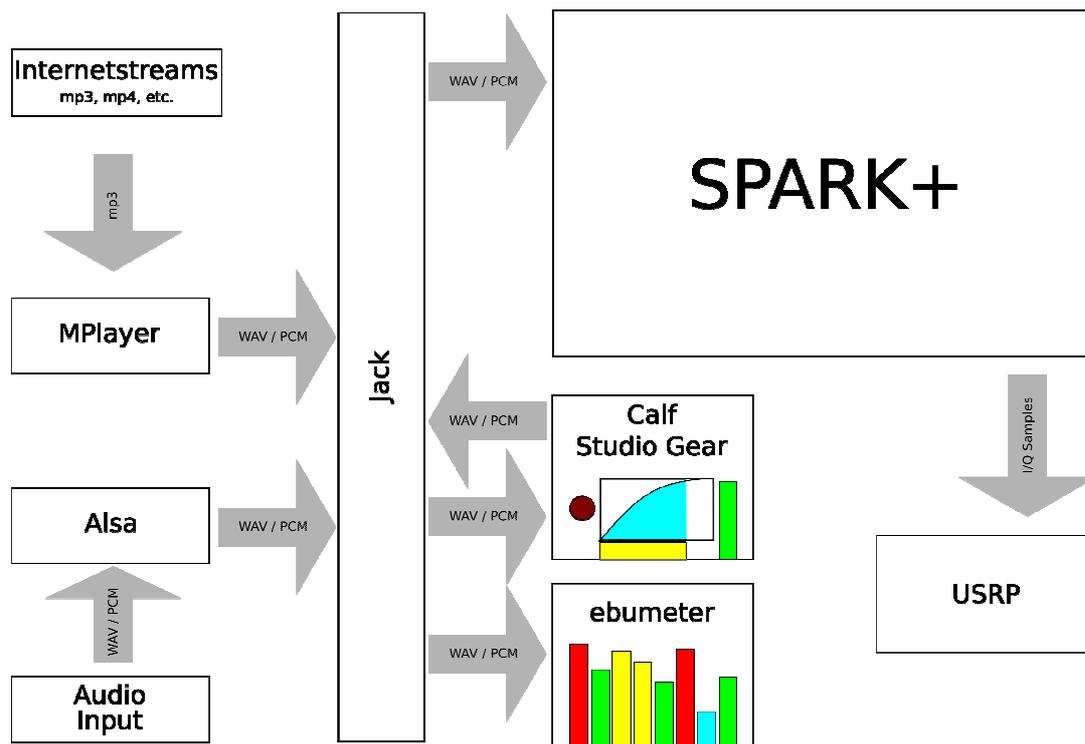


Bild 22: Signalfluss in der Software bei DRM(+)-Betrieb

## 2.3. Aufbau

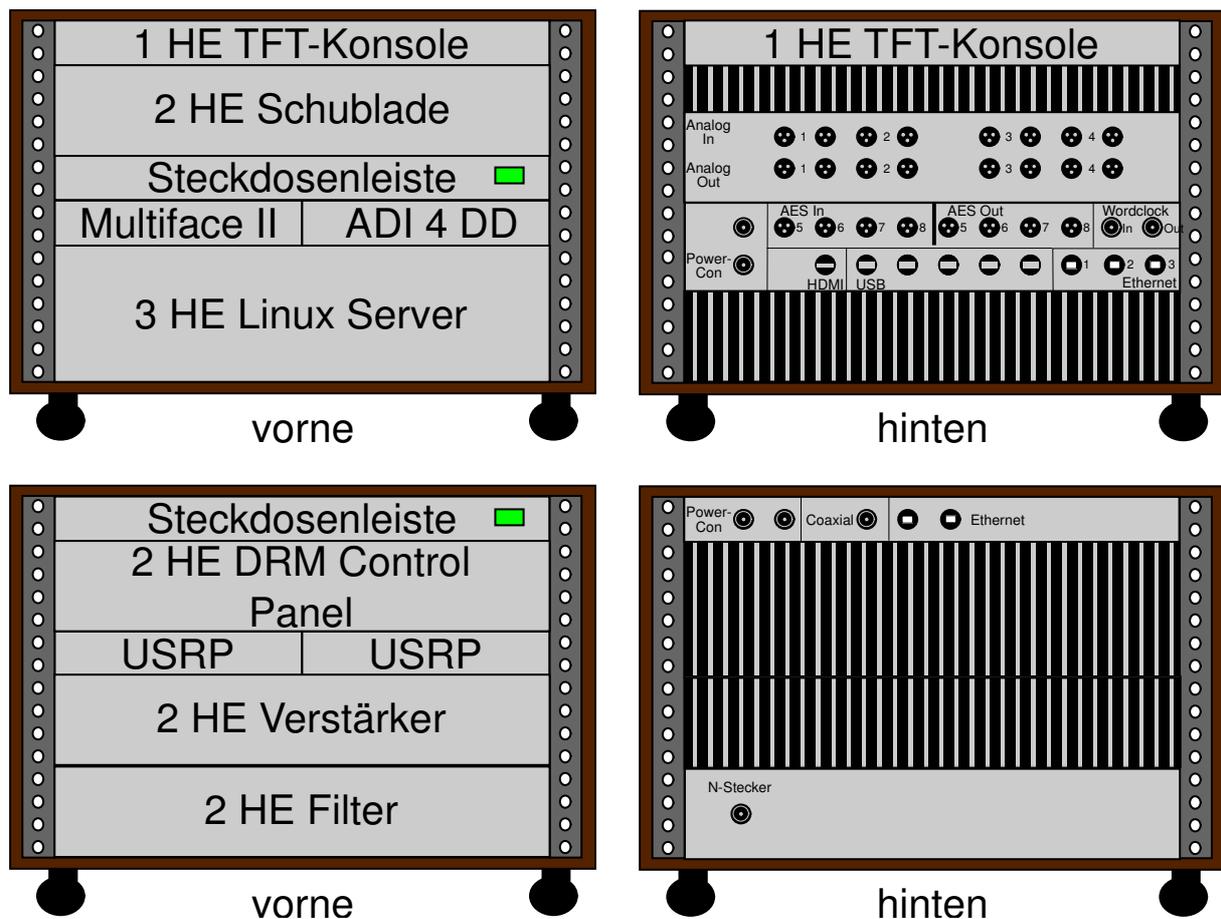


Bild 23: Multiplexgenerator (oben) und VHF-Sendeeinheit (unten)

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 vierte 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 2 zeigt noch einmal den Aufbau von Multiplexgenerator sowie VHF-Sendeeinheit und verdeutlicht, dass die Signalwege von DAB und DRM+ in der VHF-Sendeeinheit getrennt sind.

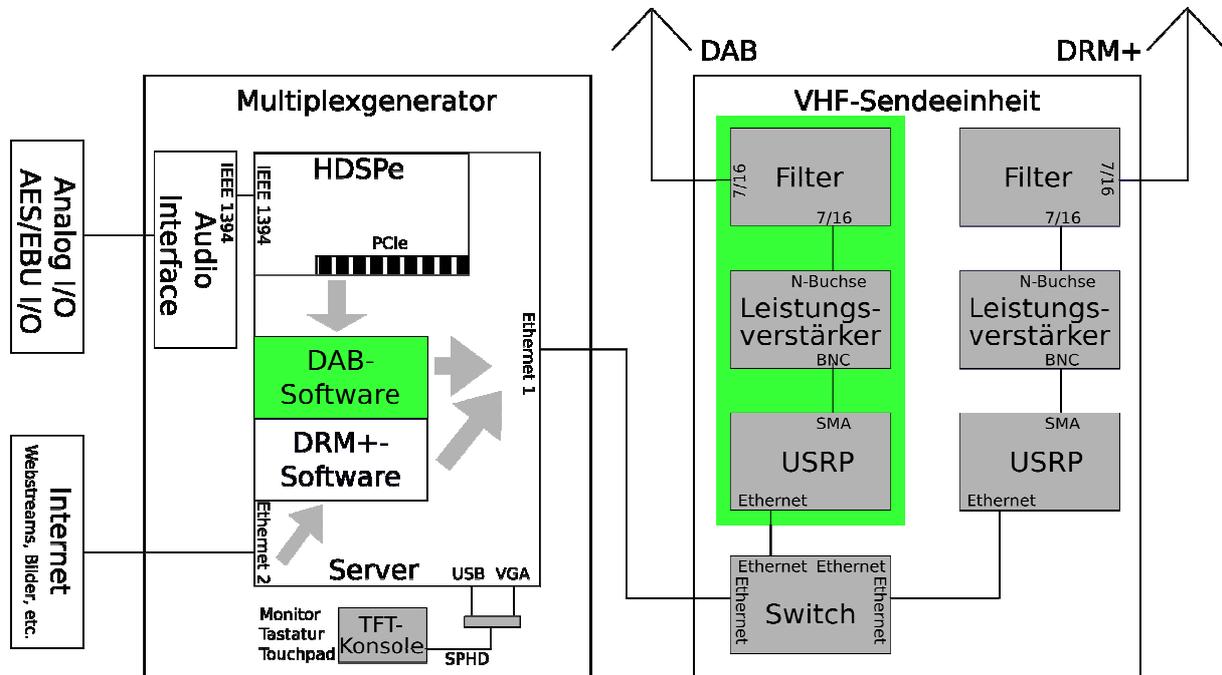


Bild 2: Konzept des Aufbaus

Das Verstärker-Rack ist 8 HE hoch sowie 95 cm lang und beinhaltet alle notwendigen Geräte zur Erzeugung und Verstärkung der HF-Signale (Bild 26).

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 8 Schutzkontaktsteckdosen bereitstellt.

Auf der Rückseite des Verstärker-Racks (Bild 27) befindet sich in den unteren beiden HE eine Frontplatte, in die auf der linken Seite eine N-Buchse zum Anschluss der Antenne 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 10W-Leistungsverstärker für DRM(+) auf dem Lüftermodul sowie das Netzteil für den Verstärker montiert.

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

Auf dem rückseitigen Boden des Racks sind ein „Raspberry Pi“ Kleincomputer, der Steuerungssignale des Multiplexgenerators an den 100W Verstärker via Ethernet weiterleitet, sowie eine Netzwerkschicht montiert.



Bild 26: VHF-Sendeeinheit Frontansicht



Bild 27: 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 24 dargestellt.

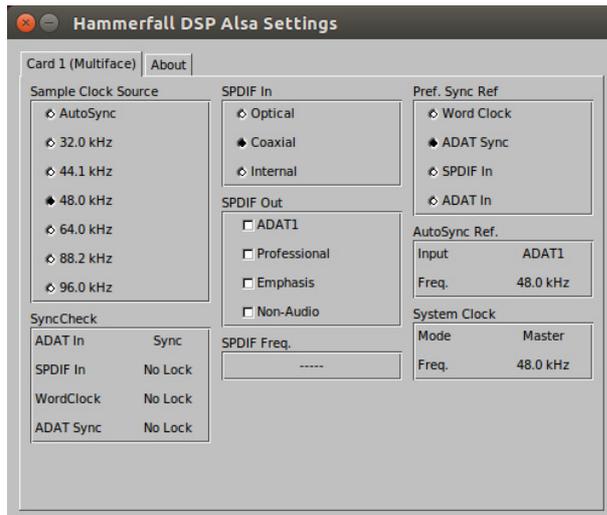


Bild 28: HDSPConf - Einstellungen des HDSPe

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



Bild 29: Statusfenster von „QjackCtl“

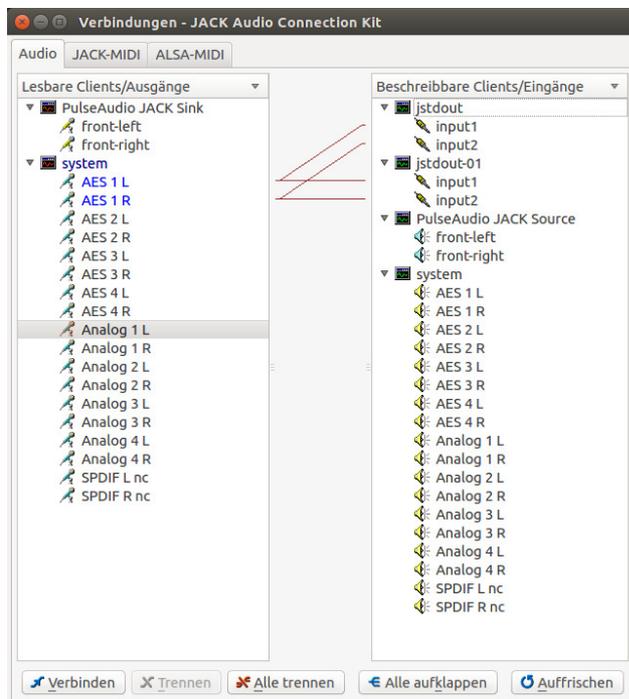


Bild 30: Verbindungsfenster von „QjackCtl“

Die Audioschnittstellen in „QjackCtl“ (Bild 29, Bild 30) 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 herausgeführt)	playback_17	SPDIF 1 L (nicht herausgeführt)
capture_18	SPDIF 1 R (nicht herausgeführt)	playback_18	SPDIF 1 R (nicht herausgeführt)

### 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 neuer 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 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 Lastwiderstand (Impedanz von 50 Ohm) unter Beachtung der zulässigen HF-Leistung betrieben werden.

### **2.5. Benutzeroberfläche**

Eine einheitliche grafische Benutzeroberfläche (GUI) gibt es zur Zeit 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 Audiotbearbeitung 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) setzen. 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 werden mit einem Shell-Skript angesprochen und in der passenden Reihenfolge mit den richtigen Parametern ausgeführt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden das Skript in zwei Teile aufgeteilt. Das erste Skript sorgt für die Entgegennahme und das Einbinden Audiodatenströmen wie Internetstreams oder auf dem Multiplexgenerator abgelegte Playlists.

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.

**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=jstddout-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 benutzen kann. Mit dem Parameter „name“ kann ein nachvollziehbarer Name vergeben werden (hier nicht genutzt).

In Zeile 25 werden die sich im untergeordneten Ordner „./audio“ befindenden Audiodateien abgespielt. Sollten diese Dateien alle abgespielt worden sein, 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 in der Dokumentation der entsprechenden Software zu finden.

**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, modulator and wave player
23
24 odr-dabmux -e radioEIT.mux | odr-dabmod -C dabmod.ini
25
26 wait
```

In Zeile 5 werden sich 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 „radioEIT.mux“ (Tabelle 5) und der Modulator mit dem Configfile „dabmod.ini“ (Tabelle 6) gestartet.

Weitere Informationen sind auch hier in der Dokumentation der entsprechenden Software verfügbar.

### 2.5.2.2. Konfigurationsdateien

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

#### 2.5.2.2.1. ODR-DabMux Configfile

Alle Parameter für den Multiplex-Aufbau werden in einem Configfile gesetzt. Im Folgenden wird die Datei für den Multiplex von „RadioEIT“ beschrieben, 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 fields 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
```

# Entwicklung und Fertigung eines digitalen Hörfunksenders als Demonstrator zur Ausstrahlung von DAB und DRM+ im VHF-Band III

---

```
; Enable timestamp definition necessary for SFN
; This also enables time encoding using the MNSC.
tst 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 its 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"  
}
```

Alle wichtigen Parameter sind durch Kommentare (gekennzeichnet durch vorangestelltes Semikolon) beschrieben.

Weitere Informationen sind auf „[http://www.opendigitalradio.org/index.php/Main\\_Page](http://www.opendigitalradio.org/index.php/Main_Page)“ sowie „<https://github.com/Opendigitalradio>“ verfügbar.

### 2.5.2.2.2. ODR-DabMod Configfile

Alle Parameter für den Modulator werden in dem Configfile „dabmod.ini“ gesetzt. Im Folgenden ist 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 receiving 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
```

Alle wichtigen Parameter sind durch Kommentare (gekennzeichnet durch vorangestelltes Semikolon) beschrieben.

Weitere Informationen sind auf „[http://www.opendigitalradio.org/index.php/Main\\_Page](http://www.opendigitalradio.org/index.php/Main_Page)“ sowie „<https://github.com/Opendigitalradio>“ verfügbar.

### 3. Laboruntersuchungen

In dem nun folgenden Kapitel sollen nun die einzelnen Komponenten alleine und als Gesamtsystem darauf überprüft werden, 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.

In diesem Kapitel wird zunächst 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-Spektrumsmasken 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 Nachbar kanal 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 einzuladen 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-Ausgangssignal 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.

Die rundfunkssystembezogenen 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“ von Rohde & Schwarz ist ein Exciter 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 Zusatzdienstleistungen 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 Analyzer, der hauptsächlich für die Analyse von analoge und digitale TV-Signalen entwickelt wurde. Er verfügte jedoch auch über die Möglichkeit, DAB-Signale zu überprüfen. Dies ermöglicht die tiefere Betrachtung der Signale, als es durch gewöhnliche Spektrumanalysatoren möglich ist.

### **3.2.5. SMBV 100A**

Der „SMBV 100A“ von Rohde & Schwarz ist ein Vektorsignalgenerator. 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 Analyzer intern erzeugten IP3-Verzerrungsprodukte nicht wie erwartet schwächer, sondern zunächst stärker.

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

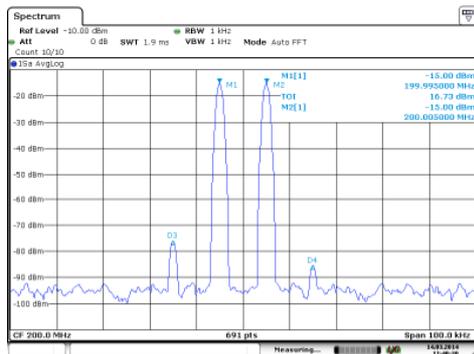


Bild 31: FSV 0 dB Eingangsdämpfung

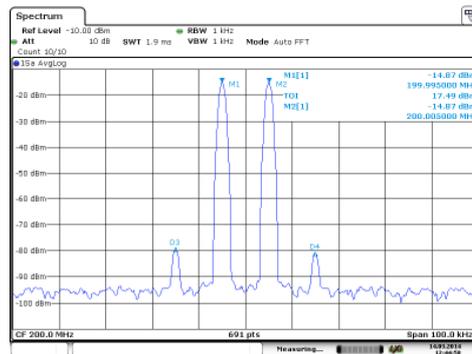


Bild 32: 10 dB Eingangsdämpfung

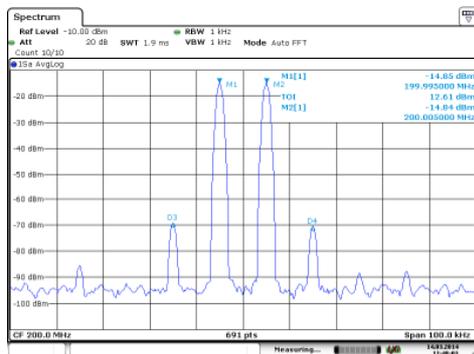


Bild 33: FSV 20 dB Eingangsdämpfung

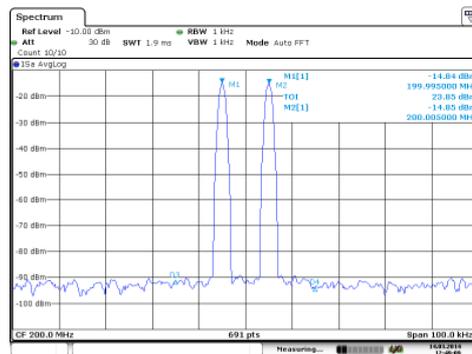


Bild 34: FSV 30 dB Eingangsdämpfung

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 Analyzern, 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 angesteuert 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 Codexs bei verschiedenen Bitraten

Zur Bewertung der Audioqualität der beiden Quellencoder („Toolame“, „fdk-aac-dabplus“) werden unterschiedliche Testdateien mit beiden Encodern in verschiedenen Bitraten codiert. Diese Dateien werden dann auf einem hochwertigen Audiosystem standardkonform dekodiert und miteinander und dem unkomprimierten Ausgangsmaterial verglichen. Dabei werden je eine Aufnahme von klassischer, Pop- sowie Rockmusik verwendet. Als D/A-Wandler wird ein „Orpheus“ von „Prismsound“ genutzt und als Abhörmonitore kommt ein Paar „MSC1“ von „Manger“ zum Einsatz. Die Hörversuche werden 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 [3] 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 beeinträchtigen 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.
- Hohe Bitraten ermöglichen sehr gute Audioqualität. Codierartefakte sind nun unhörbar und die Rauheit ist aus dem Signal verschwunden. Die Musik klingt klar und die Räum-

lichkeit 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 solchen besseren Codec in den Multiplexgenerator integrieren zu können.

### 3.3.1.3. DAB-Scout Multiplex-Aufbau

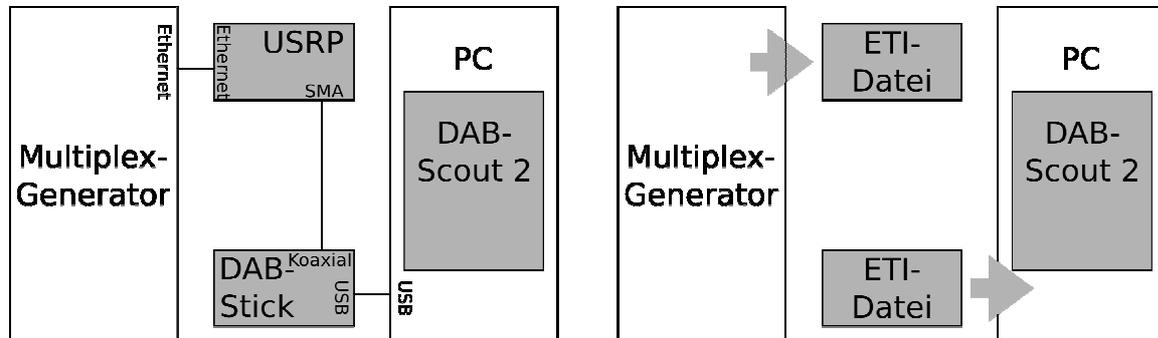


Bild 35: Überprüfen des Ausgangsdatenstroms, Empfang mittels DAB-Stick (links) und über aufgezeichnete ETI – Datei (rechts)

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 35). 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.

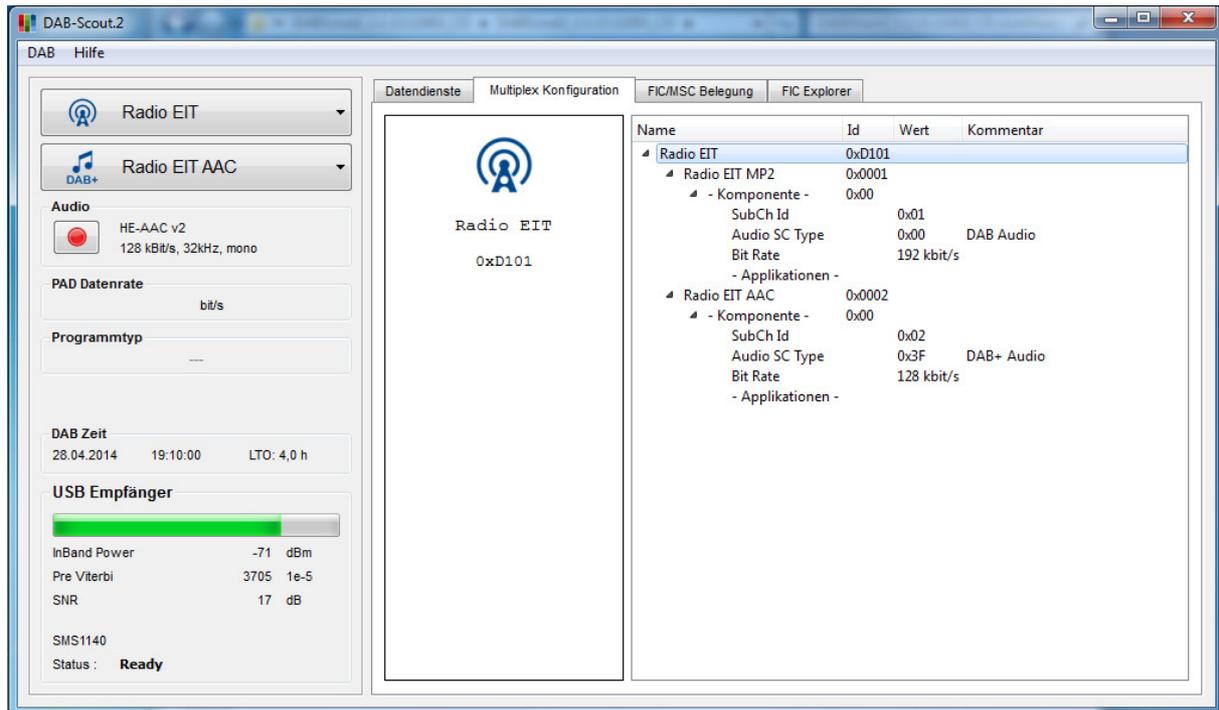


Bild 36: Multiplexaufbau DAB-Scout.2

Der „DAB-Scout.2“ zeigt die beiden Services des Multiplex und andere Daten an (siehe Bild 36). 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 Contentserver 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 Spektrumanalyzer 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 2.2.5 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 verfügbar, sodass die Nichtlinearitätsmessungen für 100W Ausgangsleistung nicht wieder-

holt werden konnte. Diese Messwerte beziehen sich wie angegeben auf 120 W Ausgangsleistung.

### 3.3.2.1. 1 dB – Kompressionspunkt

#### 3.3.2.1.1. Theoretische Vorüberlegungen [4]

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:

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

mit  $u_a(t)$  Spannung am Ausgang des Systems

$u_e(t)$  Spannung am Eingang des Systems

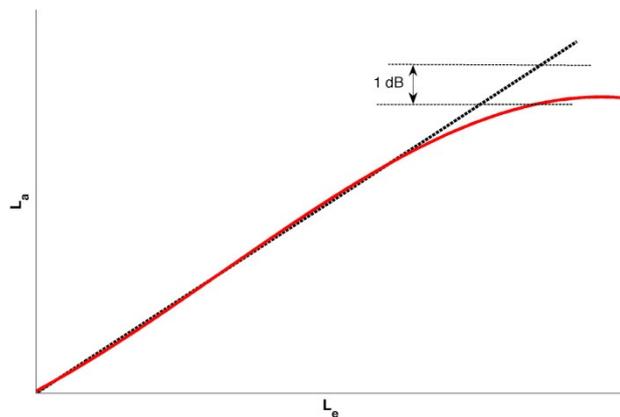
$a_n$  Koeffizient des jeweiligen nichtlinearen Elements der Spannungsverstärkung

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.

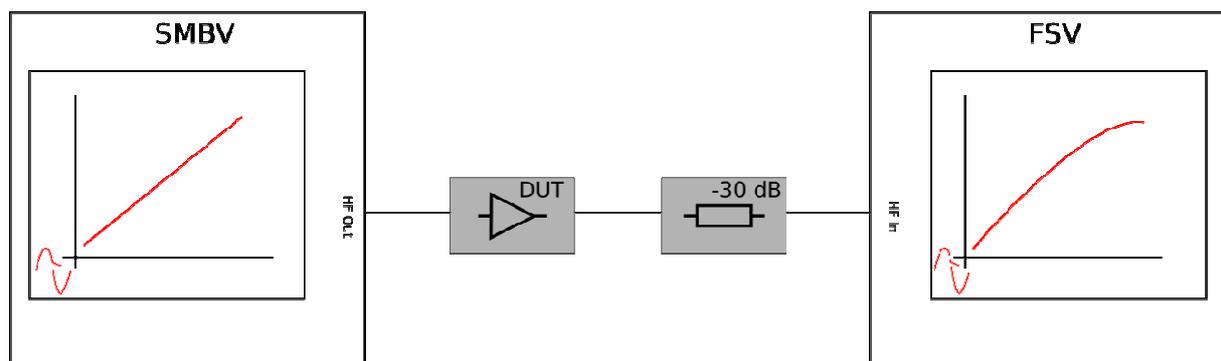
Der 1 dB-Kompressionspunkt eines Systems markiert nun den Punkt seines Aussteuerbereichs, an dem seine Verstärkung aufgrund von Sättigung um 1 dB zurückgeht (siehe Bild 37). Der 1 dB-Kompressionspunkt kann sowohl auf den Eingangspegel als auch auf den Ausgangspegel bezogen werden. Bei Leistungsverstärkern gibt man meist den Ausgangspegel an, bei dem die 1 dB-Kompression eintritt.



**Bild 37: 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 [5]



**Bild 38: Messung des 1 dB - Kompressionspunkt**

Um den 1 dB-Kompressionspunkt des HF-Verstärkers zu ermitteln, wird wie in Bild 38 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  $-6dBm \pm 3 dB$ . 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.

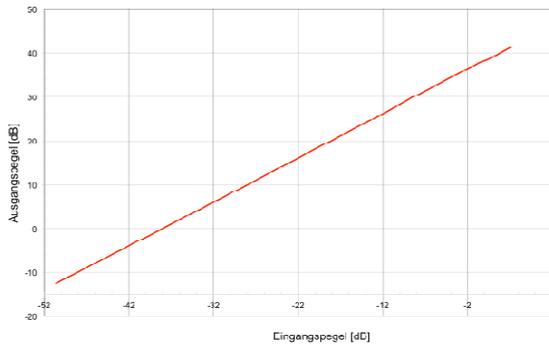


Bild 39: Kennlinie PCS

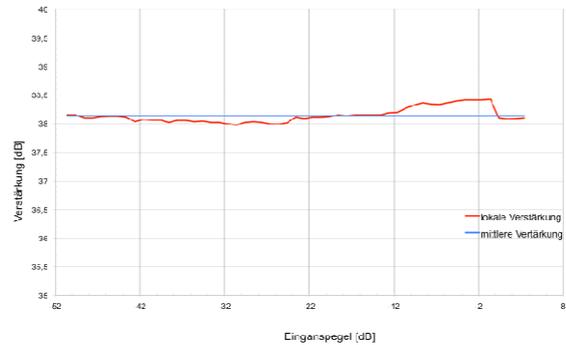


Bild 40: Verstärkung PCS

Der „Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier“ weist eine sehr lineare Kennlinie auf (siehe Bild 39). Mit einer Abweichung um nur  $\pm 0,25$  dB von der mittleren Verstärkung von  $38,14$  dB über den gesamten Arbeitsbereich schwankt diese nur sehr begrenzt (Bild 40).

### 3.3.2.2. Intercept – Punkt 3. Ordnung

#### 3.3.2.2.1. Theoretische Vorüberlegungen [4]

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

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

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

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

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

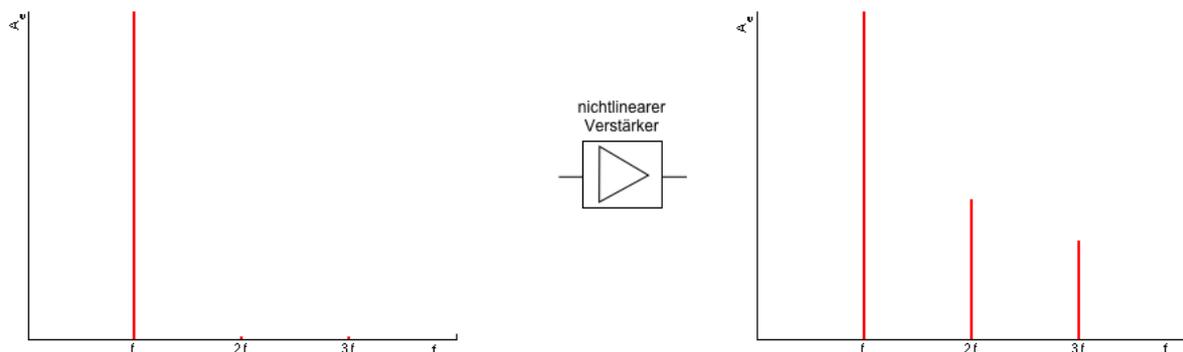
$$\begin{aligned} u_a(t) &= a_1 \cdot u_e(t) + a_2 \cdot u_e^2(t) + a_3 \cdot u_e^3(t) \\ &= a_1 \cdot \hat{U}_e \cdot \sin(2\pi f_{e,1} \cdot t) + a_2 \cdot \hat{U}_e^2 \cdot \sin^2(2\pi f_{e,1} \cdot t) + a_3 \cdot \hat{U}_e^3 \cdot \sin^3(2\pi f_{e,1} \cdot t) \\ &= a_1 \cdot \hat{U}_e \cdot \sin(2\pi f_{e,1} \cdot t) + a_2 \cdot \hat{U}_e^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos(2 \cdot 2\pi f_{e,1} \cdot t)) \\ &+ a_3 \cdot \hat{U}_e^3 \cdot \frac{1}{4} (3 \sin(2\pi f_{e,1} \cdot t) + \sin(3 \cdot 2\pi f_{e,1} \cdot t)) \quad (4) \end{aligned}$$

Der durch die geraden Exponenten auftretende Gleichanteil kann wegen der bei Verstärkern üblichen Gleichanteilsunterdrückung vernachlässigt werden. Die Pegel der Spektrallinien ergeben sich zu

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

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

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



**Bild 41: Spektrum vor und nach einem nichtlinearen System**

Es ist in Bild 41 zu erkennen, dass durch die Nichtlinearitäten Harmonische des Eingangssignals mit den Frequenzen  $f_{n.H} = n \cdot f_1$  entstehen.

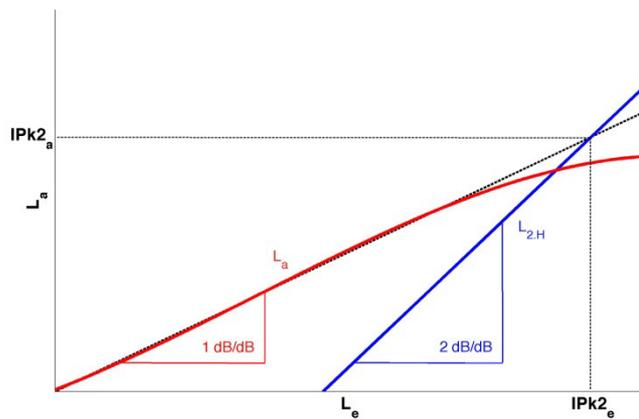
Die Pegel dieser Harmonischen hängen von den Koeffizienten  $a_n$  in Gl. 2 ab. Es besteht aber auch eine Abhängigkeit von der Ordnung  $n$  der jeweiligen Harmonischen sowie vom Eingangspegel. Bei Erhöhen des Eingangspegels steigen die Pegel der Harmonischen überproportional mit ihrer Ordnung, d.h.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

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

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

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 IP $k$ n-Punkt (z.B. IP $k$ 2-Punkt) angegeben. Der IP $k$ 2-Punkt entspricht demjenigen fiktiven Eingangs- oder Ausgangspegel, bei dem am Ausgang des nachrichtentechnischen Systems die zweite Harmonische des Eingangssignals den gleichen Pegel wie die Grundwelle aufweist.



**Bild 42: Intercept-Punkt k2**

Dieser Punkt kann in der Praxis nie erreicht werden, da ein System wie in Bild 42 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	$a_2 \cdot \frac{1}{2} (\hat{U}_{e,1}^2 + \hat{U}_{e,2}^2)$
Grundwellen (1. Harmonische)	$a_1 \cdot \hat{U}_{e,1} \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t)$ $a_1 \cdot \hat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi f_2 \cdot t)$
2. Harmonische	$a_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_{e,1}^2 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi f_1 \cdot t)$ $a_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \hat{U}_{e,2}^2 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi f_2 \cdot t)$
Intermodulationsprodukte 2. Ordnung	$a_2 \cdot \hat{U}_{e,1} \cdot \hat{U}_{e,2} \cdot \cos(2\pi(f_1 - f_2) \cdot t)$ $a_2 \cdot \hat{U}_{e,1} \cdot \hat{U}_{e,2} \cdot \cos(2\pi(f_1 + f_2) \cdot t)$
3. Harmonische	$a_3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \hat{U}_{e,1}^3 \cdot \sin(3 \cdot 2\pi f_1 \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \hat{U}_{e,2}^3 \cdot \sin(3 \cdot 2\pi f_2 \cdot t)$
Intermodulationsprodukte 3. Ordnung	$a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \hat{U}_{e,1}^2 \cdot \hat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi(2f_1 + f_2) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \hat{U}_{e,1} \cdot \hat{U}_{e,2}^2 \cdot \sin(2\pi(2f_2 + f_1) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \hat{U}_{e,1}^2 \cdot \hat{U}_{e,2} \cdot \sin(2\pi(2f_1 - f_2) \cdot t)$ $a_3 \cdot \frac{3}{4} \cdot \hat{U}_{e,1} \cdot \hat{U}_{e,2}^2 \cdot \sin(2\pi(2f_2 - f_1) \cdot t)$

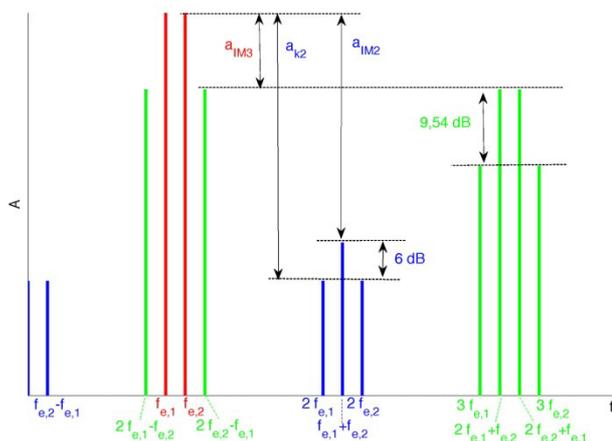
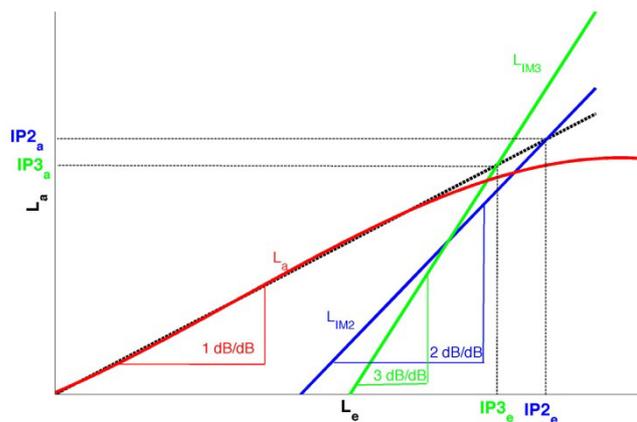


Bild 43: Ausgangsspektrum eines nichtlinearen Systems bei Zweitonaussteuerung

Neben Harmonischen entstehen noch zusätzlich Intermodulationsprodukte, auch Differenztöne genannt (Bild 43). 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 44: Intercept-Punkt 2. und 3. Ordnung**

Wie bei den Harmonischen höherer Ordnung führt auch bei den Intermodulationsprodukten eine Pegeländerung beider Sinusträger am Eingang um  $\Delta \text{ dB}$  zu einer Pegeländerung des jeweiligen Intermodulationsprodukts um  $n \cdot \Delta \text{ dB}$ . 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 44). Für den auf den Eingang bezogenen Intercept-Punkt n-ter Ordnung gilt:

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

mit  $IPn_e$  Eingang-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

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

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 Zweitton-Aussteuerung als auch die 2. Harmonische bei Eintone-Aussteuerung entstehen aufgrund des quadratischen Glieds der nichtlinearen Übertragungskennlinie. Zwischen  $IP2$  und  $IPk2$  bzw.  $IP3$  und  $IPk3$  besteht ein fester Zusammenhang (siehe auch Tabelle 1):

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

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

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 [5]

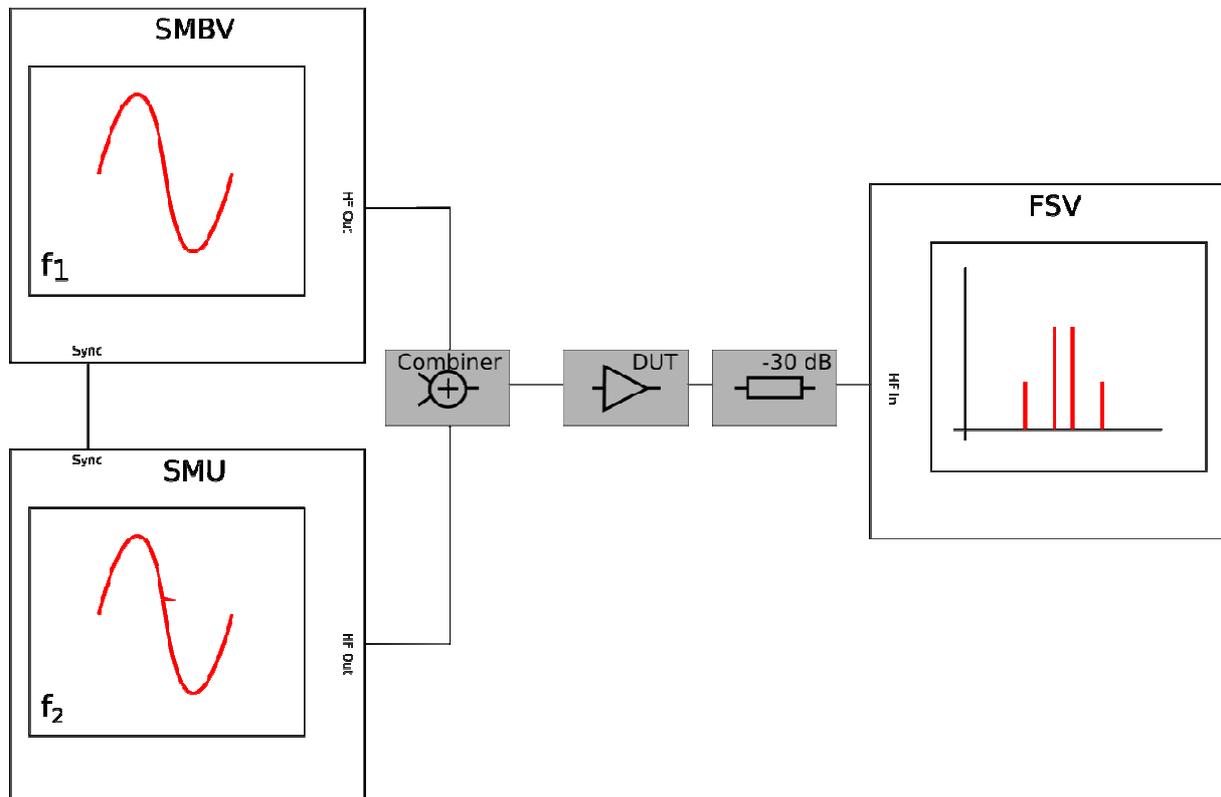
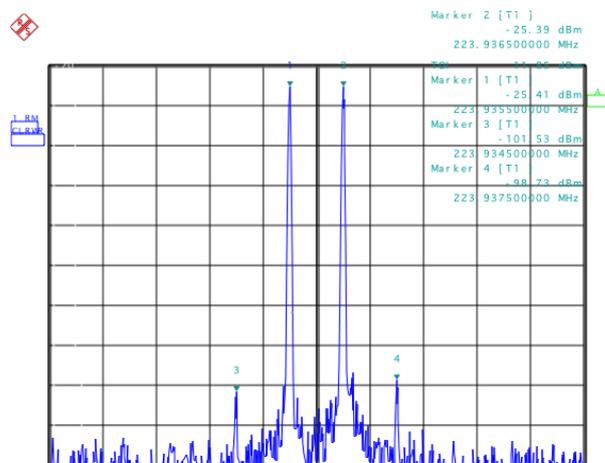


Bild 45: Messung des IP3-Punkt

Um den Intercept-Punkt 3. Ordnung zu ermitteln wird der Verstärker mit zwei Sinustönen, die sich nur wenig in ihrer Frequenz unterscheiden, angeregt (Bild 45). 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 ausgangsseitigen Intercept-Punkten die eingangsseitigen Intercept-Punkte angegeben werden.

### 3.3.2.2.3. Messergebnisse

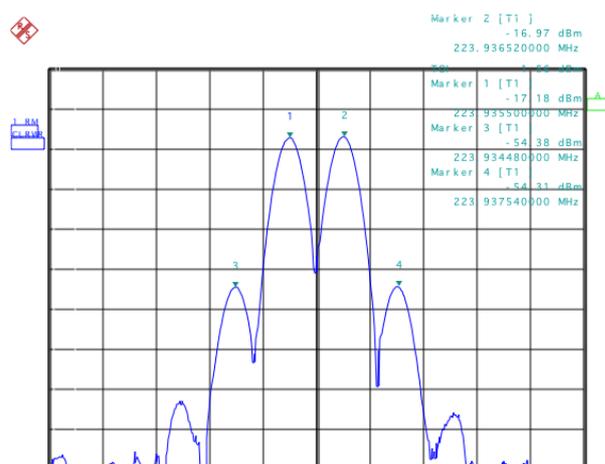
Die verwendeten Einzeltöne weisen einen Abstand von 1 kHz zueinander auf.



Input -25dBm  
Date: 19.MAR.2014 11:15:04

**Bild 46: IP3-Messung des „PCS“-Verstärkers 10 W Ausgangsleistung**

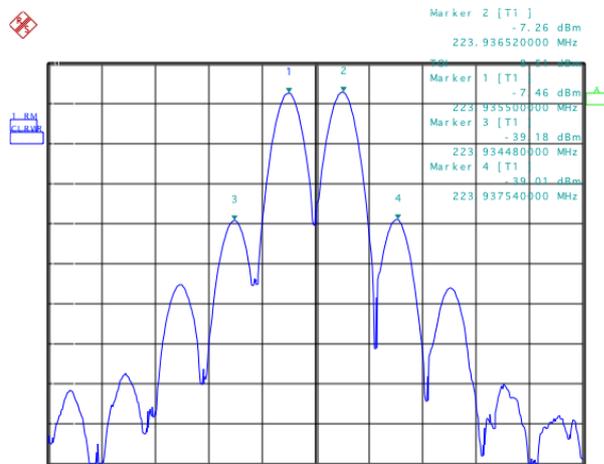
Die beiden Töne hatten jeweils einen Pegel von  $-25\text{ dBm}$ . Der ausgangsbezogene IP3-Punkt ergibt sich damit nach dem Aufaddieren der Dämpfung zu  $IP_{3,a} = 60\text{ dBm}$  (siehe Bild 46). Nach Abzug der Verstärkung von 38,14 dB ergibt sich der eingangsbezogene IP3-Punkt zu  $IP_{3,e} = 21,86\text{ dBm}$ . 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.



ATTEN 54,09dB  
Date: 19.MAR.2014 20:48:29

**Bild 47: IP3-Messung des „Electrolink“-Verstärkers 10W Ausgangsleistung**

Bei einer eingestellten Ausgangsleistung von 10 W beträgt der ausgangsseitige IP3-Punkt des „Electrolink“ Verstärkers  $IP_{3,a} = 55,7 \text{ dBm}$  (siehe Bild 47). Der eingangsbezogene IP3-Punkt beträgt  $IP_{3,e} = 9,7 \text{ dBm}$ .



ATTEN 54,09dB  
Date: 19.MAR.2014 20:46:36

#### Bild 48: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 120W Ausgangsleistung

Bei einer eingestellten Ausgangsleistung von 120 W beträgt der ausgangsseitige IP3-Punkt  $IP_{3,a} = 62,6 \text{ dBm}$  (siehe Bild 48). Der eingangsbezogene IP3-Punkt beträgt  $IP_{3,e} = 5,8 \text{ dBm}$ .

Im Vergleich der eingangsbezogenen IP3-Punkte zeigt sich, dass der Verstärker von „PCS Electronics“ einen höheren IP3-Punkt aufweist. Dass der eingangsbezogene IP3-Punkt 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 [5]

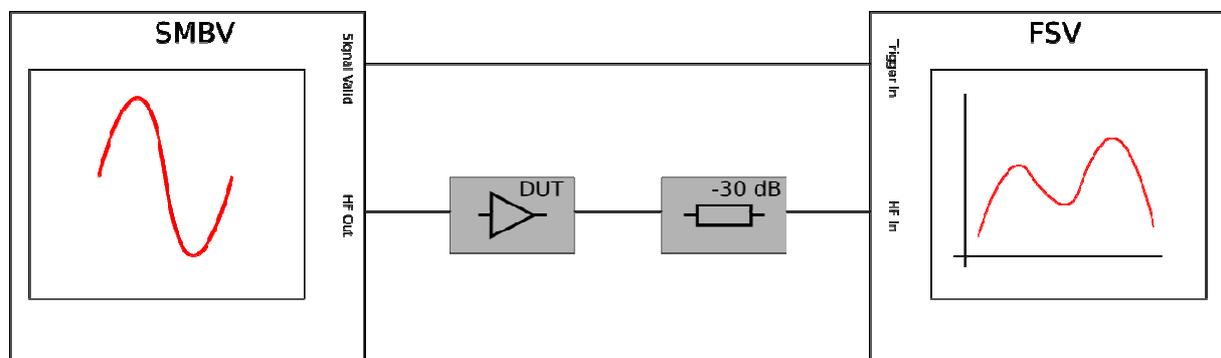


Bild 49: Messung des Frequenzgangs

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 49). Dadurch wird der Frequenzgang des Verstärkers abgetastet. Da davon auszugehen ist, dass bei sinnvoller Aussteuerung eine Grundschiwingung stets größer ist als eine von niedrigeren Frequenzen verursachte Oberschwingung, wird nur der lineare Anteil erfasst.

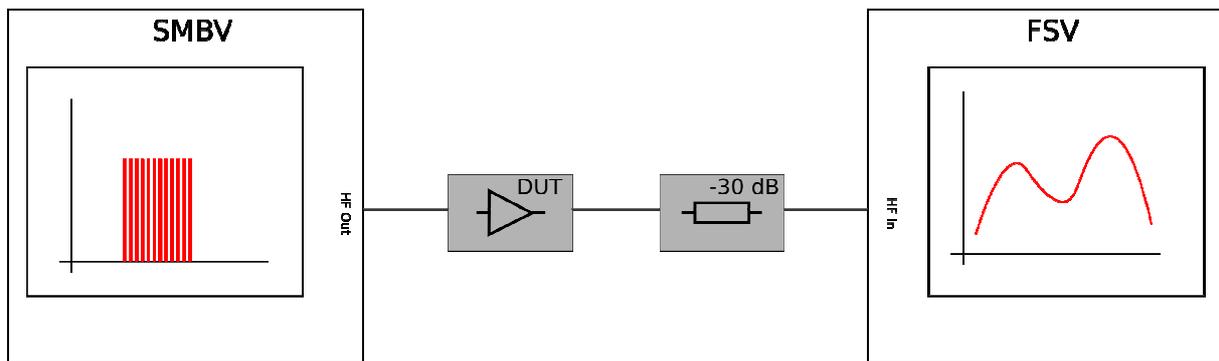


Bild 50: Messung des Frequenzgangs mit Multicarrier-Signal

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 50). 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 51: 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  $\pm 1,5$  dB ist er relativ glatt, wie Bild 51 zeigt.

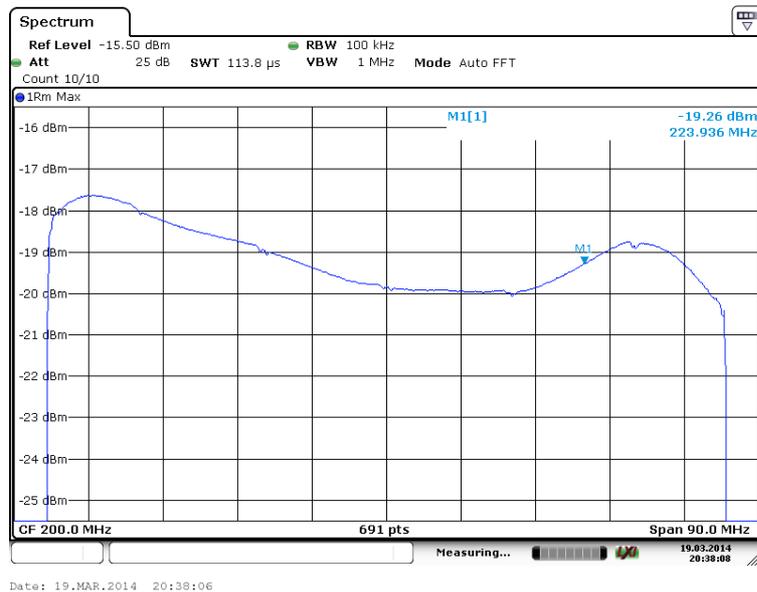


Bild 52: Frequenzgang Electrolink

Der Frequenzgang des „3B0K1A“ von Electrolink hat in der Mitte des VHF Band III einen leichten Einbruch (siehe Bild 52). Mit  $\pm 1$  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

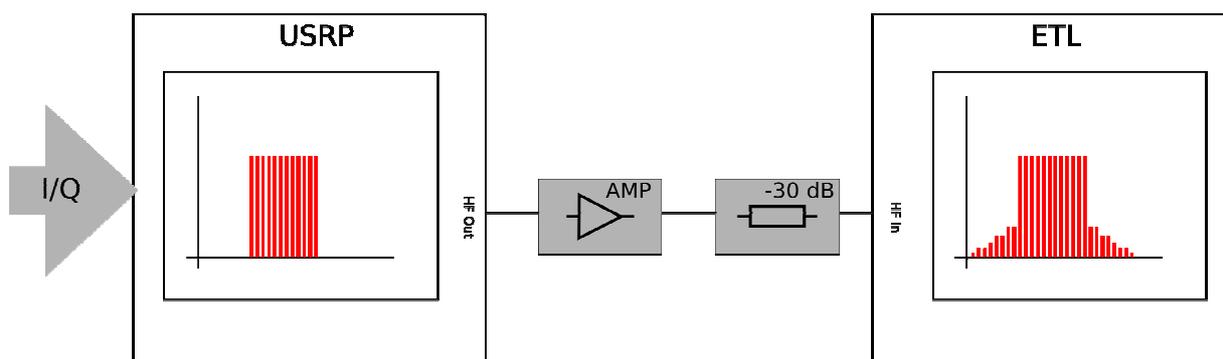


Bild 53: Messung über die Qualität der HF-Signale

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 53). 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 Mas-

kenfilter 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“ beschriebenen Methode, die es ermöglicht bei nur leichten Verzerrungen einen geringen Crestfaktor zu erzielen.

### 3.3.3.1.1. Spektrum

#### 3.3.3.1.1.1. Theoretische Vorüberlegungen [4]

Wird nun als Eingangssignal kein Zweiton-Signal genutzt sondern ein breitbandiges Mehrträger-signal, 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 ungeradzahligter 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  $IP3_o$ -Punkt und gegebener Sendeleistung einen Richtwert für den zu erwartenden Schulterabstand angibt [6]:

$$S \approx 2 \cdot (IP3_o - P_o) - 2.5 \text{ dB} \quad (15)$$

mit  $S$  Schulterabstand in  $dBm$

$IP3_o$  Ausgangsbezogener IP3-Punkt in  $dBm$

$P_o$  Ausgangsleistung in  $dBm$

Durch die in Abschnitt 0 ermittelten ausgangsbezogenen IP3-Punkte sind folgende Schulterabstände zu erwarten:

„PCS“ Verstärker 10 W: 37,5 dBm

„Electrolink“ Verstärker 10 W: 28,9 dBm

„Electrolink“ Verstärker 120 W: 21,1 dBm

#### 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 synthetisches 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

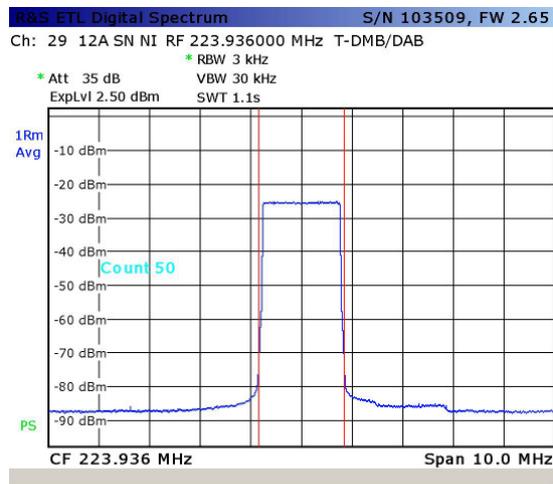


Bild 54: Spektrum des DAB-Signals des USRP

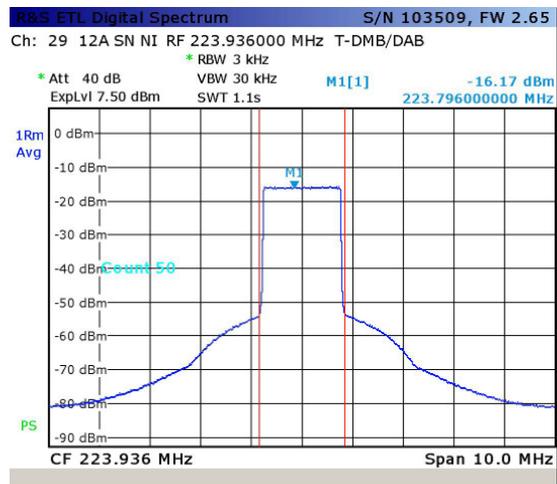


Bild 55: Schulterabstand PCS 10 W DAB-Signal

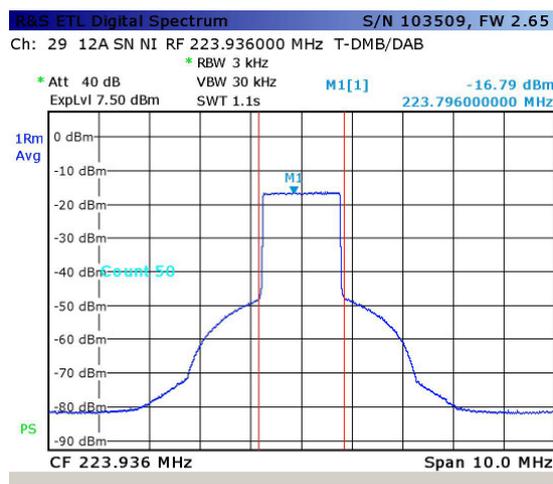


Bild 56: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers 10 W DAB-Signal

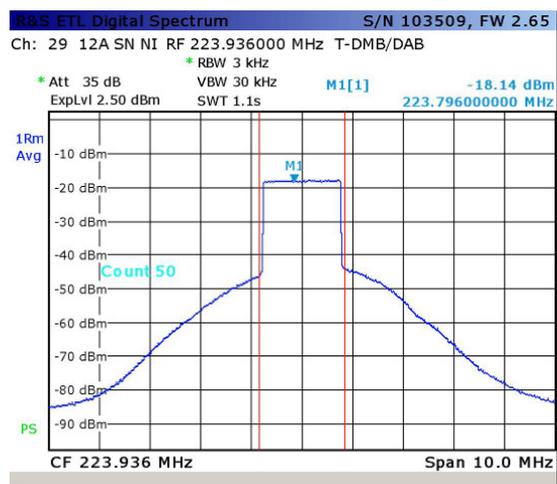
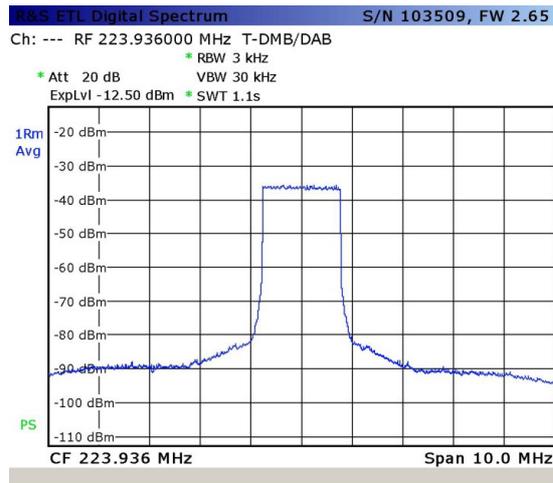


Bild 57: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers bei 120 W DAB-Signal



Date: 21.MAR.2014 12:16:06

**Bild 58: Spektrum des DAB-Signals des SDB 601**

Das in Bild 54 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 55 zeigt. Außerdem ist das Spektrum auf beiden Seiten symmetrisch.

Der „3B0K1A“ von „Electrolink“ erreicht bei 10 W Ausgangsleistung einen Schulterabstand von 32 dB (Bild 56). 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 57 zeigt ist bei höheren Frequenzen oberhalb des Nutzbandes deutlich mehr Störpegel enthalten als bei niedrigeren Frequenzen unterhalb des Nutzbandes. 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 58 zeigt, fallen die Signalfanken 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.

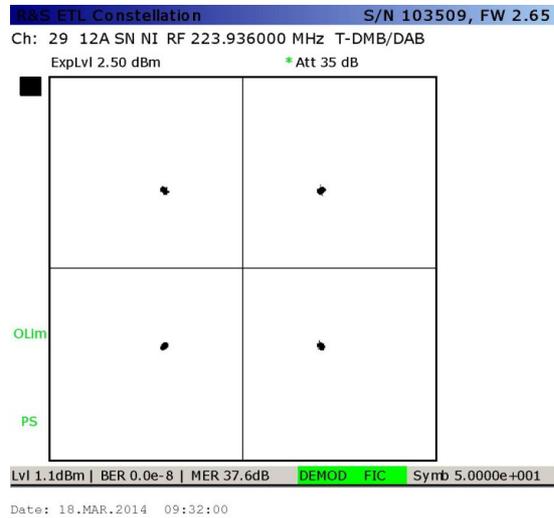


Bild 59: Konstellationsdiagramm am Ausgang des USRP

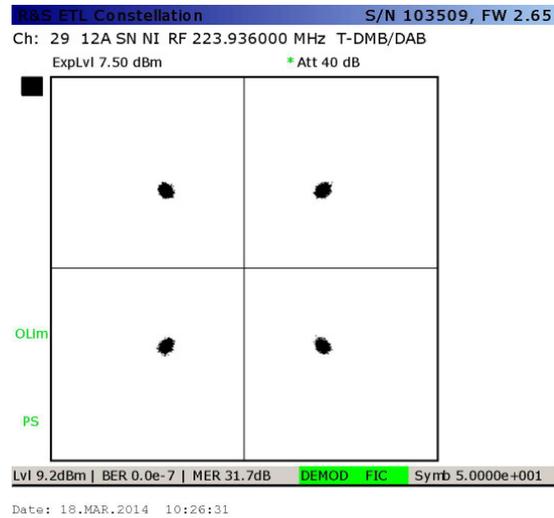


Bild 60: Konstellationsdiagramm am Ausgang des PCS Verstärker mit 10 W

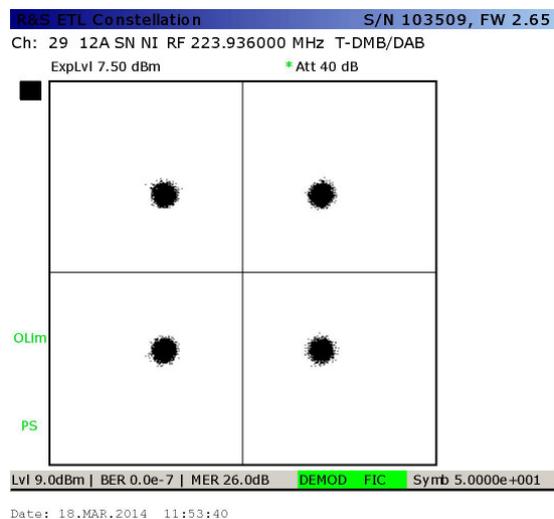


Bild 61: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 10 W

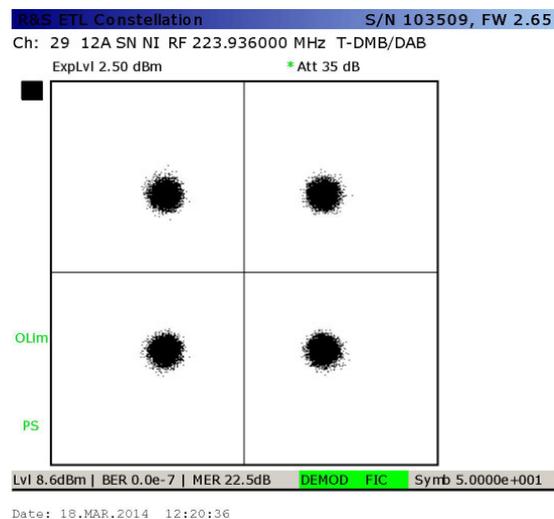
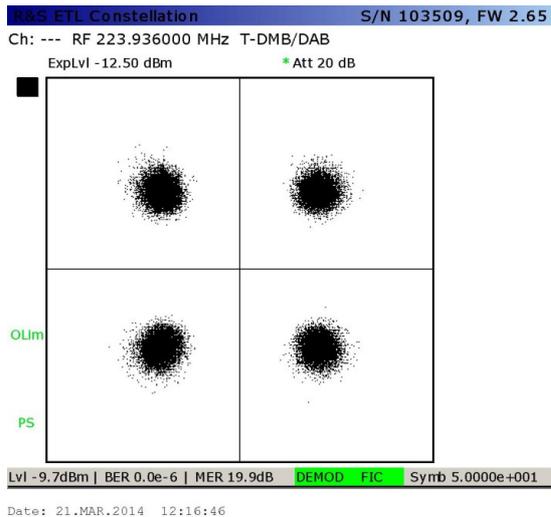


Bild 62: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 120 W



**Bild 63: Konstellationsdiagramm des SDB 601**

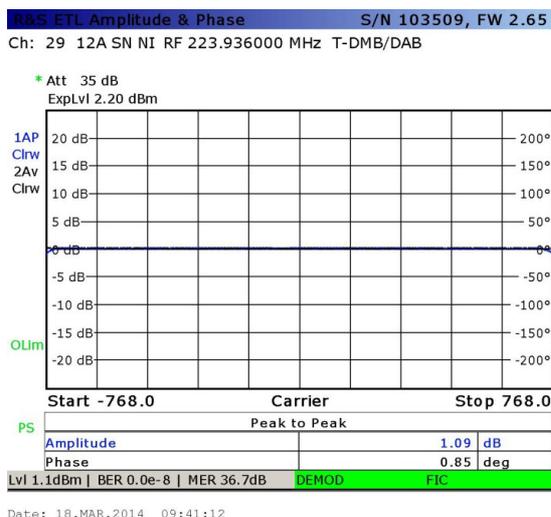
Das Konstellationsdiagramm in Bild 59 zeigt nur kleine Signalwolken um die idealen Konstellationspunkte herum. Dies bedeutet, dass die Signale im USRP sehr rauscharm erzeugt und intern verstärkt werden. Die Signalflecken sind auch nicht perimetrisch verzerrt, was auf ein geringes Phasenrauschen schließen lässt.

Der „Boxed 170-230 MHz 50 W TV VHF Band III Amplifier“ (Bild 60) von „PCS Electronics“ weist bei gleicher Leistung kleinere Signalwolken als der „3B0K1A“ (Bild 61, Bild 62) von „Electrolink“ auf (siehe Bilder 69 - 72). Er fügt dem Signal also weniger Eigenrauschen hinzu als letzterer.

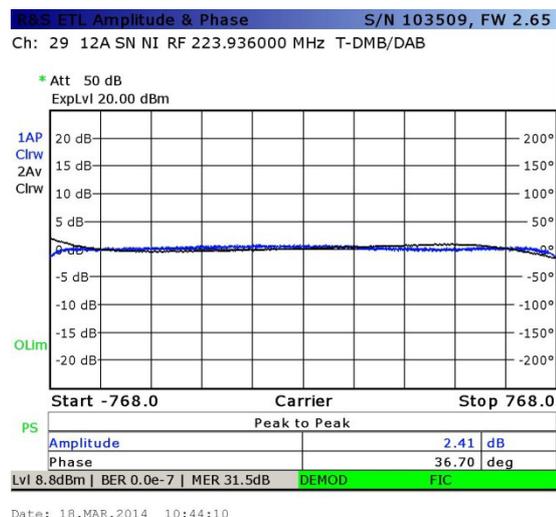
Das Konstellationsdiagramm des SDB 601 (Bild 63) ist schlechter als das des USRP nach der Verstärkung auf 120 W Ausgangsleistung durch den „3B0K1A“. Dies deutet auf ein sehr starkes Eigenrauschen des SDB 601 hin.

### 3.3.3.1.3. Amplitude und Phase

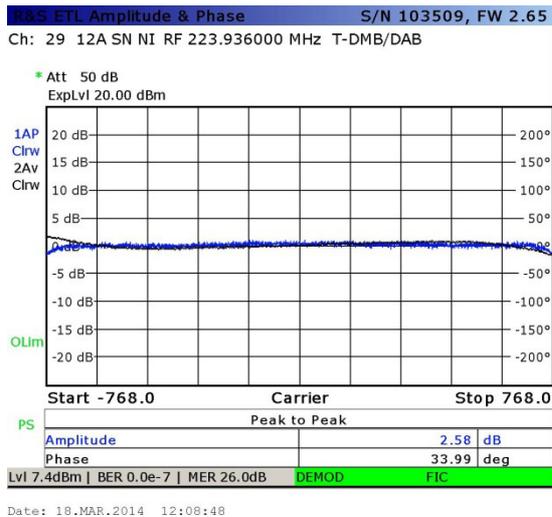
Dieses eigentlich für Kanalvermessungen gedachte Diagramm zeigt über der Frequenz aufgetragene Amplituden- und Phasenschwankungen.



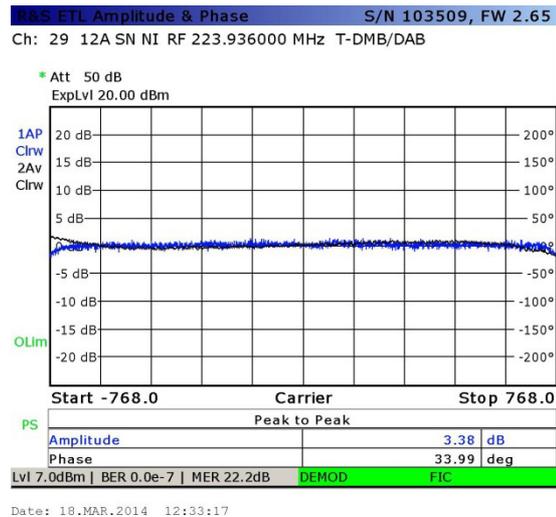
**Bild 64: Amplitude & Phase am Ausgang des USRP**



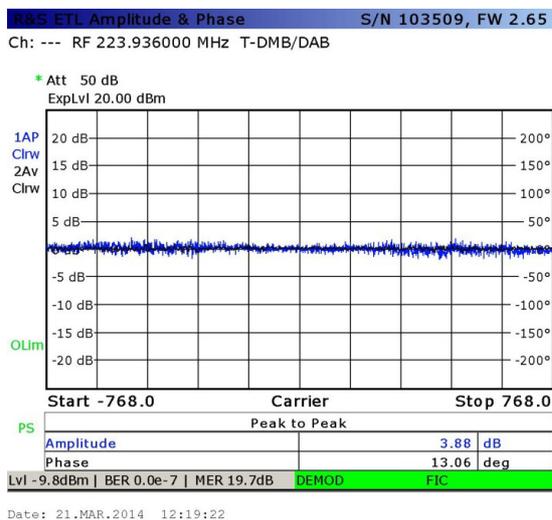
**Bild 65: Amplitude & Phase PCS 10W + Filter**



**Bild 66: Amplitude & Phase Electrolink 10 W + Filter**



**Bild 67: Amplitude & Phase Electrolink 120 W + Filter**



**Bild 68: Amplituden- und Phasenverzerrungen des SDB 601**

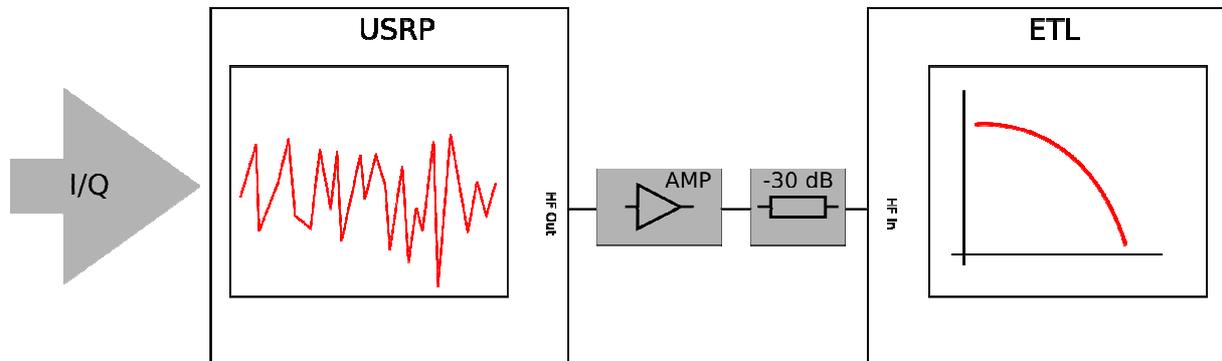
Die Übersicht in Bild 64 zeigt, dass die einzelnen Träger des OFDM-Signals in der Amplitude maximal um 1,09 dB und in der Phase maximal um 0,85° voneinander abweichen. Dies bestätigt, dass der USRP sehr rauscharm arbeitet.

Von dem glatten Amplituden- und Phasenfrequenzgang des USRP ausgehend, sieht man bei den weiteren Frequenzgängen in Bild 65 bis Bild 67, 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 68 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

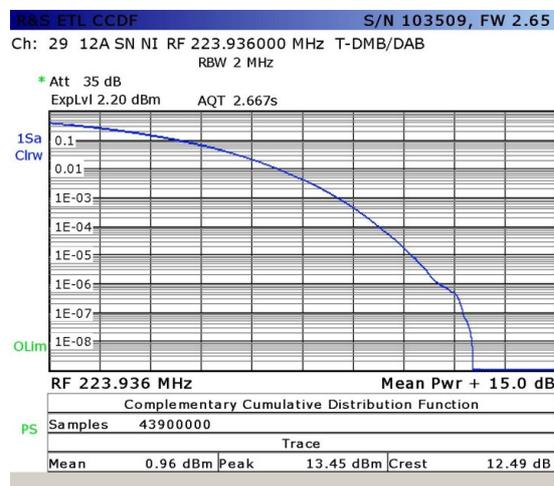


**Bild 69: Messung der CCDF und des Crestfaktors (andere Grafik)**

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.

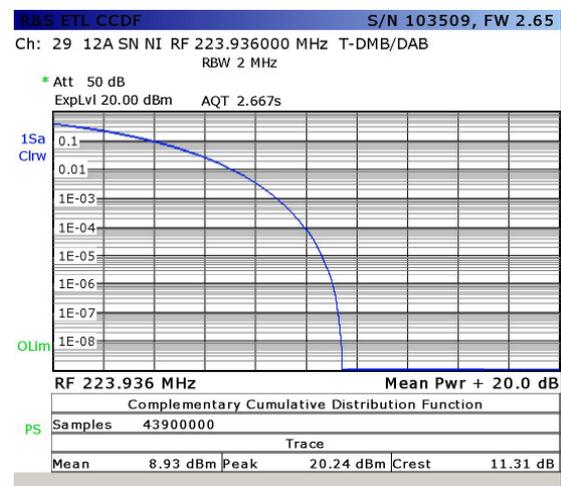
Messtechnisch wird die komplementär Amplitudenverteilung („Complementary Cumulative Density Function“, „CCDF“) des Signals ermittelt. Dazu wird der USRP mit einem DAB-Signal gespeist, das erzeugte HF-Signal wird aufgenommen und die Häufigkeit der Pegel aller Abtastwerte bestimmt. Durch Berechnung des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

#### 3.3.3.1.4.2. Ergebnisse



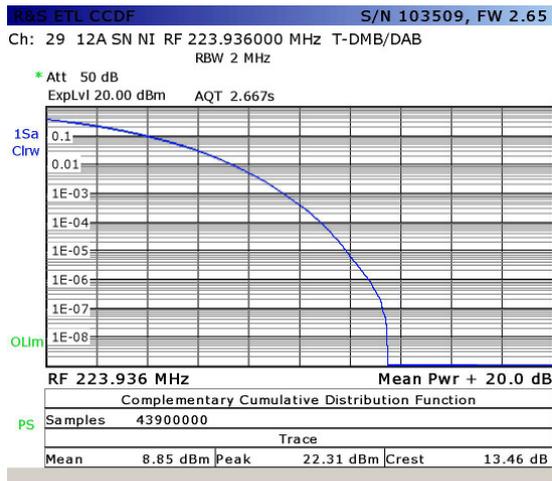
Date: 18.MAR.2014 09:38:38

**Bild 70: CCDF und Crestfaktor am Ausgang des USRP**



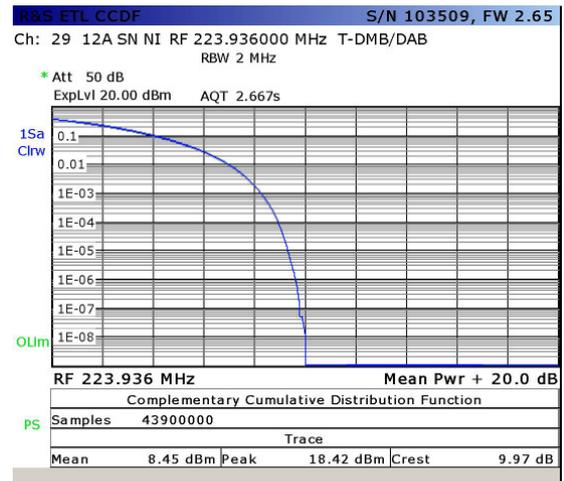
Date: 18.MAR.2014 10:29:50

**Bild 71: CCDF und Crestfaktor nach dem PCS Verstärker 10 W**



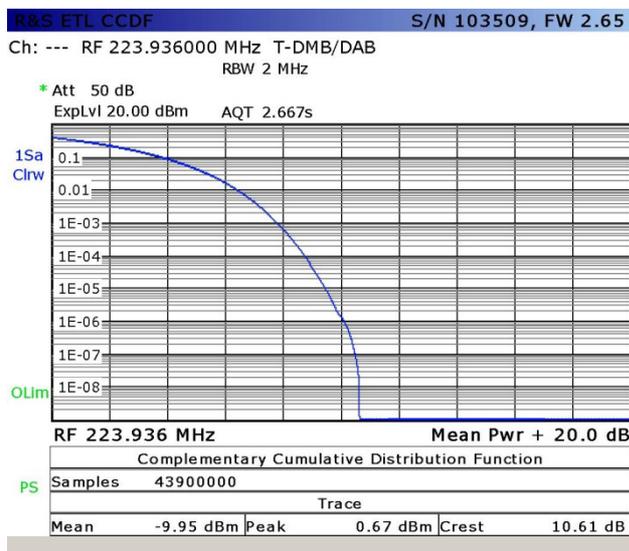
Date: 18.MAR.2014 11:55:51

**Bild 72: CCDF und Crestfaktor nach dem Electrolink Verstärker 10 W**



Date: 18.MAR.2014 12:23:14

**Bild 73: CCDF und Crestfaktor nach dem Electrolink Verstärker 120 W**



Date: 21.MAR.2014 12:18:34

**Bild 74: CCDF und Crestfaktor des SDB 601**

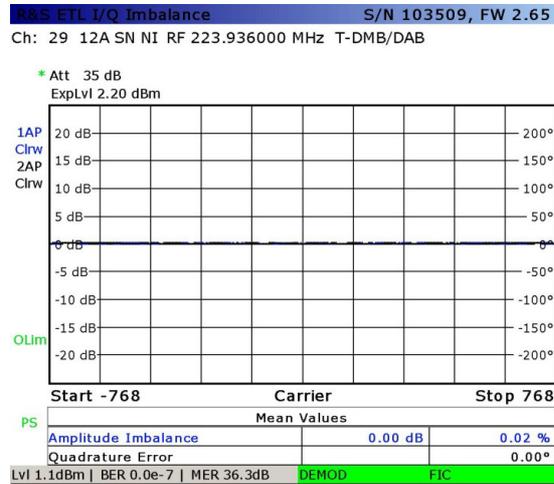
Die CCDF des Ausgangssignals des USRP in Bild 70 weist eine für OFDM-Signale typische Verteilung auf. Der Crestfaktor beträgt 12,49 dB.

Bild 71 bis Bild 73 zeigen wie die Verstärker das Signal komprimieren. Der Verstärker von PCS weist noch 11,31 dB auf. Der Crestfaktor am Ausgang des „Electrolink“ 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 Electrolink Verstärker bei hohen Leistungen besonders stark.

Die CCDF des Ausgangssignals des SDB 601 in Bild 74 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.

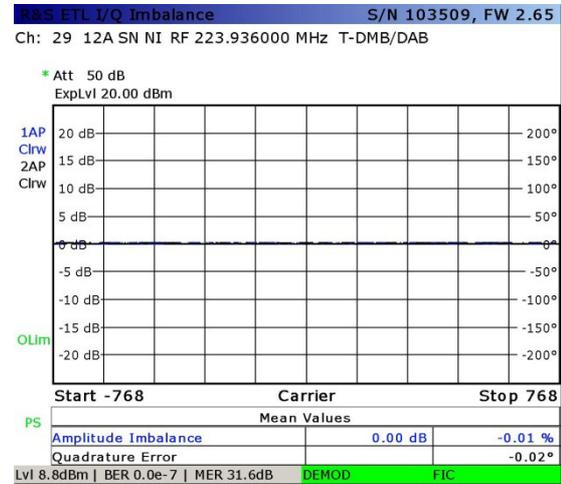
### 3.3.3.1.5. IQ-Ungleichgewicht

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



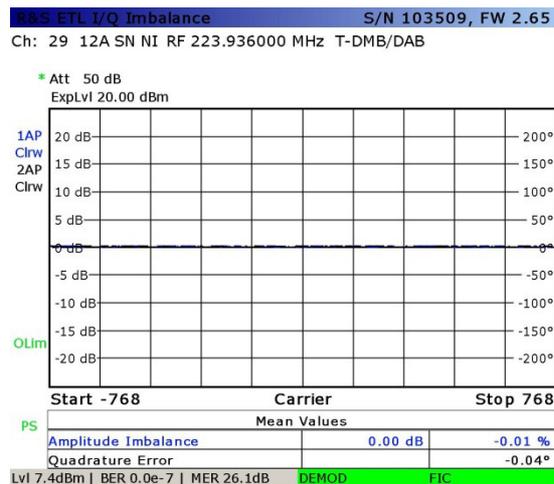
Date: 18.MAR.2014 09:39:51

**Bild 75: I/Q-Ungleichheit am Ausgang des USRP**



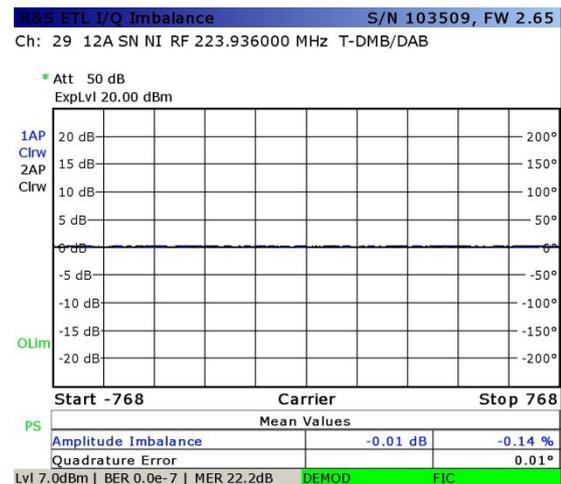
Date: 18.MAR.2014 10:43:32

**Bild 76: I/Q-Ungleichgewicht PCS 10 W + Filter**



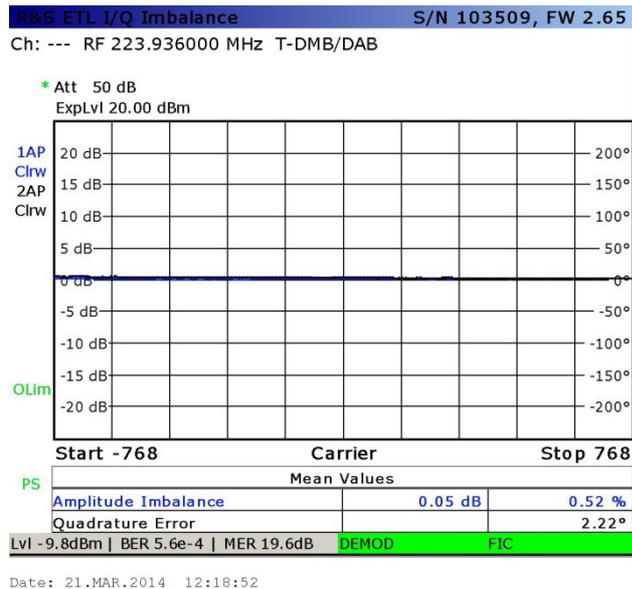
Date: 18.MAR.2014 12:08:21

**Bild 77: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 10 W + Filter**



Date: 18.MAR.2014 12:32:48

**Bild 78: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 120 W + Filter**



**Bild 79: 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 75). Dies lässt auf eine hohe Qualität der digitalen Modulation schließen.

Wie Bild 76 bis Bild 78 zeigen, wird das sehr geringe IQ-Ungleichgewicht durch beide Verstärker auch mit Maskenfilter nur sehr wenig beeinträchtigt.

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.

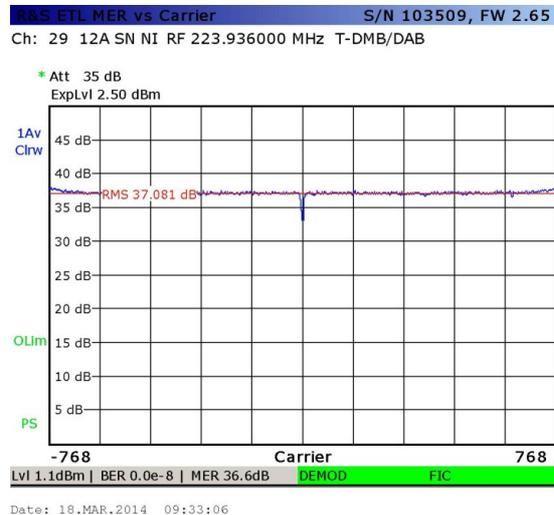


Bild 80: MER(f) des USRP

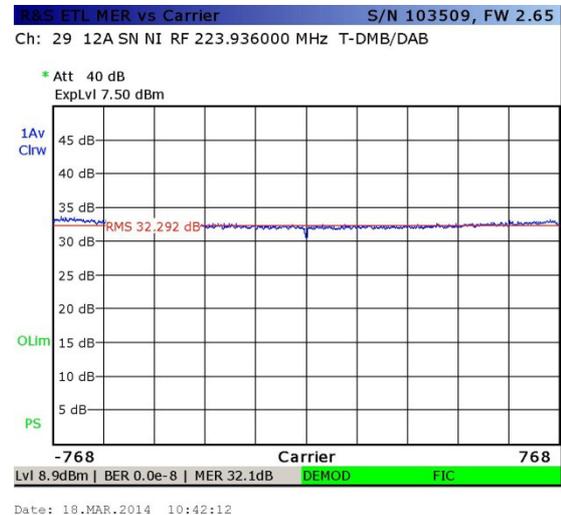


Bild 81: MER(f) PCS 10 W + Filter



Bild 82: MER(f) USRP + Electrolink 10 W + Filter

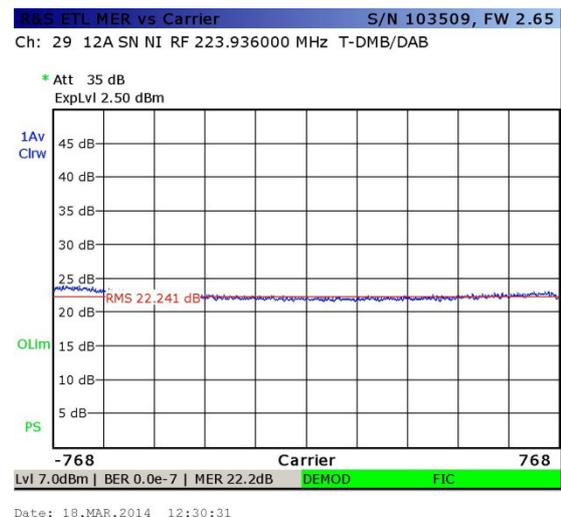
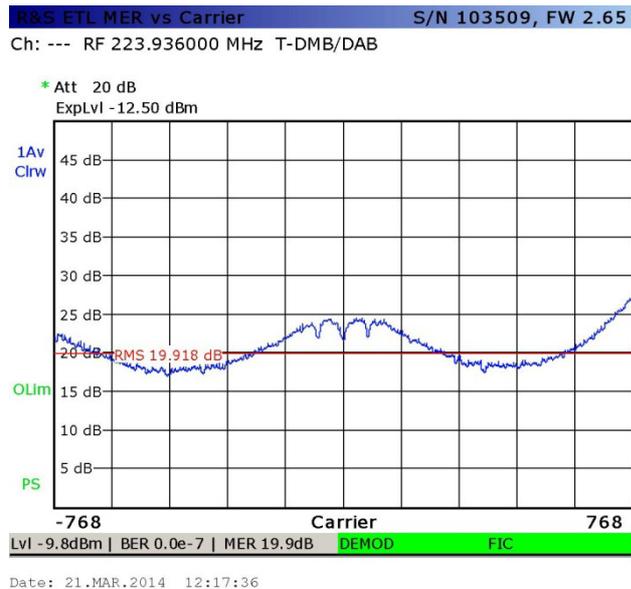


Bild 83: MER(f) USRP + Electrolink 120 W + Filter



**Bild 84: 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 80). 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 81 bis Bild 83). 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 84 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“ verbesserungsfähig 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
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
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

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
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
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 85: Modulationsfehler am Ausgang des USRP

Bild 86: 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
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
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

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
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
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 87: Modulationsfehler Electrolink 10 W + Filter

Bild 88: Modulationsfehler Electrolink 120 W + Filter

P&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 89: Modulationsfehler des SDB 601**

Die Modulationsfehler des USRP sind tabellarisch in Bild 85 aufgeführt und deutlich besser als die Minimalgrenzen, die im „ETL“ hinterlegt sind. Auch konnten keine Bitfehler ermittelt werden, so dass die BER mit 0 angegeben ist.

Die Übersichten über die Modulationsfehler in Bild 86 bis Bild 88 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 89 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 KI 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 1, 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
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
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			

Bild 90: Gesamtübersicht USRP

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 KI DAB Test		Date & Time(UTC): 18.03.2014, 13:50	
Pass	Limit	< Results	< Limit Unit
Level	-60.0	7.5	10.0 dBm
Sideband		Normal	
Transmission Mode		Mode 1, 1536 carriers	
Carrier Freq Offset	-30000.0	-4.1	30000.0 Hz
Bit Rate Offset	-100.0	0.0	100.0 ppm
MER/EVM (rms)	24.0	26.5	----- dB
MER/EVM (peak)	10.0	13.2	----- dB
BER before Viterbi		0.0e-7(29/100)	1.0e-2
FIB Errors		0	1 /s
Subchannel parameters (SubChId 1, Type STREAM AUDIO)			
BER before RS		Not applicable	2.0e-4
Packet Error Ratio		Not applicable	1.0e-8
Packet Errors		Not applicable	1 /s
MPEG Ts Bitrate		Not applicable	kbit/s
Lvl 7.5dBm   BER 0.0e-7   MER 26.5dB DEMOD FIC			
Date: 18.MAR.2014 12:05:04			

Bild 92: Gesamtübersicht Electrolink 10 W + Filter

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 KI 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 1, 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
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
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 91: Gesamtübersicht PCS 10 W + Filter

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 KI DAB Test		Date & Time(UTC): 18.03.2014, 14:14	
Fail	Limit	< Results	< Limit Unit
Level	-60.0	7.0	10.0 dBm
Sideband		Normal	
Transmission Mode		Mode 1, 1536 carriers	
Carrier Freq Offset	-30000.0	19.0	30000.0 Hz
Bit Rate Offset	-100.0	0.1	100.0 ppm
MER/EVM (rms)	24.0	22.1	----- dB
MER/EVM (peak)	10.0	9.0	----- dB
BER before Viterbi		0.0e-7(18/100)	1.0e-2
FIB Errors		0	1 /s
Subchannel parameters (SubChId 1, Type STREAM AUDIO)			
BER before RS		Not applicable	2.0e-4
Packet Error Ratio		Not applicable	1.0e-8
Packet Errors		Not applicable	1 /s
MPEG Ts Bitrate		Not applicable	kbit/s
Lvl 7.0dBm   BER 0.0e-7   MER 22.1dB DEMOD FIC			
Date: 18.MAR.2014 12:29:20			

Bild 93: Gesamtübersicht Electrolink 120 W + Filter

Fail		Limit	<	Results	<	Limit	Unit
Ensemble: Feldversuch 2009 Date & Time(UTC): 21.03.2014, 13:01:16							
Level		-60.0		-9.7		10.0	dBm
Sideband				Normal			dBm
Transmission Mode				Mode I, 1536 carriers			
Carrier Freq Offset		-30000.0		388.7		30000.0	Hz
Bit Rate Offset		-100.0		1.5		100.0	ppm
MER/EVM (rms)		24.0	*	20.0		-----	dB
MER/EVM (peak)		10.0	*	5.7		-----	dB
BER before Viterbi				-----		1.0e-2	
FIB Errors				0		1	/s
Subchannel parameters (SubChId 1, Type ---)							
BER before RS				Not applicable		2.0e-4	
Packet Error Ratio				Not applicable		1.0e-8	
Packet Errors				Not applicable		1	/s
MPEG Ts Bitrate				Not applicable			kbit/s
Lvl -9.7dBm   ---   MER 20.0dB DEMOD FIC							

Date: 21.MAR.2014 12:16:25

### Bild 94: Gesamtübersicht SDB 601

Die Gesamtübersicht über die wesentlichen Signalparameter am Ausgang des USRP in Bild 90 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 91 bis Bild 93 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 werden. Damit ließen sich im DRM+-Betrieb an einem Abschlusswiderstand 20 dBm 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 Leistungsverstärker nicht benutzbar.

Die Gesamtübersicht über die wesentlichen Signalparameter am Ausgang des „SDB 601“ in Bild 94 bestätigt das wenig positive Gesamtbild. Dieser Modulator ist für den Produktivbetrieb nur eingeschränkt geeignet.

### 3.3.3.2. Einhalten der jeweiligen Spektralmaske

#### 3.3.3.2.1. Laboraufbau

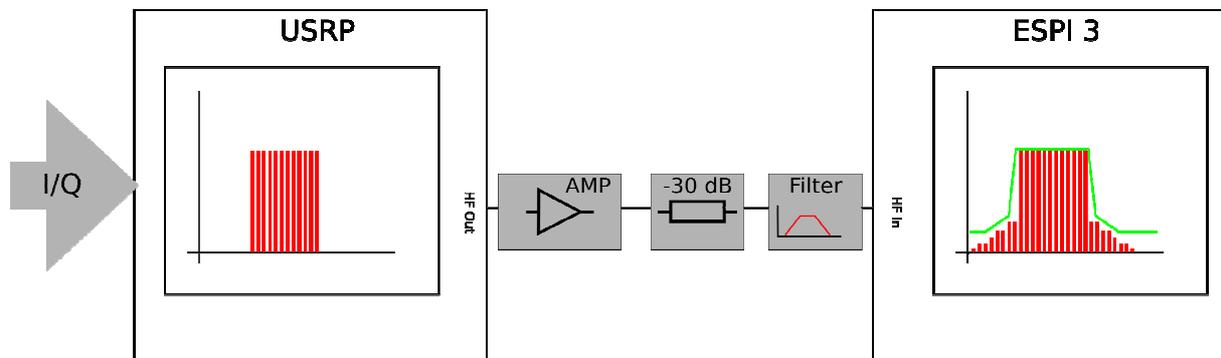


Bild 95: Messung über das Einhalten der Spektralmaske

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 Ausgangsleistung verstärkt (Bild 95). 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.

### 3.3.3.2.2. Ergebnisse

In Bild 96 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.

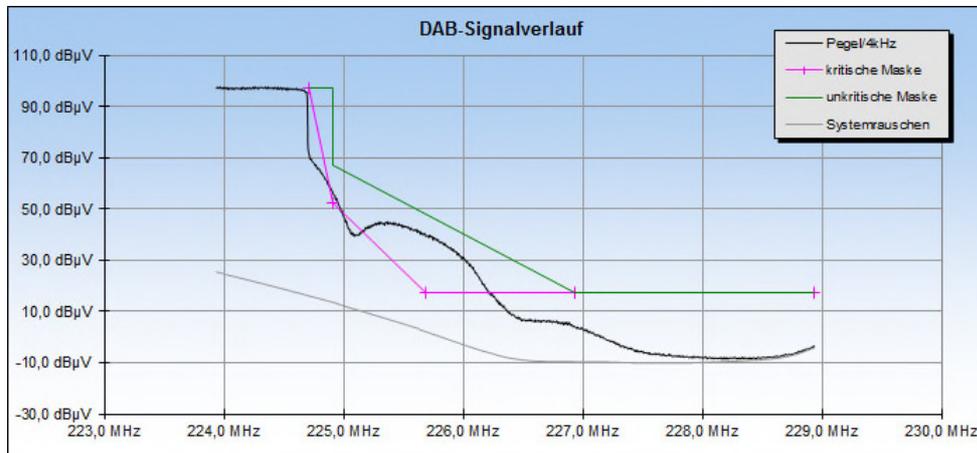


Bild 96: DAB-Signalverlauf (oberes Seitenband)

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 97 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.

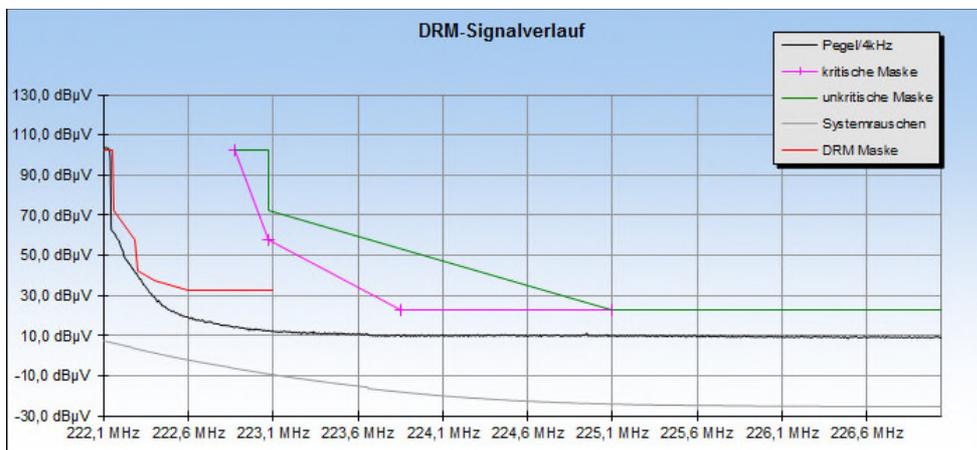


Bild 97: DRM-Signalverlauf (oberes Seitenband)

Da es zum Betrieb eines Senders im VHF Band III in Deutschland zur Zeit nur die Vorgabe der DAB-Maske gibt, ist auch nur diese einzuhalten. Auf Grund der Schmalbandigkeit von DRM+ wird diese mit großem Abstand eingehalten. Zusätzlich ist in Bild 97 der Vorschlag der Deutschen DRM Platform für eine DRM+-Spektralmaske „German DRM Platform, DRM+ Technical Expert Group: Planning Parameters for DRM Mode E („DRM+“) concerning the use in VHF Band I,II,III. V3.0 – 04/05/2011“ eingeblendet. Auch diese hält das System ein und dies wird von der BNetzA bestätigt. Auf Grund von Oberwellen, die durch den USRP erzeugt werden 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  $50 \Omega$  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 ausgetauscht werden.

#### **3.3.3.3. Maximale Stromaufnahme**

Die maximale Stromaufnahme des Gesamtsystems wurde durch ein Ampère-Meter ermittelt wobei sowohl Multiplexgenerator als auch VHF-Sendeeinheit an die gleiche Steckdose angeschlossen sind. Dabei wurde unter Vollast eine maximale Stromaufnahme von 2,8 A und eine maximal aufgenommene Leistung von 900 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 folgende Anforderungen an das Projekt 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 Bedieneingaben 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 zur Zeit 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 Vollast gemeinsam maximal 900 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 Systems, ausgenommen der Software Spark+, 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 10126,65 €. 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 als auch die Reduzierung auf die im Einzelnen benötigten Funktionen zu weiteren Kostenreduktion möglich.

## 4.3. Probeabstrahlung und Gesamtsystemtest

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

Im Vorfeld des Symposiums wurde der Sender über den Zeitraum von einer Woche zum Test betrieben. Während dieser Zeit funktionierte er sich stabil und zuverlässig.

Während 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 wird der Sender sowohl DAB als auch DRM+ abstrahlen.

#### **4.4. Vorläufiges Fazit**

Es ist gelungen, einen kostengünstigen portablen DAB-Sender zu realisieren. Wenn auch im Bezug auf Datendienste die Vorgaben noch nicht erfüllt werden konnten, so ist dennoch ein universell einsetzbares Broadcastsystem entstanden, das den einschlägigen Standards genügt. Insbesondere hat die BNetzA die Einhaltung der spektralen Vorgaben bestätigt. Durch die rege Weiterentwicklung der „mmB-Tools“ durch „opendigitalradio.org“ ist eine stetige Zunahme der Funktionen zu erwarten. Im Hinblick auf die Bedienbarkeit ist es wünschenswert, wenn in einem weiteren Projekt eine grafische Bedienoberfläche, eventuell als Webinterface, entwickelt wird, damit es auch Personen ohne tiefere Software-Kenntnisse ermöglicht wird, diesen Sender flexibel zu betreiben.

## **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 (2012-06): 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 .....	7
Bild 2: Konzept des Aufbaus .....	8
Bild 3: Thon Rack 8U Live 50 Wheels.....	11
Bild 4: RCS-85/SW .....	11
Bild 5: 19 Zoll-Server .....	12
Bild 6: CL1000 Slideaway .....	12
Bild 7: Adapterkabel SPHD zu VGA / USB.....	12
Bild 8: RME HDSPe .....	13
Bild 9: RME Multiface II .....	13
Bild 10: RME ADI 4 DD .....	13
Bild 11: USRP N200.....	14
Bild 12: USRP B100.....	15
Bild 13: PCS Verstärker.....	15
Bild 14: 3B0K1A .....	16
Bild 15: DAB-Maskenfilter.....	16
Bild 16: Signalverarbeitung im Multiplexgenerator.....	17
Bild 17: hdspmixer - Bedienoberfläche zur Steuerung des Hardwaremischers .....	18
Bild 18: Transportfenster von QJackCtl.....	19
Bild 19: ebumeter .....	19
Bild 20: Einige Plugins aus Calf Studio Gear .....	20
Bild 21: Signalfluss in der Software bei DAB-Betrieb.....	22
Bild 22: Signalfluss in der Software bei DRM(+)-Betrieb.....	23
Bild 23: Multiplexgenerator (oben) und VHF-Sendeeinheit (unten) .....	24
Bild 24: Multiplexgenerator Frontansicht .....	25
Bild 25: Multiplexgenerator Rückansicht .....	25
Bild 26: VHF-Sendeeinheit Frontansicht .....	27
Bild 27: VHF-Sendeeinheit Rückansicht .....	27
Bild 28: HDSPConf - Einstellungen des HDSPe.....	28
Bild 29: Statusfenster von „QjackCtl“ .....	28
Bild 30: Verbindungsfenster von „QjackCtl“ .....	28
Bild 31: FSV 0 dB Eingangsdämpfung.....	41
Bild 32: 10 dB Eingangsdämpfung.....	41
Bild 33: FSV 20 dB Eingangsdämpfung.....	41
Bild 34: FSV 30 dB Eingangsdämpfung.....	41
Bild 35: Überprüfen des Ausgangsdatenstroms, Empfang mittels DAB-Stick (links) und über aufgezeichnete ETI – Datei (rechts) .....	43
Bild 36: Multiplexaufbau DAB-Scout.2 .....	44

Bild 37: 1 dB - Kompressionspunkt .....	46
Bild 38: Messung des 1 dB - Kompressionspunkt .....	46
Bild 39: Kennlinie PCS .....	47
Bild 40: Verstärkung PCS.....	47
Bild 41: Spektrum vor und nach einem nichtlinearen System.....	48
Bild 42: Intercept-Punkt k2 .....	49
Bild 43: Ausgangsspektrum eines nichtlinearen Systems bei Zweitonaussteuerung.....	50
Bild 44: Intercept-Punkt 2. und 3. Ordnung .....	51
Bild 45: Messung des IP3-Punkt .....	52
Bild 46: IP3-Messung des „PCS“-Verstärkers 10 W Ausgangsleistung .....	53
Bild 47: IP3-Messung des „Electrolink“-Verstärkers 10W Ausgangsleistung .....	53
Bild 48: IP3-Messung des Electrolink-Verstärkers 120W Ausgangsleistung.....	54
Bild 49: Messung des Frequenzgangs.....	54
Bild 50: Messung des Frequenzgangs mit Multicarrier-Signal.....	55
Bild 51: Frequenzgang „PCS“ .....	55
Bild 52: Frequenzgang Electrolink.....	56
Bild 53: Messung über die Qualität der HF-Signale .....	56
Bild 54: Spektrum des DAB-Signals des USRP.....	58
Bild 55: Schulterabstand PCS 10 W DAB-Signal.....	58
Bild 56: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers 10 W DAB-Signal.....	58
Bild 57: Schulterabstand des Electrolink-Verstärkers bei 120 W DAB-Signal .....	58
Bild 58: Spektrum des DAB-Signals des SDB 601 .....	59
Bild 59: Konstellationsdiagramm am Ausgang des USRP .....	60
Bild 60: Konstellationsdiagramm am Ausgang des PCS Verstärker mit 10 W.....	60
Bild 61: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 10 W.....	60
Bild 62: Konstellationsdiagramm am Ausgang des Electrolink Verstärkers 120 W.....	60
Bild 63: Konstellationsdiagramm des SDB 601 .....	61
Bild 64: Amplitude & Phase am Ausgang des USRP .....	61
Bild 65: Amplitude & Phase PCS 10W + Filter.....	61
Bild 66: Amplitude & Phase Electrolink 10 W + Filter.....	62
Bild 67: Amplitude & Phase Electrolink 120 W + Filter.....	62
Bild 68: Amplituden- und Phasenverzerrungen des SDB 601 .....	62
Bild 69: Messung der CCDF und des Crestfactors (andere Grafik).....	63
Bild 70: CCDF und Crestfaktor am Ausgang des USRP .....	63
Bild 71: CCDF und Crestfaktor nach dem PCS Verstärker 10 W .....	63
Bild 72: CCDF und Crestfaktor nach dem Electrolink Verstärker 10 W .....	64
Bild 73: CCDF und Crestfaktor nach dem Elektrolink Verstärker 120 W .....	64
Bild 74: CCDF und Crestfaktor des SDB 601 .....	64

Bild 75: I/Q-Ungleichheit am Ausgang des USRP .....	65
Bild 76: I/Q-Ungleichgewicht PCS 10 W + Filter .....	65
Bild 77: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 10 W + Filter .....	65
Bild 78: IQ-Ungleichgewicht Electrolink 120 W + Filter .....	65
Bild 79: I/Q-Ungleichheit des SDB 601 .....	66
Bild 80: MER(f) des USRP .....	67
Bild 81: MER(f) PCS 10 W + Filter .....	67
Bild 82: MER(f) USRP + Electrolink 10 W + Filter .....	67
Bild 83: MER(f) USRP + Electrolink 120 W + Filter .....	67
Bild 84: MER(f) des SDB 601 .....	68
Bild 85: Modulationsfehler am Ausgang des USRP .....	69
Bild 86: Modulationsfehler PCS 10 W + Filter .....	69
Bild 87: Modulationsfehler Electrolink 10 W + Filter .....	69
Bild 88: Modulationsfehler Electrolink 120 W + Filter .....	69
Bild 89: Modulationsfehler des SDB 601 .....	70
Bild 90: Gesamtübersicht USRP .....	71
Bild 91: Gesamtübersicht PCS 10 W + Filter .....	71
Bild 92: Gesamtübersicht Electrolink 10 W + Filter .....	71
Bild 93: Gesamtübersicht Electrolink 120 W + Filter .....	71
Bild 94: Gesamtübersicht SDB 601 .....	72
Bild 95: Messung über das Einhalten der Spektralmaske .....	73
Bild 96: DAB-Signalverlauf (oberes Seitenband) .....	74
Bild 97: DRM-Signalverlauf (oberes Seitenband) .....	74

### Anlage 3: Produktliste

Artikel	Anzahl	Preis netto	Bezugsquelle
Thon Rack 8U Live 50 Wheels	1	198,32 €	<a href="http://www.thomann.de/de/thon_rack_8he_live_50_mit_rolle.htm">http://www.thomann.de/de/thon_rack_8he_live_50_mit_rolle.htm</a>
Thon Rack 4U Eco 45	1	78,99 €	<a href="http://www.thomann.de/de/thon_rack_4he_economy_45.htm">http://www.thomann.de/de/thon_rack_4he_economy_45.htm</a>
RCS-85/SW Rack-Steckdosenleiste	2	57,06 € 114,12 €	<a href="http://www.ltt-versand.de/Ton/Cases-Racks-und-Taschen/Case/Rack-Zubehoer/Rack-Steckdosenleiste/RCS-85-SW-Rack-Steckdosenleiste::61204.html">http://www.ltt-versand.de/Ton/Cases-Racks-und-Taschen/Case/Rack-Zubehoer/Rack-Steckdosenleiste/RCS-85-SW-Rack-Steckdosenleiste::61204.html</a>
1HE Intel Single-CPU CSE512 Server	1	1089 €	<a href="http://www.thomas-krenn.com/de/produkte/server-systeme/rack-server/1he-server/intel-single-cpu/intel-single-cpu-cse512.html">http://www.thomas-krenn.com/de/produkte/server-systeme/rack-server/1he-server/intel-single-cpu/intel-single-cpu-cse512.html</a>
TFT Konsole CL1000 Slideway	1	479 €	<a href="http://www.ute.de/produkte/kvm/tft-schubladen/tft-schublade-ohne-kvm-switch/tft-konsole-cl1000-slideway-von-aten.html">http://www.ute.de/produkte/kvm/tft-schubladen/tft-schublade-ohne-kvm-switch/tft-konsole-cl1000-slideway-von-aten.html</a>
2L-5202UP - 1,8 m USB KVM Kabel	1	11,10 €	<a href="http://www.ute.de/produkte/kvm/kvm-zubehoer/2l-5202up-1-8-m-usb-kvm-kabel-von-aten.html">http://www.ute.de/produkte/kvm/kvm-zubehoer/2l-5202up-1-8-m-usb-kvm-kabel-von-aten.html</a>
RME HDSPe PCIe	1	268,07 €	<a href="http://www.thomann.de/de/rme_hdsp_pcie.htm">http://www.thomann.de/de/rme_hdsp_pcie.htm</a>
RME Multiface II	1	531,93 €	<a href="http://www.thomann.de/de/rme_multiface_ii.htm">http://www.thomann.de/de/rme_multiface_ii.htm</a>
RME ADI 4 DD	1	486,55 €	<a href="http://www.thomann.de/de/rme_adi_4_dd.htm">http://www.thomann.de/de/rme_adi_4_dd.htm</a>
RME Uni-Rack	1	37,82 €	<a href="http://www.thomann.de/de/rme_halterung_19.htm">http://www.thomann.de/de/rme_halterung_19.htm</a>
DAP 19 Zoll Stecker-Panel 2U	2	3,53 € 7,06 €	<a href="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&amp;utm_medium=cpc">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&amp;utm_medium=cpc</a>
Rackschublade	1	41,18 €	<a href="http://www.thomann.de/de/thon_rackschublade_2he.htm">http://www.thomann.de/de/thon_rackschublade_2he.htm</a>
USRP N200	1	1188 €	<a href="https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT">https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT</a>
WBX 50-2200 MHz Rx/Tx	1	378 €	<a href="https://www.ettus.com/product/details/WBX">https://www.ettus.com/product/details/WBX</a>
SNT HRP 300 48	1	71,85 €	<a href="http://www.reichelt.com/Schaltnetzteile-Case-geschlossen/SNT-HRP-300-48/3/index.html?&amp;ACTION=3&amp;LA=446&amp;ARTICLE=108273&amp;GROUPID=4959&amp;artnr=SNT+HRP+300+48">http://www.reichelt.com/Schaltnetzteile-Case-geschlossen/SNT-HRP-300-48/3/index.html?&amp;ACTION=3&amp;LA=446&amp;ARTICLE=108273&amp;GROUPID=4959&amp;artnr=SNT+HRP+300+48</a>
Boxed 170-230MHz 50W Band III VHF TV Driver	1	539,99 €	<a href="http://www.pcs-electronics.com/high-gain-band-boxed-amplifier-p-2181.html?osCsid=0369fece4e3c5f1f793ca38185f73c62">http://www.pcs-electronics.com/high-gain-band-boxed-amplifier-p-2181.html?osCsid=0369fece4e3c5f1f793ca38185f73c62</a>

LA 9/200 24V	1	114,86 €	<a href="http://de.farnell.com/fischer-elektronik/la-9-200-24v/kuhlkorper-lufter-24v/dp/1222517">http://de.farnell.com/fischer-elektronik/la-9-200-24v/kuhlkorper-lufter-24v/dp/1222517</a>
CN-103LN	1	78,99 €	<a href="http://www.thiecom.de/index.php?sid=ab2ab59a265e3b43cd62a05fa05831ad&amp;cl=details&amp;anid=123457c1656d07826.13710581&amp;listtype=search&amp;searchparam=CN-103LN">http://www.thiecom.de/index.php?sid=ab2ab59a265e3b43cd62a05fa05831ad&amp;cl=details&amp;anid=123457c1656d07826.13710581&amp;listtype=search&amp;searchparam=CN-103LN</a>
Ecoflex 15 Plus	20 m	5,46 €/m 109,24 €	<a href="http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/SSB-Kabel/ecofex15pl.htm">http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/SSB-Kabel/ecofex15pl.htm</a>
KMT-11	1	22,52 €	<a href="http://www.kabel-kusch.de/ERDUNG/erdung.htm">http://www.kabel-kusch.de/ERDUNG/erdung.htm</a>
NLP-50-100	1	33,45 €	<a href="http://www.kabel-kusch.de/ERDUNG/erdung.htm">http://www.kabel-kusch.de/ERDUNG/erdung.htm</a>
GPA170-230	1	29,37 €	<a href="http://www.thiecom.de/index.php?sid=ab2ab59a265e3b43cd62a05fa05831ad&amp;cl=details&amp;anid=123457c16413055b2.76012161&amp;listtype=search&amp;searchparam=GPA170-230">http://www.thiecom.de/index.php?sid=ab2ab59a265e3b43cd62a05fa05831ad&amp;cl=details&amp;anid=123457c16413055b2.76012161&amp;listtype=search&amp;searchparam=GPA170-230</a>

#### Anlage 4: Softwareverzeichnis

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

## Quellenverzeichnis

---

[1] <http://www.kanalplus.fm/site/index.php?side=frekvenser.php>

[2] [http://www.bakom.admin.ch/themen/radio\\_tv/01214/02292/04351/index.html?lang=de](http://www.bakom.admin.ch/themen/radio_tv/01214/02292/04351/index.html?lang=de)

[3] Manfred Stoeckl Digitale Musikproduktion, Brotstraße 6, 54290 Trier, [digitalemusikproduktion.de](http://digitalemusikproduktion.de)

[4] Dieses Kapitel orientiert sich an: Christoph Rauscher: Grundlagen der Spektrumanalyse

[5] Dieses Kapitel orientiert sich an der Application Note „Messen mit modernen Spektrumanalysatoren“ von Detlev Liebl, Rohde & Schwarz, Version Feb. 2013 – 1MA201\_07d

[6] A. Steil, F. Schad, M. Feilen, M. Köhler, J. Lehnert, E. Hedrich, G. Kilian: Digitising VHF FM sound broadcasting with DRM+ (DRM Mode E)