

# Abschlussbericht

Projektvorhaben mit Modellversuch

## Erweiterung des Systems DAB/DAB+ um die Möglichkeit der lokalen Auseinanderschaltung innerhalb von Gleichwellennetzen

Berichtszeitraum:  
1.11.2015 bis 31.10.2017

Fabian Schrieber (IfN), Dr. Dirk Jaeger (NLM), Prof. Dr. Ulrich Reimers (IfN)

Braunschweig, Hannover, 31. Januar 2018

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Executive Summary

Die kommerzielle Einführung von DAB+ erfolgt in Niedersachsen sehr zögerlich. Insbesondere Hörfunkveranstalter aus der Privatwirtschaft haben Bedenken, die für eine Verbreitung ihrer Programme über das digitale Medium notwendigen Investitionen zu tätigen. Ihre Zurückhaltung begründen sie größtenteils mit unternehmerischen Risiken und Nachteilen, die durch eine Migration von UKW auf DAB+ entstehen würden.

Auf Einladung der Niedersächsischen Landesmedienanstalt (NLM) trafen sich am 19. Mai 2015 Vertreter niedersächsischer Hörfunkveranstalter, um der NLM zu erläutern, welche faktischen Nachteile eine Hörfunkverbreitung per DAB+ gegenüber der UKW-Verbreitung von heute mit sich bringen würde. Dabei wurde insbesondere betont, dass ein Großteil der Werbeeinnahmen durch die lokale Verbreitung von Werbeinformationen generiert wird. Einer der Hörfunkveranstalter verbreitet ein unterschiedliches Werbeangebot zeitgleich in über 20 Lokalgebieten in Niedersachsen. Die Anforderung nach lokaler Differenzierbarkeit des Angebotes steht der effizienten Nutzung großflächiger Gleichwellennetze gegenüber.

Am 1. November 2015 wurde ein Projekt mit einem technischen Modellversuch gestartet, in dessen Rahmen wissenschaftlich untersucht wurde, auf welche Art eine zeitlich begrenzte Auseinanderschaltung der Gleichwellennetze bei einer DAB+-Übertragung erfolgen kann. Das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) übernahm eine 50-prozentige Projektförderung. Für die wissenschaftlich-technischen Untersuchungen wurde das Institut für Nachrichtentechnik (IfN) der Technischen Universität Braunschweig gewonnen.

Nachdem vom IfN verschiedene technische Möglichkeiten für eine Verbreitung von lokalen Informationen in verschiedenen Regionen in einem Gleichwellennetz analysiert wurden, entschieden die Projektpartner einvernehmlich, welche dieser Lösungen im weiteren Projektverlauf vertiefend untersucht, technisch umgesetzt und im Feld erprobt werden soll. Die bevorzugte Lösung wurde im ersten Projektabschnitt vom IfN in Software realisiert und durch erste Versuche an einem Laboraufbau verifiziert. Im zweiten Projektabschnitt erfolgte durch das IfN die Entwicklung eines vollständigen Demonstrators bestehend aus einer funktionsfähigen DAB+-Hardware inklusive der für die Auseinanderschaltung notwendigen technischen Ergänzungen in dreifacher Ausfertigung. Es wurden drei Senderstandorte auf Universitätsgebäuden für den Feldversuch identifiziert und mit ebenfalls selbst entwickeltem sendetechnischem Gerät aufgebaut. Für die Signalheranführung an die Senderstandorte wurde das Datennetz der Universität eingesetzt.

In den Tests wurde nachgewiesen, dass die gefundene Lösung die temporäre Auseinanderschaltung grundsätzlich ermöglicht und dabei die weitere Verwendung von heute bereits eingesetzten DAB+-Empfangsgeräten erlaubt. Die lokalen Programminhalte sind in Sendernähe empfangbar. Einschränkungen erfolgen an den Grenzen der Lokalgebiete. Die Verbreitung der im gesamten Gleichwellennetz einheitlich verbreiteten Programminhalte erfolgt hingegen ohne Einschränkung. Die eigentliche Erfindung besteht in einer Referenz-Information, die pro lokalisiertem Programm eines Multiplex' etwa 5,5 Prozent der bestehenden DAB+-Übertragungskapazität konsumiert. Der vorliegende Abschlussbericht dokumentiert die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse.



## Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung .....	2
2	Einführung .....	3
3	Grundlagen des Systems DAB/DAB+ .....	3
3.1	Framing .....	4
3.2	Differentielle Modulation .....	4
4	Überblick verschiedener Varianten der Auseinanderschaltung .....	5
5	Systemtechnische Untersuchungen .....	6
5.1	Funktionsweise .....	6
5.2	Software Realisierung .....	7
5.2.1	Sendeseitige Signalverarbeitung .....	8
5.2.2	Empfängerseite Signalverarbeitung .....	8
5.3	Labortests .....	9
5.3.1	Verifikation des Empfangs mit handelsüblichen DAB+-Geräten.....	9
5.3.2	Untersuchungen der Empfangbarkeit mittels Simulationen.....	10
6	Feldversuch.....	14
6.1	Planung .....	14
6.2	Senderstandorte .....	14
6.3	Senderaufbau.....	15
6.4	Multiplexkonfiguration .....	17
6.5	Ergebnisse .....	17
7	Dissemination .....	20
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	22
9	Referenzen .....	23
10	Danksagung .....	24
11	Anhang .....	25
11.1	Liste der Projekttreffen.....	25
11.2	Polygon des ursprünglichen Gebietes für den Feldversuch.....	26

## 1 Vorbemerkung

Eine der bedeutenden Stärken von DAB/DAB+ besteht in der Möglichkeit, großflächige Sendernetze durch Gleichwellennetze frequenzeffizient realisieren zu können. Realisiert werden diese sogenannten Single Frequency Networks (SFN) durch die Nutzung derselben Frequenz an allen Senderstandorten. Voraussetzung ist, dass von allen an einem SFN beteiligten Senderstandorten die exakt selben Daten ausgestrahlt werden. Dieses Konzept steht damit im Widerspruch zur Einführung lokaler Werbung und anderer lokaler Hörfunkdienste, die gerade nicht in großflächigen SFNs dieselben Daten benötigen, sondern für die unterschiedliche Daten von unterschiedlichen Senderstandorten ausgestrahlt werden. Das Niedersächsische Mediengesetz (NMedienG) unterstützt das Aussenden von lokalem Hörfunk durch lokale Veranstalter und lokale Fensterschaltungen in den landesweit ausgestrahlten Programmen. Beide Dienstangebote werden in Niedersachsen mit UKW realisiert und sind Bestandteil der aktuellen Geschäftsmodelle niedersächsischer Hörfunkveranstalter.

Aus diesem Grund wurde durch die Niedersächsische Landesmedienanstalt (NLM) die Durchführung eines Modellversuches bei der Niedersächsischen Staatskanzlei (StK) nach § 31 Abs. 2 NMedienG angezeigt. Der Modellversuch erfolgte auf Basis einer durch die StK erlassenen Verordnung. Er hatte zum Ziel, die oben beschriebene Problematik wissenschaftlich zu untersuchen und Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) konnte für eine Projektbeteiligung gewonnen werden. Die wissenschaftlich-technische Betreuung erfolgte durch das Institut für Nachrichtentechnik (IfN) der Technischen Universität Braunschweig.

Der Modellversuch unterteilte sich in zwei Projektphasen. Die erste Projektphase diente hauptsächlich der Untersuchung von grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten. Sie endete mit der Festlegung einer technischen Möglichkeit und der Untersuchung der Variante durch Computer-Simulationen. In der zweiten Projektphase wurde die Variante in Form eines Demonstrators realisiert. Das Projekt wurde mit einem Feldversuch abgeschlossen, in dem die erwartete Funktionsfähigkeit der gefundenen Lösung nachgewiesen werden konnte.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse stoßen insbesondere bei Industrie und Öffentlich-rechtlichen Landeshörfunkanstalten auf Interesse. Aus diesem Grund hat das IfN sich bereit erklärt, das für den Feldversuch aufgebaute Sendernetz in Braunschweig noch einige Monate weiter zu betreiben und an dem Thema interessierte Firmen und Organisationen die Demonstration der Ergebnisse im Feld zu ermöglichen. Um abschätzen zu können, ob die Projektergebnisse auch für eine kommerzielle Anwendung geeignet sind, müssen weitere Arbeiten durchgeführt werden. Diese Arbeiten können jedoch nicht im Rahmen des nun abgeschlossenen Projektes erfolgen.

## 2 Einführung

Der Digitale Hörfunk DAB+ wird derzeit in Deutschland eingeführt und soll den analogen Hörfunk als letztes analoges Massenmedium digitalisieren. Eine Besonderheit von DAB+ ist die Tatsache, dass DAB+-Sendernetze als Gleichwellennetze ausgelegt werden können, die spektral und in ihrer Leistungsbilanz besonders effizient sind. Der Nutzung von Gleichwellennetzen stehen aber aktuelle Geschäftsmodelle, insbesondere von privaten Hörfunkanbietern, entgegen, die beispielsweise in Niedersachsen landesweit ausgestrahlte Programme zu beliebigen Zeiten durch lokal ausgestrahlte Nachrichten oder Werbeblendungen in lokale Programmfenster aufteilen. Im Extremfall werden Programmanteile eines in ganz Niedersachsen verbreiteten Hörfunkprogramms jeweils nur von einem einzigen UKW-Sender ausgestrahlt.

Innerhalb des Berichtszeitraums hat das IfN in der ersten Projektphase verschiedene Techniken auf ihre Tauglichkeit für die temporäre Auseinanderschaltung eines DAB+-Gleichwellennetzes untersucht. Einige dieser Techniken sind dem IfN aus der Welt des Digitalen Fernsehens wohlbekannt; weitere Techniken wurden als ergänzende Lösungsansätze erarbeitet.

Nachdem in Kapitel 3 die notwendigen Grundlagen des Systems DAB+, das sind im Besonderen der Frame-Aufbau sowie die differentielle Modulation, bzgl. des Projektvorhabens eingeführt wurden, werden in Kapitel 4 kurz die verschiedenen betrachteten Techniken zur Auseinanderschaltung dargestellt und bzgl. der SFN- und Empfänger-Konformität bewertet. Die Technik, die anschließend zur Realisierung ausgewählt wurde, wird in Kapitel 5 vorgestellt. Die Funktionsweise wird in Abschnitt 5.1 erläutert und die Software Realisierung in Abschnitt 5.2 dargestellt. Untersuchungen zur Empfangbarkeit der Lokalprogramme sowie der Nachweis der Empfangbarkeit mit handelsüblichen DAB+-Empfängern werden in Abschnitt 5.3 vorgenommen. Die Planung und der Aufbau der Sender für den Modellversuch in Braunschweig werden in Kapitel 6 dargestellt, bevor die Ergebnisse des Modellversuchs in Kapitel 6.5 gezeigt werden. Die Dissemination des Projektvorhabens wird in Kapitel 7 dokumentiert.

## 3 Grundlagen des Systems DAB/DAB+

Die technische Basis von DAB (Digital Audio Broadcasting) wurde in dem von der Europäischen Kommission geförderten Eureka-Projekt 147 entwickelt, welches im Jahre 1987 ins Leben gerufen wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen in die europäische Norm ETSI EN 300 401 [1] ein, deren erste Version im Februar 1995 veröffentlicht wurde. In den Jahren 1997, 2000 und 2006 gab es verschiedene Aktualisierungen der Norm. Erst im Januar 2017 wurde eine neue Version mit der Versionsnummer V2.1.1 durch ETSI verabschiedet. Waren in den früheren Versionen vier verschiedene Transmission Modes (I bis IV) beschrieben, so findet in dieser aktuellen Version ausschließlich ein einziger

Transmission Mode Anwendung. Dieser Transmission Mode I bildet die Grundlage für die weiteren Betrachtungen.

Wichtig für das Verständnis der im Rahmen dieses Modelversuchs gemachten Erfindung sind der Aufbau des Transmission Frames und die Funktionsweise der angewendeten differentiellen Modulation. Weil DAB+ im Zwischenbericht [2] zu diesem Modellversuch bereits grundlegend eingeführt wurde, wird in dem vorliegenden Abschlussbericht ausschließlich auf diese beiden wichtigsten Komponenten von DAB+ eingegangen.

### 3.1 Framing

Die Übertragung der Daten ist in sog. *Transmission Frames* organisiert. Dabei werden zeitlich in fest definierter Reihenfolge (siehe Abbildung 1) die Synchronisationsdaten (im *Synchronization Channel*), Signalisierungsdaten (im *Fast Information Channel*) und anschließend die Audio- bzw. Nutzdaten (im *Main Service Channel, MSC*) übertragen.

Der Synchronisationskanal besteht aus einem Nullsymbol, das zur zeitlichen Synchronisation des Empfängers genutzt wird und einem Phasenreferenzsymbol, das die Referenz für die differentielle Modulation (vgl. Abschnitt 3.2) darstellt.

Im Signalisierungskanal werden die Informationen zum Aufbau des Nutzdatenkanals übertragen sowie bspw. das Label der Audioprogramme und weitere Signalisierungsinformationen. Dabei werden die Daten in sog. *Fast Information Groups (FIG)* verkapselt, die wiederum in sog. *Fast Information Blocks (FIB)* zusammengefasst werden. Im Transmission Mode I werden 12 FIB je Frame übertragen. In den FIG befinden sich unterschiedlich wichtige Signalisierungsinformationen, die unterschiedlich häufig (alle 96 ms bis weniger als alle 10 s) ausgespielt werden.

Im Nutzdatenkanal werden im Transmission Mode I vier Common Interleaved Frames (CIFs) hintereinander übertragen. Ein CIF beinhaltet zu jedem im DAB+-Ensemble/-Multiplex enthaltenen Audioprogramm Daten für 24 ms Spielzeit und fasst 864 Capacity Units (CUs), wobei eine CU insgesamt 64 bit enthält und 3 CU einer Datenrate von 8 kbit/s entsprechen. Ein Audioprogramm ist für die Gültigkeit der Multiplexkonfiguration in jedem CIF in einem festgelegten *Subchannel* zu finden. Ein Subchannel ist definiert durch die Position und Kapazität im CIF.

### 3.2 Differentielle Modulation

Nach der Fehlerschutzkodierung und dem zeitlichen Interleaving (nur MSC) werden je zwei Bits QPSK moduliert. Die differentielle Modulation erfolgt anschließend rekursiv, wobei je ein DQPSK-Symbol (Differentielles QPSK-Symbol) und ein QPSK-Symbol eines OFDM-Trägers

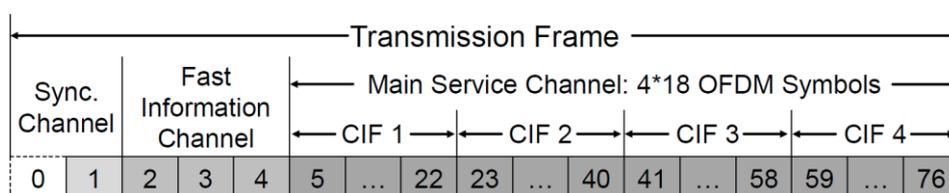


Abbildung 1: Aufbau des Übertragungsfensters

mit derselben Ordnungsnummer differentiell moduliert wird. Begonnen wird mit den QPSK-Symbolen, die im ersten OFDM-Symbol des FIC (#2 in Abbildung 1) übertragen werden sollen. Diese werden mit den festen DQPSK-Symbolen des Phasenreferenzsymbols differentiell moduliert. Anschließend werden die QPSK-Symbole des OFDM-Symbols #3 mit den DQPSK-Symbolen des OFDM-Symbols #2 moduliert. Dieser Prozess wird so bis zum letzten OFDM-Symbol des Transmission Frame fortgesetzt. Mit jedem Transmission Frame wird ein Phasenreferenzsymbol übertragen, das den Startpunkt der differentiellen Modulation und Demodulation im Empfänger bildet.

Dadurch, dass die differentielle Modulation eine rekursive Operation darstellt, ist jedes DQPSK-Symbol von allen vorherigen DQPSK-Symbolen des Transmission Frames und den zugrundeliegenden Daten abhängig.

## 4 Überblick verschiedener Varianten der Auseinanderschaltung

In der ersten Phase des Projekts wurden verschiedene Ansätze der Auseinanderschaltung betrachtet. In Tabelle 1 sind die betrachteten Ansätze aufgelistet. Zu jedem Ansatz ist angegeben, ob diese SFN-konform sind bzw. Interferenzen zu erwarten sind, ob bestehende Empfänger den Ansatz unterstützen sowie eine kurze Beschreibung des Ansatzes. Ausführlichere Erläuterungen zu den Ansätzen sind im Zwischenbericht [2] zu finden.

Realisiert wurde das Verfahren der *lokalen Überspielung mit Phasenangleichung*. Bei der Auswahl des Ansatzes wurde die Kompatibilität zu bestehenden Empfängern als notwendig eingestuft. Die Nutzung des Ansatzes *Kapazitäts-Zukauf* wird aufgrund der vielen parallel auszusendenden Lokalprogramme sowie den dafür vorhandenen Multiplex-Frequenzen als nicht wirtschaftlich umsetzbar erachtet. Aus demselben Grund sowie dem Umstand, dass für den Ansatz *Kapazitäts-Aufteilung* das Feature dynamische Multiplex-Rekonfiguration [3] im Empfänger unterstützt werden muss, wurde dieser Ansatz auch nicht weiter verfolgt. Untersuchungen dazu werden in Sachsen-Anhalt durchgeführt. Der Ansatz *Seitenkanal Internet* wurde im Rahmen einer Masterarbeit [4] am Institut für Nachrichtentechnik untersucht.

Tabelle 1 Betrachtete Ansätze zur Auseinanderschaltung

Ansatz	SFN-konform	Empfänger-kompatibel	Anmerkung
Kapazitäts-Zukauf	Ja	Ja	Parallele Aussendung der Lokalprogramme im gesamten SFN, Kapazitätsbedarf steigt linear mit Anzahl an Lokalprogrammen, problematisch bei vielen Lokalprogrammen
Kapazitäts-Aufteilung	Ja	Teilweise	Reduktion der Audioqualität während des Lokalbetriebs, sonst wie Kapazitäts-Zukauf, problematisch bei vielen Lokalprogrammen

Ansatz	SFN-konform	Empfänger-kompatibel	Anmerkung
Seitenkanal UKW / DRM	Ja	Nein	Aussendung der Lokalprogramme über UKW/DRM, permanente Frequenzbelegung für UKW/DRM notwendig, hybride Empfänger notwendig
Seitenkanal Internet	Ja	Nein	hybride Empfänger notwendig, Internet-Anbindung notwendig, mögl. Zusatzkosten für Endnutzer, mögl. Unterbrechungen beim Umschalten
Hierarchische Modulation (vgl. DVB-NGH)	Nein	Nein	Lokalprogramme via Codemultiplex eingebettet, komplexe Empfängerarchitektur, Interferenzzone zwischen lokalen Empfangsgebieten
Orthogonale Träger (vgl. DVB-NGH)	Ja	Nein	Aussendung der Lokalprogramme auf unterschiedlichen OFDM-Trägern, reduziert Multiplexkapazität
Nutzung Schutzbänder (vgl. DVB-C2)	Ja	Nein	Nutzbarmachung der Frequenzschutzbänder, benötigt präzise Abstimmung aller Sender
Lokale Überspielung mit Phasenangleichung	Nein	Ja	Interferenzzone zwischen lokalen Empfangsgebieten

## 5 Systemtechnische Untersuchungen

### 5.1 Funktionsweise

Bei der lokalen Überspielung mit Phasenangleichung werden die Programmfenster mit unterschiedlichen lokalen Inhalten von den jeweiligen im Lokalgebiet befindlichen Sendern im SFN ausgesendet. Durch die Ausspielung unterschiedlicher Programminhalte auf derselben Frequenz entstehen zwischen den verschiedenen Lokalgebieten Interferenzen. Dieser Effekt ist allgemein bekannt.

Bei einer DAB+-Übertragung entstehen Interferenzen jedoch nicht nur während der Zeiten, zu denen die Lokalfenster mit unterschiedlichen Inhalten gesendet werden, sondern auch während der nachfolgenden Übertragung von Programminhalten, die im gesamten SFN identisch sind und sich eigentlich nicht stören dürften. Grund für diese Inter-Service-Interferenz ist die Verwendung der in Abschnitt 3.2 erläuterten differentiellen Modulation. Durch die Aussendung der lokalen Programminhalte unterscheiden sich nun auch die Sendesymbole der SFN-weiten Programme. Die Folge ist eine verschlechterte Empfangbarkeit der SFN-weiten Programminhalte und eine verschlechterte Empfangbarkeit der ohnehin interferierenden Lokalprogramme. Der Unterschied hält nun bis zum Beginn des nächsten Transmission Frames an, da erst dort das nächste Phasenreferenzsymbol

übertragen wird und eine Phasenangleichung stattfindet (vgl. Aufbau des Transmission Frames in Abschnitt 3.1). Im Modus I findet die Phasenangleichung erst nach 4 CIFs statt. Das Einfügen von lokalen Programminhalten, die somit im ersten CIF des Transmission Frames vertreten wären, würde bewirken, dass sich die nachfolgenden Sendesymbole stören, unabhängig davon, ob es sich bei ihnen um lokale (uneinheitliche) oder globale (SFN-weit einheitliche) Sendesymbole handelt.

Um den Phasenunterschied mit dem zeitlichen Ende der lokalen Programminhalte zu stoppen und zu verhindern, dass es auch bei globalen Programminhalten zu Interferenzen kommt, muss eine zusätzliche Phasenangleichung der DAB+-Signale außerhalb der Regelphasenangleichung erfolgen. Diese vom IfN entwickelte Maßnahme besteht im Einbringen eines OFDM-Symbols mit Daten zur Phasenangleichung (aPRS) unmittelbar nach einem Lokalprogramm. Das aPRS muss dabei alle vom Einfügen des Lokalprogramms betroffenen OFDM-Träger angleichen. Dabei trägt das aPRS keine Nutzdaten und belegt 1/18 der Multiplexkapazität.

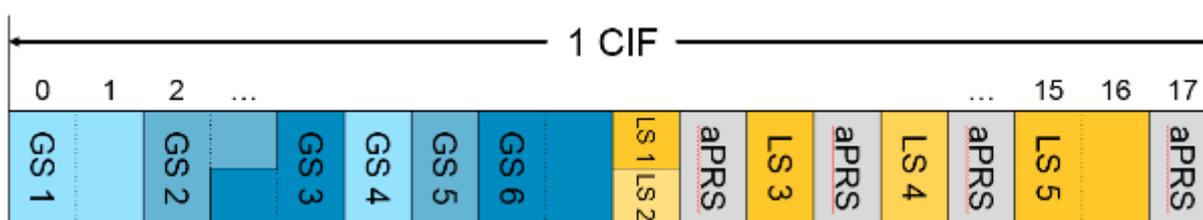


Abbildung 2: Beispielkonfiguration eines DAB+-Multiplexes mit SFN-weiten Programmen (GS) und Lokalprogrammen (LS) mit nachfolgendem zusätzlichem Phasenreferenzsymbol (aPRS)

In Abbildung 2 ist eine Beispielkonfiguration eines DAB+-Multiplexes mit dem vorgeschlagenen Verfahren zur Einbringung von Lokalprogrammen (LS) zu sehen. Nach jedem Lokalprogramm folgt ein aPRS, das den Phasenunterschied zwischen verschiedenen Sendern wieder angleicht. Die Empfangbarkeit der SFN-weiten Programme (GS) bleibt dadurch unberührt.

## 5.2 Software Realisierung

Am Institut für Nachrichtentechnik wurde eine Software basierend auf der Programmiersprache C++ entwickelt, die die Untersuchung der lokalen Auseinanderschaltung durch Computer-Simulationen ermöglicht. Dazu wurde ein DAB+-Empfänger umgesetzt, der, wie ein typisches Gerät am Markt, ein DAB+-konformes Signal erwartet und auswertet. Zusätzlich werden einige Messparameter ausgegeben. Um DAB+-Signale erzeugen zu können, ist ein standardkonformer DAB+-Modulator entwickelt worden und um die Fähigkeit, zusätzliche Phasenreferenzsymbole nach lokalen Diensten einzufügen, erweitert worden.

In Abbildung 3 ist eine Übersicht über den Aufbau der verwendeten Simulationskette mit zwei Sendern zu sehen.

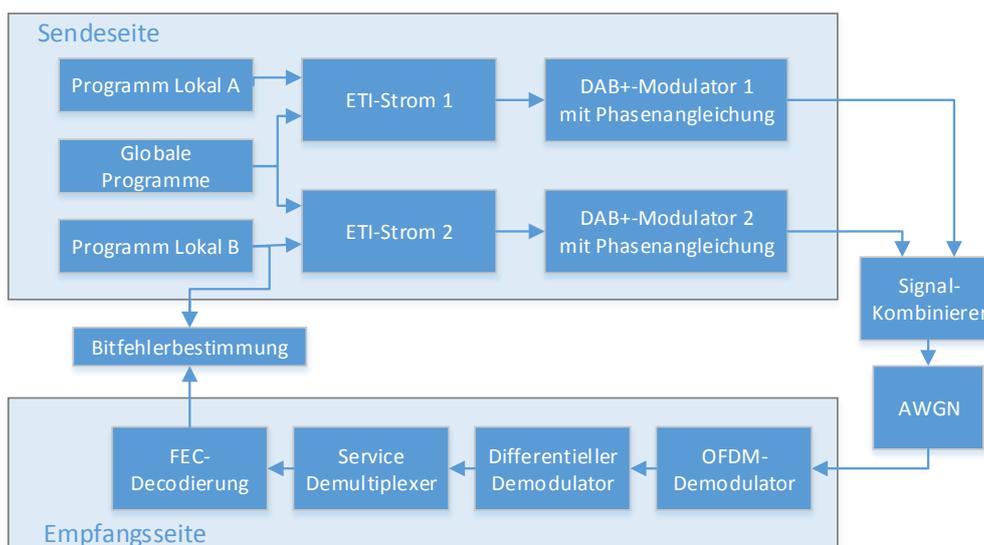


Abbildung 3: Übersicht der Simulationskette mit zwei lokalisierten Sendern

### 5.2.1 Sendeseitige Signalverarbeitung

Die sendeseitige Signalverarbeitung besteht aus der Erzeugung der Eingangsdaten, welche anschließend in einem „Ensemble Transport Interface“- (ETI-)Strom [5] verpackt werden. Die Eingangsdaten bestehen aus den notwendigen Signalisierungsinformationen (in der Abbildung nicht dargestellt), die der Empfänger benötigt, um die Payload- bzw. Audiodaten aus dem MSC zu extrahieren. Die Payload-Daten (Programm Lokal A/B, Globale Programme) sind in der Simulation Pseudo-Zufallsdaten, die erst Reed-Solomon codiert und dann mit den konfigurierbaren Signalisierungsdaten (Coderate des Faltungsschutzes, Subchannel-Size, Subchannel-Position im CIF, etc.) im ETI-Format verpackt werden. In den Simulationen unterscheiden sich die beiden ETI-Ströme 1 und 2 nur in den Subchannel-Daten der Lokalprogramme A und B. Nach den Lokalprogrammen ist ein OFDM-Symbol für das zusätzliche Phasenreferenzsymbol unbelegt, vgl. aPRS in Abbildung 2.

Der Modulator liest den ETI-Strom ein, führt die Faltungscodierung, das Zeitinterleaving, das Frame-Building, die differentielle Modulation und die OFDM-Modulation aus. Wurde ein Lokalprogramm differentiell moduliert, wird die differentielle Modulation anschließend unterbrochen und ein zusätzliches Phasenreferenzsymbol eingefügt. Anschließend arbeitet die differentielle Modulation wie zuvor weiter. Das zusätzliche Phasenreferenzsymbol ist ein mit pseudo-zufälligen Sendedaten festgelegtes Symbol und besitzt damit die Eigenschaften gewöhnlicher DAB+-Sendedaten. Das eigentliche Phasenreferenzsymbol besitzt Eigenschaften, die Empfänger zur Synchronisation und Frequenzabstimmung nutzen, und wird daher nicht genutzt.

### 5.2.2 Empfängerseite Signalverarbeitung

Der DAB+-Empfänger ist nicht auf die Lokalprogramme angepasst und erwartet ein gewöhnliches DAB+-Signal. Dazu wird die OFDM-Modulation und die differentielle Modulation rückgängig gemacht und der zu untersuchende Service, nach der Decodierung der Signalisierungsinformationen, aus dem CIF entpackt. Nach der FEC-Decodierung (Viterbi und Reed-Solomon) werden die empfangenen Daten mit den gesendeten Daten verglichen und es wird die Bitfehlerrate gemessen.

## 5.3 Labortests

Die Labortests bestanden zum einen in der Untersuchung der Empfangbarkeit mittels Computer-Simulationen und zum anderen in der Verifikation des Empfangs mit handelsüblichen DAB+-Empfängern. Ein Teil der Simulationsergebnisse wurde in [6] veröffentlicht.

### 5.3.1 Verifikation des Empfangs mit handelsüblichen DAB+-Geräten

In Abbildung 4 ist das Modell zur Aussendung von DAB+-Signalen im SFN zu sehen. Die ETI-Ströme 1 und 2, die sowohl globale als auch unterschiedliche lokale Programme enthalten, wurden mit dem Open Source Tool *ODR-dabmux* [7] generiert. Die ETI-Ströme werden entsprechend der eingestellten Multiplexkonfiguration moduliert und in den Signal-Kombinierer gegeben. Im Signal-Kombinierer werden die beiden Signale additiv überlagert, wobei das Leistungsverhältnis zwischen den beiden DAB+-Signalen in Echtzeit eingestellt werden kann. Zur Ausspielung des so generierten Summensignals wird ein sogenanntes Software-Defined-Radio-(SDR-)Frontend genutzt, das die digitalen Sendedaten in ein Radiosignal wandelt.

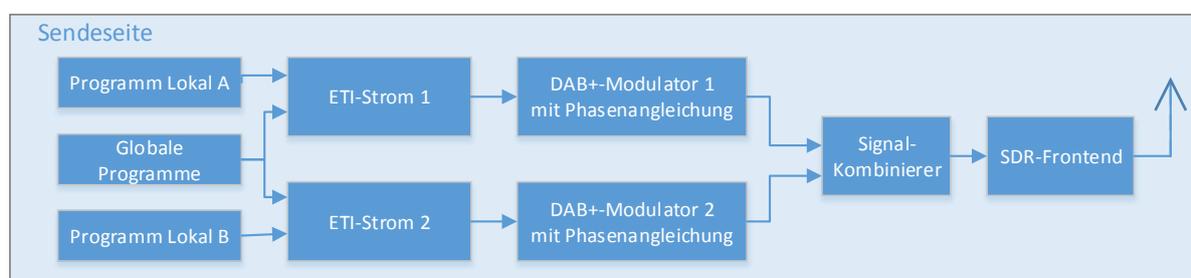


Abbildung 4: Modell zur Aussendung von DAB+-Signalen im SFN mit lokalisierten Programmen über ein Software-Defined-Radio-Frontend

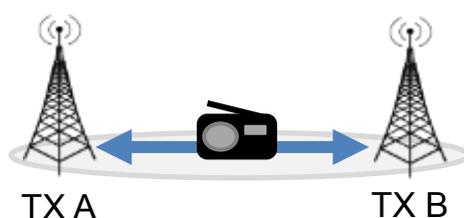


Abbildung 5: Simulierte Empfangssituation

Das ausgesendete Signal konnte mit sechs getesteten herkömmlichen DAB+-Geräten unterschiedlicher Hersteller erfolgreich empfangen werden. Das Lokalprogramm konnte nur dann nicht mehr dekodiert werden, wenn es durch zu starken Interferenzen gestört wurde, die immer dann entstanden, wenn die Leistungen der beiden DAB+-Signale sehr ähnliche Werte annahmen.

Durch die Anpassung des Sendeleistungsverhältnisses (Leistung des Senders A dividiert durch Leistung des Senders B) konnte mit diesem Test in einer ersten Näherung eine virtuelle Reise zwischen zwei DAB+-Sendern im SFN mit unterschiedlichen Lokalprogrammen umgesetzt werden. Dieses Empfangsszenario ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Empfang der globalen Programme war dabei an jeder Empfangsposition, auch zwischen

den Sendern, durchgängig möglich. Der Empfang der unterschiedlichen Lokalprogramme A und B war jeweils in der Nähe des entsprechenden Senders stets möglich. Das Sendeleistungsverhältnis war hier viel größer oder viel kleiner als 1. Bei der virtuellen Reise von Sender A zu Sender B schalteten die getesteten Geräte zunächst auf stumm. Dies geschah, wie oben erwähnt, bei ähnlich starken Sendeleistungen. Bei der weiteren virtuellen Annäherung an den Sender B wurde anschließend das Lokalprogramm B empfangen und wiedergegeben, ohne dass Umschaltmaßnahmen an den Geräten erfolgten.

### 5.3.2 Untersuchungen der Empfangbarkeit mittels Simulationen

Mittels Computer-Simulationen wurde die Empfangbarkeit von lokalen und globalen Services bestimmt. Als abhängige Variable diente das Empfangsleistungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis von Empfangsleistung A zu Empfangsleistung B mit jeweils unterschiedlichen Lokalprogrammen am virtuellen Empfangsort bestimmt. Die Grenze der Empfangbarkeit, ab der das Signal als quasi-fehlerfrei (QEF) gilt, wurde bei einer Bitfehlerrate von  $10^{-3}$  festgelegt und das dabei festgestellte Signal-zu-Rausch-Verhältnis ( $\text{SNR}_{\text{QEF}}$ ) dargestellt.

Die untersuchte Empfangssituation wird in Abbildung 5 wiedergegeben: Zwei Sender A und B senden im SFN globale und zudem jeweils unterschiedliche lokale Programme aus. Die virtuelle Empfänger-Position zwischen den beiden Sendern wird durch das Sendeleistungsverhältnis variiert. Der Empfänger kann dabei nur das Lokalprogramm dekodieren, das mit höherer Leistung empfangen wird. Die Empfangsleistung dieses Programms wird mit  $P_w$  bezeichnet; das Programm mit geringerer Empfangsleistung mit  $P_u$  und das Empfangsleistungsverhältnis wird in Dezibel mit  $10 * \lg\left(\frac{P_w}{P_u}\right)$  angegeben.

#### 5.3.2.1 Empfangbarkeit globaler Programme mit Lokalprogrammen im Multiplex

In Abbildung 6 ist das Ergebnis der Untersuchungen zur Empfangbarkeit globaler Programme zu sehen, wenn sich im selben Multiplex zudem Lokalprogramme befinden. Das dargestellte Diagramm zeigt auf der Ordinate das für einen quasi-fehlerfreien Empfang benötigte SNR. Auf der Abszisse ist das Empfangsleistungsverhältnis aufgetragen. Die Untersuchungen umfassen unterschiedliche Coderaten  $r$  jeweils mit sowie ohne eingeschalteter Phasenangleichung (aPRS). Die Zuordnung der Parameter zu den Messkurven erfolgt anhand der Legende oben rechts im Diagramm.

Bei Betrachtung der Ergebnisse mit übertragener Phasenangleichung ist zu erkennen, dass das für einen QEF-Empfang benötigte SNR konstant und damit unabhängig vom aktuellen Empfangsleistungsverhältnis ist. Die auftretenden, geringfügigen Variationen der Werte im Diagramm sind auf statistische Schwankungen bei der Rechner-Simulation zurückzuführen. Exakt dieselben SNR-Werte wurden auch bei Simulationen ohne Lokalprogramme festgestellt. Das bedeutet, dass die Empfangbarkeit der Globalprogramme durch die Anwesenheit von Lokalprogrammen mit Phasenangleichung im selben Multiplex in keiner Weise gestört wird.

Im Gegensatz dazu ist zu erkennen, dass sich der Empfang der Globalprogramme ohne aPRS zu kleinen Werten des Empfangsleistungsverhältnisses (also nach links auf der Abszisse) hin zum Teil enorm verschlechtert, während sie zu hohen Empfangsleistungsverhältnissen (siehe rechts auf der Abszisse) hin kaum beeinträchtigt wird. Je ähnlicher die Empfangsleistungen werden, desto höher ist das für den QEF-Empfang erforderliche SNR.

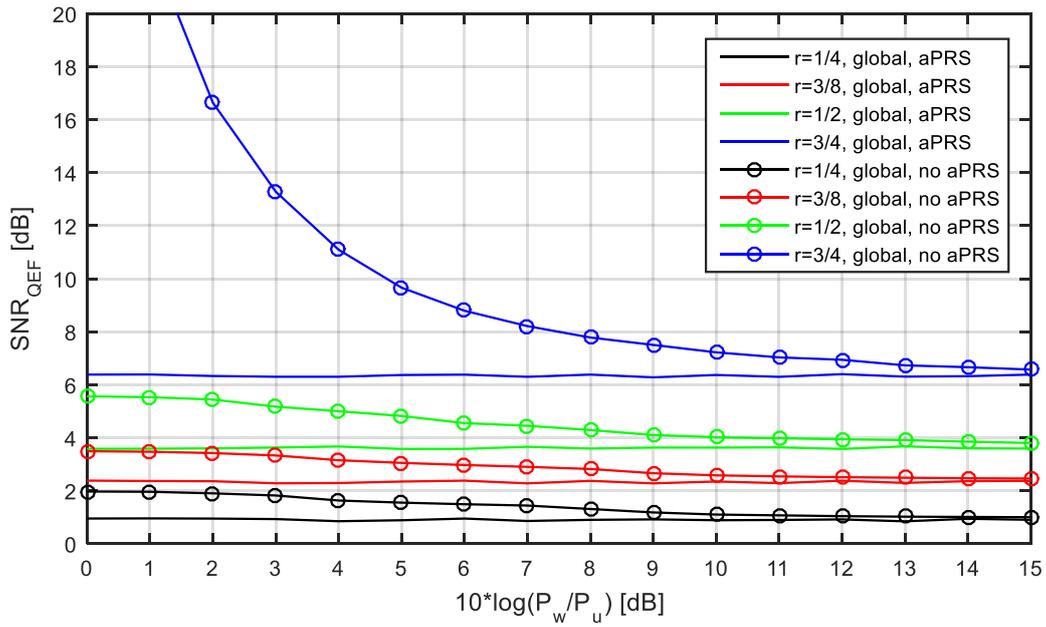


Abbildung 6: Benötigtes SNR für quasi-fehlerfreien Empfang eines globalen Programms mit und ohne Übertragung zusätzlicher Phasenangleichungssymbole

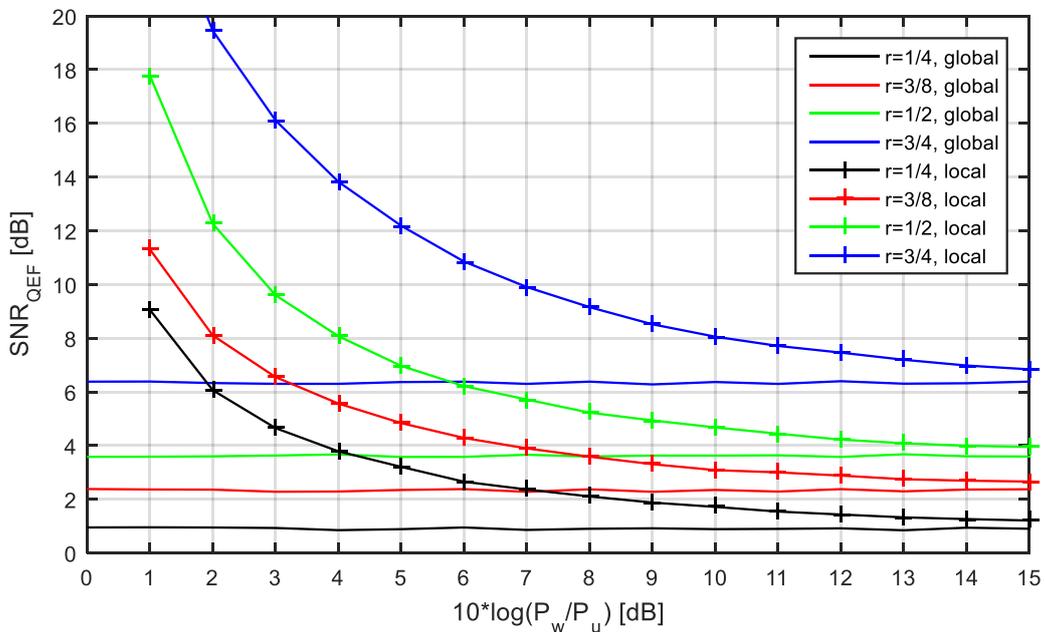


Abbildung 7: Benötigtes SNR für quasi-fehlerfreien Empfang eines Lokalprogramms mit Übertragung zusätzlicher Phasenangleichungssymbole

### **5.3.2.2 Empfangbarkeit lokaler Programme mit Phasenangleichung**

In Abbildung 7 ist das benötigte SNR zum Empfang eines Lokalprogramms mit unterschiedlichen Coderaten und unterschiedlichen Empfangsleistungsverhältnissen dargestellt. Das Lokalprogramm ist dabei so im CIF platziert, dass die Daten durch genau ein vollständiges OFDM-Symbol pro CIF übertragen werden und somit 48 CU belegen (vgl. LS 3 und 4 in Abbildung 2). Als Referenz ist das  $SNR_{QEF}$  für Globalprogramme mit aPRS gegeben. Die Lokalprogramme benötigen für einen QEF-Empfang bei hohen Empfangsleistungsverhältnissen nur geringfügig höhere SNR-Werte. Je ähnlicher das Empfangsleistungsverhältnis ist, desto höher ist das  $SNR_{QEF}$  bis kein Empfang mehr möglich ist. Zusätzlich fällt auf, dass das  $SNR_{QEF}$  bei weniger robusten Coderaten wie 3/4 und 1/2 im Vergleich zu den beiden anderen Coderaten überproportional stark ansteigt.

Das Ergebnis zeigt, dass in Gebieten mit ähnlicher Empfangsleistung der unterschiedlichen Lokalprogramme kein Empfang von Lokalprogrammen möglich ist.

### **5.3.2.3 Empfangbarkeit lokaler Programme ohne Phasenangleichung**

Abbildung 8 zeigt das benötigte SNR für den Empfang eines Lokalprogramms bei gegebenem Empfangsleistungsverhältnis. Die Lokalprogramme besitzen eine identische Konfiguration, wurden jedoch mit („+“-Marker) und ohne Phasenangleichung („o“-Marker) simuliert. Bei fehlender Phasenangleichung wird die Anforderung an das SNR zu niedrigen Empfangsleistungsverhältnissen hin drastisch erhöht. Dadurch vergrößert sich die Interferenzzone zwischen zwei Sendern. Betrachtet man umgekehrt das bei einem gegebenen SNR erforderliche Empfangsleistungsverhältnis, ergibt sich beispielsweise für die Coderate 1/4 bei einem SNR von 9 dB eine erforderliche Erhöhung des Leistungsverhältnisses um 3 dB. Bei höheren Coderaten steigt diese Erhöhung weiter.

### **5.3.2.4 Auswirkung der CU-Größe auf die Empfangbarkeit der Lokalprogramme**

Weitere, die Empfangbarkeit beeinflussende Aspekte, sind die CU-Größe eines Lokalprogramms sowie die für die Übertragung gewählte Position im CIF. Für eine effiziente Dimensionierung ist es wichtig sicherzustellen, dass bei der Übertragung der Lokalprogrammdateien diese stets auf einzelne OFDM-Symbole begrenzt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass auf ein DQPSK-Symbol mit Lokalprogrammdateien kein weiteres DQPSK-Symbol gleicher Ordnungsnummer mit Lokalprogrammdateien folgt. Eine Verwendung zweier aufeinanderfolgender DQPSK-Symbole gleicher Ordnungsnummer hätte eine Akkumulierung der Eigeninterferenzen und dadurch eine zunehmende Verschlechterung der Empfangbarkeit zur Folge.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass Lokalprogramme mit einer CU-Größe von maximal 48 CU und entsprechender Position im CIF (vgl. LS 1-4 in Abbildung 2) einen optimalen Empfang ergeben. Das benötigte SNR für verschiedene CU-Größen ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Verlauf für 48 CU entspricht denen aus den vorhergehenden Abbildungen. Da die Lokalprogrammdateien bei DAB+ nur als zusammenhängender Block auf den OFDM-Symbolen angeordnet werden können, kann ein Subchannel eine Größe von maximal 48 CU betragen, ohne dass auf ein DQPSK-Symbol mit Lokalprogrammdateien ein weiteres mit Lokalprogrammdateien folgt. Für lokalisierte Subchannel mit mehr als 48 CU verschlechtert sich die Empfangbarkeit graduell bis zu einer Größe von 96 CU, ab der sich die Empfangbarkeit kaum weiter verschlechtert. Um die Größe der Interferenzzonen zu minimieren, sollte daher eine Subchannel-Größe von 48 CU nicht überschritten werden.

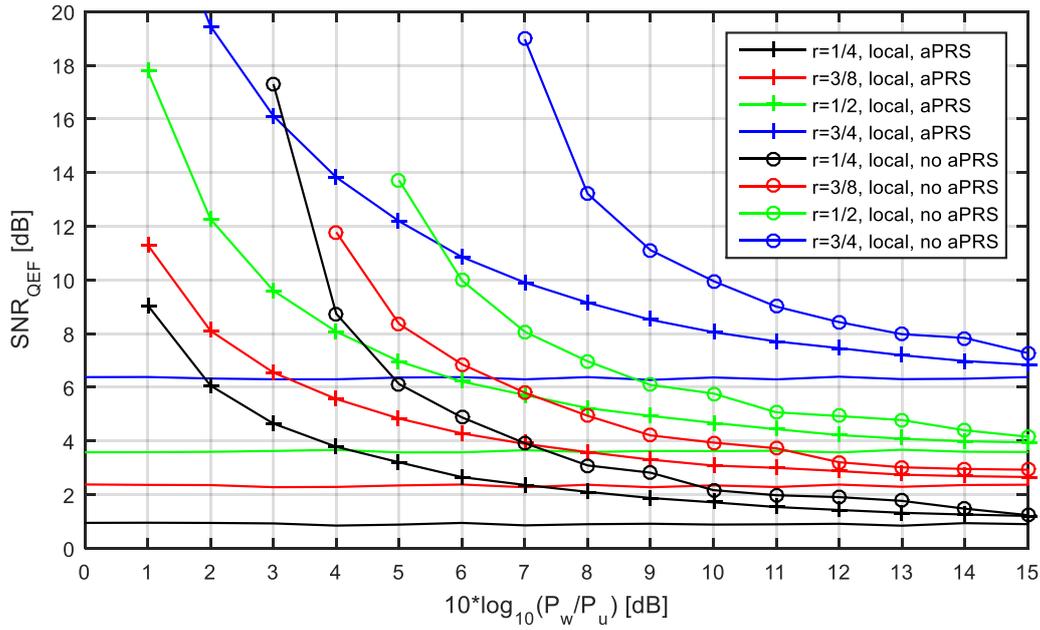


Abbildung 8: Benötigtes SNR für quasi-fehlerfreien Empfang eines Lokalprogramms mit und ohne Übertragung zusätzlicher Phasenangleichungssymbole

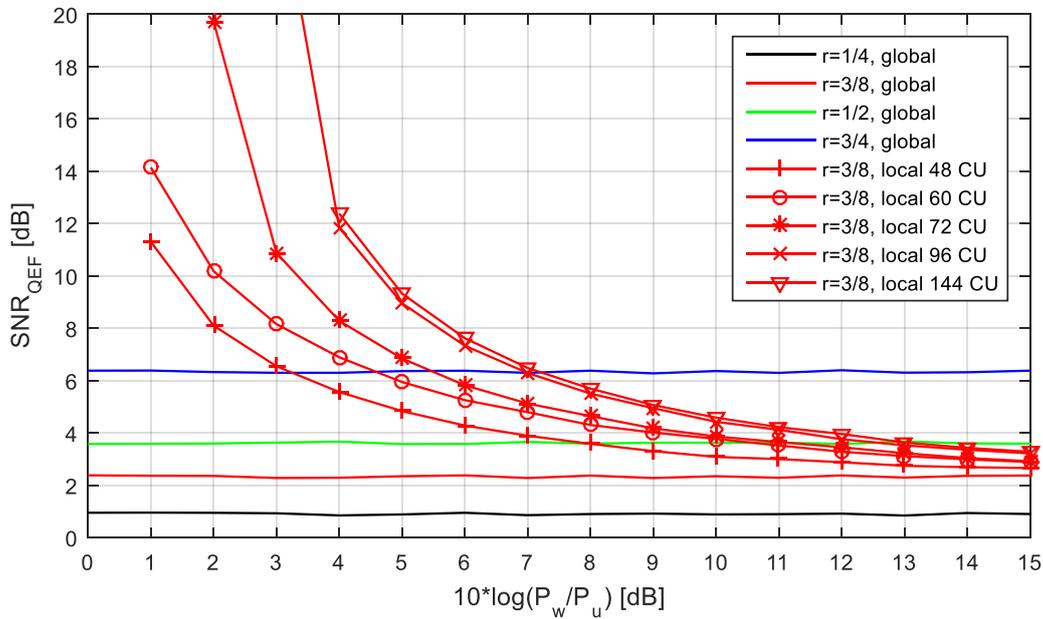


Abbildung 9: Benötigtes SNR für quasi-fehlerfreien Empfang eines Lokalprogramms mit Übertragung zusätzlicher Phasenangleichungssymbole für verschiedene CU-Größen

## 6 Feldversuch

Im Rahmen dieses Projektvorhabens ist ein Feldversuch umgesetzt worden. In diesem Kapitel ist die Planung des Feldversuchs, die Auswahl der Senderstandorte, der Aufbau der Sender und die Multiplexkonfiguration beschrieben.

### 6.1 Planung

Im Zwischenbericht [2] wurde ursprünglich für den Feldversuch ein Verbreitungsgebiet festgelegt, der in Absatz 11.2 als Polygon dargestellt ist. Es war geplant, die drei eingezeichneten Senderstandorte für den Feldtest zu betreiben. Die Umsetzung des Vorhabens hätte allerdings nur mit Unterstützung eines professionellen Sendernetzbetreibers erfolgen können. Gegen Ende der ersten Phase des Modellversuchs zeigte sich die Media Broadcast GmbH als Partner interessiert und stellte ein Sendernetz bestehend aus je einem Sender in Hannover, Braunschweig und Wolfsburg in Aussicht. Aufgrund von Verzögerungen und weiteren Faktoren wurden die Standorte jedoch nicht mit den notwendigen Sendekomponenten ausgestattet.

Um dennoch einen Feldversuch realisieren zu können, hat das Institut für Nachrichtentechnik die Umsetzung in Eigenregie übernommen. Ein Großteil der hierfür notwendigen Arbeiten umfasste dabei die Herrichtung der Senderstandorte sowie die Herstellung verschiedener Sendekomponenten.

### 6.2 Senderstandorte

Die Senderstandorte mussten verschiedenen Kriterien genügen, damit eine kosteneffiziente Umsetzung möglich war. Die Kriterien umfassen die notwendige Infrastruktur, darunter Stromanschluss, Internetanbindung mit ausreichender Datenrate, Montagemöglichkeiten für Antennen und Kabel sowie einem sicheren Aufbewahrungsort für die Sendetechnik. Dazu kommen weitere Faktoren, die die Klärung der Nutzung der Gebäudedächer, die Realisierung eines Blitzschutzes sowie vorhandene Funkanlagen betreffen.

Unter Berücksichtigung der Kriterien kamen dazu einige Gebäude der TU Braunschweig in Frage. Ausgewählt wurden die Gebäude, die die Kriterien am besten erfüllten und dabei eine angemessene Antennenhöhe bieten konnten sowie einen strategisch günstigen Standort zum Aufspannen des Gleichwellennetzes. In Abbildung 10 ist die Karte mit den umgesetzten Sendestandorten zu sehen.

Die ausgewählten Standorte, die alle Voraussetzungen erfüllten, sind

1. das sogenannte Architekten-Hochhaus (Braunschweig, Mühlenpfordtstr. 23, Antennenhöhe 57 m),
2. das Haus der Elektrotechnik (Braunschweig, Hans-Sommer-Str. 66, Antennenhöhe 55 m) und
3. das Leichtweiß-Institut (Braunschweig, Beethovenstr. 51A, Antennenhöhe 30 m).

Die Distanz zwischen dem Architekten-Hochhaus und dem Haus der Elektrotechnik beträgt 1,1 km, die zwischen dem Haus der Elektrotechnik und dem Leichtweiß-Institut 1,05 km

und die größte Distanz des Sendernetzes beträgt 2,2 km zwischen dem Architekten-Hochhaus und dem Leichtweiß-Institut.

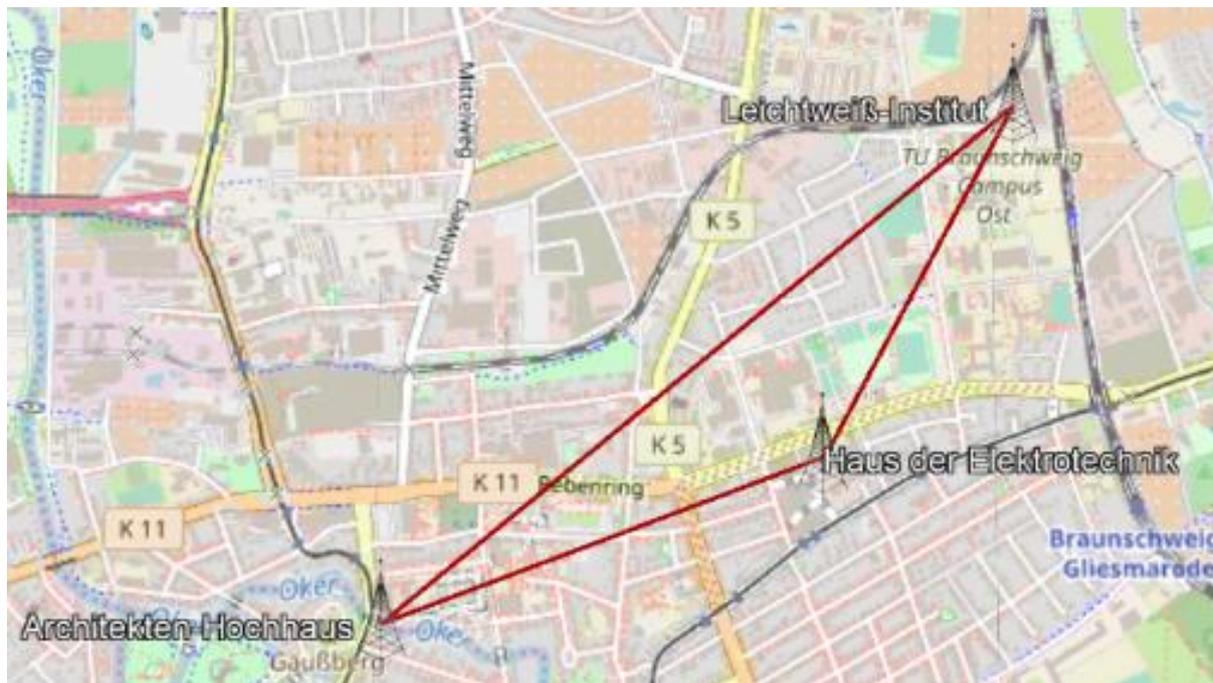


Abbildung 10: Senderstandorte des Feldversuchs

### 6.3 Senderaufbau

Der Aufbau der Senderinfrastruktur ist in Abbildung 11 dargestellt. Ein zentraler PC wurde für das Payout der ETI-Ströme verwendet. Diese enthalten dieselben Globalprogramme jedoch jeweils unterschiedliche Lokalprogramme. Die ETI-Ströme wurden mit dem Open Source Tool *ODR-dabmux* [7] erstellt. Anschließend wurde sichergestellt, dass die FIC-Daten der ETI-Ströme identisch angeordnet wurden und sich die MSC-Daten nur im Lokalprogramm-Subchannel unterschieden. Die drei ETI-Ströme wurden dann via IP-Netz zu den jeweiligen Sendestandorten übermittelt.

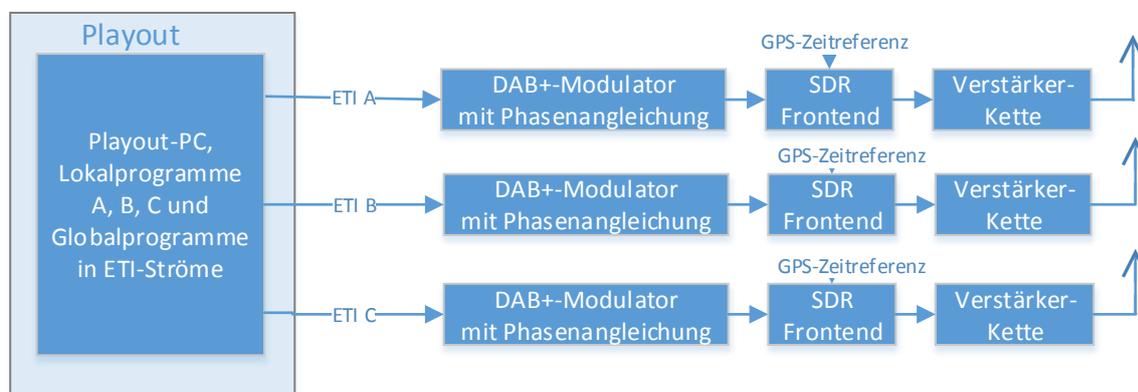


Abbildung 11: Aufbau der Zuspieldung und der Sender

Der Aufbau der einzelnen Sender wurde nach dem Software-Defined-Radio-Ansatz vorgenommen. Dabei findet die algorithmische Logik und Verarbeitung, hier der DAB+-Modulator mit Phasenangleichung, auf gewöhnlichen PCs statt. Die digital modulierten Sendedaten wurden anschließend an ein Software-Defined-Radio-Frontend geschickt, in dem die Daten in ein Hochfrequenz-Signal umgesetzt werden. In diesem Feldversuch wurden dazu Software-Defined-Radio-Frontends der Firma Ettus genutzt (vgl. Abbildung 12). Die erreichte Ausgangs-Sendeleistung des USRP liegt bei etwa 1 mW. Die USRPs wurden jeweils um ein GPS-Modul erweitert, das eine für die Ausstrahlung im SFN notwendige Zeitreferenz mit einer Genauigkeit von einigen 10 Nanosekunden bereitstellt. Die Signalverstärkung wurde mit einer Verstärker-Kette aus zwei Modulen umgesetzt. Die Vorverstärkung um etwa 30 dB sowie die Oberwellenfilterung wurde mit einem am Institut für Nachrichtentechnik entwickelten Verstärkermodul erreicht, das in Abbildung 13 zu sehen ist. Das zweite Modul besteht aus vom NDR zur Verfügung gestellten Verstärkern der Firma Plisch, die eine Verstärkung um 15 dB erreichen. Im Feldversuch wurden Sendeleistungen von 50 Watt im Kanal 9D genutzt. Die Aussendung erfolgte über eine auf das DAB+-Band umgebaute Amateurfunk-Groundplane-Antenne (vgl. Abbildung 14). Alle Sender lassen sich ferngesteuert ein- und ausschalten sowie überwachen.



Abbildung 12:  
Ettus USRP B210



Abbildung 13:  
10 W DAB+-Verstärker des IfN



Abbildung 14:  
Groundplane-  
Rundstrahlantenne



Abbildung 15: Sendeeinheit

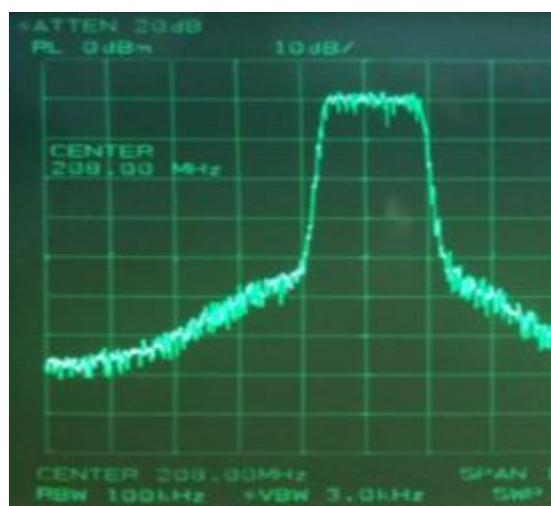


Abbildung 16: Aussende-Spektrum vor Antenne

Eine Sendeeinheit wurde in einem verschließbaren Rack-Schrank untergebracht, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Die Einheit verfügt über eine aktive Kühlung der Komponenten und ist sowohl vor Ort als auch über die Ferne bedienbar.

In Abbildung 16 ist das Spektrum des Ausgangssignals einer Sendeeinheit zu sehen, das vor der Antenne abgenommen wurde. Es sind Schulterabstände von über 40 dB zu erkennen. Zusätzlich wurde bei der Frequenzzuweisung darauf geachtet, dass die Nachbarkanäle unbesetzt sind.

## 6.4 Multiplexkonfiguration

Im Multiplex befinden sich Lokalprogramme mit unterschiedlichen Coderaten und Subchannel-Größen sowie Globalprogramme. Den verschiedenen Sendern werden dabei sowohl jeweils unterschiedliche Lokalprogramme zugeführt als auch Lokalprogramme, die auf zwei Sendern identisch sind (Haus der Elektrotechnik und Leichtweiß-Institut) und sich zu dem anderen Sender unterscheiden (Architekten-Hochhaus). Die zwei Sender arbeiten hierbei in einem Cluster und unterstützen sich gegenseitig bei der Aussendung desselben Lokalprogramms.

Die Lokalprogramme wurden mit dem Label „Lokal“ versehen, das über den Fast Information Channel übertragen wird. Zusätzlich wurde in den sogenannten *Program Associated Data* (PAD) zu jedem Lokalprogramm ein individuelles Label („Lokal Archi“, „Lokal ET“, „Lokal LWI“ sowie „Lokal ET und LWI“) gesetzt. Die PAD-Informationen werden im Main Service Channel mit den Audiodaten übertragen und lassen sich somit wie die Audiodaten lokalisieren. Das Anzeigeverhalten wurde mit einem DAB+-Auto-Radio getestet und zeigte das korrekte Label im jeweiligen Lokalgebiet an, siehe Tabelle 2.

*Tabelle 2: Fotos der angezeigten Labels, 1. Zeile Label aus FIC-Daten, 2. Zeile Label aus PAD (Ausschnitt des Lauftexts). Im Lokalbereich des Architekten-Hochhauses, Haus der Elektrotechnik, und dem Cluster Elektrotechnik und Leichtweiß-Institut.*



## 6.5 Ergebnisse

Wie in Kapitel 5 erläutert, ist für die Abschätzung der Möglichkeit eines QEF-Empfangs die Angabe des Empfangsleistungsverhältnisses wichtig. Deshalb wurde in Abbildung 17 das gemessene Empfangsleistungsverhältnis zwischen den zwei Sendern auf dem Architekten-Hochhaus und dem Leichtweiß-Institut einer Messfahrt dargestellt. Die beiden Sender wurden in diesem Beispiel ausgewählt, weil sie den größten Abstand zueinander besitzen, wodurch sich die besten Skalierungseffekte ergeben. In den Bereichen in der Nähe eines Senders wurden hohe Leistungsunterschiede mit stellenweise über 30 dB gemessen. In typischen DAB+-Netzen, in denen kaum Gleichkanalstörungen präsent sind, ist die Empfangbarkeit durch das SNR begrenzt. In diesem Versuch ist die Gleichkanalstörung bzw. das Empfangsleistungsverhältnis maßgeblich, ob ein Empfang möglich ist oder nicht. Zwischen den beiden Sendern wird der Leistungsunterschied ähnlicher und die Gleichkanalstörung nimmt zu.

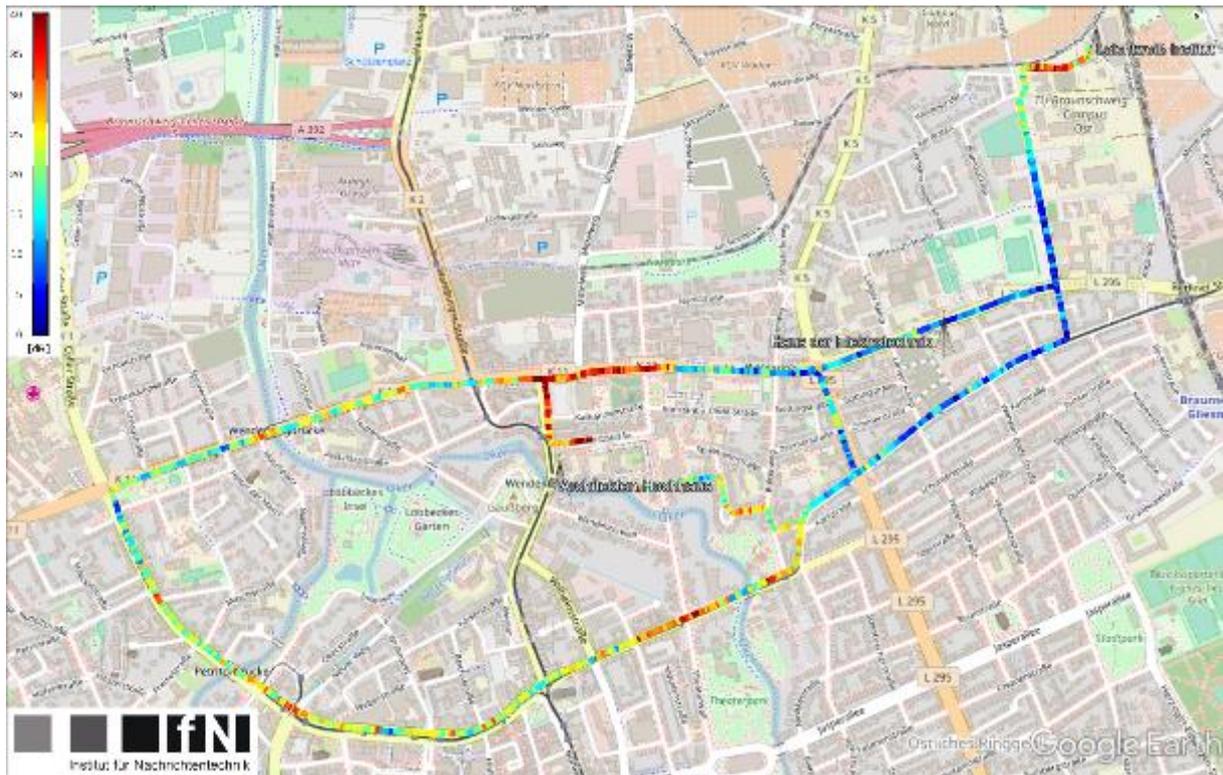


Abbildung 17: Kartenausschnitt mit gemessenem Empfangsleistungsverhältnis zwischen den Signalen der Sender auf dem Architekten-Hochhaus und dem Leichtweiß-Institut

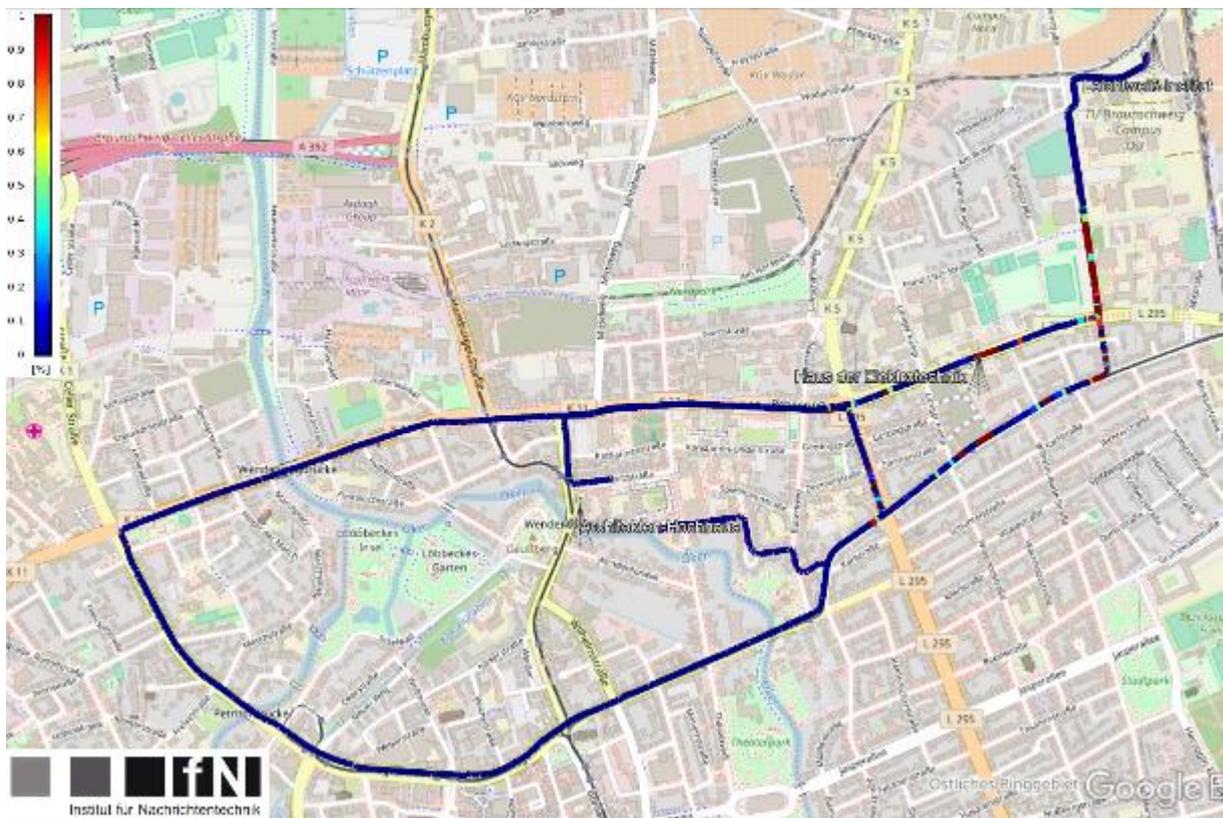


Abbildung 18: Kartenausschnitt mit gemessener Paketfehlerrate der Lokalprogramme, gesendet von den Sendern auf dem Architekten-Hochhaus und dem Leichtweiß-Institut

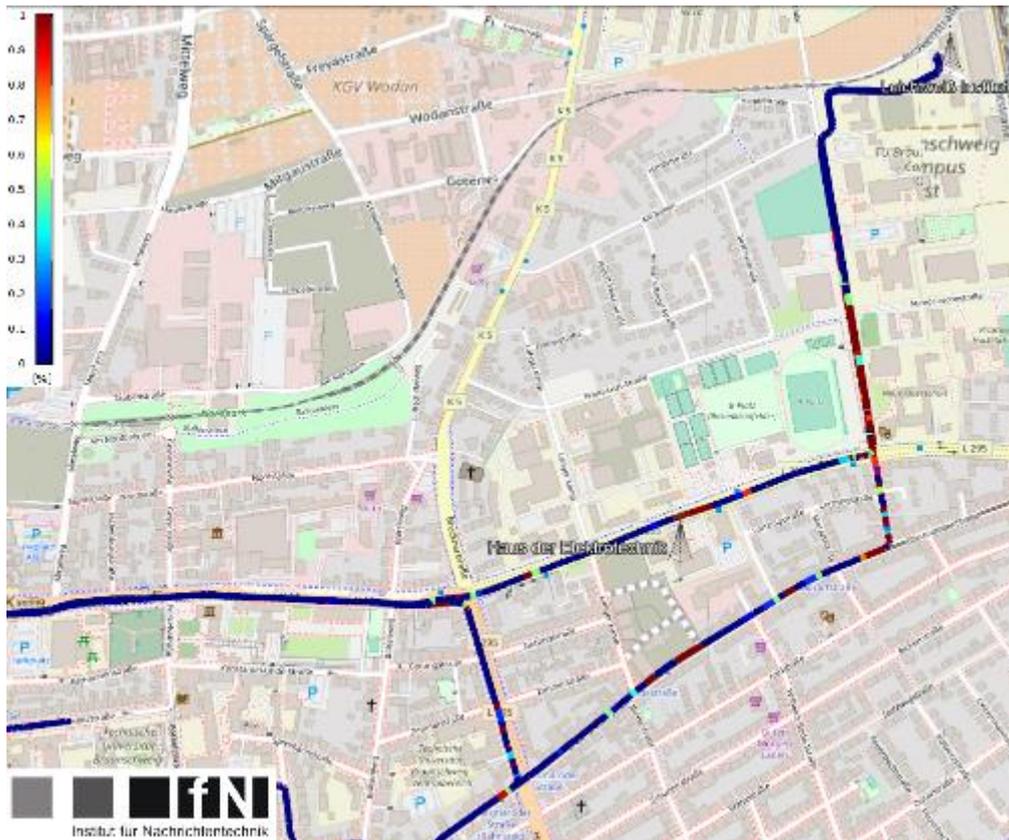


Abbildung 19: Kartenausschnitt mit Fokus auf Interferenzbereich

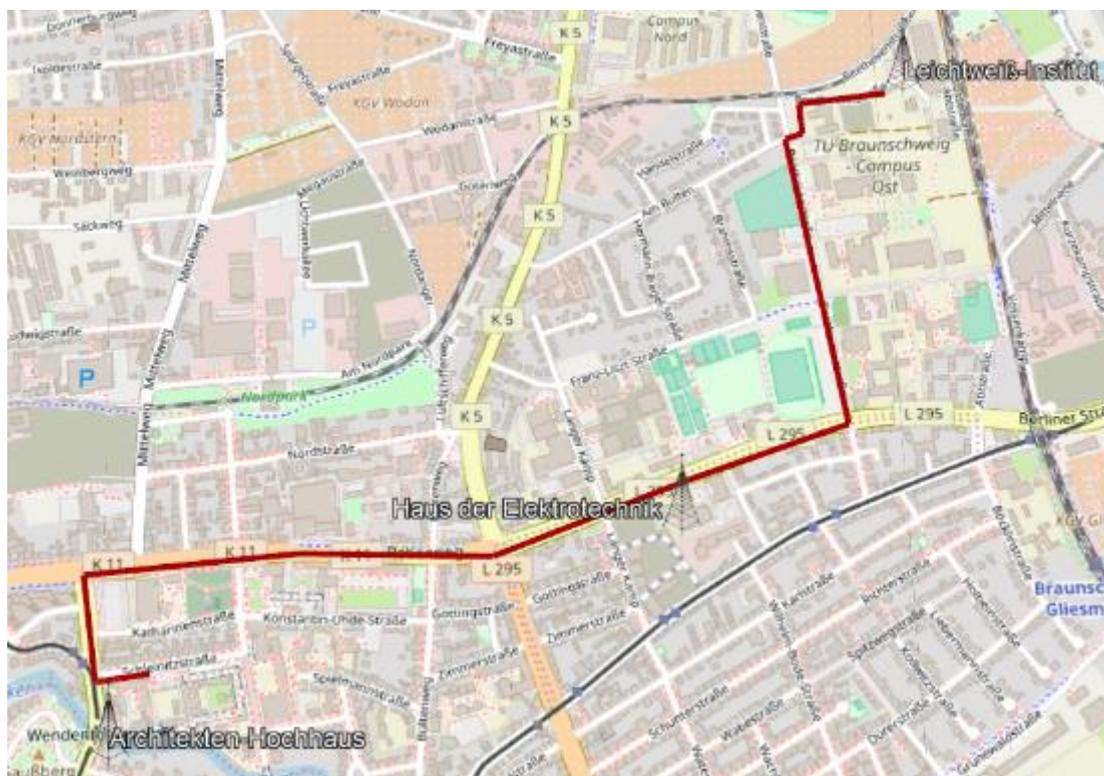


Abbildung 20: Route der Demonstrationsfahrt

Verknüpft mit dem Empfangsleistungsverhältnis ist in Abbildung 18 die dazu gemessene Paketfehlerrate der unterschiedlichen Lokalprogramme aufgetragen. Die Paketfehlerrate wird durch den Reed-Solomon-Decoders bestimmt, der zurückgibt, ob die Dekodierung erfolgreich war. Zu erkennen ist ein klarer Bereich um die jeweiligen Sender, in dem keine Paketfehler aufgetreten sind. Dies ist der Empfangsbereich des jeweiligen Lokalprogramms. Der Empfangsbereich vom Architekten-Hochhaus ist in dieser Konfiguration aufgrund der höher positionierten Antenne größer. Zwischen den beiden Sendern ist ein Bereich zu erkennen, in dem die Paketfehlerrate hoch ist und stellenweise kann kein Paket erfolgreich dekodiert werden. Dieser Interferenzbereich ist in Abbildung 19 deutlich zu erkennen. Nördlich und südlich vom Haus der Elektrotechnik sind kurze Abschnitte zu sehen, in denen kein Empfang möglich ist. Diese Bereiche entstehen aufgrund von Abschattungen der umgebenden Gebäude.

## 7 Dissemination

In diesem Kapitel werden die Gespräche mit Interessenten aufgelistet. In einem typischen Treffen wurde das Verfahren zur Integration von Lokalprogrammen in DAB+-Gleichwellennetzen sowie die Resultate vorgestellt. Zusätzlich wurden Testfahrten mit einem Privat-PKW, in dem ein typischer DAB+-Empfänger verbaut ist, in dem Versuchsnetz durchgeführt. Die Testfahrtroute ist in Abbildung 20 zu sehen. Die Fahrt wurde am Architekten-Hochhaus gestartet, vorbei am Haus der Elektrotechnik bis zum Leichtweiß-Institut und anschließend wieder zurück. Auf dem Hinweg ist der Sender auf dem Haus der Elektrotechnik ausgeschaltet.

*Tabelle 3: Liste mit Projekt-bezogenen Veranstaltungen*

Datum	Ort	Organisation	Teilnehmer Projekt	Bemerkung
24.11.2015	Berlin	Leiterkreis Digitalradio	Herr Jaeger	Kurzvorstellung Projekt bei Leiterkreis Digitalradio
26.1.2016	IfN	WDR (Delegation)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Kurzvorstellung Projekt
21.4.2016	IfN	Fraunhofer IIS (Herren Korte, Speitel)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Vorstellung Projekt & Diskussion Techniken
14.6.2016	Berlin	Technische Konferenz der Landesmedienanstalten (TKLM)	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Vorstellung Projekt
31.8.2016	IfN	Media Broadcast GmbH (Herr Wächter)	Prof. Reimers, Herren Schrieber,	Vorstellung Projekt

## Abschlussbericht

Datum	Ort	Organisation	Teilnehmer Projekt	Bemerkung
			Jaeger	
24.11.2016	IfN	MDR/WDR/SWR (Dr. Liebenow, Dr. Sommer, Herr Malfeld)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Vorstellung Projekt
9.12.2016	IfN	Delegation Landesrechnungshof Niedersachsen	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Kurzvorstellung Projekt
13.12.2016		Media Broadcast GmbH (Herren Burow, Wächter)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Telefonkonferenz Feldversuchsplanung
2.3.2017	NLM	Media Broadcast GmbH (Herr Wächter, ..)	Herr Jaeger	Feldversuchsplanung
30.3.2017	Hilver sum	NPO	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Vorstellung Projekt
15.5.2017	IfN	Rohde&Schwarz (Herr Fischer)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Kurzvorstellung Projekt
23.5.2017	IfN	Rundfunk Berlin- Brandenburg (Herren Drews, Nehse)	Prof. Reimers, Herr Schrieber	Vorstellung Projekt
8.6.2017	Cag- liari	Konferenz BMSB 2017	Herr Schrieber	Vorstellung Projekt und Simulationsergebnisse
20.7.2017	IfN	BNetzA (Herr Reich, weitere)	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Vorstellung Projekt und Feldversuchsplanung
24.11.2017	IfN	RFmondial GmbH (Herr Pagel)	Herren Schrieber, Jaeger	Vorstellung Projekt und Testmessungen der Sender
5.12.2017	IfN	BNetzA (Herren Schweizer, Reich, Hillmann, Röstel)	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Schlegel	Technischer Nachweis des Betriebsversuches, Testfahrten
5.2.2018	IfN	Media Broadcast GmbH (Herren Burow, Krüger, Lorenz, Schwalbe)	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Schlegel	Vorstellung Projekt, Testfahrten
6.2.2018		AG Netzausbau und Technik	i.V. Schwalbe	Vorstellung Projekt

Datum	Ort	Organisation	Teilnehmer Projekt	Bemerkung
23.2.2018	IfN	Herren Gehrung (ffn), Fischer (Antenne NDS), Müller, Vogt (Radio 21)	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Fischer, Jaeger	Vorstellung Projekt, Testfahrten
9.3.2018	IfN	5G Media Initiative	Herr Schrieber	Vorstellung Projekt, Labor-Demo
9.3.2018	IfN	Fraunhofer IIS (Herr Speitel)	Herr Schrieber	Kompatibilitätscheck mit IIS-DAB+- Referenz-Empfänger
20.3.2018		AG Endgeräte	Herr Schrieber	Vorstellung Projekt
20.4.2018	IfN	Neue Welle, Bayrischer Rundfunk (Herren Schreiner, Lesch)	Prof. Reimers, Herren Schrieber	Vorstellung Projekt, Testfahrten
29.5.2018	IfN	Norddeutscher Rundfunk (Herren Rombach, Kühn, Plöger, Ladebusch)	Prof. Reimers, Herren Schrieber	Vorstellung Projekt, Testfahrten

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projektvorhaben wurde die temporäre Auseinanderschaltung von DAB+-Gleichwellennetzen zum Zweck der Übertragung von lokalen Programminhalten untersucht. Die Grundlage des Projekts bildet die Fragestellung, ob bzw. inwieweit sich Geschäftsmodelle niedersächsischer Hörfunkveranstalter für die Verbreitung ihrer Hörfunkprogramme per UKW mit ihren zeitlich-begrenzten lokal unterschiedlichen Programminhalten auf DAB+-Gleichwellennetze abbilden lassen.

Nachdem im ersten Projektabschnitt vom IfN verschiedene technische Möglichkeiten für eine Verbreitung von lokalen Informationen in verschiedenen Regionen in einem Gleichwellennetz analysiert wurden, entschieden die Projektpartner einvernehmlich, welche dieser Lösungen im weiteren Projektverlauf vertiefend untersucht (vgl. Abschnitt 5.1), technisch umgesetzt (vgl. Abschnitt 5.2) und im Feld erprobt werden soll (vgl. Kapitel 6 und 6.5). Die bevorzugte Lösung wurde noch im ersten Projektabschnitt vom IfN in Software realisiert und durch erste Versuche an einem Laboraufbau verifiziert (vgl. Abschnitt 5.3.1).

Im zweiten Projektabschnitt erfolgte durch das IfN die Entwicklung eines vollständigen Demonstrators bestehend aus einer funktionsfähigen DAB+-Hardware inklusive der für die Auseinanderschaltung notwendigen technischen Ergänzungen in dreifacher Ausfertigung. Es wurden drei Senderstandorte auf Universitätsgebäuden für den Feldversuch identifiziert

und mit ebenfalls selbst entwickeltem sendetechnischem Gerät aufgebaut. Für die Signalheranführung an die Senderstandorte wurde das Datennetz der Universität eingesetzt (vgl. Kapitel 6).

Das Projektvorhaben wurde verschiedenen DAB+-Interessentenkreisen vorgestellt (vgl. Kapitel 7) sowie anhand des Labor-Demonstrators oder einer Testfahrt im Sendernetz vorgeführt.

Zusammenfassend konnten folgende Untersuchungsergebnisse festgestellt werden:

1. Die Auseinanderschaltung von DAB+-Gleichwellennetzen zum Zweck der lokalen Verbreitung von Programminhalten ist grundsätzlich möglich.
2. Empfänger, die bereits heute kommerziell zum Einsatz kommen, sind auch weiterhin uneingeschränkt zu verwenden.
3. Alle globalen Signale mit im gesamten Versorgungsgebiet des Gleichwellennetzes identischen Programminhalten werden durch die Auseinanderschaltung in keiner Weise beeinflusst.
4. Zwischen den Versorgungsgebieten zweier Signale mit unterschiedlichen, lokal begrenzt ausgesendeten Programminhalten entstehen Interferenzgebiete, die einen unterbrechungsfreien Übergang des Empfangs zwischen den beiden Signalen verhindern.
5. Durch die bei DAB+ angewendete differentielle Modulation kommt es nach dem Übertragen lokaler Programminhalte zu einer Fehlerfortpflanzung bis zum Ende eines DAB+-Transmission-Frames, die durch das Hinzufügen von Phasenreferenzsymbolen (aPRS) verhindert werden kann.
6. Weitere Arbeiten sind notwendig, um a) die Interferenzgebiete quantitativ zu erfassen und b) zu untersuchen, ob sich die neuen Erkenntnisse kommerziell verwerten lassen.

## 9 Referenzen

- [1] ETSI, „EN 300 401: Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, V2.1.1,“ ETSI, 2017.
- [2] F. Schrieber, D. Jaeger und U. Reimers, „Niedersächsische Landesmedienanstalt,“ 12. Dezember 2016. [Online]. Available: [http://www.nlm.de/fileadmin/dateien/pdf/161130\\_DAB\\_\\_Modelversuch\\_NDS\\_-\\_Zwischenbericht\\_-\\_161212.pdf](http://www.nlm.de/fileadmin/dateien/pdf/161130_DAB__Modelversuch_NDS_-_Zwischenbericht_-_161212.pdf).
- [3] ETSI, „TR 101 496-2: Digital Audio Broadcasting (DAB); Guidelines and rules for implementation and operation; Part 2: System features,“ ETSI.
- [4] S. Nilling, „Hybridradio DAB+/IP-Radio: Entwicklung eines Konzeptes und zugehöriger Use-Cases,“ Braunschweig, 2017.

- [5] ETSI, „ETS 300 799: Digital Audio Broadcasting (DAB); Distribution interfaces; Ensemble Transport Interface (ETI),“ ETSI, 1997.
- [6] F. Schrieber, „A Backward Compatible Local Service Insertion Technique for DAB Single Frequency Networks,“ *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia*, 6 2017.
- [7] Opendigitalradio association, [Online]. Available: <http://www.opendigitalradio.org/>. [Zugriff am 1 3 2018].
- [8] Sächsische Landesanstalt für Privaten Rundfunk und Neue Medien, „Lokale Programmfenster in DAB-Gleichwellennetzen,“ Dresden, 1996.

## 10 Danksagung

Die Autoren danken der Niedersächsischen Landesmedienanstalt für die Initiierung des Projektes. Ihr und dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gilt der herzliche Dank für die wohlwollende finanzielle Förderung. Die Niedersächsische Staatskanzlei hat mit dem Erlass einer Verordnung über den Modellversuch die rechtliche Grundlage für dessen Durchführung geschaffen, wofür die Autoren sehr dankbar sind. Außerdem haben die vielen fachlichen Gespräche mit Experten aus verschiedenen Firmen und Organisationen die erfolgreiche Projektdurchführung befördert. Ihnen allen gilt ebenso der Dank der Autoren wie den Kollegen des Instituts für Nachrichtentechnik für ihre fachliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten.

## 11 Anhang

### 11.1 Liste der Projekttreffen

Datum	Ort	Teilnehmer	Bemerkung
19.6.2015	NLM	Herrn Dohmen (Radio Hannover), Gehrung (ffn), A. Fischer (NLM), K. Fischer (Antenne NDS), Haase (LeineHertz), Jaeger (NLM), Müller (Radio 21), Prof. Reimers (IfN), Vogt (Radio 21), Zoellner (IfN)	Vorbesprechung mit Geschäftsführern und Technischen Leitern privater Hörfunkveranstalter
19.10.2015	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Vertragsunterzeichnung
16.11.2015	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger, Berninghaus, Gundlach, Fischer, Kurzella	Kick-Off
9.2.2016	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Diskussion versch. Varianten
18.4.2016	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger, Berninghaus, Fischer, Kurzella	Festlegung weiteres Vorgehen
3.6.2016	IfN	Prof. Reimers, Herr Jaeger	Weiteres Vorgehen + Vorgespräch TKLM
1.7.2016	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Besprechung Varianten mit hoher Priorität
10.10.2016	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger	Präsentation Software DAB+-LoSI-Labortests
17.10.2016	IfN	Herrn Schrieber, Jaeger	Besprechung Zwischenbericht und MA DAB+IP
10.11.2016	IfN	Herrn Schrieber, Jaeger	Besprechung Feldtestplanung
22.12.2016	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Fischer, Jaeger, Berninghaus, Kurzella	Bericht zu aktuellem Stand sowie Vorführung des Labor-Demonstrators
3.3.2017	IfN	Herrn Schrieber, Jaeger	Besprechung Feldtestplanung
9.5.2017	IfN	Herrn Schrieber, Jaeger	Besprechung Feldtestplanung
1.9.2017	IfN	Herrn Schrieber, Jaeger	Bericht Senderaufbau

22.12.2017	IfN	Herren Schrieber, Jaeger	Besprechung Feldtest und weiteres Vorgehen
22.1.2018	IfN	Prof. Reimers, Herren Schrieber, Jaeger, Berninghaus, Gundlach, Fischer, Rohrbach	Abschlussstreffen zum Projekt
23.2.2018	IfN	Herren Schrieber, Jaeger	Besprechung Abschlussbericht

## 11.2 Polygon des ursprünglichen Gebietes für den Feldversuch

Geographische Koordinaten des Versuchsgebietes auf der Grundlage des geodätischen Bezugssystems World Geodetic System 1984.

Polygon-Koordinaten	Ost	Nord	Höhe
Hannover-Nord	09° 38' 03''	52° 29' 21''	46 m
Gifhorn	10° 32' 00''	52° 32' 40''	54 m
Wolfsburg	10° 55' 20''	52° 25' 50''	62 m
Helmstedt	11° 04' 00''	52° 12' 50''	167 m
Wolfenbüttel	10° 38' 00''	52° 08' 50''	179 m
Salzgitter	10° 16' 10''	52° 08' 30''	88 m
Hannover-Süd	09° 38' 00''	52° 18' 50''	64 m

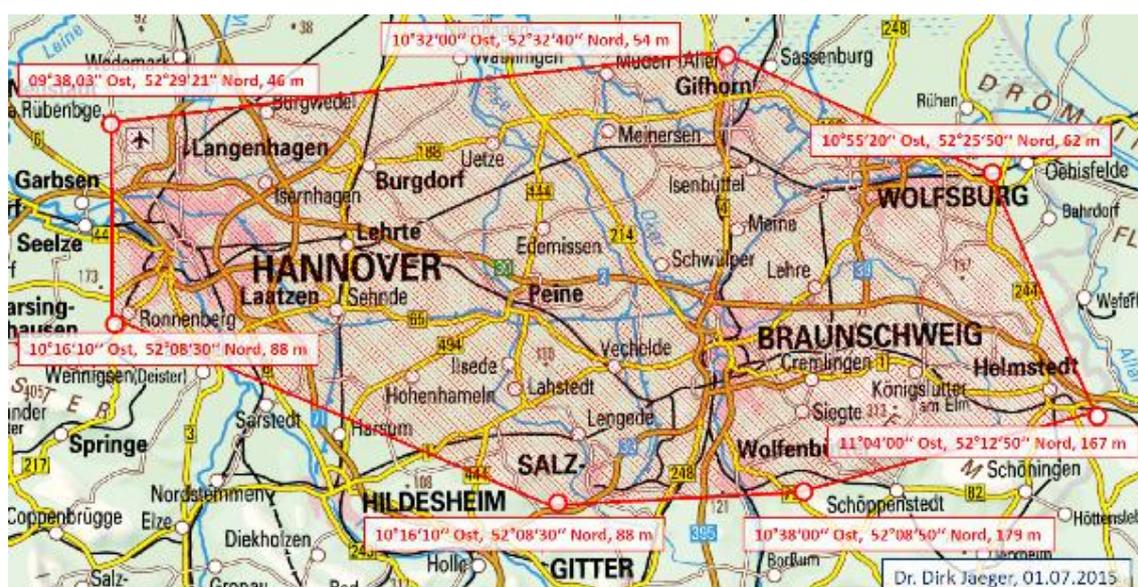


Abbildung 21: Kartenauszug des Versuchsgebietes (Polygon)