

Arbeitsgruppe für Elektronische Medien – Systemtheorie und Technik (Reimers)

1. Forschungsfelder der Arbeitsgruppe

In Fortführung der Arbeiten auf dem Feld „Kooperationsmodelle zwischen Broadband und Broadcast“ [REI3], [BEO/HOY/RIC/REI1] engagierten wir uns im Berichtszeitraum (Dezember 2019 bis November 2020) in der Weiterentwicklung und der Erprobung des unter dem Begriff „5G Broadcast“ bekannt gewordenen Systems. Wir führten die Forschungen zur Erweiterung des Digitalen Hörfunks (DAB+) um die Fähigkeit zur Unterstützung lokaler Angebote unter anderem durch die Optimierung von Empfängern und Feldmessungen fort. Die Arbeiten zur potenziellen Weiterentwicklung eines Systems zur breitbandigen und hochdatenratigen Kommunikation auf Kabelnetzen wurden erfolgreich abgeschlossen. Den Forschungs-Demonstrator für die Visible Light Communication (VLC) haben wir ausgebaut.

2. Projekte

Drei unserer Wissenschaftler sind/waren im Berichtszeitraum in Forschungsvorhaben mit Partner-Organisationen eingebunden. Die Arbeiten mit der Rohde & Schwarz GmbH und Co. KG zur Perfektionierung des 5G-Broadcast-Modulators haben wir fortgesetzt. Wir beteiligen uns an den Forschungen im 5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg www.5G-Reallabor.de (siehe Seite 87). Am 1. Oktober startete das Projekt „5G Media2Go“ (www.5gmedia2go.de).

3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Arbeitsgruppe

Herr von Beöczy, Herr Hoyer und Herr Richter sind das 5G-Broadcast-Team. Herr Schrieber komplettiert die Untersuchungen zur Ausstrahlung lokaler Dienste in einer zukünftigen Variante von DAB+. Herr Dr. Jackisch erforschte die Möglichkeiten zur Steigerung der in Kabelnetzen verfügbaren Datenrate jenseits der Möglichkeiten von DOCSIS 3.1. Herr Schlegel widmet sich der Visible Light Communication (VLC).

Nicht vergessen werden dürfen die Studierenden, die mit ihren Bachelorarbeiten (drei im Berichtszeitraum), Masterarbeiten (sechs im Berichtszeitraum) oder als studentische Hilfskräfte unsere Forschung ganz maßgeblich unterstützten. Im Jahresschnitt verstärkten so zu jeder Zeit etwa vier Personen unsere Forschungskapazitäten, die im Personalverzeichnis des IfN nicht vermerkt sind.

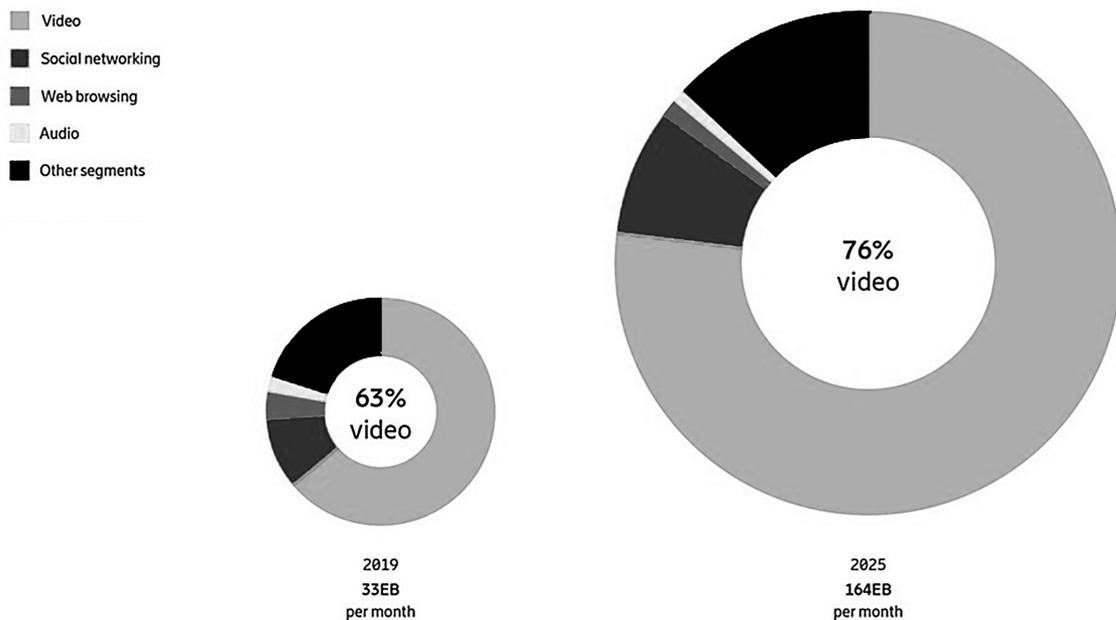


Abbildung 12: Mobiler Datenverkehr pro Monat, sortiert nach Anwendungsfall (Quelle: Ericsson Mobility Report 2020)

4. 5G Broadcast auf Basis von LTE bzw. 5G NR

Der in dem Release 14 des 3rd Generation Partnership Projects (3GPP) erstmals aufgenommene Broadcast-Modus „Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Services (FeMBMS)“ gewinnt immer mehr an Popularität. Ein Grund hierfür ist das stetig steigende weltweite Mobilfunkdatenvolumen. Wie aus dem Mobility Report der Firma Ericsson hervorgeht, soll bereits im Jahr 2025 die fünf-fache Datenmenge des Jahres 2019 über die Mobilfunknetze übertragen werden, siehe **Abbildung 12**. Ein Großteil dieses Anstiegs wird durch hochdatenratige Videodaten verursacht. Wird bei der Verteilung solcher Videodaten auf andere Übertragungswege als Broadcast zugegriffen, so steigen Distributionskosten mit ansteigender Nutzerzahl [Ma 20/018].

Gerade für die Übertragung von populären Diensten, wie z.B. Live-TV, bietet FeMBMS eine elegante Lösung, da solche Dienste damit besonders effizient in nur einem Datenstrom an viele Endgeräte übermittelt werden können. Dieses wird zum einen durch einen dedizierten Broadcast-Träger ermöglicht, der ausschließlich Broadcast-Daten überträgt, und zum anderen durch eine Konfiguration dieses Trägers, die sich von der herkömmlichen Konfiguration im Mobilfunknetz unterscheidet. So wird bei dem Modulationsverfahren Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) ein vergleichsweise kleiner Subträgerabstand von 1,25 kHz mit einer langen Schutzintervalldauer von 200 μ s genutzt. Diese Parameter erlauben es, große Gleichwellennetze mit Senderabständen von



Abbildung 13: Standorte der weltweit durchgeführten Feldtests, die den mit R&S entwickelten FeMBMS-Modulator und den am IfN entwickelten FeMBMS-Messempfänger nutzen

bis zu 60 km zu realisieren. Dadurch können die Daten über High Tower High Power (HTHP)-Senderinfrastrukturen effizient an viele Nutzer übertragen werden, wodurch die auf kleinen Mobilfunkzellen basierenden klassischen Mobilfunknetze entlastet werden.

Wie **Abbildung 13** zeigt, werden zurzeit FeMBMS-Feldversuche in wachsender Zahl in unterschiedlichsten Ländern durchgeführt. Von Südamerika, über Europa bis nach Asien wächst das Interesse an Broadcast-Übertragungen über Mobilfunkstandards. Bei allen Feldversuchen spielen sowohl der von uns gemeinsam mit R&S entwickelte FeMBMS-Modulator als auch der am Institut für Nachrichtentechnik entwickelte FeMBMS-Messempfänger eine zentrale Rolle. Da der FeMBMS-Übertragungsmodus derzeit noch in keinem kommerziellen Chip freigeschaltet wurde, ist der IfN-Messempfänger weltweit der einzige, der FeMBMS vollständig dekodieren und die empfangenen Inhalte ausspielen kann. Der Messempfänger wird über das R&S-Vertriebsnetz verkauft [RIC/REI1]. Obwohl FeMBMS auf Long Term Evolution (LTE) basiert, wird bei diesen Feldversuchen häufig der Begriff 5G Broadcast genutzt.

Seit der Fertigstellung der ersten FeMBMS-Spezifikation im Jahr 2017 wurde das System weiterentwickelt. Feldversuche zeigten, dass insbesondere der Cell

Aquisition Subframe (CAS) eine Schwachstelle bei der Übertragung in großen Gleichwellennetzen darstellt. Über diese Problematik berichteten wir im Jahresbericht 2019 ausführlich. Der CAS wird genutzt, um essenzielle Systeminformationen an die Empfänger zu übertragen und verwendet dabei die klassischen Trägerkonfigurationen aus dem herkömmlichen Mobilfunk. Dies bezieht sich auf einen OFDM-Subträgerabstand von 15 kHz und eine damit verbundene Schutzintervalldauer von nur 16,7 μ s, welche für Übertragungen mittels Low Tower Low Power (LTLTP)-Infrastrukturen ausgelegt ist, jedoch bei der Verbreitung von FeMBMS über HTHP-Sender zu vermehrten Interferenzen führt.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken und um weitere Optimierungen bei FeMBMS vorzunehmen, wurde die FeMBMS-Spezifikation in dem diesjährigen 3GPP Release 16 erweitert. Die Herren von Beöczy, Hoyer und Richter ergänzten entsprechend die Empfängersoftware um die in 3GPP Release 16 eingeführten Erweiterungen. Die aktuellen Änderungen des Systems sollen einen robusteren Empfang des FeMBMS-Signals gewährleisten. Die Modifikationen beziehen sich auf weitere Subträgerkonfigurationen für die Datenkanäle sowie eine verbesserte Robustheit der Kontrollkanäle innerhalb des CAS. Ermöglicht wird die Nutzung eines OFDM-Subträgerabstandes von 2,5 kHz, welcher für den mobilen Empfang bei höheren Geschwindigkeiten ausgelegt ist. Ebenfalls ist nun ein Subträgerabstand von 0,37 kHz mit einer besonders langen Schutzintervalldauer von 300 μ s standardisiert. Diese Werte kommen denen sehr nahe, die schon bei DVB-T2 typischerweise genutzt werden. Sie eignen sich für die Versorgung von stationären Empfängern (Roof-Top) in einem Gleichwellennetz mit Senderabständen von bis zu 90 km. Ebenfalls ermöglicht wird die Übertragung von Systeminformationen mit höherer Redundanz, ohne dass dabei die Kapazitäten für die eigentlichen Nutzdaten eingeschränkt werden [BEO/HOY/RIC/REI1]. Die grundlegende CAS-Problematik besteht jedoch auch weiterhin. Eine Bachelorarbeit widmete sich der Verwendung von Frameworks zur De- und Enkodierung von Systeminformationen [Ba 20/014].

Am 1. Oktober fiel der Startschuss für das neue Forschungsprojekt „5G Media2Go“. Dabei soll vor dem Hintergrund des zukünftig erwarteten autonomen Fahrens die Tauglichkeit von FeMBMS zur Versorgung von Fahrzeugen mit Medien-Inhalten untersucht werden. Die Projektleitung liegt beim Südwestrundfunk. Beteiligt sind Unternehmen wie Deutsche Funkturm GmbH, Deutsche Telekom, Kathrein, R&S und Porsche. Bei dem Projekt wird ein Gleichwellennetz, bestehend aus zwei Hochleistungssendern in Stuttgart und Heilbronn sowie weiteren Kleinleistungssendern aufgebaut. Über dieses Gleichwellennetz werden nun lineare Rundfunkinhalte mittels FeMBMS verbreitet. Für das Ausstrahlen der Broadcast-Inhalte wird auch hier wieder der vom IfN und R&S entwickelte FeMBMS-Modulator genutzt. Zudem spielt der vom IfN entwickelte FeMBMS-Messempfänger bei den Messungen erneut eine wichtige Rolle. Um eine erste Einschätzung über die Versorgungswahrscheinlichkeit von großen

Gleichwellennetzen zu erhalten, führte Herr von Beöczy Simulationen zur Flächenversorgung von Gleichwellennetzen durch. Dabei nutzte er den instituts-eigenen Netzwerksimulator Simulator for Mobile Networks (SiMoNe). Die daraus resultierenden Simulationsergebnisse verglich er mit den Messungen, die das IfN 2019 im Rahmen von Messfahrten im Raum München im Projekt 5G TODAY durchführte. Zwischen den gemessenen und simulierten Werten gibt es eine hohe Korrelation, so dass in Abhängigkeit der verwendeten Modulationsarten Einschätzungen zur Flächenversorgung gemacht werden können. Die so entstandenen Ergebnisse wurden beim Workshop Digital Broadcasting 2020 präsentiert [BEO1]. Aufbauend auf diesen Simulationen sollen weitere Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes 5G Media2Go folgen. Im weiteren Verlauf des Projektes wird der IfN-Empfänger in ein Fahrzeug von Porsche integriert, um lineare Inhalte auf dem fahrzeugeigenen Infotainment-System nutzen zu können. Der Schwerpunkt der Untersuchungen seitens des IfN liegt dabei auf dem FeMBMS-Empfang bei hohen Geschwindigkeiten. Hierfür wird zunächst die Empfangbarkeit des Signals unter Verwendung der Trägerkonfigurationen von Release 14 untersucht. Im weiteren Verlauf des Projekts ist es geplant, die Empfangbarkeit des Signals unter Verwendung der Trägerkonfigurationen des Release 16 zu nutzen.

Zeitgleich mit der Weiterentwicklung des auf LTE basierenden FeMBMS-Systems, erforscht das IfN einen Broadcast-Modus, aufbauend auf dem neuen Mobilfunkstandard 5G New Radio (NR). Hierfür wurden große Teile des 5G-NR-Standards in das IfN Generic Software Defined Radio Toolkit (IGST) integriert. Dabei wurde der im Standard spezifizierte Physical Layer mit Hinblick auf die Umsetzung eines 5G-NR-Broadcast-Modus erweitert. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden die in 5G NR verwendeten Mechanismen zum Mapping von Ressourcen analysiert und so erweitert, dass auch die am IfN entwickelten Broadcast-Modi dynamisch abgebildet werden können [Ma 20/003]. In einer Bachelorarbeit wurde eine dynamisch einsetzbare Kanalschätzung realisiert [Ba 20/003]. Die für einen Broadcast-Modus nötigen Signalisierungsprozeduren der höheren Layer entstanden im Rahmen einer Masterarbeit [Ma 20/021].

5G NR setzt für die Übertragung der Nutzdaten auf Low-Density Parity-Check (LDPC)-Codes als Vorwärtsfehlerschutzverfahren. Bei LTE und FeMBMS kamen noch Turbo Codes zum Einsatz. Broadcast-Übertragungen können mittels längerer Codewörter robuster gestaltet werden, als dies bei klassischen Mobilfunk-Übertragungen sinnvoll ist, wodurch beispielsweise die Versorgungsregion vergrößert werden kann. Im Vergleich zu den bei den Standards DVB-T2 und ATSC 3.0 eingesetzten LDPC-Codewörtern, sind die in 5G NR spezifizierten LDPC-Codewörter deutlich kürzer. Eine zukünftige 5G-NR-basierte Broadcast-Erweiterung würde von längeren Codewörtern profitieren. Eine Methode zur Generierung längerer Codewörter auf Basis der 5G-NR-Spezifikation hat Herr Richter untersucht [RIC1].

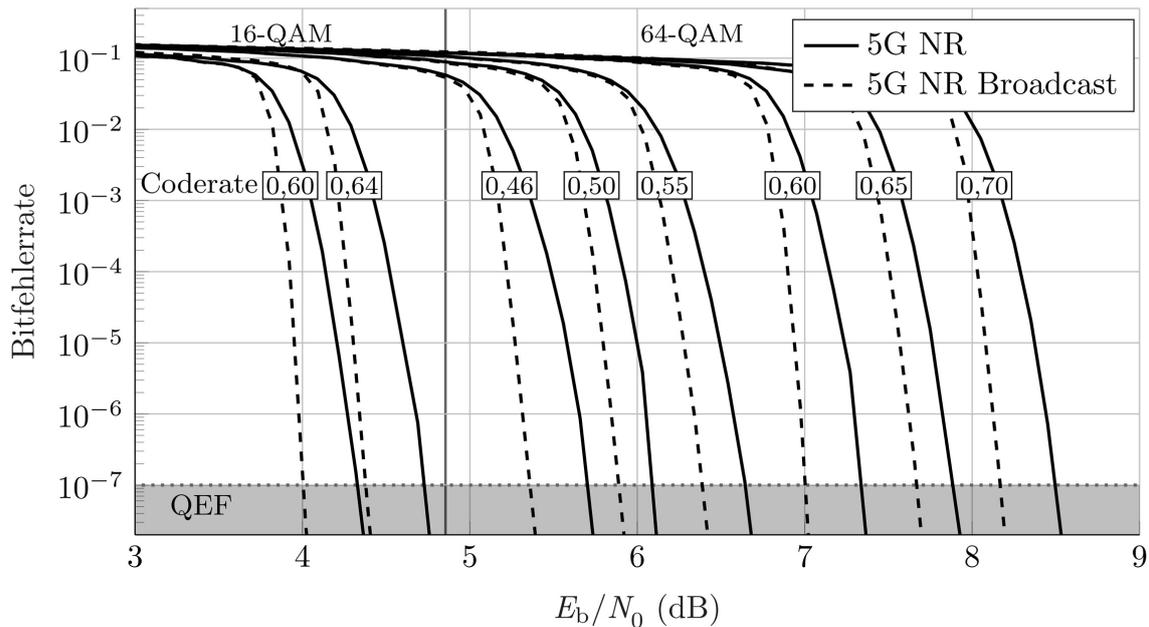


Abbildung 14: Vergleich der im AWGN-Kanal erzielten Bitfehlerraten für verschiedene MCS als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses pro Bit: 5G NR Broadcast LDPC-Codes / erweiterte 5G NR LDPC-Codes

Die in **Abbildung 14** dargestellten Simulationsergebnisse stellen die erzielten Bitfehlerraten der konventionellen 5G NR LDPC-Codes im Vergleich zu denen bei Einsatz der für 5G NR Broadcast vorgeschlagenen Erweiterung der LDPC-Codes unter dem Einfluss von additivem weißem Gaußschen Rauschen (AWGN) dar. Die Analyse wurde für verschiedene bei 5G NR definierte Modulations- und Codierungsschemata (MCS) durchgeführt, wobei der dargestellte Bereich vermutlich die größte Relevanz für zukünftige Broadcast-Anwendungen aufweist. Gut ersichtlich ist, dass durch die Erweiterung des Standards um längere Codewörter ein quasi fehlerfreier Empfang (Quasi Error Free – QEF) bei jeweils deutlich niedrigerem Signal-Rausch-Verhältnis pro Bit möglich wird, wodurch der Performanz-Unterschied zur nächstniedrigeren Coderate halbiert wird. Diese und andere Erweiterungen fließen in die Forschungen im Rahmen des Projektes „5G-Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig-Wolfsburg“ (siehe Seite 87) ein und sollen Teil des zukünftigen 5G-NR-Broadcast-Standard werden.

In einer gemeinsam mit der Abteilung Informationstheorie und Kommunikationssysteme betreuten Bachelorarbeit wurden erste Implementierungen für eine sequentielle Schlüsselgenerierung auf dem Physical Layer im IGST umgesetzt [Ba 20/011]. An einer Erweiterung der informationstheoretischen Algorithmen wird gearbeitet.

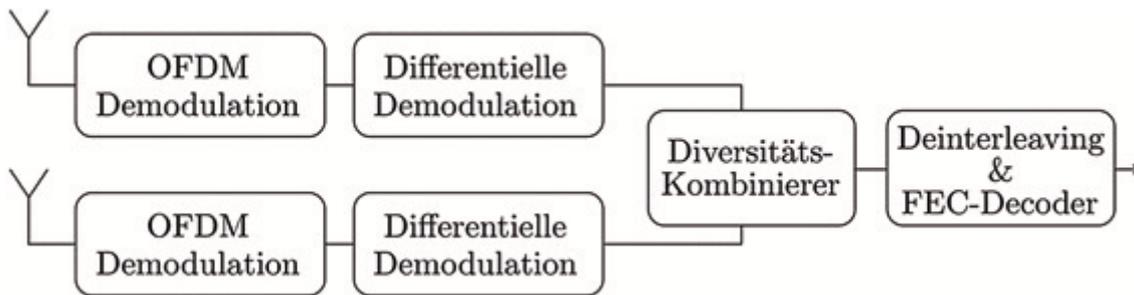


Abbildung 15: Struktur eines Diversitäts-Empfängers mit zwei Antennen (2-Rx)

5. Erweiterung von DAB+ zur Unterstützung lokaler Programme

Die Nutzung des digitalen Hörfunks DAB+ nimmt in Deutschland zu. DAB+ soll künftig den analogen UKW-Hörfunk als letztes analoges Massenmedium digitalisieren. Eine Besonderheit von Digital Audio Broadcasting (DAB) ist, dass es als erstes kommerzielles System die mittlerweile weit verbreitete Übertragungstechnik OFDM nutzt. Dadurch wird ermöglicht, dass DAB+-Sendernetze als Gleichwellennetze ausgelegt werden können, die besonders Spektrums- und kosteneffizient sind. Der Nutzung von Gleichwellennetzen stehen aber aktuelle Geschäftsmodelle zahlreicher privater Hörfunkanbieter entgegen. Diese strahlen ihre UKW-Programme beispielsweise in Niedersachsen zwar über lange Zeiten des Tages landesweit aus, teilen das Versorgungsgebiet aber zu beliebigen Zeiten zur Ausstrahlung lokaler Nachrichten oder Werbeeinblendungen in lokale Versorgungsgebiete auf. Im Extremfall werden einzelne Lokalprogramme jeweils nur von einem einzigen UKW-Sender ausgestrahlt. Die lokal adressierte Werbung stellt für die kommerziellen Programmanbieter nach eigenen Aussagen eine erhebliche Einnahmequelle dar. Um die derzeitigen UKW-Geschäftsmodelle auch in DAB+-Gleichwellennetzen realisieren zu können, bedarf es einer Erweiterung des DAB+-Systems.

Nachdem Herr Schrieber im Vorfeld eine Möglichkeit zur Erweiterung von DAB+ gefunden und per Software Defined Radio realisiert hatte, realisierte das IfN ein DAB+-Gleichwellennetz in Braunschweig. In mehreren Demonstrationen mit einem handelsüblichen DAB+-Autoradio konnte gezeigt werden, dass die Lösung das angestrebte Ziel grundsätzlich erfüllt. Die nicht lokal auseinander geschalteten Programme sind überall perfekt empfangbar. Die Empfangbarkeit der Lokalprogramme in der Nähe des jeweiligen Senders erfolgt störungsfrei. Zwischen den Sendern ist die prinzipiell nicht vermeidbare Interferenz jedoch so ausgeprägt, dass das jeweilige Lokalprogramm nicht empfangen werden kann. Die Größe der Region ohne Empfang ist auch von Eigenschaften des Empfängers abhängig.

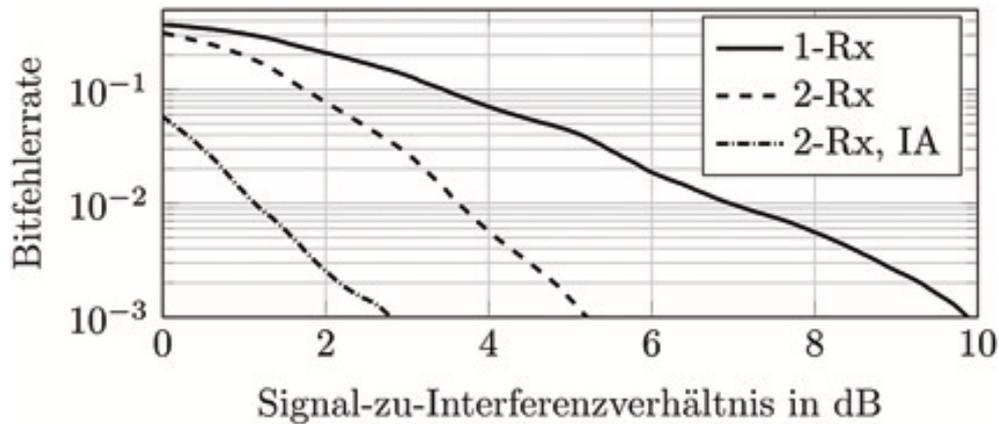


Abbildung 16: Bitfehlerrate beim Empfang des Lokalprogramms bei Nutzung einer Antenne (1-Rx) im Vergleich zu der mit zwei Antennen (2-Rx) einerseits oder andererseits mit SNR-basiertem oder Interferenz berücksichtigendem Kombinieren (IA)

Um die Robustheit von Empfängern gegen derartige Interferenz weiter zu erhöhen, untersuchte Herr Schrieber den Empfang mit Antennen-Diversität. Die Struktur des Empfängers mit zwei Antennen ist in **Abbildung 15** dargestellt. Zwei unterschiedliche Techniken zur Kombination der Signale der beiden Antennen wurden erprobt. Zum einen wurde ein für Broadcast-Empfänger typisches Schema eingesetzt, welches das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) maximiert. Zum anderen wurde ein Schema eingesetzt, das zusätzlich die auftretende Interferenz berücksichtigt. Die durch diese Techniken erreichbaren Gewinne evaluierte Herr Schrieber in Messfahrten im IfN-DAB-Netz. In **Abbildung 16** ist die Bitfehlerrate des Lokalprogramms bei Verwendung eines Fehlerschutzes mit der Coderate 1/4 gegenüber dem gemessenen Signal-zu-Interferenzverhältnis dargestellt. Als Referenz ist die Empfangs-Performance mit einer Antenne ohne Interferenzberücksichtigung (1-Rx) angegeben. Herr Schrieber konnte zeigen, dass der Diversitäts-Empfänger mit Maximierung des SNR (2-Rx) bei einer Bitfehlerrate von 10^{-3} um 4,7 dB robuster gegenüber Interferenz ist, als ein handelsüblicher Empfänger mit einer Antenne. Wird das Kombinieren unter Berücksichtigung der Interferenz verwendet (2-Rx, IA), steigt die Robustheit um weitere 2,4 dB auf 7,1 dB. Ergebnisse dieser Untersuchung wurden im Rahmen einer Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [SCHR1].

Neben der Arbeit an Lokalprogrammen in DAB+ betreute Herr Schrieber eine Masterarbeit zum Thema Human-Machine-Interfaces in zukünftigen Fahrzeugen [Ma 20/020].

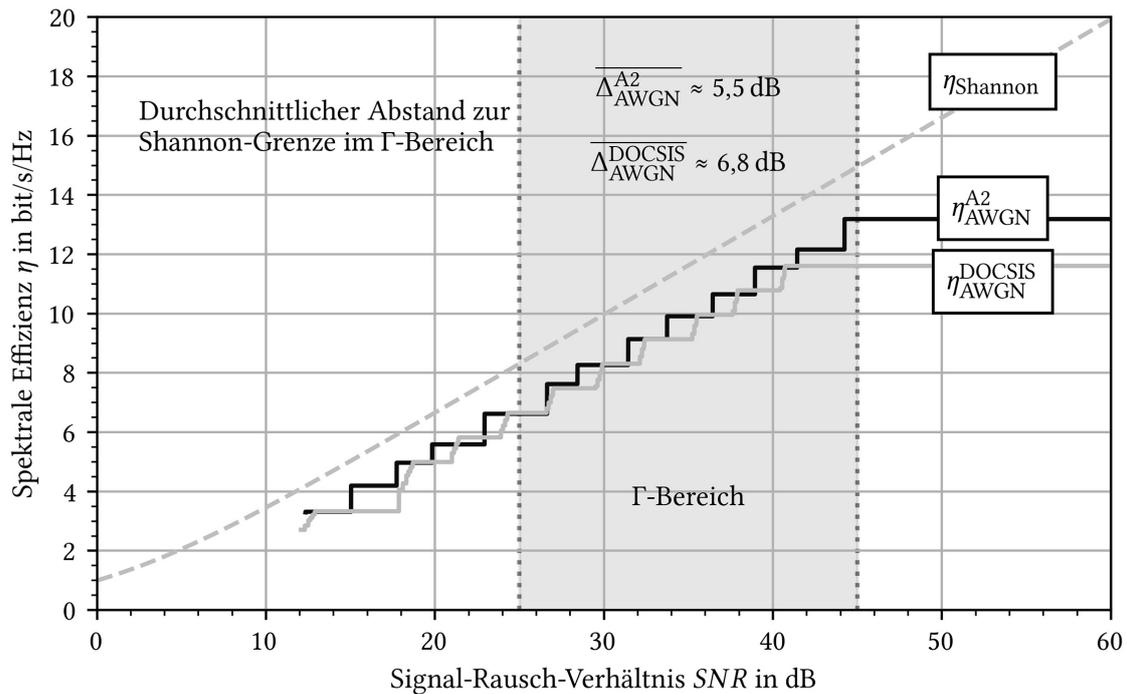


Abbildung 17: Verbesserung der spektralen Effizienz durch den gewählten Optimierungsansatz A2 gegenüber der spektralen Effizienz von DOCSIS 3.1

6. Optimierung der verfügbaren Datenraten in Hybrid-Fiber-Coax-Netzen

Für den Internetzugang in Fernsehkabelnetzen wird die Data over Cable Service Interface Specification (DOCSIS) verwendet. Eingeführt wird derzeit in vielen Netzen die Version DOCSIS 3.1, welche im sogenannten Downlink Datenraten im Gigabit-pro-Sekunde-Bereich ermöglicht, die sich angeschlossene Endgeräte teilen. DOCSIS 3.1 nutzt das Mehrträger-Modulationsverfahren OFDM. Jeder OFDM-Träger wird mit einer Quadraturamplitudenmodulation (QAM) versehen, welche bis zu 14 Bit pro Träger abbilden kann.

Herr Jackisch untersuchte im Rahmen seiner Forschung Möglichkeiten zur weiteren Steigerung der Downlink-Leistung [Ma 20/001], [Ma 20/002]. Dabei wählte er zwei unterschiedliche Optimierungsansätze, von denen der erste (Ansatz A1) das System nicht grundsätzlich modifizierte, wohingegen der zweite (Ansatz A2) selbst das bisherige Modulationsverfahren OFDM durch FBMC/OQAM (FBMC: Filter Bank Multi Carrier) ersetzte. **Abbildung 17** zeigt den durch diesen Ansatz erreichten Gewinn ($\Delta A2$) der spektralen Effizienz bei Annahme eines nur durch weißes Rauschen gestörten Übertragungskanals. Herr Jackisch schloss die Arbeiten mit Vorlage einer Dissertation mit dem Titel „Erweiterung der Leis-

tungsfähigkeit von Hybrid-Fiber-Coax-Netzen für die hochdatenratige Kommunikation“ ab und wurde am 16. September zum Dr.-Ing. promoviert.

7. Visible Light Communication

Unter dem Begriff Visible Light Communication (VLC) wird die Datenübertragung über sichtbares Licht verstanden. Mittels VLC kann beispielsweise eine herkömmliche LED-Deckenlampe gleichzeitig zur Beleuchtung und zur Datenübertragung dienen. Die Datenübertragung ist quasi die Nebenaufgabe zur eigentlichen Beleuchtung und für das menschliche Auge nicht sichtbar. VLC erlangt aufgrund des knapper werdenden Frequenzspektrums immer mehr an Bedeutung. Der Einsatz von VLC bietet sich auch in Bereichen an, in denen keine Funkübertragung möglich ist – wie z.B. unter Wasser – oder in denen eine Funkübertragung zur Störung wichtiger Systeme führen könnte. Im IfN wurde im Rahmen von Untersuchungen zu VLC ein Demonstrator realisiert, der von Herrn Schlegel permanent weiterentwickelt wird. Der aktuelle Demonstrator ermöglicht eine bidirektionale Datenübertragung zwischen einem VLC-Access-Point und einem VLC-Modem über sichtbares LED-Licht im Downlink und infrarotes Licht im Uplink. Mit diesem Aufbau kann eine Internetanbindung z.B. zu einem Laptop mittels VLC realisiert werden. Der Demonstrator erlaubt derzeit eine Übertragung mit Datenraten von über 50 Mbit/s im Downlink und auch im Uplink. Im Rahmen einer Bachelorarbeit fanden Untersuchungen statt, welche LEDs sich für VLC besonders eignen und welche LED-Parameter eine Eignung begünstigen [Ba 20/010]. Der aktuelle Demonstrator wurde in einer Veröffentlichung vorgestellt [SCHL/REI1].