

Aus der Forschung

Abteilung für Elektronische Medien – Systemtheorie und Technik (Reimers)

1. Forschungsfelder der Abteilung

Ein wichtiges, bereits nahezu traditionelles, Forschungsthema des Berichtszeitraums (1. Dezember 2018 bis 30. November 2019) waren „Kooperationsmodelle zwischen Broadband und Broadcast“ [RIC/HOY1], [REI7]. Nachdem das für die Entwicklung der Mobilfunk-Standards zuständige Gremium „Third Generation Partnership Project (3GPP)“ mit der Standardisierung von „Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service (FeMBMS)“ wesentliche Elemente des von uns erfundenen TOL+ (Tower Overlay over LTE-A+) übernommen hatte, gerieten wir in die ungewöhnliche Situation, mit unseren in FeMBMS konvertierten Systemen auf der Sende- und insbesondere der Empfangsseite in diverse Feldversuche eingebunden zu werden. Mittlerweile hat sich für FeMBMS der Name „5G Broadcast“ eingebürgert. Gestartet haben wir die Arbeiten an einem „5G New Radio Multimedia Broadcast Multicast Service“ (NR-MBMS). Die Forschungen zur Erweiterung des Digitalen Hörfunks (DAB+) um die Fähigkeit zur Unterstützung lokaler Angebote konnten auf Basis eines eigenen Sendernetzes fortgeführt werden. In einem weiteren Vorhaben widmen wir uns der potentiellen Weiterentwicklung eines Systems zur breitbandigen und hochdatenratigen Kommunikation auf Kabelnetzen. Ein WiMi erweiterte das Arbeitsgebiet Visible Light Communication (VLC) durch den Ausbau unseres Forschungs-Demonstrators.

Unsere Arbeiten umfassen die gesamte Spanne von der Grundlagenforschung, beispielsweise zu neuartigen Modulationsverfahren, bis hin zur Vorentwicklung und der Realisierung von System-Demonstratoren, die wir in Feldtests erproben. Eine besondere Rolle spielt bei vielen unserer Forschungen das Software Defined Radio (SDR) auf Basis des leistungsfähigen institutseigenen SDR-Werkzeugkastens (IfN Generic SDR Toolkit – IGST).

2. Projekte

Es ist überaus erfreulich, dass drei unserer Wissenschaftler in Forschungsvorhaben mit Partnerunternehmen eingebunden sind. Im Berichtszeitraum sind bzw. waren wir in den folgenden internationalen und nationalen Forschungsvorhaben engagiert:

2.1 Internationale Projekte

Die Forschungsarbeiten zu FeMBMS und die Beteiligung an Feldversuchen von FeMBMS fanden zusammen mit dem Forschungszentrum von Radio Italiana (Rai) und dem französischen Sendernetzbetreiber towerCast statt.

2.2 Nationale Projekte

Das Unternehmen Rohde & Schwarz GmbH und Co. KG haben wir bei der Umsetzung unserer FeMBMS-Implementierung in ein Produkt unterstützt. Mit dem Cologne Broadcasting Center – dem Produktionsbetrieb der RTL-Gruppe – haben wir an diversen kleineren Vorhaben gearbeitet. Mitglied ist das IfN in der 5G Media Initiative. Prof. Reimers ist darüber hinaus Vorsitzender des Aufsichtsrates der iTUBS mbH und des Energieforschungszentrums Niedersachsen (EFZN).

3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung

Herr von Beöczy (seit 01.01.2019), Herr Hoyer und Herr Richter bilden das 5G Broadcast/TOo5G-Team. Herr Schrieber komplettiert die Untersuchungen zur Ausstrahlung lokaler Dienste in einer zukünftigen Variante von DAB+. Herr Jackisch erforscht die Möglichkeiten zur Steigerung der in Kabelnetzen verfügbaren Datenrate jenseits der Möglichkeiten von DOCSIS 3.1. Herr Schlegel widmet sich der Visible Light Communication.

Unser Support-Team besteht aus Frau Andersen, Frau Brandt, Frau Haase, Frau Nottbohm, Frau Sengpiel und den Herren Eisenberger, Gudat und Hellrung.

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

4. 5G Broadcast (FeMBMS)

Nachdem Feldversuche mit FeMBMS die interessanten Leistungsmerkmale des Systems gezeigt hatten, stößt das am IfN umgesetzte System nun weltweit auf großes Interesse. FeMBMS ermöglicht es unter anderem, Daten mittels eines dedizierten sogenannten Broadcast-Trägers über eine vorhandene High Tower High Power (HTHP)-Senderinfrastruktur auszustrahlen. Dies eröffnet das Potential, die konventionellen Mobilfunknetze zu entlasten und gleichzeitig ei-

ne große Anzahl von Nutzern mit Video-Diensten oder ähnlichen populären Diensten in hoher Qualität versorgen zu können. Auch wenn FeMBMS häufig als 5G Broadcast bezeichnet wird, basiert es doch auf dem Mobilfunkstandard Long Term Evolution (LTE). Einige Konzepte dieses Übertragungsmodus, bspw. ein kleinerer Subträgerabstand, stammen aus dem am IfN entwickelten Tower Overlay over LTE-A+ (TOoL+). Der minimale Subträgerabstand von 1,25 kHz und die vergleichsweise lange Schutzintervalldauer von 200 μ s für die Übertragung von Nutzdaten ermöglichen die Realisierung groß-zelliger Gleichwellennetze mit Senderabständen von bis zu 60 km.

Aus der gemeinsamen Kooperation des IfN mit Rohde & Schwarz (R&S) zur Entwicklung eines kommerziellen FeMBMS-Modulators ist mittlerweile ein marktfähiges Produkt entstanden. Dabei konnte die Standard-Konformität in Tests mit externen Partnern verifiziert werden. Die am IfN mittels Software Defined Radio entwickelte FeMBMS-Empfangssoftware ist nun Teil eines kommerziellen Empfängers, welcher über das R&S-Vertriebsnetz verkauft wird. So wurden zuletzt je einer unserer FeMBMS-Empfänger für Feldversuche nach China sowie nach Brasilien, dort für die System-Erprobung anlässlich des Festivals „Rock in Rio“, geliefert. Die Partner aus beiden Ländern bekundeten großes Interesse an einem Ausbau eines FeMBMS-Netzes. Ein FeMBMS-Gleichwellennetz konnte auch in Bayern realisiert werden, wo im Frühjahr 2019 im Rahmen des bayrischen Forschungsprojektes 5G TODAY zwei Sender in Betrieb genommen wurden [REI5]. Hierzu bietet der Sonderbericht auf Seite 126 weitere Information. In dem bayrischen Versorgungsgebiet bot Herr Richter Vorträge mit Live-Demonstrationen für die AG „Media over IP“ der Deutschen TV-Plattform [RIC/REI1] und das Technik- und Innovationsforum des Verbandes der kommerziellen Medienunternehmen VAUNET [RIC/REI2].

Ebenfalls im bayrischen Versorgungsgebiet unternahmen Herr Hoyer und Herr Richter im März mehrere Messfahrten, um die Leistungsfähigkeit des Übertragungssystems zu überprüfen. Dazu verwendeten sie handelsübliche Notebooks als Messempfänger, denn dank unserer Optimierung des SDR-basierten FeMBMS-Empfängers durch Einsatz noch effizienterer Algorithmen konnte die Rechenkomplexität soweit verringert werden, dass das FeMBMS-Signal auf solchen Geräten in Echtzeit dekodiert werden kann. Das vereinfachte Blockdiagramm in **Abbildung 1** zeigt die Struktur des Empfängers. Hervorzuheben ist die aufwändige, auf Feedbackschleifen aufbauende Aufteilung und Zuordnung von Ressourcen zur Dekodierung der vier verschiedenen Kontrollkanäle im sogenannten Cell Acquisition Subframe (CAS) und des Nutzkanals.

Im Rahmen der Messfahrten entstanden Ergebnisse, die Rückschlüsse auf Stärken und Schwächen von FeMBMS zulassen.

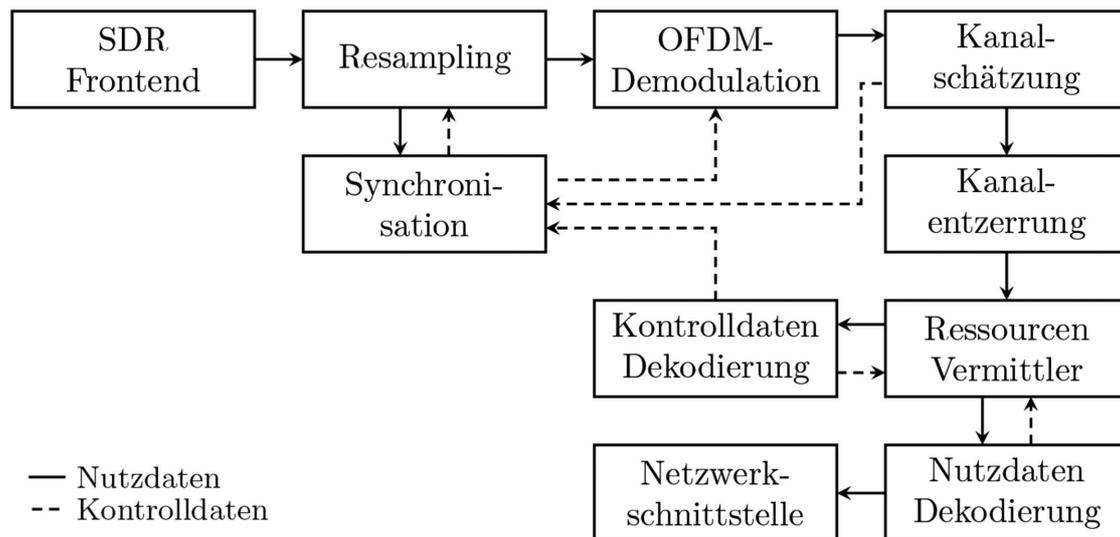


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockdiagramm des FeMBMS-Empfängers

Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Paketfehlerrate des CAS. Dieser wird benötigt, um Kontrollinformationen an die Empfänger zu übermitteln, damit jene die eigentlichen Nutzdaten, wie z.B. Video-Dienste empfangen und dekodieren können. Anders als die Nutzdaten verwendet der CAS einen Subträgerabstand von 15 kHz, wodurch dessen Schutzintervall mit $16,67 \mu s$ deutlich kürzer ausfällt als das für die Nutzdaten und die Robustheit bei der Übertragung im Gleichwellennetz oder bei Mehrwegeausbreitung mit langen Echos sinkt. In **Abbildung 2** wird die Paketfehlerrate in Abhängigkeit von den Laufzeit-Unterschieden der eintreffenden Signale für CAS und Nutzdaten dargestellt. Wie zu erwarten, stellt das kurze Schutzintervall des CAS ein Problem bei spät eintreffenden Echos bzw. bei zwei aktiven Sendern dar [RIC/HOY1].

Im Berichtsjahr fanden auch funktionale Weiterentwicklungen der SDR-Implementierungen statt. Unter anderem kann nun eine Vielzahl verschiedener Dienste mittels einer FeMBMS-Übertragung gleichzeitig bereitgestellt werden. Dafür wurde die Nutzung von sogenannten MCH Scheduling Information (MSI) implementiert, welches eine dynamische Dekodierung von Diensten ermöglicht. Konnten vorher nur maximal vier verschiedene Dienste verarbeitet werden, so können nun bis zu 435 verschiedene Dienste empfangen und dekodiert werden. Mittels Carrier Aggregation kann ein FeMBMS-Träger den für die klassische bidirektionale Mobilkommunikation genutzten Trägern der zellularen Netze hinzugefügt werden. Die Bachelorarbeit [BA 19/711] widmete sich diesem Thema. Ein Netzwerk-Interface für das Auslesen von Messwerten wurde realisiert, wodurch sämtliche empfangenen Kontrollinformationen ausgewertet werden können. Zudem wurde unsere Modulator-seitige SDR-Lösung so erweitert, dass sie auch in Gleichwellennetzen genutzt werden kann. Die dafür benötigte Syn-

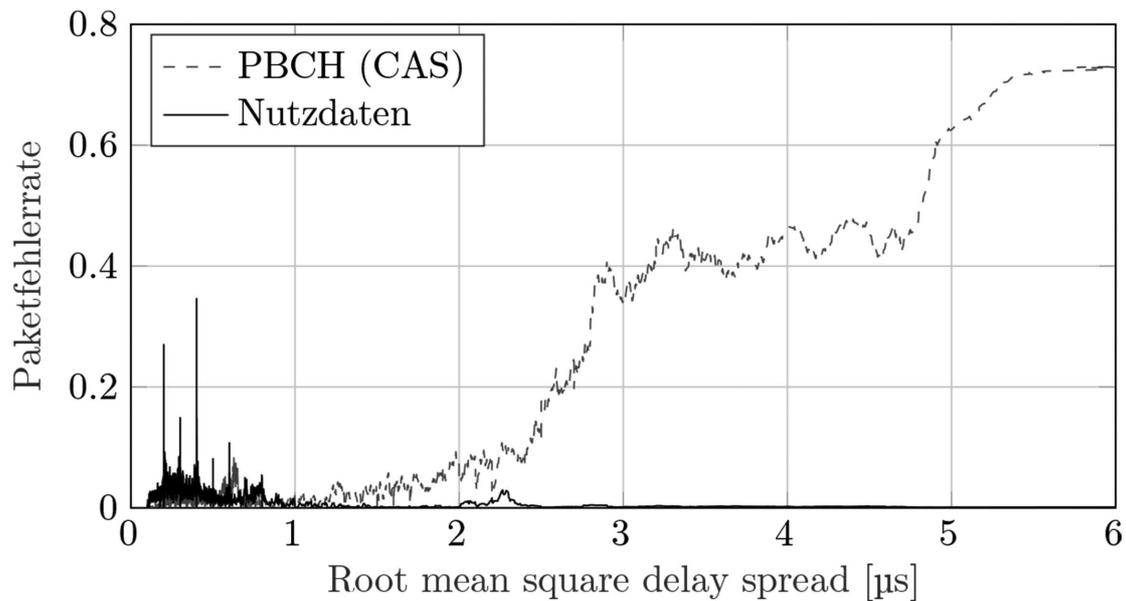


Abbildung 2: Vergleich der Paktfehlerraten des Physical Broadcast Channel im CAS und der Nutzdaten in Abhängigkeit vom mittleren Laufzeit-Unterschied der Signale

chronisierung mehrerer Sender wurde in Teilen im Rahmen einer Masterarbeit umgesetzt [MA 19/009]. Anlässlich des 10. Jubiläums des Braunschweiger Technologieforschums am 23. Oktober zeigten wir FeMBMS dann auch in Braunschweig „live“. Zu diesem Zweck installierte Herr Schlegel einen FeMBMS-Sender auf dem sogenannten Architekten-Hochhaus der Universität und in den Räumen der Industrie- und Handelskammer konnte das Signal dann empfangen werden.

Aktuell wird das SDR-System um die Algorithmen des neuen Mobilfunkstandards 5G New Radio (NR) erweitert. In diesem Rahmen wird institutsintern an einem „5G New Radio Multimedia Broadcast Multicast Service“ (NR-MBMS) geforscht, mit dessen Hilfe ein Broadcast-Modus innerhalb des neuen Mobilfunkstandards realisiert werden soll. Wir wollen auf diese Weise unsere erfolgreiche Arbeit, die in FeMBMS ihren Niederschlag gefunden hat, für eine nächste Mobilfunk-Generation fortsetzen. Auch wenn der neue Mobilfunkstandard auf den ersten Blick viele Gemeinsamkeiten mit seinem Vorgänger Long Term Evolution (LTE) hat, so unterscheiden sich beide doch in vielen Details. So wird zwar erneut OFDM als Modulationsart genutzt, andere Algorithmen, wie der Fehler-schutz, wurden hingegen geändert. Wurde in LTE noch auf Turbo- und Faltungskodierung zurückgegriffen, so werden bei NR die effizienteren Low Density Parity Check (LDPC) und Polar Codes genutzt. Auch der bei NR unterstützte Frequenzbereich wurde gegenüber dem bei LTE stark nach oben erweitert. Zudem wurden gerade in den höheren Schichten viele Änderungen vorgenommen, um geringere Latenzzeiten und bessere spektrale Effizienz umsetzen zu können.

Das Thema 5G adressierten wir in einer Publikation [REI1] und zahlreichen Vorträgen [REI2], [REI4], [REI6], [REI8], [REI9]. Hier ging es weniger darum, unsere eigenen Forschungsarbeiten zu präsentieren, als vielmehr darum, Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft das Thema so nahe zu bringen, dass sie zwischen 5G-Hype und Realität zu unterscheiden lernen.

5. Erweiterung von DAB+ zur Unterstützung lokaler Programme

Der digitale Hörfunk DAB+ wird derzeit in Deutschland eingeführt und soll den analogen Hörfunk als letztes analoges Massenmedium digitalisieren – nachdem dies beim Mobilfunk und beim Fernsehen längst erfolgt ist. Eine Besonderheit von DAB ist, dass es als erstes kommerzielles System die Übertragungstechnik OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) nutzt. Seitdem wird OFDM z.B. beim terrestrischen Fernsehen, dem Mobilfunk der 4. und 5. Generation (LTE, 5G) sowie im WLAN eingesetzt. Die Nutzung von OFDM ermöglicht es, 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.

Die Akzeptanz von DAB+ in Deutschland wird beeinträchtigt, wenn private Programmanbieter ihre derzeitigen UKW-Geschäftsmodelle über DAB+ nicht realisieren können. Aus diesem Grund untersuchte Herr Schrieber im Auftrag der Niedersächsischen Landesmedienanstalt (NLM) und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mögliche Erweiterungen des derzeitigen DAB+-Standards. Diese Erweiterungen sollen die zeitweise Auseinanderschaltung von DAB+-Sendern innerhalb von Gleichwellennetzen ermöglichen und möglichst kompatibel zum derzeitigen DAB+-Standard sein. Dabei sollen die nicht lokal auseinandergeschalteten Programme innerhalb eines DAB-Signals, das in einem Multiplex zahlreiche Programme parallel überträgt, ungestört bleiben.

Nachdem Herr Schrieber eine Möglichkeit zur Erweiterung von DAB+ gefunden und per Software Defined Radio realisiert hatte, wurde ein „IfN-eigenes“ reales DAB+-Gleichwellennetz in Braunschweig realisiert. Dass die Lösung das angestrebte Ziel grundsätzlich erfüllt, konnte in mehreren Demonstrationen mit ei-

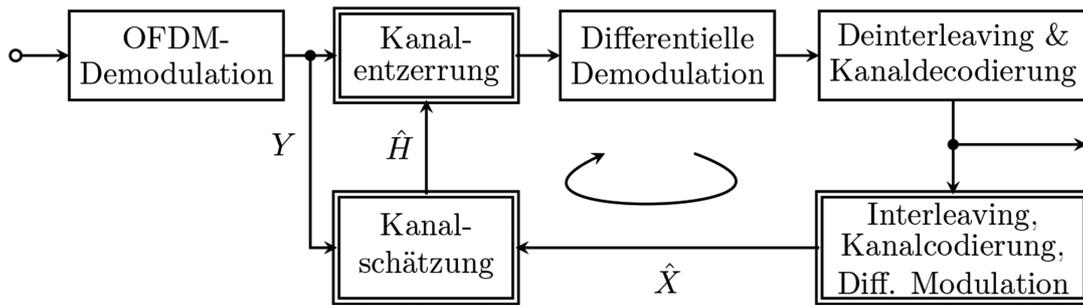


Abbildung 3: Die Struktur des iterativen Empfängers, wobei einfach umrandete Blöcke in gewöhnlichen Empfängern existieren und doppelt umrandete neu sind

nem handelsüblichen DAB+-Autoradio gezeigt werden. 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, in der die Interferenz zum Empfangsausfall führt, ist auch von Eigenschaften des Empfängers abhängig.

Um die Robustheit von Empfängern gegen derartige Interferenz weiter zu erhöhen, hat Herr Schrieber eine iterative Empfängertechnik untersucht. Die Struktur des Empfängers ist in **Abbildung 3** zu sehen: Neu gegenüber handelsüblichen Empfängern ist die explizite Kanalschätzung und Kanalentzerrung, die für die resultierende Erhöhung der Robustheit sorgt. Da das DAB+-System jedoch keine Pilottöne zur Kanalschätzung bereitstellt, muss die Kanalschätzung aus dem Empfangssignal Y und den vermutlich gesendeten Daten \hat{X} gewonnen werden. Dazu wird das Empfangssignal zuerst ohne vorherige Kanalentzerrung decodiert und anschließend wieder codiert, um die vermutlich gesendeten Daten zu erhalten. Daraus wird die Kanalschätzung \hat{H} gewonnen und genutzt, um das Empfangssignal zu entzerren und eine neue, fehlerärmere Vermutung für die gesendeten Daten zu erhalten. Diese Schleife wird so lange ausgeführt, bis sich die Vermutung über die gesendeten Daten und die Schätzung des Kanals nicht weiter verbessern. Herr Schrieber konnte zeigen, dass dieser Empfänger um 3 dB robuster gegenüber Interferenz ist, als ein handelsüblicher Empfänger. Das Ergebnis dieser Untersuchung wurde im Rahmen einer Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [SCHR1].

Als neuen, jedoch mit dem heutigen DAB+-Standard nicht kompatiblen, Ansatz zur Einbringung von Lokalprogrammen untersuchte Herr Schrieber Layered Division Multiplexing (LDM) [MA 19/001]. Bei LDM werden mehrere Datenströme

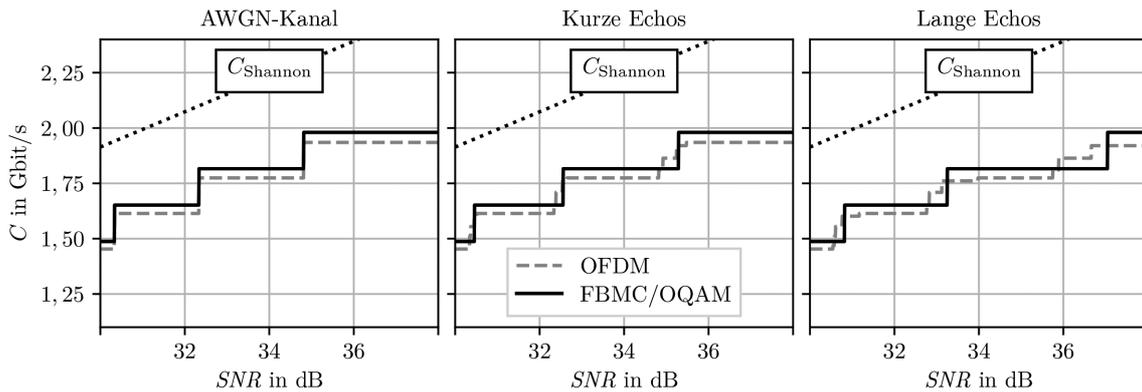


Abbildung 4: Nutzdatenraten von DOCSIS 3.1 mit OFDM als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) im Vergleich zu einer Alternative mit FBMC/OQAM

mit unterschiedlicher Leistung und Codierung zeitgleich im selben Kanal überlagert.

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. Aktuell ist hierbei die Version DOCSIS 3.1, welche im sogenannten Downlink Datenraten im Gigabit-pro-Sekunde-Bereich ermöglicht, welche sich angeschlossene Endgeräte teilen. DOCSIS 3.1 nutzt das Mehrträger-Modulationsverfahren Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Jeder OFDM-Träger wird mit einer Quadraturamplitudenmodulation (QAM) versehen, welche bis zu 14 Bit pro Träger abbilden kann. Herr Jackisch untersuchte anfänglich die Leistungsfähigkeit von realistischen DOCSIS-3.1-Systemen. **Abbildung 4** zeigt unter anderem die maximal mögliche Nutzdatenrate der jeweils besten DOCSIS-3.1-Konfiguration in drei Arten von Übertragungskanälen bei verschiedenen Signal-Rausch-Verhältnissen (SNR). Dabei ergab sich, dass im sogenannten AWGN-Kanal mit additivem weißem gaußschen Rauschen das SNR bei einer gegebenen Datenrate ca. 5 dB größer sein muss, als dies theoretisch möglich wäre. In den ebenfalls dargestellten Echokanälen vergrößert sich der Abstand weiter, da Intersymbolinterferenz auftritt. Intersymbolinterferenz wird durch Echos hervorgerufen und wird in einem OFDM-System durch ein Schutzintervall kompensiert. Das Schutzintervall enthält jedoch keine Nutzdaten und verringert somit die Datenrate.

Um die Robustheit gegen Echos zu erhöhen, kann, so die Forschungs-Hypothese von Herrn Jackisch, das alternative Modulationsverfahren Filter Bank Multi-

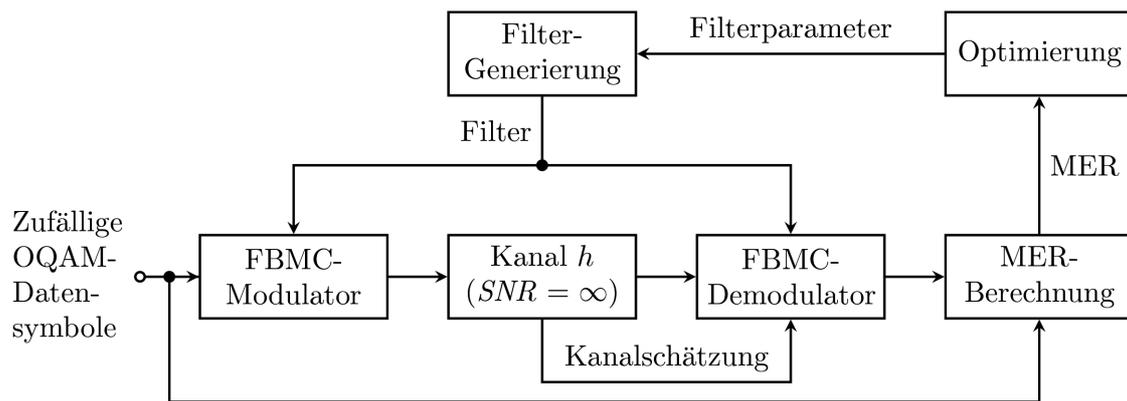


Abbildung 5: Blockschaltbild der FBMC-Filteroptimierung

Carrier (FBMC) mit Offset-QAM (OQAM) verwendet werden. FBMC/OQAM nutzt dabei ein zusätzliches Filter, wodurch Intersymbolinterferenz verringert wird, so dass auf das Schutzintervall verzichtet werden kann. In der Literatur wurden bereits einige Filter für FBMC/OQAM vorgeschlagen. Diese Filter hat Herr Jackisch als Basis zur Optimierung genommen [MA 19/006]. **Abbildung 5** zeigt das dazugehörige Blockschaltbild. Zur Untersuchung des möglichen Gewinns werden hier Zufallsdaten mithilfe eines FBMC/OQAM-Systems über typische Kabelkanäle übertragen. Die Modulationsfehlerrate (MER) beschreibt die Abweichungen zwischen den gesendeten und den empfangenen Symbolen. Das iterative Verfahren passt die Filterparameter so an, dass die Abweichungen minimiert werden. Die Optimierung wurde für fünf Arten von Filtern mit sechs Filterlängen und für drei Übertragungskanäle durchgeführt, um ideale Filter für verschiedene Szenarien zu finden.

Abbildung 4 vergleicht die Datenraten für das optimierte FBMC/OQAM-System mit denen des OFDM-basierten DOCSIS 3.1. Dabei zeigt sich, dass FBMC/OQAM durch den Verzicht auf das Schutzintervall in den allermeisten Fällen eine höhere Datenrate erzielen kann. Durchschnittlich beträgt der Gewinn gegenüber OFDM ca. 0,5 dB.

Neben der Arbeit an Kabelnetzen betreute Herr Jackisch zwei Projekte und eine Bachelorarbeit. Ein Kooperationsprojekt mit dem Cologne Broadcasting Center (CBC) untersuchte die Robustheit von Watermarking, einem Verfahren um Signalisierungsinformationen unsichtbar in Videos einzubringen [BA 19/713]. Eine weitere Projektarbeit verglich die technischen Eigenschaften verschiedener Streaming-Angebote [BA 19/706]. Schließlich verbesserte eine Bachelorarbeit die Darstellung von Diagrammen im IfN Generic SDR Toolkit [BA 19/707].

7. Visible Light Communication

Unter dem Begriff Visible Light Communication (VLC) verbirgt sich die Datenübertragung über sichtbares Licht. Durch VLC kann 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 oder in denen eine Funkübertragung zur Störung wichtiger Systeme führen könnte. Im Institut für Nachrichtentechnik wurde bereits im Jahr 2016 im Rahmen von Untersuchungen zu VLC ein Demonstrator realisiert, der von Herrn Schlegel permanent weiterentwickelt wird. Bislang dienten Signale des Digitalen Fernsehens (DVB-T2), die per VLC übertragen wurden, zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von VLC. In diesem Jahr konnte der Demonstrator zu einem Kommunikationssystem erweitert werden, in dem eine bidirektionale Datenübertragung zwischen einem VLC-Access-Point und einem VLC-Modem über sichtbares LED-Licht im Downlink und infrarotes Licht im Uplink möglich ist. Mit dieser Erweiterung kann nun eine Internetanbindung z.B. zu einem Laptop mittels VLC realisiert werden. Im Access-Point kommen handelsübliche LED-Einbaulampen zum Einsatz, die mit einem Gleichspannungsanteil für die Raumbeleuchtung und dem überlagerten Datensignal für den Downlink betrieben werden. Die Modulation ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, so dass nur eine konstant leuchtende Lichtquelle wahrgenommen wird. Im VLC-Modem detektiert eine Fotodiode die auf das Licht aufmodulierten Datensignale, die anschließend über einen Verstärker zur weiteren Verarbeitung aufbereitet werden. Der Rückkanal basiert auf dem gleichen Konzept, nutzt aber infrarotes Licht für die Übertragung.

Die komplette digitale Signalverarbeitung sowie die Modulation und Demodulation im VLC-Access-Point und VLC-Modem übernehmen dabei zwei modifizierte Power-Line-Communication-Adapter (PLC-Modems), die zur Datenkommunikation jeweils über einen Ethernet-Anschluss verfügen [MA 19/015]. Die Modifikation ermöglicht den Zugriff auf die RX- und TX-Signale der PLC-Modems, deren Verbindung zur „Power-Line“ getrennt wurde. Da der Frequenzbereich dieser RX- und TX-Signale im nutzbaren Frequenzbereich des realisierten VLC-Übertragungssystems liegt, lassen sich beide Systeme ideal kombinieren. **Abbildung 6** zeigt das realisierte Gesamtsystem.

Um ein realistisches Anwendungsszenario zu präsentieren, wurde der VLC-Access-Point in die Decke eines Büros integriert, so dass nur noch die LED-Einbaulampen und der Infrarotempfänger zu sehen sind.

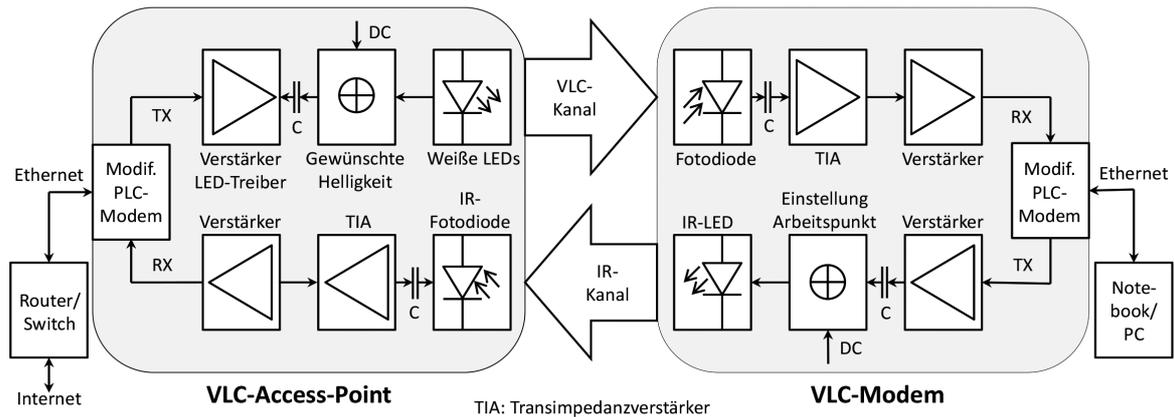


Abbildung 6: Blockschaltbild des VLC-Demonstrators

Der Demonstrator erlaubt derzeit eine Datenübertragung von über 50 Mbit/s im Downlink und über 80 Mbit/s im Uplink.

8. Arbeiten des IT-Serviceteams

Das IT-Serviceteam, bestehend aus Herrn Schlegel und Herrn Gudat, hat in diesem Jahr, neben den ständig anfallenden Aufgaben im IT-Bereich, auch diverse kleinere Projekte bearbeitet. Zu den regelmäßigen Aufgaben des Teams gehören administrative Arbeiten, der Betrieb der institutseigenen Server, die erforderliche Aktualisierung der Hardware und Software bei allen Instituts-Rechnern, allgemeine Reparaturen sowie anfallende Wartungsarbeiten. Besonders hervorzuheben ist dieses Mal die Umstellung nahezu aller Arbeitsplatzrechner auf Windows 10. Weiterhin wurden kleinere Hardwareentwicklungen durchgeführt und mehrere Server und Simulationsrechner neu beschafft und aufgesetzt. Ein Teil der institutseigenen Simulationsrechner (GPU-Cluster) konnte aufgrund hoher Lärm- und Wärmeentwicklung erstmals in den Maschinenraum des Gauß-IT-Zentrums ausgelagert werden.