

5G TODAY – AUF DEM WEG ZUM 5G-RUNDFUNK

ANETA BAIER, CHRISTIAN SAUTTER, KERSTIN PFAFFINGER, THOMAS JANNER

Im Forschungsprojekt 5G TODAY, gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung (BFS), entwickeln die Firmen Kathrein und Rohde & Schwarz unter der Projektleitung des IRT gemeinsam die technologische Basis für die flächendeckende und effiziente Verbreitung von bandbreitenintensiven Medieninhalten an mobile Endgeräte. Unterstützt werden die Projektpartner von den assoziierten Partnern Bayerischer Rundfunk und Telefónica Germany. Konkret geht es um die Umsetzung und Erforschung der FeMBMS (Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service)-Spezifikation zur großflächigen Verbreitung von Rundfunkinhalten auf Basis des 4G/5G-Mobilfunkstandards.

► In the 5G TODAY research project, funded by Bayerische Forschungstiftung (Bavarian Research Foundation, BFS), Kathrein and Rohde & Schwarz are jointly developing the technological basis for a nationwide and efficient distribution of bandwidth-intensive media content on mobile devices under IRT project management. The project partners are supported by the associated partners Bayerischer Rundfunk (regional public broadcaster for Bavaria) and Telefónica Germany. Specifically, this involves the implementation and research of the FeMBMS (Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) specification for the large-scale distribution of broadcast content based on the 4G/5G mobile radio standard.

1. Einführung

FeMBMS ist eine Weiterentwicklung des LTE Broadcast Modes eMBMS im 3GPP Release 14. Damit lassen sich 100 % der Datenkapazität für einen Rundfunkdienst nutzen. Zu den Verbesserungen gehören auch Empfang von Rundfunkinhalten auf mobilen Geräten ohne SIM-Karte sowie größere Senderzellen in einem Gleichwellennetz. Bild 1 zeigt den Zeit-

plan des Projekts. Zu Beginn des Projekts wurden die technischen und regulatorischen Anforderungen für die Umsetzung des Vorhabens definiert. Es wurden Anwendungsfälle für eine mögliche Nutzung der Technologie erörtert und die Messmethode für die Durchführung der Qualitätsmessungen beschrieben. Sehr wesentlich für den späteren Vergleich mit den tatsächlichen Messergebnissen sind die Versorgungsprognosen, die das IRT und Kathrein durchgeführt haben. Die Konzeptionierung und prototypische Realisierung der kompletten Signalkette, bestehend aus Broadcast-Sendesystem und eines entsprechenden Empfangssystems haben bereits vor einem Jahr begonnen. Ein FeMBMS-Sender wurde von der Firma Rohde & Schwarz entwickelt. Das IRT implementiert den FeMBMS-Empfänger basierend auf der Software Defined Radio (SDR) Technologie und des Open Air Interface (OAI).

Im März 2019 entstand im bayerischen Oberland ein Testfeld, um den FeMBMS-Modus in der Praxis umzusetzen und zu evaluieren. Dafür wurden zwei Hochleistungssender mit 100 KW ERP von Rohde & Schwarz an den Senderstandorten des Bayerischen Rundfunks in München-Ismaning und auf dem Wendelstein (Höhe 1828 m) installiert. In diesem Zug wurde für den Standort Ismaning eine neuartige Antenne von Kathrein entwickelt und speziell für die Versorgung von mobilen Endgeräten optimiert. Die beiden Testsender werden in einem Gleichwellennetz über Kanal 56 (750–758 MHz) betrieben. Zur Verifikation und Vergleich mit den Versorgungsprognosen wurde das vorhandene Messsystem „Kathrein Signal Analyzer“ um die FeMBMS-Funktionalität erweitert. Mit den Feldmessungen wurde im Mai 2019 begonnen.

2. LTE-basierendes 5G Broadcast Sendesystem

Grundsätzlich besteht ein LTE-basierendes 5G Broadcast-Sendesystem aus dem Datenzuführungs- und Steuer-Netzwerk (EPC – Evolved Packet Core) und einem oder mehreren Sendern. Das EPC wird für die Broadcast-Funktionalität um die Funktionseinheiten BM-SC (Broadcast Multicast Service Center), MBMS-GW (Multimedia Broadcast Multicast Services Gateway) und MCE (Multi cell Coordination Entity) gegenüber dem reinen Unicast-Betrieb erweitert. Diese Funktionseinheiten sind in Bild 2 blau eingefärbt. Die Sender erhalten die Nutzdaten vom MBMS-GW über das M1- und die Kontrolldaten von der MCE über das M2-Protokoll.

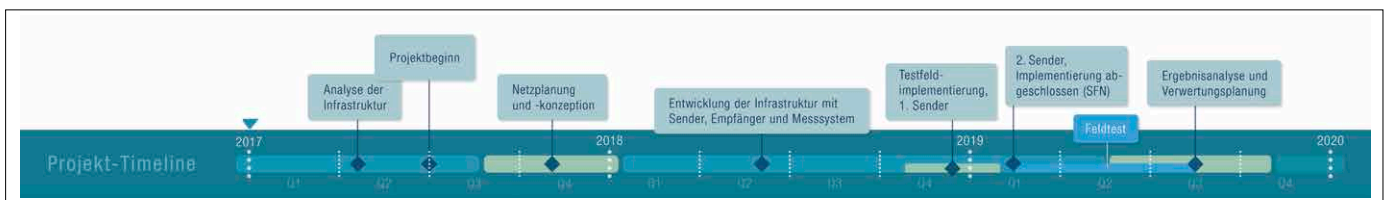


Bild 1. Zeitplan 5G TODAY mit Meilensteinen und Projektphasen. (alle Bilder: die Autoren)

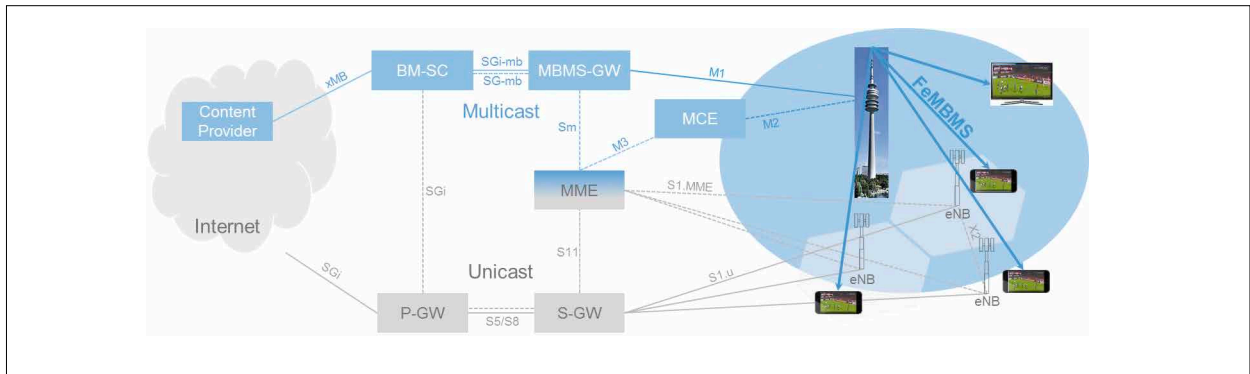


Bild 2. Evolved Packet System mit EPC und Sender (Funktionseinheiten für FeMBMS sind blau eingefärbt)

Hinsichtlich des Physical Layers handelt es sich bei FeMBMS um ein COFDM-Signal wie bei allen modernen digitalen terrestrischen Rundfunkstandards (z. B. DVB-T2).

2.1. EPC-Funktionseinheiten für FeMBMS

R&S fasst die Funktionseinheiten BM-SC, MBMS-GW und MCE in einem neuen Gerät, R&S[®]BSCC, zusammen. Das BM-SC erhält die Services vom Content Provider. Im 5G TODAY-Projekt liefert der Bayerische Rundfunk sein Programm als TSolP (Transport Stream over IP). Das BM-SC fasst die Daten der Services zu neuen Paketen zusammen und fügt im Header der Pakete einen Zeitstempel (SYNC) hinzu, der es den Sendern erlaubt, ein SFN (Single Frequency Network) zu bilden. Das BM-SC gibt die Datenpakete zum MBMS-GW weiter. Von dort werden sie den Sendern als Multicast angeboten.

Die MCE erhält vom BM-SC die Informationen über die Anzahl der Services und deren Datenraten, die zeitgleich übertragen werden sollen. Mit diesen Informationen steuert die MCE die Subframe Allocation im Sender, also die Zuweisung der Nutzdaten in die Radioframes, die dann ausgesendet werden. Zusätzlich vergibt die MCE für jeden Service ein MCS (Modulation and Coding Scheme), das die Robustheit des Empfangs durch Wahl der Modulation und des Fehlerschutzes bestimmt. Dabei wird die MCE immer versuchen, den Datenkanal optimal auszunutzen und jeden Service so robust wie möglich zu übertragen.

2.2. FeMBMS-Sender

Da die Signalform von FeMBMS gleich ist wie die von klassischen digitalen Rundfunkstandards kann FeMBMS auch von Rundfunksendern übertragen werden. Im 5G TODAY-Projekt werden dazu zwei Sender der Hochleistungssenderfamilie R&S THU9evo verwendet. Das Signal wird im Sender vom FeMBMS-Encoder R&S SDE900 und dem Exciter R&S TCE901 erzeugt.

Dabei ist die R&S SDE900 mit dem EPC wie in Bild 3 dargestellt über M1 und M2 verbunden. Die Nutzdaten, die über das

M1-Protokoll ankommen, werden im RLC-Layer (Radio Link Control) verarbeitet und dem MAC-Layer (Media Access Control) übergeben. Gleichzeitig erhält die R&S SDE900 über das M2-Protokoll die Steuerdaten für den RRC-Layer (Radio Resource Control), der die Subframe Allocation durchführt. Vom MAC werden die Daten schließlich dem Physical Layer übergeben und dort wird dann das COFDM Signal erzeugt, also Fehlerschutz (FEC, Forward Error Correction), Modulation, Framing und inverse FFT (IFFT). Die Software des Physical Layer und Teile des MAC wurden in Kooperation mit dem Institut für Nachrichtentechnik (IfN) der Technische Universität Braunschweig entwickelt.

Die resultierenden IQ-Daten des COFDM-Signals werden in IP-Pakete verpackt und über eine senderinterne IP-Strecke der R&S[®]TCE901 zugeführt. Im Exciter wird die lineare und nicht-lineare Vorverzerrung für die Leistungsverstärker durchgeführt und schließlich das analoge FeMBMS-Signal im gewünschten HF-Kanal erzeugt. Dieses HF-Signal wird dann über HF-Splitter an die Leistungsverstärker verteilt und dort verstärkt. Die verstärkten Signale aus den einzelnen Leistungsverstärker werden über ein Koppelnetzwerk zu einer Summenleistung zusammengeführt und über ein Oberwellen- und Bandpassfilter zur Sendeantenne geleitet.

3. 5G-Broadcast aus Sicht der Antenne

3.1. Sendeantennen und Planungsparameter

Generell sind die Anforderungen an Sendeantennen zur Ausstrahlung von FeMBMS-Signalen ähnlich derer für DVB-T (2). Da das FeMBMS-Signal OFDM moduliert ist, gelten für die Leistungs- und Spannungsbelastbarkeit sowie die Reflektion der Sendeantenne dieselben technischen Betrachtungen. Es ist zu beachten, dass Bandpassfilter und Weichen an die bei LTE üblichen 5 MHz oder 10 MHz Kanalbreite angepasst werden müssen.

Bestehende UHF-TV-Sendeantennen können also auch für 5G Broadcast im UHF-Band verwendet werden, wenn sie auf die Sendefrequenz abgestimmt werden können oder breitbandig konzipiert sind, sowie die Belastbarkeit ausreicht.

Ein wichtiger Aspekt bei der Planung von Sendeantennen ist jedoch die Tatsache, dass bei 5G Broadcast die Versorgung von mobilen Endgeräten in den Vordergrund rückt. Dienste, wie zum Beispiel mobiles Fernsehen erfordern ein stabiles Signal, um störende Unterbrüche zu vermeiden.

Für den portablen Empfang außerhalb von Gebäuden (portable outdoor) werden für „gute“ Versorgung 95 % der Orte bei einer Empfänger-Antennenhöhe 1,5 m über Grund angesetzt. Mit den den gewählten Modulations- und Kodierparametern (MCS 9) sowie den typischen Werten für Anten-

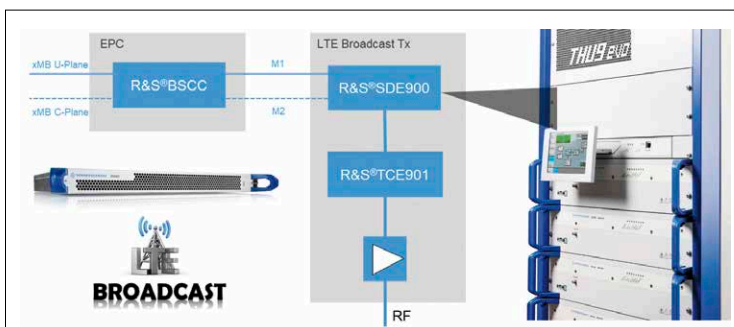


Bild 3. Blöckschaltbild der Sendekette

nengewinn sowie Rauschabstand des Empfängers ergibt sich für die Mindestfeldstärke für FeMBMS-Versorgung ein Wert von 82 dBµV/m.

3.2. Antennen für mobilen Empfang

Die Versorgung von Kraftfahrzeugen mit 5G Broadcast wird mit den im Rundfunk üblichen Sendeleistungen und Abstrahlparametern kein Problem sein, da zumindest in den mittleren und oberen Klassen heute sehr leistungsfähige MRC-Diversity-Empfangsantennensysteme eingesetzt werden können. Für UHF-Band IV/V erreicht man mit guten Scheibenantennensystemen einen linear gemittelten aktiven Gewinn von typisch + 10 dBi für vertikale Polarisation und + 5 dBi für horizontale Polarisation. Dabei fallen die Strahlungsdiagramm-Einzüge des MRC-Signals im kaum tiefer als -10 dB vom Maximum.

Eine Herausforderung stellt dagegen die Integration von UHF-Antennen in Handheld-Endgeräte dar, zum Beispiel Smartphones, mit typischen Abmessungen mit 120 x 60 x 8 mm. Antennenbauformen wie Monopole oder Planarantennen erstrecken sich bei brauchbarer Effizienz und Strahlungseigenschaften auf ca. ¼ Wellenlänge. Das heißt, bei einer Wellenlänge von 400 mm bei 750 MHz würde die Antenne ungefähr so groß wie das Handheld selbst. Dies macht auch den Einsatz von Diversity-Antennen für den UHF-Bereich bei Handhelds innerhalb des Gehäuses sehr schwierig. Der Antennengewinn eines „Handheld“-Empfangsgerätes im UHF-Band wird in Planungsrichtlinien mit -9.5 dBd angenommen [2]. Theoretische Untersuchungen und praktische Tests kommen zu dem Schluss, dass dieser Wert durchaus erreicht werden kann. Eine Problematik sind jedoch die Strahlungsdiagramme, die eine starke Abhängigkeit von Geräteposition und dem Einfluss der Hände haben, und Minima von 10–15 dB aufweisen können (siehe Bild 4).

3.3 Die Sendeantennen im 5G TODAY-Netz

Im Projekt 5G TODAY besteht das Sendernetz zur Aussendung des FeMBMS-Signals aus zwei Stationen großer Leistung (High-Power High-Tower): Wendelstein bei Rosenheim, und Ismaning bei München.

Am Wendelstein wird die bestehende, vertikal polarisierte UHF-Sendeantenne, die auch der Ausstrahlung von DVB-T2 Fernsehen dient, benutzt. Trotz seiner ERP von 100 kW und exponierten Lage ist das Signal vom Wendelstein zu schwach, um im 50km entfernten München die 5G-Broadcast-Versorgung „portable outdoor“ zu erzeugen.

Daher hat man am Standort Ismaning, ca. 15 km nordöstlich von München, einen zweiten FeMBMS-Sender großer Leistung implementiert, der im SFN (Single Frequency Network) mit dem Wendelstein arbeitet. Die Sendeantenne in Ismaning wurde so konzipiert, dass sie die Sendeleistung wahlweise horizontal, vertikal oder rechtsdrehend zirkular polarisiert abstrahlen kann. Die dabei eingesetzten Antennenfelder sind so optimiert, dass das Strahlungsverhalten der horizontal und vertikal polarisierten Anteile im Betriebskanal nahezu identisch ist. Dies ermöglicht aussagekräftige Messkampagnen für das Projekt 5G TODAY.

Bereits in den 1970er-Jahren wurde für UKW-Rundfunk der Einsatz von zirkularer Polarisation untersucht. Für mobilen und portablen Empfang ergaben damalige Tests eine Verbesserung der Signalstärke sowie Verringerung der Schwundtiefe, die einer Erhöhung der ERP von ca. 5–7 dB entsprächen. Leider wird dies bei UKW mit zusätzlichen Störungen durch verstärkte Mehrwegeausbreitung erkauft. Daher konnte sich zirkulare Polarisation bei UKW in Europa nicht durchsetzen, wohl aber in anderen Ländern.



Bild 4. Typische Parameter für eine Mobiltelefon-Empfangsantenne im UHF Band V (alle Bilder: die Autoren)

Mit Mehrträger-Modulationsverfahren und durch leistungsfähige Fehlerkorrektur stellen diese Mehrwegeausbreitungsstörungen heutzutage beim digitalen Rundfunk kein Problem mehr dar. Im günstigen Fall können damit Empfangslücken in dichter städtischer Bebauung aufgefüllt werden. Ein weiterer Vorteil von zirkularer Polarisation ist, dass damit der Empfang nahezu unabhängig von der Polarisations-Stellung der Empfangsantenne wird (siehe Bild 6).

Zirkulare Polarisation hätte also das Potential, die schlechten Antenneneigenschaften von mobilen Endgeräten im UHF-Band, besonders unter schwierigen Empfangsbedingungen, auszugleichen. Die Verbesserung der Versorgung bei Nutzung von zirkularer Polarisation soll im Rahmen des Projekts 5G TODAY untersucht und, wenn möglich, quantifiziert werden.

4. Messtechnik für FeMBMS

Für das Projekt 5G TODAY wurde eine spezielle FeMBMS-Messoftware erstellt. Diese basiert auf der Plattform „Kathrein Signal Analyzer“ und arbeitet nach dem SDR (Software Defined Radio)-Prinzip. Systembestandteile sind u. a.:

- FeMBMS-Decodersoftware
- HF-Empfänger Rohde&Schwarz TSMW
- Diverse Positions-, Weg- und Höhengeber

Der HF-Empfänger digitalisiert das Empfangssignal und stellt die I/Q-Daten der Decodersoftware zur Verfügung. Diese wertet



Bild 5. UHF-FeMBMS-Sendeantenne ISMANING und Blick ins Innere eines Antennenfeldes

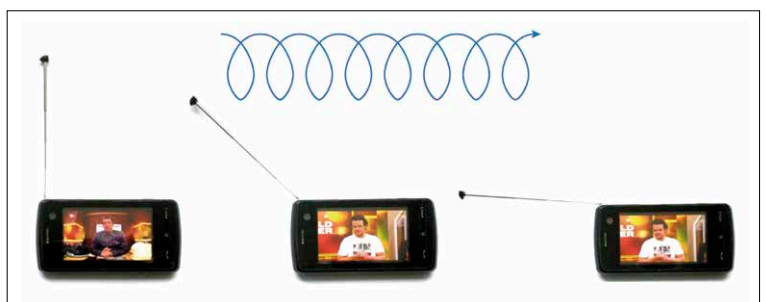


Bild 6. Bei zirkularer Polarisation ist guter Empfang unabhängig von der Stellung der Empfangsantenne

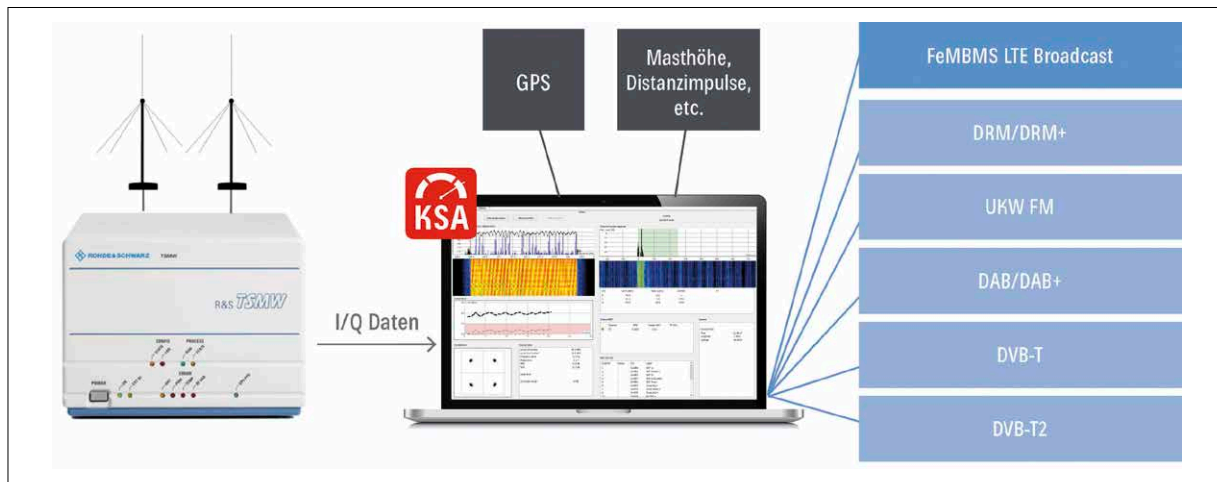


Bild 7. Messsystem für FeMBMS

den Empfangspegel und die Empfangsqualität von dedizierten Datenpaketen aus, und fügt die Informationen der Positionsgeber hinzu. Das System arbeitet im „Snapshot“-Modus, die Software arbeitet also die I/Q-Daten paketweise ab. Um eine akzeptable Messgeschwindigkeit zu erzielen, wird das empfangene Signal nicht bis auf Bild- und Tonebene herunterdecodiert – dies ist für die Messung selbst auch nicht erforderlich.

Es ist zu erwähnen, dass die Decoder-Software unabhängig von bestehenden Chipsätzen oder Software erstellt wurde. Im Abgleich mit anderen Plattformen ermöglicht dies gleichzeitig die Validierung der Umsetzung des Standards. Im Projekt 5G TODAY wird das Messsystem in verschiedenen Fahrzeugen zur Auswertung der Signalqualität und der Versorgung „stationär“, „portable outdoor“ oder „mobil“ eingesetzt.

5. Feldmessungen – Erste Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts fanden bereits erste Feldmessungen statt. Weitere Messungen sind bis zum Ende des Projekts geplant, auf deren Basis letztlich eine Einschätzung der Möglichkeiten, aber auch Grenzen eines FeMBMS-Netzes erfolgen soll. Mit der praktischen Umsetzung des Standards stellt das Förderprojekt ein Testfeld zur Verfügung, um Praktikabilität und Leistungsfähigkeit des Systems besonders in Hinblick auf die Anforderungen des Rundfunks auf Herz und Nieren zu prüfen.

Für die Messungen wurde die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Messsoftware KSA der Firma Kathrein (Enkom) eingesetzt. In einem ersten Schritt wurden Mobilmessungen mit einer externen Autodachantenne durchge-

führt und die Messdaten hinsichtlich der Feldstärke und dem CINR ausgewertet. Zur Beurteilung der Netzkonzeption wurde sowohl das MBSFN-Datensignal (Multimedia Broadcast Single Frequency Network, MBSFN) mit einem Cyclic Prefix (CP) von 200 μ s betrachtet, als auch das CAS-Signal (Cell Acquisition Subframe) mit einem CP von 16,67 μ s. Das CAS-Signal enthält die im Rahmen einer 100%igen MBSFN-Übertragung benötigten Kontrollinformationen und befindet sich auf dem Subframe #0. Es wird mit einer Periode von 40 ms übertragen und ist somit in jedem vierten Radioframe enthalten. Da das CAS-Signal für Signalisierung und Synchronisierung benötigt wird, muss für die Decodierung des Datensignals zunächst das CAS-Signal korrekt decodiert werden. Somit ist eine Versorgung für das MBSFN nur dann gewährleistet, wenn sowohl das Datensignal als auch das CAS-Signal empfangen werden können. Das CAS-Signal verfügt nur über ein sehr kurzes CP, was es für den Gleichwellennetzbetrieb in HTHP-Netzen unattraktiv macht. Es ist dafür jedoch deutlich robuster und benötigt ein wesentlich geringeres C/N als das entsprechende Datensignal. Eine Untersuchung von Nokia [1] zeigt, dass abhängig vom Kanalprofil ein SNR von 4,8 dB bzw. -6,6 dB erforderlich ist, um unter Einhaltung eines Fehlerkriteriums von 1% PBCH BLER noch decodiert werden zu können. Ob diese C/N-Werte für den realen Empfänger tatsächlich ausreichend sind, muss in Labortests noch verifiziert werden.

Die beiden Sender Ismaning und Wendelstein wurden zum Zeitpunkt der ersten Mobilmessungen mit vertikaler Sendeantenne und einer Strahlungsleistung von jeweils 100 kW ERP betrieben, wobei zunächst noch keine Delay-Optimierung zum Einsatz kam. Als Sendernetzkonfiguration wurde für diese ersten Testmessungen MCS9 gewählt. Bild 8 zeigt exemplarisch die gemessenen RSRP-Werte (Reference signal received power) für die zugrundeliegende Netzkonfiguration. Dargestellt ist ein Ausschnitt auf der Messroute, der in Bild 9 mit einer roten Umrandung markiert ist (Pfeil zeigt Fahrtrichtung an). Da sich die Messrouten in der Nähe des Senders Ismaning befinden, sind dessen Leistungen auf der Messstrecke durchgehend höher, als die des Senders Wendelstein, der zwar in exponierter Lage, aber dennoch in örtlich großer Entfernung zur Messstrecke liegt. Die gemessenen Leistungen beziehen sich auf die jeweiligen Referenzsignale. Aus diesem Grund weisen die CAS-Signale eine andere Bezugsbandbreite als das zugehörige MBSFN-Datensignal auf, was sich in einer niedrigeren Leistung für das MBSFN-Signal niederschlägt.

Da bereits im Vorfeld eine Prognose der zu erwarten-

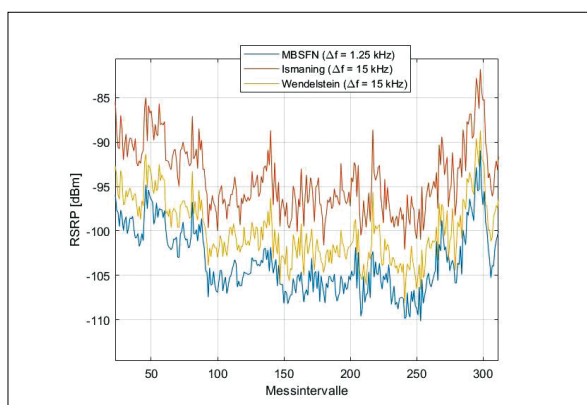


Bild 8.
Gemessene
RSRP-Werte für
CAS-Signale und
MBSFN-Signal

den Feldstärken im Netz mittels des Frequenzplanungstools Fransy erfolgt ist, konnte in einem weiteren Schritt ein Vergleich der aus den gemessenen RSRP-Werten abgeleiteten Feldstärken des MBSFN mit den Simulationen erfolgen. Für diese Plausibilitätsprüfung wurden die Messwerte über jeweils 50 m Messstrecke gemittelt, dies entspricht der Auflösung der Prognose, welche mit dem IRT2D-Ausbreitungsmodell durchgeführt wurde. Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Messung auf einem Ausschnitt der Messroute, welche qualitativ mit der darunterliegenden flächigen Feldstärkeprognose verglichen werden kann. Es zeigt sich in vielen Bereichen eine relativ gute Übereinstimmung der Messwerte mit den Simulationen. An manchen Orten übersteigt der tatsächliche Feldstärkewert die Vorhersage, dies besonders in (vor) städtischen Gebieten. Aber auch der umgekehrte Effekt tritt auf. Es existieren Bereiche, in denen die Simulationen sehr hohe Feldstärkewerte liefern, während die realen Messwerte niedriger ausfallen. Hier zeigen sich die Grenzen von Prognosen auf Basis einer groben Morphografieklassifizierung, die etwa oftmals innerhalb des gesamten Orts-/Stadtgebiets einheitlich dichte Siedlung annehmen, während sie außerhalb großflächig von offener Landschaft ausgehen. Der Einsatz hochaufgelöster Topo-/Morphodaten in den Prognosen könnte diesbezüglich Abhilfe schaffen.

Die Labor- und Feldmessungen im Rahmen des Förderprojekts sind gestartet und werden in nächster Zeit zahlreiche Analysen, Diskussionen und Erkenntnisse mit sich bringen, die eine klarere Sicht auf Möglichkeiten und Grenzen des Systems erlauben. Es wird jedoch noch einer Vielzahl an Untersuchungen und Messungen zu weiteren spezifischen Aspekten bedürfen, um letztlich zu einer verlässlichen Gesamtbeurteilung des Systems hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Brauchbarkeit für den Rundfunk zu gelangen.

6. Zusammenfassung

Das Projekt 5G TODAY endet am 31.10.2019. Bis zum Ende des Projekts werden Feldtests durchgeführt, um die Eignung der Technologie als Rundfunksystem zu evaluieren. Die Versuchsergebnisse werden anhand von Messprotokollen und Ergebnisberichten mit Blick auf die verwendete Sendetechnik zusammengefasst. Es werden auch Vorschläge zur Einbringung in den Standard erarbeitet.

Ein 5G-Rundfunkmodus erlaubt eine effiziente Verbreitungsmöglichkeit über die Zellgrenzen klassischer Mobilfunktechnologien hinweg und bietet durch die realisierte

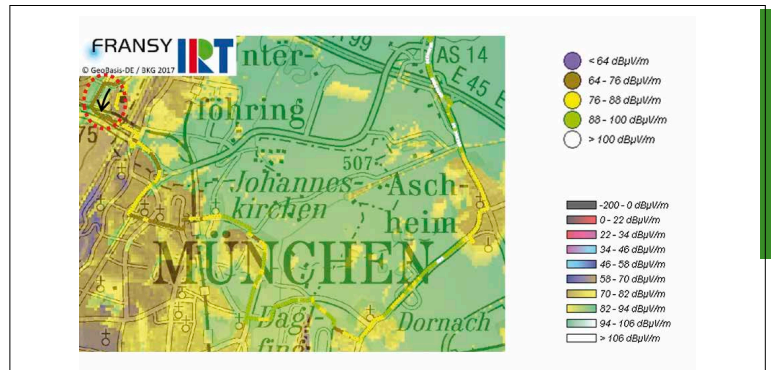


Bild 9. Vergleich von Feldstärkeprognosen und Messungen des MBSFN-Signals (alle Bilder, sofern nicht anders erwähnt: die Autoren)

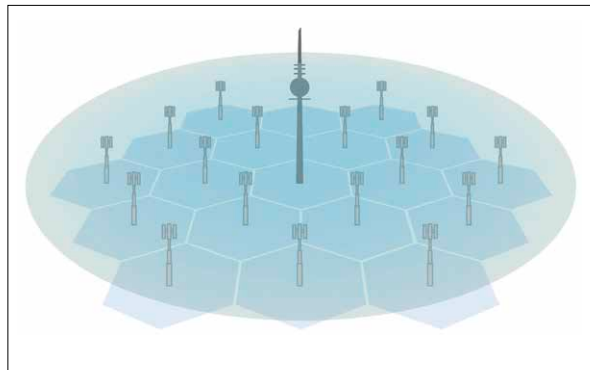


Bild 10. Effiziente Verbreitung über Zellgrenzen hinweg

Konvergenz die Möglichkeit eines Rückkanals auf Basis derselben Technologie. So entsteht ein Mehrwert in 5G-Endgeräten, von der nahtlosen Kombination von linearen Fernsehendungen mit On-Demand-Angeboten bis hin zu sicherheitsrelevanten Informationen für die gesamte Bevölkerung.

Literaturverzeichnis:

- [1] R1-1611493, Performance results for cell acquisition subframe, Nokia, Alcatel-Lucent Shanghai Bell, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #87, Reno, USA, November 2016
- [2] ITU-R Report BT.2254-3: Frequency and network planning aspects of DVB-T2, ITU, Geneva 2017



ANETA BAIER

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Sachgebiet Funkssysteme am IRT. Derzeit leitet sie das bayerische Forschungsprojekt 5G Today

www.irt.de



THOMAS JANNER

leitet das Produktmanagement und die Entwicklung Signalverarbeitung für die Terrestrischen Sendesysteme bei Rohde & Schwarz.

www.rohde-schwarz.com



KERSTIN PFAFFINGER

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am IRT und im Sachgebiet Funkssysteme für die Frequenz- und Sendernetzplanung zuständig

www.irt.de



CHRISTIAN SAUTTER

ist Senior Director R&D Product Management bei der KATHREIN Broadcast GmbH

www.kathrein.com

Bild: IRT

Bild: Photogenika

Bild: IRT

Bild: Kathrein