

- 30 AKTUELL
- 31 Sandbox Pitching in München –
Eine Rückschau
RONALD MIES
- 31 Professionelle Audio- und Video-Produktion
als Herausforderung für den nächsten Mobil-
funkstandard 5G
JENS PILZ, GESINE RODENKIRCHEN,
AXEL SCHMIDT
- 31 Frequenzen für 5G – Ein Problem?
ULRICH REIMERS
- 46 ARD Medien-File-Transfer MFT 2.0 –
Konzeption und Realisierung eines
universellen File-Transfer-Systems für
den Medienaustausch in heterogenen
Systemumgebungen – Teil 2
RALF EINHORN, ANDREAS EBNER,
ANDRÉ STEFFENS, HOLGER LICHTENTHÄLER



FREQUENZEN FÜR 5G – EIN PROBLEM?

ULRICH H. REIMERS

Die fünfte Generation des Mobilfunks, allgemein als 5G titulierte, ist derzeit in aller Munde. Zwar werden die für eine weltweite Nutzung erforderlichen Standards durch das 3rd Generation Partnership Project (3GPP) erst entwickelt, aber es drängt sich der Eindruck auf, als ob alle Welt bereits weiß, wofür 5G gut sein wird und was es leisten kann. Von den vielfältigen Anwendungsfeldern, für die 5G genutzt werden können soll, ist der Einsatz für eine flächendeckende Bereitstellung schneller Breitbandverbindungen das am heftigsten diskutierte. „5G zu jeder Milchkanne“ ist eine typische Forderung, insbesondere aus den Reihen der (Regional-)Politik. Allerdings wird dabei weder betrachtet, welchen technischen und physikalischen Randbedingungen auch 5G unterliegen wird, noch wird über die wirtschaftliche Dimension eines flächendeckenden Ausbaus geredet. Der vorliegende Beitrag beleuchtet einige der technischen Randbedingungen und zeigt, dass in Anbetracht grundsätzlicher Fragen insbesondere der flächendeckende Ausbau mit den gerade verfügbar werdenden Frequenzen illusorisch ist.

► The fifth generation of mobile radio, generally referred to as 5G, is currently on everyone's lips. Although the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) is still developing the standards required for worldwide use, one has the impression that the whole world already knows what 5G will be good for and what it can do. Of the many fields of application for which 5G is to be used, the most hotly debated is the use for nation-wide provision of fast broadband connections. „5G to every milk can“ is a typical demand, especially from the ranks of (regional) politics. However, it does not consider which technical and physical boundary conditions 5G will also be subject to, nor does it talk about the economic dimension of a nation-wide coverage. The present article examines some of the technical boundary conditions and shows that, in view of fundamental questions, the area-wide expansion with the frequencies currently becoming available is illusory.

1. Einleitung: Erwartungen an 5G

Die Liste der Versprechungen, die sich um den Begriff 5G ranken, ist lang. Bild 1 demonstriert dies [Nokia].

Während in der Öffentlichkeit das Anwendungsfeld „Kommunikation zwischen Maschinen“ (Machine-to-Machine – M2M) relativ wenig Beachtung findet, wird das Anwendungsfeld „Sicherheitskritische Kommunikation“ durchaus

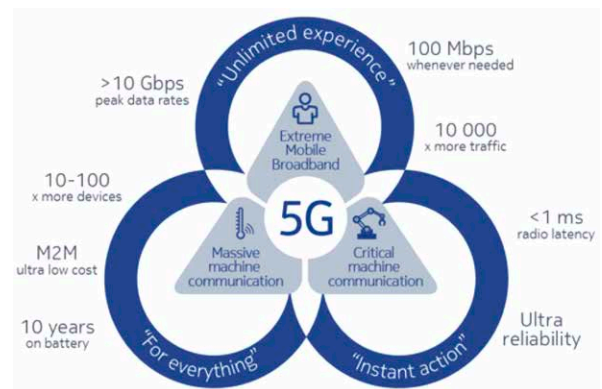


Bild 1: Anwendungsfelder von 5G aus der Sicht eines Herstellers. Grafik: Nokia

diskutiert und vor allen Dingen mit den Planungen für autonom fahrende Fahrzeuge in Verbindung gebracht. Eine detaillierte Liste der möglichen Anwendungsfelder für 5G hat das Konsortium 5G-PPP erarbeitet [5G-PPP]. Die sieben dort sogenannten „Verticals“ sind: Automotive, Manufacturing, Media, Energy, eHealth, Public Safety und Smart Cities. Das Thema in der Öffentlichkeit ist aber die Verwendung von 5G für hochdatenratige Breitbandverbindungen. Hier sind die Versprechungen insbesondere der Netzausrüster wie Ericsson, Huawei und Nokia äußerst vollmundig. Und natürlich sind es gerade diese Unternehmen, die daran interessiert sein müssen, mit 5G-Netzen den Umsatz der Zukunft zu generieren. Von den Betreibern der Mobilfunknetze selbst liest und hört man zu 5G weit weniger, denn der Ausbau von 5G-Netzen ist für sie natürlich primär eine kostenintensive Herausforderung. Aber auch in der Politik ist 5G angekommen. So erklärte der damalige Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur, Alexander Dobrindt, schon 2017: „5G ist die Grundlage der Gigabit-Gesellschaft“ [BMVI].

2. Der Stand der Entwicklung im Downlink

Mit Blick auf die Ankündigung einer Gigabit-Gesellschaft liegt es nahe, speziell die im sogenannten Downlink spezifizierten Algorithmen der Signalverarbeitung zu betrachten, um aus dieser Betrachtung abschätzen zu können, welche tatsächlichen Datenraten realistisch sind. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass auch im 5G-Zeitalter die Datenrate auf dem Weg zum Endgerät (Downlink) relevanter ist, als die auf dem Weg zur Basisstation (Uplink). Gerade Letzterer spielt bei der Frage des Netzausbaus aber eine gewichtige Rolle. Die spannenden Entwicklungen im Kernnetz, aber auch Aspekte des Network Slicing etc. sollen hier außer Betracht bleiben, denn zum Schluss entscheidet sich auf der Funkstrecke, welche Datenrate den Kund/innen zur Verfügung stehen. Dokumentiert sind die Algorithmen im 3GPP Release 15, der in aktualisierter Version am 25. Januar 2019 erschien [3GPP]. Geplant ist die zusammenfassende Dokumentation des 5G-Systems aber erst in Release 16, der Ende 2019 zur Verfügung stehen könnte und dann der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) als deren System IMT 2020 (IMT: International Mobile Telecommunications) vorgeschlagen

werden soll. Die folgende Aufzählung nennt wichtige Algorithmen des Release 15.

- OFDM mit Guard Interval (wie DAB+, DVB-T, DVB-T2, DVB-C2) (Guard Interval heißt hier: Cyclic Prefix)
- Maximal 3300 OFDM-Träger
- Trägerabstand $2^{\mu} \cdot 15$ kHz (bis 240 kHz)
- Länge des cyclic prefix: 4,7 μ s oder kürzer
- Modulation der OFDM-Träger: QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM (wie DVB-T2)
- Verbindungsaufbau mittels beam sweeping
- Fehlerschutz für die Nutzdaten: LDPC (wie DVB-T2)
- Fehlerschutz für die Kontroll-Kanäle: Polar Code
- MIMO unterhalb 6 GHz (einige zehn gleichzeitige Nutzer/innen): bis zu 8*8
- MIMO oberhalb 6 GHz (wenige gleichzeitige Nutzer/innen): typisch 2*2 (beamforming)

Es fällt auf, dass die Auflistung viele Elemente enthält, die speziell bei DVB-T2 bereits in Betrieb sind. Die „Algorithmen-Revolution“ hat also nicht stattgefunden. Neu ist der für die Kontroll-Kanäle ausgewählte Fehlerschutz mittels Polar Code. Für die kurzen Paketlängen der Kontroll-Kanäle ist der dem Low Density Parity Check Code (LDPC) überlegen, welcher seine Stärke bei den langen Daten-Paketen ausspielt. Nicht mehr neu, aber bei den Broadcast-Systemen wegen des fehlenden Uplink nicht effizient [Rob], ist Multiple Input Multiple Output (MIMO).

Es liegt nun nahe, in Kenntnis der Leistungsmerkmale von DVB-T2 die im Downlink mögliche Datenrate abzuschätzen. In einem 8 MHz breiten Kanal werden in Deutschland je nach Parameter-Wahl per DVB-T2 22 bis 27 Mbit/s ausgestrahlt. Skaliert man den höheren der Werte auf eine Kanalbandbreite von 20 MHz (siehe Abschnitt 3), so resultieren für ein 5G-Signal 67,5 Mbit/s.

Komplex ist die Betrachtung der Wirkung von MIMO. In einem x*y-MIMO-System stehen an der Basisstation x Antennen für die jeweilige Verbindung zum Endgerät und in diesem y Antennen zur Verfügung. Im Idealfall könnten damit mehrere unabhängige Signale gesendet bzw. empfangen werden, wobei die kleinere der beiden Zahlen x bzw. y diese Zahl bestimmt. In der Realität sind die Signale aber zum einen nicht völlig de-korreliert, benötigen Pilotsignale zur Identifikation, welche die verfügbare Datenrate mindern u.v.a.m. Es stellt sich auch die Frage, wie viele Antennen z.B. in einem klassischen Smartphone effektiv wirksam sein können. Eine sehr lesenswerte Betrachtung dazu findet sich in dem 2018 erschienenen Beitrag [LiYang]. Dort wird eine Antennen-Struktur für ein Smartphone mit 10 Antennen beschrieben und deren Leistungsvermögen analysiert, wobei sogar der Einfluss der Hände berücksichtigt wird, die das Smartphone halten. Die Antennen sind für einen Frequenzbereich optimiert, der in Abschnitt 3 im Mittelpunkt der Betrachtung stehen wird. Allerdings geht die Analyse von der Antennen-Struktur in einer Leiterplatte aus, die nicht mit Bauteilen bestückt ist, und es wird das Vorhandensein der

großflächigen Batterie und des Displays nicht berücksichtigt. Dieser Aufsatz ist ein hervorragendes Beispiel für das prinzipiell Machbare, ohne dass daraus abgeschätzt werden kann, welche praktische Größenordnung der MIMO-Gewinn erreichen kann. Vielleicht ist die folgende Abschätzung realitätsnah: Bei gutem Störabstand, also in der Nähe einer Basisstation, mag im Fall des bei [3GPP] spezifizierten 8*8-MIMO ein MIMO-Gewinn in der Größenordnung eines Faktors 3 realistisch sein. Der Downlink liefert dann maximal 200 Mbit/s. Wenn „einige zehn gleichzeitige Nutzer“, sagen wir 40, gleichzeitig diese maximale Datenrate nutzen, muss die Basisstation allein für die 8 Gbit/s bereitstellen können.

3. Frequenzen für 5G

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) gab am 26. November 2018 die Bestimmungen zur Versteigerung von Frequenzen in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz bekannt. Zur Versteigerung stehen die folgenden Frequenzen (Abb. 2) [BNETZA].

Neben diesen bundesweit nutzbaren Frequenzen stellt die BNetzA weitere Frequenzen im Bereich 3.700 MHz bis 3.800 MHz sowie 26 GHz für lokale Zuteilungen bereit. Im Bereich 2 GHz sind viele der Frequenzen bis 2025 belegt und erst anschließend für 5G nutzbar. Das umfangreiche Entscheidungs-Dokument der BNetzA formuliert zahlreiche Auflagen, die von den Unternehmen zu erfüllen sein werden, die sich an der Frequenz-Versteigerung beteiligen. Beispielsweise müssen bis Ende 2022 98 % der Haushalte in jedem Bundesland mit mindestens 100 Mbit/s im Downlink im Antennensektor erreicht werden. Das heißt nicht etwa, dass alle Haushalte 100 Mbit/s nutzen können. Die typische Basisstation versorgt drei Sektoren und muss daher 300 Mbit/s bereitstellen – in Summe für alle Nutzer/innen in ihrem Versorgungsgebiet. Ebenfalls zum 31. Dezember 2022 müssen alle Bundesautobahnen mit 100 Mbit/s im Downlink im Antennensektor erreicht werden. Weitere Vorgaben beziehen sich auf Bundes-, Landes- und Staatsstraßen und auf Wasserwege. Es ist davon auszugehen, dass diese Auflagen, wenn überhaupt, bis 2022 nicht mit 5G zu realisieren sind, sondern mit 4G (LTE – Long Term Evolution). Es gibt aber auch spezielle 5G-Auflagen: Bis Ende 2022 sind 1000 „5G Basisstationen“ in Betrieb zu nehmen. Mit Blick auf die vorhandene Belegung der Frequenzen bei 2 GHz werden die 5G-Basisstationen im Bereich 3,6 GHz in Betrieb gehen müssen. Dabei können die Bieter Frequenzblöcke in ganzzahligen Vielfachen von 10 MHz (ungepaart) ersteigern.

4. Ein Problem?

Die Versteigerung der Frequenzen im Bereich 3,4 GHz bis 3,7 GHz erschließt einen Frequenzbereich, der in etwa um den Faktor vier höher liegt, als die Frequenzen, mit denen der GSM-Mobilfunk in Deutschland startete (GSM 900: 890 MHz bis 915 MHz und 935 MHz bis 960 MHz). Die Freiraumdämpfung F einer elektromagnetischen Welle folgt aber der Gleichung:



Bild 2: Zur Versteigerung im Frühjahr 2019 verfügbare Frequenzen
Grafik: BNETZA



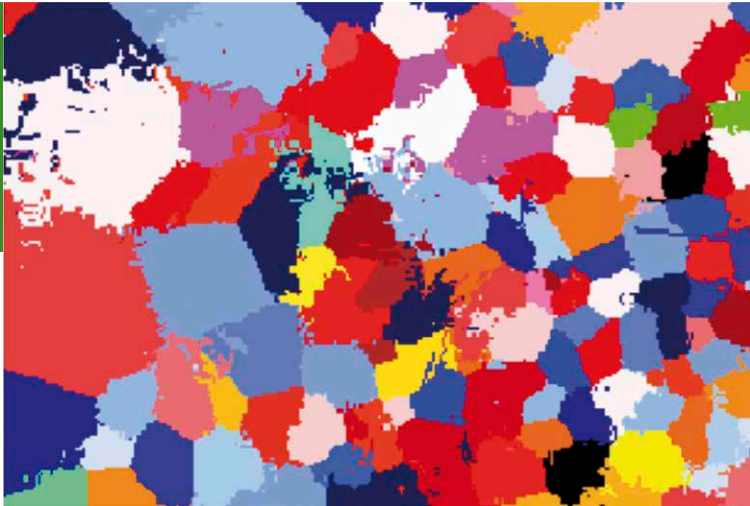


Bild 3: Struktur der Versorgungsgebiete eines zellularen Mobilfunknetzes [Kür2016]

$$F = \left(\frac{4\pi r \cdot f}{c} \right)^2$$

wobei f die Frequenz, r die Entfernung und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Sie nimmt von 890 MHz zu 3400 MHz damit um den Faktor 14,6 zu. Dies entspricht 11,6 dB. Entsprechend muss dann auch die Sendeleistung der Basisstation steigen, wenn man von unveränderten Antennen-Gewinnen auf Sender- und Empfängerseite, unveränderter Empfänger-Empfindlichkeit etc. ausgeht. Hier darf aber nicht vergessen werden, dass ein Smartphone nur dann im Mobilfunknetz eingebunden ist, wenn auch der Uplink zurück zur Basisstation funktioniert. Und die Erhöhung der Sendeleistung im Uplink ist aus verschiedenen Gründen praktisch undurchführbar. Genannt sei hier nur beispielsweise die Spezifische Absorptionsrate (SAR). Das Bundesamt für Strahlenschutz nennt hier für ein aktuelles iPhone den Wert von 1,38 W/kg (am Ohr). Die Weltgesundheitsorganisation empfiehlt als obersten Grenzwert 2,0 W/kg. Es bleibt da also wenig Luft nach oben. Nicht vergessen werden darf auch die Lebensdauer einer Batterie-Ladung im Endgerät, die bei Erhöhung der Sendeleistung im Uplink abnehmen würde. Tatsächlich ist der Uplink das Element, welches über die Reichweite einer 5G-Basisstation entscheidet [WangGuo]. Im Ergebnis ist der zur Verfügung stehende Freiheitsgrad der Abstand r zwischen Basisstation und Smartphone. Die Netze müssen also verdichtet werden.

Nun mag man argumentieren, dass die Freiraumdämpfung nicht die in der Praxis relevanten Verhältnisse charakterisiert. Hier erweist es sich als Glücksfall, dass Dr.-Ing. Kin Lin Chee, betreut von Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner, am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen einer Untersuchung zur Eignung von WiMAX (IEEE 802.16) zur Versorgung von Dörfern mit Breitband-Internet umfangreiche Messungen bei den Frequenzen 835 MHz und 3535 MHz durchgeführt hat. Die Messungen erfolgten im niedersächsischen Dorf Hetzwege, das zwischen Bremen und Hamburg, also im Flachland, liegt. Die Ergebnisse sind in seiner Dissertation dokumentiert, die insbesondere auch darstellt, welchen Einfluss die Veränderung der Beblätterung der Bäume im Jahresverlauf hat [Chee]. Der Unterschied der Freiraumdämpfung zwischen den betrachteten Frequenzen liegt, nimmt man die obige Gleichung als Basis, bei 17,9 entsprechend 12,5 dB. Die Ergebnisse der Dissertation sind daher, auch wenn die untere

der beiden Frequenzen nicht exakt der für GSM 900 entspricht, sehr relevant für die hier zu betrachtende Analyse. Tatsächlich sind die gemessenen Unterschiede noch einmal größer, als mittels der Freiraumdämpfung prognostiziert. Im Winter, also bei fehlender Beblätterung liegen sie bei direkter Sichtverbindung (LOS: Line of Sight) im Mittel bei 14,8 dB und bei fehlender direkter Sichtverbindung (NLOS: Non Line of Sight) bei 22,0 dB. 22 dB entsprechen dem Faktor 158.

Damit stellt sich also nun die Frage, wie groß das Versorgungsgebiet einer Mobilfunkzelle sein kann, wenn die genutzte Frequenz im Bereich 3,5 GHz liegt. Häufig geht man vereinfachend davon aus, dass ein Mobilfunknetz aus Zellen besteht, deren Versorgungsgebiet einem Hexagon entspricht. Die Realität sieht aber anders aus:

In Bild 3 erkennt man die sehr irreguläre Struktur der Zellen, die sich aus unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen ergibt. Die Zuordnung zu den Zellen ist in dem Bild nach dem jeweils stärksten empfangenen Signal erfolgt. Tatsächlich kann man die hier sehr „hart“ wirkenden Zellgrenzen aber nur durch Versorgungswahrscheinlichkeiten charakterisieren.

Die Abmessungen des Versorgungsgebietes einer Zelle sind maßgeblich auch von der Robustheit des Signals abhängig. Unterschiedliche Modulationsarten (bei 5G wie bei DVB-T2 von QPSK bis 256 QAM) und unterschiedliche Codieraten des Fehlerschutzes müssen bei dieser Betrachtung berücksichtigt werden. Von Bedeutung ist die Umgebung, in der die Zelle installiert wird. Außerdem spielen zahlreiche andere Parameter hier eine bedeutende Rolle. Wenn es aber nur um den Vergleich der Zellradien bei unterschiedlichen Frequenzen geht und die jeweiligen Parameter bei dem Vergleich jeweils identisch gewählt werden, ist eine relevante Aussage möglich. Die nachfolgende Tabelle 1 [Kür2018] ermöglicht den Vergleich. Das unterlegte Signalformat entspricht dem „Modulation and Coding Scheme (MCS)“ 15 des LTE-Mobilfunk-Standards (64 QAM im Downlink). Der Zellrand ist durch eine Versorgungswahrscheinlichkeit von 95 % charakterisiert.

TABELLE 1: VERGLEICH DER ZELLRADIEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN FREQUENZEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE UMGEBUNGEN

Trägerfrequenz in MHz	Zellradius in m			
	Stadt	Vorstadt	Ländlich flach	Ländlich hügelig
800	553	1063	2043	1573
3500	137	264	507	390

Eine „Milchmädchenrechnung“ beleuchtet die Konsequenz der hier dargestellten Werte. Würde man beispielsweise Niedersachsen als ein ausschließlich „ländlich flaches“ Territorium annehmen und tatsächlich eine flächendeckende 5G-Versorgung realisieren (ohne Einschränkungen aus der Uplink-Versorgung überhaupt zu berücksichtigen), wären 61.000 Basisstationen erforderlich. Für den Fall, dass die drei Mobilfunknetz-Betreiber separate Netze realisieren müssten, wären es 183.000. Natürlich wäre die Zahl in der Realität deutlich höher, da sowohl die Städte, die Vorstädte und die hügeligen bzw. bergigen Regionen des südlichen Niedersachsens ebenfalls zu versorgen wären. Zur Kalibrierung: In [BNetzA] wird die Zahl der derzeit bundesweit in Betrieb befindlichen LTE-Basisstationen mit 48.146 angegeben.

Da jede der Basisstationen an das Kernnetz angebunden

werden muss, steigt mit der Zahl der benötigten Basisstationen naturgemäß der Aufwand für die Backhaul-/Front-haul-Verbindungen. Inwieweit dies mit Glasfaser-Anschlüssen oder mit Funkverbindungen erfolgen kann, bleibt abzuwarten. Vielversprechend ist die Nutzung von Frequenzen im 300 GHz-Bereich, die derzeit in dem europäisch/japanischen Projekt ThoR (Terahertz end-to-end wireless systems supporting ultra-high data Rate applications) erforscht wird, dessen europäische Projektleitung am Institut für Nachrichtentechnik (IfN) der Technischen Universität Braunschweig angesiedelt ist.

5. Zusammenfassung

Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass mit der Entwicklung der fünften Generation des Mobilfunks ein weiterer bedeutender Schritt zur Verbesserung der Mobilfunkversorgung ermöglicht werden wird. In Ballungsräumen wird dies auch mit den in Kürze zur Verfügung stehenden Frequenzen im 3,5 GHz-Bereich gelingen. Für die Flächenversorgung ist dieser Bereich nicht geeignet. Erst wenn, zum Beispiel durch Aufgabe der Versorgung mit 3G (UMTS), Frequenzen in niedrigeren Frequenzbereichen verfügbar werden, wird sich die Situation verbessern. Das in der Vergangenheit für das terrestrische Fernsehen genutzte Frequenzspektrum (694 MHz bis 790 MHz, also 96 MHz) könnte ebenfalls für 5G genutzt werden, aber zum einen ist die verfügbare Bandbreite beschränkt, zum anderen sind die Wellenlängen so groß (bei 750 MHz 40 cm), dass die Verwendung von (MIMO-) Antennen im Smartphone an räumliche Grenzen stößt.

Eine Alternative zu 5G für die großflächige Versorgung von Smartphone-Nutzer/innen mit Daten, die von ihnen zeitgleich genutzt werden können, beispielsweise also für die immer bedeutender werdende Live-Berichterstattung von Großereignissen, stellt der von 3GPP in Release 14 spezifizierte LTE-Zusatz FeMBMS (Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) dar [FeMBMS]. Dieses System ist ein „Cousin“ des im IfN erfundenen und realisierten Systems TOoL+ (Tower Overlay over LTE-A+). FeMBMS ging erstmal in Kooperation zwischen dem Forschungszentrum von Radio Italiana (Rai) und dem IfN anlässlich der European Championships 2018 on air [EBU] und wird derzeit als Ergebnis einer Kooperation zwischen der Firma Rohde & Schwarz und dem IfN in Bayern bereits ausgestrahlt [Rohde]. ◀



Bild: Stantien Fotostudio

Prof. Dr.-Ing. **ULRICH H. REIMERS** ist Geschäftsführender Leiter des IfN und Vizepräsident für Hochschulentwicklung und Technologietransfer der Technischen Universität Braunschweig.

www. www.ifn.ing.tu-bs.de/ifn

- [BMVI] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/098-dobrindt-5g-strategie.html>. Abruf am 3. Februar 2019
- [EBU] <https://tech.ebu.ch/news/2018/07/ebu-members-irt-and-raitest-5g-for-broadcast-applications-during-european-championships-2018>. Abruf am 4. Februar 2019
- [Nokia] <https://networks.nokia.com/5g/get-ready>, Abruf am 20. Januar 2019
- [Chee] Chee, Kin Lin: Fixed Broadband Wireless Access in Vegetated Rural Residential Areas. SHAKER-Verlag 2012, ISBN 978-3-8440-0975-0
- [Kür2016] Kürner, Thomas: Vorlesung Grundlagen des Mobilfunks, Braunschweig 2016
- [Kür2018] Kürner, Thomas: in litteris November 2018
- [LiYang] Li Y, Yang G.: Dual-mode and triple-band 10-antenna handset array and its multiple-input multiple-output performance evaluation. 5G. Int J RF Microw Comput Aided Eng. 2018; e21538. <https://doi.org/10.1002/mmce.21538>
- [Qualcomm] https://www.hsosnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Forschung/Recherche/Laboreinrichtungen_und_Versuchsbe triebe/Labor_fuer_Hochfrequenztechnik_und_Mobilkommunikation/Mobilkomtagung/2018/Vortraege/4_Vortrag_Milenkovic.pdf. Abruf am 29. Januar 2019
- [Rob] Robert, J.: Terrestrial TV Broadcasting Using Multi-Antenna Systems. SHAKER-Verlag 2014, ISBN 978-3-8440-2446-3
- [Rohde] https://www.rohde-schwarz.com/de/unternehmen/news-und-presse/details/pressebereich/pressemitteilungen-detailseiten/rohde-schwarz-treibt-mit-kathrein-weltweit-ersten-lte-broadcast-high-power-high-tower-sendebetrieb-vor-an-pressemitteilungen-detailseite_229356-598412.html. Abruf am 4. Februar 2019
- [FeMBMS] Richter, L; Ilse, S.: Coverage Evaluation of LTE FeMBMS: A Case Study Based on a DVB-T2 Network. In Proc. 13th IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), elektronisch (5 Seiten), Valencia, Spanien, Juni 2018
- [WanGuo] Wan, L.; Guo, Z. et al.: 4G/5G Spectrum Sharing. IEEE Vehicular Technology Magazine. Dec 2018, S. 28–39.

6. Literaturverzeichnis

- [3GPP] <http://www.3gpp.org/release-15>. Abruf am 3. Februar 2019
- [5G-PPP] <https://5g-ppp.eu/verticals/>. Abruf am 3. Februar 2019
- [BNETZA] https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html, Abruf am 27. Januar 2019