

Technische Aspekte der Mobilfunktechnologien

Dr.-Ing. Martin H. Virnich

Referat bei der Anhörung zum Thema „Mobilfunk“ im Südtiroler Landtag

29. April 2015

Leiter der Fachgruppe „Physik“ im VDB e.V.



Grundsätzlicher Aufbau von Mobilfunksystemen

Mobilfunksysteme haben eine zelluläre Struktur. Kern jeder Zelle ist eine Basisstation, mit der die Mobilteile verkehren. Eine direkte Verbindung zwischen zwei Mobilteilen – auch wenn sie sich direkt nebeneinander befinden – ist nicht möglich. Die Zellradien erstrecken sich – je nach Art der Zelle und Sendeleistung – von ca. 10 m bis zu max. 50 km. Man unterscheidet unter dem Gesichtspunkt der Zellgröße resp. nach der Größe des versorgten Gebietes im Wesentlichen folgende Zellarten: Makro-, Mikro-, Pico- und Femtozellen.

Jedes Mobilfunksystem benötigt – ähnlich wie eine Kommune auch – eine Verwaltung. Diese Aufgabe wird von der Basisstation übernommen, die hierfür bestimmte Organisations-, Steuer- oder Pilotkanäle benutzt. Diese „Verwaltungs“-Kanäle werden – unabhängig von der aktuellen Auslastung der Basisstation mit Telefon- und Datenverkehr durch die Nutzer – permanent mit konstanter Leistung ausgesendet. Die Verkehrskanäle, in denen die Benutzerdaten übertragen werden, sind dagegen vielfach leistungsgeregelt.

Die Sendeleistung einer Basisstation ist nicht konstant, sondern schwankt mit der Auslastung durch die Nutzer. Es gibt eine minimale Sendeleistung, die nie unterschritten wird; sie wird für die Aussendung der o.a. „Verwaltungs“-Kanäle benötigt und führt in der Umgebung der Basisstation zu Mindest-Immissionen. Nach oben gibt es ebenfalls eine Leistungsbegrenzung, die erreicht ist, wenn alle möglichen Verkehrskanäle voll belegt sind und mit maximaler Leistung ausgestrahlt werden. Dieser Zustand kennzeichnet die Vollast der Anlage, die in der Umgebung zu Maximal-Immissionen führt. Aktuell schwanken die Sendeleistung und damit die Immissionen auslastungsabhängig zwischen Minimum und Maximum.

Typischerweise beträgt der Unterschied zwischen Minimum und Maximum der Sendeleistung:

- Faktor 2 bis 4 für GSM (Global System for Mobile Communications)
- Faktor 6,3 für UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
- Faktor 4 für LTE (Long Term Evolution).

Entsprechende Faktoren gelten für die Immissionen der Leistungsflussdichten (= Strahlungsdichten). Für die Feldstärken gelten die Quadratwurzeln aus den o.a. Faktoren.

Maßgeblich für die aktuelle Immission ist

- zum einen die Auslastung der Basisstation, abhängig von der Anzahl Teilnehmer und den von ihnen benötigten Datenübertragungsraten (Telefonat, SMS, Datentransfer) → „Kapazität“,
- zum anderen die für eine stabile Verbindung benötigte Feldstärke, abhängig von der Streckendämpfung (Entfernung, Hindernisse, Gebäudedämpfung, Antennen-Richtcharakteristik usw.) → „Versorgung“.

Für die Bewertung maßgeblich ist die Immission bei maximaler Sendeleistung (Volllast, Maximal-Immission).

Crestfactor

Bei den Mobilfunksystemen GSM-EDGE (Enhanced Data Rates for GSM-Evolution), UMTS, WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), LTE und TETRA (Terrestrial Trunked Radio, Bündelfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben BOS wie Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienste) unterscheidet sich der Spitzenwert der Sendeleistung deutlich vom Effektivwert, ebenso wie bei WLAN (Wireless Local Area Network) mit Datenverkehr (nicht dagegen beim „klassischen“ GSM und der GSM-Variante GPRS (General Packet Radio Service)).

Der Quotient von Spitzenwert (Peak) durch Effektivwert (RMS, Root Mean Square), der als Crestfactor bezeichnet wird, beträgt beispielweise bei UMTS, LTE und WLAN mit Datenverkehr 10 - 13 dB (Dezibel), dies entspricht dem Faktor 10 bis 20 für die Sendeleistung und für die Immission als Leistungsflussdichte (Feldstärkeimmissionen verhalten sich proportional zur Quadratwurzel aus den o.g. Faktoren). Während also eine Basisstation im klassischen GSM-Modus und max. 20 Watt Sendeleistung diese 20 Watt niemals überschreitet, treten bei einer UMTS-Basisstation mit ebenfalls 20 W Effektivleistung Leistungsspitzen bis 200 Watt (10 dB Crestfactor) oder auch 400 Watt (13 dB Crestfactor) auf.

Einfluss der Richtcharakteristik der Sendeantenne auf die Immissionen

Für die Höhe der Immissionen in der Umgebung einer Basisstation ist außerdem die Richtwirkung der Sendeantenne von großer Bedeutung.

Man unterscheidet Rundumantennen (auch bezeichnet als omnidirektionale Antennen, Rundstrahler, Kugelstrahler oder Antennen mit isotroper Charakteristik) und Richtantennen (auch: direktionale Antennen). Rundum-/isotrope Antennen haben keine bevorzugte Empfangs- bzw. Sende-Richtung (ähnlich wie die Sonne oder eine Glühbirne), während Richtantennen eine Richtwirkung aufweisen und bevorzugt mit ihrem „keulenförmigen“ Hauptstrahl in einen eingegrenzten Raumbereich strahlen (wie z.B. ein Scheinwerfer). Die Erhöhung der von einer Sendeantenne durch Bündelung/Fokussierung in Hauptstrahlrichtung erzeugten Leistungsflussdichte gegenüber einer normierten Bezugsantenne – meistens ist dies der isotrope Kugelstrahler – wird als isotroper Antennengewinn G_i bezeichnet und in dBi („Dezibel i“) angegeben. Ein Gewinn von z.B. 3 dBi entspricht der doppelten Leistungsflussdichte, 10 dBi entsprechen der zehnfachen Leistungsflussdichte und 17 dBi – ein typischer Wert für Mobilfunk-Sektorantennen – entsprechen dem 50-Fachen.

Die Richtdiagramme einer Antenne geben Aufschluss über ihre Richtwirkung in der horizontalen und in der vertikalen Ebene. Richtdiagramme werden üblicherweise in Polarkoordinaten (360°) dargestellt; die Skalierung erfolgt i.d.R. in dB (Dezibel).

Die Punkte, an denen die Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte um 3 dB gegenüber der Hauptstrahlrichtung gesunken ist, liefern eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Richtwirkung einer Antenne. Eine Verringerung um 3 dB bedeutet für die Leistungsflussdichte eine Reduzierung auf die Hälfte. Der Winkel zwischen den beiden 3-dB-Punkten wird als Halbwertsbreite oder auch als 3-dB-Öffnungsbreite bezeichnet. Je ausgeprägter die Bündelung und Richtwirkung der Antenne, desto schmaler ist die Hauptkeule und desto kleiner die Halbwertsbreite.

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, ist die vertikale Richtwirkung der hier betrachteten Mobilfunk-Sektorantenne wesentlich stärker ausgeprägt als die horizontale, wie dies bei Mobilfunkantennen i.d.R. der Fall ist. Um eine so hohe Richtwirkung zu erzielen, muss man als Nebenwirkung in Kauf nehmen, dass sich zusätzlich zur erwünschten Hauptkeule auch – eigentlich unerwünschte – so genannte Nebenzipfel oder Nebenkeulen ausbilden. Obwohl sie deutlich niedriger sind als die Hauptkeule, spielen sie eine wichtige und bestimmende Rolle für die Stärke der Immissionen im näheren Bereich um die Antenne.

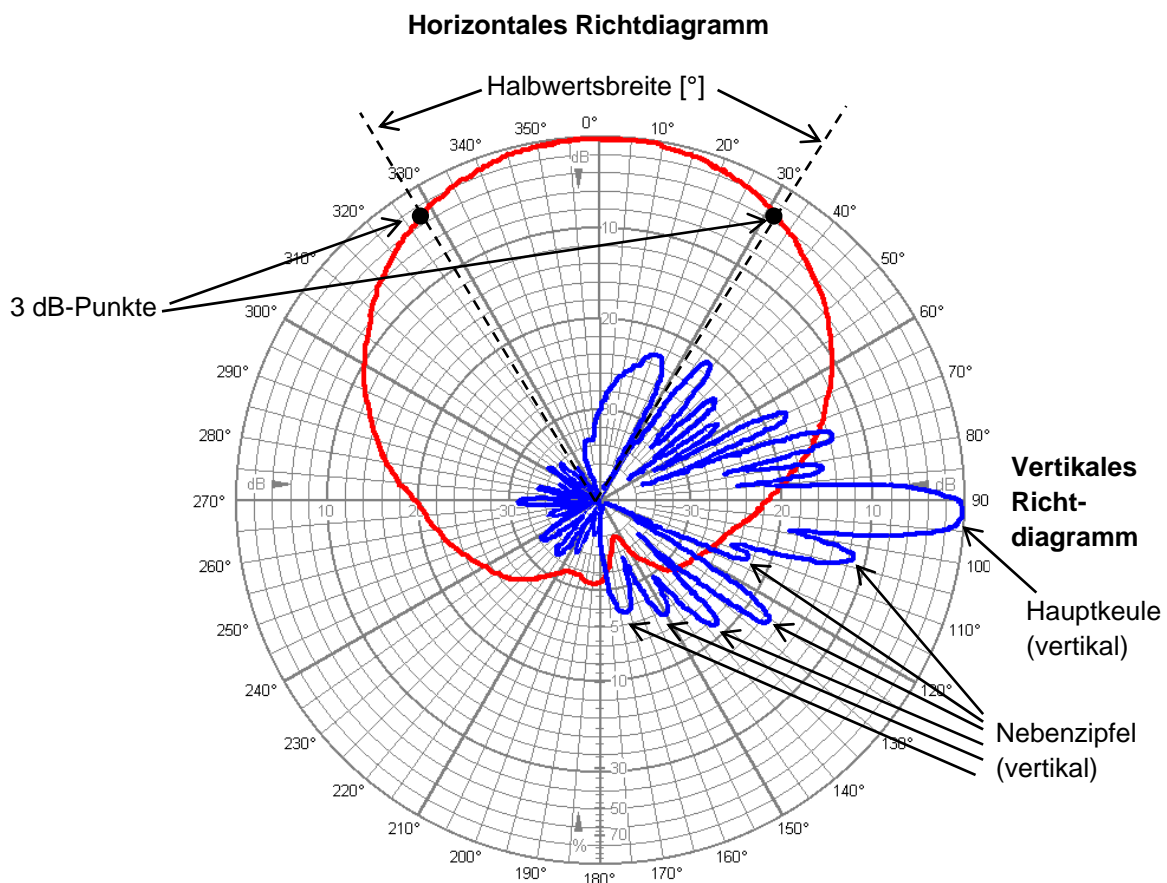


Abb. 1: Horizontales und vertikales Richtdiagramm einer Mobilfunkantenne; Kathrein 735 147, 1862 MHz; Quelle [1]

Bei Sendeanennen bezeichnet der Antennengewinn in dBi die Erhöhung der Leistungsflussdichte in der Hauptstrahlrichtung gegenüber dem isotropen Kugelstrahler als Bezugsantenne. Anstatt die Leistung eines Senders anzuheben, ist es also auch möglich, durch Einsatz einer Richtantenne die Feldstärke und Leistungsflussdichte im zu versorgenden Gebiet zu erhöhen bzw. die Tiefe des versorgten Gebietes zu vergrößern. Dafür wird dann allerdings die Breite des Versorgungsgebietes aufgrund des kleineren Öffnungswinkels der „Sendekeule“ kleiner (Bündelungseffekt).

Die aufgrund der Bündelung der Abstrahlung erzielte höhere Leistungsflussdichte drückt sich als so genannte äquivalente isotrope Strahlungsleistung aus, abgekürzt EIRP (*E*quivalent *I*sotropically *R*adiated *P*ower). Sie ist in Hauptstrahlrichtung der Antenne um den isotropen Gewinn höher als die in die Antenne eingespeiste Sendeleistung. Bei einem für Mobilfunk-Sektorantennen typischen isotropen Gewinn von $G_i = 17$ dBi, der bezogen auf die Leistungsflussdichte dem Faktor 50 entspricht, erhält man bei 20 W Antenneneingangsleistung eine EIRP von $20 \cdot 50 \text{ W} = 1.000 \text{ W}$. Mit diesen 1.000 W müsste eine isotrope Antenne gespeist werden, um in Hauptstrahlrichtung der Sektorantenne die gleiche Leistungsflussdichte zu erzeugen wie die Sektorantenne mit 20 W.

Zwischenresümee

Fasst man die bisherigen Ausführungen zusammen, so erkennt man, dass die alleinige Betrachtung der in die Antenne eingespeisten Sendeleistung eines Mobilfunkkanals nur wenig über die Immissions-situation aussagt. Dies wird in der folgenden Tabelle noch deutlicher. Hier wird für „klassisches“ GSM (Crestfactor 1 bzw. 0 dB), für die GSM-Variante EDGE (*E*nhanced *D*ata *R*ates for *G*SM *E*volution, Crestfactor 3 dB) und für UMTS (Crestfactor 10 - 13 dB) exemplarisch die „Leistungskette“ mit einer typischen Mobilfunk-Sektorantenne (isotroper Gewinn $G_i = 17$ dBi, entsprechend Faktor 50 für die Leistungsflussdichte) durchgerechnet.

Max. Sendeleistung pro Kanal (RMS)	Mobilfunkdienst	EIRP pro Kanal RMS ($G_i = 17$ dBi)	Typische Kanalzahl pro Sektor	EIRP für alle Kanäle RMS	Crest-factor	EIRP für alle Kanäle Peak
20 W	GSM 900	1.000 W	4	4.000 W	1 (0 dB)	4.000 W
	EDGE 900	1.000 W	4	4.000 W	2 (3 dB)	8.000 W
	UMTS	1.000 W	2	2.000 W	10 (10 dB)	20.000 W
					20 (13 dB)	40.000 W

Nachfolgend zum Vergleich die entsprechenden Daten zu WLAN/WiFi. Hier ist die maximal zulässige EIRP auf 0,1 W (2,4 GHz) bzw. 1 W (5 GHz) begrenzt. Im 2,4GHz-Band können maximal drei Frequenzkanäle parallel betrieben werden, daher wurde für die Berechnung diese Kanalzahl zugrunde gelegt.

WLAN/WiFi	2,4 GHz	0,1 W	3	0,3 W	10 - 20 (10 - 13 dB)	3 - 6 W
	5 GHz	1 W		3 W		30 - 60 W

Insbesondere für Betrachtungen der biologischen Relevanz dürfte neben dem Effektivwert (RMS) auch der Spitzenwert (Peak) von Bedeutung sein.

Immissionsverlauf in der Umgebung von Antennen mit Richtwirkung

Zur Betrachtung der Auswirkungen der Antennen-Richtcharakteristik auf die Immissionen in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand werden im Folgenden die Ergebnisse von Modellrechnungen herangezogen.

Die nachfolgend zitierten Modellbetrachtungen zur Berechnung der Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Hochfrequenz-Immissionen von Mobilfunk-Basisstationen stammen aus einer 2001 durchgeführten Untersuchung, die vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen beauftragt wurde [2]. Den Berechnungen liegen die folgenden geometrischen Verhältnisse zwischen Mobilfunksender und Empfänger zugrunde (Abb. 2).

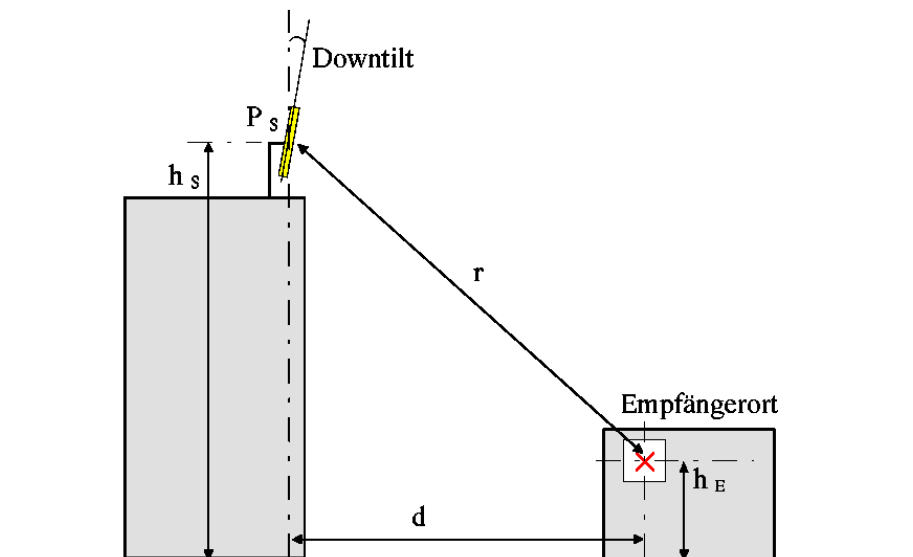


Abb. 2: Zugrunde gelegte Geometrie für die folgenden Berechnungen der Leistungsflussdichte am Empfängerort; P_s = Sendeleistung, h_s = Höhe der Sendeantenne, h_E = Höhe der Empfangsantenne, d = lateraler (horizontaler) Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne, r = Entfernung zwischen Sende- und Empfangsantenne (Luftlinie); (Quelle: [2], S. 14)

Des Weiteren basieren die Berechnungen auf folgenden Daten:

Richtdiagramme der Basisstations-Antenne Kathrein K735 147 bei 1862 MHz (Bild 2-4)

Gewinn: 18,0 dBi

Halbwertsbreite horizontal: 65°

Halbwertsbreite vertikal: 7°

Downtilt (vertikale Neigung, elektrisch): 2°

Ermittelt werden die Immissionen in horizontaler Hauptstrahlrichtung (Sektormitte, 0°). Die zugrunde gelegten Rechnungen basieren auf einem einfachen Freiraum-Wellenausbreitungsmodell. Dieses Modell wird auch von der deutschen Bundesnetzagentur (BNetzA) bei der Bewertung der Immissionen zur Standortbescheinigung benutzt.

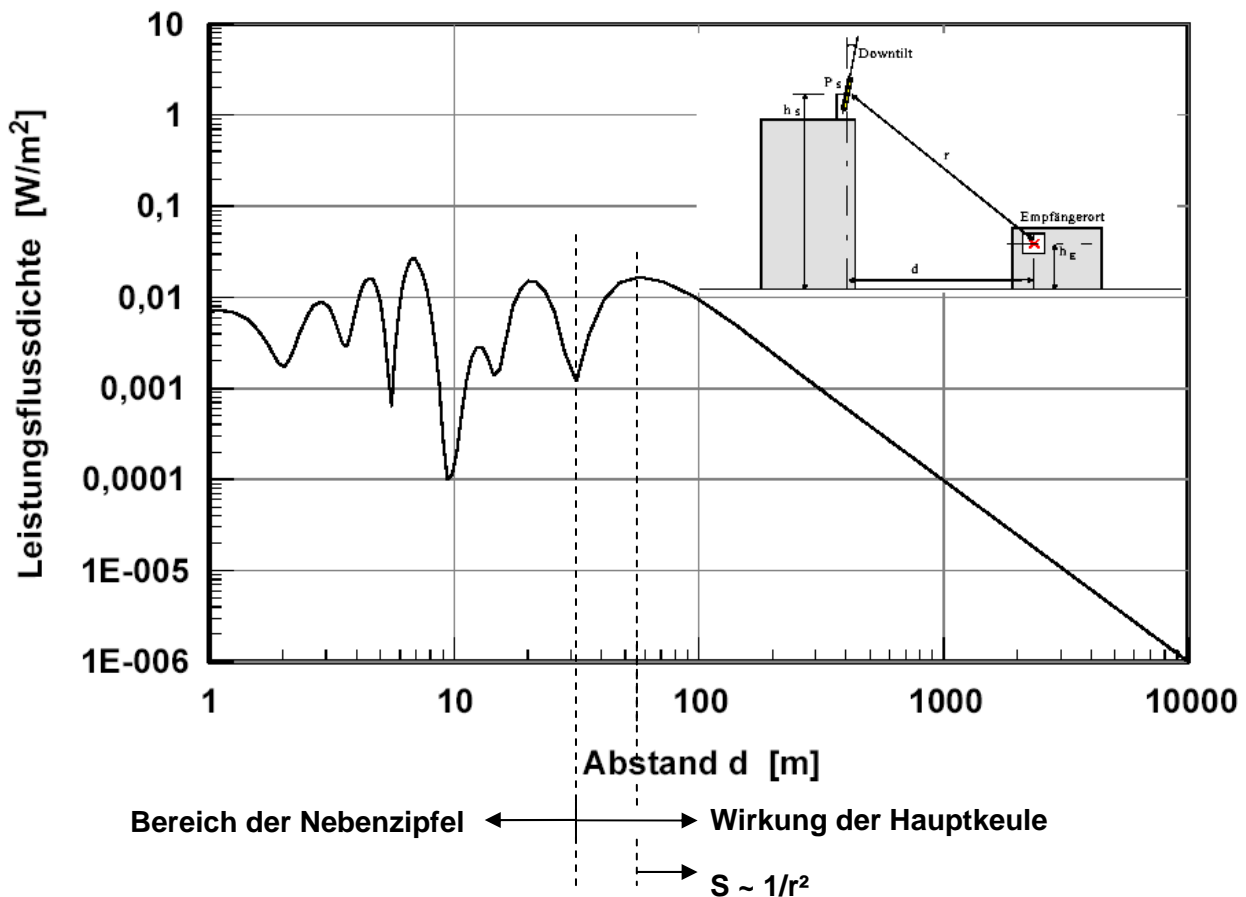


Abb. 3: Verlauf der berechneten Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand, Wirkung von Hauptkeule und Nebenzipfel ($P_s = 20 \text{ W}$, $h_s - h_E = 5 \text{ m}$, Downtilt (vertikale Neigung) = 2° elektrisch); (Quelle: [2], S. 19)

Abb. 3 zeigt als Ergebnis der Modellrechnung den Verlauf der Leistungsflussdichte in Abhängigkeit vom lateralen Abstand d zwischen Sender und Empfänger. Der linke Teil der Kurve ist wesentlich bestimmt vom Einfluss der Nebenzipfel. Bewegt man sich vom Fußpunkt der Sendeantenne weg, so „durchwandert“ man zunächst das Auf und Ab der Nebenzipfel. Ein Vergleich der Nebenzipfel im vertikalen Richtdiagramm (Abb. 1) mit den relativen Maxima und Minima führt genau zu der o.a. Welligkeit des Kurvenverlaufs. Erst in einem Abstand von ca. 30 Metern gelangt man im obigen Beispiel in den Wirkungsbereich der Hauptkeule und erreicht bei 50 - 60 Meter das Maximum der Hauptkeule. Von diesem Punkt an fällt die Leistungsflussdichte kontinuierlich ab. Im logarithmischen Maßstab erscheint dieser Abfall als Gerade, tatsächlich sinkt die Leistungsflussdichte in diesem Bereich proportional zum Entfernungsquadrat. Während beim isotropen Kugelstrahler dieses klassische Entfernungsgesetz überall gilt, hat es bei einer Richtantenne nur Gültigkeit, solange man sich auf der Mittelachse der Hauptkeule – oder auch eines Nebenzipfels – bewegt.

Diese Ergebnisse widerlegen eindeutig die oft zu hörende Behauptung, die Mobilfunkantenne müsse gerade auf der Schule, dem Kindergarten usw. montiert werden, da ja „unter der Antenne nichts ist“. Solche Äußerungen zeugen von der Unkenntnis des Einflusses der Nebenzipfel im nahen Umfeld der Antenne.

Die Vielzahl der oben genannten Einflussfaktoren führt dazu, dass ohne genaue Kenntnis der technischen Daten einer Sendeanlage, der Ausrichtung der Antennen und der Geländetopologie bzw. ohne Messung keine seriösen Aussagen über die Höhe der Immissionen gemacht werden können. Die Angabe der Entfernung oder ob Sichtkontakt zu der Antenne besteht, reicht bei weitem nicht aus.

Dies wird durch die Messungen und Auswertungen von Münzenberg und Haumann anschaulich bestätigt (215 Messpunkte im Umfeld von GSM-Basisstationen bis 1.000 m, [3]). Der Einfluss einer Vielzahl maßgeblicher Faktoren mit hoher Varianz drückt sich in der großen Streubreite der Messwerte in Abb. 4 aus. Ein Kriterium wie „Sichtkontakt“ steht lediglich stellvertretend für die Einflussfaktoren Abschattung und Gebäudedämpfung mit der allein ihnen schon eigenen hohen Varianz; die übrigen Faktoren sind hierbei noch gar nicht berücksichtigt.

Die statistische Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass im Mittel bei bestehendem Sichtkontakt zur Sendeanlage um den Faktor von ca. zehn höhere Leistungsflussdichte anzutreffen sind als ohne Sichtkontakt (Regressionskurven in Abb. 4). Allerdings ist die Varianz der Immissionen in jeder beliebigen Entfernung größer als dieser Unterschied der Mittelwerte mit und ohne Sichtkontakt! Im konkreten Einzelfall darf die Betrachtung also nicht auf die Entfernung oder das Bestehen oder Nicht-Bestehen eines Sichtkontaktes zur Sendeanlage reduziert werden.

Andere Untersuchungen, die im Auftrag von Umweltministerien deutscher Bundesländer durchgeführt wurden, bestätigen diesen Sachverhalt, der im Übrigen nicht nur für GSM, sondern für alle Mobilfunktechniken zutrifft.

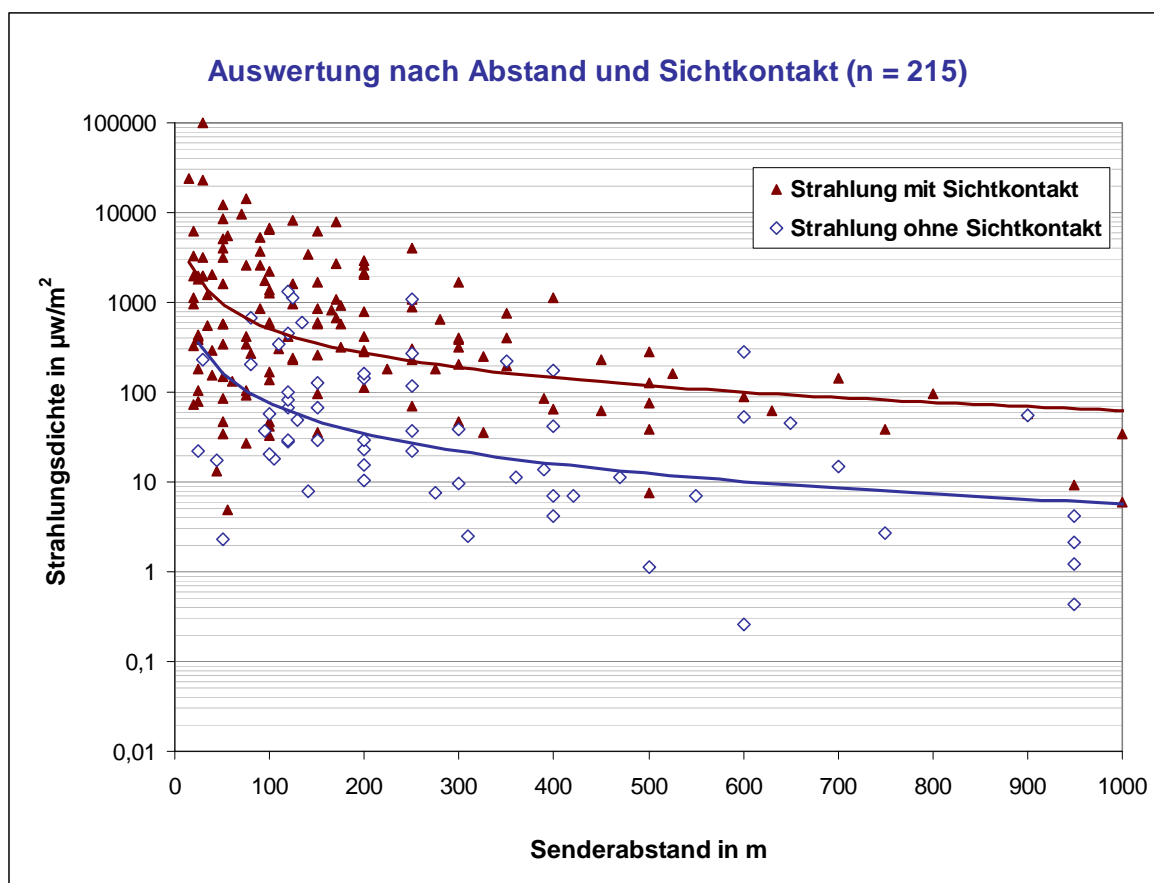


Abb. 4: Mobilfunk-Immissionen in der Nähe von GSM-Sendeanlagen in Wohngebieten
(Quelle: [3], S. 62)

Indoor-Versorgung durch „Mobilfunk“

Ging es bei der Einführung des ersten digitalen Mobilfunksystems (GSM) darum, das Telefonieren unterwegs, also tatsächlich „mobil“ zu ermöglichen, so ist schon seit langem ein weiteres erklärtes Ziel der Mobilfunkbetreiber, das Festnetztelefon durch Indoor-Versorgung mittels „Mobilfunk“ abzulösen. Mit Mobilität im eigentlichen Sinne des Wortes hat dies nichts mehr zu tun, vielmehr geht es hier ganz einfach um die Vergrößerung von Marktanteilen durch Verdrängungswettbewerb.

Wenn aber zur Indoor-Versorgung die Gebäudehülle von der externen Basisstation durchstrahlt werden muss, so ist hierfür eine deutlich höhere Sendeleistung erforderlich, die in der gesamten Umgebung der Basisstation zu entsprechend höheren Immissionen führt.

Unter Immissionsgesichtspunkten auch nicht günstiger ist ein neues Konzept der Fa. Liquid Broadband, die sich in Deutschland bei der Frequenzversteigerung 2015 um eine Mobilfunklizenz im Frequenzbereich 700 MHz bemüht hat. Hier werden kleine Basisstationen – so genannte NetStations – innerhalb von Gebäuden, in Wohnungen und Büros aufgestellt. Sie versorgen ein Gebiet mit einem Radius von bis zu 500 Metern und müssen dazu gleich mehrfach die Gebäudedämpfung überwinden. ([4], [5])

Einen konsequent alternativen Weg geht z.B. die schweizerische Stadt St.Gallen. Dort setzt man auf ein äußerst kleinzelliges Netz mit WLAN- (und in Zukunft auch Mobilfunk-) Basisstationen sehr geringer Leistung und insbesondere auf eine konsequente Trennung von Outdoor- und Indoor-Versorgung. [6].

Signalcharakteristiken

Die drei Mobilfunkgenerationen GSM, UMTS und LTE basieren auf sehr unterschiedlichen technischen Standards, was sich u.a. in den Signalcharakteristiken wie Bandbreite und Zeitverlauf des Signals niederschlägt. Abb. 5 zeigt die Signalbandbreiten der drei Systeme im Verhältnis untereinander, wobei diese nur für GSM und UMTS fix sind. LTE kann mit unterschiedlichen Bandbreiten implementiert werden, wovon die gebräuchlichsten 10 MHz und 20 MHz sind. Bei GSM beträgt die Kanalbandbreite 200 kHz, die recht gut der Signalbandbreite entspricht. UMTS weist eine Signalbandbreite von 3,84 MHz auf, die Kanäle sind aber i.d.R. ca. 5 MHz breit. Die LTE-Kanäle werden nur zu 90 % vom Signal ausgefüllt; d.h. bei 10 MHz Kanalbandbreite beträgt die Signalbandbreite 9 MHz, bei 20 MHz Kanalbandbreite beträgt sie 18 MHz. Im Vergleich dazu belegt WLAN/WiFi (Wireless Local Area Network / Wireless Fidelity) ca. 16 MHz Signalbandbreite.

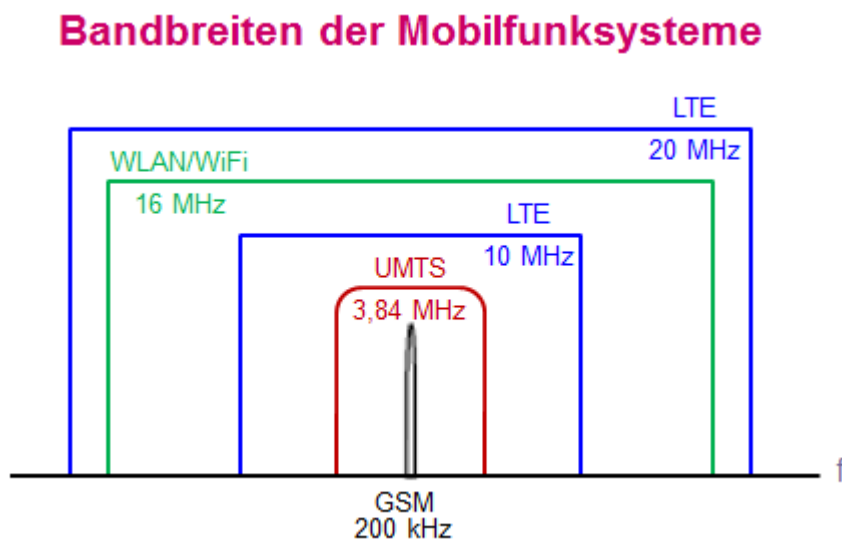


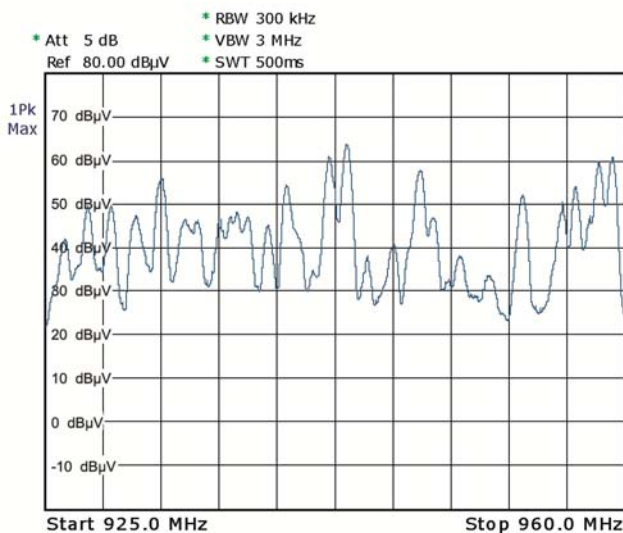
Abb. 5: Signalbandbreiten der Mobilfunksysteme

Aber auch der zeitliche Verlauf der Signale ist bei den Systemen sehr unterschiedlich. Im Folgenden werden neben den typischen Spektren der einzelnen Mobilfunkbänder exemplarisch einige Zeitverläufe wiedergegeben. Zusätzlich werden WLAN-Signale (g-Standard) im Standby und beim Datentransfer dargestellt. Die Spektren und die Zeitverläufe wurden mittels eines Hochfrequenz-Spektrumanalysators ermittelt. Zur Messung der Zeitverläufe wurde der Analysator in die Betriebsart „Zero Span“ geschaltet. Beim „Zero Span“ ist der Analysator fest auf eine Empfangsfrequenz eingestellt und zeigt im Display den Verlauf der Hüllkurve des Signals, ähnlich wie ein Oszilloskop.

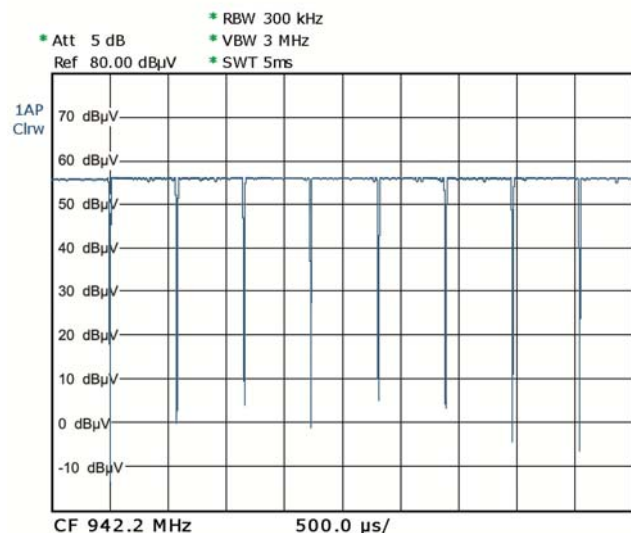
Zu jedem Funksystem werden außerdem die Spektrogramme der Signal-Hüllkurve vorgestellt. Diese wurden mittels FFT aus den Hüllkurven gewonnen. Im Spektrogramm wird das Signal gleichzeitig auf der Frequenz- und der Zeitachse dargestellt. Die Signalstärke wird durch Farben bzw. unterschiedliche Graustufen dargestellt. In den hier gezeigten Spektrogrammen entsprechen helle Farben großen Amplituden, dunklere Farben dementsprechend kleinen. Die Frequenzachse verläuft waagrecht. Die Zeitachse verläuft senkrecht; das Spektrogramm entwickelt sich im Zeitablauf von oben nach unten; d.h. der aktuelle Zeitpunkt, an dem die Messung gestoppt wurde, befindet sich oben; auf der Zeitachse liegt die Vergangenheit unten. Über dem Spektrogramm ist immer noch die spektrale Ansicht zum letzten dargestellten Zeitpunkt wiedergegeben.

Eine ausführliche, detaillierte Darstellung der verschiedenen Signalcharakteristiken und zur Funktionsweise der heutzutage wichtigsten Funkdienste wird in [7] gegeben. Die Signal-Hüllkurven kann man auch einer akustischen Analyse unterziehen, wobei die funkdiensttypischen Geräuschemuster von Amplitudenmodulationen hörbar werden. Eine interaktive DVD mit den entsprechenden Audiodateien ist unter [8] erschienen.

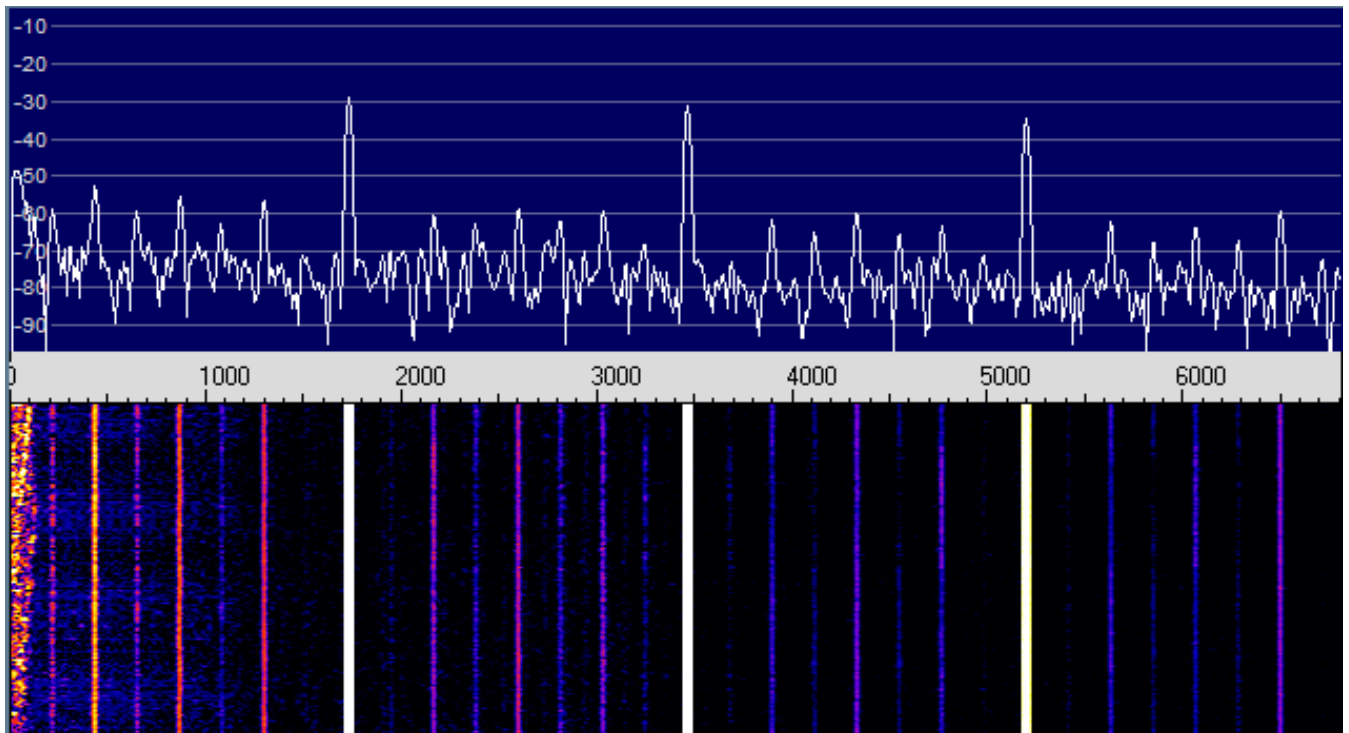
GSM/EDGE



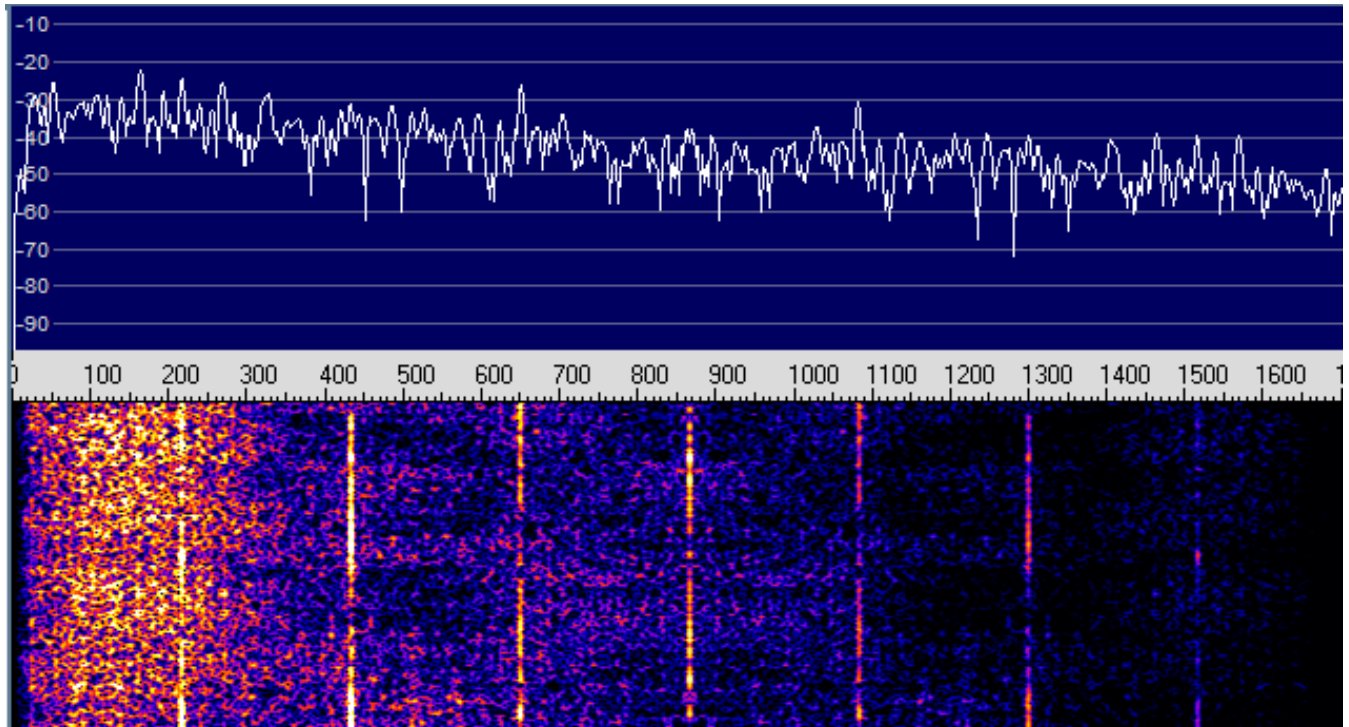
Spektrum des Mobilfunkbandes GSM 900 (925 – 960 MHz). Jeder Peak entspricht aktiven Frequenzkanal (Organisationskanäle BCCH und lastabhängige Verkehrskanäle TCH).



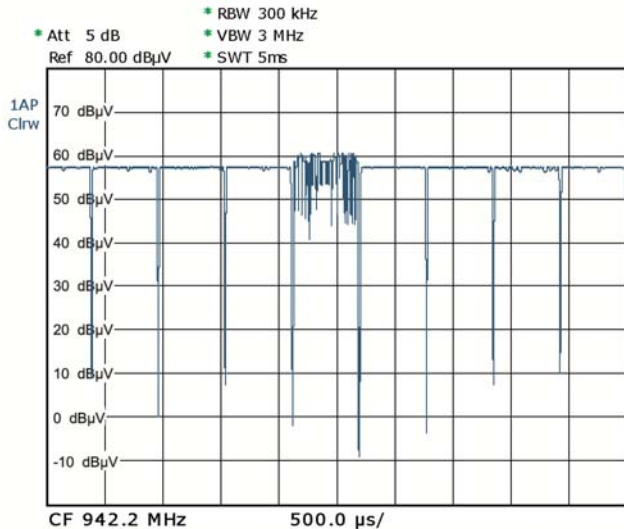
Zeitverlauf eines ständig mit voller Sendeleistung aktiven Organisationskanals (BCCH) GSM 900; periodische Pulsung mit 1,73 kHz Pulsfrequenz. Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht $500 \mu\text{s} = 0,5 \text{ ms}$. Ein GSM-Rahmen umfasst acht Zeitschlitze, d.h. jeder achte Zeitschlitz ist dem gleichen Teilnehmer zugeordnet.



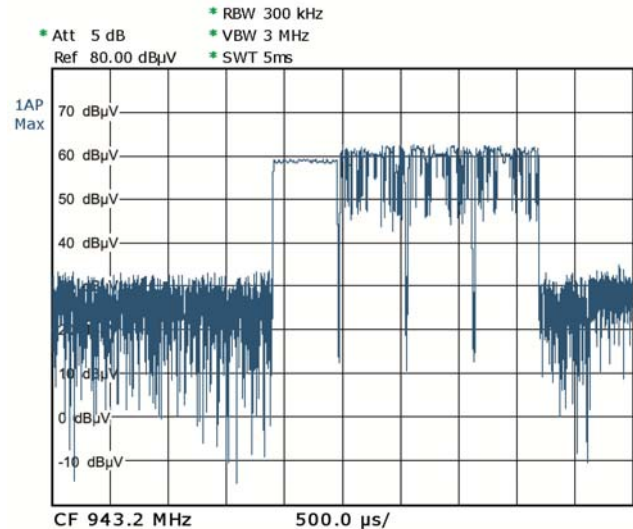
FFT-Spektrum und Spektrogramm eines GSM-Organisationskanals bis 7000 Hz. Es handelt sich um ein typisches Linienpektrum eines periodischen Pulses. Dominant ist die diskrete Spektrallinie bei 1,7 kHz, gefolgt von ihren ganzzahligen Vielfachen (Oberschwingungen). Die Spektrallinie mit der niedrigsten Frequenz liegt bei 217 Hz.



FFT-Spektrum und Spektrogramm eines GSM-Signals mit EDGE-Verkehr (Lastabhängiger Verkehrskanal TCH) bis 1700 Hz. Erkennbar sind zum einen diskrete Spektrallinien bei 217 Hz sowie den zugehörigen Oberschwingungsfrequenzen, die auf die periodische Pulsung zurückzuführen sind; zum anderen nichtperiodische Anteile, dominant bei den tieferen Frequenzen. Diese sind durch das bei EDGE verwendete Modulationsverfahren bedingt.

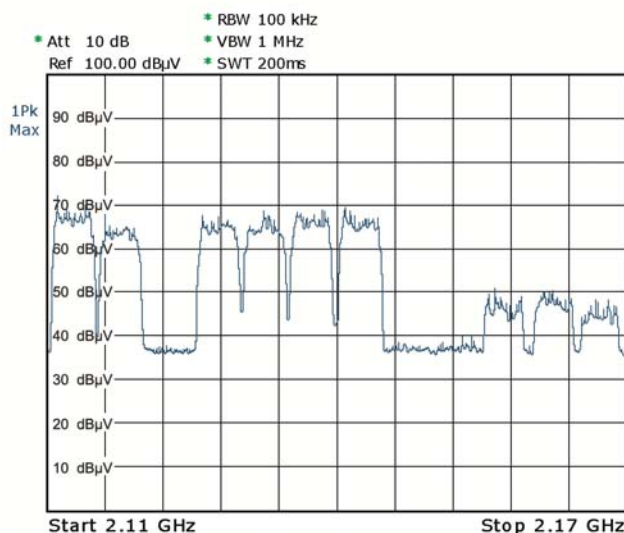


Zeitverlauf eines ständig mit voller Sendeleistung aktiven Organisationskanals (BCCH) GSM 900 mit momentan einem Zeitschlitz im EDGE-Modus; periodische Pulsung mit 1,73 kHz Pulsfrequenz. Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht $500 \mu\text{s} = 0,5 \text{ ms}$.

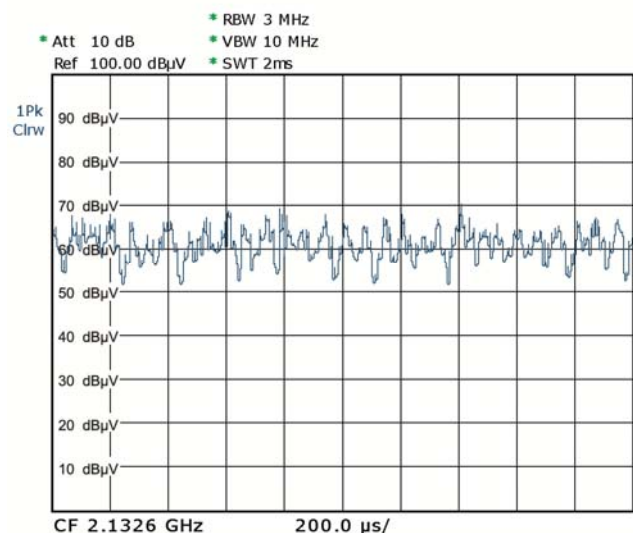


Zeitverlauf eines lastabhängigen Verkehrskanals (TCH) GSM 900; vier von den acht Zeitschlitzten eines GSM-Rahmens sind gerade aktiv, davon drei im EDGE-Modus. Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht $500 \mu\text{s} = 0,5 \text{ ms}$. Dominante Pulsfrequenzen 217 Hz und ganzzahlige Vielfache davon.

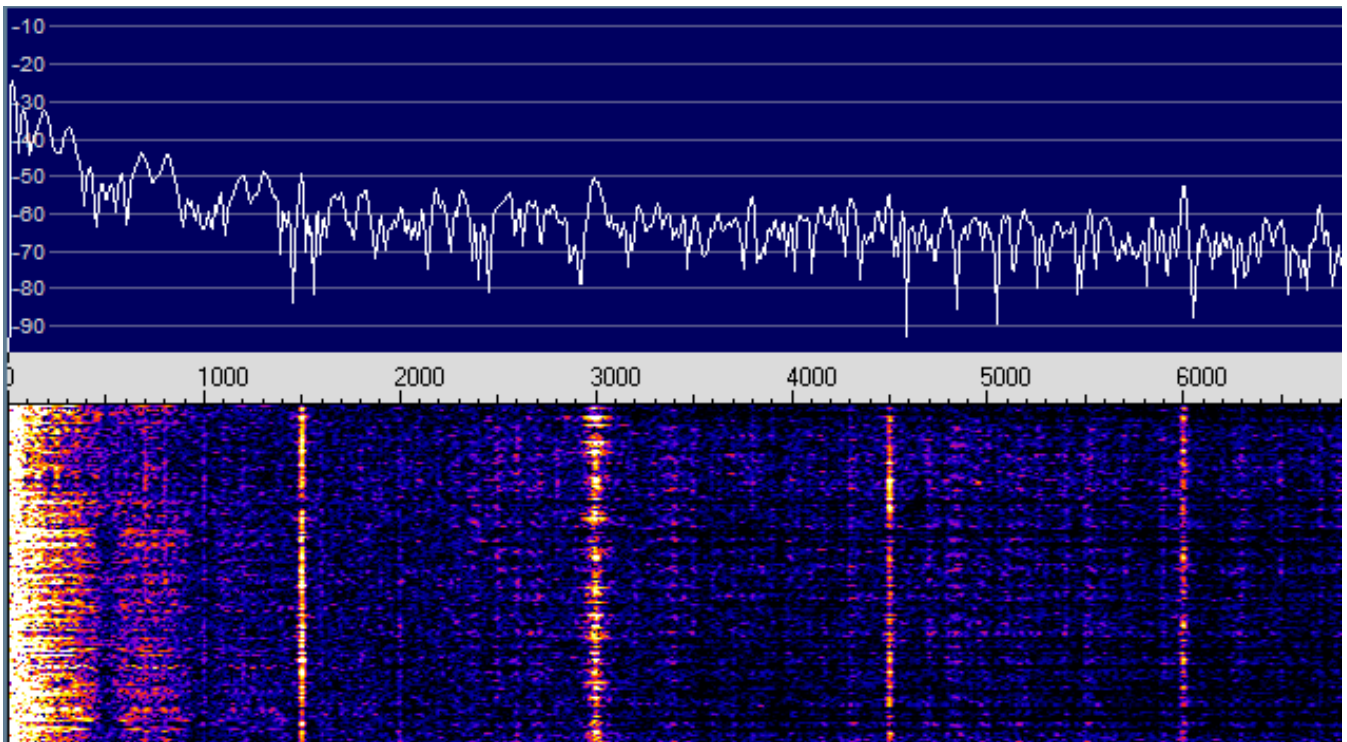
UMTS



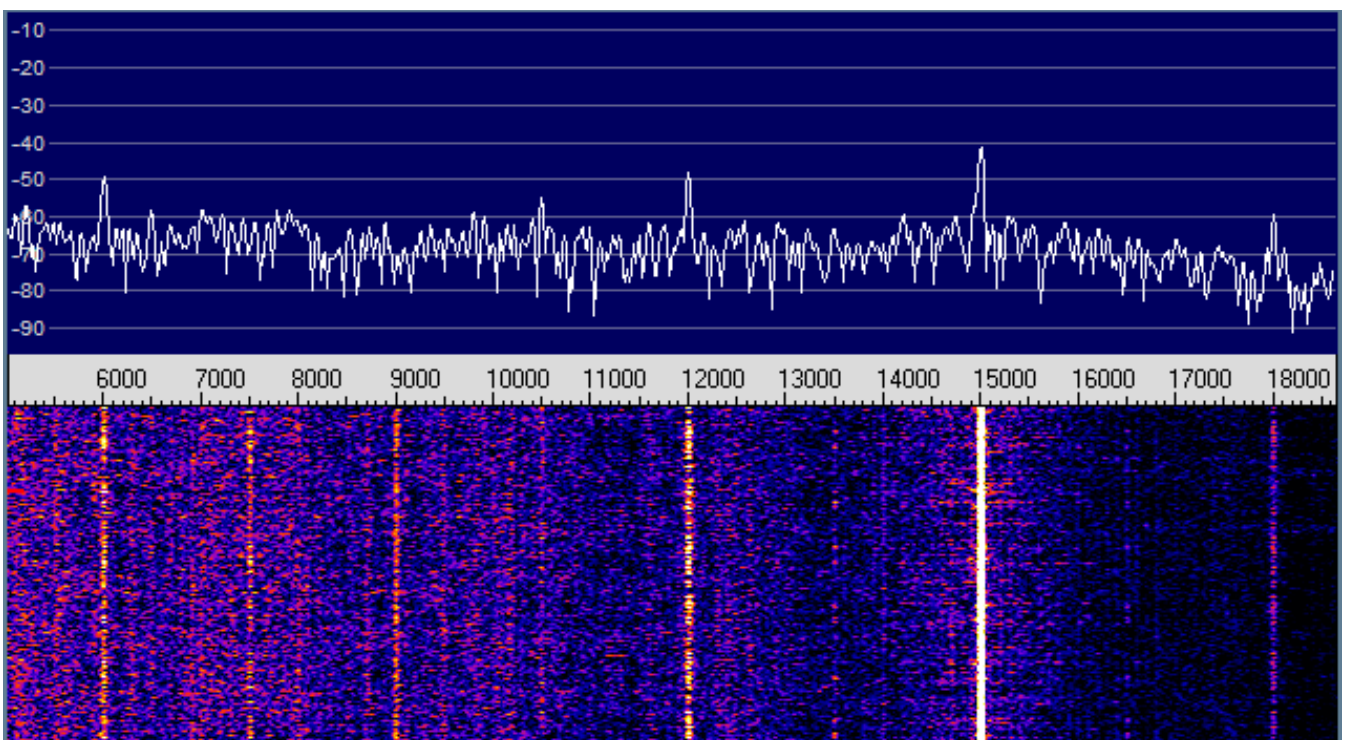
Spektrum des Mobilfunkbandes UMTS (2.110 – 2.170 MHz); sechs der insgesamt zwölf Kanäle mit etwa gleich hohen Immissionen, drei mit niedrigeren, drei Kanäle ohne nachweisbare Immissionen.



Zeitverlauf eines UMTS-Signals. Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht $200 \mu\text{s} = 0,2 \text{ ms}$.

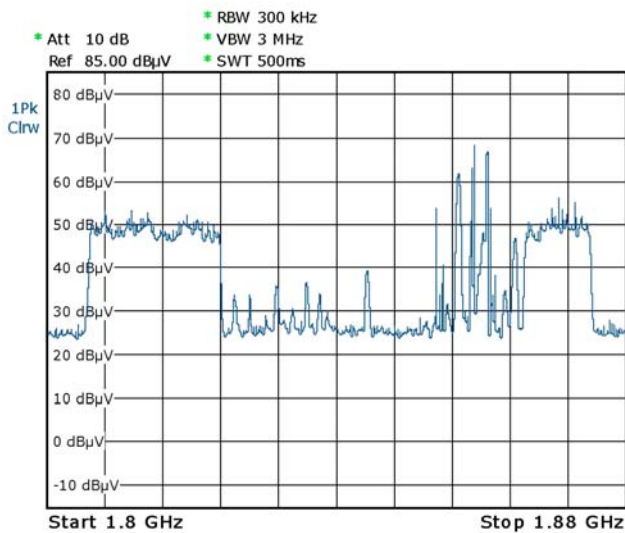


FFT-Spektrum und Spektrogramm eines UMTS-Signals bis 7 kHz; neben unregelmäßigen Strukturen sind auch deutlich – etwas „zerrupfte“ – diskrete Spektrallinien bei 1,5 kHz und ganzzahligen Vielfachen zu erkennen, die auf periodische Anteile hindeuten.

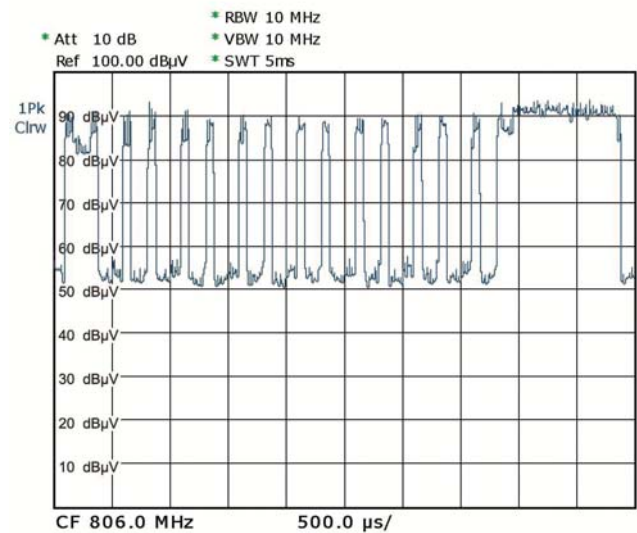


FFT-Spektrum und Spektrogramm eines UMTS-Signals von 5 kHz bis 19 kHz; auch hier sind unregelmäßige Strukturen zu sehen und die Spektrallinien bei ganzzahligen Vielfachen von 1,5 kHz setzen sich hier fort. Es fällt auf, dass die Spektrallinie bei 15 kHz die stärkste in beiden Teilspektren ist. Es ist daher wahrscheinlich, dass es sich nicht um eine Oberschwingung von 1,5 kHz handelt, sondern um eine eigene Grundschwingung dieser Frequenz.

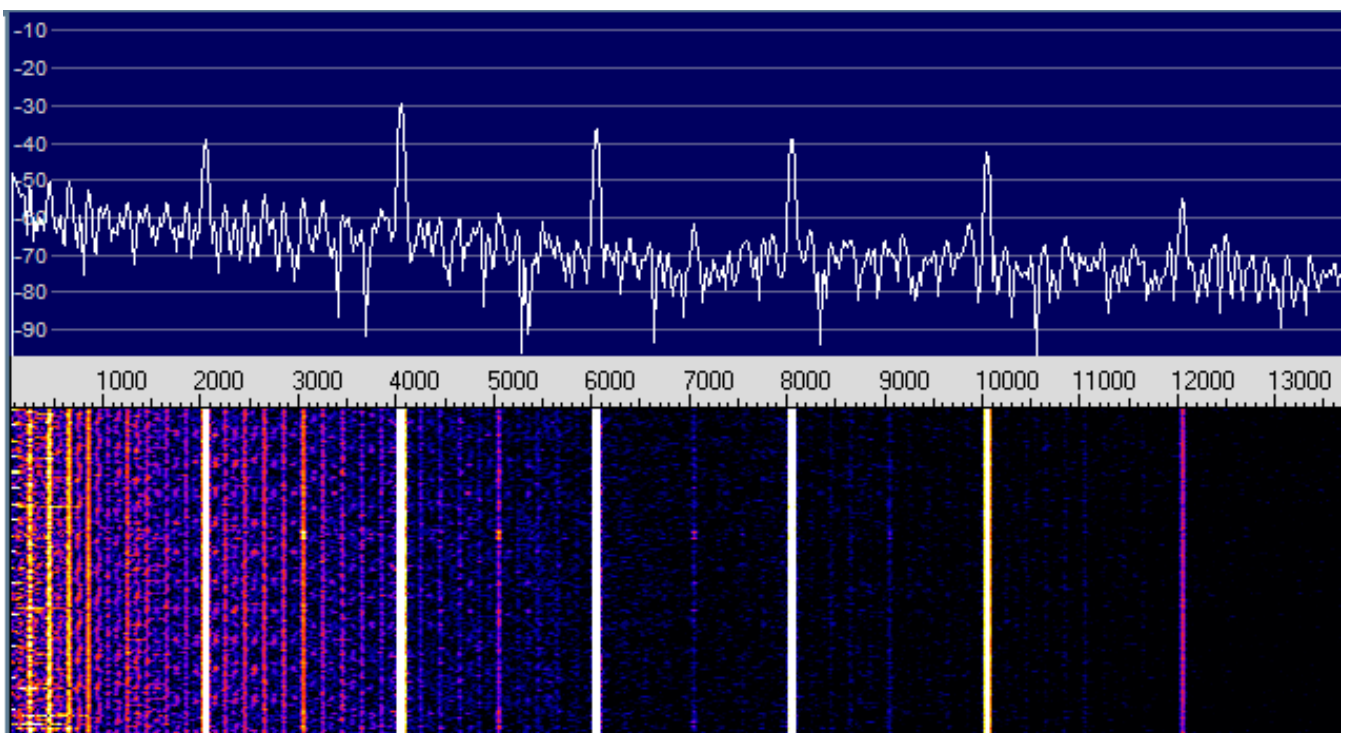
LTE



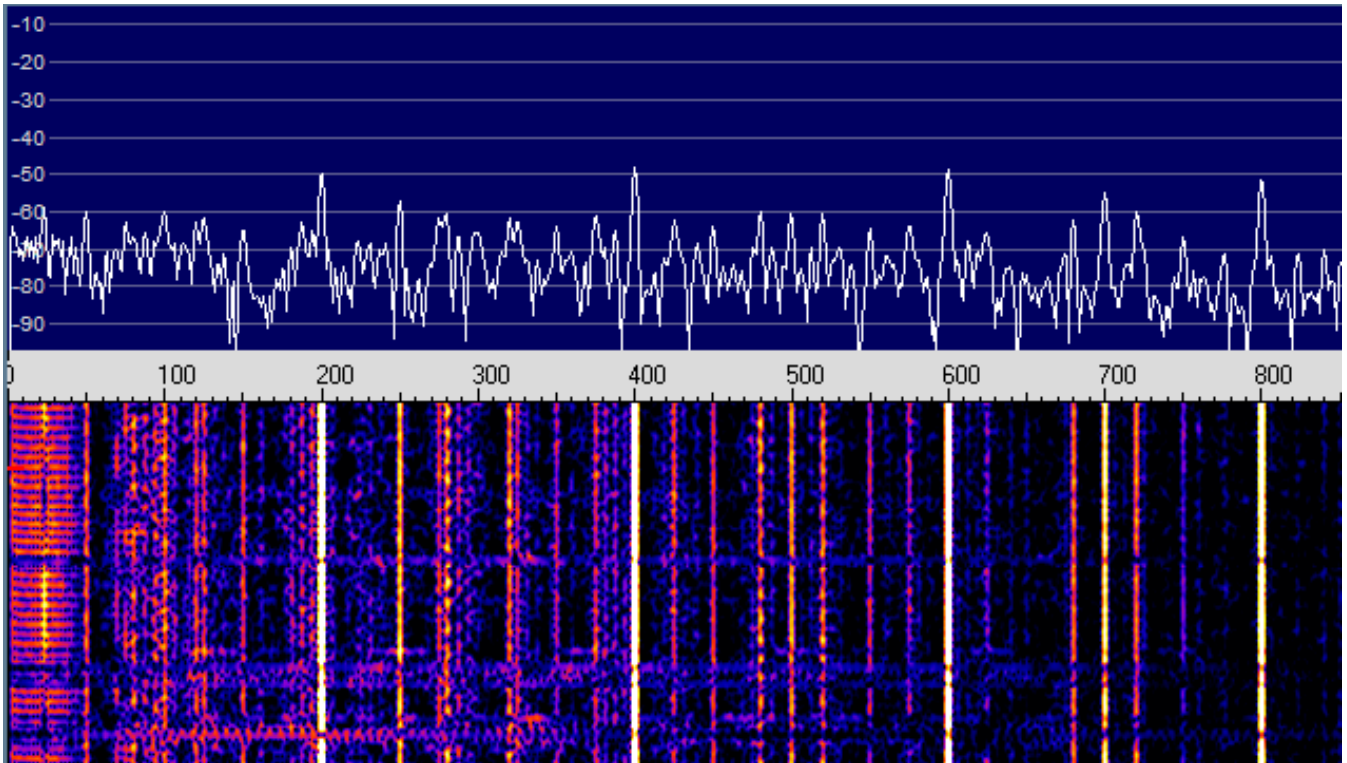
Spektrum 1.800 – 1.880 MHz; ursprünglich nur GSM-Betrieb, jetzt gemischter Betrieb von GSM und LTE. Linker „Tafelberg“: LTE mit Kanalbandbreite 20 MHz; rechter „Tafelberg“: LTE mit Kanalbandbreite 10 MHz; dazwischen GSM.



Zeitverlauf eines LTE-Signals mit geringer Last, daher werden überwiegend Signalisierungs- und Kontrollkanäle dargestellt. Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht $500 \mu\text{s} = 0,5 \text{ ms}$. Mit zunehmender Last werden die Lücken zwischen den Impulsen gefüllt. Die zu den verschiedenen Signalisierungs- und Kontrollkanälen gehörenden Pulsfrequenzen liegen bei 25 Hz (PBCH), 200 Hz (P-SS und S-SS), 1 kHz (PDCCH) und 4 kHz (RS).



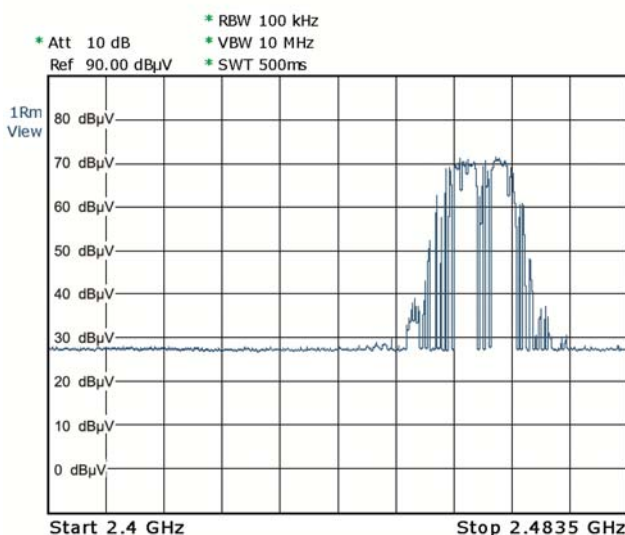
FFT-Spektrum und Spektrogramm eines LTE-Signals bis 13 kHz; dominant sind diskrete Spektrallinien bei 2 kHz und ganzzahligen Vielfachen



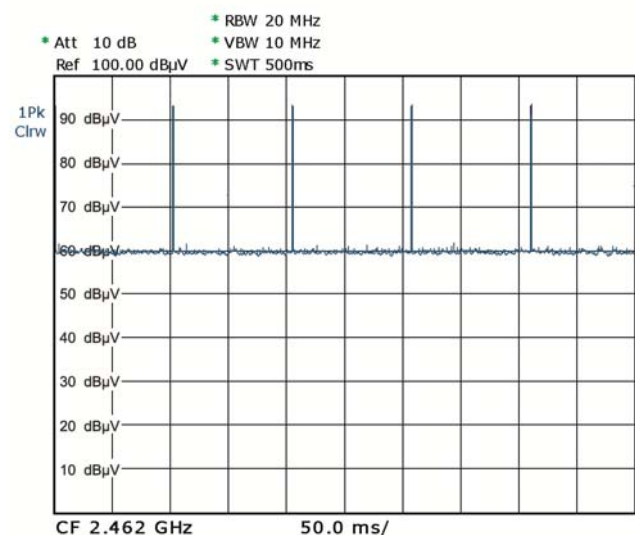
FFT-Spektrum und Spektrogramm eines LTE-Signals bis 850 Hz; man erkennt dominante Spektrallinien bei 25 Hz und 200 Hz sowie ein ganzes Liniengitter mit Abständen der Spektrallinien von 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz und 200 Hz. Dies deutet auf starke Pulsanteile hin.

WLAN/WiFi (g-Standard)

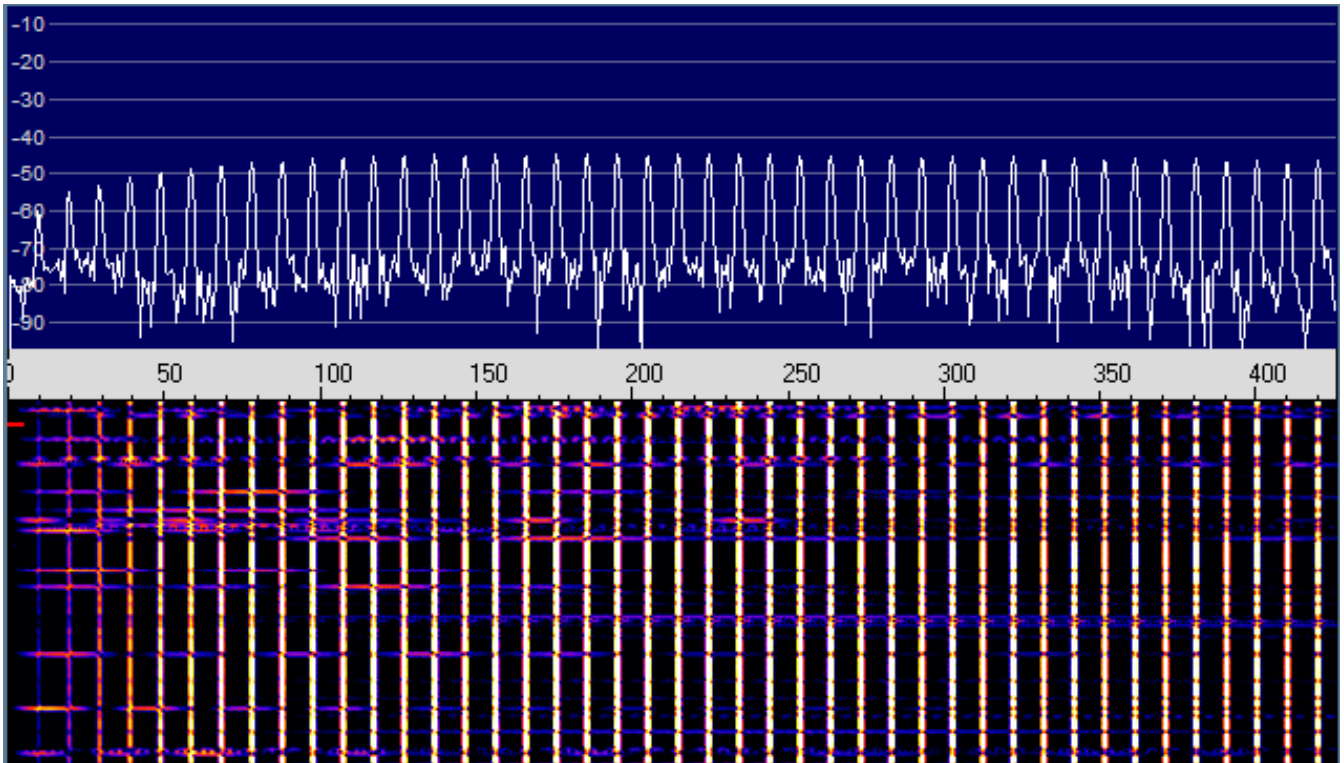
Standby



Spektrum eines WLAN-Accesspoints im Standby (2,4 GHz-Band, g-Standard)

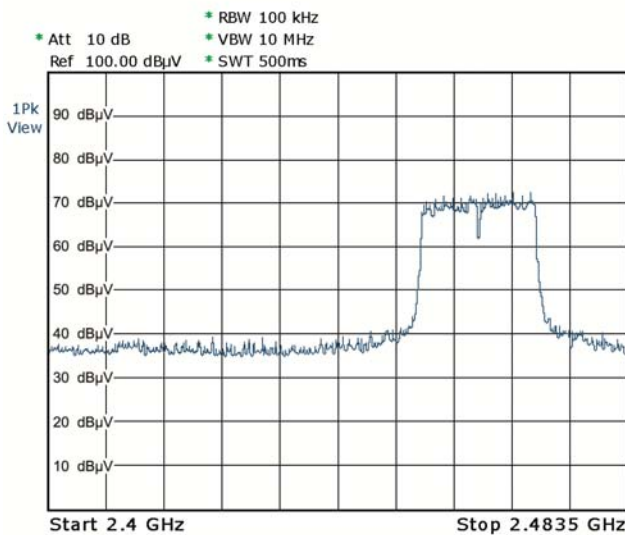


Zeitverlauf eines WLAN-Signals im Standby (2,4 GHz-Band, g-Standard). Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht 50 ms. Periodische Pulsung des Standby-Signals mit 9,7 Hz.

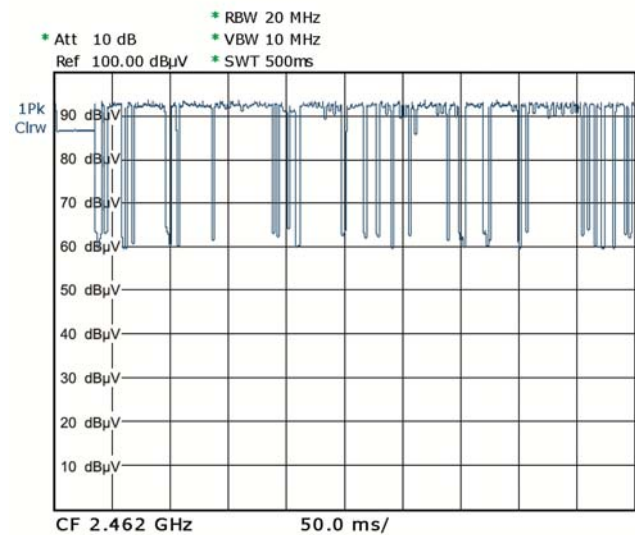


FFT-Spektrum und Spektrogramm eines WLAN-Signals im Standby (g-Standard) bis 450 Hz; der Abstand der Spektrallinien beträgt knapp 10 Hz, entsprechend der Standby-Pulsfrequenz von 9,7 Hz

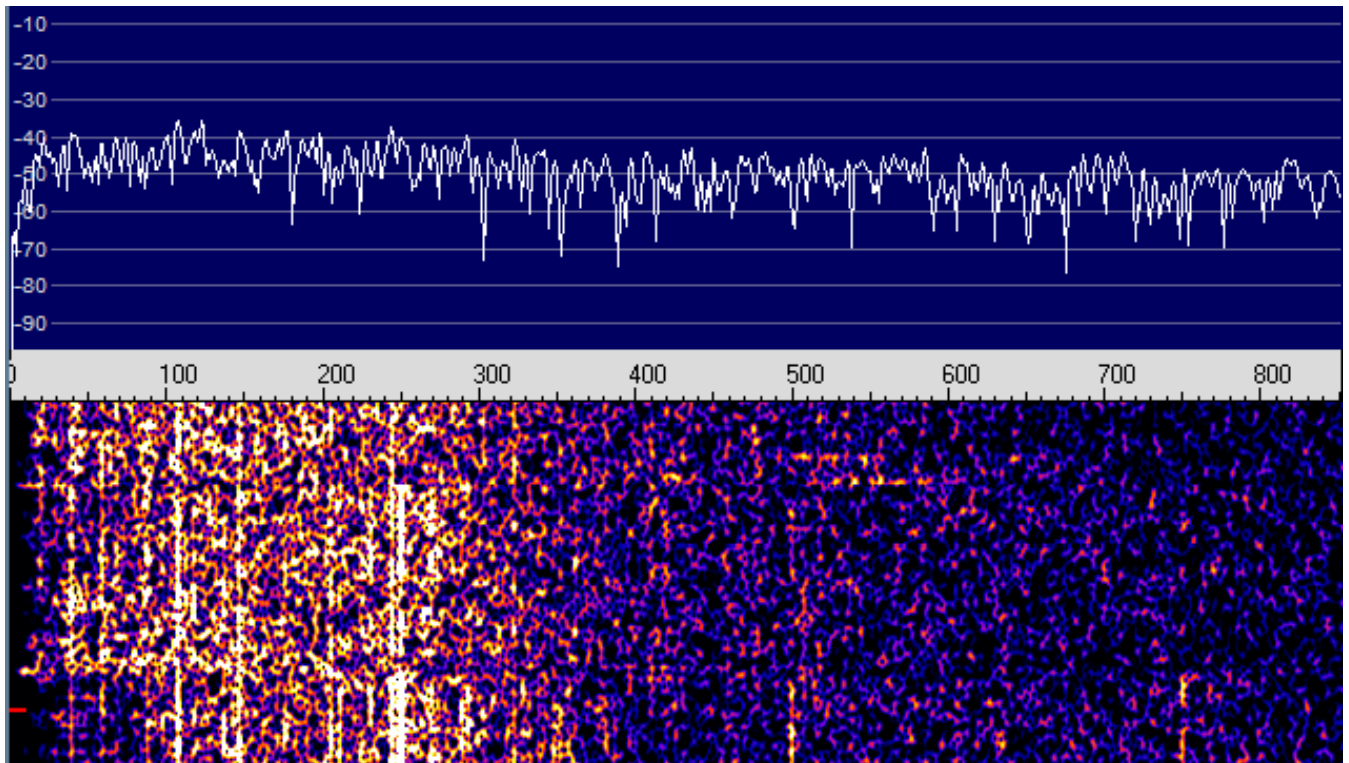
Datentransfer



Spektrum eines WLAN-Accesspoints beim Datentransfer (2,4 GHz-Band, g-Standard)



Zeitverlauf eines WLAN-Signals bei Datentransfer (2,4 GHz-Band, g-Standard). Eine Rasterteilung der Zeitachse entspricht 50 ms



FFT-Spektrum und Spektrogramm eines WLAN-Signals mit Datenverkehr (g-Standard) bis 850 Hz; die diskreten Spektrallinien sind von unregelmäßigen Strukturen überlagert

Emissionen von Mobilteilen/Smartphones

Die folgenden Ausführungen sind aus einer Veröffentlichung von Dipl.-Ing. Dietrich Ruoff (VDB) zitiert [9]. Hier wurden in einer messtechnischen Untersuchung für die 7. EMV-Tagung des VDB 2013 die Sendeaktivitäten von einfachen „guten alten“ Mobiltelefonen („Handys“) mit denen moderner Smartphones verglichen.

Handover und Rückmeldeintervall

Die Mobilfunktechnik ist auf Seiten der Basisstationen im Prinzip wie die alten Leuchttürme der Seefahrer aufgebaut: Ein Organisationskanal sendet rund um die Uhr ein Statussignal zur Orientierung einbuchungswilliger Mobilgeräte. Aus dem Bewegungsprofil des Handynutzers errechnet die Basisstation ein Rückmeldeintervall, in dem sich das Mobiltelefon regelmäßig bei der Basisstation melden muss. Dies variiert je nach Auslastung in der Funkzelle und Ortsveränderung des Mobiltelefons zwischen einmal und 10 mal pro Stunde und öfter (Zeitraster) oder abhängig von der Empfangsfeldstärke (Intensitätsraster), wobei dies das Handy selbst überwacht. Dies wird natürlich parallel genutzt, um rechtzeitig vor Verlassen der Funkzelle auf die benachbarte Basisstation lückenlos umbuchen zu können (Handover). Bei einer Autobahnfahrt mit empfangsbereitem Mobiltelefon werden hierbei Unterschiede zwischen Handy und Smartphone deutlich (Abb. 6).

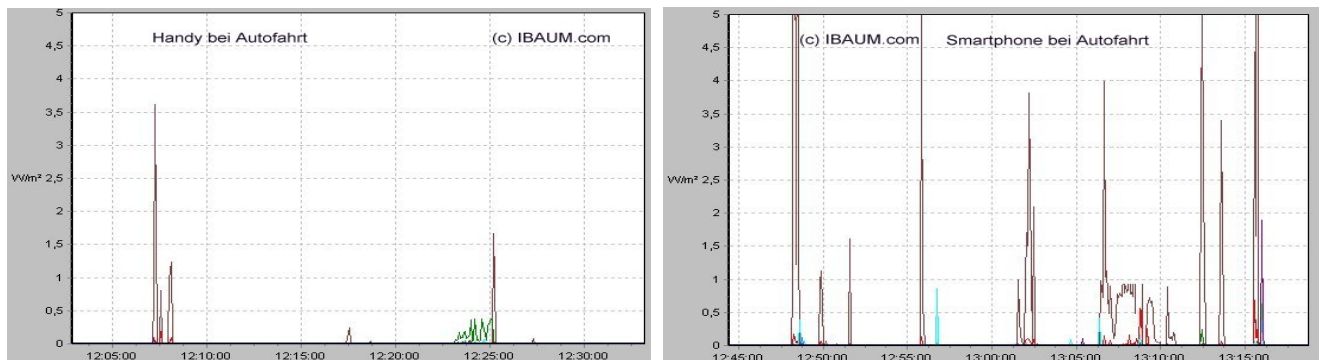


Abb. 6: Funkintervalle incl. Handover bei Autofahrt: Handy (links) vs. Smartphone (rechts) auf gleicher Strecke; Aufzeichnungsdauer jeweils 30 Minuten

Was hat sich verändert?

Moderne Smartphones kommunizieren insgesamt anders: Zusätzlich zum Mobilfunk ist WLAN/Bluetooth aktiv (z.B. Freisprechoption), es sei denn, der vorausschauende Nutzer deaktiviert dies bei Nichtgebrauch, um den Akku zu schonen – ständiges Suchen nach WLAN-Access Points leert den Stromspeicher rapide und nicht jeder S-/U-Bahn-Tunnel bietet Mobilfunkversorgung. So wird durch „normale“ bis ausgiebige Nutzung der Smartphone-Möglichkeiten die vormals üppige Akkulaufzeit von z.B. 200 Stunden Standby und mehr ganz leicht auf 10 bis 5 Stunden oder weniger reduziert. Das kann auch tagsüber schon mal unterwegs ein Nachladen erfordern.

Die Kommunikationsfreudigkeit eines Smartphones ist im Vergleich zu älteren Nur-Telefon-Versionen (Handy) nachfolgend dargestellt (Abb. 7): Im empfangsbereiten Standby ohne Ortsveränderung hat das Standard-Handy nur wenig bis kaum Kontakt mit seiner Basisstations-Umwelt. Ganz anders das Smartphone – die lokale WLAN-Suche ist neben Mobilfunk-Kontakten zyklisch über Stunden aktiv (auch ohne Antwort) und kann je nach aktiven Apps so intensiv werden, dass kaum noch Pausen entstehen – obwohl der Nutzer, wie z.B. nachts, keine Hand anlegt.

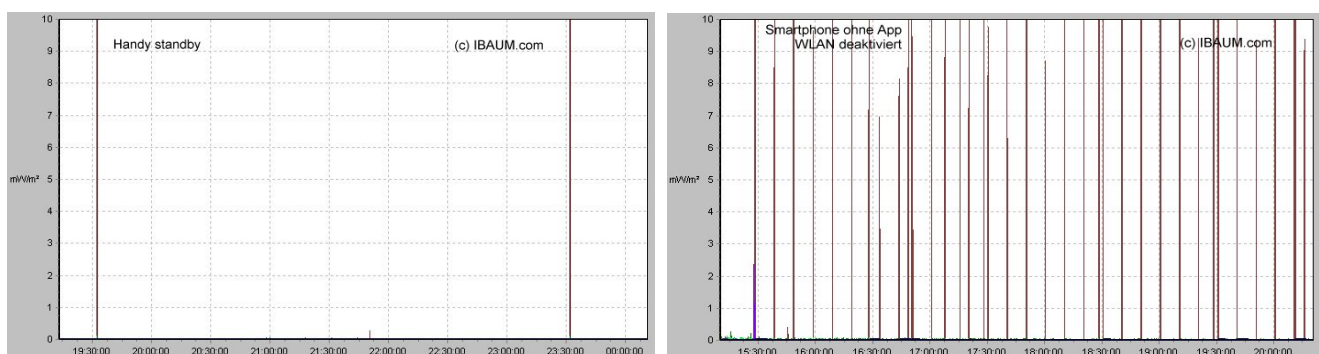


Abb. 7: Typisches Handy-Standby, Meldung alle 4 Stunden (links) vs. Smartphone im Standby (rechts), keine Apps beim Smartphone aktiv; WLAN deaktiviert; Aufzeichnungsdauer jeweils 4,5 Stunden

Kommuniziert wird je nach App-Einstellungen im Minuten- bis Stundentakt, auf allen verfügbaren GSM-UMTS-WLAN-Pfaden (künftig natürlich auch LTE).

Untertags bzw. mobil hängt die Sendehäufigkeit stark von der individuellen Nutzung und der Ortsveränderung ab. Nachts aber ist noch lange nicht Schluss, wenn – wie z.B. bei der jüngeren Generation üblich – das Smartphone empfangs- (und auch sende-)bereit auf dem Nachttisch liegt: Die üblichen Apps sind aktiv in Wartestellung. Um Bandbreite und damit Kosten bei der Mobilfunk-Datenflat zu spa-

ren, schalten viele Smartphone-Nutzer deshalb zuhause auf die kostenfreie WLAN-Schnittstelle des hauseigenen DSL-Routers um, was dann z.B. folgende Konsequenz hat: Datenflat gespart, aber GSM oder UMTS ist nach wie vor (auch) aktiv.

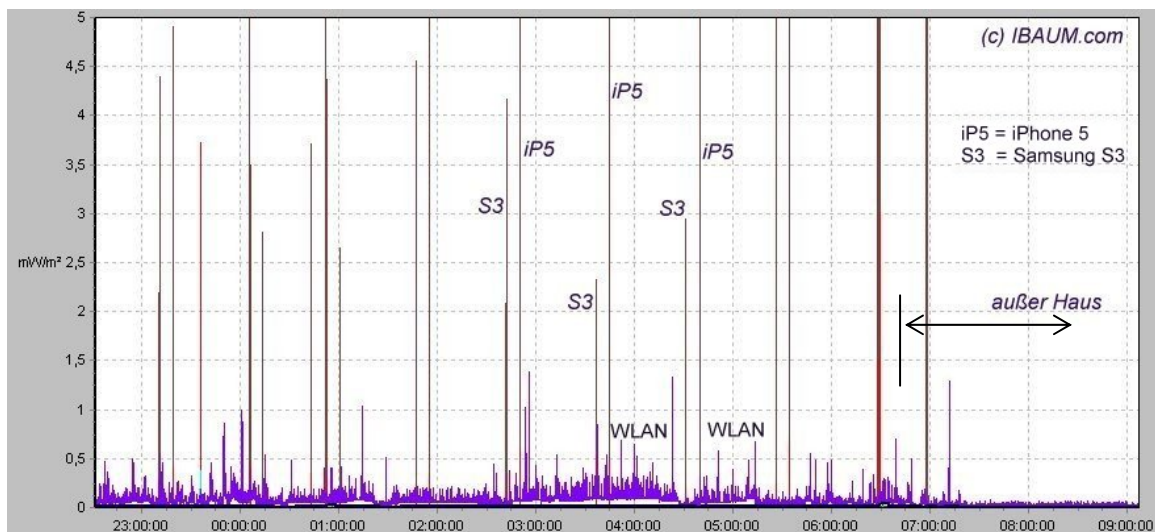


Abb. 8: Zwei Smartphones nachts links (iP5) und rechts (S3) neben dem Bett, Dosimeter links neben dem Bett; WLAN in den GSM-Pausen. Das weiter vom Dosimeter entfernte Smartphone (S3) ist an den niedrigeren Immissionen erkennbar. Ab 07:20 Uhr befinden sich die Besitzer samt ihren Smartphones außer Haus.

Auch bei vermeintlich sorgfältiger Deaktivierung aller Apps zeigt sich das Smartphone immer noch kommunikativ – in großen Abständen per GSM, aber besonders über WLAN (Abb. 9).

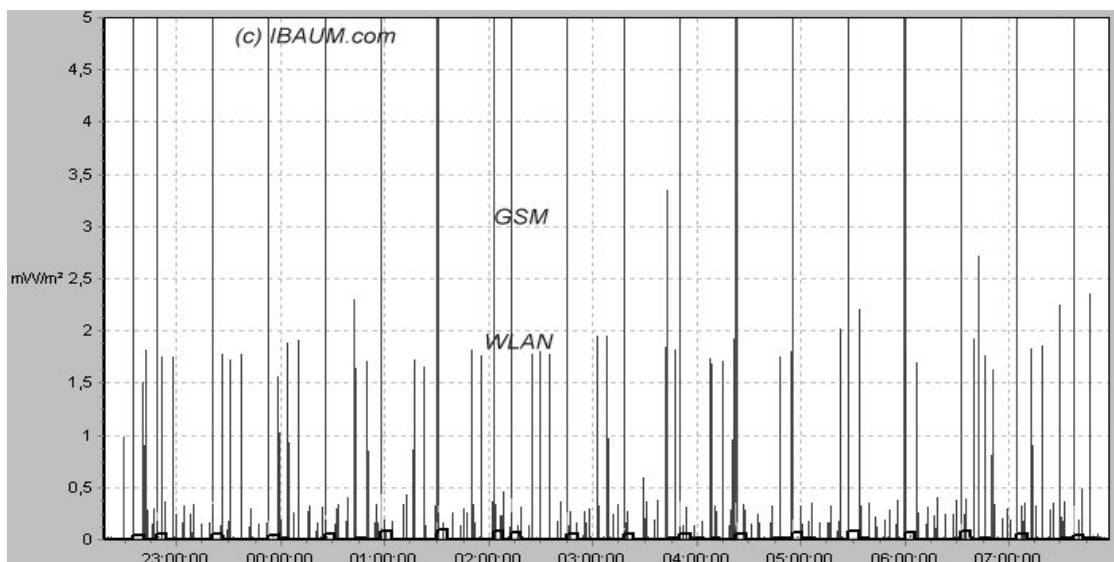


Abb. 9: Smartphone iP4S nachts ohne aktive Apps, WLAN in den GSM-Pausen

Im Prinzip spiegelt dies mindestens die Situation tagsüber wider, wenn z.B. gerade nichts am Smartphone gemacht wird. Dadurch unterscheiden sich moderne Smartphones doch sehr deutlich von den Nur-Telefonier-Handys der Anfangszeit – werden aber genauso körpernah getragen.

Emissionen bei laufenden Apps

Wird ein Smartphone einige Stunden oder wenige Tage nicht betrieben, so erfolgt beim Wiedereinschalten ein wahres Feuerwerk der Kommunikation (Abb. 10): Viele kleine Updates der Basisprogramme sind minutenlang notwendig. Aber auch danach erfordern die benutzten und aktiven Apps einen ständigen Funkkontakt: Alle Kommunikationsdienste wie E-Mail, Facebook, Twitter, Bahnfahrplan usw. werden laufend synchronisiert – am häufigsten natürlich im Automode, also selbsttätig, sobald neue Infos vorhanden sind. Alte Nur-Telefonier-Handys sind da sehr sparsam: Kaum mal ein Funktionsupdate, und der Akku hält dementsprechend sehr lange.

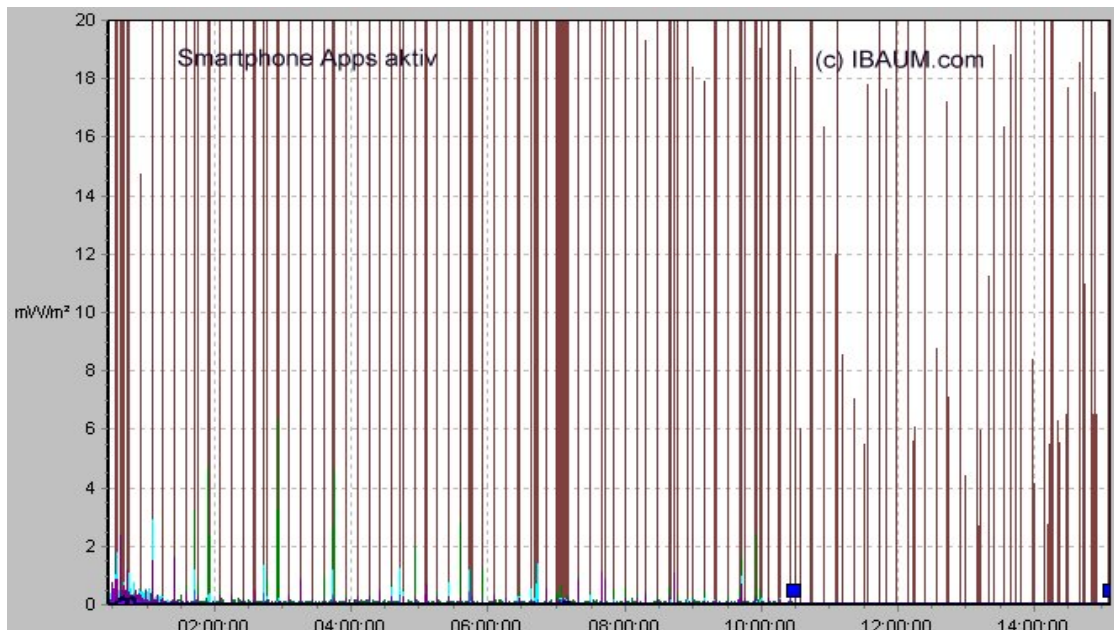


Abb. 10: Smartphone (Android) im Standby, Updates und mehrere Apps im Hintergrund aktiv (GSM und UMTS)

Ergänzte Tests mit ausgeschalteter „Datenoption“ ergaben zwar knapp 25 % weniger Verbindungen im Hintergrund, aber immer noch extrem viel mehr als bei Nur-Telefonier-Handys. Berichte von Nutzern zeigen, dass automatische Hintergrund-Verbindungen offensichtlich recht vielschichtig im Telefon-Betriebssystem verankert sind. Als Laie ist man hier „ausgeliefert“ bzw. bleibt nur noch der „Flugmodus“, bei dem alle Funkverbindungen gekappt werden.‘

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Kathrein Werke KG, Rosenheim: Kathrein Mobilfunk-Antennen; CD-ROM, Version 6, Edition 03/02, No.: 9986-418
- [2] Bornkessel, Ch.; Kunisch, J.; Pamp, J. (IMST – Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik GmbH): Elektromagnetische Felder in NRW – Untersuchung der Immissionen durch Mobilfunk Basisstationen, Abschlussbericht zum AP 4 „Einfluss von Grenzwertverschärfungen auf die Gesamtimmission“, erstellt für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW); 18. März 2002; www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/mobilfunk.pdf

- [3] Münzenberg, U.; Haumann, Th. (Hrsg.: VDB e.V.): Die aktuelle „Hochfrequenzlandschaft“ im Zeitalter des Mobilfunks – Dokumentation der Belastung der Anwohner durch exemplarische Mobilfunkmessungen in Gemeinden; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 1. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 19.-20. April 2002 im Öko-Zentrum NRW, Hamm; Im Verlag der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) e.V., Springe-Eldagsen 2002, ISBN 3-930576-04-3; S. 57-68
- [4] Virnich, Martin H.: Neueste Entwicklungen im Mobilfunkbereich und zukünftige Frequenzversteigerungen – Was kommt noch auf uns zu?; in: Tagungsband zum 14. BUND-Umweltsymposium – Mensch, Umwelt, Gesundheit am 7. März 2015 in Mainz; Wissenschaftlicher Beirat des BUND sowie Landesverbände Rheinland-Pfalz und Hessen (Hrsg.); Mainz 2015
- [5] <https://www.liquid-broadband.de>
- [6] Küng, Andreas: St.Galler Wireless – Querdenken lohnt sich! Grundlagen, Konzept und messtechnische Begleitung; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 8. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 24.-25. April 2015 in München; Im Verlag des AnBUS e.V., Fürth 2015, ISBN 978-3-9814025-8-2; S. 197-208
- [7] Virnich, Martin H.: Akustische Analyse von Funksignalen mit Breitbandmessgeräten; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 8. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 24.-25. April 2015 in München; Im Verlag des AnBUS e.V., Fürth 2015, ISBN 978-3-9814025-8-2; S. 145-185
- [8] Virnich, Martin H.: Audio-Analyse von Funksignalen – Ein „Hörbuch“ der Geräusche von funkdienstspezifischen Amplitudenmodulationen; DVD mit Akustik-Dateien; Hrsg.: Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V.; Bezugsquellen: Virnich, Martin H., Ingenieurbüro für Baubiologie und Umweltmesstechnik ibu, www.baubiologie-virnich.de und Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V., www.baubiologie.net
- [9] Ruoff, Dietrich: Emissionen von Smartphones; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 7. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 12.-13. April 2013 in München; Im Verlag des AnBUS e.V., Fürth 2013, ISBN 978-3-9814025-3-7; S. 195-204