

Messung der hochfrequenten elektromagnetischen Immissionen an ortsfesten Funksendeanlagen

Matthias Wuschek

Immissionsmessungen bei Funksendeanlagen aus unterschiedlichen Anlässen

Im Gegensatz zur Einschätzung von nationalen und internationalen Expertengruppen beziehungsweise Strahlenschutzorganisationen stehen in der allgemeinen öffentlichen Diskussion um mögliche gesundheitliche Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung von Funksystemen oft nicht die mobilen Endgeräte, sondern die ortsfesten Sendeanlagen im Fokus der Besorgnis. Dies zeigt sich beispielsweise häufig bei öffentlichen Diskussionen im Rahmen der Neuerrichtung oder Erweiterung von Standorten für Mobilfunkbasisstationen. Dabei werden immer wieder Fragen nach der Größe der Exposition durch hochfrequente Signale gestellt.

Neben numerischen Verfahren zur Berechnung der von Funksendeanlagen erzeugten Immission haben sich vor allem Messungen als geeignetes Mittel zur Expositionsbestimmung erwiesen, die in der Öffentlichkeit eine hohe Akzeptanz genießen. Beispielsweise besteht im Freistaat Bayern seit dem Jahr 2003 für Kommunen die Möglichkeit, im Rahmen des Dialogs zwischen Bürger und Netzbetreiber Immissionsmessungen in Auftrag zu geben, die anschließend aus einem speziellen Fonds mit bis zu 90 Prozent der Kosten bezuschusst werden können. Dieses Verfahren hat sich als eine erfolgreiche Komponente im Dialogprozess zur Versachlichung der Diskussionen um die gesundheitlichen Auswirkungen von Funksendeanlagen bewährt, so dass 2007 dieses Förderprojekt nochmals bis 2011 verlängert wurde [FEE 07].

Derartige Expositionsmessungen werden meist in Wohnbereichen oder an Punkten mit besonderem öffentlichem Interesse (zum Beispiel Kindergärten, Schulen, Krankenhäuser) durchgeführt.



Abb. 1: Feldstärkemessung in unmittelbarer Nähe einer Mobilfunkantenne

Dort ist zwar nicht mit einer Überschreitung der Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß der 26. Bundesimmissionsschutzverordnung [26. BImSchV] zu rechnen, da dies bereits durch die Berechnungen der Bundesnetzagentur (BNetzA) im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens vor Inbetriebnahme sichergestellt wird. Allerdings werden in diesem Verfahren keine konkreten Immissionswerte für Punkte in der näheren Umgebung von Funkseideanlagen zur Verfügung gestellt. Erst Messungen vor Ort nach Inbetriebnahme liefern schließlich dem Bürger quantitativ Auskunft über die Immissionssituation in benachbarten Wohnungen oder dem Kindergarten nebenan. Neben Expositionsmessungen in der Umgebung von Funkseideanlagen zum Zweck der Öffentlichkeitsinformation werden mehr und mehr auch Erhebungen in unmittelbarer Nähe von Sendeanennen, zum Beispiel im Rahmen des Arbeitsschutzes, notwendig (Abb. 1). Die zunehmende Zahl an Sendetürmen und Dachstandorten mit oftmals einer Vielzahl von Antennen unterschiedlicher Betreiber macht es für den Standortverantwortlichen immer häufiger nötig, mittels Messungen die Einhaltung einschlägiger Grenzwerte des Arbeitsschutzes zu verifizieren (Abb. 2).


Ebenfalls auf messtechnische Untersuchungen angewiesen ist man in den Fällen, in denen die Einhaltung bestimmter Grenzwerte nicht mehr mittels vereinfachter Berechnungsverfahren unter „Worst Case“-Annahmen nachgewiesen werden kann. Während diese Fälle in Deutschland nur relativ selten auftreten, häuft sich die Notwendigkeit von Expositionsmessungen insbesondere dann, wenn aufgrund besonders niedriger Grenzwerte diese durch die Sendeanlagen größtenteils ausgeschöpft werden. Ein Beispiel für diese Situation findet man in der Schweiz. Aufgrund der dortigen Rechtslage [NISV 99] dürfen an bestimmten Orten, an denen sich Personen nicht nur vorübergehend aufhalten, die Immissionen nicht mehr als etwa zehn Prozent der Feldstärkegrenzwerte betragen, wie sie in der EU-Ratsempfehlung [EU 99] beziehungsweise in der 26. BImSchV vorgegeben sind. Diese deutlich niedrigeren Grenzwertvorgaben machen es insbesondere bei Standorten mit mehreren Betreibern beziehungsweise geringen Entfernungen zu relevanten Aufenthaltsorten von Personen notwendig, mittels Messungen die Grenzwerteinhalten zu verifizieren. Neben den beiden bisher vorgestellten typischen Anlässen für Expositionsmessungen (Öffentlichkeitsinformation beziehungsweise Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten) findet man in den letzten Jahren auch immer häufiger eine dritte Gruppe von Hochfrequenzexpositionsmessungen. Hierbei handelt es sich um Messkampagnen



Abb. 2: Die oft große Zahl der auf Funktürmen installierten Antennen macht es notwendig, mittels Messungen Sicherheitsbereiche auf den verschiedenen Plattformen zu bestimmen.

mit einer relativ großen Zahl von Messpunkten, um durch statistische Auswertung der Messergebnisse genauere Informationen über die typische Immissionssituation der Bevölkerung zu erhalten. Derartige Messkampagnen sind beispielsweise das „Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg“ [BOC 03], das „EMF-Monitoring“ in Bayern [BER 04], die Messreihen des Informationszentrum Mobilfunk in Deutschland [IZMF] beziehungsweise des Forum Mobilkommunikation in Österreich [FMK] sowie die EMF-Messreihen der Bundesnetzagentur [BNetzA]. Allen derartigen Projekten ist gemeinsam, durch Messungen an einer großen Anzahl von Punkten (meist >100) statistisch belastbare Aussagen über die typische Größe der Hochfrequenzexposition, teilweise auch noch unterschieden nach verschiedenen Verursacherguppen (zum Beispiel Tonrundfunk, TV, Mobilfunk), zu erhalten.

Besonders interessant werden derartige Messkampagnen, wenn sie nicht nur einmalig durchgeführt, sondern nach einer bestimmten Zeit wiederholt werden, wie dies beispielsweise beim EMF-Monitoring in Bayern der Fall ist. Im September 2008 wurde der Bericht über die zweite Messkampagne (2006/07) veröffentlicht, bei der an den gleichen 400 Punkten wie im Rahmen der ersten Kampagne (2002/03) Immissionsmessungen durchgeführt wurden [MUE 08]. Durch den Vergleich der Ergebnisse der beiden Messreihen können nun erstmals statistisch belastbare



Aussagen über mögliche Veränderungen der typischen Hochfrequenz-Expositionssituation im Land getroffen werden. Eine ähnliche Kampagne wurde auch im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms im Jahr 2005 durchgeführt. Hier dienten Messungen an circa 200 Punkten vor beziehungsweise nach Umstellung von analogen TV-Sendern auf digitale Systeme (DVB-T) der Beantwortung der Frage, wie sich die Exposition der Bevölkerung durch diese Umstellung verändert [SCH 06].

Ebenfalls im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms wurden bei zwei epidemiologischen Projekten umfangreiche Immissionsmessungen innerhalb von Wohn- und Schlafräumen durchgeführt. Zweck der Messungen war es, für die betrachteten Räume beziehungsweise Schlafplätze charakteristische Expositionsgrößen zu ermitteln, die für epidemiologische Untersuchungen möglicher Gesundheitseffekte von Anwohnern in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen benötigt wurden [NEI 05, DAN 08].

Unterschiedliche Aufgabenstellungen erfordern unterschiedliche Mess- und Auswerteverfahren

Je nach Aufgabenstellung werden an die Durchführung der Messung, die Auswertung der Ergebnisse sowie die Genauigkeit der Erfassung unterschiedlich strenge Anforderungen gestellt. Auch die Kosten für derartige Erhebungen dürfen niemals aus den Augen verloren werden. So ist es bei Messungen im Rahmen des Arbeitsschutzes sicherlich notwendig, mit besonderer Sorgfalt und Präzision die Einhaltung der Grenzwerte zu überprüfen. Hierbei ist zu gewährleisten, dass die Untersuchungen die ungünstigste Expositionssituation erfassen, so dass man sich auf jeden Fall sicher sein kann, ob an bestimmten Orten vorgegebene Grenzwerte eingehalten werden. Derartige Untersuchungen tangieren den unmittelbaren Gesundheitsschutz mit möglicherweise gravierenden Konsequenzen bei fehlerhafter Bewertung.

Messungen zur Öffentlichkeitsinformation fordern natürlich auch ein gewisses Mindestmaß an Präzision und Verlässlichkeit. Da jedoch an den betrachteten Orten die gültigen Grenzwerte typischerweise immer sehr deutlich unterschritten werden, können bei der Genauigkeit der Analyse einige Einschränkungen durchaus zugelassen werden, so dass dadurch die Kosten für die Untersuchungen günstiger ausfallen können.

Messkampagnen zum Zweck von Umweltmonitoring erfordern meist deutlich andere Vorgehensweisen. Schon die Messpunktauswahl beschränkt sich hier in der Regel auf

öffentlich zugängliche Orte im Freien. Die Messungen werden in Bodennähe durchgeführt, es erfolgt nur eine Momentaufnahme der Immission, das heißt keine Erfassung der Maximalimmission bezüglich des Ortes und eventueller zeitlicher Immissionsschwankungen. Ansonsten würden derartige Messkampagnen wegen des gestiegenen Zeitaufwandes für Messung und Auswertung jeden Kostenrahmen sprengen. Hier wird also immer ein gewisser Kompromiss aus Präzision der Erfassung und Zeitbedarf beziehungsweise Kostenrahmen gewählt werden müssen.

Leider bieten die zur Verfügung stehenden Messprinzipien und Messgeräte für den Hochfrequenzbereich nicht die Möglichkeit, ein für alle Aufgabenstellungen allgemein gültiges, einfaches und kostenminimiertes Messverfahren mit dafür optimal geeigneten Geräten zu definieren. Dem Messtechniker und auch dem Gerätehersteller bleibt also nichts anderes übrig, als die für die konkrete Messaufgabe am besten geeigneten Verfahren und Geräte zu entwickeln beziehungsweise auszuwählen. „Elektromogmessgeräte“ in der Preisklasse unter 1.000,- Euro mit einfachen numerischen Digitalanzeigen sind in der Regel für professionelle Immissionsmessungen nicht geeignet. Dies wird schon dadurch klar, dass die Kosten für die Kalibrierung der Messantenne in einem DKE-akkreditierten Prüflabor üblicherweise im vierstelligen Eurobereich liegen.

Fachgerechte Hochfrequenz-Immissionsmessungen erfordern grundsätzlich eingehendes Wissen über die Funktionsweise der dafür verwendbaren Messgeräte. Ebenso wichtig sind allerdings Kenntnisse über die Zeitstruktur der zu messenden Signale und der gesetzlichen Regularien bezüglich Grenzwertphilosophie, Schutzziele und Immissionserfassung. Durch falsche Einstellungen am Messgerät oder nicht korrekte Interpretation der am Gerät angezeigten Resultate sind ohne weiteres Fehlbewertungen der Immission um mehrere Größenordnungen möglich, die weder als Über-, noch als Unterbewertung der tatsächlichen Immission akzeptiert werden können.

In den letzten Monaten beziehungsweise Jahren haben verschiedene Projekte aus dem Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm und aus einzelnen Bundesländern dazu beigetragen, einerseits die Datenlage über typische Immissionsverhältnisse in der Umgebung verschiedener Sendeanlagen zu vergrößern, und andererseits geeignete Mess- und Berechnungsverfahren zur Immissionsbestimmung zu entwickeln [BOC 03, BOR 02, BOR 05, BOR 05-2, BOR 05-3, BOR 08 SCH 06, WUS 04]. Ebenfalls besondere Erwähnung finden sollten einschlägige Arbeiten aus der Schweiz, die zu sehr ausführlichen Messvorschriften führ-

ten [BUWAL 02, BUWAL 03, BUWAL 05]. Zusätzlich wurden in der Schweiz durch umfangreiche Ringversuche die Zuverlässigkeit und Praktikabilität von Expositionsmessverfahren im Hochfrequenzbereich eingehend untersucht und verifiziert [METAS 02, METAS 06, METAS 08]. Auf diesem Sektor kann die Schweiz als europaweit führend angesehen werden.

In den folgenden Abschnitten werden beispielhaft frequenzselektive Messverfahren zur Bestimmung hochfrequenter elektromagnetischer Immissionen von Funksendeanlagen des Ton- und Fernsehgrundfunks und des Mobilfunks vor allem hinsichtlich der Messdurchführung und der erforderlichen Einstellungen am Messgerät genauer spezifiziert. Frequenzselektive Messungen können bei einer Vielzahl von Aufgabenstellungen effizient eingesetzt werden, sind jedoch wegen der relativ komplexen Messgeräte besonders anfällig für Fehlbedienungen. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich hauptsächlich auf die Immissionsmessung in für die Allgemeinbevölkerung allgemein zugänglichen Bereichen, das heißt, der im Rahmen der Standortbescheinigung von der Bundesnetzagentur festgelegte Sicherheitsabstand wird von den weiteren Betrachtungen ausgeklammert. Außerdem wird für die Betrachtung das Grenzwertkonzept der ICNIRP [ICNIRP 98] zugrunde gelegt, das unter anderem in den für Deutschland gesetzlich verbindlichen Grenzwerten der 26. BImSchV verankert ist. Allerdings sind die wesentlichen im folgenden vorgestellten grundsätzlichen Sachverhalte auch bei Arbeitsschutzmessungen gleichermaßen relevant.

Charakterisierung der Feldverteilung und Forderungen an die Immissionsbestimmung

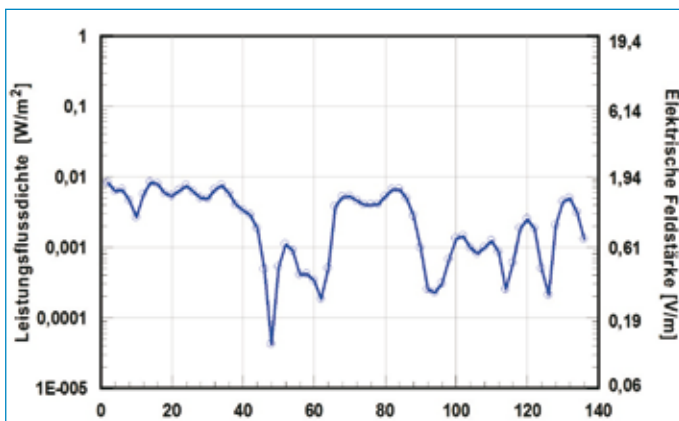


Abb. 3: Immissionsverlauf in einem Innenraum über einer Strecke von 1,4 Meter (Frequenz: 1,9 GHz) [BOR 05]. Man erkennt hier Schwankungen der Immission von bis zu 20 dB innerhalb weniger Zentimeter.

Eine ausführliche Analyse der Immissionsverteilung am Beispiel von GSM-Mobilfunkstationen hat gezeigt, dass die Immission in direktem Umfeld der Stationen örtlich großskalig (durch die Richtcharakteristik der Mobilfunkantennen) und kleinskalig (durch Interferenzen besonders in Innenräumen, siehe Abb. 3) schwankt [BOR 05]. Somit ist die Messwertaufnahme an nur einem Raumpunkt nicht repräsentativ für die in einem Raum vorhandene mittlere oder maximale Immission.

Zusätzlich dazu treten auch im zeitlichen Verlauf bei vielen Funksystemen großskalige (Leistungsregelung bei mehrkanaligen Anlagen in Abhängigkeit von Nutzeranzahl) und kleinskalige (DTX und Leistungsregelung in Abhängigkeit der Verbindungsqualität) Schwankungen der Immission auf. Deswegen beschreibt eine Augenblicksmessung die maximal mögliche Immissionssituation nur unzureichend. Die 26. BImSchV sowie die dazugehörigen Durchführungshinweise des Länderausschusses für Immissionsschutz [LAI 04] definieren, dass Messungen der Immission am Einwirkungsort mit der stärksten Immission und eine Bewertung der Messergebnisse auf Basis der maximal gemessenen Werte zu erfolgen haben. Außerdem sind die Messungen bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; andernfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen. Die Grenzwerte sind angegeben als Effektivwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke. Im gleichen Sinn definieren die berufsgenossenschaftlichen Vorschriften die Expositionserfassung für den Arbeitsschutz [BGR 01]. Diesen Forderungen ist durch ein geeignetes Messverfahren Rechnung zu tragen.

Grundsätzliches Messverfahren

Bei der Messung hochfrequenter Immissionen wird grundsätzlich zwischen breitbandigen und frequenzselektiven Messverfahren unterschieden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass breitbandige Verfahren einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches ermitteln, wobei nicht zugeordnet werden kann, wie sich die Immissionsanteile frequenzmäßig und damit auch emittentenbezogen aufteilen. Dadurch wird bei Vorhandensein mehrerer Signale in verschiedenen Frequenzbereichen die Bewertung mit den zugehörigen (teilweise frequenzabhängigen) Grenzwerten erschwert oder sogar unmöglich. Demgegenüber kann durch den Einsatz frequenzselektiver Verfahren ermittelt werden, welche Immissionen am Messort bei welcher Frequenz vorliegen. Durch die Frequenzinformation ist in vielen Fällen eine Zuordnung zur Quelle der Immission



Abb. 4: Breitbandmessgeräte für Hochfrequenzfelder (Narda STS)

möglich. Auch wegen der oftmals eingeschränkten Empfindlichkeit üblicher Breitbandmessgeräte (typisch 1 V/m, selten auch darunter) eignen sich Breitbandmessgeräte (Abb. 4) häufig nur für Expositionsmessungen bei vergleichsweise großen Feldstärken, wie sie meist nur im Rahmen von Arbeitsschutzmessungen auftreten.

Bei frequenzselektiven Messungen werden üblicherweise Spektrumanalysatoren oder Messempfänger sowie passende Empfangsantennen und HF-Kabel verwendet (Abb. 5). Auch integrierte Lösungen, bei denen Messantenne und Analysator fest miteinander verbunden werden können, sind seit einigen Jahren auf dem Markt verfügbar (Abb. 1). Die Anforderungen bezüglich einer örtlichen Maximalwert-erfassung lassen sich sehr effizient mit der so genannten „Schwenkmethode“ erfüllen: Hierbei wird nicht nur an einem festen Messpunkt, sondern in einem Messvolumen gemessen. Das Messvolumen wird mit einer handgeführten Messantenne abgetastet, wobei gleichzeitig die Vordrifsrichtung und die Polarisationsrichtung der Messantenne variiert werden. Während des Suchvorgangs wird das Spektrum mit der „Maxhold“ Funktion des Messgerätes kontinuierlich erfasst. Besonders einfach lässt sich die Raumabtastung mit Isotropantennen durchführen, die seit einigen Jahren nicht nur für Breitbandmessgeräte, sondern auch für frequenzselektive Messsysteme verfügbar sind (Abb. 1). Aus dem „Maxhold“ Spektrum können dann die Maximalwerte für die weitere Auswertung herangezogen werden. Die Bewegung der Antenne muss bezogen auf die Messgeschwindigkeit des Spektrumanalysators langsam erfolgen.

Mit der Schwenkmethode lässt sich allerdings keine Analyse der räumlichen Verteilung oder eine räumliche Mittelung der Immissionen zum Beispiel in einem Zimmer erreichen, wie es beispielsweise für Immissionserfassungen bei epidemiologischen Studien interessant ist. Für diesen Zweck stellt die „Punktrastermethode“ eine brauchbare Alternative dar, bei der die Immission an mehreren festen Punkten im Raum gemessen und anschließend gemittelt wird. Die Ergebnisse solcher Mittelungsmessungen sind stets kleiner als die mit der Schwenkmethode erzielbaren Ergebnisse [VOI 04], was den „Maximierungsaspekt“ der Messanforderungen nach der 26. BImSchV unterstreicht. Grundsätzlich ist je nach Vorgabe der relevanten Vorschriften zu entscheiden, welche Methode der Maximalwertbestimmung (die zeitsparende Schwenkmethode oder eine aufwändigere Punktrastermessung) herangezogen werden sollte. Festzuhalten ist allerdings, dass die Messung der Exposition an nur einem Punkt im Raum nicht ausreichend ist.

Moderne Funksignale besitzen, neben einer häufig sehr großen Signalbandbreite, eine meist komplizierte zeitliche Struktur. Die momentane Signalleistung schwankt unter Umständen erheblich. Nachdem das biologische Wirkungsmodell im Hochfrequenzbereich auf der thermischen Wirkung der absorbierten Hochfrequenzenergie beruht, ist bei der Signalerfassung sicherzustellen, dass nicht kurzzeitige Leistungsspitzen als Basis für den Grenzwertvergleich herangezogen werden, sondern der „Effektivwert“ (engl. „root mean square“, RMS) des Signals, der die mittlere transportierte Leistung im Signal darstellt (allerdings, wie oben

bereits erwähnt, natürlich bei höchster betrieblicher Auslastung der Quelle). Nur wenn Signalspitzenwerte außerordentlich groß im Vergleich zum Effektivwert ausfallen (zum Beispiel bei Radarsignalen), greifen auch Beschränkungen des Spitzenwerts.

Im Folgenden werden die zur leistungsrichtigen Erfassung von Hochfrequenzsignalen der Funkanwendungen notwendigen Einstellparameter am Spektrumanalysator aus den Signalstrukturen der betreffenden Funksignale abgeleitet. Die wichtigsten, am Spektrumanalysator einzustellenden Parameter sind:

- Die „Auflösebandbreite“ („resolution bandwidth“, RBW) des Zwischenfrequenzfilters. Diese muss an die Bandbreite des zu messenden Signals angepasst sein, auf keinen Fall darf die RBW kleiner als die Signalbandbreite sein, dies würde zu einer Unterbewertung der Exposition führen.
- Der für die korrekte Erfassung der mittleren Signalleistung („RMS-Wert“) geeignete *Detektortyp* (hier ist insbesondere zwischen „Peak“- und „RMS-Detektor“ abzuwägen). Leider kann man bei vielen handelsüblichen Messgeräten nicht unbedingt davon ausgehen, dass bei Aktivierung des RMS-Detektors vom Gerät dann auch wirklich der korrekte RMS-Wert des Signals angezeigt wird. In vielen Fällen müssen noch weitere Parameter am Gerät geeignet eingestellt werden. Hier benötigt der Bediener meist viel Erfahrung, wenn er eine Fehlbewertung der Exposition vermeiden will.
- Die Glättung des gleichgerichteten Signals erfolgt mit einem *Videofilter*, dessen Bandbreite („video bandwidth“, VBW) ebenfalls geeignet einzustellen ist. Hier kann üblicherweise die Faustregel angewendet werden, dass die VBW nicht kleiner als die RBW gewählt werden sollte, damit es nicht zu einer Unterbewertung der Signalamplitude kommt.
- Zusätzlich sind gegebenenfalls auch der am Analysator dargestellte *Frequenzbereich* („span“) und die *Messgeschwindigkeit* („sweep time“) an das zu messende Signal anzupassen.

Für ein tiefer gehendes Studium der Funktionsweise moderner Spektrumanalysatoren sei hier insbesondere auf [RAU 00] verwiesen.

Analoger Rundfunk

LMK-Hörrundfunk

Die Immissionen durch Lang-, Mittel- und Kurzwellensender (LMK-Sender) tragen zu einem wesentlichen Anteil zur Gesamtmission in der Allgemeinbevölkerung bei. In [BOC

03] wurde bei Messungen im Raum Baden-Württemberg auf einem regelmäßigen Raster von 2 x 2 km festgestellt, dass im Durchschnitt über alle 895 Messpunkte etwa 47 % der grenzwertbezogenen Exposition von LMK-Signalen stammt. Bei der Messung der Gesamtmission sind diese Signale deswegen zu berücksichtigen.

LMK-Sender arbeiten im Frequenzbereich 150 kHz bis 30 MHz. Sie dienen hauptsächlich der Übertragung analoger Tonsignale (meist Rundfunk, aber auch andere Dienste, wie Amateurfunk oder nicht öffentliche Funkverbindungen zum Beispiel für Militär und Schifffahrt). Zusätzlich existieren im Längstwellenbereich (9 kHz bis 150 kHz) noch einige Sender für Sonderanwendungen (zum Beispiel Zeitzeichen, Navigation, Funksteuerung). Als Modulation kommt in nahezu allen Fällen derzeit noch die Amplitudenmodulation zum Einsatz (allerdings wurden bereits einige Tonrundfunksender auf digitale Modulation umgestellt).

Da im normalen Betriebszustand auf Grund des Prinzips der Amplitudenmodulation die Momentanleistung des Senders deutlichen zeitlichen Schwankungen unterliegt und aus Gründen der Energieeinsparung meist zusätzlich eine Regelung der Sendeleistung erfolgt, liefern Messungen bei



Abb. 5: Frequenzselektive Messtechnik mit Spektrumanalysator und Messantenne (Rohde & Schwarz)

eingeschalteter Modulation nur relativ ungenaue Ergebnisse. Für eine korrekte Feldstärkemessung sollte daher immer bei unmoduliertem Träger gemessen werden [BUWAL 05]. In diesem Fall kann der Peak-Detektor verwendet werden. Als RBW ist ein Wert von 10 kHz ausreichend, da im LMK-Bereich mit sehr schmalen Funkkanälen gearbeitet wird.

UKW-Hörrundfunk

Tonrundfunkprogramme im UKW-Frequenzbereich (87,5 bis 108 MHz) werden frequenzmoduliert (FM) übertragen. Da bei FM die niederfrequente Information die momentane Frequenz des Trägersignals beeinflusst und nicht dessen Amplitude, ergibt sich ein Sendesignal mit konstanter Leistung, so dass für die Bestimmung der zeitgemittelten Immission keine Korrekturen vorgenommen werden müssen. Für die Immissionsmessung bei UKW-Signalen ist somit der Peak-Detektor ausreichend. Die Auflösungsbreite (RBW) sollte 200 oder 300 kHz betragen.

Analogfernsehen

In Deutschland wird zur Übertragung analoger Fernsehprogramme der CCIR-Standard B (Band 1: 49 bis 68 MHz; Band 3: 174 bis 223 MHz) beziehungsweise G (im UHF-Band, 470 bis 790 MHz) verwendet. Ein *analoges TV-Signal* stellt genau genommen die Summe aus den Einzelsignalen Luminanz, Chrominanz und Toninformation dar, die mit unterschiedlichen Modulationsverfahren (Restseitenbandmodulation, Quadraturamplitudenmodulation und Frequenzmodulation) auf unterschiedliche Träger aufmoduliert werden.

Charakteristisch für Analog-TV sind die alle 64 µs auftretenden Zeilensynchronimpulse, die den Sender auf 100 Prozent der Sendeleistung tasten, während die zwischen zwei Synchronimpulsen herrschende Momentanleistung stark vom Inhalt der zu übertragenden Bildzeile abhängt. Bei einem zufälligen Bildinhalt ergibt sich eine mittlere Sendeleistung, die etwa 4 bis 5 dB unter der Synchronspitzenleistung liegt. Die beiden Tonträger sind um 13 dB und 20 dB schwächer als der Bildträger.

Die Erfassung der mittleren Immission erfolgt deswegen am einfachsten durch Messung der Synchronspitzenleistung mit dem Peak-Detektor unter Anwendung eines Korrekturfaktors von etwa 4 dB zur Berücksichtigung eines mittleren Bildinhalts unter Einschluss der Tonsignale. Für den „Worst Case“-Fall eines reinen Schwarzbildes (maximal mögliche Immission) beträgt der Korrekturfaktor statt dessen 2,2 dB [BUWAL 05]. Die RBW sollte auf 1 MHz eingestellt werden.

Bei Verwendung eines RMS-Detektors wird die Messung vom momentanen Bildinhalt abhängig. Daher kommt es in diesem Fall zu einer Zunahme der Messunsicherheit aufgrund der Möglichkeit, dass zum Zeitpunkt der Messung gerade ein nicht „repräsentatives“ Bild abgestrahlt wird. Zuverlässiger werden die Messergebnisse nur durch mehrmaliges Wiederholen und Mittelwertbildung, was allerdings den Zeitbedarf für Messung und Auswertung erhöht.

Derzeit werden die analogen Fernsehsysteme durch digitale terrestrische Sender ersetzt, so dass die Expositionsmessung von analogen TV-Signalen mehr und mehr an Bedeutung verlieren wird.

Digitaler Rundfunk

Terrestrisches Digitalfernsehen DVB-T

DVB-T, das so genannte „Überall-Fernsehen“, ist mittlerweile in den meisten Regionen Deutschlands verfügbar. DVB-T arbeitet im ähnlichen Frequenzbereich wie Analog-TV (ohne Band 1), allerdings beträgt die obere Frequenzgrenze 862 MHz.

Bei DVB-T kommt eine Mehrträgermodulation nach dem COFDM - Verfahren (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) zum Einsatz. Der Gesamtstrom wird auf eine große Zahl von einzelnen Teildatenströmen aufgeteilt. Jeder Teildatenstrom moduliert einen eigenen Träger. Es entsteht dadurch ein sehr breites Spektrum mit 7,6 MHz im UHF- und 6,6 MHz im VHF-Bereich.

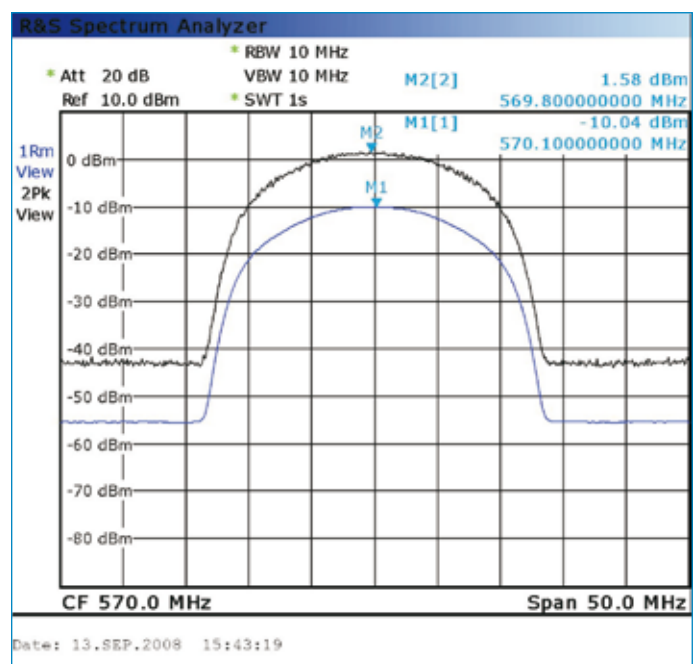


Abb. 6: DVB-T-Signal (Kanal 33, Leistung: -10 dBm) gemessen mit RMS-Detektor (blau) beziehungsweise Peak-Detektor (schwarz). Die Messung mit Peak-Detektor führt hier zu einer Überbewertung der Leistung von etwa 11,6 dB.

Stellt man ein DVB-T-Signal im Zeitbereich dar, so ergibt sich ein rauschähnlicher Signalverlauf. Typisch für rauschähnliche Signale ist der große Unterschied zwischen kurzfristig auftretenden Maxima U_{Peak} und dem Effektivwert U_{RMS} des Signals. Beschrieben wird dieser Unterschied durch den so genannten „Crest-Faktor“ $C [\text{dB}] = 20 \cdot \log(U_{\text{Peak}}/U_{\text{RMS}})$. Derzeit liegen realistische Werte für den Crestfaktor zwischen 10 und 12 dB.

Für die Expositionsmesstechnik ist es von entscheidender Bedeutung, dass die mittlere Leistung gemessen wird, da diese aufgrund des thermischen Wirkungsmodells die korrekte Beurteilungsgröße für die Einhaltung der abgeleiteten Grenzwerte darstellt.

Deswegen sind die Messungen unbedingt mit dem RMS-Detektor durchzuführen. Der Peak-Detektor führt zu einer Überbewertung der mittleren Immission um etwa die Größenordnung des Crestfaktors (Abb. 6). Je nach verwendetem Messgerät ist auf eine ausreichend große Sweeptime von typisch 10 bis 100 ms zu achten, da der RMS-Detektor bei zu kleinen Sweepzeiten zu große Messergebnisse liefert. Eine an die Signalbandbreite (6,6 beziehungsweise 7,6 MHz) angepasste RBW ist einzustellen. Stehen derart große Auflösungsbreiten am Messgerät nicht zur Verfügung, kann notfalls auch mit der höchsten verfügbaren Bandbreite gemessen und eine Ergebniskorrektur mittels eines geeigneten Aufschlagsfaktors durchgeführt werden. Allerdings ist in diesem Fall mit einer Tendenz zur Überbewertung der Immission zu rechnen. Eine gut geeignete Alternative zur spektralen Messung ist die integrale Erfassung der Signale mittels einer Kanalleistungsmessung, die von vielen modernen Analysatoren unterstützt wird. Jedoch ist hierbei darauf zu achten, dass dann die eingestellte Auflösungsbreite maximal etwa fünf Prozent der Signalbandbreite beträgt.

Sendeseitige Leistungsregelungen sind bei DVB-T nicht bekannt, insofern ist eine Extrapolation der gemessenen Werte auf einen maximalen Anlagenzustand entbehrlich.

Digitaler Hörrundfunk DAB

Der digitale Hörrundfunk DAB (Digital Audio Broadcasting) ist bereits seit einigen Jahren nahezu flächendeckend in Deutschland eingeführt. Der momentan dafür landesweit meist genutzte Kanal 12 (223 bis 230 MHz) wird hierbei in die vier Frequenzabschnitte 12A bis 12D mit je 1,5 MHz Bandbreite aufgeteilt, in denen jeweils ein Ensemble von Programmen übertragen werden kann (einige Bundesländer nutzen für DAB auch noch andere TV-Kanäle im Band 3). Zusätzlich ist für lokale Programmangebote eine Übertragung im L-Band (1452 bis 1492 MHz) vorgesehen.

Auch bei DAB wird ein digitaler Bitstrom übertragen, der ein Multiplexsignal aus codierten Audiodaten und anderen Zusatzinformationen darstellt. Wie bei DVB-T werden mehrere Programme in einen Datenstrom gemultiplext. Als Modulationsverfahren wird ebenfalls COFDM benutzt. Es ergibt sich wiederum ein Spektrum ähnlich dem von DVB-T, nur mit einer geringeren Bandbreite von etwa 1,5 MHz. Der Crestfaktor des rauschähnlichen Signals beträgt etwa 10 dB.

Für die Messung bedeutet dies, dass ein RMS-Detektor unabdingbar ist. Die RBW sollte etwa 1,5 MHz betragen. Bezüglich Sweepzeiten sowie alternativer Bandbreiten gilt das bei DVB-T Gesagte.


Mobilfunk

GSM 900 und GSM 1800

Mobilfunk-Basisstationen der GSM-Netze senden in den Frequenzbereichen 920 bis 960 MHz (GSM-R und GSM 900) beziehungsweise 1820 bis 1880 MHz (GSM 1800). Die Signale der einzelnen Betreiber sowie der unterschiedlichen Basisstationen sind anhand unterschiedlicher Trägerfrequenzen unterscheidbar. Ein Frequenzkanal kann mittels eines Zeitmultiplexverfahren („Time Division Multiple Access“, TDMA) durch Unterteilung in acht Zeitschlitze von bis zu acht Mobilfunkteilnehmern gleichzeitig genutzt werden. Für jeden Sektor einer Basisstation gibt es einen so genannten Signalisierungskanal („Broadcastkanal“, BCCH), der ständig mit konstanter Leistung ausgesendet wird, auch wenn keine Gespräche in dieser Funkzelle stattfinden. Ist die Anlage jedoch mit mehreren Frequenzkanälen pro Sektor ausgestattet (Regelfall), so werden in Abhängigkeit vom momentanen Gesprächsaufkommen die übrigen Zeitschlitze zu- oder abgeschaltet. Außerdem kann die Sendeleistung in jedem Zeitschlitz in Abhängigkeit der jeweiligen Verbindungsqualität dynamisch geregelt („Power Control“) oder in Sprechpausen auch ganz abgeschaltet werden (DTX).

Hieraus resultiert bei mehrkanaligen Anlagen in Abhängigkeit von Auslastung, Verbindungsqualität und Sprachbetrieb ein zeitlich schwankendes Sendesignal. Eine einfache Messung aller im Downlink-Frequenzbereich (Senderichtung Basisstation - Mobilteil) vorhandenen Immissionen beschreibt somit nur einen Momentanzustand, wohingegen laut 26. BImSchV eine Beurteilung der Immission bei maximaler Anlagenauslastung gefordert ist.

Die maximal mögliche Immission ermittelt man am einfachsten durch die Vermessung der Immission der Signalisierungskanäle BCCH und leistungsmäßiger Multiplikation dieses Wertes mit der Anzahl der vom Netzbetreiber für den



jeweiligen Sektor bei der Bundesnetzagentur beantragten Kanäle. Diese Maximalimmission kann im (sehr seltenen) Extremfall erreicht, aber nicht überschritten werden.

Die Messung erfolgt der spektralen Bandbreite eines GSM-Kanals von 200 kHz entsprechend am besten mit einer Auflösungsbandbreite von 200 kHz. Als Detektor sollte primär der RMS-Detektor verwendet werden, wobei abhängig vom Analysatortyp auch mit einem Peak-Detektor vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können; dies ist aber für den verwendeten Analysator vorab an einem realen GSM-Signal auszutesten.

Für die oben beschriebene Messung ist die konstruktive Mitarbeit der Netzbetreiber unverzichtbar, da für eine exakte Erfassung beziehungsweise Hochrechnung auf den Maximalzustand die technischen Daten der gemessenen Anlagen (insbesondere Frequenzen der BCCH-Kanäle sowie maximal beantragte Kanalzahl pro Sektor) benötigt werden. Die Hochrechnung auf Basis der BCCH-Immissionen gestattet auch eine exakte Berücksichtigung der Betriebsart „Frequency-Hopping“, bei der in den Gesprächskanälen (nicht beim BCCH!) die Sendefrequenz von Zeitschlitz zu Zeitschlitz gewechselt wird. Würde die Immissionserfassung auf Basis aller am Display des Spektrumanalysators im Maxhold Modus gefundenen Signale vorgenommen werden, würde dadurch die reale Immission unter Umständen deutlich überschätzt.

UMTS (FDD-Mode)

Der Downlink-Frequenzbereich beim UMTS-Mobilfunk liegt zwischen 2110 und 2170 MHz. Jeder Betreiber besitzt zwei UMTS-Kanäle mit einer Breite von je 5 MHz, wobei derzeit oft nur ein Kanal aktiv ist.

Im Unterschied zu GSM erfolgt bei UMTS die Identifizierung unterschiedlicher Stationen aufgrund unterschiedlicher „Verwürfelungscodes“ (Scramblingcodes). Die verschiedenen Kanäle (Daten- oder Verkehrskanäle) einer Station werden durch unterschiedliche „Spreizcodes“ getrennt. Einige der Signalisierungskanäle einer Station werden permanent mit definierter Sendeleistung abgegeben, während manche Signalisierungskanäle und insbesondere die Datenkanäle nur nach Bedarf (Verkehrsaufkommen) aktiviert und, zum Zweck der Sicherstellung einer optimalen Übertragungsqualität, in ihrer Leistung permanent verändert werden.

Im Frequenzbereich belegt ein UMTS-Kanal etwa eine Bandbreite von 4,3 MHz. Im Zeitbereich hat das Signal (vergleichbar mit DVB-T und DAB) rauschähnlichen Charakter, wobei hier der Crestfaktor auslastungsabhängig ist. Da die

abgegebene Leistung bei UMTS-Basisstationen hauptsächlich von der momentan zu übertragenden Datenmenge und der Verbindungsqualität zu den Teilnehmern abhängt, ist der spektral gemessene Leistungswert zeitabhängig, wobei aus dem Spektrum nicht ersichtlich ist, welches Verkehrsaufkommen zur Zeit der Messung gerade vorliegt.

Für eine exakte Extrapolation auf den maximalen Anlagenzustand ist daher die spektrale Messung nur sehr bedingt geeignet. Der spektral gemessene Augenblickswert (RBW=5 MHz, RMS-Detektor) muss im Sinne einer „worst-case Betrachtung“ als derjenige Wert interpretiert werden, der sich im Zustand ohne Verkehrslast (nur Signalisierung) ergibt. Eine Hochrechnung auf Basis des prozentualen Verhältnisses der Signalisierungskanäle an der maximalen Sendeleistung eines Kanals überschätzt die tatsächliche Immission aber gerade bei Verkehrslast um mehrere dB.

Für eine exakte Immissionserfassung unter realer Verkehrslast ist eine so genannte „codeselektive Messung“ notwendig. Hier wird aus dem Codespektrum der mit konstanter Leistung abgegebene Signalisierungskanal „P-CPICH“ extrahiert und dessen Immission gemessen. Die Hochrechnung auf die maximale Anlagenauslastung erfolgt dann mit einem Faktor, der sich aus der aktuell eingestellten Leistung des P-CPICH und der maximal möglichen Sendeleistung der Anlage ergibt. Auf dem Markt sind derzeit codeselektive Messgeräte verfügbar, die speziell auf die Bedürfnisse von Immissionsmessungen an UMTS-Stationen abgestimmt sind [BOR 05-2].

Fazit

Je nach konkreter Aufgabenstellung sind bei der Erfassung der Immissionen, verursacht durch Hochfrequenzsignale von Funksendeanlagen, sehr unterschiedliche Anforderungen an die Messverfahren, die Ergebnisauswertung und die eingesetzten Messgeräte zu stellen. Basis für die korrekte Immissionsermittlung sind immer die jeweils relevanten Normen und Messvorschriften. Expositionsmessungen im Hochfrequenzbereich erfordern eine intensive Ausbildung und große Erfahrung des dafür eingesetzten Personals. Normgerechte Messgeräte sind kostspielig und in ihrer Bedienung meist relativ komplex. Falsch gewählte Einstellparameter beziehungsweise eine nicht geeignete Vorgehensweise bei der Immissionserfassung können zu Messfehlern von mehreren Größenordnungen führen. Dabei sind sowohl Über- als auch Unterbewertungen der Expositionssituation möglich.

Dieser Beitrag sollte einen kurzen Einblick in typische Arten von Hochfrequenzexpositionsmessungen geben. Geeignete

Vorgehensweisen sowie korrekte Geräteeinstellungen wurden beispielhaft für die sehr häufig eingesetzte frequenzselektive Messtechnik bei wichtigen Funksendeanlagen vorgestellt und erläutert. Die gebotene Kürze erlaubt es natürlich nicht, auf alle Problematiken derartiger Messungen detailliert einzugehen, auch konnten einige ebenfalls bedeutsame Funkssysteme (zum Beispiel TETRA, WiMAX, Sendeanlagen in Haushalt und Büro, wie WLAN oder DECT) nicht behandelt werden, da dies den Umfang des Beitrags gesprengt hätte.

Literatur

- [26. BImSchV] 26. BImSchV, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl. Jg. 1996 Teil I Nr. 66, 20.12.1996.
- [BER 04] J. Bernkopf, Monitoring elektromagnetischer Felder an statistisch ausgewählten Orten in Bayern, NIR 2004 Nichtionisierende Strahlung Sicherheit und Gesundheit, 36. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Köln, 31.8.-2.9.2004, S. 411-418, (2004).
- [BGR 01] BGR B11 (ZH1/257), Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit: Elektromagnetische Felder, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik, Juni 2001.
- [BNetzA] http://emf.bundesnetzagentur.de/gisinternet/regtp/html/Infofenster_Messort.html
- [BOC 03] U. Bochtler, R. Eidher und M. Wuschek, Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg, Studie im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Aschaffenburg, Stuttgart, Regensburg, (2003).
- [BOR 02] Chr. Bornkessel, A. Schramm und M. Neikes, Messverfahren zur Ermittlung der Immission durch Mobilfunk Basisstationen, Studie für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, IMST Kamp-Lintfort, (2002).
- [BOR 05] Chr. Bornkessel und M. Schubert, Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk Basisstationen, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 05-2] Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek, Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Zwischenbericht Entwicklung geeigneter Mess- und Berechnungsverfahren, Kamp-Lintfort, (2006).
- [BOR 05-3] Chr. Bornkessel, M. Wuschek, M. Neikes, A. Schramm, M. Schubert, P. Schmidt, Elektromagnetische Felder in NRW: Feldmessungen in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2005).
- [BOR 08] Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuschek, Bestimmung der Immission durch WiMAX, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Zwischenbericht Entwicklung geeigneter Verfahren, Kamp-Lintfort, (2008).
- [BUWAL 02] Mobilfunk-Basisstationen (GSM) - Messempfehlung, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2002).
- [BUWAL 03] Mobilfunk-Basisstationen (UMTS-FDD) - Messempfehlung, Entwurf vom 17.09.2003, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS), Bern, (2003).
- [BUWAL 05] Rundfunk- und Funkrufsendeanlagen - Vollzugsempfehlung zur NISV, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, (2005).
- [DAN 08] H. Danker-Hopfe, H. Dorn, Untersuchung der Schlafqualität bei Anwohnern einer Basisstation - Experimentelle Studie zur Objektivierung möglicher psychologischer und physiologischer Effekte unter häuslichen Bedingungen, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Klinik und Poliklinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Charité - Universitätsmedizin, Berlin, (2008).
- [EU 99] 1999/519/EG, Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999. <http://www.stmugv.bayern.de/umwelt/elektromog/mobilfunkpakt/>
- [FEE 07] Forum Mobilkommunikation, Mobilfunk in Österreich: Messwerte und Informationen, Wien, (2008).
- [FMK] ICNIRP Guidelines, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics, vol. 74 no. 4, S. 494-522, (1998).
- [ICNIRP 98] <http://www.izmf.de/html/de/40723.html#subhd5>
- [IZMF] Länderausschuss für Immissionsschutz, Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung), Fassung vom 26.03.2004, www.lai-immissionsschutz.de, (2004).
- [LAI 04] H. Ryser, Vergleichsmessungen an Mobilfunk-Basisstationen (GSM), METAS Report Nr. 2002-256-472, Bern, (2002).
- [METAS 02] H. Ryser, B. Mühlemann, UMTS-Vergleichsmessung (Sommer 2006), METAS Report Nr. 2006-218-598, Bern, (2006).
- [METAS 06] F. Pythoud, B. Mühlemann, J. Baumann, A. Siegenthaler, Measurement of Non Ionizing Radiation from a Broadcasting Station: An Inter-Laboratory Comparison (Autumn 2007), METAS Report Nr. 2008-218-658, Bern, (2008).
- [METAS 08] K.-P. Müller, T. Kurz, EMF-Monitoring in Bayern 2006/07 - Messungen von elektromagnetischen Feldern (EMF) in Wohngebieten, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, (2008).
- [MUE 08] H.-P. Neitzke, J. Osterhoff, K. Peklo, H. Voigt, T. Wohlatz, Bestimmung der Exposition von Personengruppen, die im Rahmen des Projektes „Querschnittsstudie zur Erfassung und Bewertung möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch die Felder von Mobilfunkbasisstationen“ untersucht werden, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH, Hannover, (2005).
- [NEI 05] Schweizerischer Bundesrat, Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), 23.12.1999, Veröffentlichung durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- [NISV 99] Chr. Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [RAU 00] M. Schubert, Chr. Bornkessel, und M. Wuschek, Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).
- [SCH 06] M. Wuschek, C. Bornkessel, D. Manteuffel, M. Schubert und P. Schmidt, Möglichkeiten und Grenzen der Minimierung von Mobilfunkimmissionen: Auf Messdaten und Simulationen basierende Optionen und Beispiele, Abschlussbericht für das Bayerische Landesamt für Umweltschutz, Regensburg, (2004).
- [WUS 04] H. Voigt und H.-P. Neitzke, Methoden und Ergebnisse der Messung von Hochfrequenz-Immissionen in Wohnungen, EMF-Monitor vol. 10 (2004) No. 3, (2004).
- [VOI 04]

Dr.-Ing. Matthias Wuschek ist Professor für Nachrichtenübertragungstechnik und Mobilfunktechnologie an der Hochschule Deggendorf. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich intensiv mit der Entwicklung und Erprobung von Messverfahren zur Ermittlung der Exposition bei elektromagnetischen Feldern, insbesondere im Hochfrequenzbereich. In den letzten Jahren hat er eine große Zahl unterschiedlicher EMF-Messkampagnen und Projekte auf dem Gebiet der Erfassung von Hochfrequenzfeldern durchgeführt, unter anderem auch im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms.