
Bestimmung der Exposition
der allgemeinen Bevölkerung
durch neue Mobilfunktechniken

Zwischenbericht

„Aufarbeitung des relevanten Standes
von Wissenschaft und Technik“

erstellt für das
Bundesamt für Strahlenschutz

23. Januar 2012

Projektleitung beim Auftragnehmer

Dr. Christian Bornkessel
IMST GmbH
Abteilung Prüfzentrum
Carl-Friedrich-Gauß-Straße 2-4
47475 Kamp-Lintfort
Tel: 02842/981-383
Fax: 02842/981-299
E-Mail: bornkessel(at)imst.de

Prof. Dr. Matthias Wuschek
EM-Institut GmbH
Carlstraße 5
93049 Regensburg
Tel.: 0941/298365-0
Fax: 0941/298365-2
E-Mail: matthias.wuschek(at)em-institut.de

Autoren

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH
Markus Schubert, IMST GmbH
Prof. Dr. Matthias Wuschek, EM-Institut GmbH

Projektleitung beim Auftraggeber

Dirk Geschwentner
Bundesamt für Strahlenschutz
Arbeitsgruppe SG 1.2
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim
Tel: 030 18333-2148
Fax: 030 18333-2205
E-Mail: DGeschwentner(at)bfs.de

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	5
1.2	Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes	5
2	Vorstellung der neuen Mobilfunksysteme	6
2.1	Long Term Evolution (LTE)	6
2.1.1	<i>Einführung</i>	6
2.1.2	<i>Bandbreiten und Frequenzbereiche</i>	7
2.1.3	<i>Kodierung und Modulation</i>	9
2.1.4	<i>Sendeleistungen</i>	10
2.2	Digitaler Behördenfunk (TETRA-BOS).....	10
2.2.1	<i>Einführung des digitalen Behördenfunks in Deutschland</i>	10
2.2.2	<i>Bandbreite und Frequenzbereich</i>	14
2.2.3	<i>Modulationsverfahren</i>	14
2.2.4	<i>TETRA- und GSM-Netze im Vergleich</i>	15
2.3	UMTS-HSPA	18
2.3.1	<i>Neue Modulations- und Übertragungsverfahren bei HSDPA</i>	20
2.3.2	<i>Einfluss der Netzstruktur auf die Exposition</i>	20
3	Praxistaugliche Messverfahren	23
3.1	Grundsätzlich mögliche Messverfahren und Erfassungsmethoden..	23
3.1.1	<i>Breitbandige Verfahren</i>	23
3.1.2	<i>Frequenzselektive Verfahren</i>	23
3.1.3	<i>Codeselektive Verfahren</i>	28
3.1.4	<i>Messtechnische Erfassungsmethoden</i>	28
3.1.5	<i>Stand der Normung</i>	32
3.2	LTE.....	33
3.2.1	<i>Signalverläufe von LTE-Basisstationssignalen</i>	33
3.2.2	<i>Spektrale Methoden</i>	41
3.2.2.1	Korrekte Messung	41
3.2.2.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung	49
3.2.2.3	Messempfindlichkeit und Nachweisgrenzen	51
3.2.2.4	Messunsicherheit	52
3.2.2.5	Besonderheiten der Feldanalysatorfamilie SRM-3000/-3006 von Narda	54
3.2.3	<i>Codeselektive Methoden</i>	62
3.2.4	<i>Arbeiten anderer Institutionen</i>	67
3.2.5	<i>Generelle Einsetzbarkeit von Personendosimetern</i>	68
3.2.6	<i>Grundsätzliche Untersuchungen zu MIMO</i>	79
3.2.6.1	Downlink-MIMO in LTE	79
3.2.6.2	Derzeitige Adaptierung und Konsequenzen für die Messtechnik.....	82
3.3	TETRA BOS	84

3.3.1	<i>Signalverläufe von TETRA-Basisstationssignalen</i>	84
3.3.2	<i>Spektrale Messung von TETRA-Signalen</i>	86
3.3.2.1	Korrekte Messung	86
3.3.2.2	Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung.....	91
3.3.2.3	Nachweisgrenzen, Messunsicherheit	92
3.3.3	<i>Generelle Einsetzbarkeit von Personendosimetern</i>	92
4	Literaturstudie zu ähnlichen Messprojekten	96
4.1	Long Term Evolution (LTE)	96
4.1.1	<i>Eigene Arbeiten</i>	96
4.1.2	<i>Arbeiten anderer Institutionen</i>	98
4.1.3	<i>Literaturrecherche über die Exposition durch LTE-Endgeräte</i>	100
4.2	Digitaler Behördenfunk (TETRA-BOS)	103
	Literaturverzeichnis	106
	Abkürzungsverzeichnis	111
	Verzeichnis häufig verwendeter Symbole	114

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Der vorliegende Zwischenbericht ist Bestandteil des Forschungsvorhabens „Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken“ des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Anlass des Forschungsvorhabens ist der fortschreitende Ausbau der Infrastruktur für die funkgestützte Telekommunikation in Deutschland (z.B. 3.x/4G, digitaler BOS-Funk). Im Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) wurden unter anderem für die Mobilfunktechniken GSM und UMTS Expositionserfassungsverfahren entwickelt sowie ausführliche Expositionsuntersuchungen durchgeführt. Die hierdurch geschaffene Datenbasis zur Exposition der allgemeinen Bevölkerung gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern soll jetzt um Informationen über die Beiträge neuer Funkdienste ergänzt und insgesamt weiter verbessert werden. Einen Schwerpunkt bilden hierbei der Mobilfunkstandard „Long Term Evolution“ (LTE) sowie das Netz für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (TETRA-BOS), zu deren elektromagnetischen Immissionen bislang nur wenig publizierte Daten vorliegen.

In diesem Vorhaben stehen die (ortsfesten) Sender der Infrastruktur im Vordergrund; Expositionen der Endgeräte werden exemplarisch untersucht. Aus den Ergebnissen des Vorhabens soll abgeleitet werden, wie sich die maximale und tatsächliche Exposition der allgemeinen Bevölkerung in Deutschland durch den Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur ändert.

1.2 Einordnung des vorliegenden Zwischenberichtes

In diesem Zwischenbericht wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens aufgearbeitet. Der Bericht zeigt einen Überblick über die relevanten bisherigen Arbeiten des Auftragnehmers und anderer Stellen. Insbesondere werden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

Die für eine sachgerechte Immissionsbestimmung wesentlichen *funktechnischen Eigenschaften* neuer in Deutschland eingesetzter Mobilfunktechniken (LTE und TETRA-BOS) werden in Kapitel 2 zusammengestellt. Zusätzlich wird hier untersucht, ob der Ausbau der UMTS-Netze und die Einführung des neuen Übertragungsverfahrens HSPA mit einer Immissionsänderung verbunden sind und Anpassungen des Messverfahrens erfordern.

In Kapitel 3 wird eine Übersicht über praxistaugliche Messverfahren und Erhebungsmethoden hinsichtlich der Abschätzung der zeitlich variablen und vom Aufenthaltsort einer Person abhängigen, maximal möglichen und tatsächlich auftretenden Expositionen gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern erarbeitet. Die Brauchbarkeit dieser Verfahren und Methoden für die Expositionsabschätzung bei Funksendeanlagen der neuen Mobilfunktechniken wird diskutiert. Die Diskussion umfasst Empfindlichkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit sowie den erforderlichen Aufwand zum Erreichen aussagefähiger Ergebnisse.

In Kapitel 4 werden verfügbare Ergebnisse aus abgeschlossenen und laufenden Untersuchungen (einschließlich im In- und Ausland durchgeführter Messkampagnen) in Form einer bewerteten Literaturstudie zusammengefasst und kritisch diskutiert.

2 Vorstellung der neuen Mobilfunksysteme

2.1 Long Term Evolution (LTE)

In diesem Abschnitt erfolgt eine Auflistung wichtiger Parameter von LTE-Signalen, insbesondere der Parameter, die für die korrekte Immissionserfassung bzw. -bewertung von Bedeutung sind. Eine übersichtliche Kurzdarstellung zur LTE-Technik findet sich z.B. in [BNETZA 10].

2.1.1 Einführung

LTE (Long Term Evolution) ist eine neue Mobilfunktechnik und Nachfolger von UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). LTE wird dabei noch der 3. Mobilfunkgeneration zugeordnet und hat die chronologische Bezeichnung 3.9G. Der Nachfolger von LTE, LTE Advanced, wird dann als 4. Generation (4G) bezeichnet.

Ähnlich wie bei den anderen Mobilfunkgenerationen sind zum Betrieb ein Netz aus Basisstationen, die eine bestimmte Fläche versorgen, sowie entsprechend kompatible Endgeräte notwendig. Anders als z.B. bei Funkruf- oder Rundfunksendeanlagen ist LTE eine Vollduplex-Technik, d.h. Basisstationen und Endgeräte können gleichzeitig senden und empfangen.

Gegenüber UMTS (3G) und den Datenbeschleunigern HSPA/HSPA+ (3.5G, High Speed Packet Access, siehe auch Abschnitt 2.3) werden für LTE wesentlich höhere Datenraten spezifiziert. Bei LTE sollen maximale Downlinkraten von 100 Mbit/s und maximale Uplinkraten von 50 Mbit/s (jeweils bei einer Bandbreite von 20 MHz) erreicht werden. Unter Einsatz höherwertiger Modulationstechniken (64-QAM) und Mehrantennentechniken (4x4 MIMO) sind im Downlink theoretisch sogar Datenraten bis zu 326 Mbit/s und im Uplink bis zu 86 Mbit/s möglich. Somit ist die spektrale Effizienz wesentlich höher als bei UMTS. Damit wird die Hauptanwendung der neuen Technik der mobile Breitbandzugang zu Telekommunikationsdiensten sein. Sprache wird als VoIP (Voice over IP) zwar möglich sein, tritt gegenüber den Datendiensten aber in den Hintergrund.

LTE ist optimiert für geringe Nutzergeschwindigkeiten bis zu 15 km/h. Bis 120 km/h ist ebenfalls eine hohe Performance gesichert, allerdings dürfen hier minimale Leistungseinbußen auftreten [ROB 12].

LTE arbeitet mit W-CDMA Systemen und GSM-Systemen zusammen. Multimode-Endgeräte unterstützen den Handover zu und von diesen anderen Systemen.

Ein herausragender Unterschied von LTE zu seinen Vorgängertechniken ist die „flachere“ Netzwerkarchitektur. Im Gegensatz zu UMTS entfallen beispielsweise die Radio Network Controller (RNC); ein Großteil ihrer Funktionalität (z.B. User Management, Ressourcenaufteilung, Interferenzmanagement) wird in die Basisstation (eNodeB) übertragen [SAU 11]. Die eNodeB sind sowohl direkt mit dem Kernnetz, als auch untereinander verbunden. Damit werden gegenüber den Vorgängertechniken die Latenzzeiten reduziert (typ. 10 ms); die Daten können direkter zu ihrem Ziel geroutet werden. Diese Veränderung wird als SAE (System Architecture Evolution) bezeichnet.

LTE verfügt ausschließlich über eine paketorientierte Datenübertragung (IP-basiert) und wird deswegen auch als „All-IP Netz“ bezeichnet.

2.1.2 Bandbreiten und Frequenzbereiche

Bei LTE können statt des bislang im Mobilfunkbereich üblichen starren Kanalarasters (200 kHz bei GSM, 5 MHz bei UMTS) flexible Kanalbandbreiten von 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz genutzt werden. Je größer die Bandbreite ist, desto größer ist auch die verfügbare Datenrate.

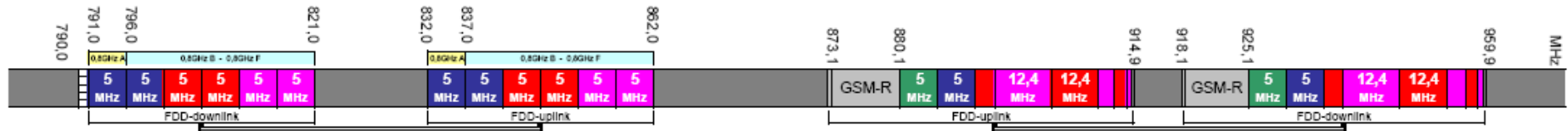
LTE wurde so entworfen, dass es in verschiedenen Frequenzbereichen von etwa 700 MHz bis 2700 MHz betrieben werden kann. Vom 12. April bis zum 20. Mai 2010 hat bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) in Mainz die Versteigerung der Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz für den „drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten“ stattgefunden. Die Ausschreibung war technologie-neutral formuliert; derzeit wird LTE in einigen dieser Frequenzbereiche aufgebaut. Besondere Bedeutung hat hierbei der Frequenzbereich der „Digitalen Dividende“. Damit wird der früher primär dem analogen terrestrischen Fernsehen sowie dem Militär zugeteilte Frequenzbereich von 790 - 862 MHz bezeichnet. Da die spektrale Effizienz des digitalen Fernsehens größer als die des analogen Fernsehens ist, entstand durch die mittlerweile vollzogene Umstellung von Analog-TV auf DVB-T ein freier Frequenzbereich (die „Digitale Dividende“), der für andere Anwendungen zur Verfügung gestellt werden kann. Für Funkanwendungen „in der Fläche“ eignet sich dieser Frequenzbereich besser als z.B. der für UMTS genutzte Bereich um 2.100 MHz, da bei tieferen Frequenzen sowohl die Wellenausbreitungsbedingungen als auch die Gebäudedurchdringung günstiger sind. Demzufolge können mit einer Basisstation im Band der Digitalen Dividende wesentlich größere Flächenbereiche abgedeckt werden als mit einer Station, die im 2 GHz-Band sendet. Sofern für eine Versorgungsplanung also eher die Flächenabdeckung als die Kapazität entscheidend ist, ist die Nutzung einer tieferen Frequenz günstiger. Deswegen soll der Frequenzbereich der Digitalen Dividende auch primär für ländliche Bereiche genutzt werden. Die vorrangige Versorgung der ländlichen Gebiete im Vergleich zu den städtischen Gebieten ist auch in den Vergaberichtlinien der BNetzA festgelegt [VFG 59].

Die Zuordnung der Frequenzblöcke an das jeweilige Unternehmen als Ergebnis der Auktion kann Bild 2.1 entnommen werden [BNETZA 10-1].

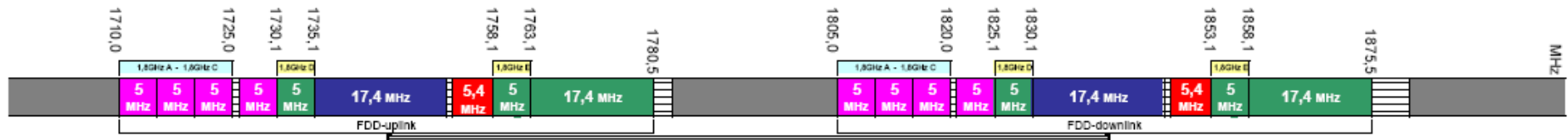
Die Trennung von Up- und Downlink kann sowohl durch Zeitduplex (Time Division Duplex, TDD) oder Frequenzduplex (Frequency Division Duplex, FDD) realisiert werden. TDD bedeutet, dass die beiden Übertragungsrichtungen dieselbe Trägerfrequenz nutzen, wobei Up- und Downlink durch ein festgelegtes Zeitschema getrennt werden. Bei FDD können Basisstation und Endgerät gleichzeitig senden und empfangen, da Up- und Downlink auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen abgewickelt werden. Für den Frequenzbereich der Digitalen Dividende ist in den Vergaberichtlinien der Bundesnetzagentur ausschließlich FDD vorgeschrieben.

Ein Vorteil von TDD besteht darin, dass eine unsymmetrische Datenübertragung ermöglicht wird. TDD LTE unterstützt sieben verschiedene Konfigurationen, die bestimmen, wie viel Zeit für den Uplink und den Downlink verwendet wird. Vier der sieben Konfigurationen sehen eine Bevorzugung des Downlinks vor, bei einer Konfiguration ist das Verhältnis ausgeglichen.

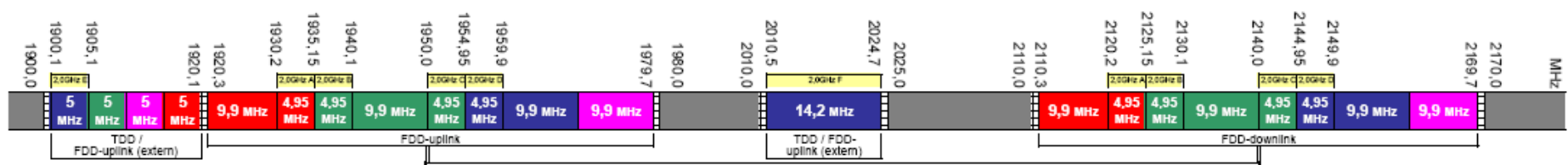
• Frequenzbereiche bei 800 MHz und 900 MHz



• Frequenzbereich bei 1,8 GHz



• Frequenzbereich bei 2 GHz



• Frequenzbereich bei 2,6 GHz

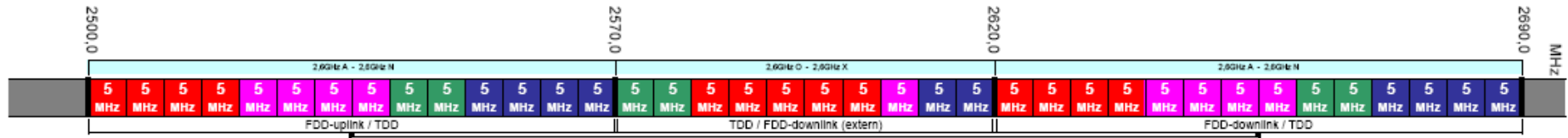


Bild 2.1: Übersicht über das Frequenzspektrum in den Bereichen 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz mit Zuteilung der Frequenzen für den drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten (gelbe und hellblaue Felder) [BNETZA 10-1]

2.1.3 Kodierung und Modulation

Als Kodierungsverfahren im Downlink (d.h. seitens der Basisstation) wird bei LTE OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) verwendet. OFDMA ist ein Mehrträgerverfahren, das die Funkressourcen mehreren Endnutzern zuordnet. OFDMA basiert auf OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Die gesamte Trägerbandbreite wird in viele Unterträger mit einem Trägerabstand von 15 kHz aufgespalten. Jeder Unterträger wird dann mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert. Die einzelnen Trägersignale stehen orthogonal zueinander und können sich deswegen kaum gegenseitig beeinflussen. Damit ist OFDM resistent gegenüber schmalbandigen Störungen, da eine Störung auf einem Unterträger nicht das gesamte Frequenzband beeinflusst. Im Gegensatz zu OFDM, bei dem die gesamte Bandbreite einem Nutzer für eine bestimmte Zeit zugewiesen ist, teilen sich bei OFDMA zu jedem Zeitpunkt mehrere Nutzer die verfügbare Bandbreite. Dies geschieht durch die Bildung von Subkanälen aus mehreren einzelnen Trägern, die zeitlich und zahlenmäßig dynamisch den einzelnen Nutzern entsprechend ihren Anforderungen zugeordnet werden können. Nicht zugewiesene Unterträger sind dabei ausgeschaltet; somit werden Leistungsaufnahme und Interferenz reduziert.

Im Uplink (auf Seiten des Nutzers) wird als Kodierungsverfahren SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) benutzt. SC-FDMA hat einen geringeren Crest Faktor (Verhältnis von kurzzeitig auftretender Maximalleistung zur mittleren Leistung des Sendesignals) als OFDMA. Dadurch wird der Batterieverbrauch reduziert und die Auslegung des Sendeverstärkers im Endgerät vereinfacht. Bei SC-FDMA werden die Datensymbole sequenziell übertragen, wobei jedes Symbol auf mehrere Unterträger verteilt wird, wohingegen bei OFDMA mehrere Symbole parallel mit einem Symbol pro Unterträger übertragen werden.

Als Modulationsverfahren werden bei LTE QPSK (Quadrature Phase Shift Keying, Quadraturphasenumtastung), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation, Quadraturamplitudenmodulation) und 64-QAM eingesetzt. Die höherwertigen Modulationen sind empfindlicher bezüglich Kanalstörungen. Dies bedeutet, dass für Nutzer, die sich relativ nahe an der Basisstation befinden, ein vergleichsweise unrobustes Signalprofil verwendet werden kann, das dafür eine höhere Nutzdatenrate ermöglicht (z.B. 64-QAM mit wenig Fehlerschutz). Bei Nutzern, die weit von der Basisstation entfernt sind, wird hingegen ein robustes Profil mit entsprechend niedrigerer Nutzdatenrate verwendet (z.B. QPSK mit viel Fehlerschutz).

Zur weiteren Steigerung der Datenrate und der spektralen Effizienz können bei LTE MIMO-Techniken (Multiple Input Multiple Output) eingesetzt werden. MIMO nutzt die Mehrwegesignalausbreitung zwischen Sender und Empfänger, die in allen terrestrischen Kommunikationssystemen vorhanden ist. Durch die Verwendung mehrerer Antennen auf Seiten der Basisstation und teilweise auch auf Endgeräteseite kann entweder ein einzelner Datenstrom simultan über mehrere Antennen abgestrahlt werden (Transmit Diversity), was zu einer Erhöhung der Systemreichweite führt, oder der zu übertragende Datenstrom wird in mehrere Einzeldatenströme aufgeteilt und über mehrere Antennen parallel gesendet bzw. empfangen (Spatial Multiplexing), was den Durchsatzgewinn erhöht. Bei LTE wird für den Downlink eine Konfiguration aus zwei Sende- und zwei Empfangsantennen als Basis verwendet (2x2 MIMO), wobei Konfigurationen mit vier Antennen laut Standard ebenfalls möglich sind. Für den Uplink wird MU-MIMO (Multi-User MIMO) eingesetzt; hierbei wird seitens des Endgerätes nur eine Sendeantenne benötigt, was zu einer Kostenersparnis auf Endgeräteseite führt.

2.1.4 Sendeleistungen

Nach Aussagen der Netzbetreiber sind die Sendeleistungen pro physikalischem Kanal bei LTE-Basisstationen vergleichbar zu denen von GSM- und UMTS-Anlagen und betragen bei Outdoor-Anlagen etwa 20 bis 50 W. Auch die Antennengewinne liegen im Bereich der etablierten Mobilfunktechniken (etwa 15 bis 19 dBi). Damit ergeben sich äquivalente isotrope Strahlungsleistungen von mehr als 10 W EIRP, so dass die Basisstationen den Bestimmungen der 26. BImSchV [26. BImSchV] unterliegen. Für den Betrieb der LTE-Standorte ist eine Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur notwendig.

Für Endgeräte definiert der relevante LTE-Standard 3GPP TS36.101 Release 8 [ETSI 136.101] eine maximale Ausgangsleistung von 23 dBm (200 mW) ± 2 dB am Antennenkonnektor. In den Vergaberichtlinien der Bundesnetzagentur [VFG 59] für den Frequenzbereich der Digitalen Dividende (790 - 862 MHz) wird die maximale äquivalente isotrope Abstrahlungsleistung der Endgeräte mit 25 dBm EIRP (entsprechend 316 mW) „unterstellt“, wobei ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass in Abhängigkeit der Antennenkonfiguration auch höhere Werte möglich sind.

Die in TS36.101 definierte Antennenleistung ist größer als die nach DIN EN 62479 [EN 62479] beschriebene „Niedrigleistungsausschlussgrenze“ von 20 mW (ICNIRP, Allgemeinbevölkerung, Kopf und Rumpf) für elektronische und elektrische Geräte kleiner Leistung. Deswegen ist zum Nachweis der Übereinstimmung der LTE-Endgeräte mit den Basisgrenzwerten für die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern auf jeden Fall eine SAR-Bewertung durchzuführen.

2.2 Digitaler Behördenfunk (TETRA-BOS)

2.2.1 Einführung des digitalen Behördenfunks in Deutschland

Seit vielen Jahrzehnten nutzen die deutschen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) für ihre nichtöffentliche Kommunikation analoge Funkssysteme. Zu den wichtigsten BOS-Behörden zählen die Polizei von Bund und Ländern, der Verfassungsschutz, Feuerwehren, Rettungsdienste sowie der Katastrophen- und Zivilschutz. Gelegentlich spricht man hierbei auch von den „Blaulicht-Behörden“.

Zur Verfügung standen bisher analoge Funkssysteme in verschiedenen Frequenzbändern, wie aus Tabelle 2.1 ersichtlich.

Band	Frequenzbereich [MHz]; jeweils Unter- und Oberband	Verfügbare Kanäle (Simplex / Duplex)	Anwendungsbereiche
8 m	34,36 - 35,80; 38,46 - 39,90	24 / 49	Festverbindungen; wenig genutzt
4 m	74,215 - 77,475; 84,015 - 87,275	22 / 142	Sprechfunk (Fest / Mobil)
2 m	167,56 - 169,38; 172,16 - 173,98	0 / 92	Sprechfunk (Fest / Mobil), Alarmierung, Relaiszubringer
70 cm	443,6 - 444,9625; 448,6 - 449,9625	0 / 110	Festverbindungen zu Relaisfunkstellen

Tabelle 2.1: Frequenz- und Anwendungsbereiche des analogen BOS-Funks

Allerdings wurde in den letzten Jahren mehr und mehr deutlich, dass diese - teilweise mehr als 30 Jahre alten - analogen Systeme immer weniger in der Lage sind, die an moderne Kommunikationseinrichtungen im Sicherheitsumfeld gestellten Anforderungen ausreichend zu erfüllen. Insbesondere folgende Problematiken wurden vermehrt kritisiert:

- Die analogen Systeme ermöglichen keine wirkungsvolle Verschlüsselung, d.h. die Verbindungen sind vergleichsweise einfach abzuhören.
- Die Nutzung der zur Verfügung stehenden Funkkanäle ist wenig effektiv.
- Die Kapazität der bisherigen Technik reicht insbesondere bei Großeinsätzen häufig nicht mehr aus.
- Die Zahl der Teilnehmer kann nicht eingeschränkt werden. Alle Gespräche können / müssen von allen Teilnehmern mitgehört werden (der gesamte Funkverkehr läuft über einen einzigen offenen Funkkanal).
- Es ist kein echter Telefonmodus möglich (d.h. Kommunikation nur zwischen zwei Teilnehmern).
- Eine Datenübertragung (z.B. Bilder) ist nur sehr eingeschränkt realisierbar. Der Zugriff auf Datenbanken ist nicht möglich.
- Die Systeme besitzen die für Analogfunk typische schlechte Sprachqualität („verrauscht“). Teilweise herrscht mangelhafte Funkversorgung, d.h. die Versorgung ist nicht überall gewährleistet („Funklöcher“).
- Es ergeben sich Kompatibilitätsprobleme zwischen den einzelnen in Deutschland aktuell vorhandenen analogen BOS-Netzen (Feuerwehr, Polizei, Rettungsdienste etc.). Es ist auch keine staatenübergreifende Kompatibilität vorhanden (d.h. es herrscht eine ähnliche Situation, wie zu Zeiten der analogen öffentlichen Mobilfunknetze).
- Die Verfügbarkeit der analogen Technik wird durch die Hersteller immer weniger sichergestellt (In Europa haben bereits viele Länder auf digitale Technik umgestellt). Dadurch ergeben sich immer höhere Wartungs- und Reparaturkosten für die alten Systeme.

Aus diesen Gründen laufen bereits seit etwa zwanzig Jahren Bestrebungen, die alten analogen BOS-Netze durch ein bundesweit einheitliches digitales Funknetz zu ersetzen. Im Jahr 1990 verpflichtete sich die Bundesrepublik im Rahmen des Schengener Durchführungsübereinkommens im Zuge des Wegfalls der innereuropäischen Grenzkontrollen, ein modernes, länderübergreifendes BOS-Kommunikationssystem auf Basis eines europäischen Standards aufzubauen. Insbesondere folgende Leistungsmerkmale sollen durch das neue Funksystem erfüllt werden:

- Verbesserte Sprachqualität durch digitale Übertragung mit angemessener Fehlerkorrektur.
- Abhörsicherheit durch wirkungsvolle Verschlüsselungsmechanismen.

- Ausschluss von nicht autorisierten Funkgeräten.
- Es muss möglich sein, eine individuelle Funkverbindung zu einem einzelnen Teilnehmer aufzubauen (Telefonruf).
- Alternativ müssen auch bestimmte Gruppen oder alle Teilnehmer ansprechbar sein (Gruppenruf / Rundruf).
- Eine spezielle Notruffunktion muss vorhanden sein.
- Ein Priorisieren von Verbindungen ist möglich.
- Über das Netz sollen auch Alarmierungen erfolgen können.
- Teilnehmer, die nicht allzu weit voneinander entfernt sind, sollen in der Lage sein (wie bei einfachen Sprechfunkgeräten), ohne eine dazwischengeschaltete Basisstation direkt miteinander kommunizieren zu können (Direktbetrieb). Damit wird eine begrenzte Einsetzbarkeit auch in Regionen ohne ausreichende Funknetzabdeckung (z.B. in Wäldern) ermöglicht.
- Eine angemessene Datenkommunikation ist möglich (Zugriff auf Datenbanken, Übertragung von z.B. Bildern oder Patientendaten, Kurzmitteilungen).
- Der Übergang in öffentliche Telefonnetze ist möglich.
- Der Verbindungsaufbau geschieht sehr schnell (< 1 Sekunde, d.h. deutlich schneller, als im öffentlichen Mobilfunk üblich).
- Effizientere Nutzung des verfügbaren Frequenzspektrums durch Mehrfachnutzung eines Funkkanals.

Diese Aufzählung zeigt, dass die Anforderungen an moderne BOS-Netze von den aktuell betriebenen öffentlichen Mobilfunknetzen nicht oder nur teilweise erfüllt werden können.

Nach verschiedenen Erprobungsprojekten wurde entschieden, dass in Deutschland ein digitales BOS-Funksystem nach dem „TETRA-25“-Standard aufgebaut wird (Die Zahl 25, die häufig an die Bezeichnung „TETRA“ angehängt wird, gibt an, dass der Kanalabstand 25 kHz beträgt). Die neu gegründete „Bundesanstalt für den Digitalfunk für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben“ (BDBOS) erhielt im Jahr 2007 den Auftrag, das Funknetz zu errichten und zu betreiben. Die Systemtechnik für das bundesweite Netz wird von der Firma EADS Secure Networks geliefert [HAR 10].

Die Einführung des BOS-Digitalfunks in den Bundesländern wurde zunächst zeitgleich geplant, jedoch aus haushaltstechnischen Gründen nicht in dieser Weise umgesetzt. Dadurch ist der aktuelle Status des Netzausbaus von Bundesland zu Bundesland derzeit noch sehr unterschiedlich (siehe Bild 2.2).

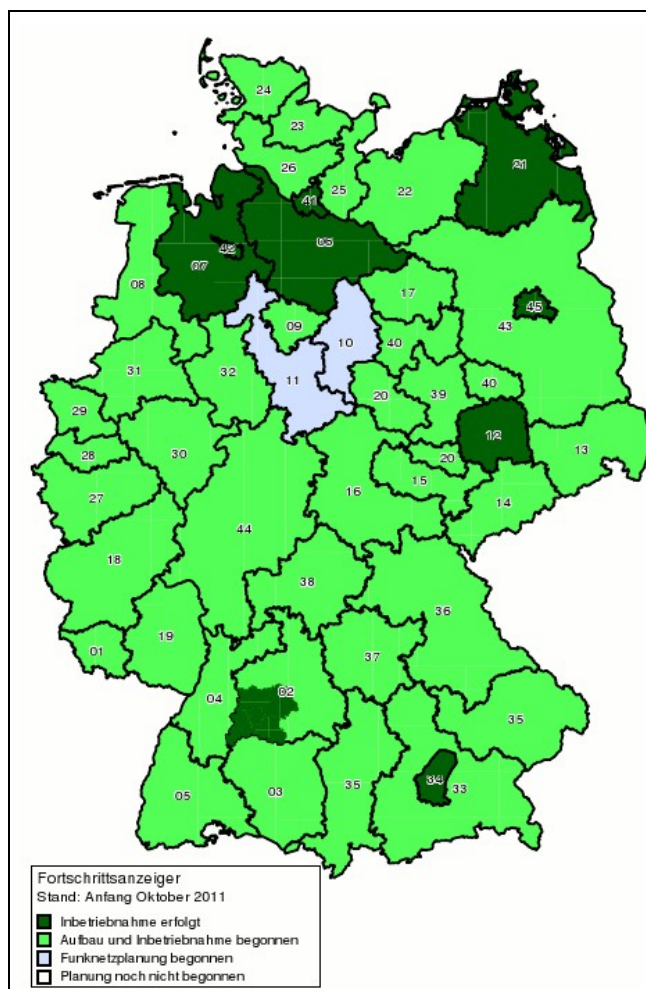


Bild 2.2: Aktueller Status des BOS-Netzausbaus in Deutschland (nach [BDBOS])

In Berlin befindet man sich beispielsweise derzeit schon im sogenannten „erweiterten Probebetrieb“ [BERLIN]. In dieser Phase werden in den beteiligten Organisationen die Leitstellen in den Digitalfunk integriert, Endgeräte ausgeschrieben, beschafft, programmiert und verteilt sowie zeitgleich Schulungen durchgeführt. Zusätzlich wird allerdings weiterhin an der Verbesserung der Netzqualität gearbeitet. Der Freistaat Bayern plant hingegen, den Netzaufbau erst bis Ende 2012 abzuschließen. Danach ist die schrittweise Inbetriebnahme der sechs in Bayern befindlichen Netzabschnitte vorgesehen [STMI 10].

Leider ist es nicht gelungen, europaweit nur einen Standard für die digitalen BOS-Netze durchzusetzen. Anstatt des TETRA-Standards, der beispielsweise von Belgien, den Niederlanden, Dänemark, Österreich, Großbritannien, Irland sowie Deutschland bevorzugt wurde, favorisierten Frankreich, Tschechien, die Slowakei sowie die Schweiz und Teile der spanischen Guardia Civil den abweichenden Standard „TETRAPOL“ der französischen Firma Matra Nortel Communications. Die beiden genannten Standards sind jedoch grundsätzlich nicht kompatibel. Bild 2.3 zeigt den aktuellen Ausbaustatus des digitalen Behördenfunks in Europa.

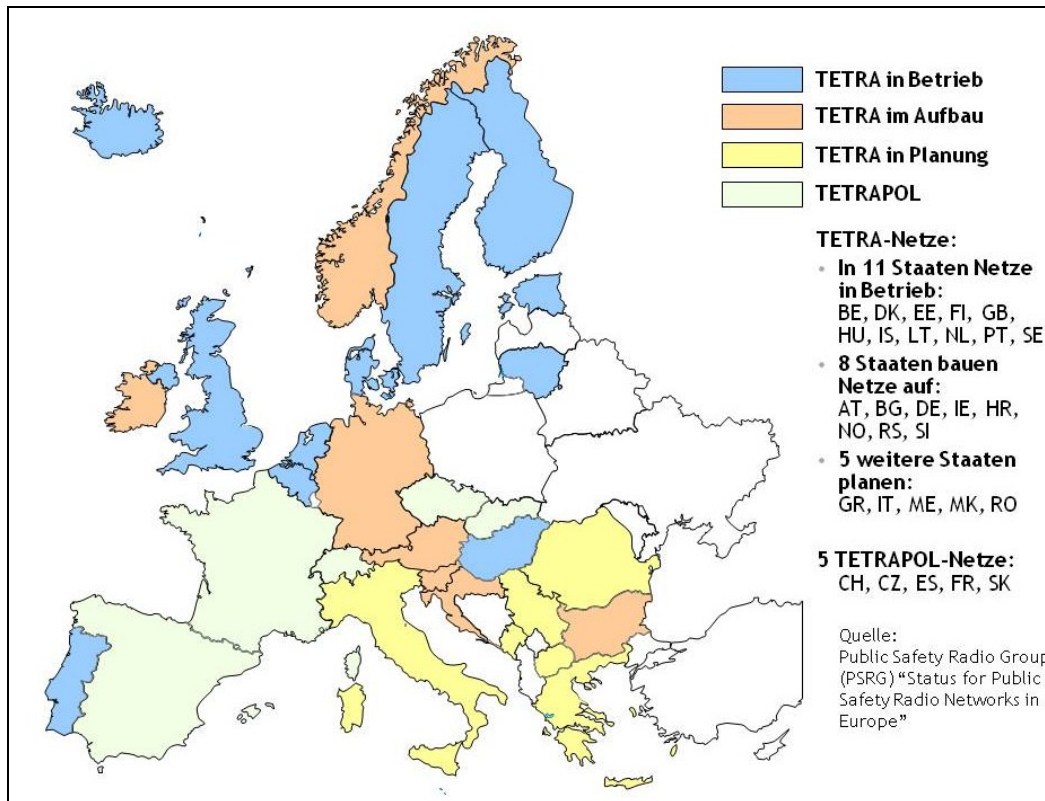


Bild 2.3: Ausbaustatus des digitalen Behördenfunks in Europa (nach [BDBOS])

Neben den BOS-Netzen wird der TETRA-Standard auch bei privaten Funknetzen verwendet. Hierfür sind in Deutschland die Frequenzbänder im Bereich von 410 - 430, 450 - 470, 873 - 876 sowie 918 - 921 MHz [BNETZA 11] vorgesehen. Beispielsweise betreiben der Flughafen und die Stadtwerke München jeweils eigene TETRA-Betriebsfunknetze [SICHERHEIT; SWM].

2.2.2 Bandbreite und Frequenzbereich

Dem digitalen BOS-Netz steht in Deutschland der Frequenzbereich 380 - 385 MHz (Uplink) bzw. 390 - 395 MHz (Downlink) zur Verfügung. Es können somit 200 Duplexkanäle mit einer Bandbreite von je 25 kHz genutzt werden.

2.2.3 Modulationsverfahren

Bezüglich des Vielfachzugriffsverfahrens ist TETRA dem GSM-Mobilfunk sehr ähnlich: Auch TETRA nutzt TDMA (Time Division Multiple Access) zur Mehrfachnutzung eines Funkkanals. Im Unterschied zu GSM wird jedoch nicht mit acht sondern nur mit vier Zeitschlitten je Rahmen gearbeitet. Als Modulationsverfahren kommt bei TETRA nicht das bei GSM verwendete GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) zur Anwendung, sondern $\pi/4$ -DQPSK ($\pi/4$ -shifted Differential Quaternary Phase Shift Keying), was im Vergleich zu GMSK eine höhere spektrale Effizienz besitzt.

2.2.4 TETRA- und GSM-Netze im Vergleich

Anfang der 90er Jahre begann das European Telecommunications Standards Institute (Europäisches Institut für Fernmeldenormen = ETSI) mit der Erarbeitung des TETRA-Standards. Das Kürzel stand anfangs für **Trans European Trunked R**Adio und wurde später in **TErrestrial Trunked R**Adio umbenannt. Das hier definierte Mobilfunksystem ist nicht für die öffentliche Anwendung, sondern für geschlossene Nutzergruppen, wie beispielsweise Militär, Behörden, Sicherheitsdienste, Verkehrsgesellschaften und Energieversorger bestimmt, da in den Spezifikationen eine Vielzahl von Leistungsmerkmalen aufgenommen wurden, die primär im Bereich der Sicherheitsbehörden Anwendungen finden.

Grundlage der Normungsarbeit war allerdings die erfolgreiche Festlegung der Leistungsmerkmale des GSM-Mobiltelefonnetzes, welche im Wesentlichen von denselben Gremien geleistet wurde. Daher lassen sich auch gewisse grundsätzliche Parallelen zwischen beiden Systemen ziehen. Im Detail sind jedoch die unterschiedlichen Anwendungsbereiche beider Systeme deutlich erkennbar. Die TETRA-Standardisierung ist in der ETS-300392 dokumentiert.

Bevor im Detail auf für die Expositionsmesstechnik wichtige funktechnische Parameter von TETRA-Signalen eingegangen wird, soll in diesem Abschnitt ein kurzer grundsätzlicher Vergleich zwischen den aktuell betriebenen GSM-Netzen und dem im Aufbau befindlichen BOS-TETRA-Netz durchgeführt werden, wobei insbesondere auf die von den Basisstationen generierten hochfrequenten Immissionen abgezielt wird.

Frequenzbereich, Reichweite:

Wie oben bereits angegeben, steht dem digitalen BOS-Netz in Deutschland der Frequenzbereich 380 - 385 MHz (Uplink) bzw. 390 - 395 MHz (Downlink) zur Verfügung. Es werden also deutlich niedrigere Frequenzen als im GSM-Mobilfunk (880 - 960 bzw. 1.710 - 1.880 MHz) verwendet. Der niedrigere Frequenzbereich ermöglicht prinzipiell eine größere Reichweite sowie ein besseres Eindringen in Gebäude.

Versorgungskonzept:

Von den kommerziellen GSM-Netzen ist bekannt, dass sie innerhalb der Wohn- und Gewerbebebauung von Ortschaften eine zufriedenstellende Inhausversorgung anstreben, während im Außenbereich oft nur die Versorgung im Freien sichergestellt wird. Allerdings wird der Versorgung wichtiger Verkehrswege (Straßen, Eisenbahnlinien) zusätzlich besondere Beachtung geschenkt.

Für die digitalen BOS-Netze sind die Anforderungen anders gewichtet. Grundsätzlich werden bei der Bewertung der Funkabdeckung nicht an alle Orte die gleichen Mindestanforderungen gestellt. Man unterscheidet hingegen verschiedene Versorgungskategorien, die in folgender Tabelle aufgelistet sind:

Versorgungskategorie	Versorgungsgrad
4	Handfunkversorgung in Gebäuden (Gürtelhöhe)
3	Handfunkversorgung in Gebäuden (Kopfhöhe)
2	Handfunkversorgung außerhalb von Gebäuden (Gürtelhöhe)
1	Handfunkversorgung außerhalb von Gebäuden (Kopfhöhe)
0	Fahrzeugfunkversorgung auch bei hoher Geschwindigkeit

Tabelle 2.2 Versorgungs-kriterien für das Digitalfunknetz [STMI 09].

In Bayern sind beispielsweise alle Siedlungsgebiete mindestens mit der Kategorie 2 zu versorgen. Für alle Bundesautobahnen sowie ausgewählte Grenz- und Berggebiete gilt mindestens Kategorie 1, für sonstige Flächen mindestens Kategorie 0 [STMI 09]. Die Versorgungskategorien 3 und 4 werden für „besonders sicherheitsrelevante“ Bereiche (z.B. in Großstädten) gefordert. Die Versorgungsgüte beim digitalen BOS-Netz ist somit nicht mit der des kommerziellen GSM-Netzes vergleichbar.

Zahl der Basisstationen:

Sowohl aufgrund der höheren Anforderungen an die Versorgungsgüte, insbesondere innerhalb von Ortschaften, als auch wegen der deutlich größeren Teilnehmerzahl (In Deutschland gibt es aktuell über 100 Millionen Mobilfunkverträge, die Nutzerzahl im BOS Netz beträgt derzeit hingegen nur etwa 500.000) sind im GSM-Mobilfunk wesentlich mehr Basisstationen notwendig, als für den BOS-Digitalfunk. Eine Nachfrage bei den vier GSM-Netzbetreibern ergab, dass beispielsweise in Bayern im Jahr 2010 mehr als 10.000 GSM-Basisstationsstandorte betrieben wurden. Für den BOS-Digitalfunk sind in Bayern weniger als 1.000 Standorte vorgesehen [STMI 10].

Zudem werden an den meisten GSM-Standorten drei Funkzellen mittels Sektorantennen versorgt, also drei Basisstationen betrieben. Für den BOS-Digitalfunk sind im Regelfall Omnantennen vorgesehen, d.h. pro Standort wird nur eine Basisstation betrieben. Nur in Ballungsgebieten oder an anderen Orten mit hohem Funkverkehrsaufkommen sind sektorierte Standorte geplant.

Sendeleistungen, Kanalzahlen:

GSM-Funkzellen arbeiten derzeit typisch mit Senderausgangsleistungen von bis zu etwa 40 Watt pro Kanal. In jeder Funkzelle werden meist ein bis sechs Kanäle betrieben. Für den digitalen BOS-Funk werden ebenfalls Senderausgangsleistungen von bis zu etwa 40 Watt pro Kanal angegeben, die Anzahl der pro Zelle betriebenen Kanäle liegt typisch zwischen einem im ländlichen Umfeld und acht im Bereich von besonders sicherheitsrelevanten Orten. Die Parameter „Leistung pro Kanal“ und „maximale Kanalzahl pro Funkzelle“ liegen also bei beiden Netzen in einer ähnlichen Größenordnung. Dies bedeutet jedoch nicht automatisch,

dass ein TETRA-Standort im Mittel auch etwa gleich viel Hochfrequenzleistung in die Umgebung abstrahlt, wie ein typischer GSM-Standort, da die meisten TETRA-Standorte ja nur eine (Omni-)Funkzelle versorgen, bei GSM hingegen die meisten Standorte drei Funkzellen bedienen.

Zusätzlich ist auch das unterschiedliche Verkehrsaufkommen in TETRA- und GSM-Zellen zu berücksichtigen: Wie aus einschlägigen Untersuchungen bekannt (z.B. [BOR 05]), ist die von den GSM-Basisstationen abgestrahlte Leistung vom aktuellen Telefon- bzw. Datenverkehr abhängig. Vergleichbares gilt auch für TETRA-Systeme (siehe Abschnitt 3.3.1). Da das typische Verkehrsaufkommen im BOS-Digitalfunk vermutlich in den meisten Fällen unter dem typischen Verkehr liegt, den GSM-Zellen abwickeln, wird auch die im Mittel von BOS-Digitalfunkbasisstationen abgestrahlte Leistung unter der von GSM-Standorten liegen.

Auch die Antennengewinne sind vergleichbar mit denen des GSM-Mobilfunks (etwa 7 dBi bei Omni- bzw. ca. 15 dBi bei Sektorantennen). Damit ergeben sich gewöhnlich äquivalente isotrope Strahlungsleistungen von mehr als 10 W EIRP. Für den Betrieb der TETRA-Standorte ist also gemäß §4, BEMFV [BEMFV] eine Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur notwendig.

Lage der Basisstationsstandorte:

Für den GSM-Mobilfunk betreibt man im ländlichen Umfeld bzw. entlang von Autobahnen durchaus auch nutzerferne Standorte im Außenbereich auf hohen Masten. Zusätzlich sind aber wegen der gewünschten Inhausversorgung und der großen Teilnehmerzahl auch sehr viele nutzernahe Standorte innerhalb bebauter Gebiete notwendig. Deren Antennen werden dann häufig auf Dächern installiert.

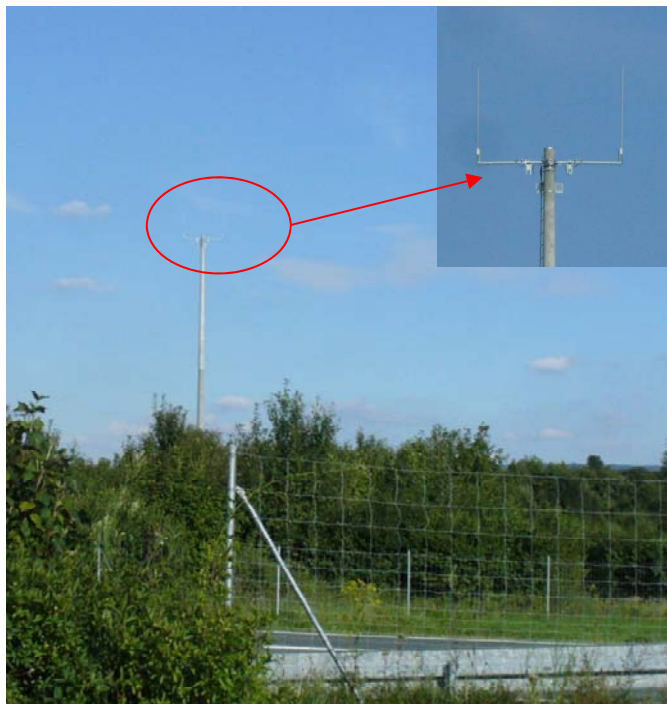


Bild 2.4: Typischer BOS-Digitalfunkstandort mit Omnantennen im Außenbereich

BOS-Digitalfunkstandorte sind größtenteils als Maststandorte (Masthöhe typisch mindestens 30 Meter; siehe Bild 2.4) an exponierten Orten im Außenbereich geplant. Nur im Bereich der Großstädte muss auch mit einer nennenswerten Anzahl von Standorten im bebauten Umfeld gerechnet werden. Geht man beispielsweise von der für Bayern geplanten Standortzahl von etwas weniger als 1.000 Standorten aus und zieht davon eine angemessene Zahl für die Großstädte und Ballungsräume ab, so ergibt sich bei einer Annahme einer regelmäßigen Netzstruktur im ländlichen Bereich in erster Näherung ein Standortabstand von etwa 8 Kilometer.

Wie frühere Untersuchungen bezüglich GSM- und UMTS-Basisstationen gezeigt haben [z.B. WUS 04, BOR 06], generieren Standorte, die auf hohen Masten oder Bergen im Außenbereich installiert sind, regelmäßig deutlich geringere Immissionen an Daueraufenthaltsbereichen der Anwohner, als Dachstandorte, die innerhalb des bebauten Gebiets liegen.

Das im Aufbau befindliche BOS-Digitalfunknetz unterscheidet sich also in Bezug auf folgende für die in der Umgebung der Basisstationsstandorte generierte Hochfrequenzimmission wesentliche Parameter von herkömmlichen GSM-Netzen:

- Deutlich geringere Zahl an Funkstandorten (Um mindestens den Faktor 10 weniger).
- Statt drei, wie bei GSM meist üblich, wird im BOS-Digitalfunk typisch nur eine Funkzelle pro Senderstandort versorgt.
- Die beim BOS-Digitalfunk verwendeten Sendeleistungen pro Kanal sind typisch nicht größer als die einer GSM-Zelle. Die Zahl der installierten Kanäle ist vermutlich beim BOS-Digitalfunk im Mittel geringer.
- Die typische Auslastung der Funkzellen ist im Mittel geringer als im GSM-Netz.
- Der BOS-Digitalfunk betreibt vorwiegend exponierte Standorte im Außenbereich.

Daher ist zu vermuten, dass in bebauten Gebieten von Dörfern und Städten im Mittel deutlich geringere TETRA-Immissionen auftreten, als dort im Vergleich dazu durch den GSM-Mobilfunk erzeugt werden.

2.3 UMTS-HSPA

Die Einführung des UMTS-Mobilfunkstandards (UMTS = Universal Mobile Telecommunications System) war der entscheidende Schritt zur Weiterentwicklung der mobilen Kommunikation von hauptsächlich vorwiegend Sprachdiensten, wie es noch bei GSM der Fall war, hin zur hochratigen mobilen Datenkommunikation („mobiles Internet“). Allerdings stellt auch die Einführung von UMTS nicht das Ende der Entwicklung auf diesem Sektor da. Bis heute werden die GSM- und UMTS-Systemkomponenten weiterentwickelt, zusätzlich wird jedoch mit LTE bzw. LTE-Advanced auch ein völlig neuer Standard verfolgt. Die Weiterentwicklung von GSM, UMTS und LTE wird in der „Third Generation Partnership Project“-Organisation (3GPP) betrieben. In Abständen von etwa 2 Jahren veröffentlicht 3GPP regelmäßig eine

neue Version („Release“) des Standards, in die aktuelle Änderungen und mehr oder weniger große Neuerungen aufgenommen werden.

Die erste Version des UMTS-Standards findet sich im Release 99, wobei die Nummer auf das Jahr hinweist, in dem der Standard veröffentlicht wurde (1999). Die folgenden Versionen wurden nicht mehr nach dem Veröffentlichungsjahr bezeichnet, sondern einfach mit fortlaufenden Nummern versehen.

UMTS Release 99 unterstützte Datenraten pro Teilnehmer von bis zu 384 kbit/s im Downlink sowie bis zu 128 kbit/s im Uplink (bei sehr guten Übertragungsbedingungen auch bis zu 384 kbit/s im Uplink). Damit lag man auf Augenhöhe zu den leitungsgebundenen Übertragungen mittels ISDN- oder langsamen DSL-Anschlüssen, wie sie damals Stand der Technik waren.

Die erhebliche Steigerung der maximalen Datenübertragungsraten im Festnetzbereich machte es notwendig, auch im mobilen Sektor deutliche Verbesserungen einzuführen, wenn man konkurrenzfähig bleiben wollte. Der entscheidende Schritt dazu findet sich in den Releases 5 und 6. Mit Release 5 wurde in der UMTS-Luftschnittstelle ein neues Übertragungsverfahren namens „High Speed Downlink Packet Access“ (HSDPA) eingeführt. Dieses ermöglicht im Downlink eine theoretische Datenrate von bis zu 14 Mbit/s. In der Praxis werden mit den derzeit aktuellen Endgeräten bei guten Empfangsbedingungen und nur wenigen Nutzern pro Zelle etwa 5 bis 7 Mbit/s erreicht. Bei nicht optimalen Bedingungen am Ort des Teilnehmers und vielen gleichzeitigen Nutzern pro Zelle sind immer noch Geschwindigkeiten von typisch 800 kbit/s möglich [SAU 11]. Release 6 brachte schließlich auch eine signifikante Steigerung der maximalen Übertragungsgeschwindigkeiten im Uplink auf mehrere Mbit/s unter idealen Bedingungen mittels „High Speed Uplink Packet Access“ (HSUPA). Außerdem steigert HSUPA die Anzahl der Nutzer, die gleichzeitig Daten über die gleiche Funkzelle übertragen können. Die Kombination aus HSDPA und HSUPA wird als „High Speed Packet Access“ (HSPA) bezeichnet. Im Release 8 und 9 finden sich weitere Verbesserungen der Übertragungsgeschwindigkeit bei UMTS (HSPA+). Unter idealen Bedingungen sind im Downlink Datenraten von theoretisch bis zu 82 Mbit/s möglich, im Uplink bis zu 20 Mbit/s.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass es sich bei HSPA in erster Linie nur um eine Aufwertung des UMTS-Netzes handelt und nicht um ein neues Funksystem, das quasi parallel in einer gewöhnlichen UMTS-Zelle betrieben wird (so wie es bei GSM und UMTS häufig der Fall ist). HSPA ersetzt in einer Zelle die vorher vorhandenen UMTS-Komponenten der ersten Generation, was nicht zwingend eine Änderung der Emission (z.B. aufgrund höherer abgestrahlter Leistung) notwendig werden lässt.

Die Immissionen, verursacht durch UMTS-Basisstationen der ersten Generation (Release 99), wurden bereits in [BOR 06] eingehend untersucht. Im Folgenden soll nun etwas näher darauf eingegangen werden, ob die Einführung der neuen Übertragungsverfahren bei UMTS (HSDPA) zu einer Zunahme der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch die Basisstationen führen kann.

Bei dieser Fragestellung muss unterschieden werden, ob eine Veränderung der Immission nur aufgrund neuer Modulations- und Zugriffsverfahren im Bereich der Luftschnittstelle

bedingt ist, oder ob auf indirektem Weg andere Parameter (z.B. Anzahl der Sendeanlagen, Kundenverhalten) einen Einfluss auf die Immission nehmen.

2.3.1 Neue Modulations- und Übertragungsverfahren bei HSDPA

Im Bereich der physikalischen Übertragung (Luftschnittstelle) wird die Steigerung der maximal übertragbaren Datenraten bei den verschiedenen Evolutionsschritten von HSPA durch die folgenden drei wesentlichen Neuerungen ermöglicht:

- Einsatz höherwertiger Modulationsverfahren in den Kanälen, die für die Nutzdatenübertragung zuständig sind. Zusätzlich zum standardmäßigen Verfahren (QPSK) sind (bei entsprechend guter Verbindungsqualität) auch 16-QAM und 64-QAM möglich, wodurch die Übertragungskapazität theoretisch um den Faktor 2 bzw. 3 gesteigert wird. Außerdem können für eine Verbindung zu einem Endgerät mehr Kanäle gebündelt werden als bisher. Die Art des verwendeten Modulationsverfahrens in den Datenkanälen hat unmittelbar keinen Einfluss auf die Exposition in der Umgebung der Sendeanlage.
- Verwendung von MIMO-Technologien (Multiple Input Multiple Output), d.h. z.B. zwei simultane Datenströme werden über zwei Antennen auf der gleichen Frequenz abgestrahlt. Hierbei ist eine Erhöhung der mittleren Immission in der Umgebung möglich, wenn - im Vergleich zur Abstrahlung über nur eine Antenne - nun doppelt so viel Sendeleistung erzeugt wird (z.B. 2 x 20 Watt im Gegensatz zu nur 1 x 20 Watt).
- Eine weitere Steigerung der Übertragungskapazität ist durch den Einsatz des „Dual Cell“-Verfahrens möglich. Hierbei werden zwei benachbarte UMTS-Kanäle (Bandbreite je 5 MHz) für die Übertragung zu einem Endgerät gebündelt. Dies setzt voraus, dass in der Basisstation zwei Sendekanäle betrieben und über die Antenne abgestrahlt werden, was natürlich - im Vergleich zur Verwendung nur eines Kanals - zu einer Verdopplung der abgestrahlten Leistung und damit der Immission führt.

Für die Immissionsmesstechnik haben diese Neuerungen im Bereich der physikalischen Übertragung keine Auswirkungen. Auch nach Einführung von HSDPA kann die Immission, verursacht durch UMTS-Sendeanlagen - wie in [BOR 06] bereits ausführlich erläutert - am einfachsten und präzisesten durch codeselektive Messung des P-CPICH und anschließender Hochrechnung auf maximale Sendeleistung bestimmt werden. Dafür geeignete Messgeräte sind verfügbar.

2.3.2 Einfluss der Netzstruktur auf die Exposition

In den ersten Jahren nach Inbetriebnahme der UMTS Netze (2002) war die Kundenresonanz zum Leidwesen der Betreiber ungemein verhalten, was zu einem großen Teil darauf zurückgeführt wurde, dass viele Nutzer (noch) keine Anwendungen für mobiles Internet sahen. Insbesondere fehlten attraktive Endgeräte, so dass anfangs hauptsächlich nur herkömmliche Datenkommunikation mittels UMTS-Sticks oder PCMCIA-Karten betrieben wurde. Mit der Einführung der so genannten „Smartphones“ (d.h. Mobiltelefone, die ein vergleichsweise großes Farbdisplay sowie mehr Computerfunktionalität als ein gewöhnliches Mobiltelefon zur

Verfügung stellen, wie beispielsweise das iPhone, das im Jahr 2007 auf den Markt kam), und der kleinen Netbook-Computer begann jedoch die Akzeptanz des mobilen Internet exponentiell zuzunehmen (Bild 2.5). Zu diesem Zeitpunkt war es auch möglich, durch die Einführung von HSPA die Datenübertragungsraten für mobile Kommunikation signifikant zu steigern. Der Fortschritt auf dem Gebiet der Endgeräte verlief also parallel mit dem Fortschritt im Bereich der Übertragungstechnik.

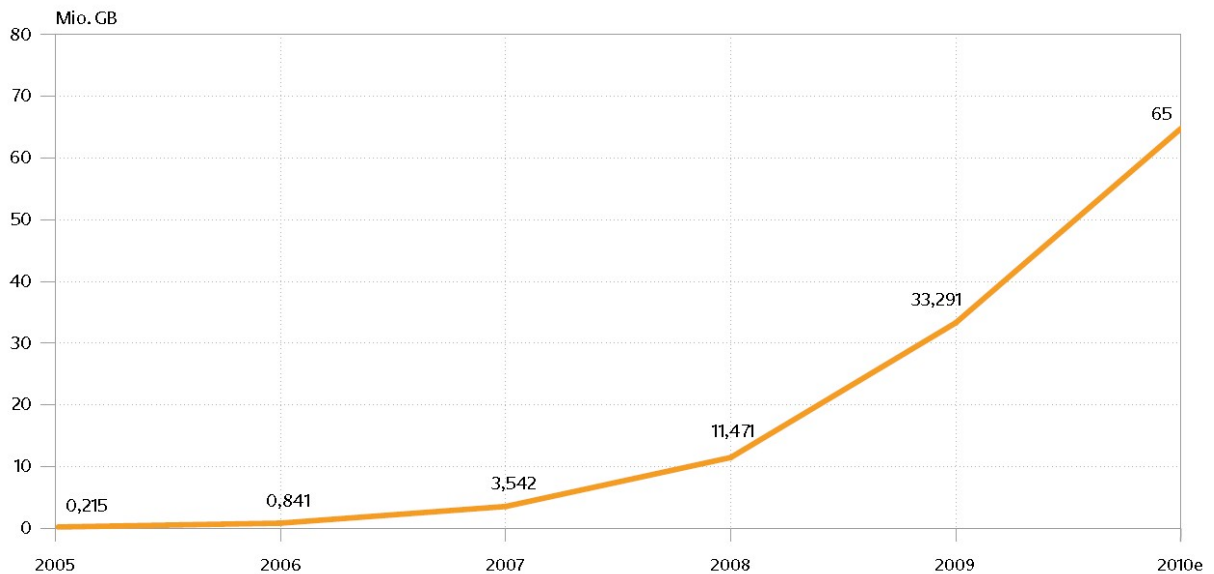


Bild 2.5: Entwicklung des Datenvolumens im Mobilfunk 2005 bis 2010 [BNETZA 11-1]

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die gesteigerten Downlink-Datenraten von über einem Mbit/s im städtischen Umfeld maximal im Bereich von einigen hundert Metern um die Basisstation herum sichergestellt werden können, da nur bei entsprechend guter Verbindungsqualität die dafür notwendigen höherwertigen Modulationsverfahren verwendet werden können. Zudem ist die Zahl der in einer Zelle maximal gleichzeitig möglichen hochratigen Datenverbindungen beschränkt. Diese Grundtatsachen führen zu folgenden Konsequenzen:

- Zur Sicherstellung einer flächendeckenden Versorgung mit HSDPA z.B. im Bereich einer Stadt benötigt man typisch ein dichteres Netz mit kleineren Zellen, als es für ein UMTS-Mobilfunknetz der ersten Generation (Release 99) notwendig ist. Neue Basisstationsstandorte dienen zur Verbesserung der Flächenversorgung mit hochratigen Diensten. Die häufig zu hörende Annahme, dass für kleinere Zellradien Sender mit geringerer Leistung ausreichend wären, ist so nicht korrekt, da dies nur der Fall wäre, wenn man weiterhin die Technologie der ersten Generation nutzen würde. Bei einigen der deutschen Netzbetreiber konnte man beobachten, dass die UMTS-Systemtechnik der zweiten Generation mit höheren Sendeleistungen (z.B. 40 Watt/Kanal statt vorher 20 Watt/Kanal) ausgestattet ist. Als Konsequenz ist also aufgrund der größeren Zahl an Senderstandorten und einer gleichbleibenden oder sogar größeren Sendeleistung/Kanal eine größere mittlere flächenbezogene Immission zu erwarten.
- Die dramatische Zunahme der Akzeptanz mobiler Breitbanddienste führt natürlich ebenfalls zu einer Vergrößerung der mittleren Immission, da die von UMTS-Anlagen im Mittel abgestrahlte Leistung mit dem Datenverkehrsaufkommen zunimmt.

- Zusätzlich macht es der gesteigerte Datenverkehr notwendig, dass die Betreiber nicht mehr nur einen Frequenzkanal am Senderstandort nutzen, so wie es in den Anfangsjahren der Fall war. Heute findet man mehr und mehr Standorte, bei denen auch der zweite oder noch mehr Kanäle verwendet werden. Die vier deutschen UMTS-Betreiber verfügen im „klassischen“ UMTS-Downlinkband (Frequenzbereich von 2110 bis 2170 MHz) über zwei (Telekom), drei (Vodafone und Telefónica) bzw. vier Kanäle (E-Plus), siehe auch Bild 2.1. Die maximal in der Umgebung einer UMTS-Basisstation auftretende Immission nimmt proportional mit der Zahl der aktivierten Frequenzkanäle zu.

Die Einführung von HSDPA und die teilweise dadurch bedingte Zunahme des UMTS-Datenverkehrs sind somit prinzipiell mit einer Zunahme der Immission, verursacht durch die Basisstationen, verbunden. Wie groß diese Zunahme in Fläche typisch ausfällt, kann in gewissen Grenzen durch Messkampagnen quantifiziert werden. Sowohl im „Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg“ [GRI 11] als auch im „EMF-Monitoring Bayern“ [MUE 08] wurde im zweiten Messdurchgang eine Zunahme der UMTS-Immission im Vergleich zur Erstmessung festgestellt. Allerdings fanden bei beiden Programmen die Erstmessungen zu einem Zeitpunkt statt, an denen das UMTS-Netz nicht bzw. nur rudimentär ausgebaut war, so dass diese Ergebnisse nur die Veränderung aufgrund des Netzerstausbaus beschreiben. Aussagen über eine Zunahme der Immission aufgrund des gesteigerten Datenverkehrs kann vermutlich erstmals das „EMF-Monitoring Bayern“ liefern, dessen dritte Messkampagne derzeit durchgeführt wird. Damit wird ein Vergleich zum Status in den Jahren 2011/12 mit dem der Jahre 2006/07 möglich.

Für die Immissionsmesstechnik haben diese Neuerungen jedoch keine Auswirkungen. Auch nach Einführung von HSDPA kann die Immission, verursacht durch UMTS-Sendeanlagen, am einfachsten und präzisesten durch codeselektive Messung des P-CPICH und anschließender Hochrechnung auf maximale Sendeleistung bestimmt werden.

3 Praxistaugliche Messverfahren

3.1 Grundsätzlich mögliche Messverfahren und Erfassungsmethoden

Zur Bestimmung der Exposition durch hochfrequente Felder von Funksendeanlagen existieren mehrere Verfahren, die völlig unterschiedliche Messprinzipien verwenden, was dazu führt, dass die dafür geeigneten Messgeräte sich bezüglich Funktionsweise, Leistungsfähigkeit und Preis sehr stark unterscheiden. Die Verfahren lassen sich wie folgt untergliedern:

- Breitbandige Messverfahren,
- frequenzselektive (spektrale) Messverfahren und
- codeselektive Messverfahren

3.1.1 Breitbandige Verfahren

Breitbandige Verfahren ermitteln einen Gesamtwert für die Immission innerhalb eines durch das Messgerät festgelegten Frequenzbereiches, 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. Beispielsweise ist es in der Umgebung eines Standortes, an dem neben LTE-Signalen auch GSM- und UMTS-Funkdienste abgestrahlt werden, mittels einer Breitbandmessung nicht möglich zu unterscheiden, welchen prozentualen Anteil an der Gesamtimmission durch die LTE-Signale generiert werden. Außerdem ist die Empfindlichkeit breitbandiger Messgeräte üblicherweise auf etwa 0,2 bis 0,6 V/m begrenzt, so dass sie im Regelfall nur in unmittelbarer Antennennähe vernünftig verwendet werden können. Damit beschränkt sich das Haupteinsatzgebiet von breitbandigen Messungen an Basisstationen auf den Bereich Arbeitsschutz sowie für Übersichtsmessungen zur Vorselektion von Raumbereichen, an denen eine Detailmessung mit einem anderen Verfahren durchgeführt wird.

Breitband-Messgeräte bestehen in der Regel aus einer Anzeigeeinheit mit interner oder externer Feldsonde (Bild 3.1 links und Mitte, NBM 550 der Firma Narda Safety Test Solutions).

3.1.2 Frequenzselektive Verfahren

Spektrale bzw. frequenzselektive Verfahren weisen gegenüber breitbandigen Verfahren eine wesentlich größere Empfindlichkeit auf. So ist beispielsweise in [BOR 06] für die Immissionsmessung im Umfeld von UMTS-Sendeanlagen bei Verwendung eines modernen Spektrumanalysators in Verbindung mit einer logarithmisch-periodischen Antenne eine maximal erzielbare Empfindlichkeit von etwa 0,0005 V/m ermittelt worden. Außerdem wird bei frequenzselektiven Messungen die Frequenzinformation der Immission zur Verfügung gestellt, so dass in vielen Fällen eine Zuordnung zur Quelle der Immission möglich ist.

Frequenzselektive Messungen erfolgen mit Spektrumanalysatoren bzw. Messempfängern in Verbindung mit geeigneten Antennen. Als Beispiel ist in Bild 3.1 rechts der tragbare Spektrumanalysator FSH-3 mit isotroper Messantenne der Firma Rohde & Schwarz dargestellt.



Bild 3.1: Beispiele für ein Breitbandmessgerät (links) mit dazugehöriger Sonde (Mitte) bzw. ein frequenzselektives Messsystem (rechts), bestehend aus Spektrumanalysator, Messantenne und optionalem Steuerrechner.
Quelle: www.narda-sts.de (links, Mitte), www.rohde-schwarz.de (rechts)

Als Messantennen werden im hier zu betrachtenden Frequenzbereich (300 MHz - 2,7 GHz) üblicherweise kleine logarithmisch-periodische oder bikonische Antennen verwendet. Seit einigen Jahren sind z.B. von den Firmen Narda Safety Test Solutions und Rohde & Schwarz auch isotrope Messantennen für frequenzselektive Messungen verfügbar, die sich immer mehr als Standardlösung durchsetzen.

Frequenzselektive Messungen sind aufgrund ihrer zahlreichen Vorteile das primär verwendete Messverfahren in der elektromagnetischen Immissionsmesstechnik. Innerhalb zahlreicher Projekte des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms wurde ihre Eignung zur Messung der Exposition von z.B. GSM und UMTS [BOR 06], analogem und digitalem Hör- und Fernsehgrundfunk [BOR 06-1], WiMAX-Sendeanlagen [BOR 09] sowie WLAN [SCHM 05] untersucht und nachgewiesen. Dabei hat sich unter anderem herausgestellt, dass die gewählten Einstellparameter am Messempfänger bzw. Spektrumanalysator einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Da zur Informationsübertragung moderner Funkanwendungen immer modulierte Signale verwendet werden müssen, die je nach gewähltem Verfahren sehr unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Bandbreite, Crestfaktor) besitzen, ist es notwendig, die Einstellparameter am Spektrumanalysator passend zu wählen, um auch wirklich als Ergebnis den Effektivwert der Feldstärke zu erhalten. Dies gilt insbesondere bei modernen digitalen Übertragungsverfahren. Bezüglich der korrekten Geräteeinstellung für die Messung von TETRA- bzw. LTE-Signalen sind also entsprechende Untersuchungen notwendig, die in den nachfolgenden Abschnitten dokumentiert werden.

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Einstellparameter am Spektrumanalysator vorgestellt, die einen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Betrachtet werden dabei ausschließlich moderne Analyserarten mit digitaler Signalverarbeitung ab der Videoebene. Ältere, rein analoge Spektrumanalysatoren sind für die Erfassung digital modulierter, breitbandiger Signale in der Regel nur eingeschränkt brauchbar. Für ein tiefer gehendes Studium des Aufbaus und der Eigenschaften moderner Spektrumanalysatoren sei an dieser Stelle auf [RAU 00] verwiesen.

Auflösebandbreite („Resolution Bandwidth“ RBW)

Dieser Parameter legt die 3-dB-Bandbreite des Zwischenfrequenzfilters fest, mit der die Signale im Analysator gemessen werden. Die RBW muss immer mindestens so groß sein wie die Bandbreite des zu messenden Signals. Ansonsten kommt es zu einem Pegelverlust in der Anzeige, also zu einer Unterbewertung der Immission, da nicht die gesamte Signalenergie das Filter passiert. Wird mit einer zu großen RBW gemessen, kann es vorkommen, dass eventuell vorhandene Nachbarkanäle mit in das Messergebnis einbezogen werden, so dass ein zu großer Wert angezeigt wird oder eng benachbarte Signale nicht mehr aufgelöst werden können. Grundsätzlich sollte also die RBW mindestens so groß wie die Signalbandbreite, aber auch nicht wesentlich größer gewählt werden. Bei einigen Spektrumanalysatoren steht kein ausreichend breites ZF-Filter zur Verfügung, um besonders breitbandige Signale wie z.B. UMTS, DVB, WiMAX oder LTE korrekt zu erfassen. Hier besteht gegebenenfalls die Möglichkeit, einen geeigneten Korrekturfaktor zu definieren, der den Pegelverlust aufgrund der zu geringen Bandbreite kompensiert. Diese so genannte Bandbreitenkorrektur zwischen der verwendeten Auflösesebandbreite und der Signalbandbreite B_{Sig} erfolgt nach der Formel $10 \cdot \log(B_{\text{Sig}}/B_{\text{N}})$. B_{N} ist hierbei die äquivalente Rauschbandbreite des verwendeten ZF-Filters; diese entspricht bei Gaußfiltern näherungsweise der verwendeten Auflösesebandbreite.

Videobandbreite („Video Bandwidth“ VBW)

Das Videofilter befindet sich bei konventionellen Analysatoren hinter dem Gleichrichter und hat den Zweck, aus dem gleichgerichteten Zwischenfrequenzsignal des Analysators die „Signaleinhüllende“ zu extrahieren und vom Rauschen zu befreien. Bei Verwendung des RMS-Detektors muss die VBW deutlich größer als die RBW gewählt werden, damit keine zusätzliche Mittelwertbildung durch das Videofilter entsteht, was die Bestimmung des RMS-Wertes verfälschen würde. Bei vielen modernen Analysatoren kann die VBW an die gewählte RBW bzw. den gewählten Detektor gekoppelt werden, so dass eine diesbezügliche Fehlbedienung von vornherein vermieden wird.

Sweeptime (SWT) und dargestellter Frequenzbereich (Span)

Im Regelfall wird man bei Expositionsmessungen bestrebt sein, einen möglichst großen Frequenzbereich darzustellen, um beispielsweise gleich alle vorhandenen LTE-Signale zu erfassen und die vorhandenen Feldstärkewerte am Analysator ablesen zu können. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Analysators sind diesem Wunsch jedoch Grenzen gesetzt. Abhängig von der Zahl der vorhandenen Pixel auf der Frequenzachse (typischer Wert: zwischen 300 und 500 je nach Modell) ergibt sich ein maximal sinnvoll darstellbarer Frequenzbereich, bei dem die einzelnen Funksignale noch vernünftig aufgelöst werden können. Als Faustregel sollte der Quotient aus Span und eingestellter RBW kleiner als die horizontale Pixelanzahl des Analysators sein [RAU 00]. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei einem Spektrumanalysator mit 500 Pixel bei einer RBW von 1 MHz ein Frequenzbereich von maximal 500 MHz sinnvoll dargestellt werden kann.

Gleichzeitig wird meist eine kleine Sweeptime gewünscht, um eine möglichst große Messrate zu erzielen (damit beispielsweise bei Anwendung der „Schwenkmethode“ und „normaler“

Geschwindigkeit des Abtastvorgangs mit der handgeführten Antenne ausreichend viele Messungen im untersuchten Volumen durchgeführt werden). Allerdings besteht ein Zusammenhang zwischen Sweeptime, RBW und Span: Wird bei kleiner RBW und/oder großem Span eine zu kleine Sweeptime gewählt, wird der eingestellte Frequenzbereich mit so hoher Geschwindigkeit durchfahren, dass das ZF-Filter nicht mehr ausreichend Zeit hat, vollständig einzuschwingen (die Einschwingzeit eines Filters ist umgekehrt proportional zu seiner Bandbreite), wodurch sich ein Amplitudenverlust in der Anzeige, sowie meist auch noch ein Fehler bei der Frequenzmessung einstellt. Ungeeignete Kombinationen zwischen RBW, Sweeptime und Span werden von modernen Analysatoren in der Regel automatisch erkannt und durch einen Warnhinweis (z.B. die Meldung „uncal“ auf dem Bildschirm) angezeigt.

Eine zu kleine Sweeptime hat zusätzlich noch einen negativen Einfluss auf den RMS-Detektor. Dieser Einfluss wird bei den derzeit am Markt befindlichen Geräten nach unserer Erfahrung jedoch nicht automatisch vom Gerät signalisiert. Näheres dazu ist im Abschnitt „Detektortyp“ beschrieben.

Eingangsdämpfung (Input Attenuation), Referenzpegel (Ref Lvl)

Grundsätzlich sollte der Referenzpegel so gewählt werden, dass das zu messende Signal den vertikalen Darstellungsbereich des Analysators gut ausnützt, um eine möglichst optimale Ablesbarkeit und Messdynamik sicherzustellen. Mittels der Eingangsdämpfung ist es möglich, starke Signale so weit abzuschwächen, dass es nicht zu Übersteuerungen des Eingangsmischers kommt. Zur Messung besonders schwacher Signale ist es prinzipiell möglich, eine Eingangsdämpfung von 0 dB einzustellen. Hierbei sei allerdings angemerkt, dass es in diesem Fall, insbesondere bei der Verwendung kleiner bikonischer Antennen, durch Fehlanpassungen zu einer Zunahme der Messunsicherheit kommen kann [BOR 06].

Detektortyp

Moderne Spektrumanalysatoren stellen dem Nutzer eine Vielzahl verschiedener Detektortypen zur Verfügung. Für die Messung der Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder sind insbesondere die folgenden beiden von Bedeutung:

- Der „Peak-Detektor“ (Spitzenwertdetektor, „Max-Peak-Detektor“) und
- der „RMS-Detektor“ (Effektivwertdetektor; RMS = Root Mean Square)

Mit dem Peak-Detektor, der in allen gängigen Analysatormodellen realisiert ist, ist es möglich bei Signalen mit zeitlich schwankender Hüllkurve den größten Wert der Momentanleistung eines Signals festzustellen. Der RMS-Detektor hingegen ist in der Lage, bei einem zeitlich schwankenden Signal die mittlere Leistung (bzw. den Effektivwert) zu ermitteln. Immer mehr moderne Analysatoren bieten inzwischen auch diesen RMS-Detektor an. Ist die Zuverlässigkeit des Peak-Detektors im Regelfall kein Problem, so sind bei einer Aktivierung des RMS-Detektors einige Randbedingungen zu beachten, um wirklich den Effektivwert eines Signals zu ermitteln. Dazu muss man zunächst verstehen, wie ein RMS-Detektor arbeitet. Im Fol-

genden ist nur eine relativ kurze Funktionsbeschreibung wiedergegeben, erschöpfende Detailinformationen finden sich in [RAU 00]:

Aus der im Display vorhandenen horizontalen Pixelanzahl und der aktuell eingestellten Sweeptime ergibt sich während des Sweeps eine bestimmte Verweilzeit pro Pixel. Während dieser Verweilzeit nimmt der A/D-Wandler im Spektrumanalysator eine Anzahl an Abtastwerten („Samples“), die um so größer ist, je höher die Abtastfrequenz des Wandlers bzw. die Verweilzeit pro Pixel ist. Bei einem Analysator mit beispielsweise 500 Pixeln auf der horizontalen Achse, einer Abtastfrequenz von 32 MHz (typischer Wert für aktuelle Geräte) und einer Sweeptime von 100 ms ergeben sich 6.400 Samples pro Pixel.

Ist der Peak-Detektor eingestellt, wird aus den verfügbaren Abtastwerten der größte ausgewählt und für die Vertikaldarstellung am Bildschirm herangezogen. Ist jedoch der RMS-Detektor aktiviert, so wird in einem schnellen Signalprozessor der quadratische Mittelwert aus den pro Pixel verfügbaren Abtastwerten gebildet und dieses Resultat zur Anzeige gebracht (siehe auch Abschnitt 3.2.2.1).

Die RMS-Bestimmung wird also nicht in einer analogen Schaltung durchgeführt, sondern sie ist das Ergebnis eines Rechenprozesses. Um verlässliche RMS-Werte zu erhalten, muss die Zahl der Samples, aus denen der RMS-Wert berechnet wird, ausreichend groß sein. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine zu kleine Sweeptime eine zu kurze Signalverweilzeit pro Pixel und damit eine zu geringe Anzahl an Abtastwerten verursachen kann, so dass sich gegebenenfalls ein ungenauer RMS-Wert einstellt. Das gleiche kann auftreten, wenn die Abtastfrequenz des Analysators zu niedrig ist.

Zusätzlich kann das dem A/D-Wandler vorgeschaltete Auflösefilter zu Problemen bei der RMS-Bestimmung führen, wenn die Sweeptime so kurz gewählt ist, dass das Filter nicht mehr vollständig einschwingen kann [ROS]. Näheres zu dieser Problematik findet sich in Abschnitt 3.2.2.1.

Es muss daher bei Verwendung eines RMS-Detektors auf jeden Fall immer geprüft werden, ob die gewählten Einstellparameter (insbesondere die Sweeptime) zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Betriebsart „Kanalleistungsmessung“

Moderne Spektrumanalysatoren bieten neben der üblichen frequenzselektiven Messung von Signalleistungen auch die Möglichkeit an, die gesamte in einem definierten Frequenzbereich vorhandene Leistung durch Integration der Messergebnisse eines durchlaufenden schmalbandigen ZF-Filters zu ermitteln. Dieses Verfahren wird „Kanalleistungsmessung“ (engl. „Channel Power Measurement“) genannt und ermöglicht beispielsweise die Bestimmung der Leistung breitbandiger Signale (wie beispielsweise DVB, UMTS, WiMAX oder LTE) auch mit Analysatoren, die kein ausreichend breites ZF-Filter besitzen. Dadurch wird im spektralen Mode eine Leistungsmessung ohne Verwendung von Bandbreiten-Korrekturfaktoren ermöglicht. Bei der Messung von breitbandigen LTE Signalen könnte dieses Verfahren alternativ zur spektralen Messung eingesetzt werden.

3.1.3 Codeselektive Verfahren

Die *codeselektive* Messtechnik ist in der Expositionsmesstechnik vergleichsweise neu. Sie war bislang nur für Messungen an UMTS-Basisstationen von Bedeutung [BOR 06] und ermöglichte dabei als einziges Verfahren eine zuverlässige Bestimmung der Exposition bei maximaler Anlagenauslastung unabhängig von der jeweiligen Verkehrsauslastung. Durch die Tatsache, dass bei UMTS alle Basisstationen eines Betreibers auf derselben Frequenz senden und darüber hinaus aufgrund des Code-Multiplexverfahrens die Immission des mit konstanter Leistung gesendeten Pilotkanals nicht im Frequenzbereich extrahierbar ist, war eine Verlagerung der Immissionsmessung aus dem Frequenzbereich in den Codebereich notwendig.

Auch LTE wird als Gleichwellennetz betrieben, so dass hier ebenfalls Codes zur Unterscheidung der einzelnen Funkzellen verwendet werden. Daher ist zu prüfen, ob für LTE-Immissionsmessungen nicht ebenfalls codeselektive Verfahren Vorteile gegenüber einer frequenzselektiven Messtechnik aufweisen.

3.1.4 Messtechnische Erfassungsmethoden

Aus der Erfahrung diverser Vorgängerprojekte z.B. zu GSM, UMTS, WLAN, WiMAX oder Rundfunk ([BOR 05, BOR 06, SCHM 05, BOR 09]) ist bekannt, dass die Immissionsverteilung im Hochfrequenzbereich am Immissionsort

- zeitlichen Schwankungen und
- örtlichen Schwankungen unterworfen ist.

Die zeitlichen Schwankungen resultieren dabei aus einer zeitlichen Änderung des Ausbreitungskanals vom Sender zum Immissionsort (z.B. durch fahrende Autos o.ä.) sowie, wie z.B. im Falle von GSM-, UMTS- und WiMAX-Basisstationen, aus einer zeitlichen Änderung der Sendeleistung durch die aktive Sendeleistungsregelung. Dies führt dazu, dass das Ausgangssignal an einer Messantenne als Maß für die Immission zeitlich nicht konstant ist. Auch bei TETRA- und LTE-Basisstationen ist eine auslastungsabhängige Leistungsabgabe vorhanden.

Zu diesen zeitlichen Schwankungen kommen örtliche kleinskalige Schwankungen durch Mehrwegeausbreitungseffekte („fast fading“) hinzu. Es kann also bei Verschiebung der Messantenne um einige Zentimeter ein gänzlich anderer Messwert resultieren (bei GSM und UMTS wurden kleinskalige Änderungen bis zu 20 dB nachgewiesen).

Die zeitlichen und örtlichen Schwankungen haben Konsequenzen auf das einzusetzende Messverfahren. Das bedeutet, dass je nach Aufgabenstellung (z.B. Bestimmung der maximalen Exposition im Unterschied zur Messung der durchschnittlichen Exposition) unterschiedliche Erfassungsmethoden eingesetzt werden müssen. Oder anders ausgedrückt: Unterschiedliche Erfassungsmethoden werden in ein und derselben Feldumgebung in der Regel auch zu unterschiedlichen Messergebnissen führen.

Messverfahren zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten

Bei diesem Messverfahren ist das örtliche und zeitliche Maximum der Immission zu ermitteln. Das bedeutet, dass Techniken einzusetzen sind, welche die gemessene Immission zeitlich und örtlich maximieren.

Für die zeitliche Maximierung bedeutet dies, dass z.B. durch Messung von zeitlich konstanten Signalisierungskanälen unter Ausnutzung eines Zusammenhanges zwischen der Sendeleistung der Signalisierungskanäle und der maximal möglichen Anlagensendeleistung auf die Immission bei maximalem Betriebszustand der Sendeanlage extrapoliert werden kann. Bei GSM- und UMTS-Mobilfunk-Basisstationen hat sich hierbei die Messung des BCCH- bzw. PCPICH Kanals als geeignete Methode erwiesen. Für TETRA- und LTE-Basisstationen werden in vorliegendem Bericht geeignete Methodiken entwickelt.

Bezüglich der örtlichen Maximierung wird ein spezielles Verfahren der Bewegung der Messantenne durch das zu untersuchende Messvolumen bei aktivierter „Maxhold“ Funktion des Messgerätes eingesetzt. Hierfür existieren mit der Schwenkmethode und der Punktrastermethode zwei mögliche Ansätze, von denen die Schwenkmethode bei gleicher Genauigkeit am effektivsten arbeitet und aus diesem Grund beispielsweise in den Schweizer Messempfehlungen für die Immissionsmessung an GSM- und UMTS-Basisstationen als Referenzmethode festgeschrieben ist. Die Schwenkmethode zur örtlichen Maximierung kann zur Messung bei TETRA- und LTE-Basisstationen direkt übernommen werden.

Örtlich und zeitlich gemittelte Durchschnittswerte

Beispielsweise im Rahmen von epidemiologischen Projekten oder grundsätzlichen Untersuchungen zur Exposition der Bevölkerung kann es sinnvoll sein, nicht die „theoretisch mögliche maximale Immission“, sondern eine real vorhandene „durchschnittliche Immission“ anzugeben, die z.B. im Schlafzimmer oder auf dem Bett-/Kopfkissenbereich (für epidemiologische Schlafstudien) vorliegt. Da, wie oben beschrieben, die Immission örtlich und zeitlich variiert, ist hier die Messung der Felder an einem fixen Ort zu einem festen Zeitpunkt nicht hinreichend, sondern es müssen geeignete örtliche und zeitliche Mittelungstechniken eingesetzt werden. Hierfür können z.B. Punktrastermethoden oder ein z.B. in [BOR 06] verwendetes langsames, gleichmäßiges Abscannen des Messvolumens mit einer Antenne bei gleichzeitiger *kontinuierlicher* Messwertabspeicherung eingesetzt werden (siehe Bild 3.2).

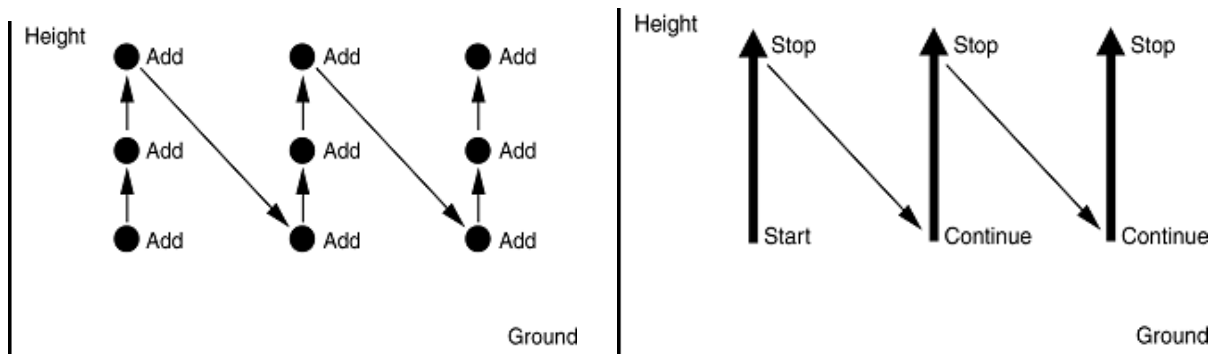


Bild 3.2: Bestimmung der örtlich und zeitlich gemittelten Exposition mittels Einzelpunktmessung (links) oder kontinuierlicher Erfassung (rechts); (Quelle: Narda Safety Test Solutions).

Die an den Rasterpunkten diskret bzw. beim Abscannen kontinuierlich aufgenommenen Messwerte sind anschließend leistungsmäßig zu mitteln. Die Mittelung ist selbstverständlich direkt auf Basis der abgespeicherten Istwerte, und nicht etwa mit den auf maximale Auslastung extrapolierten Werten durchzuführen. Außerdem ist die Mittelung leistungsbezogen durchzuführen, d.h. Leistungsflussdichtewerte sind linear, Feldstärkewerte hingegen quadratisch zu mitteln. Vor der Mittelung sind die von einem Spektrumanalysator in der Regel logarithmisch angezeigten Pegelwerte in lineare Größen umzurechnen (Entlogarithmierung).

Bei dieser Art der Messungen müssen isotrope Antennen eingesetzt werden. Lediglich bei der Punktrastermethode kann die Messung auch durch manuelle Positionierung einer dipolartigen Antenne am Messpunkt in drei orthogonalen Raumrichtungen erfolgen. Diese Methode ist aber extrem aufwändig, zeitintensiv und fehlerträchtig und somit für Vorortmessungen nicht praktikabel. Bei der kontinuierlichen Erfassung ist zusätzlich darauf zu achten, dass die Abtastgeschwindigkeit im Messvolumen an die Messgeschwindigkeit des Analysators (Sweepzeit) angepasst ist, so dass eine ausreichend dichte Abtastung des Volumens sichergestellt ist.

Langzeitmessungen

Langzeitmessungen werden üblicherweise bei feststehender Messantenne, d.h. an einem fixen Ort, durchgeführt, siehe Bild 3.3. Durch kontinuierliche Messwertaufnahme wird der zeitliche Verlauf der Immission aufgezeichnet. Obwohl diese Art der Messung aufgrund der örtlichen Immissionsvariation nur für den konkreten Messpunkt, aber nicht für das umgebende Messvolumen repräsentativ ist, können solche Langzeitmessungen jedoch interessant sein, um Erkenntnisse über das generelle zeitliche Verhalten der Immission zu gewinnen. Hierdurch können beispielsweise zeitliche Charakteristika detailliert untersucht werden, die aus der sendeseitigen Leistungsregelung resultieren.

Im Idealfall sind für Langzeitmessungen isotrope Antennen zu verwenden. Sofern jedoch lediglich die sendeseitige Leistungsregelung untersucht werden soll und zeitliche Änderungen des Ausbreitungspfades keine Rolle spielen, können auch Einschränkungen in der Isotropie hingenommen werden. Die Verwendung von stärker richtenden Antennen ist in dem Maße möglich, je weniger sich das Einfallswinkelspektrum der Signale vom Sender zeitlich ändert.



Bild 3.3: Langzeitmesssystem auf einem Gebäudedach in der Nähe einer Mobilfunksendeanlage

Besonders geeignet für eine Erfassung der örtlich und zeitlich gemittelten Exposition erscheint die Messung im Frequenzbereich, da hiermit auch mehr als ein Signal gleichzeitig erfasst werden kann. Aber auch die Kanalleistungsmessung ist im Prinzip zur Erfassung räumlicher und zeitlicher Durchschnittswerte verwendbar.

Manche Spektrumanalysatoren bieten zusätzlich auch die Möglichkeit, eine Messung im Zeitbereich wie mit einem Messempfänger durchzuführen („Receiver Mode“). Die Messung findet bei fester Mittenfrequenz und Auflösebandbreite permanent statt. Das Ergebnis wird entweder in Grafikform über der Zeit dargestellt, oder auch als numerische Werte ausgegeben. Falls in diesem Mode eine ausreichend große Messbandbreite eingestellt werden kann und ein RMS-Detektor vorhanden ist, kann damit ebenfalls der zeitliche Durchschnittswert beispielsweise der LTE-Exposition für einzelne Punkte ermittelt werden. Es ist nur eine ausreichend große Verweilzeit pro Pixel einzustellen, so dass die Signalmittelung nicht nur während der LTE-Pulse (zum Signalverlauf von LTE-Basisstationssignalen siehe Abschnitt 3.2.1), sondern auch unter Berücksichtigung der Pausen zwischen den Bursts durchgeführt wird. Die Tauglichkeit dieses Verfahrens wurde bereits in [BOR 09] bei der Messung der zeitabhängigen Immission von WiMAX-Basisstationen dokumentiert.

Eine Sonderform der Langzeitmessungen stellen die so genannten „Dosimetermessungen“ dar (Bild 3.4). Hierbei wird die Immission nicht punktbezogen, sondern personenbezogen ermittelt. Speziell dafür entwickelte automatische Langzeitmesssysteme können dazu z.B. am Körper einer Person befestigt werden. Dadurch sind Schwankungen der persönlichen Exposition z.B. während des Tagesablaufs dokumentierbar. Im Rahmen dieses Projektes wird auch die Eignung von Personendosimetern für die geplanten Expositionsuntersuchungen geprüft.



Bild 3.4: Personendosimeter EME Spy 120 der Firma Antennessa

3.1.5 Stand der Normung

International existiert inzwischen eine Vielzahl von Normen zur Messung der Immission, verursacht durch Hochfrequenzquellen. In diesen werden primär geeignete Strategien zur Erfassung der Felder, Methoden zur Abschätzung der Messunsicherheit und zum Teil auch funksystemspezifische Hinweise zur korrekten Einstellung frequenz- bzw. codeselektiver Messgeräte vorgeschlagen. Auch das Thema der Hochrechnung auf maximale Anlageauslastung bei Mobilfunksystemen ist in diesen Normen zu finden. Besonders ausführlich sind hierbei die CENELEC-Norm EN 40592 (die letztlich auch für Deutschland Relevanz besitzt) und die IEC-Norm 62232.

Sucht man jedoch in diesen Normen nach konkreten Vorgaben zur korrekten Messung der Immission, verursacht durch LTE-Basisstationen, so wird man derzeit nicht sehr fündig. Einzig in der IEC 62232 finden sich im Annex N einige Informationen zu Frequenzbereichen, Kanalbandbreiten und Modulationsverfahren bei LTE [IEC 62232]. Konkrete Hinweise zur korrekten Messung oder gar zur Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung fehlen jedoch. Die IEC 62232 soll in der Arbeitsgruppe TC 106 der IEC unter anderem hinsichtlich LTE-Basisstationen ergänzt werden. Allerdings wird ein erster Draft nicht vor Ende 2013 / Anfang 2014 erwartet.

Bezüglich TETRA findet man in der IEC 62232 (Annex N) einige Informationen zu Frequenzbereichen, Kanalbandbreiten und Modulationsverfahren. Außerdem wird dort (ebenfalls in Annex N) das Prinzip zur Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung vorgestellt. Dies findet man auch in der EN 50492 (Annex I) [EN 50492]. In der europäischen Normenarbeitsgruppe CENELEC WG1 wird derzeit an einer Erweiterung der EN 50492 um LTE-

Messungen gearbeitet. Der Leiter der Arbeitsgruppe, J. Wiart, wurde mehrfach angeschrieben und um Details zum geplanten LTE-Messverfahren gebeten, allerdings bislang ohne Reaktion.

Nationale Vorschriften zur korrekten Messung der Immissionen, verursacht von TETRA- bzw. LTE-Basisstationen (z.B. herausgegeben vom Länderausschuss für Immissionsschutz), sind uns derzeit nicht bekannt. Im Rahmen vorliegenden Projektes wurde Kontakt mit der Bundesnetzagentur aufgenommen. Hierbei konnte eruiert werden, dass durch den Prüf- und Messdienst (PMD), der u.a. für die bundesweiten Feldstärkemessungen zur EMVU verantwortlich ist, eine Messvorschrift zur Immissionsmessung an LTE-Anlagen erarbeitet wird, die Ende 2011 fertiggestellt sein soll. Details zu dieser Messvorschrift konnten noch nicht mitgeteilt werden.

3.2 LTE

3.2.1 Signalverläufe von LTE-Basisstationssignalen

Nachfolgend werden die für eine Expositionsmessung an LTE-Basisstationen relevanten zeitlichen Strukturen von LTE Downlink-Signalen beschrieben [BOR 11].

Die zeitliche Rahmenstruktur ist in der ETSI TS 136 211 geregelt [ETSI 136.211], Bild 3.5. Ein so genannter Typ 1 LTE-Frame (d.h. für LTE FDD Systeme) hat eine Gesamtlänge von 10 ms. Der Frame wird in 20 einzelne Slots mit je 0,5 ms Länge unterteilt. Zwei aufeinander folgende Slots werden als LTE-Subframe bezeichnet.

Beim Typ 1 Frame mit normalem zyklischen Präfix (cyclic prefix, CP) sind pro Slot 7 Symbole enthalten, d.h. $N_{\text{symb}}^{\text{DL}} = 7$. Das erste der sieben Symbole hat eine Länge von 71,875 μs ; die anderen sechs Symbole sind jeweils 71,354 μs lang. Die kleinste Zeit-Frequenz-Einheit (ein Symbol auf einem Unterträger) wird als Resource Element (RE) bezeichnet. Bei der FDD Downlink-Framestruktur mit normalem zyklischen Präfix werden 12 aufeinander folgende Unterträger ($N_{\text{SC}}^{\text{RB}} = 12$) und 7 aufeinander folgende Symbole ($N_{\text{symb}}^{\text{DL}} = 7$) als Resource Block (RB) bezeichnet. Somit besteht ein RB aus 84 RE (12 Unterträger x 7 Symbole) und belegt 180 kHz im Frequenzbereich (12 x 15 kHz) bzw. 1 Slot (0,5 ms) im Zeitbereich.

Die Größe eines RB ist für alle Bandbreiten einheitlich. Bei konstantem Kanalabstand ist jedoch die Anzahl der RB von der eingestellten Kanalbandbreite abhängig. Im Frequenzbereich kann die Zahl der verfügbaren RB von 6 (bei Übertragungsbandbreite 1,4 MHz) bis 100 (bei Übertragungsbandbreite 20 MHz) reichen. Somit ist die Signalbandbreite immer etwas kleiner als die Kanalbandbreite; sie variiert von 1,08 MHz (6 RB) bis 18 MHz (100 RB).

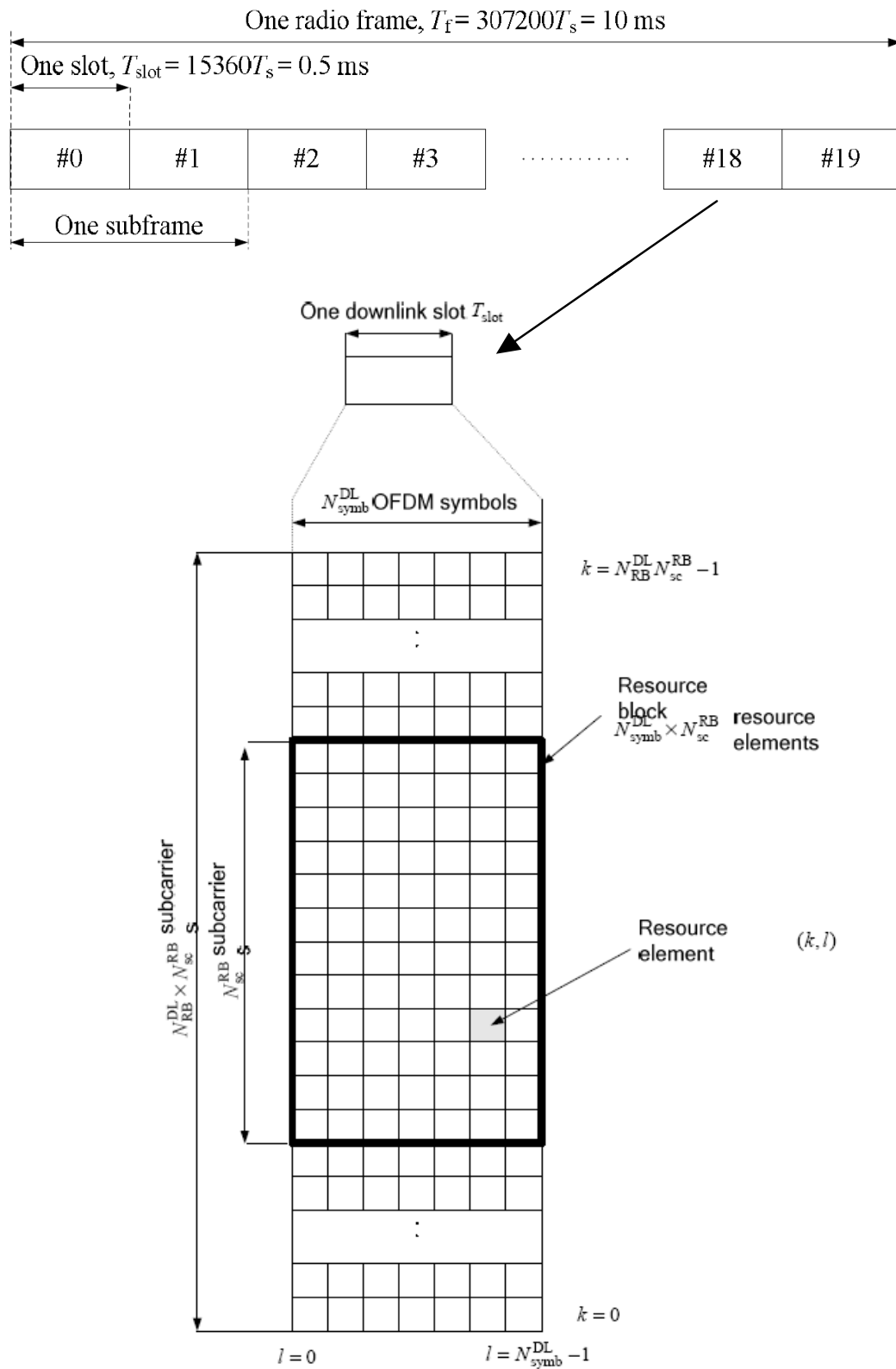


Bild 3.5: Frame- und Resource Block-Struktur von LTE FDD Downlink-Signalen, aus [ETSI 136.211]

Die Zuordnung der physikalischen Kanäle und Signale in den Frames lässt sich am besten mit Hilfe des Resource Grids beschreiben. Im Resource Grid werden die einzelnen Resource Elemente in ein Diagramm eingetragen, wobei die x-Achse die Zeit (bzw. Slotnummer) und die y-Achse die Frequenz (bzw. Nummer des Unterträgers) darstellt. In Bild 3.6 ist das

Resource Grid für ein Downlink FDD Signal (Einantennenkonfiguration, d.h. kein MIMO) bis zum ± 45 . Unterträger abgebildet (nach [BOO]). Die Bezeichnung der wichtigsten physikalischen Kanäle und Signale geht aus nachfolgender Tabelle hervor:

Bezeichnung	Beschreibung
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel: in jedem Subframe, sofern Nutzerdaten übertragen werden; Transport von Nutzerdaten
PBCH	Physical Broadcast Channel: 6 RB um Bandmitte, 4 Symbole im Slot 1; trägt zellspezifische Systeminfo und Access-Control Parameter
PDCCH	Physical Downlink Control Channel: in jedem Subframe; geht über alle RB; belegt 1-3 Symbole im ersten Slot jeden Subframes für Bandbreiten >1,4 MHz bzw. 2-4 Symbole sonst (Wert wird durch PCFICH festgelegt); Ressourcenzuweisung an UE (user equipment) für up- und downlink
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel: im ersten OFDM-Symbol jeden Subframes; legt die Zahl der OFDM-Symbole für den PDCCH fest
RS	Reference Signal: in jedem sechsten Unterträger; Symbol 0 und 4 in jedem Slot für Ein- und Zweiantennenkonfigurationen; für Zellauswahl und Kanalschätzung
P-SS	Primary Synchronization Signal: auf 62 Unterträgern um die Bandmitte auf Symbol 6 in Slot 0 und 10; wird vom UE zur Zeit- und Frequenzsynchronisation bei Zellsuche verwendet und trägt Sektorkennung der Basisstation
S-SS	Secondary Synchronization Signal: auf 62 Unterträgern um die Bandmitte auf Symbol 5 in Slot 0 und 10; Synchronisierungssignal für UE bei Zellsuche; beinhaltet frame timing (10 ms) und Cell-ID (BS-Kennung)

Tabelle 3.1: Bezeichnung der wichtigsten physikalischen Kanäle und Signale

Es sei an dieser Stelle besonders darauf verwiesen, dass die Synchronisierungssignale sowie der PBCH nicht den gesamten Frequenzbereich belegen. Unabhängig von der Signalbandbreite belegen P-SS und S-SS ± 31 Unterträger (d.h. 0,93 MHz) und der PBCH ± 36 Unterträger (d.h. 1,08 MHz). Die Referenzsignale erstrecken sich zwar über den gesamten Frequenzbereich, belegen aber nur jeden sechsten Unterträger.

Das in Bild 3.6 dargestellte Resource Grid repräsentiert ein Szenario mit maximalem Verkehr, bei dem alle Resource Elemente gefüllt sind. Sofern kein aktiver Verkehr im Netz läuft, sind die in Bild 3.6 grün dargestellten Resource Elemente des PDSCH entweder nicht belegt (weiß) oder teilweise mit Dummy-Daten gefüllt. Weiterhin ist zu beachten, dass die Anzahl der PDCCH OFDM-Symbole je Subframe für LTE-Signale mit einer Bandbreite größer als 1,4 MHz von eins bis drei variieren kann; in Bild 3.6 belegt der PDCCH drei Symbole.

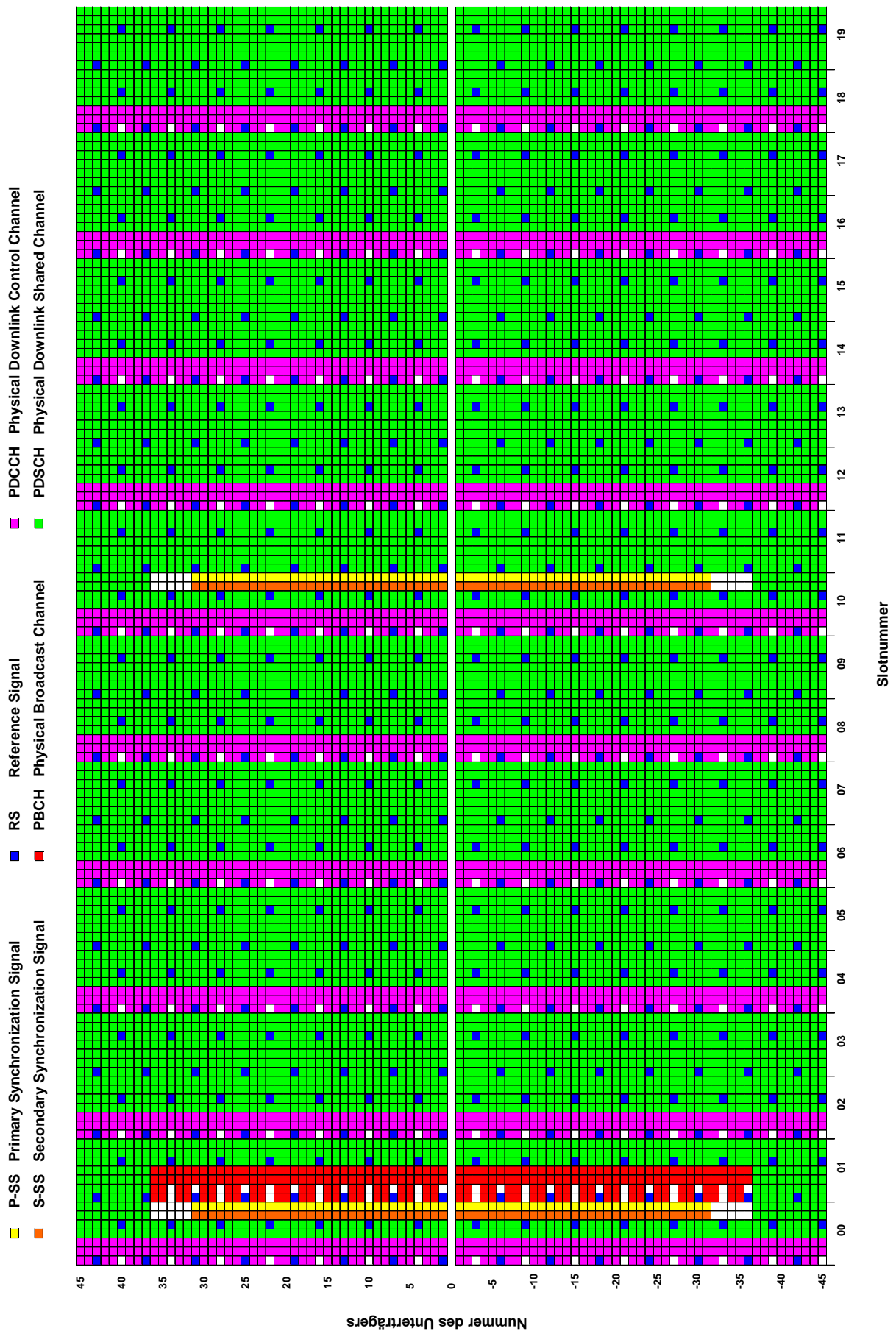


Bild 3.6: Resource Grid eines LTE Typ 1 Downlink Radio Frames, Einantennenkonfiguration, nach [BOO]

Für die Untersuchungen zur Signalstruktur im Zeit- und Frequenzbereich wurde mit einem LTE-Basisstationssimulator (Anritsu MT 8820C Radio Communication Analyzer) ein FDD-Signal bei 806 MHz, Kanalbandbreite 10 MHz (Frequenzbereich der Digitalen Dividende) erzeugt und leitungsgebunden mit einem Spektrumanalysator (Rohde & Schwarz FSP-7) analysiert. Die Analyse eines mit einem Signalgenerator erzeugten Signals unter Laborbedingungen hat gegenüber Feldmessungen mit einer Empfangsantenne den Vorteil, dass äußere Einflüsse (z.B. Veränderungen des Ausbreitungsweges durch Bewegung von Personen oder fahrende Autos) vermieden werden und definierte Verkehrsbedingungen (nur Signalisierung oder maximaler Verkehr) eingestellt werden können.

Bild 3.7 zeigt den Signalverlauf des LTE FDD Downlinksignals im Zeitbereich ohne Verkehr (nur Signalisierung). Der dargestellte Zeitausschnitt (10 ms) entspricht der Länge eines Radio Frames. Das Signal weist eine periodische, pulsartige Struktur auf, die durch die Signalisierungskanäle und -signale bedingt ist. Mit Hilfe des Resource Grids (Bild 3.6) ist es möglich, die gemessenen Immissionen den entsprechenden Signalen bzw. Kanälen zuzuordnen. Dies erfolgt in Bild 3.8, das eine Vergrößerung des mit einem roten Kreis in Bild 3.7 markierten Bildausschnitts darstellt.

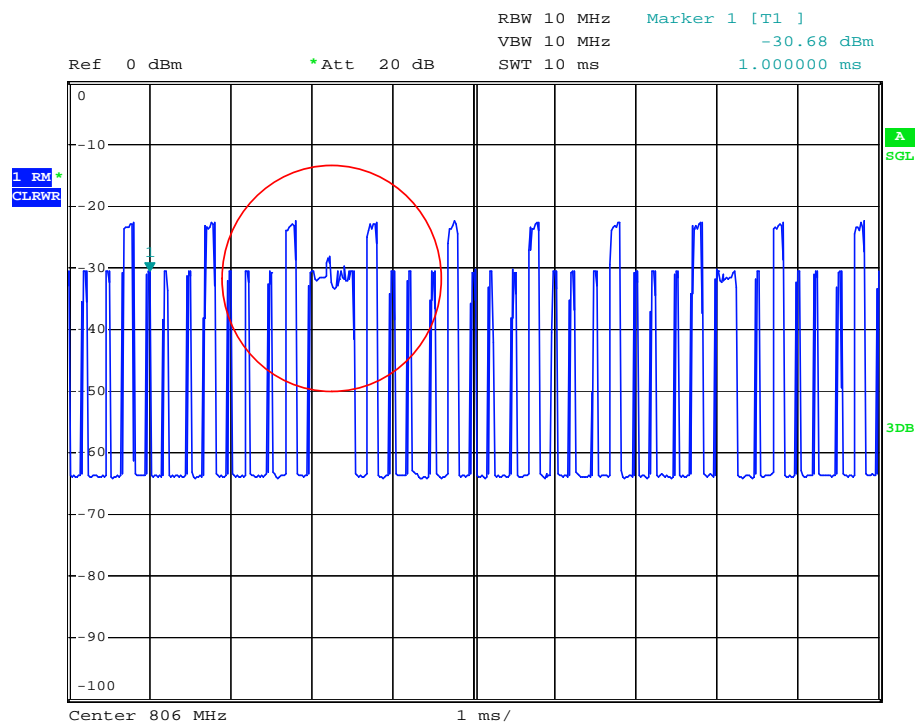


Bild 3.7: LTE FDD Signal im Zeitbereich ohne Verkehr

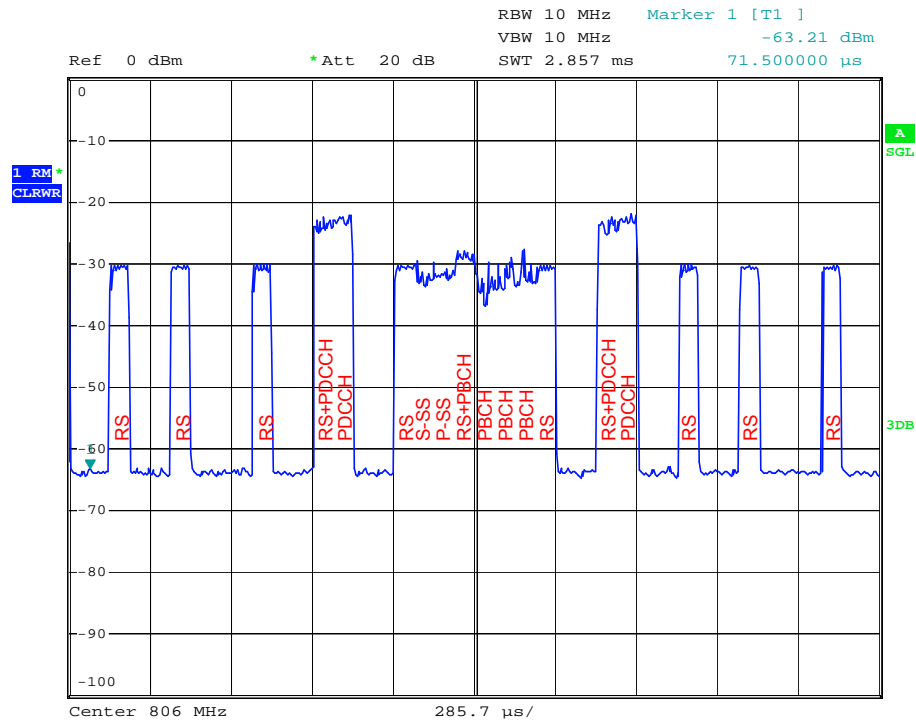


Bild 3.8: LTE FDD Signal – Detail aus Bild 3.7

Bei der Interpretation von Bild 3.7 und 3.8 ist zu beachten, dass bei der vorliegenden Messung offensichtlich der PDCCH nur jeweils zwei Symbole am Beginn jeden Subframes belegt (und nicht drei, wie in Bild 3.6 dargestellt). Der PDCCH kann bei einem LTE-Signal mit einer Bandbreite größer 1,4 MHz ein bis drei Symbole belegen; der Wert wird durch PCFICH festgelegt.

Wenn eine LTE Basisstation Nutzerdaten überträgt, werden die Lücken zwischen den Signalisierungsimpulsen zunehmend mit Verkehrsdaten aufgefüllt. Die Veränderung in der Zeitstruktur ist in Bild 3.9 dargestellt: Hier ist die Signalstruktur ohne Verkehr (blau) und diejenige mit maximalem Verkehr (rot) zusammen in einem Bild dargestellt. Es ist nun abhängig von der Anzahl der Nutzer, ihrer Kapazitätsanforderung und der Konfiguration des Schedulers der Basisstation, wie die Ressourcen auf die unterschiedlichen Nutzer aufgeteilt werden. Im Fall maximalen Datenverkehrs sind die Pulse von Bild 3.7 nicht mehr sichtbar und es ergibt sich quasi eine einheitliche Linie. In Abhängigkeit der Leistungskonfiguration der einzelnen Resource Elemente (EPRE, Energy per Resource Element) können einzelne Signalisierungsimpulse entweder aus dem Signal herausragen oder durch die Verkehrskanäle überdeckt werden. In Bild 3.9 ist eine Parameterkombination dargestellt, bei der im maximalen Verkehrszustand alle Symbole bis zur maximalen Amplitude des PDCCH „aufgefüllt“ sind.

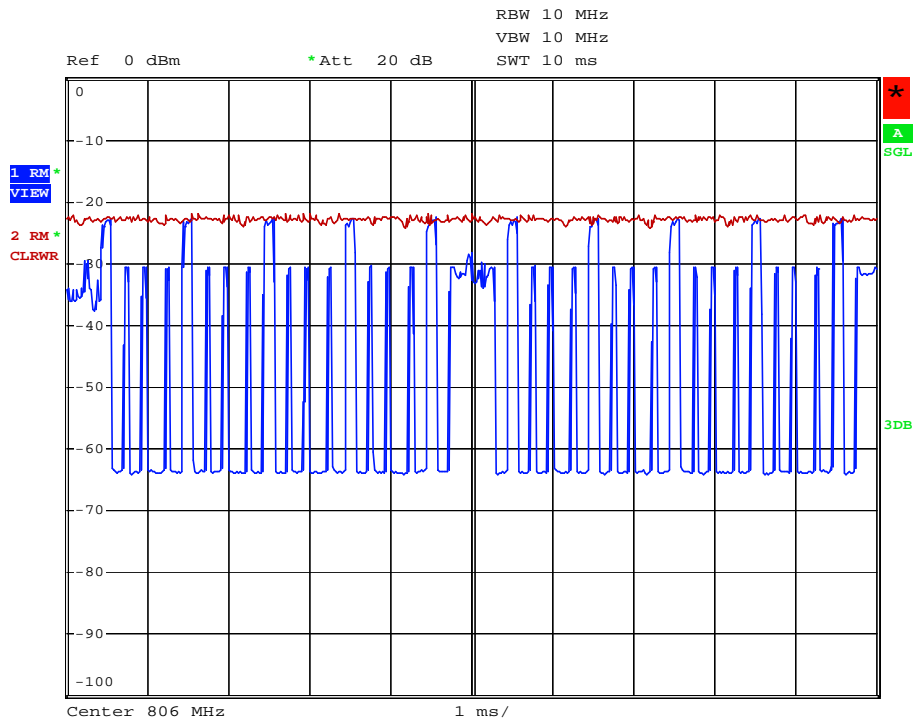


Bild 3.9: LTE FDD Signal im Zeitbereich ohne Verkehr (blau) und mit maximalem Verkehr (rot)

Bild 3.10 zeigt das LTE Signal ohne Verkehr im Frequenzbereich. Hier wurde bewusst eine kleine Auflösungsbandbreite gewählt, um die Form des Signals nicht zu verfälschen. Mit den beiden Markern 1 und 2 sind Beginn und Ende des Spektrums gekennzeichnet. Die ermittelte Signalbandbreite beträgt 9,0 MHz, wie sie exakt bei einem LTE-Signal mit einer Kanalbandbreite von 10 MHz zu erwarten ist (50 RB mit je 180 kHz).

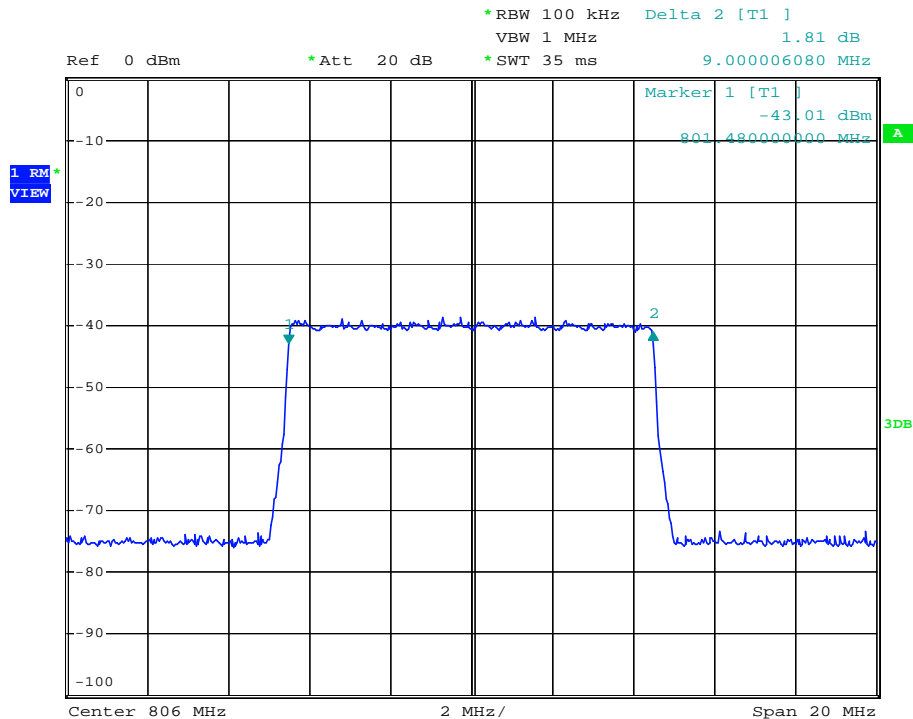


Bild 3.10: LTE FDD Signal ohne Verkehr im Frequenzbereich

Obwohl bei derzeit in Deutschland installierten Netzen primär FDD zum Einsatz kommt, wird nachfolgend kurz auf die zeitliche Struktur von LTE TDD Signalen eingegangen (Bild 3.11). Jeder Radio-Frame mit einer Länge von 10 ms besteht hier aus zwei Halbrahmen von je 5 ms Länge. Jeder Halbrahmen besteht aus fünf Subframes von je 1 ms Länge. Die unterstützten Uplink-Downlink Konfigurationen sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Hierbei bezeichnet „D“ einen Subframe für die Downlink-Übertragung und „U“ einen Subframe für die Uplink-Übertragung. „S“ ist ein spezieller Subframe, der zwischen der Umschaltung von Downlink zu Uplink benötigt wird. Er beinhaltet die drei Felder DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), GP (Guard Period) und UpPTS (Uplink Pilot Timeslot). Die Guard Period verhindert, dass sich empfangene und gesendete Signale überlagern. In LTE werden Uplink-Downlink Konfigurationen mit 5 ms und 10 ms Schaltpunkt-Periodizität unterstützt, d.h. die Umschaltung zwischen Downlink und Uplink (gekennzeichnet durch den „Special Frame“ S) kann alle 5 oder alle 10 ms erfolgen. Die Subframes 0 und 5 sowie DwPTS sind immer für die Downlink-Übertragung reserviert. UpPTS und der dem Special Frame nachfolgende Subframe sind immer für die Uplink-Übertragung reserviert.

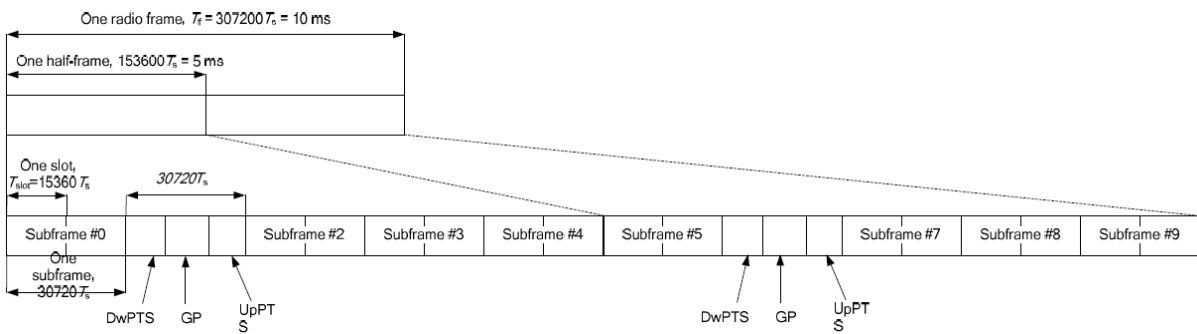


Bild 3.11: Frame-Struktur von LTE TDD Downlink-Signalen (für 5 ms Schaltpunktperiodizität); aus [ETSI 136.211]

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabelle 3.2: Uplink-Downlink Konfigurationen für LTE TDD, aus [ETSI 136.211]

Die bezüglich der Immission durch Basisstationen „worst case“ LTE TDD Konfiguration ist die Konfiguration 5, da hier mit acht Subframes die meisten Subframes für die Downlink-Übertragung vorgesehen sind.

3.2.2 Spektrale Methoden

3.2.2.1 Korrekte Messung

Die in den Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2 dargestellten Zusammenhänge basieren auf dem von der IMST GmbH im Rahmen des Projektes „Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen“ im Auftrag des IZMF [IZMF 10] entwickelten Messverfahren. Das Messverfahren wurde jedoch für vorliegendes Projekt grundlegend überprüft und erweitert sowie durch nachfolgend dargestellte Spektrumanalysator-Darstellungen ergänzt.

Wie bereits im letzten Abschnitt wurde für die folgenden Untersuchungen mit einem LTE-Basisstationssimulator (Anritsu MT 8820C Radio Communication Analyzer) ein FDD-Signal bei 806 MHz, Kanalbandbreite 10 MHz (Frequenzbereich der Digitalen Dividende) erzeugt und leitungsgebunden mit einem Spektrumanalysator (Rohde & Schwarz FSP-7) analysiert.

Detektor

Bild 3.12 zeigt den zeitlichen Verlauf eines LTE-Signals ohne Verkehr (nur Signalisierung), aufgenommen mit dem Sample-Detektor. Es ist zu erkennen, dass bedingt durch das Modulationsverfahren die Hüllkurve zeitlich stark schwankt. Es ergibt sich, vergleichbar z.B. mit UMTS oder DVB-T, ein rauschähnliches Signal (mit Unterbrechungen). Die Schwankungsbreite der Hüllkurve beträgt typisch etwa 15-25 dB, maximal ca. 30 dB.

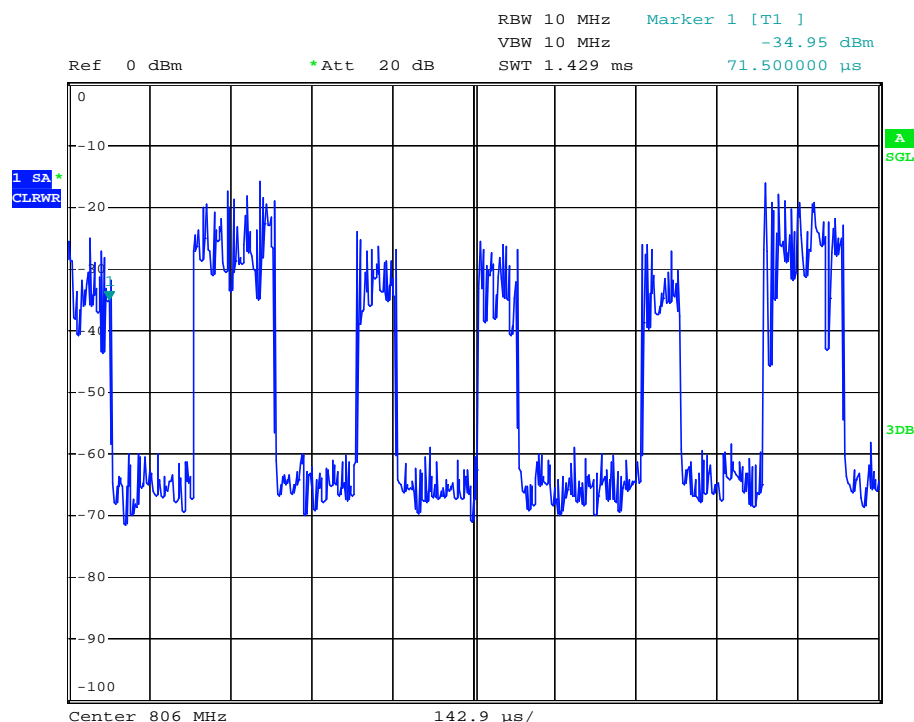


Bild 3.12: LTE-Signal im Zeitbereich, ohne Verkehr, Messung mit Sample-Detektor. Dargestellt ist eine Zeitspanne von 20 Symbolen.

Zeitliche Schwankungen (bezogen auf Zeiträume, in denen ein HF-Signal abgestrahlt wird), verursacht durch das Modulationsverfahren, werden durch den Crestfaktor beschrieben. Dieser gibt den Unterschied zwischen kurzzeitig auftretender Maximalleistung eines Signals und dessen mittlerer (effektiver) Leistung (nur gemittelt während des Signales, d.h. das

Tastverhältnis hat keinen Einfluss) an. Der Crestfaktor lässt sich beispielsweise als Unterschied der Messung mit Peak-Detektor und RMS-Detektor bestimmen. Diese Messungen sind in den Bildern 3.13 für ein LTE-Signal ohne Verkehr und in Bild 3.14 für ein LTE-Signal mit maximalem Datenverkehr dokumentiert. Der festgestellte Crestfaktor der gemessenen Signale beträgt etwa 11 dB. Bei Messungen an realen Stationen wurden Crestfaktoren zwischen 9 und 12 dB festgestellt.

Nach dem den Grenzwertempfehlungen von ICNIRP [ICNIRP 98] zugrunde liegenden thermischen Wirkungsmodell muss bei zeitlich schwankender Exposition (aufgrund der schnellen zeitlichen Leistungsschwankungen des Signals durch das Modulationsverfahren) eine zeitliche Mittelung der Exposition durchgeführt werden. Dies erfolgt am einfachsten mit dem RMS-Detektor am Spektrumanalysator. Wird die Messung stattdessen mit einem Peak-Detektor durchgeführt, so würde die richtlinienkonform zu bestimmende Immission um den Crestfaktor überbewertet.

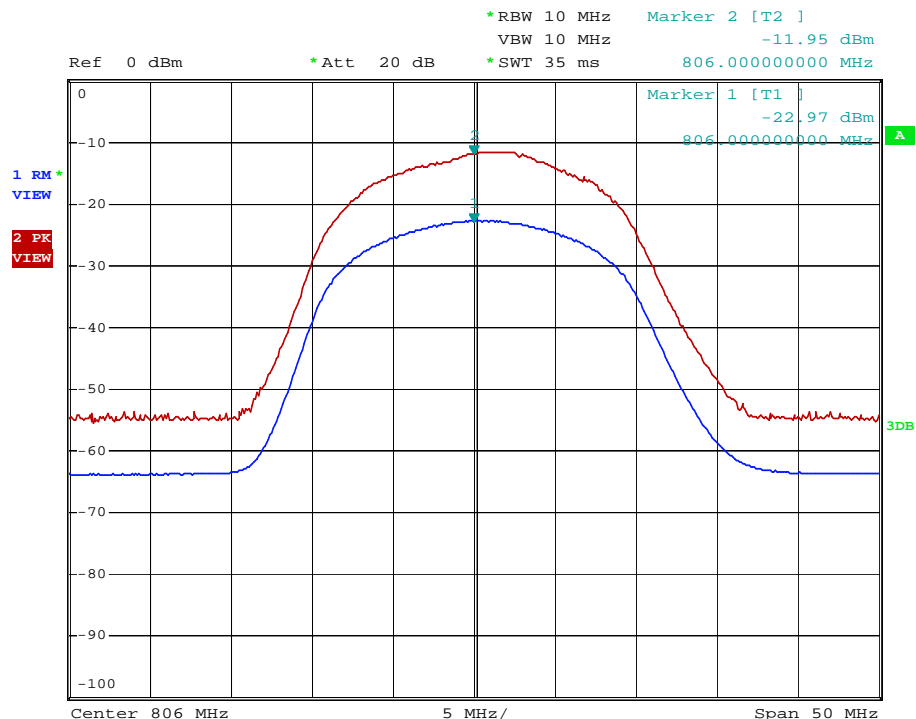


Bild 3.13: LTE-Signal im Frequenzbereich ohne Verkehr, Messung mit RMS-Detektor (blau) und Peak-Detektor (rot). Markerwerte bei 806 MHz: RMS -22,97 dBm, Peak -11,95 dBm.

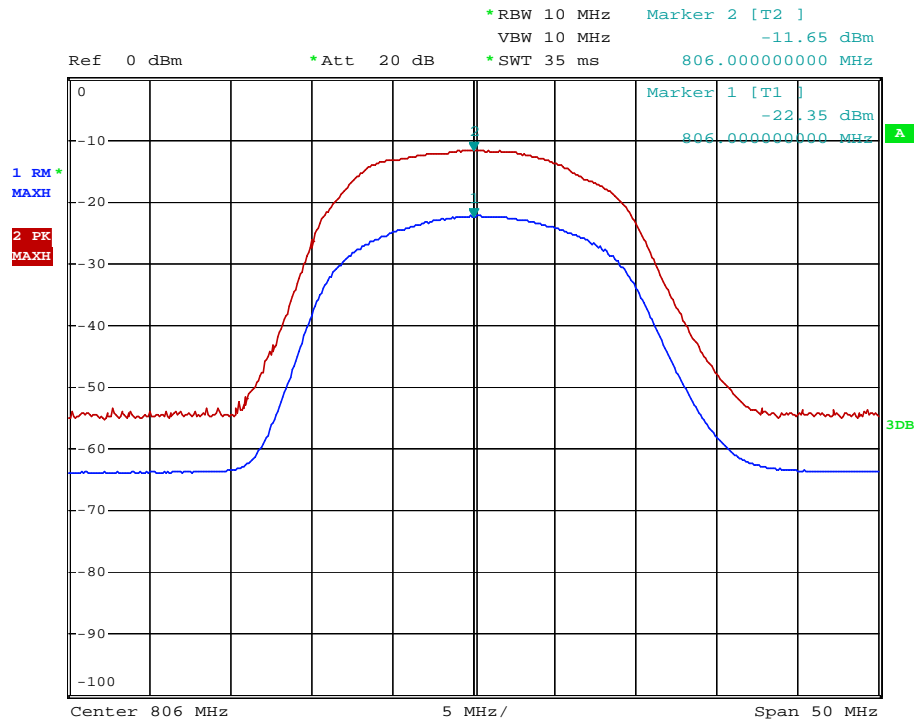


Bild 3.14: LTE-Signal im Frequenzbereich maximalem Verkehr, Messung mit RMS-Detektor (blau) und Peak-Detektor (rot). Markerwerte bei 806 MHz: RMS -22,35 dBm, Peak -11,65 dBm.

Die Bilder 3.13 und 3.14 zeigen auch, dass der RMS-Detektor nur die starken Signalschwankungen glättet, jedoch nicht durch die Signalpausen im Signal ohne Verkehr beeinflusst wird, da die RMS-Messergebnisse nahezu gleich sind. Hierfür ist jedoch die Wahl einer korrekten Sweeptime notwendig, damit das Messergebnis unabhängig von der aktuellen Auslastung wird. Auf die Sweeptime wird weiter unten noch detailliert eingegangen.

Auflösebandbreite (RBW)

Sinnvoller Weise sollte das LTE-Signal mit einer Auflösebandbreite gemessen werden, die mindestens so groß wie die Signalbandbreite ist, da es ansonsten zu einer Unterbewertung der Immission kommt. Dies ist in Bild 3.15 gezeigt, wo ein 10 MHz LTE-Signal (Kanalbandbreite 10 MHz, Signalbandbreite 9 MHz) mit drei unterschiedlichen Bandbreiten gemessen wurde. Am Signalgenerator wurde eine Leistung von -47,8 dBm pro 15 kHz Resource Element für alle Kanäle und Signale eingestellt. Bei einem 10 MHz Signal mit 600 Resource Elementen pro Symbol müsste dann die maximal angezeigte Leistung -20,0 dBm sein. Das HF-Kabel hat eine Dämpfung von 1,3 dB bei 806 MHz. Zu erwarten wäre am Analysator also eine maximale Leistung von -21,3 dB.

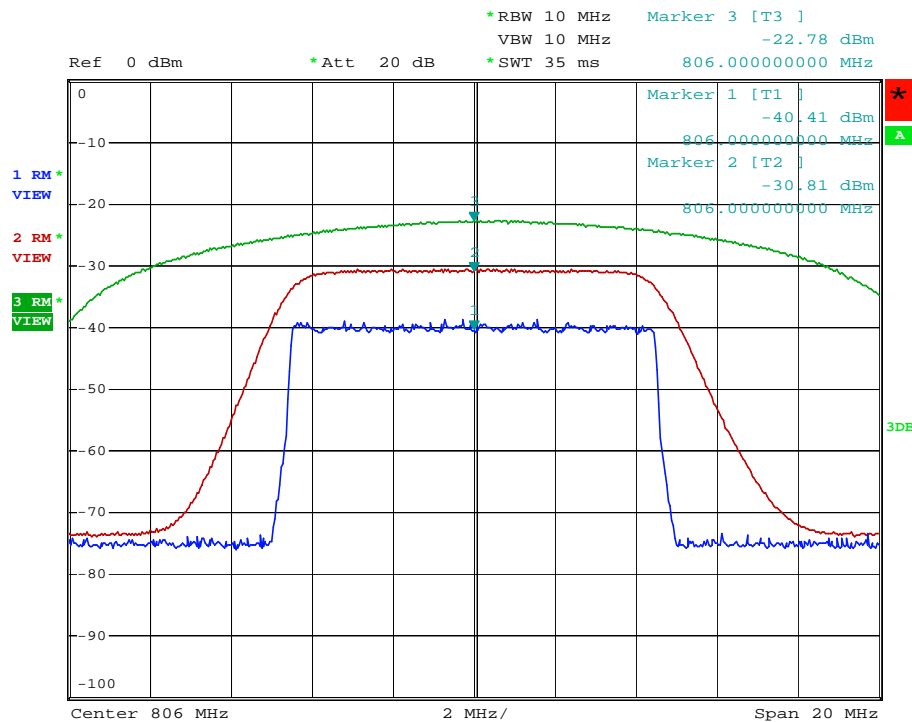


Bild 3.15: LTE-Signal im Frequenzbereich ohne Verkehr, Messung RBW 100 kHz (blau), 1 MHz (rot) und 10 MHz (grün). Markerwerte bei 806 MHz: 100 kHz -40,41 dBm, 1 MHz -30,81 dBm, 10 MHz -22,78 dBm.

Aus Bild 3.15 ist ersichtlich, dass die mit einer Auflösungsbandbreite von 100 kHz bzw. 1 MHz gemessenen Werte etwa 20 bzw. 10 dB zu niedrig sind. Die mit einer RBW von 10 MHz gemessene Leistung stimmt in etwa mit der zu erwartenden Leistung überein, ist aber etwa um 1,5 dB zu gering. Ursache hierfür ist die Auslegung des Auflösefilters im Spektrumanalysator als Gaußfilter mit begrenzter Flankensteilheit, der offensichtlich aufgrund seiner Filtercharakteristik einige Signalanteile nicht korrekt erfasst. Die Kanalleistungsmessung (RBW 300 kHz) ergab einen Anzeigewert von -21,4 dBm, der mit dem zu erwartenden Wert identisch ist. In Arbeiten einer Schweizer Arbeitsgruppe [FRI 11] wurde bei der Messung eines 20 MHz LTE-Signals (Signalbandbreite 18 MHz) mit einer RBW von 20 MHz eine Unterbewertung von 1,645 dB festgestellt, was gut mit dem in vorliegenden Untersuchungen festgestellten Wert von 1,5 dB übereinstimmt.

Allerdings ist die Fehlbewertung durch den gaußförmigen Auflösefilter bei praktischen LTE-Messungen weitaus geringer, wie im Folgenden dargestellt wird:

Das im Abschnitt 3.2.2.2 entwickelte Verfahren einer Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung geht von der Grundidee aus, dass (ähnlich wie z.B. bei GSM- oder UMTS-Mobilfunk-Basisstationen) die Immission durch lediglich diejenigen Kanäle bzw. Signale gemessen wird, die unabhängig von der aktuellen Verkehrsauslastung der Station mit konstanter Sendeleistung gesendet werden. Im Falle von LTE sind dies die Signalisierungen P-SS, S-SS, RS und der Kontrollkanal PBCH. Aus Bild 3.6 ergibt sich, dass P-SS, S-SS und PBCH nicht über die gesamte Bandbreite gehen, sondern einen etwa 1 MHz breiten Frequenzbereich um die Mittenfrequenz belegen. Genau genommen belegen P-SS und S-SS eine Bandbreite von 0,93 MHz (62 Unterträger) und PBCH eine Bandbreite von 1,08 MHz

(72 Unterträger). Zur Erfassung dieser Kanäle genügt es also, mit einer RBW von 1 MHz zu arbeiten, um diese Signale bzw. Kanäle zu detektieren.

Für einen 1 MHz großen Bereich in der Kanalmitte wäre mit den gewählten Einstellungen am LTE-Generator eine Leistung von etwa -30,9 dBm (inkl. Kabeldämpfung) zu erwarten. Der in Bild 3.15 angegebene Wert der spektralen Messung mit einer RBW von 1 MHz beträgt -30,8 dBm und ist somit in guter Übereinstimmung zum erwarteten Wert. Mit der Kanalleistungsmessung wurde mit einer RBW von 100 kHz ein Wert von -30,3 dBm ermittelt. Die Fehlbewertung bei der Messung mit gaußförmigen Auflösfiltern fällt hier also geringer aus. Grund ist die Tatsache, dass der Gaußfilter mit einer Auflösbandbreite von 1 MHz auch noch Signalanteile außerhalb der 1 MHz Bandbreite erfasst, die offensichtlich die Unterschätzung teilweise kompensieren.

Da sich bei handelsüblichen Spektrumanalysatoren keine Auflösfilter von 0,93 oder 1,08 MHz einstellen lassen, wurde mit einer Kanalleistungsmessung überprüft, was für Fehlbewertungen durch eine Auflösbandbreite von 1,0 MHz im Vergleich zu 0,93 bzw. 1,08 MHz entstehen. Wohingegen der Messwert bei 1,0 MHz -30,3 dBm beträgt, wurde bei 0,93 MHz -30,6 dBm und bei 1,08 MHz -29,9 dBm gemessen. Der Unterschied ist also mit 0,3 bis 0,4 dB gering.

Sweeptime (SWT)

Ein sehr wichtiger und bei nicht korrekter Auswahl fehlerträchtiger Aspekt bei Verwendung des RMS-Detektors ist die Einstellung einer angepassten Sweeptime (SWT).

Einerseits darf keine *zu große* Sweepzeit eingestellt werden, da dann eine zu große Verweilzeit pro Pixel entsteht [vgl. BOR 09]. Zu groß ist die Verweilzeit dann, wenn sie länger ist als die Dauer des zu messenden Pulses. In diesem Fall würden bei einer LTE-Basisstation ohne Verkehr für die rechnerische Bestimmung des RMS-Werts pro Pixel auch Abtastwerte aus Zeiten, in denen kein Signal vorhanden ist, herangezogen, d.h. durch ein „Hineinmitteln in die Pausen“ zwischen zwei Pulsen wird das Signal unterbewertet. Ist hingegen die Verweilzeit kleiner (oder maximal gleich) der Dauer des zu messenden Pulses, ergeben sich auf jeden Fall auch RMS-Werte, die ausschließlich aus Abtastwerten zum Zeitpunkt des Vorhandenseins des Pulses errechnet wurden, so dass bei Nutzung von „Maxhold“ wirklich der RMS-Wert des Signalpulses bestimmt wird.

Für die Messungen in diesem Bericht wurden Spektrumanalysatoren mit einer Horizontalauflösung von 501 Pixel verwendet. Da die Länge eines LTE-Symbols bei etwa 70 μ s liegt (d.h. 70 μ s ist die maximal erlaubte Verweilzeit pro Pixel), darf die Sweepzeit nicht größer als 35 ms gewählt werden. Für andere Spektrumanalysatoren mit anderen Horizontalaufösungen ergeben sich entsprechend andere Werte. Sofern P-SS und S-SS mit exakt gleicher Leistung gesendet werden und im Immissionsspektrum amplitudenmäßig dominieren, darf die Sweepzeit maximal doppelt so groß werden (da P-SS unmittelbar nach dem S-SS gesendet wird). Allerdings kann hiervon nicht automatisch ausgegangen werden.

Die Problematik der möglichen Unterbewertung durch eine zu große Sweeptime ist in Bild 3.16 demonstriert:

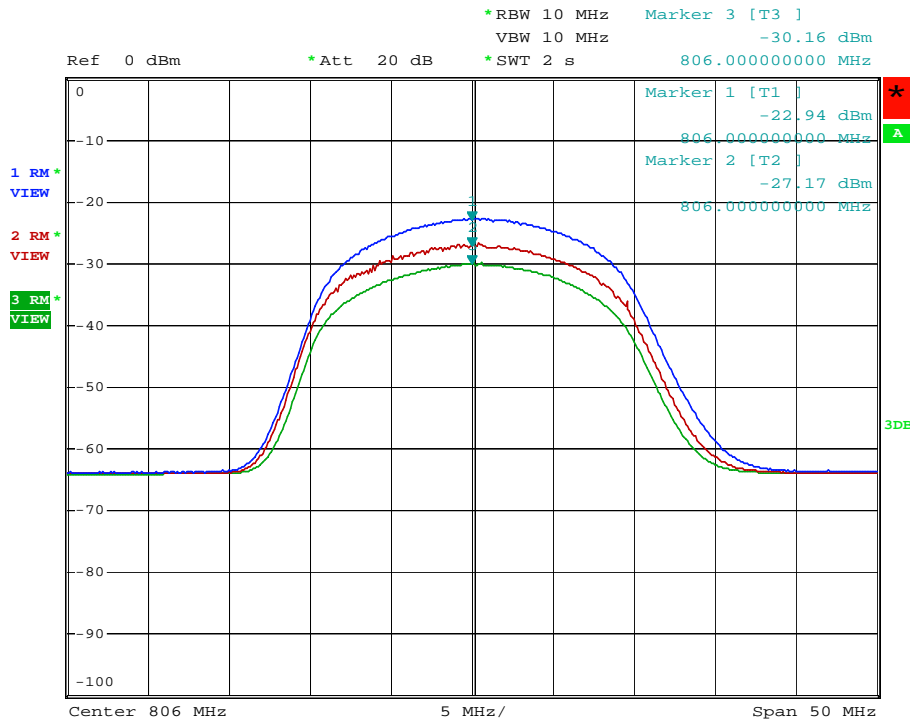


Bild 3.16: LTE-Signal im Frequenzbereich ohne Verkehr, Messung SWT 35 ms (blau), 200 ms (rot) und 2 ms (grün), jeweils Maxhold; Markerwerte bei 806 MHz: 35 ms -22,94 dBm, 200 ms -27,17 dBm, 2 s -30,16 dBm.

Das bereits oben beschriebene Generatorsignal ohne Verkehr wurde mit drei verschiedenen Sweeptimes gemessen. Bei einer Sweeptime von 2 s ergibt sich zur als „optimal“ abgeleiteten Sweeptime von 35 ms eine Fehlbewertung von 7,2 dB. Bei zunehmendem Verkehr wird die Unterschätzung der Immission geringer, da sich die „Lücken“ in der Signalstruktur mit Verkehr auffüllen und damit ein „Hineinmitteln“ in die Lücken reduziert wird. Nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse einer Messreihe unterschiedlicher Sweeptimes bei einem Signal ohne Verkehr und einem mit maximalem Verkehr.

Sweeptime	Anzeigewert ohne Verkehr	Anzeigewert max. Verkehr
2,5 ms	-20,48 dBm	-19,61 dBm
10 ms	-22,21 dBm	-21,65 dBm
35 ms	-22,77 dBm	-22,47 dBm
70 ms	-23,16 dBm	-22,53 dBm
100 ms	-24,13 dBm	-22,61 dBm
200 ms	-26,70 dBm	-22,65 dBm
1 s	-29,54 dBm	-22,76 dBm
2 s	-30,10 dBm	-22,79 dBm

Tabelle 3.3: Einfluss der Sweeptime auf die Anzeigewerte; LTE-Signal ohne Verkehr und mit max. Verkehr; Messung mit Spektrumanalysator, RMS, RBW=VBW=10 MHz, Maxhold.

Auf der anderen Seite darf die Sweeptime aber auch nicht *zu klein* gewählt werden. Der RMS-Detektor zeigt nur dann die mittlere Leistung an, wenn er den RMS-Wert aus einer genügend großen Anzahl an Abtastwerten (Samples) errechnen kann. Dies bedeutet, dass es bei sehr kurzen Sweepzeiten des Analysators zu Messfehlern kommen kann. Die Ursache dafür liegt in der nicht ausreichend guten Mittelung aufgrund einer zu geringen Verweilzeit pro Pixel, so dass sich eine Anzeige ergibt, die noch nicht ausreichend geglättet ist. Die entscheidende Frage ist, wie viele Samples für einen „stabilen“ RMS-Wert notwendig sind bzw. wie groß der mögliche Fehler wird, wenn weniger Samples zur Verfügung stehen. Diese Aussagen sind generell geräteabhängig.

Die Untersuchungen zu dieser Thematik wurden mit einem Spektrumanalysator FSP-7 von Rohde & Schwarz durchgeführt. Bei diesem Gerät erhält der RMS Detektor vom Analog Digital Konverter einen Samplestrom mit 32 MHz, d.h. es laufen alle 31,25 ns Samples ein. Allerdings wird das Signal vorher noch durch das Auflösefilter gefiltert, das eine bandbreitenabhängige Einschwingzeit besitzt. Bei sehr schmalen Filtern sind dann direkt aufeinander folgende Samples des 32 MHz Datenstroms, die innerhalb dieser Einschwingzeit erfasst werden, nicht mehr unabhängig voneinander und können zur Berechnung des RMS-Wertes nicht herangezogen werden. Die effektive Samplerate, die auch die Stabilität des Ergebnisses bestimmt, wird maßgeblich von der Filterbandbreite bzw. der Filtereinschwingzeit bestimmt. Für Gaußfilter ist die Einschwingzeit etwa gleich dem Reziproken der Filterbandbreite. Sofern mit einem Gauß-Auflösefilter der Bandbreite 1 MHz gemessen wird, hat das Filter eine Einschwingzeit von 1 μ s und es laufen bei einer Verweilzeit von 70 μ s pro Pixel (SWT=35 ms) insgesamt 70 unabhängige Samples ein, die für eine RMS-Berechnung zur Verfügung stehen.

In der Gerätebeschreibung der Rohde&Schwarz Spektrumanalysatoren der FSP-Reihe wird folgende Grafik angegeben, die die Wiederholgenauigkeit einer RMS-Kanalleistungsmessung bei einem Rauschsignal mit dem Crestfaktor von 10 dB (d.h. vergleichbar mit einem LTE-Signal) in Abhängigkeit von der Anzahl der unkorrelierten Samples angibt. Für die oben abgeleiteten 70 unkorrelierten Samples, die für eine Zeitbereichs- oder spektrale Messung pro Pixel relevant sind, kann eine 95 % Wiederholgenauigkeit von etwa $\pm 1,2$ dB abgelesen werden. D.h. durch die „begrenzte“ Anzahl der Samples ist mit einem Fehler von etwa 1,2 dB zu rechnen, die sich wegen des „Maxhold-Modus“ am ehesten als entsprechende Überbewertung der tatsächlichen Immission bemerkbar macht.

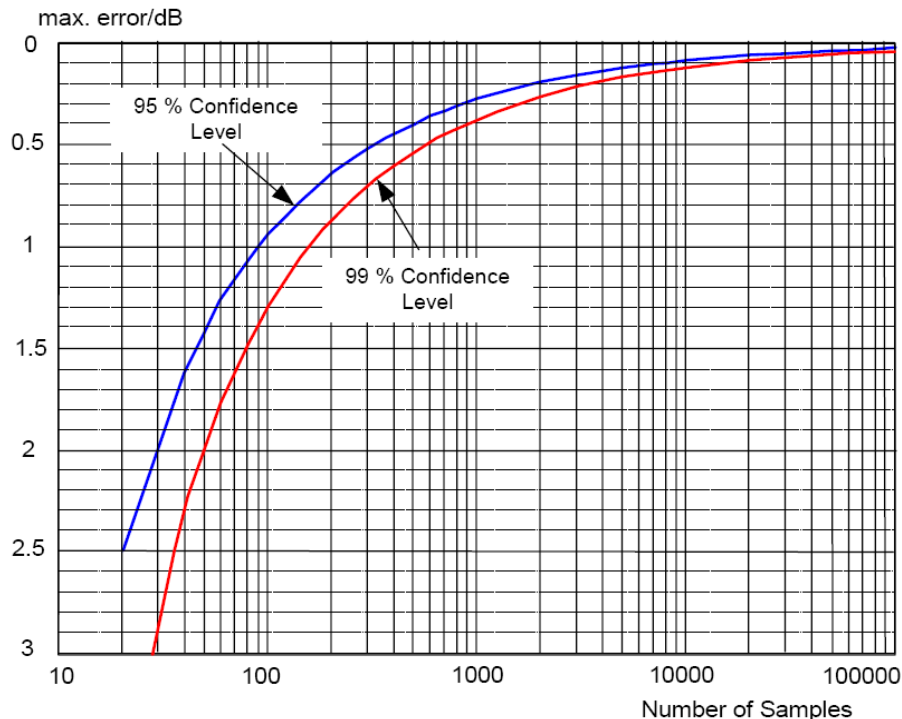


Bild 3.17: Wiederholgenauigkeit einer RMS-Kanalleistungsmessung an einem Rauschsignal, nach [ROS]

Eine Verringerung des Fehlers ließe sich erreichen, wenn die Messungen in der Betriebsart Kanalleistungsmessung durchgeführt würden. Sofern die Kanalbandbreite „bildschirmfüllend“ gewählt wird (Kanalbandbreite = Span), werden alle 501 Pixel zur Kanalleistungsmessung herangezogen. Somit wird auf den ersten Blick die Anzahl der unkorrelierten Samples um den Faktor 501 erhöht. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass bei der Kanalleistungsmessung Auflösebandbreiten von maximal 10 % der Kanalbandbreite zu verwenden sind. Eine Auflösebandbreite von beispielsweise 30 kHz (3 % der Kanalbandbreite von 1 MHz) würde bei einer SWT von 35 ms zu 1050 unkorrelierten Samples führen, was nach Bild 3.3 mit einem Fehler von 0,3 dB (bei 95 % Vertrauensniveau) verbunden ist.

Selbstverständlich sind die hier für die FSP-Reihe der Rohde & Schwarz Spektrumanalysatoren abgeleiteten Sachverhalte hersteller- bzw. modellabhängig, so dass sich für andere Analysatoren andere Sweepzeiten bzw. Messfehler ergeben. Für eine korrekte LTE Expositionsmessung mit anderen Geräten muss eine dem Gerät entsprechende Fehlerbetrachtung nach obigem Muster durchgeführt werden. Allerdings kann schon hier gesagt werden, dass Spektrumanalysatoren, die zur korrekten Berechnung des RMS-Wertes relativ lange Zeiten benötigen, zur Messung von LTE-Signalen nicht geeignet sind.

Messmodus

Die Messung kann wahlweise in den Modi Frequenzbereich (spektraler Modus), Zeitbereich (Zero Span) oder Kanalleistungsmessung (Channel Power) erfolgen. Speziell bei einem LTE-Signal ohne Verkehr (nur Signalisierung) ist jedoch in Verbindung mit der Schwenkmethode von einer Messung im spektralen Modus abzuraten: Aufgrund der gepulsten Signalcharakteristik kann es mehrere Sekunden dauern, bis sich das Spektrum vollständig aufge-

baut hat und der Wert in der Kanalmitte zuverlässig bestimmt werden kann. Dies ist vergleichbar mit der Messung anderer pulsartiger Signale (z.B. WLAN bzw. WiMAX ohne Verkehr). Hier wäre also die Messung im Zeitbereich oder in Kanalleistungsmodus zu bevorzugen, wobei allerdings jeweils eine feste Mittenfrequenz eingestellt werden und deswegen für jeden einzelnen LTE-Kanal ein eigener Schwenkvorgang durchgeführt werden muss.

3.2.2.2 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung

Grundidee der Bestimmung der Immission von LTE-Anlagen bei maximaler Anlagenauslastung ist es, die Immission durch Signale oder Kanäle zu bestimmen, die verkehrsunabhängig mit konstanter Sendeleistung abgestrahlt werden, und diese Immission mit dem Verhältnis von maximal möglicher Sendeleistung der Anlage zur Sendeleistung des gemessenen Signals/Kanals zu extrapolieren. Wie bereits im letzten Abschnitt erläutert, kommen als Signale bzw. Kanäle P-SS, S-SS, RS und PBCH in Frage. Welcher von diesen Signalen mit der höchsten Leistung gesendet wird (denn bei der Schwenkmethode wird üblicherweise der Spektrumanalysator auf Maxhold eingestellt und damit die Immission des leistungsstärksten Signals gemessen), ist entweder aus einer Voruntersuchung zu bestimmen (Messung mit Spektrumanalysator im Zeitbereich), oder beim jeweiligen Netzbetreiber zu erfragen.

Bei der Extrapolation sind folgende Beiträge zu berücksichtigen:

Zuerst muss eine Bandbreitenkorrektur zwischen Messbandbreite und der Signalbandbreite B_{Sig} nach der Formel $10 \cdot \log(B_{\text{Sig}}/B_N)$ erfolgen. B_N ist hierbei die äquivalente Rauschbandbreite des verwendeten ZF-Filters; diese entspricht bei Gaußfiltern näherungsweise der Auflösungsbandbreite. Wurde z.B. ein LTE-800 Signal (Kanalbandbreite üblicherweise 10 MHz, d.h. Signalbandbreite 9 MHz) mit einer Auflösungsbandbreite von 1 MHz gemessen, beträgt der Hochrechnungsfaktor 9,5 dB.

Weiterhin muss ein eventuell vorhandener Leistungsunterschied zwischen dem gemessenen *Maximalwert* des Signals/Kanals mit der größten Amplitude und der *mittleren Leistung* des LTE-Signals bei Volllast berücksichtigt werden. Zur Ermittlung dieses Korrekturfaktors müssen beim Netzbetreiber die EPRE-Einstellungen der Station abgefragt werden. Diese beinhalten die Information, ob die Resource Elemente aller Kanäle und Signalisierungen mit gleicher Leistung (dann wäre keine Korrektur notwendig) oder mit unterschiedlicher Leistung gesendet werden. Üblicherweise werden die EPRE-Daten einer LTE-Basisstation als relative Werte in Bezug zur EPRE des Referenzsignals RS angegeben. Gibt beispielsweise ein Betreiber an, dass die EPRE von RS, PBCH, PDCCH und PDSCH identisch sind, die EPRE der Synchronisierungen P-SS und S-SS aber um +3 dB erhöht ist, dann ist eine Korrektur wie folgt vorzunehmen: Ein LTE-800 Rahmen mit 10 MHz Bandbreite besteht aus 600 Unterträgern auf der Frequenzachse und 140 Symbolen auf der Zeitachse; zusammen ergeben sich also 84.000 Resource Elemente. Von den 84.000 Elementen sind $4 \times 62 = 248$ Elemente (P-SS und S-SS belegen je ± 31 Unterträger und kommen in einem Rahmen je zweimal vor) um +3 dB in ihrer Leistung gegenüber den anderen erhöht. Wird der (durch P-SS und S-SS bestimmte) gemessene Maximalwert der Immission mit 100 % bezeichnet, liegt der Mittelwert der Immission bei $((248 \cdot 100 \%) + (83.752 \cdot 50 \%)) / 84.000 = 50,148 \%$, d.h. vom ermittelten Messwert müssen 2,997 dB abgezogen werden, um auf den mittleren Immissi-

onswert zu kommen. An diesem Beispiel wird deutlich, dass eine Erhöhung der EPRE von P-SS und S-SS die mittlere Immission kaum beeinflusst. Diese wird von der EPRE der zahlenmäßig überwiegenden Resource Elemente des PDSCH dominiert.

Können detaillierte Informationen über die EPRE-Einstellungen von den Betreibern nicht oder nur teilweise zur Verfügung gestellt werden, ist trotzdem eine „worst-case“ Abschätzung möglich: Bei den bislang messtechnisch untersuchten Stationen gab es keinen Fall, bei dem die EPRE der zahlenmäßig dominanten Resource Elemente des PDSCH größer war als die EPRE von RS, P-SS oder S-SS. Im Sinne eines „worst-case“ Ansatzes sollte also wie beschrieben die Immission durch das leistungsstärkste Signal gemessen werden und eine Hochrechnung lediglich als Bandbreitenkorrektur (Messbandbreite auf Signalbandbreite) erfolgen, d.h. es wird hier vereinfacht davon ausgegangen, dass alle RE dieselbe (maximale) EPRE haben. Nach Aussagen der Netzbetreiber sind bei LTE-Basisstationen derzeit verschiedene EPRE-Einstellungen möglich. Beispielsweise kann die Sendeleistung gleichmäßig auf alle Resource Elemente aufgeteilt werden („Flat Power Control“). Möglich ist auch, dass die EPRE der PDSCH gegenüber P-SS, S-SS und RS abgesenkt ist. Es ist allerdings zu beachten, dass die derzeitige Parametrisierung der LTE-Stationen nicht unbedingt mit derjenigen übereinstimmen muss, die sich in den nächsten Monaten bzw. Jahren nach Aufnahme bzw. Ausweitung des Wirknetzbetriebs mit verstärkter Last im LTE-Netz ergibt.

Mit dem oben beschriebenen Verfahren steht ein taugliches Werkzeug zur Verfügung, das mit handelsüblichen Spektrumanalysatoren, wie sich auch zur Immissionsbestimmung z.B. an GSM-, UMTS- oder DVB-T Stationen eingesetzt werden, im gegenwärtigen Aufbauzustand der LTE-Netze eine zuverlässige Immissionsbestimmung bei maximaler Anlagenauslastung ermöglicht. Bei zunehmender Senderdichte ist es jedoch nicht mehr möglich, die Immissionen einer LTE Basisstation eines Betreibers von den Immissionen einer benachbarten Station desselben Betreibers im selben Frequenzband zu separieren, da beide auf derselben Frequenz arbeiten. Obwohl dies aus Strahlenschutzsicht aufgrund einer notwendigen Ermittlung der Gesamtimmission eher weniger relevant ist, kann es jedoch aus Risikokommunikationsaspekten notwendig sein, die Immission einer Station getrennt auszuweisen. Außerdem ist für den Fall, dass beide Stationen mit unterschiedlichen EPRE-Einstellungen betrieben werden, mit einer Überschätzung der tatsächlichen Immission zu rechnen, sofern für die Hochrechnung der größere Extrapolationsfaktor der beiden Stationen angewendet wird. Zu Unterschätzungen der Immission kann es hingegen kommen, wenn die Pulsmuster zweier benachbarter Stationen bzw. Sektoren (im Folgenden als Zellen bezeichnet) im selben Frequenzbereich zeitlich genau soweit verschoben sind, dass die Pulse der einen Zelle in die Lücken der zweiten Zelle fallen. In diesem Fall kann, abhängig von der Parametrisierung der beiden betroffenen Zellen, nicht mehr gewährleistet werden, dass der Spektrumanalysator die Summenimmission beider Zellen korrekt anzeigt; dies müsste dann durch entsprechende Sicherheitszuschläge kompensiert werden. Laut Netzbetreiber sind die Sektoren einer Station zeitlich synchronisiert, unterschiedliche Stationen aber nur frequenzsynchronisiert. Die Zeitsynchronisierung zumindest der Sektoren einer Station konnte in bisherigen Messungen bestätigt werden. Ob von benachbarten Stationen relevante Immissionsbeiträge am Messpunkt vorliegen und diese zeitlich in der Art verschoben sind, dass sie

in die Lücken des primär zu messenden Signals fallen, sollte also im Rahmen einer Vormessung im Zeitbereich untersucht werden.

Abhilfe schaffen hier Scannermessverfahren, die die Immissionsbeiträge einzelner Stationen desselben Betreibers korrekt ermitteln und von denen anderer Stationen separieren können. Für diese Aufgabenstellung gibt es auf dem Messtechnikmarkt erste Lösungen, die aus dem Gesamtsignal den Beitrag von RS, P-SS und S-SS decodieren und, da in diesen Signalisierungssignalen die Cell-ID der Basisstation bzw. der einzelnen Sektoren enthalten ist, für jede Basisstation bzw. Sektor separat darstellen können. Diese werden im Abschnitt 3.2.3 vorgestellt.

3.2.2.3 Messempfindlichkeit und Nachweisgrenzen

Ziel des nachfolgenden Abschnitts ist die Abschätzung von Empfindlichkeitsgrenzen der frequenzselektiven Messtechnik unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Abschnitten definierten Einstellparameter.

Die Messempfindlichkeit des spektralen Messsystems ist vom Spektrumanalysator, der eingesetzten Messantenne und vom HF-Verbindungskabel abhängig. Grundüberlegung ist hierbei, dass nur solche Expositionssignale gemessen werden können, die größer als das Grundrauschen des Messgerätes sind. Neben dem gewählten Gerätetyp sind für das Grundrauschen vor allem die Einstellparameter entscheidend, und zwar insbesondere die Auflösungsbandbreite, die Vordämpfung und der Detektortyp.

Für den Labor-Spektrumanalysator der Firma Rohde & Schwarz FSP-7 beträgt das Grundrauschen für den Parametersatz RBW=1 MHz, 0 dB Vordämpfung, RMS-Detektor mit 35 ms Sweepzeit, Maxhold etwa 14 dB μ V. Beim Zuschalten von 10 dB Vordämpfung steigt das Grundrauschen um ebenfalls 10 dB. Im Kanalleistungsmodus (RBW=30 kHz) beträgt bei 0 dB Vordämpfung das Grundrauschen bei einer Kanalbandbreite von 1 MHz etwa 17 dB μ V. Diese Werte sind mit 9,5 dB auf eine 9 MHz Signalbandbreite bzw. mit 12,6 dB auf eine 18 MHz Signalbandbreite zu extrapolieren.

Der maßgebliche Parameter der verwendeten Messantenne in der Empfindlichkeitsbetrachtung ist der so genannte Antennenfaktor K (in dB/m). Er bezeichnet als Wandlungsmaß das Verhältnis zwischen der elektrischen Feldstärke des Feldes, in dem sich die Antenne befindet, zur anliegenden Hochfrequenzspannung am Antennenfußpunkt. Die Antennenfaktoren sind im Allgemeinen frequenzabhängig. Für die logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142, die bislang von der IMST GmbH für LTE-Messungen eingesetzt wurde, nimmt der Antennenfaktor je nach LTE-Frequenzbereich Werte zwischen 22,9 und 32,2 dB/m an. Bei isotropen Antennen ist aufgrund der fehlenden Richtwirkung mit einem wesentlich größeren Antennenfaktor zu rechnen (z.B. Isotropantenne Rohde & Schwarz 30 MHz – 3 GHz etwa 35-47 dB/m).

Zusammen mit den typischen Kabeldämpfungen von geeigneten Messkabeln (hier z.B. Workhorse WHU18-1818-120 3 m) lassen sich hieraus die erzielbaren Empfindlichkeiten des gesamten Messsystems nach Tabelle 3.4 ableiten:

Frequenzbereich	Grundrauschen FSP-7	Antennenfaktor USLP-9142	Kabeldämpfung	erzielbare Nachweisgrenze für Signalbandbreite		
				1 MHz	9 MHz	18 MHz
LTE-800	14 dB μ V	22,9 dB/m	1,3 dB	38,2 dB μ V/m	47,7 dB μ V/m	50,8 dB μ V/m
LTE-1800	14 dB μ V	28,7 dB/m	1,8 dB	44,5 dB μ V/m	54,0 dB μ V/m	57,1 dB μ V/m
LTE-2000	14 dB μ V	30,4 dB/m	1,9 dB	46,3 dB μ V/m	55,8 dB μ V/m	58,9 dB μ V/m
LTE-2600	14 dB μ V	32,2 dB/m	2,2 dB	48,4 dB μ V/m	57,9 dB μ V/m	61,0 dB μ V/m

Tabelle 3.4: Erzielbare Empfindlichkeiten für die Messung von LTE-Signalen, Spektrumanalysator FSP-7 mit den Parametern RBW=1 MHz, VBW=10 MHz, RMS-Detektor, Sweeptime=35 ms, Eingangsdämpfung 0 dB, minimaler Referenzpegel, Empfangsantenne Schwarzbeck USLP-9142

Fazit:

- Mit der ausgewählten Messgerätekombination ist eine Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte sicher gegeben. Die Grenzwerte betragen in den LTE-Frequenzbereichen 38,7 V/m (bei 791 MHz; entspricht 151,7 dB μ V/m) bis 61 V/m (ab 2 GHz; entspricht 155,7 dB μ V/m). Hier besteht mindestens 94 dB Empfindlichkeitsreserve des Messsystems zu den Grenzwerten.
- Bei Verwendung von isotropen Antennen sinkt die Empfindlichkeit um mehr als 10 dB. Trotzdem ist auch hiermit noch ein sicherer Nachweise der Einhaltung der Grenzwerte gegeben.

3.2.2.4 Messunsicherheit

Jedes Messergebnis ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Diese Messunsicherheit muss durch das Messlabor bestimmt werden und ist im Prüfbericht anzugeben.

Die gesamte Messunsicherheit setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen:

- Messunsicherheit der Messeinrichtung: Hier werden alle instrumentbedingten Unsicherheiten zusammengefasst, also z.B. Messunsicherheiten des Messgerätes und von Zuleitungskabeln bzw. Antennen.
- Methodenbedingte Unsicherheit: Diese umfasst die Unsicherheit der Probenahme, die sich z.B. aus individuell unterschiedlichen Vorgehensweisen verschiedener Messpersonen bei der Abtastung des Messvolumens ergibt. Auch werden Unsicherheiten, die sich durch Verwendung der Messgeräte (insbesondere Antennen) nicht unter Laborbedingungen, sondern in realen Umgebungen ergeben, berücksichtigt.

Im Folgenden werden für die spektrale Messung diejenigen Teilbeiträge aufgelistet, die in die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit eingehen.

Messgerät:

Hier werden diejenigen Unsicherheitsbeiträge primär bezüglich der Amplitudengenauigkeit übernommen, die der Hersteller in der Produktdokumentation spezifiziert hat. Außerdem kommt die in Abschnitt 3.2.2.1 beschriebene Ungenauigkeit durch die begrenzte Anzahl von unkorrelierten Samples bei der Berechnung des RMS-Wertes hinzu.

Antenne

Ausschlaggebend ist hier die Kalibrierengenauigkeit der Antenne, die dem jeweiligen Kalibrierbericht zu entnehmen ist. Antennen werden in der Regel nur bei einigen ausgewählten Frequenzpunkten kalibriert, weswegen sich bei der Interpolation für dazwischen liegende Werte auch eine Unsicherheit ergibt. In [BOR 06] wurde herausgearbeitet, dass vor allem bei schwach richtenden oder isotropen Antennen der Messende, abhängig von Frequenz, Abstand, Polarisierung und Bodenbeschaffenheit, einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Hinzu kommen Fehler durch die nicht korrekte Erfassung der Polarisierung, inkorrekte Berücksichtigung aller Empfangsrichtungen und mögliche Unterschiede des Freifeldantennenfaktors in realen Umgebungen.

Bei vorliegender Unsicherheitsbetrachtung wird hierfür ein Beitrag von 2 dB unter der Voraussetzung des Einsatzes der log.-per. Antenne USLP-9142 angesetzt. Bei Verwendung von dipolartigen Antennentypen oder isotropen Kugelsonden ist dieser Unsicherheitsbeitrag anzupassen.

Kabel

Hier gilt das für die Kalibrierung der Antennen Gesagte.

Zusätzlich ergeben sich durch Anschluss des Kabels an Antenne und Spektrumanalysator Fehlanpassungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Für ein typisches frequenzselektives LTE-Messsystem (hier: Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSP-7, logarithmisch-periodische Antenne Schwarzbeck USLP-9142) kann beispielsweise folgendes Messunsicherheitsbudget nach Tabelle 3.5 aufgestellt werden.

Komponente	Einflussfaktor	Spezifizierte Unsicherheit [dB]	Verteilung	Divisor	Standardunsicherheit [dB]
FSP-7	Absolutpegel	0,2	Normal	2	0,10
FSP-7	Frequenzgang	0,5	Normal	2	0,25
FSP-7	Linearitätsabweichung	0,2	Rechteck	1,73	0,12
FSP-7	Samplezahl für RMS-Wert	1,2	Normal	2	0,6
Kabel	Absolutkalibrierung	0,2	Normal	2	0,10
Kabel	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
USLP-9142	Absolutkalibrierung	1,5	Normal	2	0,75
USLP-9142	Interpolation	0,1	Rechteck	1,73	0,06
Fehlanpassung	Kabel/FSP-7	0,16	U-förmig	1,41	0,11
Fehlanpassung	USLP-9142/Kabel	0,13	U-förmig	1,41	0,09
Fehlanpassung	USLP-9142/FSP-7	0,18	U-förmig	1,41	0,13
USLP-9142	Umgebung	2,0	Normal	2	1,0
Probennahme	Reproduzierbarkeit	1,8	Normal	2	0,9
Kombinierte Standardunsicherheit					1,70
Erweiterte Messunsicherheit (k=2)					3,40

Tabelle 3.5: Beispiel für ein Messunsicherheitsbudget bei spektraler LTE-Messung
Messung mit FSP-7 und USLP-9142

Die erweiterte Messunsicherheit für ein Vertrauensintervall von 95 % beträgt für dieses Beispiel etwa 3,4 dB. Diese Unsicherheit bewegt sich damit im für Hochfrequenz-Immissionsmessungen üblichen Bereich.

3.2.2.5 Besonderheiten der Feldanalysatorfamilie SRM-3000/-3006 von Narda

Seit einigen Jahren bietet die Firma Narda Safety Test Solutions ein speziell für EMF-Messungen entwickeltes frequenzselektives Messgerät (SRM-3000) an, das in seiner Standardkonfiguration aus einem Batterie betriebenen Grundgerät mit isotroper Messantenne besteht (Bild 3.18). Alternativ können jedoch auch einachsige Antennen für die Messung verwendet werden. Aktuell ist das zweite Modell dieser Messgerätefamilie auf dem Markt (SRM-3006). Da dieses Instrument im Bereich der EMF-Messtechnik inzwischen relativ weit verbreitet ist, es jedoch in Bezug auf Signalverarbeitung und Betriebsarten (Modi) teilweise etwas abweichende Funktionalitäten im Vergleich zu herkömmlichen Laborspektralanalysatoren aufweist, wurde es speziell bezüglich seiner Eignung für LTE-Immissions-

messungen untersucht. Dies geschah insbesondere vor dem Hintergrund einer aktuellen Publikation aus dem Hause Narda [KEL 11], in der u.a. detailliert auf die Messung von LTE-Signalen mit dem SRM-3006 eingegangen wird.

Zweck der Untersuchungen war die Klärung der Frage, ob auch mit dem SRM eine korrekte Messung der verkehrsunabhängigen Signale in der Mitte des LTE-Spektrums (insbesondere P-SS, S-SS, RS und PBCH) als Basis für die in Abschnitt 3.2.2.2 vorgestellte Extrapolation auf maximale Leistung möglich ist. Vergleichbar zu Abschnitt 3.2.2.1 wurden die für diese Aufgabe geeigneten Messmodi mit ihren dazugehörigen korrekten Einstellparametern erprobt. Durchgeführt wurden die Untersuchungen im Rahmen eines Ortstermins am Firmensitz von Narda Deutschland in Pfullingen. Als Signalquelle stand dort ein Signalgenerator der Firma Agilent (N5182A) mit LTE-Option zur Verfügung. Die Messungen wurden sowohl mit einem SRM-3006 als auch mit dem Vorläufermodell SRM-3000 durchgeführt. Zum Vergleich der Ergebnisse war zusätzlich ein Spektrumanalysator FSL-6 von Rohde & Schwarz verfügbar.



Bild 3.18 SRM-3000 (links) und SRM-3006 (rechts) von Narda.

In [KEL 11] wird für das SRM-3006 als bevorzugtes Messverfahren zur Bestimmung der Leistung der Synchronisationssignale (oder des PBCH) der Mode „Level Recorder“ empfohlen. Hierbei befindet sich das Messgerät im Empfängermodus, d.h. es ist auf eine feste Frequenz abgestimmt. Die Betriebsart ist somit vergleichbar mit dem „Zero Span“ herkömmlicher Analysatoren, jedoch ist die Ergebnisdarstellung etwas anders: Statt einer Darstellung des Leistungsverlaufs über der Zeit wird hier eine numerische Anzeige (ergänzt durch einen Bargraphen) verwendet (Bild 3.19). Als Auflösungsbreite (RBW) wird 800 kHz empfohlen. Damit wird am besten der zentrale Teil des LTE-Spektrums mit den leistungs-konstanten Synchronisations- und Signalisierungssignalen heraus selektiert.

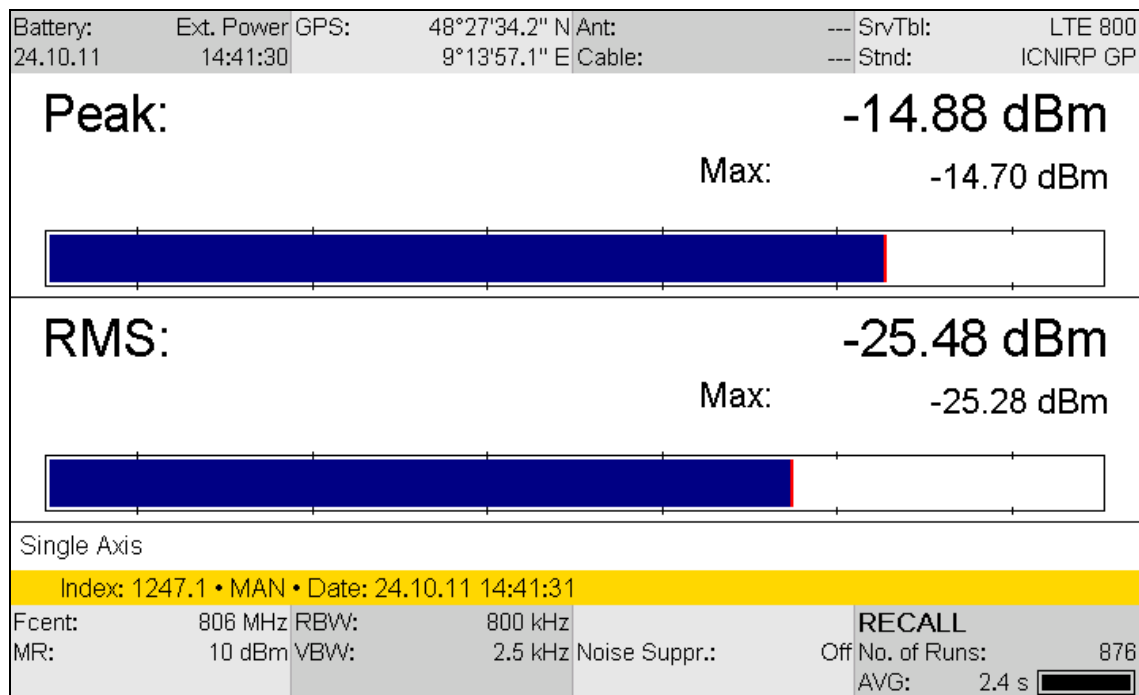


Bild 3.19 Ergebnisanzeige des SRM-3006 im „Level Recorder“ Mode.

Für die hier benötigten Leistungswerte beispielsweise der Synchronisationssignale (gemittelt über die Dauer der Signale, also etwa 143 μ s) ist die „Peak“-Anzeige des Displays auszuwerten. Die „RMS“-Anzeige liefert den Mittelwert der Leistung innerhalb eines größeren Zeitraums (in Bild 3.19 ist eine Mittelungszeit von 2,4 s gewählt), so dass bei nicht hundertprozentiger Verkehrsauslastung der „RMS“-Wert immer kleiner ausfällt, als der „Peak“-Wert. Bei Vollaustung (und gleicher Leistung in allen Resource Elementen) verschwindet die Differenz zwischen den beiden Anzeigewerten.

Der ergänzend angegebene „Max“-Wert (zusätzlich dargestellt als rote Linie im Bargraphen) gibt den seit Beginn der Messung aufgetretenen Größtwert der Leistung an. Dieser wird insbesondere bei Verwendung der „Schwenkmethode“ für die weitere Auswertung verwendet, da er den im Messvolumen aufgetretenen Maximalwert der Immission wiedergibt.

Zur Glättung der modulationsbedingten kurzzeitigen Leistungsschwankungen der zu messenden Synchronisationssignale ist die „RMS“-Darstellung somit nicht geeignet, da diese in die Nullstellen des Signals hinein mitteln würde. Für die Mittellung vergleichsweise kurzer Signale wurde im SRM-3006 eine zweite Glättungsfunktion implementiert, nämlich die Signalglättung mittels eines zusätzlich aktivierten Videofilters. Im Unterschied zu herkömmlichen Analysatoren wirkt das Videofilter beim SRM-3006 vor der Logarithmierung, so dass linear über die Leistung gemittelt wird, was die korrekte Vorgehensweise darstellt. Bei herkömmlichen Analysatoren befindet sich das Videofilter hinter dem Logarithmierer, so dass bei Verwendung des Videofilters eine Verfälschung des Glättungsergebnisses auftritt, da ein Mittelwert über dB-Werte gebildet wird.

Selbst bei Signalen mit modulationsbedingtem großen Crestfaktor, aber kontinuierlicher Leistungsabgabe (z.B. DVB-T) ist die Glättung mittels Videofilter die einzig korrekte Alternative, falls für die Suche des räumlichen Maximums die „Schwenkmethode“ angewendet wird.

Würde man hingegen den „RMS“-Wert in der „Level-Recorder“-Anzeige ablesen, hätte man eine Kombination aus zeitlicher Mittelung, welche zwar die gewünschte Glättung des Signals erzielen würde, jedoch wird aufgrund der langen Mittelungszeit (je nach Einstellung typ. mindestens mehrere Sekunden) und der gleichzeitigen Bewegung der Antenne zusätzlich eine räumliche Mittelung der einzelnen Messwerte erfolgen, so dass nicht mehr das räumliche Maximum sondern ein mehr oder weniger undefinierter Raummittelwert angezeigt wird.

Folgende Einstellungen werden in [KEL 11] für die Messung von LTE-Signalen mit dem SRM-3006 empfohlen (Bild 3.19):

- Betriebsmode: „Level Recorder“
- f_{cent} : Mittenfrequenz des zu messenden Kanals
- RBW: 800 kHz
- VBW: 2,5 kHz oder 1,6 kHz (dient der Signalglättung)
- Ablesen der „Peak“-Werte am Display des Analysators.

Bei der in Bild 3.19 dokumentierten Messung ergibt sich ein Ablesewert von -14,7 dBm.

Aufgrund der endlichen Messzeit und der damit bedingten endlichen Anzahl von Messwerten, die in die Signalmittelung einfließen, ist die Mittelwertbildung nie hundertprozentig perfekt, es bleibt - insbesondere bei Verwendung der Max-Hold-Werte - immer eine geringfügige Überbewertung der Immission (siehe dazu auch die Ausführungen zum Detektortyp in Abschnitt 3.1.2). Nach [KEL 11] muss der Ablesewert noch um 0,94 dB verringert werden, wenn man die bei einer VBW von 2,5 kHz vorhandene leichte Überbewertung noch korrigieren will. Tiefergehende, in [KEL11] noch nicht publizierte Untersuchungen von Narda zeigen, dass bei einer Videobandbreite von 1,6 kHz auf den Korrekturfaktor von 0,94 dB verzichtet werden kann (allerdings unter Inkaufnahme einer geringfügig größeren Messunsicherheit).

Im Rahmen des Ortstermins bei Narda wurden Vergleichsmessungen zwischen der Messung mit einem herkömmlichen Analysator (FSL-6) und dem SRM-3006 durchgeführt. Als Testsignal wurde ein LTE-Signal mit 20 MHz Kanalbandbreite (18 MHz Signalbandbreite) und einer Mittenfrequenz von 806 MHz verwendet. Die Messungen wurden jeweils für die beiden Extremsituationen „kein Verkehr“ und „maximaler Verkehr“ vorgenommen. Im Modus „kein Verkehr“ wurden als stärkste Signale die Synchronisationssignale eingestellt, alle anderen regelmäßig auftretenden Signale wurden stark abgesenkt. Die Ergebnisse der Messungen sind in den folgenden Tabellen dokumentiert:

Bandbreiteneinstellungen am SRM-3006	RBW = 800 kHz; VBW = 2,5 kHz	RBW = 800 kHz; VBW = 1,6 kHz
Anzeigewert (Max-Peak)	-14,70 dBm	-15,50 dBm
Korrekturfaktor aufgrund nicht 100%iger RMS-Glättung	-0,94 dB	0 dB
Extrapolation auf B = 930 kHz	+0,83 dB	+0,83 dB
Extrapolation auf die volle Signalbandbreite (Hier: B = 18 MHz)	+12,9 dB	+12,9 dB
Ergebnis:	-1,91 dBm	-1,77 dBm

Tabelle 3.6 Beispielhafte Ergebnisauswertung einer LTE-Messung mit dem SRM-3006 (Bestimmung der Leistung der Synchronisationssignale mittels der Betriebsart „Level Recorder“ und Extrapolation auf die volle Signalbandbreite; Testsignal mit einer Signalbandbreite von 18 MHz; kein Verkehr).

Der in den Tabellen 3.6 und 3.7 aufgeführte Extrapolationsfaktor von 0,83 dB ergibt sich aus der Tatsache, dass das Synchronisationssignal eine Bandbreite von 930 kHz belegt, es jedoch nur mit einem Gaußfilter der Bandbreite 800 kHz (was einer äquivalenten Rauschbandbreite von 768 kHz entspricht) gemessen wird. Der Extrapolationsfaktor errechnet sich somit zu $10 \cdot \log(930/768) = 0,83$ dB.

Um schließlich auf maximale Immission zu extrapolieren, ist das Ergebnis für B = 930 kHz noch mit $10 \cdot \log(\text{Signalbandbreite} / 930 \text{ kHz})$ zu vergrößern. Bei einem 18-MHz-Signal sind somit noch 12,9 dB zu addieren.

Der Vergleich mit dem FSL-6 (Zero Span, RBW=1 MHz, VBW= 10 MHz, RMS-Detektor, SWT=35 ms) ergab einen auf 18 MHz extrapolierten Wert von -1,65 dBm. Die Abweichung zur Messung mit dem SRM-3006 beträgt somit -0,26 bzw. -0,12 dB. Somit kann also von einer guten Übereinstimmung der Messergebnisse gesprochen werden.

Die Resultate der Messung von LTE-Signalen mit maximalem Verkehr sind in Tabelle 3.7 dokumentiert. Das Testsignal wurde so eingestellt, dass die Leistung in allen Resource Elementen gleich ist.

Bandbreiteneinstellungen am SRM-3006	RBW = 800 kHz; VBW = 2,5 kHz	RBW = 800 kHz; VBW = 1,6 kHz
Anzeigewert (Max-Peak)	-13,53 dBm	-13,90 dBm
Korrekturfaktor aufgrund nicht 100%iger RMS-Glättung	-0,94 dB	0 dB
Extrapolation auf B = 930 kHz	+0,83 dB	+0,83 dB
Extrapolation auf die volle Signalbandbreite (Hier: B = 18 MHz)	+12,9 dB	+12,9 dB
Ergebnis:	-0,74 dBm	-0,17 dBm

Tabelle 3.7 Beispielhafte Ergebnisauswertung einer LTE-Messung mit dem SRM-3006 (Bestimmung der Leistung der Synchronisationssignale mittels der Betriebsart „Level Recorder“ und Extrapolation auf die volle Signalbandbreite; Testsignal mit einer Signalbandbreite von 18 MHz; maximaler Verkehr).

Der Vergleich mit dem FSL-6 ergab einen auf 18 MHz extrapolierten Wert von +0,35 dBm. Die Abweichung zur Messung mit dem SRM-3006 beträgt somit -1,09 bzw. -0,52 dB. Die Übereinstimmung mit der Referenz ist für dieses Testsignal also etwas schlechter.

Bei beiden Testsignalen liefert die Messung mit einer VBW von 1,6 kHz ein Ergebnis, das besser mit der Referenzmessung übereinstimmt als bei einer VBW von 2,5 kHz.

Obige Auswertung wurde mittels Signalgenerator und direkt mit diesem über Kabel verbundenem Analysator durchgeführt und repräsentiert damit eine Feldstärkemessung unter Verwendung einer einachsigen Antenne. Verwendet man - wie beim SRM-3006 häufig der Fall - eine isotrope Antenne für die Messungen, so wird das LTE-Signal nicht mehr unterbrechungsfrei gemessen, sondern es werden die Signale der drei orthogonalen Messdipole in der Isotropantenne nacheinander erfasst. Zusätzlich ergibt sich eine gewisse Totzeit, die für das Umschalten von Dipol zu Dipol benötigt wird. Aufgrund dieser geänderten Erfassungsart (Pro Messung werden nun weniger Frames erfasst, als bei der einachsigen Variante) ergibt sich nach [KEL 11] bei der Verwendung einer Videobandbreite von 2,5 kHz ein etwas anderer Korrekturfaktor, der die Unvollkommenheit der RMS-Glättung berücksichtigt, von 0,73 dB (statt 0,94 dB bei der einachsigen Messung). Wählt man hingegen eine Videobandbreite von 1,6 kHz, kann der Korrekturfaktor wieder zu Null gesetzt werden.

Das SRM-3006 bietet zusätzlich auch die Möglichkeit, mehrere Funkkanäle gleichzeitig zu messen. Dies wird in der Betriebsart „Safety Evaluation“ ermöglicht. Beispielsweise kann man, wie im Bild 3.20 dargestellt, in diesem Messmode den zentralen Teil des Spektrums (B = 930 kHz) für die drei im LTE-800-Band in Deutschland aktuell in Betrieb befindlichen LTE-Anlagen mit den Mittenfrequenzen 796, 806 und 816 MHz (Signalbandbreite jeweils 9 MHz) mit steilen Kanalfiltern gleichzeitig erfassen.

Battery:	Ext. Power	GPS:	50°6'22.8" N	Ant:	3AX 0.4-6G	SrvTbl:	LTE 800
30.10.11	19:34:47		11°27'28.1" E	Cable:	---	Std:	ICNIRP GP
Table View: Detailed							
Index	Service	Fmin	Fmax	Max			
1	Srv_0000	795.535 000 MHz	796.465 000 MHz	65.58 dBµV/m			
2	Srv_0001	805.535 000 MHz	806.465 000 MHz	78.77 dBµV/m			
3	Srv_0002	815.535 000 MHz	816.465 000 MHz	65.19 dBµV/m			
Others				83.82 dBµV/m			
Total				84.33 dBµV/m			
Isotropic							
Safety Evaluation							
MR:	120 dBµV/m	RBW:	30 kHz	Sweep Time:	366 ms	Progress:	<input type="checkbox"/>
				Noise Suppr.:	Off	No. of Runs:	148
				AVG:	6 min		<input type="checkbox"/>

Bild 3.20 Ergebnisanzeige des SRM-3006 im „Safety Evaluation“ Mode. Messung der zentralen Teile der Signalspektren im LTE-800-Bereich (Mittenfrequenzen: 796, 806 und 816 MHz). Hier: Signal bei 806 MHz vorhanden, in den anderen beiden Kanälen nicht.

Die Signalglättung wird durch eine ausreichend kleine RBW sichergestellt [KEL 05], die hier mit 30 kHz etwa drei Prozent der Bandbreite des gemessenen Signals beträgt.

Diese Messmethode hat den Vorteil, dass mehrere LTE-Signale in einem Messdurchgang analysiert werden, während im „Level Recorder“-Mode (so wie auch in der Zero-Span-Betriebsart bei herkömmlichen Analysatoren) immer nur ein Kanal gemessen werden kann. Der nächste Kanal kann erst nach Ändern der Mittenfrequenz erfasst werden. Auch für Nutzer des Vorgängermodells (SRM-3000) ist die Betriebsart „Safety Evaluation“ von Bedeutung, da in diesem Modell der „Level Recorder“-Mode noch nicht implementiert ist, und somit auch nicht für LTE-Messungen zur Verfügung steht.

Ein Nachteil des „Safety Evaluation“-Mode liegt darin, dass die einzelnen LTE-Signale nicht permanent, sondern immer nur ausschnittsweise gemessen werden. Dies macht sich insbesondere dann negativ bemerkbar, wenn eine sehr große Zahl an verschiedenen LTE-Kanälen mittels „Safety Evaluation“ gleichzeitig gemessen werden soll. Es kann dann vorkommen, dass in Situationen, bei denen von der Anlage nur die Signalisierungssignale abgegeben werden, eine vergleichsweise lange Zeit (> 30 s) verstreicht, bis wirklich der größtmögliche Signalwert (z.B. der Synchronisationssignale) erfasst wird, da das Auftreten dieses kurzen Signals (ca. $143 \mu\text{s}$ innerhalb von 5 ms bei den Synchronisationssignalen) mit dem Zeitpunkt der Messung genau dieses Kanals zusammentreffen muss. In diesem Fall ist von der Anwendung der Schwenkmethode abzuraten und nur die Messung mittels Stativ und ausreichend langer Wartezeit zu empfehlen. Soll die Schwenkmethode angewendet werden, sollte jeweils immer nur ein Kanal gemessen werden (dies lässt sich am Gerät entsprechend einstellen), so dass die Messzeit für das Signal maximiert ist. Zusätzlich sollte der Schwenkvorgang ausreichend langsam durchgeführt werden.

Im Rahmen der Erprobungsmessungen bei Narda wurden die vom Generator erzeugten LTE-Signale mittels der Betriebsart „Safety Evaluation“ gemessen, Geräteeinstellungen wie in Bild 3.20 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.8 dokumentiert.

Testsignal	Kein Verkehr	Maximaler Verkehr
Anzeigewert (Max-Peak)	-12,85 dBm	-11,73 dBm
Extrapolation auf die volle Signalbandbreite (Hier: B = 18 MHz)	+12,9 dB	+12,9 dB
Ergebnis:	0,05 dBm	1,17 dBm

Tabelle 3.8 Beispielhafte Ergebnisauswertung einer LTE-Messung mit dem SRM-3006 (Bestimmung der Leistung der Synchronisationssignale mittels der Betriebsart „Safety Evaluation“ und Extrapolation auf die volle Signalbandbreite; Testsignal mit einer Bandbreite von 18 MHz; maximaler Verkehr).

Lieferten die Messungen in der Betriebsart „Level Recorder“ immer geringfügig niedrigere Werte als die Referenzmessung mit dem Spektrumanalysator, ergeben sich nun etwas höhere Messwerte (Unterschiedsfaktor 1,7 bzw. 0,82 dB). Zurückzuführen ist dies vermutlich auf die Tatsache, dass die gewählte RBW von 30 kHz noch keine optimale Signalglättung sicherstellt. Verwendet man beispielsweise eine RBW von 10 kHz, so verkleinert sich der

Anzeigewert bei Messung des LTE-Signals ohne Verkehr von -12,85 auf -13,6 dBm. Der Unterschiedsfaktor zur Referenzmessung verringert sich dadurch von 1,7 auf 0,95 dB.

Die Messempfindlichkeit beider Verfahren ist in folgender Tabelle wiedergegeben:

Frequenzbereich	Nachweisgrenze bei Messung des zentralen Teils des Spektrums	Extrapoliert auf Signalbandbreite = 9 MHz	Extrapoliert auf Signalbandbreite = 18 MHz
LTE-800	65 dB μ V/m	76 dB μ V/m	79 dB μ V/m
LTE-1800	56 dB μ V/m	67 dB μ V/m	70 dB μ V/m
LTE-2000	57 dB μ V/m	68 dB μ V/m	71 dB μ V/m
LTE-2600	57 dB μ V/m	68 dB μ V/m	71 dB μ V/m

Tabelle 3.9: Erzielbare Empfindlichkeiten für die Messung von LTE-Signalen bei Verwendung des SRM-3006 mit 6-GHz-Isotropantenne („Safety Evaluation“: Messung der zentralen 930 kHz, RBW=30 kHz, minimaler Referenzpegel; „Level Recorder“: RBW = 800 kHz, VBW = 1,6 kHz, minimaler Referenzpegel)

Fazit:

- Auch mittels der Betriebsart „Level Recorder“ des SRM-3006 sind LTE-Signale derart erfassbar, dass aus den Messresultaten eine Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung möglich wird. Da sich das SRM-3006 jedoch in seiner Grundkonzeption deutlich von herkömmlichen Laboranalysatoren unterscheidet, sind die für eine derartige Messung optimalen Einstellparameter deutlich anders. Insbesondere die RMS-Detektion erfolgt hier in grundlegend anderer Weise. Dies ist bei der Bedienung des Messgerätes unbedingt zu beachten. Als Antennen können isotrope oder einachsige Typen eingesetzt werden. Für LTE ist die Betriebsart „Level Recorder“ als die primäre Erfassungsmethode bei Verwendung des SRM-3006 anzusehen.
- Alternativ ist auch eine Messung im „Safety Evaluation“-Mode möglich, was insbesondere für Anwender des Vorläufermodells SRM-3000 von Bedeutung ist (da dieser Gerätetyp die Betriebsart „Level Recorder“ nicht zur Verfügung stellt). Hierbei ist es prinzipiell möglich, auch mehr als einen LTE-Kanal gleichzeitig zu messen. Zu beachten ist jedoch, dass in dieser Betriebsart die Messung der einzelnen Kanäle nicht mehr kontinuierlich erfolgen kann, was dazu führt, dass unter Umständen eine erhebliche Zeit vergeht, bis bei allen untersuchten Signalen die durch die betrachteten Synchronisationssignale generierten Maximalwerte detektiert wurden.
- Auch mit dem SRM-3000 / -3006 ist eine Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte sichergestellt. Die Empfindlichkeitsreserve bei Verwendung isotroper Antennen beträgt mindestens 72 dB, so dass auch Signale deutlich unterhalb der Grenzwerte noch zuverlässig erfasst werden können.

3.2.3 Codeselektive Methoden

Aufgrund der in Abschnitt 3.2.2.2 erwähnten Probleme der spektralen LTE-Messtechnik (keine Separierung der Immissionsanteile verschiedener Stationen bzw. Sektoren (im Folgenden als Zellen bezeichnet) eines Betreibers im identischen Frequenzbereich und damit verbundene Unsicherheiten bei der Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung) besteht die Frage, ob es mit Hilfe einer Decodierung des LTE-Datenstroms ähnlich wie bei UMTS möglich ist, die Immissionsbeiträge stationsgenau separieren zu können. Bei UMTS kann aus dem Gesamtsignal die Immission durch den Primary Common Pilot Channel P-CPICH stationsgenau separiert werden, der mit vom aktuellen Verkehr unabhängiger Sendeleistung gesendet wird. Mit Hilfe des Verhältnisses von maximaler Sendeleistung der Station zur eingestellten Sendeleistung des P-CPICH ist es hier möglich, zuverlässig auf maximale Anlagenauslastung zu extrapolieren [BOR 06].

Das nach Aussage des Herstellers erste EMVU-Messsystem für codeselektive Messungen von LTE-FDD-Signalen wird von der Firma Rohde & Schwarz unter der Bezeichnung „R&S[®]TS-EMF“ angeboten [KAU 11]. Das Verfahren decodiert die Signale P-SS, S-SS und RS, da dies diejenigen Signale sind, die zellspezifisch codiert sind. Alle weiteren Kanäle (und auch die Nutzdaten, d.h. PDSCH) sind nicht zellspezifisch codiert. Dies stellt einen Unterschied zu UMTS dar, bei dem nahezu alle Kanäle bzw. Signale einer Station mit einem einheitlichen zellspezifischen Scrambling-Code codiert sind. Neben der Immission durch P-SS, S-SS und RS werden auch weitere Basisstationsparameter, wie z.B. der Faktor ρ_B , ermittelt. Der Faktor ρ_B gibt das EPRE-Verhältnis der PDSCH Resource Elemente in Bezug zu RS für diejenigen Symbole an, in denen der zellspezifische RS gesendet wird. Sofern MIMO eingesetzt wird, gibt die Messung weiterhin eine Aussage darüber, wie viele Antennen (1, 2 oder 4) bei der Basisstation verwendet werden.

Die codeselektive Messtechniklösung der Firma Rohde & Schwarz wurde im Rahmen vorliegenden Projektes anhand von Labormessungen eingehend untersucht. Hierzu wurden im Rahmen eines Ortstermins in München ausführliche codeselektive Messungen durchgeführt und mit spektralen Messungen verglichen (Spektrumanalysator Rohde & Schwarz FSL-6), wobei als LTE-Signalquelle ein Signalgenerator diente (Rohde & Schwarz SMU 200A mit LTE-Funktionalität). Als Frontend für die codeselektiven Messungen diente der Universal Radio Network Analyser TSMW der Firma Rohde & Schwarz. Die Messung wurde mit der Software RFEX gesteuert. Bild 3.21 zeigt den Messaufbau. Das codeselektive Messgerät TSMW und der Spektrumanalysator FSL-6 waren über einen Power Divider gleichzeitig am Signalgenerator angeschlossen, so dass die codeselektiven Werte direkt mit den spektralen Messwerten verglichen werden konnten.



Bild 3.21: Messaufbau der Labormessungen zur Überprüfung der codeselektiven Messtechnik bei der Firma Rohde & Schwarz mit LTE-Frontend R&S TSMW

Am LTE-Signalgenerator wurde der Parametersatz „E_TM1_1_10MHz“ bei 806 MHz gewählt. Es handelt sich um einen in der ETSI TS 136 141 definierten Parametersatz („E-TM1.1“) für ein LTE-Signal mit 10 MHz Kanalbandbreite, der für Konformitätstests an LTE-Basisstationen verwendet wird.

Da die Messgeräte direkt per Kabel an den Signalgenerator angeschlossen waren, wurde in der RFX Software als Antennenfaktor „0 dB/m“ gewählt. Dadurch entsprechen alle im folgenden in der Einheit „dB μ V/m“ dokumentierten Werte den gemessenen Spannungswerten in „dB μ V“.

In einer ersten Messung wurde ein Signal (Basisstation mit Cell ID 2) ohne Verkehr (nur Signalisierung) eingestellt, bei dem alle Resource Elemente die gleiche EPRE hatten. Bild 3.22 zeigt die von RFX ausgegebene Messdokumentation (einige Spalten des Originalreports sind aus Übersichtlichkeitsgründen nicht dargestellt).

Cell ID	Frequency [MHz]	Field Strength E [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	Limit L [V/m]	SSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	PSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	CenterRSRP [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	AntMaskRSRP
2	806,0000	0,0027	68,6600	39,0429	0,002703959	68,64000168	0,002694636	68,6100029	0,00034435	50,74	1
Total Exposure Ratios											
Total Field Strength (RMS)			0,0027 V/m								
Max. Single Value:			0,0027 V/m								

Bild 3.22: Report der Messung 1; LTE-Signal ohne Verkehr

In den Spalten 6 und 7 sind die Messergebnisse für die S-SS Immission (in V/m bzw. dB μ V/m) und in den Spalten 8 und 9 die Ergebnisse für die P-SS Immission angegeben. Die Angabe bezieht sich auf die Summenimmission der P-SS bzw. S-SS Resource Elemente über alle 62 Unterträger (siehe Bild 3.6). Mit der „CenterRSRP“ (Reference Signal Received Power, Spalten 10 und 11) wird die Immission durch die RS Resource Elemente dokumentiert. Es handelt sich hier um einen linear gemittelten Wert über alle RS in einem 1,08 MHz

breiten Streifen um die Mittenfrequenz (d.h. die inneren 6 Resource Blocks). Im Unterschied zu P-SS und S-SS ist dieser Wert aber keine Summation über alle RS in diesem Frequenzband, sondern die mittlere Leistung eines RS. Multipliziert man zur Kontrolle die angezeigte RSRP mit dem Faktor 62 (der Anzahl der aufsummierten P-SS bzw. S-SS Unterträger), ergibt sich ein Wert von 68,66 dB μ V/m, der identisch mit der dokumentierten Immission durch P-SS und S-SS ist. Der Spektrumanalysator zeigte mit einer RBW von 1 MHz (d.h. es werden die inneren Resource Blocks in einem 1 MHz breiten Streifen erfasst) einen Wert von 68,6 dB μ V/m an. Dieser ist identisch mit den bei der codeselektiven Messung ermittelten Werten. Weiterhin werden im Auswertereport auch die Anzahl der Sendeantennen (Spalte 12; ein Wert von „1“ entspricht hier einer Sendeantenne) und in den Spalten 3 und 4 die Inband Power, d.h. die im zentralen Megahertz gemessene uncodierte Leistung, angezeigt.

Als Fazit dieser ersten Messung ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen codeselektiver und spektraler Messtechnik einerseits und zu den Einstellungen am Signalgenerator (alle RE haben die gleiche EPRE) andererseits.

In einer zweiten Messung wurden sämtliche Einstellungen von Messung 1 beibehalten; allerdings wurde nun die EPRE von P-SS und S-SS um 3 dB gegenüber der EPRE der RS abgesenkt. Bild 3.23 zeigt die RFEF Messdokumentation. Die Absenkung der EPRE der P-SS und S-SS gegenüber Messung 1 wurde richtig erkannt. Die Immission durch P-SS und S-SS ist identisch. Die Immission durch RS ist im Vergleich zu Messung 1 gleich geblieben.

Cell ID	Frequency [MHz]	Field Strength E [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	Limit L [V/m]	SSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	PSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	CenterRSRP [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	AntMaskRSRP
2	806,0000	0,0019	65,6900	39,0429	0,001918669	65,66000214	0,001909854	65,62000122	0,000345939	50,78	1
Total Exposure Ratios											
Total Field Strength (RMS)			0,0019 V/m								
Max. Single Value:			0,0019 V/m								

Bild 3.23: Report der Messung 2; LTE-Signal ohne Verkehr, P-SS und S-SS abgesenkt

In einer dritten Messung wurde am Signalgenerator maximaler Datenverkehr eingestellt; alle Resource Elemente des PDSCH waren belegt. Alle RE hatten dieselbe EPRE. Die Cell ID wurde auf 1 umgestellt. Bild 3.24 zeigt das Ergebnis der Messung.

Cell ID	Frequency [MHz]	Field Strength E [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	Limit L [V/m]	SSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	PSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	CenterRSRP [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	AntMaskRSRP
1	806,0000	0,0011	61,0600	39,0429	0,001128496	61,05000153	0,001128496	61,05000153	0,000143384	43,13	1
Total Exposure Ratios											
Total Field Strength (RMS)			0,0011 V/m								
Max. Single Value:			0,0011 V/m								

Bild 3.24: Report der Messung 3; LTE-Signal mit maximalem Datenverkehr

Wiederum ist die Immission durch P-SS und S-SS gleich und identisch mit der auf 62 RE erweiterten RSRP (61,05 dB μ V/m). Die Immissionen liegen insgesamt unterhalb derjenigen, die in Messung 1 und 2 festgestellt wurden. Grund hierfür ist, dass die unverändert eingestellte Gesamtausgangsleistung des Signalgenerators („level“) zu einer anderen EPRE führte. Eine diesbezüglich Korrektur um den Faktor 7,63 dB (ermittelt aus der Generatoreinstellung „RS power relative to level“, die bei Messung 1 und 2 bei -20,15 dB und bei Mes-

sung 3 bei -27,78 dB lag), führt wiederum auf identische Werte wie bei Messung 1 bzw. 2. Mit dem Spektrumanalysator wurde ein Kontrollwert von 61,4 dB μ V/m ermittelt, der gut mit den P-SS bzw. S-SS Immissionen übereinstimmt.

In einer vierten Messung wurden über den Kanal A und B des Signalgenerators zwei Signale mit unterschiedlichen Frequenzen (806 und 816 MHz) erzeugt. Es wurde nur Signalisierung eingestellt. Alle RE hatten dieselbe EPRE. Bild 3.25 zeigt die Dokumentation der Messungen. Beide Signale werden richtig erkannt. Die auf 62 Unterträger extrapolierte RSRP-Immission beträgt 60,48 dB μ V/m (bei 806 MHz) bzw. 60,78 dB μ V/m (bei 816 MHz) und ist identisch mit den Immissionen durch die jeweiligen P-SS und S-SS.

Cell ID	Frequency [MHz]	Field Strength E [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	Limit L [V/m]	SSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	PSynchChanPow [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	CenterRSRP [V/m]	Field Level [dB μ V/m]	AntMaskRSRP
12	806,0000	0,0011	60,4700	39,0429	0,001053174	60,44999924	0,001053174	60,44999924	0,000134276	42,56	1
77	816,0000	0,0011	60,8000	39,2845	0,001093957	60,78000107	0,001093957	60,78000107	0,000138995	42,86	1
Total Exposure Ratios											
Total Field Strength (RMS)			0,0015	V/m							
Max. Single Value:			0,0011	V/m							

Bild 3.25: Report der Messung 4; 2 LTE-Signale unterschiedlicher Frequenz ohne Verkehr

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Geschwindigkeit der Decodierung durchgeführt: Die Geschwindigkeit ist vor allem vor dem Hintergrund des Einsatzes der Schwenkmethode wichtig, da diese eine gewisse Mindestgeschwindigkeit der Decodierung voraussetzt. Für ein Messpaket mit drei LTE-Frequenzen wurden bei Einsatz einer einachsigen Antenne 91 Dekodierungsdurchläufe innerhalb von 30 Sekunden gemessen. Die Messgeschwindigkeit wird damit als für die Schwenkmethode geeignet beurteilt.

Als Zwischenfazit der Labormessungen lässt sich der Schluss ziehen, dass sich das von der Firma Rohde & Schwarz entwickelte codeselektive Messsystem anhand von leitungsgebundenen LTE-Messungen als sehr gut geeignet erwiesen hat. Beim Ortstermin wurden auch erste Überblicksmessungen von realen Signalen über die Luftschnittstelle (vorwiegend 2-Antennen-MIMO) durchgeführt. Ein Verfahren für eine verlässliche Hochrechnung der decodierten Signalkomponenten auf die maximale Anlagenauslastung ist bei der Firma Rohde & Schwarz noch in Entwicklung. Insbesondere die Auswirkungen spezieller Provider-spezifischer Parametrisierungen der Basisstationen müssen hier noch weiter untersucht werden. Nach Abschluss dieser Untersuchungen ist es im Rahmen vorliegenden Projektes beabsichtigt, systematische Messungen im Feld durchzuführen (z.B. beginnend im Bereich eines Sektors einer Basisstation, danach in Sektormitte, daran anschließend im Überlappungsbereich von mehreren Basisstationen identischer und unterschiedlicher Frequenz mit ähnlichen Pegelverhältnissen), um den Einsatzbereich und die Grenzen des Messsystems im realen Einsatz zu testen.

Die Firma Narda Safety Test Solutions arbeitet derzeit ebenfalls an einer codeselektiven Option für das frequenzselektive Feldstärkemesssystem SRM-3006. Laut Aussage von

Narda ist die Markteinführung der codeselektiven Option für Mai 2012 geplant. Im Rahmen vorliegenden Projektes ist es geplant, systematische Tests sowohl an Signalgeneratoren, als auch an LTE-Stationen vor Ort im vergleichbaren Umgang wie bei der Rohde & Schwarz Lösung durchzuführen, sobald eine entsprechende Version verfügbar ist.

Die als Ergebnis der codeselektiven Messungen ermittelten Immissionen müssen, ähnlich wie bei der spektralen Messung, auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert werden. Dazu gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

Die erste Möglichkeit ist äquivalent zur bereits bei den spektralen Messungen beschriebenen Vorgehensweise: Bei den Netzbetreibern sind die Leistungsverhältnisse (EPRE) der einzelnen Resource Elemente (insbesondere der Verkehrsdaten PDSCH) in Bezug zu den gemessenen P-SS, S-SS und RS abzufragen und auf dieser Basis eine mittlere Immission über einen Rahmen zu bilden.

Darüber hinaus steht aber noch eine zweite Möglichkeit zur Verfügung, bei der nicht die detaillierten EPRE-Verhältnisse benötigt werden, sondern bei der die Hochrechnung auf Basis der maximal möglichen Sendeleistung der Zelle erfolgt. Diese Möglichkeit bietet den Vorteil, dass diese Daten „einfacher zu beschaffen“ sind, da sie u.U. auch dem nationalen Regulierer im Rahmen einer Beantragung einer neuen Station vom Betreiber mitgeteilt werden müssen. Zusätzlich ist hier noch eine Information über die eingestellte Sendeleistung des RS (Reference Signal Power) notwendig. Sofern dieser Wert nicht vom Betreiber mitgeteilt wird, könnte er im Rahmen des Decodiervorgangs ausgelesen werden, da er von der Basisstation im System Information Block 2 (SIB 2) abgestrahlt wird. Die Hochrechnung erfolgt dann auf Basis folgender Überlegung: Beträgt beispielsweise bei einem 10 MHz LTE-Signal (600 RE pro Symbol) die maximale Sendeleistung 20 W und wird als RS Power (d.h. EPRE RS) 18 dBm ausgelesen, kann die Leistung der anderen RE im selben Symbol nur kleiner sein, da eine Leistung von 20 W bei 600 RE einer mittleren EPRE von 15,2 dBm entspricht. Selbst wenn einige RE innerhalb eines Symbols eine größere EPRE als RS hätten (der Parameterbereich der EPRE PDSCH kann von -6 bis +3 dB in Bezug auf EPRE RS reichen), dann muss die EPRE von anderen RE im selben Symbol entsprechend abgesenkt sein, da sonst für dieses Symbol die maximale Sendeleistung von 20 W überschritten werden würde. Die Hochrechnung erfolgt nun in der Weise, dass die gemessene RSRP-Immission leistungsmäßig mit einem Faktor multipliziert wird, der sich aus dem Verhältnis zwischen maximaler Sendeleistung der Zelle zur Sendeleistung eines RS-Elements berechnet. Dies entspricht von der Idee her der Hochrechnung bei der codeselektiven UMTS-Messung, bei der die maximale Immission leistungsbezogen aus der Multiplikation von gemessener Immission durch den P-CPICH mit dem Faktor zwischen maximaler Sendeleistung und P-CPICH-Leistung (leistungsbezogen 10, wenn der CPICH 10 % der Gesamtsendeleistung beansprucht) erfolgt.

Diese Variante der Hochrechnung erscheint gegenüber der ersten Möglichkeit sehr viel unkomplizierter, da weniger (und weniger „kritische“) Betreiberdaten erforderlich sind, der Hochrechnungsalgorithmus vergleichsweise einfach ist und trotzdem eine exakte Bestimmung der Maximalimmission gewährleistet ist.

3.2.4 Arbeiten anderer Institutionen

In der Literatur finden sich vergleichsweise wenige Arbeiten anderer Institutionen zum Thema LTE-Messverfahren. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer diesbezüglichen Literaturrecherche vorgestellt:

Eine Arbeitsgruppe um Joseph hat 2009 Immissions-Messungen an LTE-Basisstationen durchgeführt und diese mit Immissionen durch andere hochfrequente Quellen verglichen [JOS 10]. Hier wurde das spektrale Verfahren angewendet (siehe auch Abschnitt 4.1.2), wobei aufgrund der langen Sweepzeit eher eine „aktuelle“, d.h. zeitgemittelte Exposition erfasst wurde, die offenbar nicht auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet wurde.

Eine Anwendung des spektralen Verfahrens mit Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung wird in [FEL 11] beschrieben: Empfohlen werden Messungen im Zero-Span mit einer Auflösebandbreite von 1 MHz und einer Sweepzeit von mindestens 70 ms bei Spektrumanalysatoren mit 1000 horizontalen Pixel (dies entspricht 35 ms bei 500 Pixel). Nach Ansicht der Autoren würden die Referenzsignale (RS) mit der kleinsten Leistung abgestrahlt, weswegen sich die Messungen auf die Erfassung des Physical Broadcast Channels (PBCH) mit „relativ starker Leistung“ konzentrierten, die wie oben beschrieben in einem 1,08 MHz breiten Bereich um die Mittenfrequenz unabhängig von der verwendeten Bandbreite konzentriert sind. Unverständlich ist jedoch, dass zur Messung der Peak-Detektor empfohlen wird, obwohl in eigenen Untersuchungen Überbewertungen der Exposition in der Größenordnung von 9 bis 12 dB im Vergleich zur RMS-Bewertung festgestellt wurden. Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt dann mit einem Faktor, der sich aus dem Verhältnis zwischen maximal möglicher Sendeleistung der Zelle und der Leistung des gemessenen PBCH errechnet. Prinzipiell ist dieses Verfahren ähnlich zum von der IMST GmbH entwickelten Messverfahren (Ermittlung der verkehrsunabhängigen Signalisierung in einem 1 MHz breiten Streifen um die Kanalmitte), allerdings sollte unbedingt der RMS-Detektor Anwendung finden. Außerdem sollte im Rahmen einer Vormessung an jeder Station überprüft werden, welcher von den verkehrsunabhängigen Kanälen und Signalisierungen die höchste Amplitude am Spektrumanalysator hervorruft; dies muss nicht zwingend der PBCH sein.

In einer Veröffentlichung der Firma Narda Safety Test Solutions [KEL 11] wird die Anwendung des spektralen Verfahrens mit dem firmeneigenen Messgerät SRM-3006 beschrieben. Zur Mittelung des Signals, die bei Laboranalysatoren mit Hilfe des RMS-Detektors erfolgt, wird hier eine besonders kleine Videobandbreite (VBW) verwendet. Diese Lösung ist bei Laboranalysatoren in der Regel nicht erlaubt, da das Videofilter in der Signalkette nach dem Logarithmierer angeordnet ist und somit keine linearen, sondern logarithmierte Signalwerte gemittelt werden würden. Im Beitrag wird als Alternative eine Messung in der Betriebsart „Safety Evaluation“ beschrieben, die eine Kanalleistungsmessung über einen vorher eingestellten Frequenzbereich darstellt. Die Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung basiert auf einer selektiven Vermessung der Immission durch P-SS, S-SS und/oder PBCH und nachträglicher Extrapolation mit einem das Verhältnis zwischen gesamter Sendeleistung und Leistung der gemessenen Signalanteile angegebenden Faktor. Nähere Informationen zu dieser Thematik mit einem ausführlichen Vergleich der verschiedenen Messmethoden der Gerätefamilie SRM-3006/-3000 untereinander und im Vergleich zu einem Laborspektrumanalysator finden sich in Abschnitt 3.2.2.5.

Auch in der Schweiz, die bei der Entwicklung von Immissionsmessverfahren für GSM und UMTS eine Vorreiterrolle übernahm, wird derzeit an geeigneten Messverfahren für LTE-Immissionen gearbeitet [RIE 11, FRI 11]. Erste Vorschläge, die in einem messtechnischen Pilotprojekt überprüft wurden, basieren auf einer Messung der konstanten und mit vom aktuellen Verkehr der Basisstationsantenne unabhängiger Leistung gesendeten Signale in der Kanalmitte mit einer Bandbreite von 1 MHz und anschließender Hochrechnung auf den maximalen Anlagenzustand. Allerdings wird auch hier darauf verwiesen, dass mit spektralen Verfahren die Beiträge einzelner Zellen in einem Gleichkanalnetzwerk nicht unterschieden werden können, weswegen codeselektive Messinstrumente nötig werden. Insgesamt zeigten die Messungen an einer Pilotanlage, dass LTE-Messungen in derselben Qualität durchgeführt werden könnten wie bei GSM und UMTS üblich und dass die Immissionen in derselben Größenordnung lägen.

3.2.5 Generelle Einsetzbarkeit von Personendosimetern

Eine weitere generelle Möglichkeit in der messtechnischen Erfassung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern besteht in der Verwendung von Personendosimetern. Personendosimeter wurden in den letzten Jahren verstärkt für epidemiologische Studien eingesetzt [QUEBEB, MOBILEE]. Vom Bundesamt für Strahlenschutz wurden für vorliegende Untersuchungen Geräte des Typs EME Spy 120 der französischen Firma Antennessa (jetziger Hersteller: Satimo) zur Verfügung gestellt (Bild 3.26).

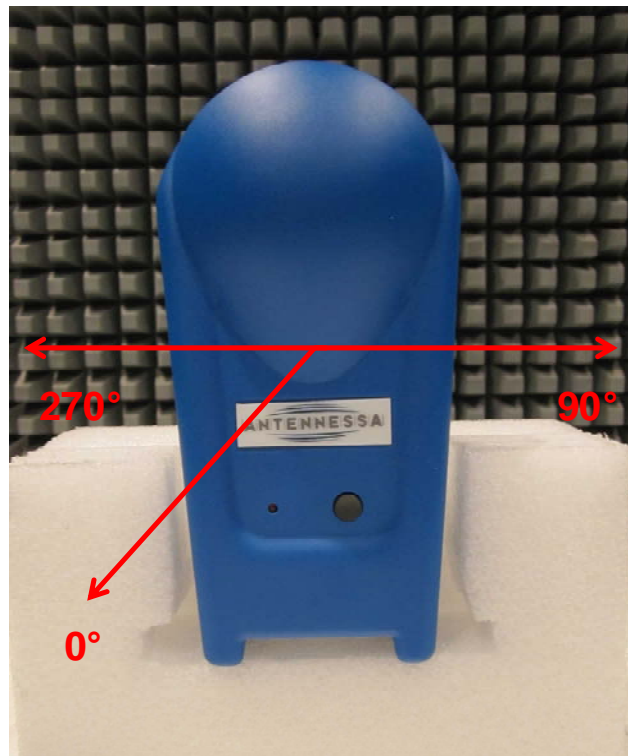


Bild 3.26: Untersuchtes Personendosimeter EME Spy 120 mit Drehrichtungsangabe für die Untersuchung der axialen Isotrope

Das Personendosimeter EME Spy 120 ist ein in 12 unterschiedlichen Frequenzbändern selektiv messendes Gerät. In Tabelle 3.10 sind die Frequenzbereiche aufgeführt, die durch das Gerät abgedeckt werden (der Name kennzeichnet die vom Hersteller angegebene Bandbezeichnung).

Name	Frequenzbereich [MHz]	Nutzung in Deutschland
FM	88-108	UKW-Rundfunk
TV3	174-223	DAB, Analog-TV, DVB-T
Tetrapol	380-400	TETRA
TV4&5	470-830	DVB-T, Analog-TV, LTE-800 Downlink, Reportagefunk, Betriebsfunk
GSMtx	880-915	GSM 900 Uplink
GSMrx	925-960	GSM 900 Downlink
DCStx	1710-1785	GSM 1800 Uplink, LTE-1800 Uplink
DCSrx	1805-1880	GSM 1800 Downlink, LTE-1800 Downlink
DECT	1880-1900	DECT
UMTStx	1920-1980	UMTS Uplink, LTE-2000 Uplink
UMTSrx	2110-2170	UMTS Downlink, LTE-2000 Downlink
WIFI	2400-2500	WLAN, Bluetooth, ISM

Tabelle 3.10: Frequenzbereiche des Personendosimeters EME Spy 120

Durch einen Vergleich der Frequenzbereiche von Tabelle 3.10 mit den für eine potenzielle Nutzung durch LTE versteigerten Frequenzbereichen nach Bild 2.1 ergibt sich, dass die Dosimeter frequenzbezogen prinzipiell in den Bereichen TV4&5 (LTE-800 Downlink), DCSrx (LTE-1800 Downlink) und UMTSrx (LTE-2000 Downlink) einsetzbar wären. Da allerdings die Signalcharakteristik von LTE-Signalen nicht unbedingt mit der Charakteristik derjenigen Funkanwendungen identisch ist, für die das Dosimeter konstruiert wurde (in den hier betroffenen Frequenzbereichen Fernsehfunk sowie GSM-1800 und UMTS-Downlinksignale), bleibt zu überprüfen, ob die Dosimeter die LTE-Signale korrekt verarbeiten und amplitudenmäßig richtig angeben.

Zu diesem Zweck wurden für vorliegendes Projekt Untersuchungen im EMV-Labor der IMST GmbH wie folgt durchgeführt: Die Dosimeter wurden in etwa 1,3 m Höhe auf einem Holztisch mit Styroporaufsatz aufrecht stehend positioniert; der Aufbau befindet sich auf einem Drehtisch. In etwa 3 m Entfernung vom Dosimeter wurde in ebenfalls 1,3 m Höhe eine Sendeanenne (EMCO 3115, vertikale Polarisation) aufgestellt, die an einen HF-Verstärker (Amplifier Research 100W1000 (100 W 80-1000 MHz) oder 25S1G4 (25 W 0,8-4,2 GHz)) angeschlossen war. Der Boden zwischen Dosimeter und Antenne war mit Absorbern ausgelegt. An den Eingang des Verstärkers wurde ein LTE-Basisstationssimulator (Anritsu MT 8820C Radio Communication Analyzer) angeschlossen und mit diesem optional ein LTE-Signal mit den Zuständen „nur Signalisierung“ und „maximaler Verkehr“ generiert. Der Eingangspegel

wurde so eingestellt, dass am Ort des Dosimeters ein Wert von 1-2 V/m vorlag. Höhere Immissionen sind im allgemein zugänglichen Umfeld von Basisstationen selten; wesentlich kleinere Werte hätten Probleme mit der Anzeigeempfindlichkeit der verwendeten Breitbandsonde ergeben. Am Ort des Dosimeters wurde vor Beginn der Untersuchungen die vorhandene Feldstärke mit einem Spektrumanalysator (Rohde & Schwarz FSP-7 mit log.-per. Antenne Schwarzbeck USLP-9142) und einem Breitbandmessgerät (Wandel & Goltermann EMR-300 mit E-Feldsonde 100 kHz – 3 GHz) gemessen. Der Spektrumanalysator wurde mit den Einstellungen Zero-Span, RBW 10 MHz, VBW 10 MHz, RMS-Detektor, Sweep-Zeit 2 s) betrieben. Durch die lange Mittelungszeit wird nicht der Maximalwert des Signals, sondern ein (unter dem Maximalwert liegender) zeitlicher Mittelwert angezeigt. Bild 3.27 zeigt den Messaufbau in der Absorberkammer.

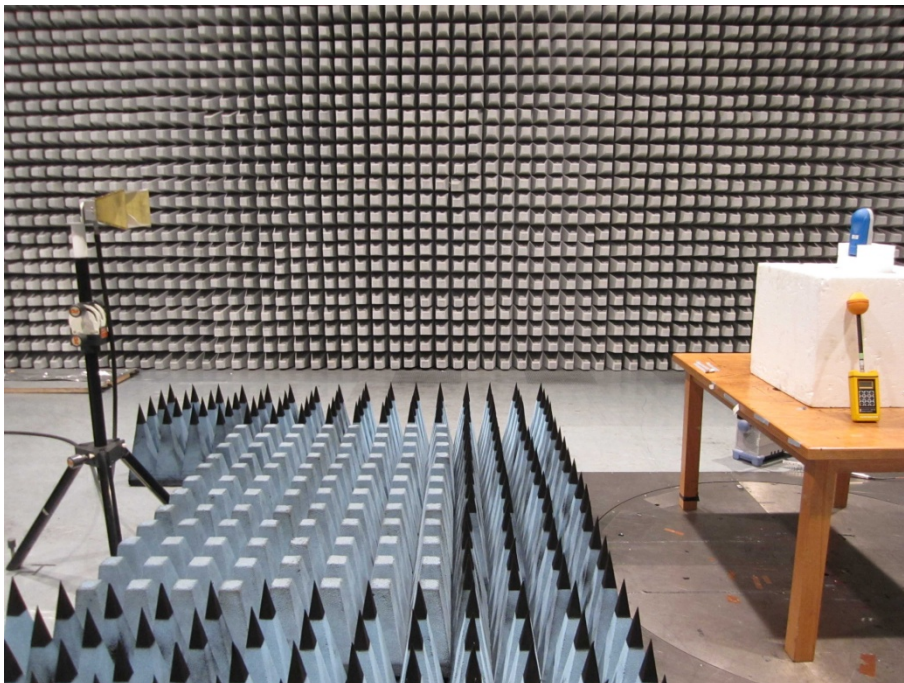


Bild 3.27: Messaufbau zur Überprüfung der Dosimetereignung für LTE-Messungen

Die Messungen wurden in folgender Reihenfolge durchgeführt:

1. Aufnahme von mindestens 10 aufeinander folgenden Messwerten (Messintervall 5 s) bei fest stehendem Dosimeter, Vorderseite zur Antenne ausgerichtet zur Untersuchung von Anzeigewert (im Vergleich zu den als Referenz geltenden Messwerten von Spektrumanalysator und Breitbandmessgerät) und Schwankungsbreite.
2. Messung der Azimut-Charakteristik des Dosimeters zur Beurteilung der axialen Isotropie, d.h. Drehung des aufrecht stehenden Dosimeters um 360° in 30° Schritten. Hierbei Aufnahme von mindestens 3 Messwerten pro Winkel mit anschließender quadratischer Mittelung der Feldstärkewerte.

Die Messungen wurden mit zwei Dosimetern durchgeführt, und zwar

- Dosimeter 1: EME Spy 120: DE_018_0306
- Dosimeter 2: EME Spy 120: DE_002_0306

Als erste zu untersuchende Frequenz wurde 806 MHz ausgewählt; diese liegt in Übereinstimmung mit Bild 2.1 in der Mitte des Downlinkbereiches für LTE-800. Nach Tabelle 3.10 ist hier eine Antwort des Dosimeters im Band „TV4&5“ zu erwarten. Die Bilder 3.28 und 3.29 zeigen die Ergebnisse von 10 aufeinander folgenden Messung bei fest stehendem Dosimeter bei einem LTE-Signal ohne Verkehr (nur Signalisierung). Wohingegen als Referenz von der Breitbandsonde ein Wert von 2,2 V/m und vom Spektrumanalysator ein Wert von 1,67 V/m (bzw. 1,98 V/m nach Korrektur von 1,5 dB nach Abschnitt 3.2.2.1) angezeigt wird, liegen die vom Dosimeter angezeigten Werte wesentlich niedriger: Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte zwischen 0,12 und 0,16 V/m bei einem (quadratischen) Mittelwert von 0,14 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 0,15 und 0,17 V/m bei einem Mittelwert von 0,16 V/m. Die Werte liegen damit mindestens 20 dB unter den Referenzwerten von Spektrumanalysator und Breitbandsonde.

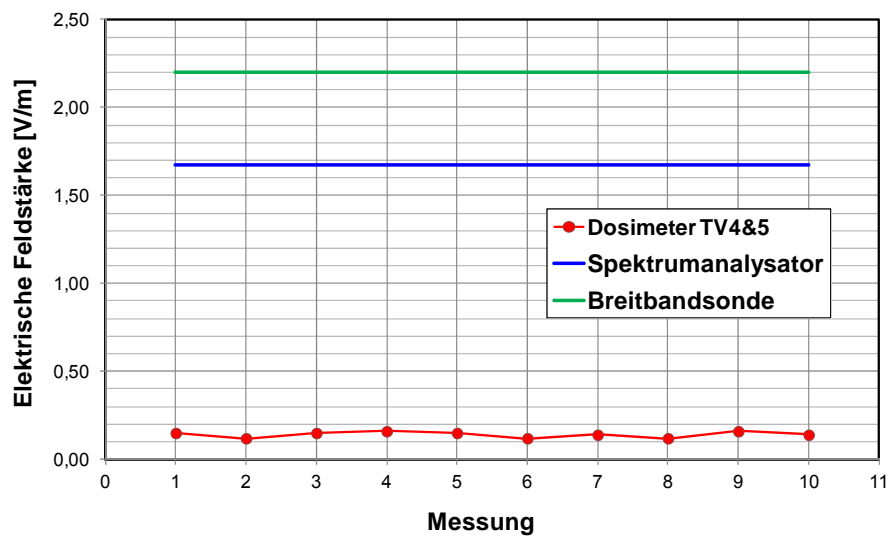


Bild 3.28: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 806 MHz, ohne Verkehr

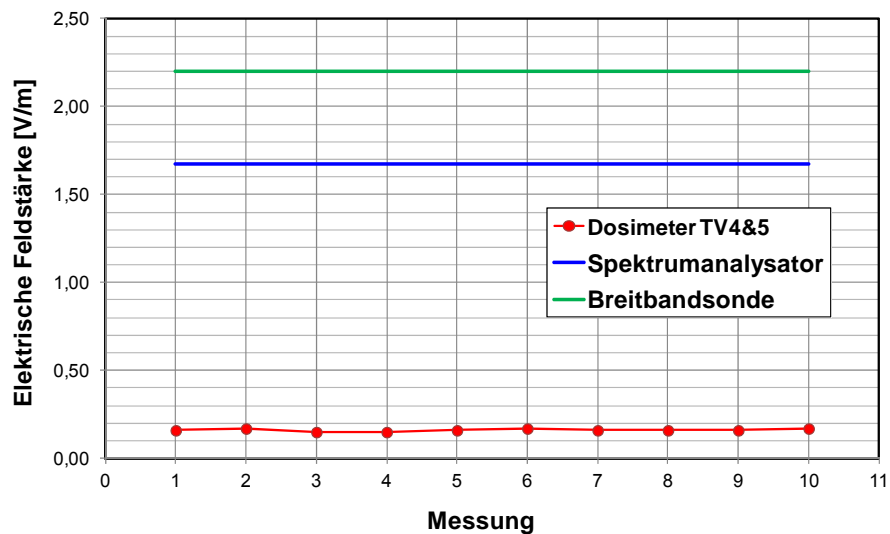


Bild 3.29: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 806 MHz, ohne Verkehr

Die Bilder 3.30 und 3.31 zeigen die entsprechenden Ergebnisse bei maximalem LTE-Datenverkehr. Die Referenzwerte sind 2,1 V/m (Breitbandsonde) bzw. 1,62 V/m (Spektrumanalysator, bzw. 1,93 V/m nach Korrektur). Die durch das Dosimeter ermittelten Werte sind bei nahezu unveränderten Referenzwerten nunmehr höher als beim Zustand ohne Verkehr. Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte zwischen 0,97 und 1,04 V/m bei einem Mittelwert von 1,01 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 1,06 und 1,15 V/m bei einem Mittelwert von 1,12 V/m. Die Werte liegen damit mehr als 3 dB unter den Referenzwerten von Spektrumanalysator und Breitbandsonde.

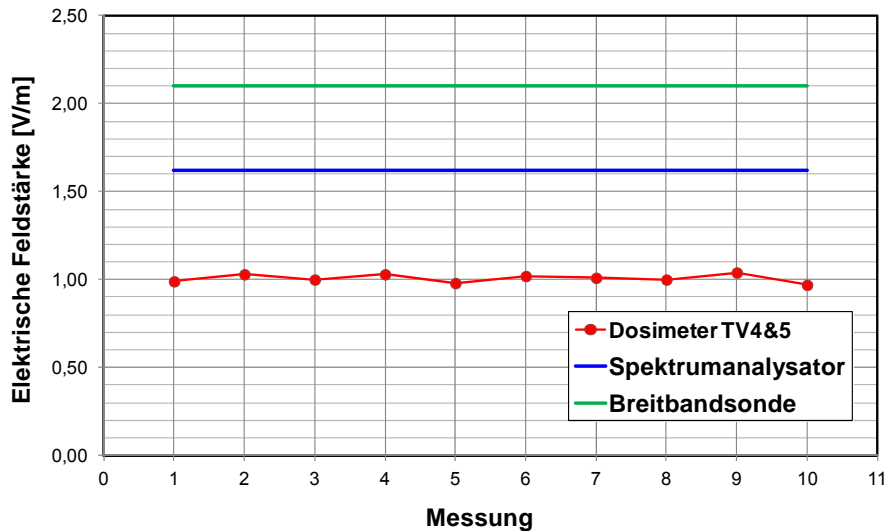


Bild 3.30: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 806 MHz, maximaler Verkehr

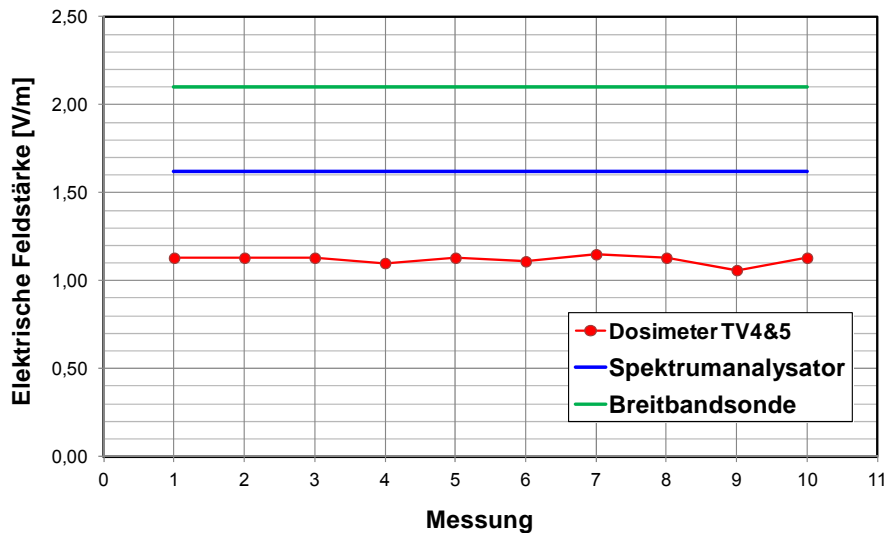


Bild 3.31: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 806 MHz, maximaler Verkehr

Aus den Messungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Anzeige der untersuchten Dosimeter ist stark vom Verkehrszustand des LTE-Signals abhängig: Für die beiden Extremzustände „ohne Verkehr“ und „maximaler

Datenverkehr“ unterscheiden sich die Anzeigewerte bei nahezu unveränderten Referenzwerten um etwa 17 dB.

2. Sowohl für den Zustand „ohne Verkehr“, als auch für den Zustand „maximaler Verkehr“ liegen die Dosimeterwerte unterhalb der Referenzwerte. Der Unterschied ist beim Zustand „ohne Verkehr“ am größten und beträgt mehr als 20 dB.
3. Die zeitlichen Schwankungen der Dosimeter bei fest stehendem Gerät sind trotz der rauschartigen Signalstruktur gering; sie liegen bei maximal 1 dB.
4. Beide untersuchte Dosimeter geben bei identischem Signal nicht exakt denselben Wert aus; die Differenz beträgt etwa 1 dB.

Bild 3.32 zeigt das Azimutdiagramm von Dosimeter 2 beim Zustand „ohne Verkehr“ (links) und „maximalem Verkehr“ (rechts). Die Messwerte alle 30° sind durch Datenmarker gekennzeichnet; dazwischen wurden die Werte interpoliert. Die axiale Isotropie ist als gut zu bewerten; die Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert beträgt maximal 1,7 dB.

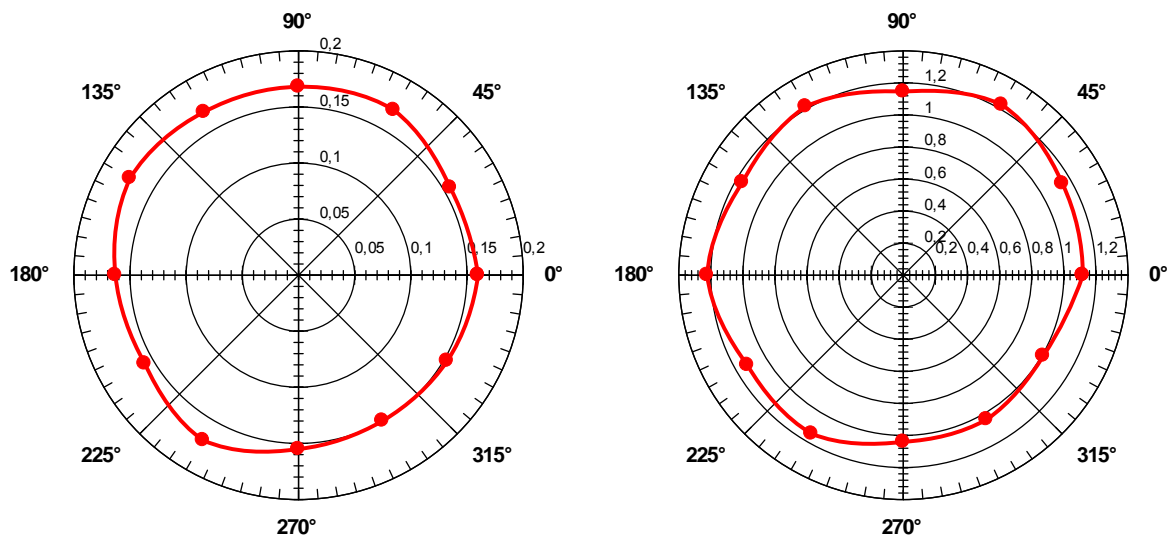


Bild 3.32: Azimutdiagramme von Dosimeter 2, „ohne Verkehr“ (links) und „maximaler Verkehr“ (rechts), Frequenz 806 MHz

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die zweite ausgewählte Frequenz vorgestellt. Hierzu wurde eine Frequenz von 1815 MHz (Kanalbandbreite 10 MHz) gewählt, die in Übereinstimmung mit Bild 2.1 in der Mitte des 20 MHz Blocks der Deutschen Telekom liegt, der bereits in Köln für LTE-1800 genutzt wird. Laut Tabelle 3.10 ist durch das Dosimeter eine Anzeige im Band „DCSrx“ (GSM 1800 Downlink) zu erwarten.

Die Bilder 3.33 und 3.34 zeigen die Ergebnisse von 10 aufeinander folgenden Messung bei fest stehendem Dosimeter bei einem LTE-Signal ohne Verkehr (nur Signalisierung). Wohingegen als Referenz von der Breitbandsonde ein Wert von 1,3 V/m und vom Spektrumanalysator ein Wert von 1,08 V/m (bzw. 1,28 V/m nach Korrektur) angezeigt wird, liegen die vom Dosimeter angezeigten Werte wesentlich niedriger: Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte

zwischen 0,07 und 0,08 V/m bei einem (quadratischen) Mittelwert von 0,07 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 0,09 und 0,12 V/m bei einem Mittelwert von 0,11 V/m. Die Werte liegen damit wiederum mindestens 20 dB unter den Referenzwerten von Spektrumanalysator und Breitbandsonde. Im Unterschied zu den Untersuchungen bei 806 MHz werden jetzt aber nicht nur Messwerte im zu erwartenden Dosimeterband, sondern auch noch in den Bändern „DCStx“ (GSM 1800 Uplink) und „DECT“ (DECT Schnurlostelefone) angezeigt. Diese „Fehlanzeigen“ werden nachweislich nicht durch den verwendeten Leistungsverstärker (z.B. als Erzeugung von Oberwellen durch das gepulste Eingangssignal ohne Verkehr) generiert, da bei einer Kontrolle mit dem Spektrumanalysator über die Luftschnittstelle durch den Verstärker erzeugte Störungen mehr als 50 dB unter der Amplitude des Trägers lagen. Sie müssen also durch die Signalverarbeitung im Dosimeter verursacht werden.

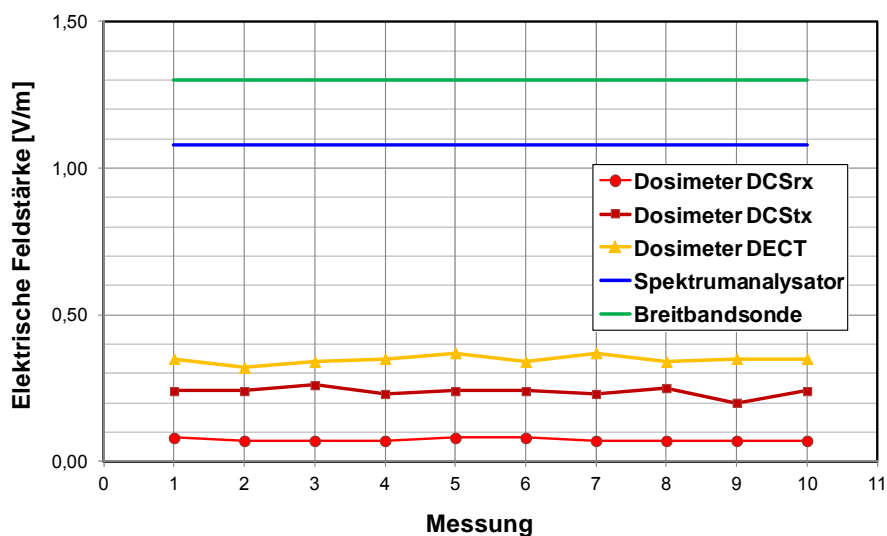


Bild 3.33: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 1815 MHz, ohne Verkehr

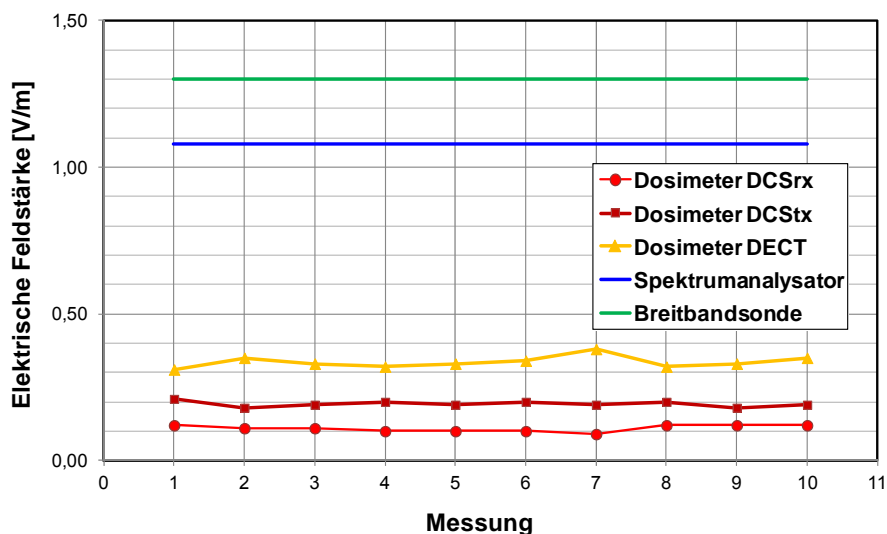


Bild 3.34: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 1815 MHz, ohne Verkehr

Die Bilder 3.35 und 3.36 zeigen die entsprechenden Ergebnisse bei maximalem LTE-Datenverkehr. Die Referenzwerte sind 1,3 V/m (Breitbandsonde) bzw. 1,11 V/m (Spektru-

manalysator, bzw. 1,32 V/m nach Korrektur). Die durch das Dosimeter ermittelten Werte sind bei nahezu unveränderten Referenzwerten wiederum höher als beim Zustand ohne Verkehr. Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte zwischen 1,15 und 1,32 V/m bei einem Mittelwert von 1,25 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 1,35 und 1,52 V/m bei einem Mittelwert von 1,44 V/m. Die Werte liegen damit im Bereich (Dosimeter 1) oder sogar über den Referenzwerten (Dosimeter 2). Auffällig ist ebenfalls, dass die angezeigten Werte in den anderen Dosimeter-Frequenzbereichen im Vergleich zum erwarteten Signal (DCSrx) stark zurückgegangen ist: Für den Bereich „DCStx“ werden zwar noch Werte von maximal 0,19 V/m angezeigt; die für den Zustand „ohne Verkehr“ als größte Werte angegebene Messwerte im DECT-Bereich liegen nun jedoch an bzw. unterhalb der Nachweisgrenze des Dosimeters (0,05 V/m).

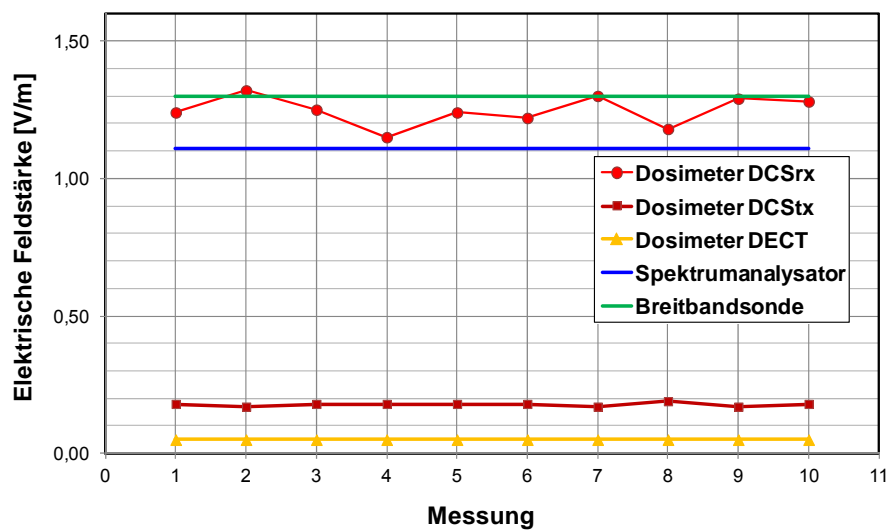


Bild 3.35: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 1815 MHz, maximaler Verkehr

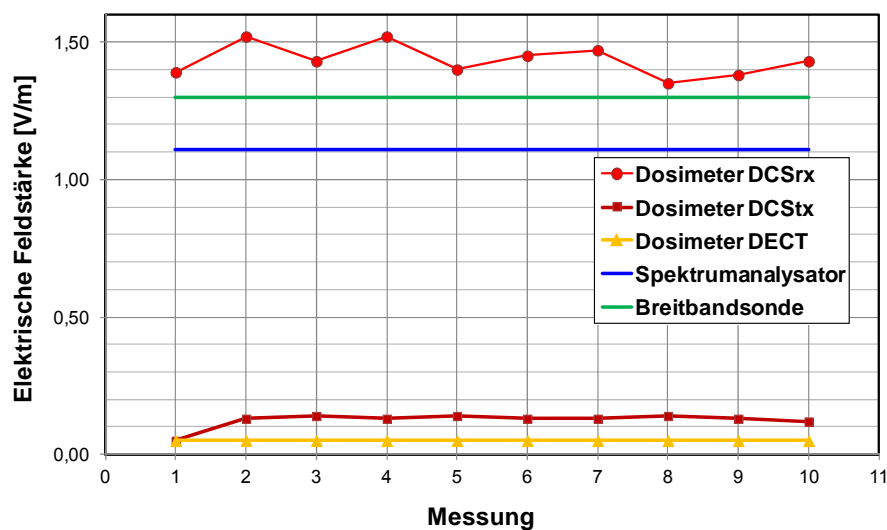


Bild 3.36: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 1815 MHz, maximaler Verkehr

Als Fazit der Messungen bei der zweiten Frequenz haben die Schlussfolgerungen 1, 3 und 4 der Frequenz 806 MHz Gültigkeit. Wohingegen der bei maximalem Verkehr im erwarteten

Frequenzband „DCSrx“ ausgegebene Wert nun im Bereich oder sogar leicht oberhalb der Referenzwerte liegt, werden vor allem beim Zustand „ohne Verkehr“ offenkundig falsche Anzeigewerte in den Bereichen „DCStx“ und „DECT“ ausgegeben, die wertemäßig über den Werten im zu erwartenden Frequenzbereich liegen.

Bild 3.37 zeigt das Azimutdiagramm von Dosimeter 2 (nur DCSrx) beim Zustand „ohne Verkehr“ (links) und „maximalem Verkehr“ (rechts). Die axiale Isotropie ist primär bei maximalem Datenverkehr etwas schlechter als bei 806 MHz; die Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert beträgt maximal 3 dB.

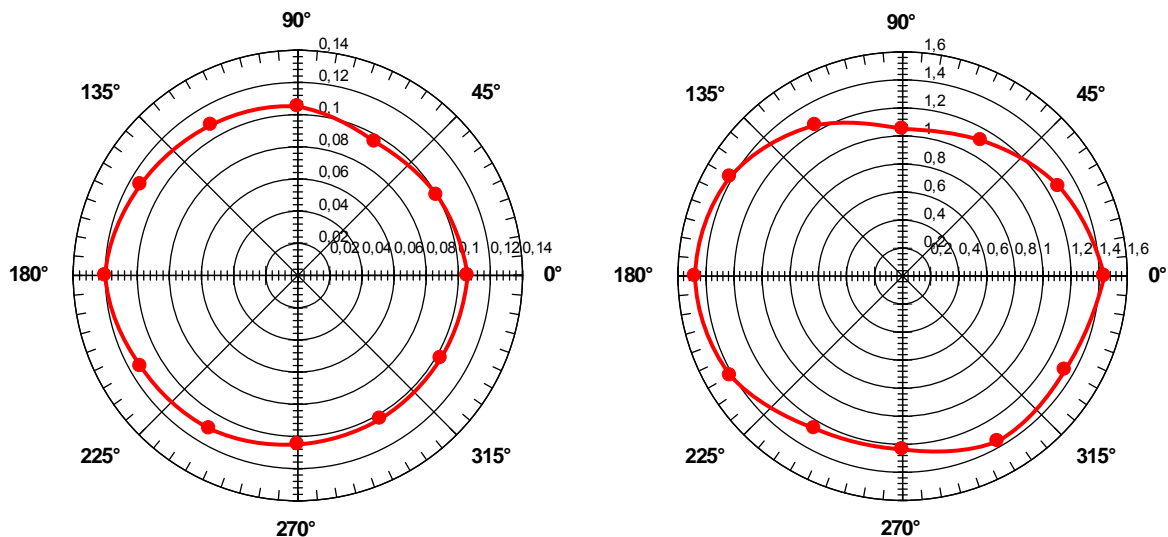


Bild 3.37: Azimutdiagramme von Dosimeter 2, „ohne Verkehr“ (links) und „maximaler Verkehr“ (rechts), Frequenz 1815 MHz

Als dritte Frequenz wurde 2125 MHz bei einer Kanalbandbreite von 10 MHz ausgewählt. Diese liegt nach Bild 2.1 zwischen den beiden an die Telekom Deutschland und E-Plus versteigerten 5 MHz-Blöcke im UMTS-Bereich. Durch das Dosimeter ist eine Ausgabe im Band „UMTSrx“ zu erwarten.

Die Bilder 3.38 und 3.39 zeigen die Ergebnisse von 10 aufeinander folgenden Messung bei fest stehendem Dosimeter bei einem LTE-Signal ohne Verkehr (nur Signalisierung). Wohingegen als Referenz von der Breitbandsonde ein Wert von 1,1 V/m und vom Spektrumanalysator ein Wert von 1,06 V/m (1,26 V/m nach Korrektur) angezeigt wird, liegen die vom Dosimeter angezeigten Werte wesentlich niedriger: Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte zwischen 0,09 und 0,10 V/m bei einem (quadratischen) Mittelwert von 0,09 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 0,07 und 0,08 V/m bei einem Mittelwert von 0,08 V/m. Die Werte liegen damit wiederum mehr als 20 dB unter den Referenzwerten von Spektrumanalysator und Breitbandsonde. Wie bereits bei der Frequenz von 1815 MHz beobachtet, wird neben dem „erwarteten Band“ auch noch ein weiteres Band (DECT) in nahezu identischer Größe angezeigt. Diese Anzeige ist nicht durch Fehler beim Versuchsaufbau erklärbar, sondern wird offensichtlich durch die Signalverarbeitung im Dosimeter verursacht.

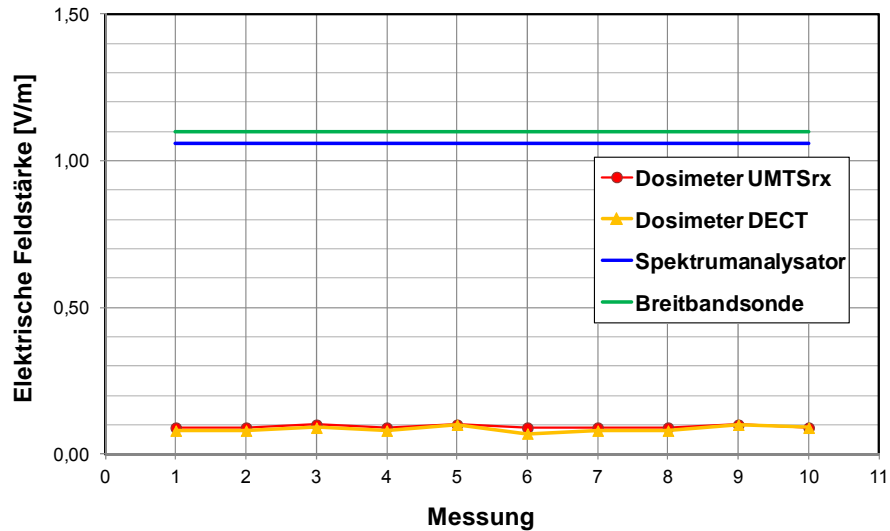


Bild 3.38: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 2125 MHz, ohne Verkehr

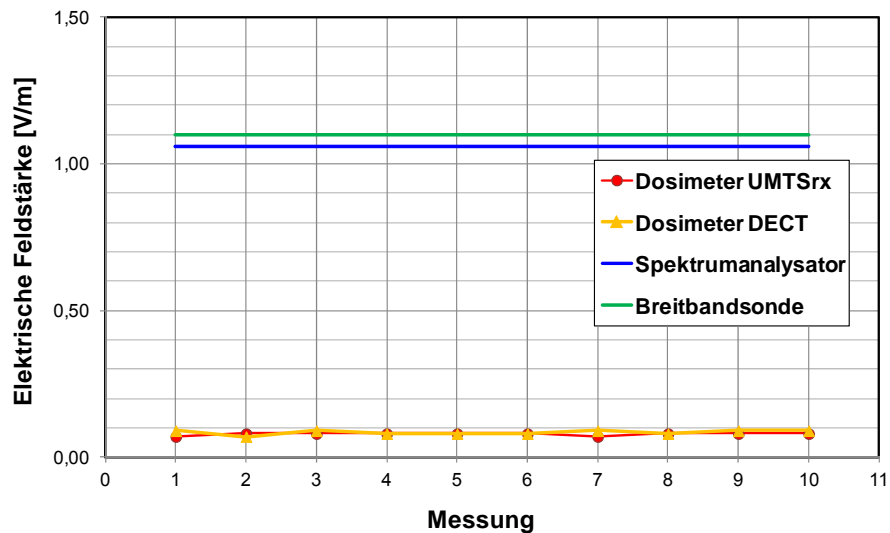


Bild 3.39: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 2125 MHz, ohne Verkehr

Die Bilder 3.40 und 3.41 zeigen die entsprechenden Ergebnisse bei maximalem LTE-Datenverkehr. Die Referenzwerte sind 1,1 V/m (Breitbandsonde) bzw. 1,06 V/m (Spektrumanalysator, 1,26 V/m nach Korrektur). Die durch das Dosimeter ermittelten Werte sind bei unveränderten Referenzwerten wiederum höher als beim Zustand ohne Verkehr. Beim Dosimeter 1 schwanken die Werte zwischen 0,83 und 0,88 V/m bei einem Mittelwert von 0,87 V/m; beim Dosimeter 2 schwanken die Werte zwischen 0,79 und 0,86 V/m bei einem Mittelwert von 0,82 V/m. Die Werte beider Dosimeter liegen unterhalb des Referenzwertes, allerdings ist die Differenz deutlich kleiner als bei 806 MHz. Die angezeigten Werte im „fehlangezeigten“ Dosimeter-Frequenzbereich „DECT“ bleiben auf vergleichbarem Niveau wie beim Zustand „ohne Verkehr“ und liegen nun weit unterhalb der Werte im erwarteten Frequenzband.

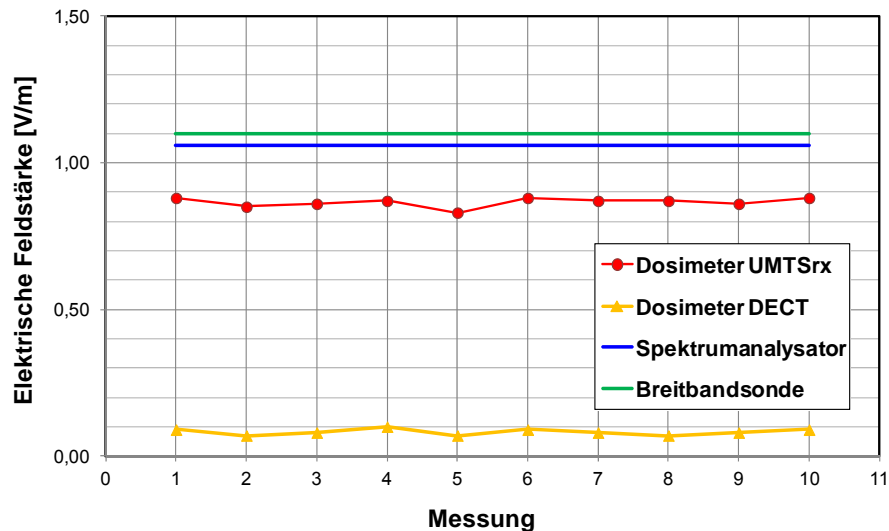


Bild 3.40: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, 2125 MHz, maximaler Verkehr

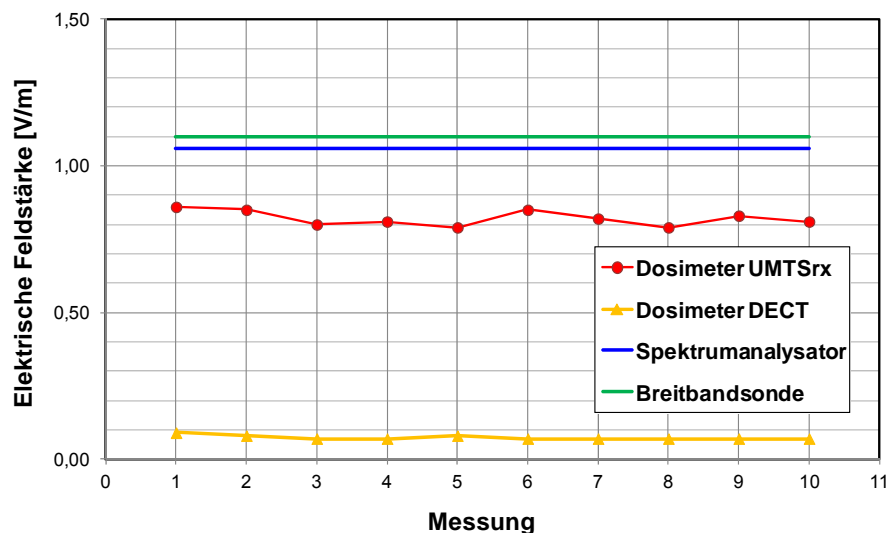


Bild 3.41: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, 2125 MHz, maximaler Verkehr

Als Fazit der Messungen ergibt sich quasi eine Vermischung der Effekte bei der ersten und zweiten untersuchten Frequenz: Wiederum ist ein deutlicher Unterschied der angezeigten Werte vom Verkehrszustand bei nahezu unveränderten Referenzwerten zu verzeichnen, der mehr als 20 dB beträgt. Außerdem werden auch in anderen, nicht durch die Sendefrequenz belegten Frequenzbändern (DECT) Anzeigewerte ausgegeben. Aus diesen Gründen wurde auf eine Vermessung der axialen Isotropie bei der dritten Frequenz verzichtet.

Als Gesamtfazit der Messungen bei allen drei Frequenzen lässt sich feststellen, dass die untersuchten Dosimeter vom Typ EME Spy 120 für die Immissionsmessung von LTE-Basisstationssignalen nicht geeignet sind. Dies hat folgende Gründe:

1. Der vom Dosimeter angezeigte Wert ist zwar vom aktuellen Verkehrszustand der LTE-Basisstation abhängig, jedoch ist die Differenz zwischen dem Zustand ohne Verkehr und dem mit maximalem Verkehr viel zu groß: Während beim Zustand „ohne

Verkehr“ (nur Signalisierung) der Anzeigewert mindestens 20 dB unterhalb des tatsächlichen zeitlichen Mittelwertes liegt, ist der Anzeigewert bei maximalem Datenverkehr wesentlich höher und kann den tatsächlichen Wert erreichen oder sogar überschreiten. Somit ist auch kein Korrekturfaktor ableitbar, da der Korrekturfaktor verkehrsabhängig ist und die aktuelle Verkehrsauslastung einer LTE-Zelle in der Regel nicht bekannt ist sowie zeitlich stark schwanken kann.

2. In den untersuchten Frequenzbereichen LTE-1800 und LTE-2000 kommt es vor allem bei niedriger Verkehrsauslastung zu Übersprechen, also zu relevanten Anzeigewerten in Frequenzbändern, die nicht durch das LTE-Signal belegt sind.
3. Es existiert kein Frequenzband im Dosimeter, das exklusiv einem LTE-Band zugewiesen ist. LTE-800 liegt beispielsweise im Band TV4&5, somit kann allein aus der Anzeige des Dosimeters nicht beurteilt werden, ob die angezeigten Werte tatsächlich von einer LTE-Station stammen, oder von einem Fernsehsender im Frequenzbereich 470-830 MHz. Ebenso verhält es sich in den anderen untersuchten Frequenzbereichen LTE-1800 (Dosimeter GSM-1800 Downlink) und LTE-2000 (Dosimeter UMTS Downlink). Ein Einsatz wäre nur dann möglich, wenn mit Hilfe einer begleitenden spektralen Messung festgestellt werden würde, dass keine anderen Quellen in dem umfassten Frequenzbereich vorhanden sind. Unter Berücksichtigung von Punkt 1 erübrigt sich ein Einsatz bei Feldmessungen aber ohnehin.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Einschätzung keine Kritik am bestimmungsgemäßen Einsatzzweck des Dosimeters darstellt, da das Dosimeter herstellereitig nicht für LTE spezifiziert ist. Eine Untersuchung der Dosimereignung für den Funkdienst TETRA, für den das Dosimeter herstellereitig spezifiziert ist, findet sich in Abschnitt 3.3.5.

3.2.6 Grundsätzliche Untersuchungen zu MIMO

3.2.6.1 Downlink-MIMO in LTE

MIMO (Multiple Input Multiple Output) bezeichnet die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen in der drahtlosen Kommunikation. Durch MIMO-Techniken kann sowohl die Datenübertragung robuster gestaltet, als auch die Datenrate erhöht werden.

Nach LTE-Spezifikation sind die folgenden MIMO-Modes für LTE möglich [GES 11]:

- Single-Antenna Transmission (kein MIMO)
- Transmit Diversity
- Spatial Multiplexing
- Kombinationen aus Transmit Diversity und Spatial Multiplexing
- Beamforming

Die wichtigsten MIMO-Techniken werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Transmit Diversity (Space Time Coding)

Beim Transmit Diversity werden von der Basisstation identische Daten über mehrere Antennen redundant übertragen. Befinden sich die Sendeantennen weit genug voneinander entfernt, so sind die Fading-Eigenschaften der jeweiligen Ausbreitungspfade zum Empfänger unabhängig voneinander. Um ein redundantes Signal zu erzeugen, werden sog. Space-Time Codes verwendet. Alamouti entwickelte die ersten Codes für zwei Antennen. Jede Antenne verwendet ein unterschiedliches Coding, aber der gesendete Informationsgehalt bleibt gleich. Somit wird durch Transmit Diversity nicht die Datenrate erhöht, sondern die Übertragung robuster gestaltet (z.B. gegen Fading). Durch diese mehrfache Übertragung des codierten Datenstroms über unabhängige Pfade steigt die Chance für den Empfänger, das Signal zuverlässig zu empfangen, selbst wenn einer der Pfade sehr starkem Fading unterliegt. Bild 3.42 zeigt die Prinzipskizze für das Space Time Coding mit zwei Sende- und einer Empfangsantenne [MAU 07]. Alternativ kann die Codierung auch im Frequenzbereich erfolgen (Space Frequency Coding).

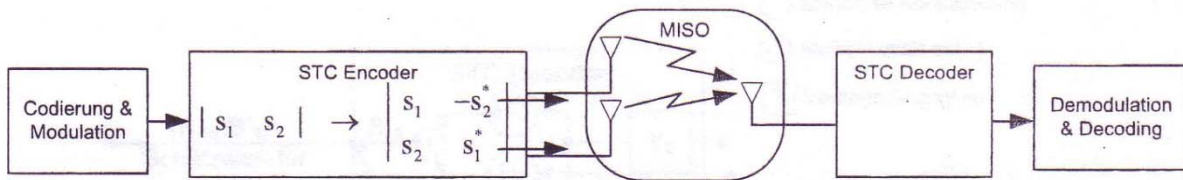


Bild 3.42: Prinzip des Space Time Coding mit zwei Sendeantennen [MAU 07]

Spatial Multiplexing

Beim Spatial Multiplexing wird das zu übertragende Signal in mehrere Einzeldatenströme aufgeteilt. Jeder Teildatenstrom wird über eine andere Sendeantenne abgestrahlt. Die maximale Anzahl der zu multiplexenden Datenströme hängt von der Antennenkonfiguration ab. Zum Beispiel können in einer 2x2 MIMO-Konfiguration mit zwei Sende- und zwei Empfangsantennen zwei Datenströme örtlich gemultiplext werden. Die Ausbreitungspfade müssen durch einen Mindestabstand der Antennen unkorreliert sein. Unter der Annahme einer Mehrwegeumgebung treffen die unterschiedlichen Sendesignale an den Empfangsantennen mit genügend unterschiedlichen räumlichen Signaturen (d.h. mit unterschiedlichen „räumlichen Fingerabdrücken“) ein und ermöglichen im Empfänger eine Unterscheidung der verschiedenen Datenströme.

In Bild 3.43 ist dies in einer Prinzipskizze dargestellt ([MAU 07]): Ein seriell ankommender Datenstrom aus $M_t \cdot z$ Symbolen wird in M_t parallele Blöcke mit jeweils z Symbolen aufgeteilt und über M_t Sendeantennen übertragen.

Das Spatial Multiplexing ermöglicht gegenüber dem Transmit Diversity einen Durchsatzgewinn, d.h. eine höhere Datenrate bei gleich bleibender Robustheit.

Sofern die einzelnen Datenströme für einen Empfänger bestimmt sind, wird von Einzel-User MIMO (engl. Single-User MIMO; SU-MIMO) gesprochen, wohingegen bei mehreren Empfängern der Begriff Mehr-Benutzer-MIMO (engl. Mult-User MIMO; kurz MU-MIMO) verwen-

det wird. Während das SU-MIMO direkt die einzelne jeweilige Datenrate beeinflusst, wird beim MU-MIMO die Kapazität der gesamten Versorgungszelle erhöht.

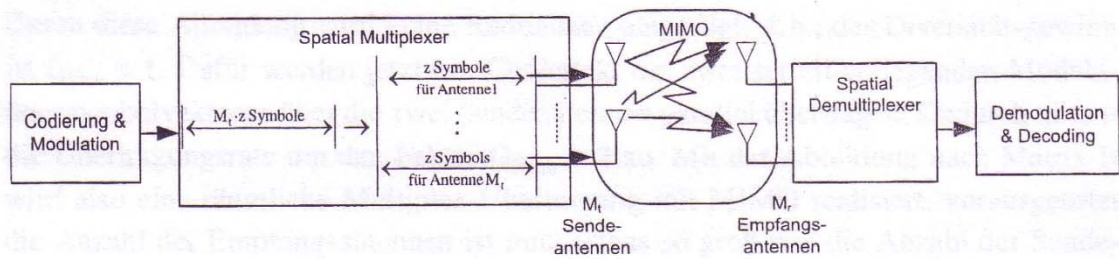


Bild 3.43: Prinzip des Spatial Multiplexing [MAU 07]

In praktischen MIMO-Systemen ist eine Kombination aus Transmit Diversity und Spatial Multiplexing möglich. Beide Techniken benötigen jedoch Umgebungen, in denen die räumlichen Ausbreitungspfade möglichst wenig miteinander korreliert sind. In Umgebungen mit einem dominanten Ausbreitungspfad, wie z.B. in LOS-Szenarien, kann mit diesen beiden Techniken nur ein geringer Gewinn realisiert werden.

Adaptive Antennensysteme / Beamforming

Die Idee bei einem adaptiven Antennensystem ist es, die Sendeenergie der Antenne nicht gleichmäßig im Sektor zu verteilen, sondern auf einzelne Benutzer zu fokussieren. Durch die damit verbundene Interferenzminimierung wird u.a. eine Kapazitätserhöhung (bzw. bei gleicher Datenrate auch eine Expositionsminderung) erreicht. Beim Beamforming werden ein Antennenarray bzw. mehrere räumlich getrennte Antennen benötigt.

Als Konzepte sind das „Switched Beamforming“ sowie das „Adaptive Beamforming“ möglich (Bild 3.44).

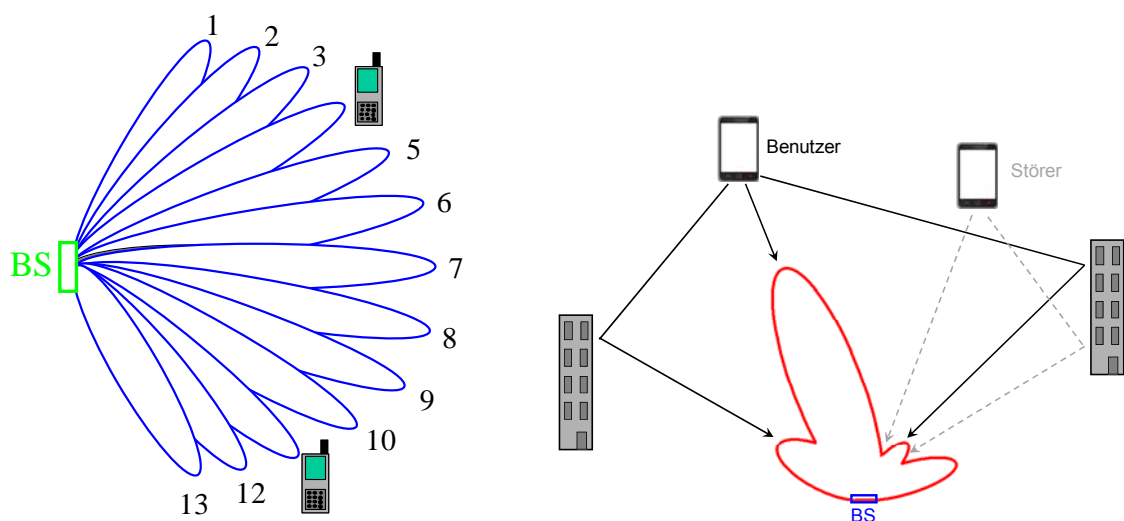


Bild 3.44: Switched Beamforming (links) und Adaptive Beamforming (rechts)

Beim „Switched Beamforming“ werden im Vorhinein fest definierte Positionen der Hauptstrahlungsbereiche der Antenne festgelegt. Als Kriterium für die Auswahl *eines speziellen* Strahlungskegels kann z.B. die empfangene Leistung eines Benutzers dienen.

Beim „Adaptive Beamforming“ wird die Abstrahlcharakteristik mit Hilfe einer digitalen Signalverarbeitung in optimaler Weise an das jeweilige Versorgungsszenario angepasst. Das Antennendiagramm wird dabei so geformt, dass ein Strahlungskegel in Richtung des gewünschten Benutzers ausgebildet wird, wobei hier auch Reflexionspfade berücksichtigt werden. Zu Benutzern, die anderen Zellen zugeordnet sind und durch ihre Immission Interferenzen in der „adaptiven“ Zelle verursachen, wird ein Minimum im Abstrahldiagramm ausgebildet.

Nach [GES 11] werden bei LTE nur die PDSCH-Übertragungen in das Beamforming einbezogen.

3.2.6.2 Derzeitige Adaptierung und Konsequenzen für die Messtechnik

Nach Aussagen der Netzbetreiber wird derzeit häufig Polarisationsdiversity (als spezielle Form des Transmit Diversity) eingesetzt. Da bei LTE-Basisstationen primär kreuzpolarisierte Antennen eingesetzt werden, werden dabei zwei (vom Informationsgehalt identische) Datenströme an den $+45^\circ$ und den -45° Konnektor der Antenne angeschlossen und über die Luftschnittstelle übertragen. Hierbei werden also die beiden orthogonalen Polarisations Ebenen als „räumlich getrennte Antennen“ betrachtet.

Sowohl für die spektrale, als auch für die codeselektive Messtechnik ist es hierbei wichtig zu wissen, wie die Steuersignale und -kanäle auf die beiden Antennen (bzw. die beiden Polarisations Ebenen) aufgeteilt werden.

Die Verteilung der Referenzsignale (RS) auf die beiden Antennen ist in Bild 3.45 dargestellt [ETSI TS 136.211]. Im Gegensatz zu Bild 3.6 (Einantennenkonfiguration) ist in jedem Symbol, das die zellspezifischen RS beinhaltet, der mittlere Unterträger zwischen zwei RS ausgetastet (leer). Genau in diesen Lücken befinden sich bei der anderen Antenne die RS-Elemente. Durch diese verschachtelte Anordnung ist es dem Endgerät aufgrund der eindeutigen Lage der RS-Elemente im Resource Grid möglich zu erkennen, ob die RS von Antenne 1 oder Antenne 2 stammen.

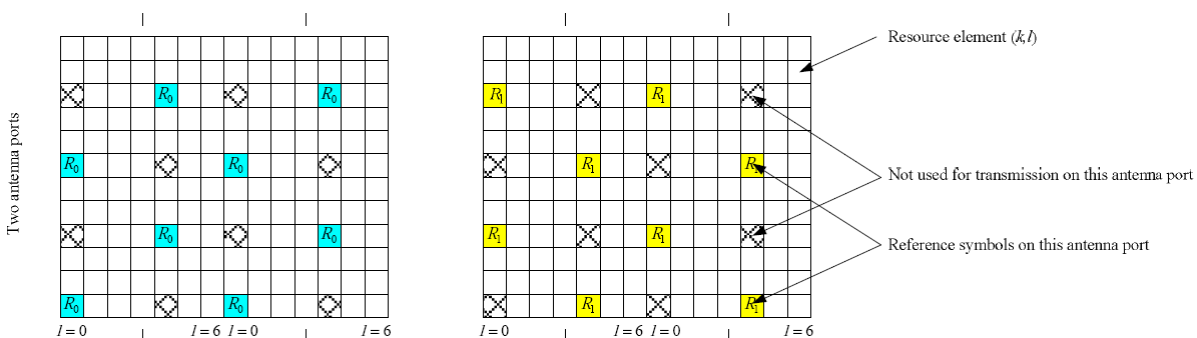


Bild 3.45: Verteilung der Referenzsignale (RS) auf 2 Sendeantennen, normal CP [ETSI 136.211]

Für die spektrale Messung ist von Bedeutung, dass die RS von beiden Antennen nicht zeitlich (bzw. in der Phase) verschoben sind, sondern in ein und demselben Symbol liegen

und ihre Immissionsbeiträge sich summieren. Wird also für eine Messung der RS mit der Schwenkmethode mit einer einachsigen Antenne durch Drehen in der Polarisationssebene das Immissionsmaximum gefunden, ist für die Berücksichtigung der zweiten Polarisationssebene kein Korrekturfaktor notwendig, da die Methode die Resultierende aus den beiden orthogonalen RS-Immissionen findet. Bei einer isotropen Sonde ist durch die Isotropie ohnehin eine korrekte Berücksichtigung der orthogonalen Einzelbeiträge sichergestellt.

Bei der codeselektiven Messung ist zu unterscheiden, ob der Algorithmus den Mittelwert zwischen den RS-Immissionen beider Antennen ausgibt oder die RS-Immission der als stärker empfangenen Antenne. Die erste Variante stellt nach [ICNIRP 98] die exaktere Variante im Sinne einer korrekten Summation der Immission von zwei Quellen dar; letztere Variante entspricht einer Abschätzung nach oben und kann dann zu einer Überschätzung führen, sofern am Messort eine Polarisationsrichtung gegenüber der anderen dominant ist. Auf jeden Fall sind bei der codeselektiven Messung die Immissionsbeiträge der beiden Antennen zu addieren.

Laut Aussagen der Netzbetreiber werden P-SS und S-SS derzeit nicht im Diversity-Mode über beide Polarisationssebenen gleichzeitig sondern jeweils nur über eine Ebene abgestrahlt; es ist jedoch eine zeitlich wechselseitige Abstrahlung möglich. Für eine mögliche Hochrechnung auf Basis der Synchronisierungssignale ist die wechselseitige Abstrahlung ohne Folgen für eine korrekte spektrale Messung; für die codeselektive Messung gilt das bei der RS-Immission Gesagte. Nur wenn die Synchronisierungssignale *permanent* von der 45° Ebene oder der -45° Ebene abgestrahlt werden würden (d.h. ohne Wechsel), wären Über- und Unterschätzungen möglich, je nachdem, ob die Polarisationssebene mit oder ohne Synchronisierungssignale am Messort dominiert. Im Fall der spektralen Messungen wird eine Unterschätzung begrenzt sein, da automatisch die nächststärkeren Signale (Signalisierungen oder Verkehrsdaten), die über beide Ebenen abgestrahlt werden, gemessen werden.

Die anderen Signalisierungen (PBCH, PDCCH) können derzeit sowohl mit, als auch ohne Diversity gesendet werden. Sie sind für die codeselektive Messtechnik ohne Belang. Bei der spektralen Messtechnik werden sie korrekt erfasst, sofern sie über beide Ebenen gesendet werden. Sofern sie statisch nur über eine Ebene übertragen werden, sind wieder Über- oder Unterschätzungen möglich, sofern eine Hochrechnung auf Basis dieser Signale durchgeführt werden sollte.

Prinzipiell ist hierbei anzumerken, dass die Verteilung der P-SS, S-SS, PBCH und PDCCH auf die Antennenebenen in gewissem Umfang Optimierungsparameter darstellen, die im späteren Wirknetzbetrieb anders eingestellt sein können als derzeit.

Andere MIMO-Modes werden derzeit noch nicht verwendet, sondern befinden sich im Untersuchungsstadium. Mit ihrem Einsatz ist allerdings nicht kurzfristig, sondern höchstens mittel- bis langfristig zu rechnen.

3.3 TETRA BOS

3.3.1 Signalverläufe von TETRA-Basisstationssignalen

Die Signale einer TETRA-Basisstation sind denen einer GSM-Sendeanlage sehr ähnlich. Bei TETRA wird aufgrund des benutzten Zugriffsverfahrens (TDMA = Time Division Multiple Access) ein physikalischer Funkkanal mit der Bandbreite von 25 kHz in vier Zeitschlitz und somit in vier unabhängige Kommunikationskanäle unterteilt. Zum Vergleich: GSM unterteilt einen 200 kHz breiten Kanal in acht Zeitschlitz. Somit ermöglicht TETRA um den Faktor vier mehr Zeitschlitz bzw. Kommunikationsverbindungen pro MHz Bandbreite als GSM.

Vier aufeinanderfolgende Zeitschlitz bilden also bei TETRA einen TDMA-Rahmen (Frame). Dieser besitzt eine Dauer von 56,67 ms, während ein Zeitschlitz (Slot) 14,167 ms breit ist. Bild 3.46 zeigt die prinzipielle Rahmenstruktur von TETRA.

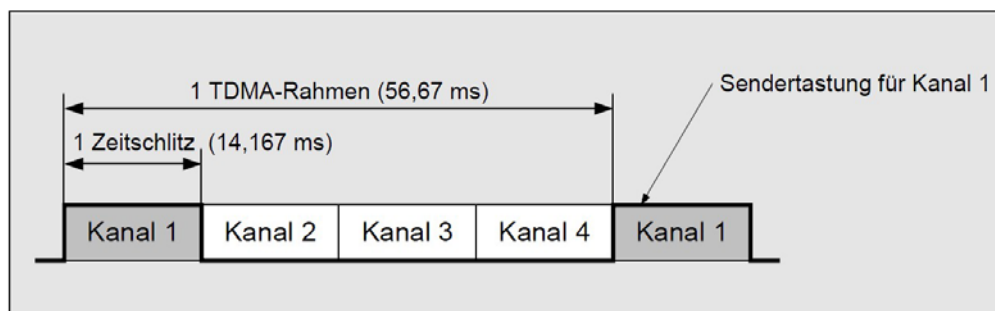


Bild 3.46: TETRA-Rahmenstruktur [BAK 01]

Für eine einfache Sprachverbindung zu einem Endgerät wird pro Rahmen ein Zeitschlitz belegt. Theoretisch können also mit einem physikalischen Kanal (d.h. einer Sendeempfangseinheit) gleichzeitig maximal vier Mobiltelefon-Verbindungen unterhalten werden (bei Vernachlässigung der Signalisierung). In der Praxis sind jedoch bei einer Anlage, die nur einen Frequenzkanal nutzt, maximal drei Verbindungen gleichzeitig möglich, da der erste Zeitschlitz (wie auch bei GSM der Fall) für Signalisierungszwecke verwendet wird und daher nicht für Verkehrsdaten zur Verfügung steht. Über diesen ersten Zeitschlitz werden unter anderem Daten des MCCH (Main Control Channel) abgestrahlt. Der MCCH ist vergleichbar zum BCCH (Broadcast Control Channel) bei GSM.

Wird eine zweite Frequenz in der Zelle verwendet, stehen allerdings vier weitere Kanäle zur Verfügung (der erste Zeitschlitz der zweiten Frequenz muss nicht mehr für Signalisierung reserviert werden), die Gesamtkapazität steigt somit auf sieben Nutzkanäle an. Bei drei verwendeten Frequenzen ergeben sich maximal elf Nutzkanäle.

Aufgrund der Zeitstruktur erhalten die Telefone etwa achtzehnmal pro Sekunde einen für sie bestimmten Burst mit Nutzdaten. Grundsätzlich kann auch bei TETRA eine Zeitschlitzbündelung erfolgen (bis zu vier Zeitschlitz können gebündelt werden), wodurch die maximal übertragbare Datenrate gesteigert wird.

Auf dem Träger, über den der MCCH abgestrahlt wird („MCCH-Träger“) müssen alle Zeitschlitz immer mit Burstsignalen gefüllt werden, auch wenn gerade gar keine Verbindungen zu Teilnehmern zu führen sind. Auch dies ist vergleichbar zu GSM und hat den Zweck, den Endgeräten ein möglichst zeitkonstantes Signal zur Verfügung zu stellen, das beispielsweise

als Referenz für vergleichende Empfangspegelmessungen der Endgeräte zum Zweck der Zellwahl genutzt wird. Kapitel 9.4.5.1 des relevanten TETRA-Standards [ETSI 300.392] spezifiziert, dass in allen weiteren in der Zelle genutzten Frequenzkanälen („Traffic-Kanäle“) die ungenutzten Zeitschlitze ebenfalls mit Burstsignalen gefüllt werden können, sie müssen es aber nicht. Eine zusätzliche Regelung der Sendeleistung abhängig von der aktuellen Verbindungsqualität gibt es bei TETRA nur im Uplink, jedoch nicht im Downlink.

Ist eine Funkzelle also mit nur einer Frequenz ausgestattet, so wird permanent die volle Leistung abgestrahlt, eine auslastungsabhängige Emission ist nicht zu beobachten. Diese kann nur bei Standorten auftreten, die mindestens mit zwei Frequenzen ausgestattet sind, da hier - wie auch bei GSM - grundsätzlich gestattet ist, die aktuell unbenutzten Zeitschlitze insbesondere zum Zweck der Interferenzminimierung abzuschalten. Das von GSM bekannte Frequenzsprungverfahren („Frequency Hopping“), das meist bei den Traffic-Kanälen angewendet wird, um die Auswirkungen von Interferenzen zu minimieren, ist bei TETRA nicht vorgesehen.

Als Modulationsverfahren kommt bei TETRA nicht das bei GSM verwendete GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) zur Anwendung, sondern $\pi/4$ -DQPSK ($\pi/4$ -shifted Differential Quaternary Phase Shift Keying), was im Vergleich zu GMSK eine höhere spektrale Effizienz besitzt. Dabei werden immer zwei aufeinanderfolgende Bits zu einem Symbol zusammengefasst, wodurch vier verschiedene Symbole (00, 01, 10 und 11) möglich sind. Diese wiederum werden im Hochfrequenzsignal nicht absolut in der Phase, sondern differenziell als Veränderung der Phase codiert. „ $\pi/4$ “ bedeutet, dass dabei nur Phasensprünge von $0^\circ \pm 45^\circ$ bzw. $180^\circ \pm 45^\circ$ möglich sind. Die Phase des HF-Trägers kann sich somit von Symbol zu Symbol nur um die vier Winkel -45° , $+45^\circ$, -135° oder $+135^\circ$ ändern.

Dieses Verfahren führt jedoch zu stärkeren Schwankungen in der Signalhüllkurve, als es bei GMSK der Fall ist. Ist der modulationsbedingte Crestfaktor von GSM nahezu vernachlässigbar, beträgt er bei $\pi/4$ -DQPSK etwa 3 dB. Dies hat - wie im nächsten Abschnitt noch näher gezeigt wird - direkte Auswirkungen auf die Signalmesstechnik.

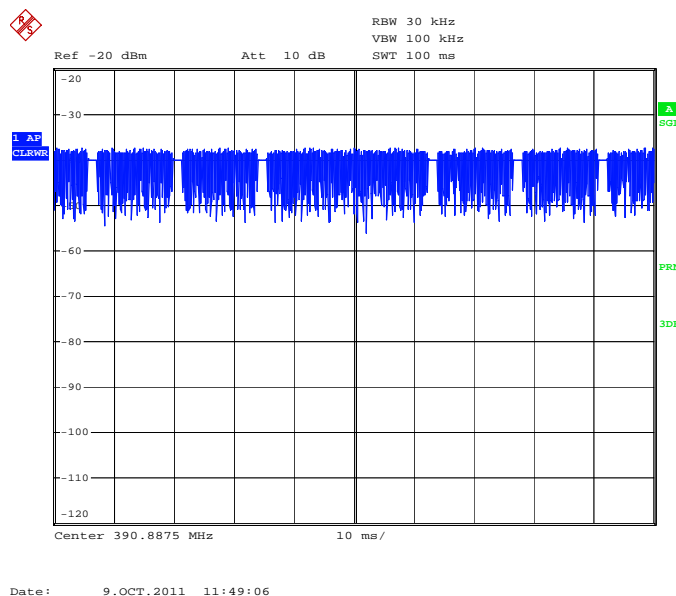


Bild 3.47: Zeitlicher Verlauf der Sendeleistung eines TETRA-Basisstationssignals („MCCH-Träger“).

Wie aus Bild 3.47 ersichtlich, zeigt das TETRA Signal eine Schwankungsbreite der Momentanleistung von mehr als 10 dB, was durch das angewendete Modulationsverfahren bedingt ist. Nur für kurze Zeiträume (innerhalb der Zeitschlitz 2 bis 4 eines Frames) beobachtet man eine konstante Leistungsabgabe. Diese ist dadurch bedingt, dass hier ein Bursttyp abgestrahlt wird, der jeweils in einem definierten Zeitraum zum Zweck der Frequenzsynchronisation der Endgeräte eine fest vorgegebene Bitsequenz überträgt, die dazu führt, dass durch die differenzielle Phasencodierung permanent nur 45°-Phasensprünge auftreten, was zu einer nahezu konstanten Hüllkurve des HF-Signals führt.

In folgender Tabelle sind die wesentlichen Eigenschaften der Signale in der BOS-TETRA-Luftschnittstelle denen von GSM-Signalen gegenübergestellt:

Parameter / Eigenschaft	BOS-TETRA	GSM
Frequenzbereich	390 - 395 MHz	925 - 960 MHz; 1820 - 1880 MHz
Kanalbandbreite	25 kHz	200 kHz
Vielfachzugriffsverfahren	TDMA	TDMA
Zeitschlitz / Frame	4	8
Dauer eines Frames	55,67 ms	4,6 ms
Modulationsverfahren	$\pi/4$ -DQPSK	GMSK
Crestfaktor aufgrund der Modulation	ca. 3 dB	ca. 0 dB
Leistungsregelung	Nur im Uplink möglich	Im Up- und im Downlink möglich
Frequency Hopping	Nicht vorgesehen	Möglich

Tabelle 3.11: Vergleich wichtiger Parameter und Eigenschaften von TETRA- und GSM-Basisstationssignalen.

3.3.2 Spektrale Messung von TETRA-Signalen

3.3.2.1 Korrekte Messung

Um auch für TETRA-Signale optimale Werte für die wesentlichen Parameter des Analysators zu bestimmen, wurde wieder mittels Signalgeneratoren (Rohde & Schwarz SMU-200A und Willtek 2303 Stabilock) ein TETRA-Basisstationssignal (Frequenzbereich: 390 - 395 MHz) generiert und über eine Koaxialleitung direkt mit dem Eingang des Spektrumanalysators verbunden. Als Messgeräte standen hierbei zwei typische Laboranalysatoren (ESPI-3 sowie FSL-6 von Rohde & Schwarz) sowie das SRM-3006 von Narda zur Verfügung.

Detektor

Aufgrund des den Grenzwertempfehlungen von ICNIRP [ICNIRP 98] zugrunde liegenden thermischen Wirkungsmodells muss bei zeitlich schwankender Exposition (aufgrund der schnellen zeitlichen Leistungsschwankungen des TETRA-Signals durch das Modulationsverfahren) eine zeitliche Mittelung der Exposition durchgeführt werden. Dies erfolgt am einfachsten mit dem RMS-Detektor am Spektrumanalysator. Wird die Messung stattdessen mit

einem Peak-Detektor durchgeführt, so würde die richtlinienkonform zu bestimmende Immis- sion um den Crestfaktor überbewertet.

Bild 3.48 zeigt das Ergebnis der spektralen Messung eines TETRA-Signals, in der ein Vergleich zwischen Peak- und RMS-Detektor vorgenommen wurde. Am Generator war ein TETRA-Signal der Frequenz 392 MHz mit einem Pegel von -20 dBm eingestellt. Offensicht- lich liefert der RMS-Detektor (bei Berücksichtigung der Kabeldämpfung) zwischen Generator und Analysator) den korrekten Leistungswert, während die Verwendung des Peak-Detektors zu einer Überbewertung von etwas mehr als 3 dB führt. Die Fehlbewertung liegt also - wie zu erwarten - in der Größenordnung des Crestfaktors.

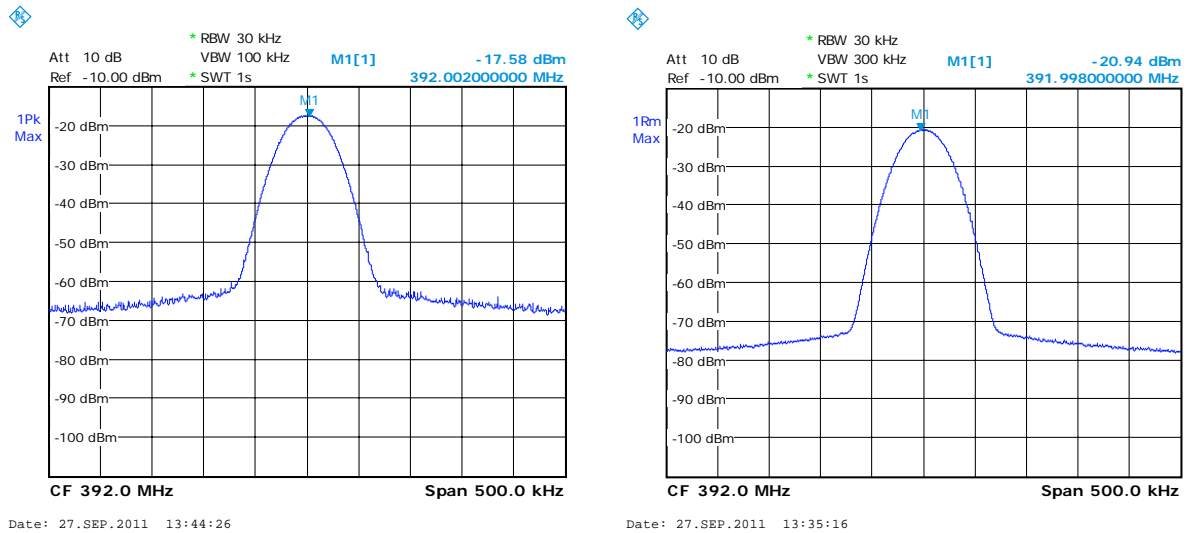


Bild 3.48 Spektrale Messung eines TETRA-Signals mit dem FSL-6; Messwert bei Verwendung des Peak-Detektors (links): -17,58 dBm; Messwert bei Verwendung des RMS-Detektors (rechts): -20,94 dBm. Eingestellt war eine Generatorausgangsleistung von -20 dBm.

Beim SRM-3006 wird die RMS-Glättung durch das Videofilter durchgeführt (siehe dazu auch Abschnitt 3.2.2.5). Auch diese Funktion wurde im Rahmen der Erprobungsmessungen überprüft. Die Ergebnisse sind in Bild 3.49 zu sehen. Am Generator war ein TETRA-Signal der Frequenz 390,8875 MHz mit einem Pegel von -40 dBm eingestellt.

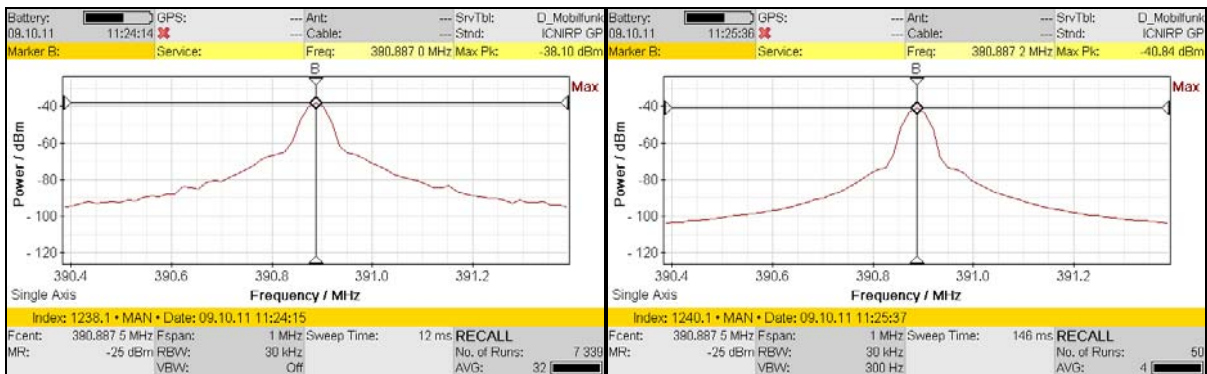


Bild 3.49 Spektrale Messung eines TETRA-Signals mit dem SRM-3006; Messwert bei Peak-Detektion, d.h. VBW = „off“ (links): -38,10 dBm; Messwert bei RMS-Glättung durch das Videofilter, d.h. VBW = 300 Hz (rechts): -40,84 dBm. Eingestellt war eine Generatorausgangsleistung von -40 dBm.

Die Vergleichsmessung mit einem ESPI-3 und RMS-Detektion ergab einen Leistungswert von $-40,46$ dBm, so dass von einer guten Übereinstimmung beider Messungen gesprochen werden kann.

Offensichtlich erzielt man also mit dem SRM-3006 eine für TETRA-Signale optimale RMS-Glättung bei Verwendung eines Videofilters mit einer Bandbreite von 300 Hz, also einem Prozent der RBW. Eine weitere Verringerung der VBW führt zu keiner signifikant besseren Glättung, dafür nimmt die vom Gerät gewählte Sweepzeit auf mehr als eine Sekunde zu, was insbesondere bei Verwendung der Schwenkmethode als zu groß anzusehen ist, da in diesem Fall die Bewegung der Messantenne im Untersuchungsvolumen extrem langsam erfolgen muss.

Bild 3.50 zeigt das Ergebnis der Messung des TETRA-Signals aus Bild 3.49 bei Darstellung des gesamten derzeit in Deutschland relevanten Downlinkfrequenzbereichs. Der Anzeige kann man entnehmen, dass die Sweepzeit mit 179 ms weiterhin ausreichend klein bleibt und sich der Messwert - trotz geringerer Verweilzeit auf dem Signal - im Vergleich zur Messung mit kleinerem Span nicht nennenswert verändert hat.

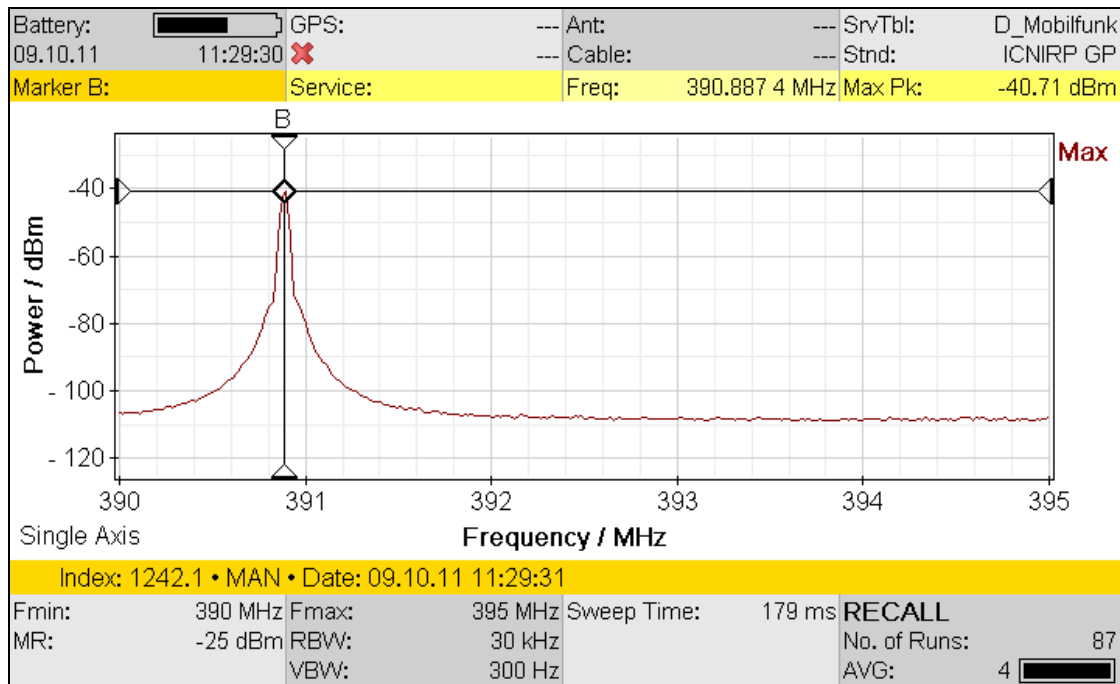


Bild 3.50 Spektrale Messung eines TETRA-Signals mit dem SRM-3006; Darstellung des gesamten TETRA-Downlinkfrequenzbereichs; Messwert bei RMS-Glättung durch das Videofilter, d.h. VBW = 300 Hz: $-40,71$ dBm. Eingestellt war eine Generatorausgangsleistung von -40 dBm.

Auflösebandbreite (RBW)

Das TETRA-Signal muss mit einer Auflösebandbreite gemessen werden, die mindestens so groß wie die Signalbandbreite ist, da es ansonsten zu einer Unterbewertung der Immission kommt. Dies ist in Bild 3.51 gezeigt, in dem die Ergebnisse zweier TETRA-Messungen mit zwei unterschiedlichen Bandbreiten dargestellt sind. Am Generator war eine Signalfrequenz von 392 MHz und ein Pegel von -20 dBm eingestellt. Größere Auflösebandbreiten als 30 kHz sind nicht sinnvoll, da bei deren Verwendung frequenzmäßig eng benachbarte Signale nicht mehr separiert werden können.

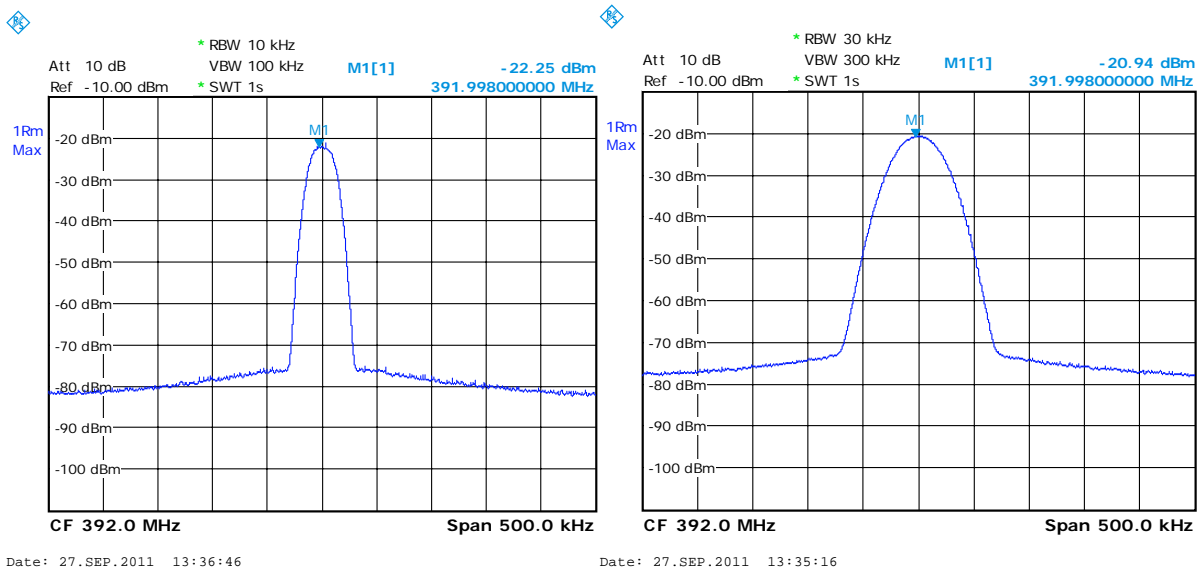


Bild 3.51 Spektrale Messung eines TETRA-Signals mit dem FSL-6; Ergebnis bei einer RBW von 10 kHz (links) bzw. 30 kHz (rechts). Markerwerte: -22,25 dBm (links), -20,94 dBm (rechts).

Aus Bild 3.51 ist ersichtlich, dass die mit einer Auflösebandbreite von 10 kHz gemessenen Werte im Vergleich zur korrekten Messbandbreite (30 kHz) etwa 1,3 dB zu niedrig sind. Daher sollte eine Auflösebandbreite von 10 kHz nur dann verwendet werden, wenn das TETRA-Spektrum so dicht belegt ist, dass eine vernünftige Trennung der einzelnen Signale mit einer RBW von 30 kHz nicht mehr vernünftig möglich ist. Allerdings sollte dann die leichte Unterbewertung durch einen Zuschlag entsprechend korrigiert werden.

Sweeptime (SWT)

Ein sehr wichtiger und bei nicht korrekter Auswahl fehlerträchtiger Aspekt bei Verwendung des RMS-Detektors gängiger Laboranalysatoren ist die Einstellung einer angepassten Sweeptime (SWT). Grundsätzlich wird man bei der Messung von TETRA-Signalen bestrebt sein, eine möglichst kurze Sweeptime am Gerät einzustellen, damit eine möglichst große Anzahl an Messungen pro Sekunde vorgenommen wird, was insbesondere bei der Schwenkmethode eine möglichst dichte Abtastung des Messvolumens ermöglicht.

Wie allerdings bereits in Abschnitt 3.2.2.1 dargelegt, führt eine zu geringe Sweeptime zu einer unvollkommenen RMS-Glättung, wodurch aufgrund der üblicherweise gewählten Max-

Hold-Betriebsart eine nicht unerhebliche Überschätzung der Exposition verursacht werden kann. In Bild 3.52 wird dieser Effekt dargestellt. Am Generator war ein TETRA-Signal der Frequenz 390,8875 MHz mit einem Pegel von -40 dBm eingestellt.

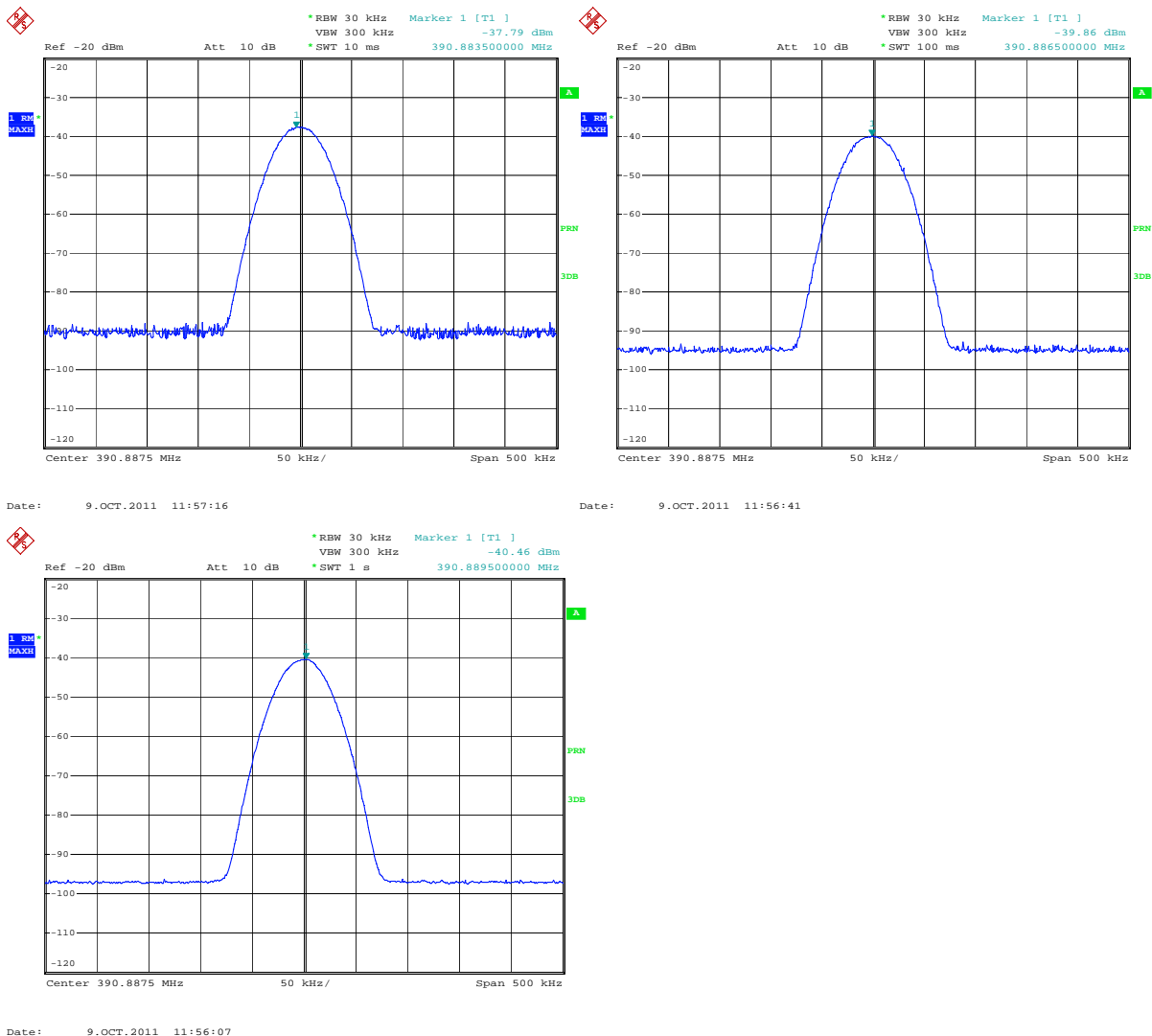


Bild 3.52 Spektrale Messung eines TETRA-Signals mit dem ESPI-3; Messung mit RMS-Detektor und einer Sweeptime von 10 ms (oben links), 100 ms (oben rechts) bzw. 1 s (unten). Markerwerte: -37,79 dBm (oben links), -39,86 dBm (oben rechts) und -40,46 dBm (unten).

Gegenüber der Sweeptime von 1 s ist bereits bei einem Wert von 100 ms eine leichte Vergrößerung des Messwertes um etwa 0,6 dB zu beobachten. Verkleinert man die Sweeptime nochmals um den Faktor 10, so ergibt sich eine Überbewertung um mehr als 2,5 dB. Die Sweeptime von 100 ms stellt bei dem hier verwendeten Analysator (ESPI-3) offensichtlich einen guten Kompromiss aus Messgeschwindigkeit und zuverlässiger RMS-Glättung dar. Allerdings sollte die Sweeptime keinesfalls kleiner als 100 ms gewählt werden, wenn man eine deutliche Überbewertung der Immission vermeiden will.

3.3.2.2 Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung

Grundidee der Bestimmung der Immission von TETRA-Anlagen bei maximaler Anlagenauslastung ist es, die Immission durch Kanäle zu bestimmen, die verkehrsunabhängig mit konstanter Sendeleistung abgestrahlt werden, und diese Immission mit dem Verhältnis von maximal möglicher Sendeleistung der Anlage zur Sendeleistung des gemessenen Kanals zu extrapolieren. Dieses Verfahren wird in gleicher Weise bei der Extrapolation der Immissionen von GSM-Sendeanlagen verwendet und ist beispielsweise in [BOR 05] eingehend beschrieben. Im Folgenden wird das Verfahren nochmals kurz skizziert:

Eine TETRA-Basisstation kann auf einer oder mehreren, fest zugeordneten Frequenzen Signale abgeben. Jede Frequenz bildet einen physikalischen Kanal. Für jeden Sektor (bzw. jede Funkzelle) der Basisstation gibt es allerdings immer einen Kanal, der ständig

- konstant mit maximaler Leistung sendet und
- bei dem alle Zeitschlitze mit Signal belegt sind, auch wenn gerade keine Verbindung über diesen Kanal abgewickelt wird.

Bei TETRA wird diese Frequenz häufig „MCCH“-Träger (MCCH = Main Control Channel) genannt, sie dient u.a. als Referenzsignal für Zellwahl und Handover und bestimmt durch ihr permanentes Vorhandensein die minimale in einer Funkzelle mögliche Immission.

Zusätzlich zur MCCH-Frequenz können ein oder mehrere so genannte Nutz- oder Gesprächskanäle (TCH, Traffic Channel) hinzukommen, falls eine größere Anzahl an Gesprächen abzuwickeln ist. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass im Gegensatz zum MCCH

- nur dann gesendet wird, wenn Gespräche zu übertragen sind,
- gegebenenfalls nur in denjenigen Zeitschlitzen gesendet wird, in denen ein Gespräch läuft.

Die TCH's sind dafür verantwortlich, dass die Sendeleistung der Basisstation zeitlich nicht konstant ist, sondern vom Gesprächsaufkommen abhängt.

Die Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung erfolgt derart, dass zunächst die Immission, verursacht nur durch die MCCH-Kanäle gemessen wird und diese Immissionen nachträglich mit Hilfe der Anzahl der maximal möglichen Kanäle pro Funkzelle linear hochgerechnet wird.

Für eine korrekte Bestimmung der maximal möglichen Immission einer Anlage ist die konstruktive Mitarbeit des Netzbetreibers notwendig. Falls vom Betreiber

- die Anzahl der TETRA-Sektoren (Zellen) am Funkstandort,
- die maximale Anzahl der Kanäle pro Sektor (Zelle) und
- möglichst auch die Frequenzen der unterschiedlichen Kanäle (MCCH und TCH)

benannt werden, kann eine Zuordnung der im Spektrum gemessenen Immissionen auf die unterschiedlichen Kanäle der Station(en) und eine entsprechende Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung zuverlässig erfolgen.

Liegen keine Angabe vom Betreiber über die Anzahl der Sektoren und die maximale Kanalzahl vor, kann nur eine ungenaue Extrapolation durchgeführt werden, wobei die am Standort

vorhandene Sektorzahl in den meisten Fällen aufgrund der Messergebnisse noch gut erkennbar wird (es sei denn, zum Zeitpunkt der Messung sind nicht alle installierten Sektoren in Betrieb). Will man eine Unterbewertung der Immission möglichst ausschließen, sollte die Extrapolation unter Annahme einer besonders großen Kanalzahl erfolgen. Für besonders sicherheitsrelevante Bereiche ist mit Funkzellen von bis zu acht Kanälen zu rechnen. Bei vielen Standorten führt diese Vorgehensweise allerdings vermutlich zu einer deutlichen Überbewertung der Immission.

Die maximale Kanalzahl kann unter Umständen durch einen Vergleich der Sicherheitsabstände (BNetzA-Datenbank im Internet oder Standortbescheinigung) eines BOS-Standortes mit bekannter Konfiguration und der Abstände der betrachteten Anlage mit unbekannter Konfiguration auf realistischere Werte eingegrenzt werden.

3.3.2.3 Nachweisgrenzen, Messunsicherheit

Betrachtet man das SRM-3006 mit isotroper Antenne und den als optimal anzusehenden Einstellparametern (RBW = 30 kHz, VBW = 300 Hz), so ergibt sich eine Nachweisgrenze (Grundrauschen) von etwa 50 dB μ V/m. Damit ist eine Überprüfung der Einhaltung des Grenzwertes sicher gegeben. Der Grenzwert beträgt im BOS-TETRA-Frequenzbereich 27,5 V/m (entspricht 148,8 dB μ V/m). Es besteht somit nahezu 100 dB Empfindlichkeitsreserve des Messsystems zu den Grenzwerten.

Verwendet man statt isotroper Antennen gewöhnliche einachsige Antennen, so kann die Empfindlichkeit der Messung nochmals erheblich gesteigert werden.

Bezüglich der Messunsicherheit existiert beispielsweise für das SRM eine eigene Application-Note von Narda, in der die erzielbaren Genauigkeiten für verschiedene Frequenzbereiche dargestellt sind [NAR 07]. Dort wird für den Frequenzbereich des BOS-TETRA-Funks die gleiche Messunsicherheit angegeben, wie sie auch im Frequenzbereich des GSM-900-Mobilfunks erzielbar ist (+2,4 / -3,3 dB bei Verwendung der isotropen Antenne).

3.3.3 Generelle Einsetzbarkeit von Personendosimetern

Auch bei TETRA-Funksignalen stellt sich die Frage nach der generellen Einsetzbarkeit von Personendosimetern zur Unterstützung der Immissionsmessungen. Neben der Untersuchung von LTE-Signalen wurden deswegen im Rahmen vorliegenden Projektes auch Untersuchungen zur Eignung von Personendosimetern für Messungen an TETRA-Signalen durchgeführt. Im Unterschied zu LTE war bei TETRA allerdings die Erwartungshaltung einer prinzipiellen Einsetzbarkeit höher, da nach Tabelle 3.10 für TETRA ein eigenes Dosimeterband („Tetrapol“) existiert.

Die Untersuchungen wurden wiederum mit zwei Dosimetern des Typs Antennessa EME Spy 120 durchgeführt, die bereits im Abschnitt 3.2.4 vorgestellt wurden. Auch der verwendete Messaufbau entspricht dem der LTE-Untersuchungen, wobei hier aufgrund des niedrigen Frequenzbereiches eine andere Sendeantenne zum Einsatz kam (Amplifier Research AT1080, 30-1000 MHz, vertikale Polarisation). Bild 3.53 zeigt den verwendeten Messaufbau.

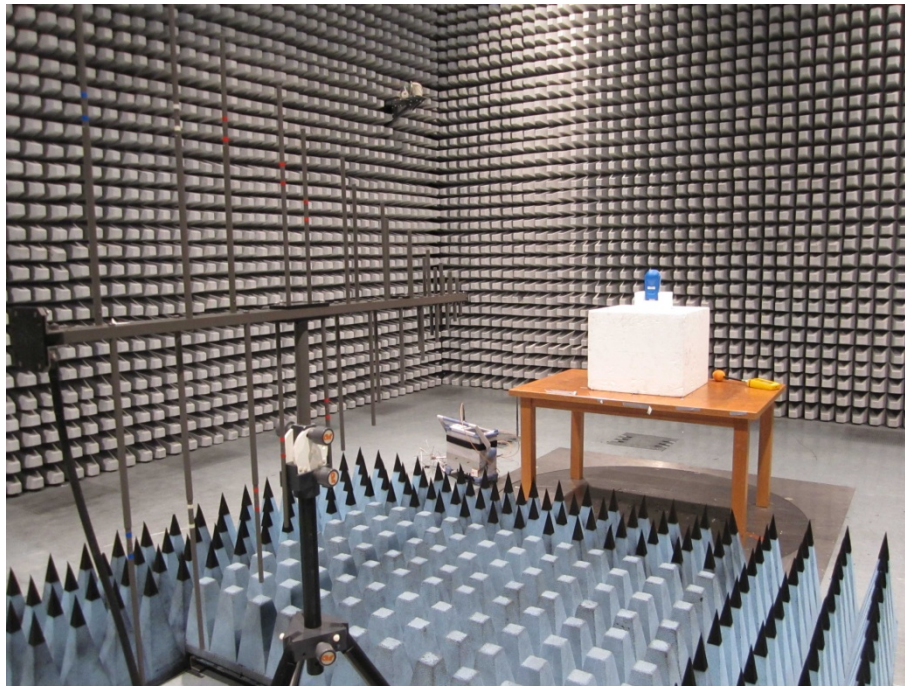


Bild 3.53: Messaufbau zur Überprüfung der Dosimereignung für TETRA-Messungen

Als Signalgenerator wurde ein Willtek 2303 Stabilock Generator eingesetzt, der auf Kanal 3800 bei einer Frequenz von 395,0125 MHz ein TETRA-Signal (1 MCCH, keine TCH) erzeugte. Da der Generator keine Pegel größer als -40 dBm generieren konnte, waren die am Ort des Dosimeters erzeugten Feldstärken unterhalb von 1 V/m. Als Referenz mit der Feldstärkesonde wurde ein Wert von 0,85 V/m und mit dem Spektrumanalysator (Empfangsantenne Schwarzbeck VUBA 9117, 30-1000 MHz) ein Wert von 0,78 V/m gemessen.

Die Bilder 3.54 und 3.55 zeigen die Ergebnisse von zehn aufeinander folgenden Messungen bei fest stehendem Dosimeter beim TETRA-Signal. Beide Dosimeter zeigten im Dosimeterband „Tetrapol“ einheitlich und durchgängig einen Wert von 0,70 V/m (keine Schwankung) an. Die Abweichung vom Referenzwert ist vergleichsweise gering und beträgt zum Spektrumanalysator 0,9 dB und zur Breitbandsonde 1,7 dB.

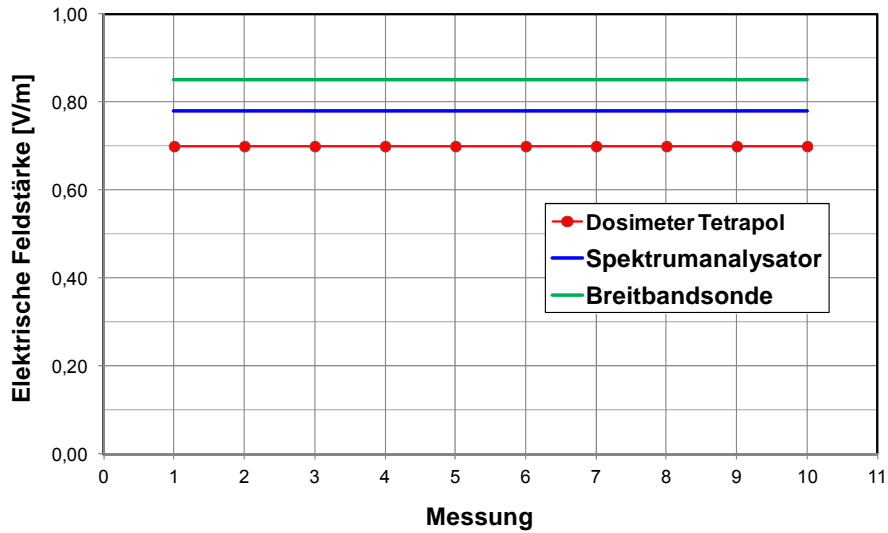


Bild 3.54: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 1, TETRA-Signal 395,0125 MHz

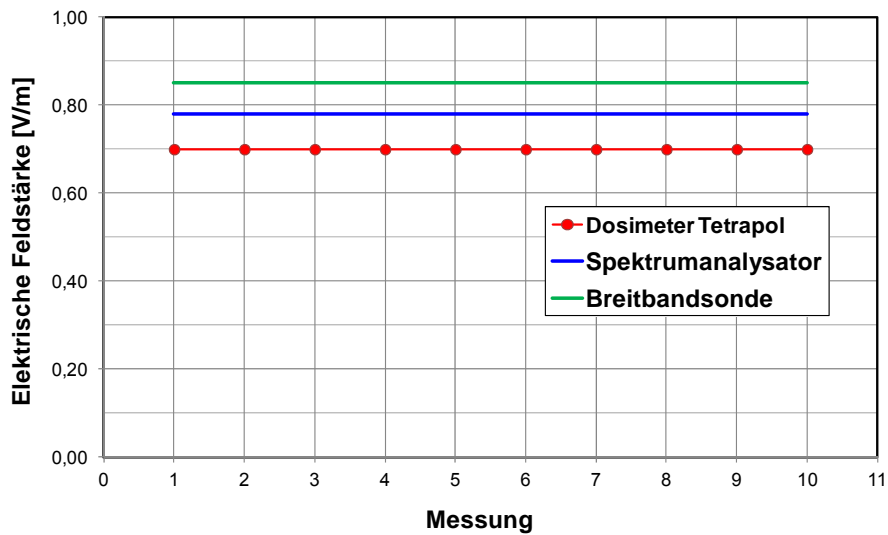


Bild 3.55: Messergebnisse bei fest stehendem Dosimeter 2, TETRA-Signal 395,0125 MHz

Bild 3.56 zeigt das Azimutdiagramm von Dosimeter 2. Die Messwerte alle 30° sind durch Datenmarker gekennzeichnet; dazwischen wurden die Werte interpoliert. Die axiale Isotropie ist als gut zu bewerten; die Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert beträgt maximal 1,2 dB.

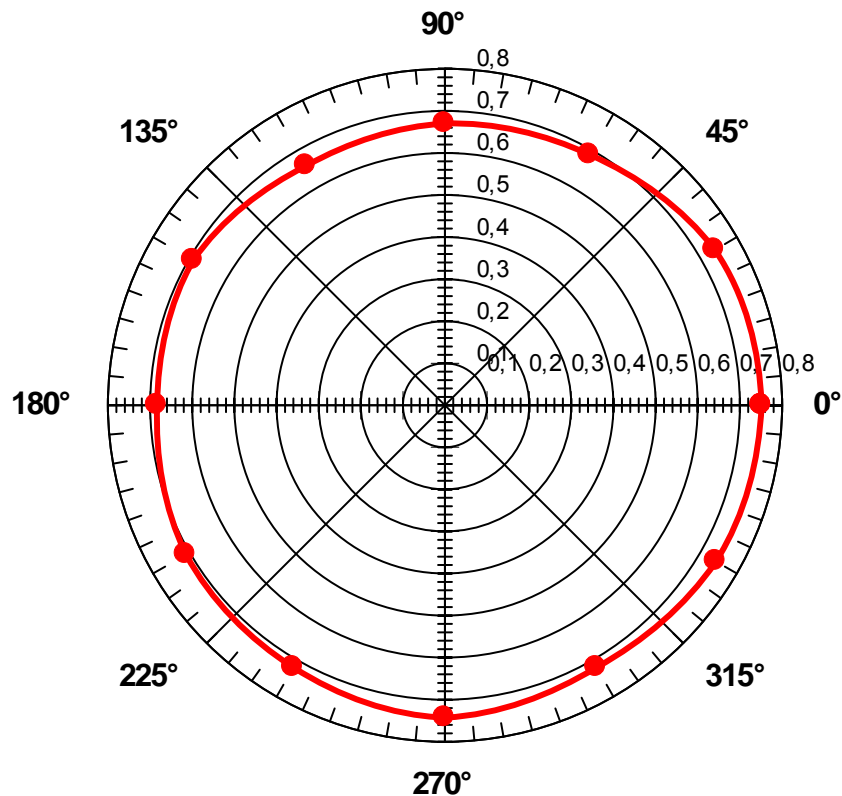


Bild 3.56: Azimutdiagramm von Dosimeter 2, TETRA-Signal 395,0125 MHz

Vorbehaltlich der Tatsache, dass die Labormessungen nur mit einem einfrequenzen Signal stattfanden, lässt sich aus den Messungen der Schluss ziehen, dass die verwendeten Dosimeter zum Einsatz von Immissionsmessungen an TETRA-Signalen gut geeignet sind. Dafür sprechen folgende Gründe:

1. Der Anzeigewert ist mit einer Abweichung von 0,9 dB (Spektrumanalysator) bzw. 1,7 dB (Breitbandsonde) in guter Übereinstimmung zum Referenzwert. Offensichtlich verarbeitet das Dosimeter die TETRA spezifische Modulation korrekt.
2. Die Schwankung der Messergebnisse bei aufeinander folgenden Messungen mit unveränderter Feldstärke ist äußerst gering.
3. Die axiale Isotropie im Freiraum ist mit maximal 1,2 dB (Differenz zwischen Maximalwert und Minimalwert) gut.

Zu beachten ist die Empfindlichkeitsschwelle des Dosimeters, die bei 0,05 V/m liegt.

4 Literaturstudie zu ähnlichen Messprojekten

4.1 Long Term Evolution (LTE)

4.1.1 Eigene Arbeiten

Durch die IMST GmbH wurden im Jahre 2010 im Auftrag des Informationszentrums Mobilfunk e.V. (IZMF) Immissionsmessungen an LTE-Basisstationen durchgeführt. Die Basisstationen befanden sich im Test- bzw. Pilotbetrieb, d.h. noch nicht im Regelnetzbetrieb. Für die Messungen wurde ein spektrales Messverfahren verwendet, das im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde (vgl. auch Kapitel 3). Alle Ergebnisse wurden auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in einem Messbericht [BOR 10] und einer Broschüre [IZMF 10] dokumentiert. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die untersuchten Standorte. Sofern sich Mobilfunkanlagen des GSM- und UMTS-Standards am selben Standort befanden, wurden deren Immissionen mit gemessen, auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert und den LTE-Immissionen gegenüber gestellt. Die in der Spalte „GSM/UMTS am selben Standort?“ angegebene Zahl von Systemen bezeichnet die Anzahl der GSM 900 / GSM 1800 / UMTS-Anlagen am selben Standort. Sind beispielsweise zwei Betreiber jeweils mit GSM 900 und UMTS am Standort vertreten, beträgt die Anzahl der Systeme vier.

Lfd. Nr.	Adresse (PLZ, Ort, Straße)	LTE-System	GSM/UMTS am selben Standort?
1	70435 Stuttgart, Lorenzstr. 10, Firmengelände Alcatel-Lucent, Haus 2	LTE-2600 FDD, 20 MHz	nein
2	70435 Stuttgart, Lorenzstr. 10, Firmengelände Alcatel-Lucent, Haus 1	LTE-800 FDD, 10 MHz	ja (3 Systeme)
3	41069 Mönchengladbach, Landgrafenstraße 59, Firmengelände SMS MEER	LTE-800 FDD, 10 MHz	ja (4 Systeme)
4	40212 Düsseldorf, Berliner Allee 52, Galeria Kaufhof Gebäude	LTE-2600 FDD, 20 MHz	ja (6 Systeme)
5	40211 Düsseldorf, Worringer Straße 87	LTE-2600 FDD, 20 MHz	ja (3 Systeme)
6	16866 Kyritz, Hagenstraße 9a	LTE-800 FDD, 10 MHz	ja (4 Systeme)
7	80992 München, Georg-Brauchle-Ring 23-25	LTE-2600 FDD, 20 MHz	ja (6 Systeme), über das gesamte Gebäudedach verteilt; zusätzlich Indoor-Anlagen

Tabelle 4.1: Beschreibung der untersuchten LTE-Standorte aus der Studie [BOR 10]

Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 4.1 in einem Verteilungsdiagramm dargestellt. Insgesamt wurden Messungen an 77 Messpunkten durchgeführt, die sich jeweils bezüglich ihrer Ausrichtung, dem Abstand und den Sichtverhältnissen zur jeweiligen LTE-Anlage

unterschieden. Die höchsten LTE-Immissionen wurden mit 1,49 % des Leistungsflussdichte-Grenzwertes bzw. 12,27 % des Feldstärke-Grenzwertes der 26. BImSchV festgestellt.

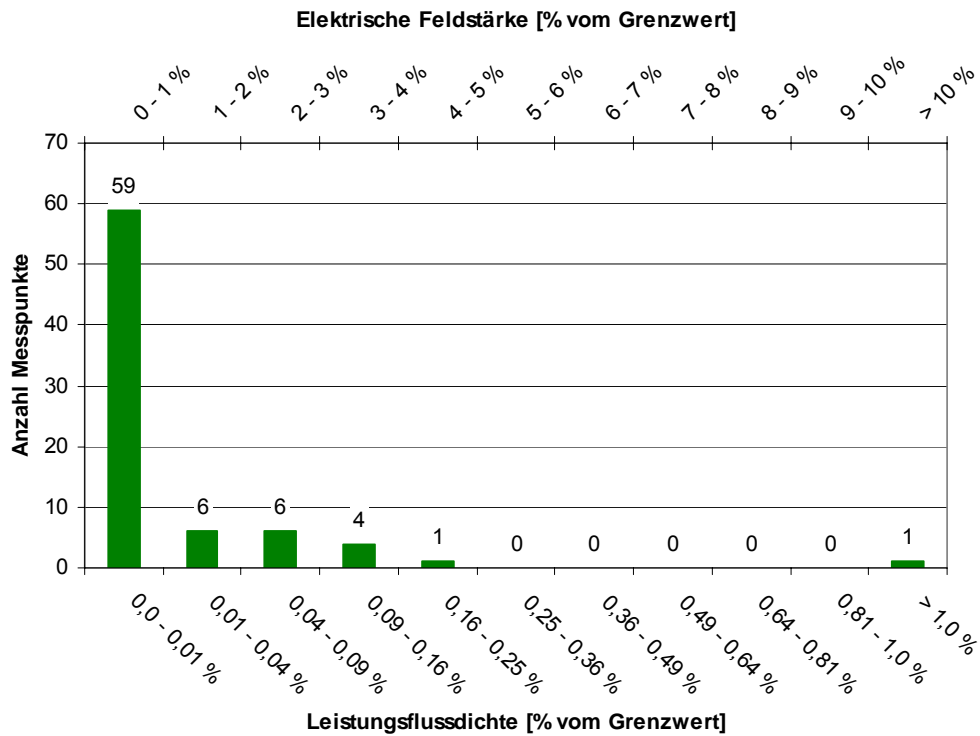


Bild 4.1: Gemessene LTE-Immissionen der Studie [BOR 10]

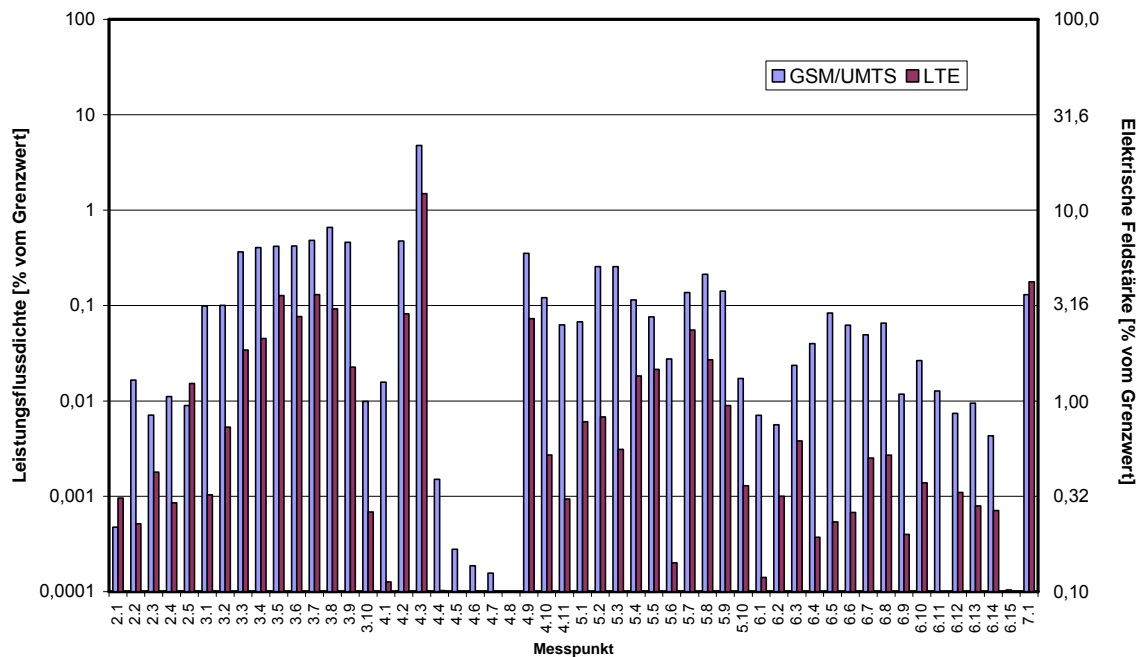


Bild 4.2: Vergleich zwischen LTE und GSM/UMTS-Immissionen der Studie [BOR 10]

Bild 4.2 zeigt einen Vergleich zwischen LTE-Immissionen und GSM/UMTS-Immissionen für die relevanten Messpunkte derjenigen Standorte, an denen neben LTE-Anlagen auch GSM/UMTS-Anlagen installiert waren. Bei einem grenzwertbezogenen Vergleich zeigte sich, dass an der überwiegenden Zahl der untersuchten Messpunkte die Immissionen durch LTE-Sendeanlagen geringer waren als die der GSM/UMTS-Anlagen. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich der Ausbau der LTE-Netze zum Zeitpunkt der Messungen erst in der Pilotphase befand, wohingegen sich die GSM- und UMTS-Netze in einem wesentlich finaleren Ausbaustadium und im Regelnetzbetrieb befanden. Trotzdem konnte bereits an dieser Stelle die Prognose aufgestellt werden, dass sich auch nach einem flächendeckenden LTE-Aufbau die LTE-Immissionen nicht gravierend von denjenigen der etablierten GSM- und UMTS-Anlagen unterscheiden werden.

4.1.2 Arbeiten anderer Institutionen

Eine Arbeitsgruppe um Joseph hat 2009 Immission-Messungen an LTE-Basisstationen durchgeführt und diese mit Immissionen durch andere hochfrequente Quellen verglichen [JOS 10]. Zum Zeitpunkt der Messungen waren im Untersuchungsgebiet zwei LTE-Frequenzen im 2,6 GHz Band mit 10 MHz und 20 MHz Bandbreite belegt. Die Messungen wurden an insgesamt 30 zufällig gewählten Messorten durchgeführt (27 outdoor, 3 indoor). Zum Einsatz kam eine dreiasige isotrope Messantenne in Verbindung mit einem Spektrumanalysator. Für LTE wurde der RMS-Detektor mit einer Auflösungsbandbreite von 1 MHz und einer Sweepzeit von 20 s verwendet. Eine Extrapolation auf die Signalbandbreite ist im Beitrag nicht beschrieben. Die lange Sweepzeit deutet auf eine Ermittlung einer mittleren Immission hin, die bei einer LTE-Basisstation ohne Verkehr wesentlich geringer ist als die maximal mögliche. Es ist im Beitrag nicht vermerkt, ob die Schwenkmethode zur Ortsmaximierung zum Einsatz kam. In früheren Publikationen derselben Arbeitsgruppe wurde ein Stativ verwendet und die Immission an einem festen Punkt ermittelt.

Die gemessenen LTE-Immissionen wurden mit 0,006 bis 0,8 V/m dokumentiert, was einer feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung von 0,01 bis 1,3 % entspricht. Damit wurden wesentlich geringere Werte als in der IMST-Studie (Abschnitt 4.1.1 gemessen), was an der fehlenden Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung liegen könnte.

Tabelle 4.2 und Bild 4.3 [JOS 10] zeigen einen Vergleich der gemessenen LTE-Immissionen zu denen anderer Funkdienste. Nach diesen Angaben betrug der mittlere Immissionsbeitrag von LTE zur gesamten HF-Immission 4,1 %.

RF signal	Frequency band (MHz)	Variation of E over 30 measurement locations (V/m)	ICNIRP reference level (V/m)	E_{avg} (V/m)	Exposure ratio ^a	APD ^b (%)	MPD ^c (%)
FM	100	<0.008–0.3	28	0.04	0.010	1.3	26.4
T-DAB	220	<0.013–0.1	28	0.02	0.003	0.1	0.5
TETRA	390	<0.001–0.1	28	0.02	0.003	0.3	3.4
PMR	146–174, 406–470	<0.002–0.2	28–29.8	0.02	0.006	0.2	1.3
Analogue TV—DVB-T	174–223, 470–830	<0.005–0.3	28–39.6	0.05	0.011	1.4	31.5
GSM900	900	0.06–2.1	41.3	0.65	0.051	35.6	84.1
GSM1800	1800	0.03–2.1	58.3	0.52	0.035	26.2	86.8
DECT	1880	<0.007–0.2	59.6	0.10	0.003	4.4	31.0
UMTS-HSPA	2100	0.08–1.4	61	0.50	0.023	26.4	89.5
Wi-Fi	2400	<0.006–0.1	61	0.02	0.002	0.3	4.7
LTE	2600	<0.006–0.8	61	0.18	0.012	4.1	23.2
WiMAX	3500	—	61	—	—	—	—
Total all signals	—	0.2–2.6	—	1.11	0.059	—	—

FM, Frequency Modulation; T-DAB, Terrestrial–Digital Audio Broadcasting; TETRA, Terrestrial Trunked Radio; PMR, Private Mobile Radio; DVB-T, Digital Video Broadcasting–Terrestrial; GSM, Global System for Mobile Communications; UMTS, Universal Mobile Telecommunications System; DECT, Digital Enhanced Cordless Telecommunications; HSPA, High Speed Packet Access; WiFi, Wireless Fidelity 802.11; LTE, Long Term Evolution; WiMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access.

^aExposure ratio = maximal field value/ICNIRP reference level.

^bAPD = average power density contribution over 30 locations.

^cMPD = maximal power density contribution over 30 locations.

Tabelle 4.2: Elektrische Feldstärken für LTE und andere HF-Signale sowie grenzwertbezogene Auswertungen der Messungen aus der Studie [JOS 10]

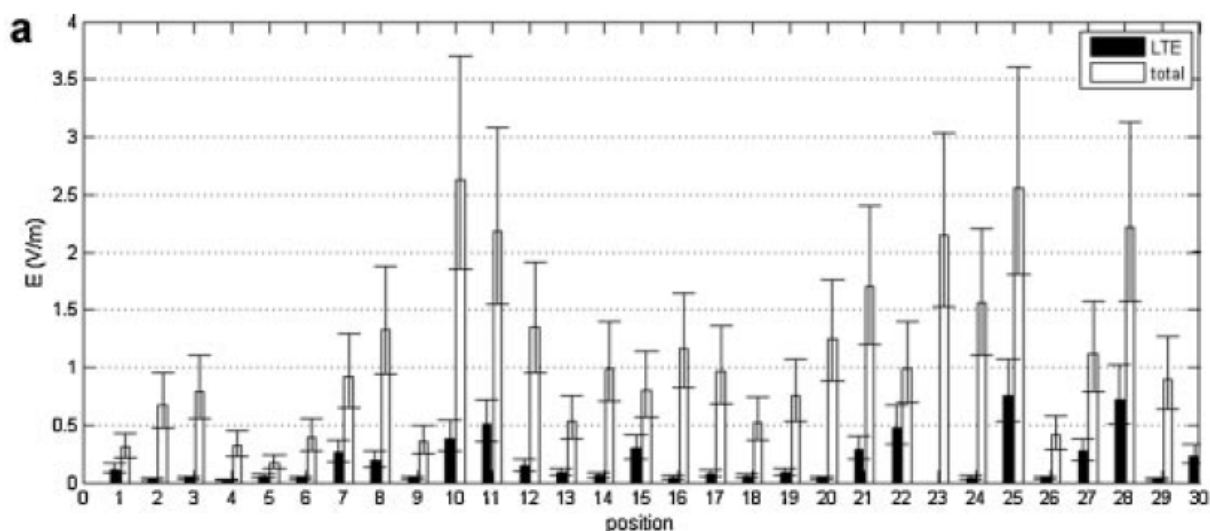


Bild 4.3: LTE- und Gesamtmissionen („total“) für die 30 Messpunkte aus der Studie [JOS 10]

Die gleiche Arbeitsgruppe führte im Februar 2011 im Auftrag der GSM Association (GSMA) und in Kooperation mit Vodafone und Ericsson auch erste codeselektive Messungen an 40 zufällig verteilten Messpunkten im Stadtgebiet von Reading (UK) durch. Die Ergebnisse der Messungen sind noch nicht publiziert, aber zur Veröffentlichung eingereicht [JOS 11]. Zum Zeitpunkt der Messungen befand sich in Reading ein LTE-Netzwerk mit 7 Basisstationen bei 2,68 GHz (Bandbreite 20 MHz) im Probebetrieb. Für die Messungen wurden zwei unterschiedliche Messsysteme der Firma Rohde & Schwarz verwendet: Zum einen der LTE Analysator TSMW mit der Netzplanungs-Software Romes, zum anderen ein Spektrumanalysator FSV mit der Option FSV-K100/-K104 (EUTRA/LTE DL Measurement Application) mit EUTRA/LTE Downlink Software. Beide Messsysteme wurden in Kombination mit der dreiaxigen isotropen Sonde TS-EMF von Rohde & Schwarz verwendet und gestatten eine

separate Erfassung der zellspezifischen Leistung der Referenzsignale bzw. Synchronisationssignale. Die gemessene Leistung dieser Signale wurde auf einen „worst case“ Wert unter Zuhilfenahme eines Extrapolationsfaktors (in den vorab von [JOS 11] zur Verfügung gestellten Informationen nicht näher beschrieben) extrapoliert. Aktuelle, d.h. nicht auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte LTE-Immissionen betragen maximal 0,5 V/m und im Mittel 0,2 V/m. Die maximale extrapolierte LTE-Immission ist mit 2,8 V/m angegeben.

Als Fazit kann festgestellt werden, dass die Zahl der Messprojekte anderer Institutionen sehr überschaubar ist und sich im Wesentlichen auf Arbeiten einer Forschergruppe beschränkt. Die bei den ersten Untersuchungen der Gruppe eingesetzte spektrale Messmethode war aufgrund der verwendeten Einstellungen am Spektrumanalysator auf die Ermittlung von zeitgemittelten LTE-Immissionen ausgelegt, die bei einem LTE-Netz ohne bzw. mit wenig Datenverkehr um einige dB unterhalb der maximal möglichen Immission liegt. Auch wurden die Messungen offensichtlich an feststehenden Punkten (Stativ) vorgenommen, was aufgrund von Fading nur sehr begrenzte Schlüsse über die maximale oder durchschnittliche Immission am Messort zulässt. Weiterhin hat die Gruppe auch erste Messungen mit codeselektiver Messtechnik vorgenommen, die allerdings noch nicht veröffentlicht sind.

4.1.3 Literaturrecherche über die Exposition durch LTE-Endgeräte

Im folgenden Abschnitt werden derzeit verfügbare Werte für die spezifische Absorptionsrate von LTE-Endgeräten dargestellt. Das LTE-Netz in Deutschland befindet sich gerade im Aufbau und es sind derzeit im Markt nur wenige Endgeräte kommerziell verfügbar. Hierbei handelt es sich um folgende Geräte (vgl. <http://itemobile.de> vom 13.10.2011):

- LTE Surfstick Samsung GT-B3740,
- LTE Surfstick Huawei E398 (Telekom Speedstick LTE / Vodafone K5005),
- LTE Router Huawei „Speedport LTE“

Darüber hinaus werden auf <http://itemobile.de> der Tablet-Computer „Galaxy Tab 8.9 LTE“ (ab Dezember) und das Smartphone „Galaxy S2 LTE“ von Samsung angekündigt. Bezüglich der SAR konnte für den Telekom Speedstick aus der Installationsanleitung die Aussage "Der SAR-Grenzwert für drahtlose Geräte beträgt 2,0 Watt/Kilogramm (W/kg), und der höchste für dieses Gerät ermittelte SAR-Wert liegt unterhalb dieses Grenzwerts" sowie „Zur Einhaltung der Richtlinien für die Belastung durch Hochfrequenzwellen muss ein Mindestabstand von 2,5 cm zwischen Gerät und Körper eingehalten werden“ ermittelt werden. In der Bedienungsanleitung des Huawei „Speedport LTE“ heißt es: „Das Gerät muss mit einem Abstand von mindestens 20 cm zwischen Antennen und allen Personen montiert und betrieben werden“. Es ist hierbei allerdings zu beachten, dass die in den Bedienungsanleitungen von Endgeräten angegebenen SAR-Werte dem *maximalen* Ergebnis aus den detaillierten SAR-Untersuchungen bei *verschiedenen* Mobilfunkstandards entsprechen. Da Endgeräte in der Regel mit mehreren Funkdiensten (z.B. GSM, UMTS; LTE; WLAN) ausgerüstet sind, ist eine eindeutige Zuordnung des SAR-Wertes zu einem speziellen Funkdienst nicht möglich.

Daher wurde für die Recherche folgender Ansatz verfolgt: In den USA wird ein LTE-Funknetz bereits schon seit 2010 betrieben, wenn auch in anderen Frequenzbereichen (Band 13,

Band 17, AWS=Band 4, PCS 1900=Band 2). Alle Endgeräte, die in den USA in Verkehr gebracht werden sollen, müssen umfangreiche Tests (EMV, Funk, SAR usw.) absolvieren und von der Zulassungsbehörde für Kommunikationsgeräte (Federal Communications Commission – FCC) abgenommen werden. Nach erfolgreicher Abnahme werden sämtliche Reports der verschiedenen Messungen im Internet veröffentlicht. In diesen Reports sind – anders als in den Bedienungsanleitungen – die funkdienstspezifischen SAR-Werte dokumentiert. Deswegen wurde zunächst eine Recherche über die Internetplattform <http://www.phonescoop.com> durchgeführt, um eine Geräteauswahl für Mobiltelefone zu erhalten, die über den LTE-Standard verfügen. Als nächster Schritt wurde die Internetseite der FCC nach den entsprechenden Testreports zu den Geräten durchsucht. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte stammen aus diesen Testreports. Die Frequenzen und Bandbreiten beziehen sich auf die während der jeweiligen SAR-Messung untersuchten Parameterbereiche. Unterschieden wird jeweils nach Kopf- und Körperbetrieb der Geräte.

Band & Modus	Sendefrequenz in [MHz] (Bandbreite in [MHz])	Sendeleistung geleitet in [dBm]	SAR in [W/kg]	
			gemittelt 10g (1g) Kopf	Gemittelt 10g (1g) Körper
Esteem; LG Electronics (FCC-ID: BEJMS910)				
AWS LTE	1710,7 – 1754,3	23,5	0,27 (0,52)	0,48 (0,77) *
PCS LTE	1850,7 – 1909,3	23,6	0,27 (0,52)	0,48 (0,79) *
Revolution; LG Electronics (FCC-ID: BEJVS910)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,4	0,48 (0,63)	0,69 (0,95) *
VS920; LG Electronics (FCC-ID: BEJVS920)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,7	0,23 (0,30)	0,24 (0,34) *
Galaxy Indulge R910; Samsung (FCC-ID: A3LSCHR910)				
AWS LTE	1710,7 – 1754,3	23,1	k. Angabe	0,28 (0,48) **
PCS LTE	1850,7 – 1909,3	23,9	k. Angabe	0,33 (0,54) **
Droid Charge; Samsung (FCC-ID: A3LSCHI510)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,1	0,19 (0,39)	0,14 (0,23) *
Craft SCH-R900; Samsung (FCC-ID: A3LSCHR900)				
AWS LTE	1710,5 – 1754,5	22,9	k. Angabe	0,26 (0,43) **
PCS LTE	1850,7 – 1909,3	22,9	k. Angabe	0,33 (0,55) **
Stratosphere; Samsung (FCC-ID: A3LSCHI405)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,3	0,17 (0,24)	0,29 (0,40) *
ThunderBolt; HTC (FCC-ID: IDNM8PG05100)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,0	0,31 (0,46)	0,30 (0,45) *
Droid Bionic; Motorola (FCC-ID: IHDT56MX1)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	24,2	0,55 (0,72)	0,38 (0,50) ***
Breakout; Pantech (FCC-ID: JYCAPACHE)				
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,3	0,23 (0,32)	0,33 (0,44) *

Tabelle 4.3: Übersicht über SAR-Werte von LTE-tauglichen Mobiltelefonen,
*: Messabstand 1,0 cm, **: Messabstand 1,5 cm, ***: Messabstand 2,5 cm

Tabelle 4.4 zeigt die SAR-Werte von LTE-Datensticks und LTE-Routern, deren Werte über die Internetseite der FCC recherchiert wurden.

Band & Modus	Sendefrequenz in [MHz] (Bandbreite in [MHz])	Sendeleistung geleitet in [dBm]	SAR in [W/kg]
			Gemittelt 10g (1g) Körper
SCH-LC11; Samsung (FCC-ID: A3LSCHLC11) – LTE Portable Wireless Router			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,1	0,69 (1,09) **
E397u-53; Huawei (FCC-ID: QISE397U-53) - LTE Multi-mode USB Rotator			
AWS LTE	1710 – 1755	21,4	0,67 (1,19) *
VL 600; LG Electronics (FCC-ID: BEJVL600) – LTE USB Modem			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	25,5	0,73 (1,12) *
MC6789; Novatel Wireless (FCC-ID: PKRNVWMC679) – LTE USB Dongle			
LTE (Band 17)	710 (7 MHz)	22,8	0,33 (0,53) *
AWS LTE	1710 – 1754	22,9	0,63 (1,13) *
MC551; Novatel Wireless (FCC-ID: PKRNVWMC551) – LTE USB Modem			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	24,5	0,76 (1,23) *
MIFI4510; Novatel Wireless (FCC-ID: PKRNVWMIFI4510) – LTE Wireless Router			
LTE (Band 13)	782 (5 MHz)	24,5	0,51 (0,75) ***
PCS LTE	1851,3 – 1908,8	24,5	0,77 (1,42) ***
UML290; Pantech- (FCC-ID: JYCRAY) – USB Modem			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,1	0,71 (1,15) *
SLC-U100; Samsung- (FCC-ID: A3LSLCU100) – USB Modem			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,0	0,73 (1,09) *

Tabelle 4.4: Übersicht über SAR-Werte von LTE Routern und LTE USB-Geräten,
*: Messabstand 0,5 cm, **: Messabstand 1,0 cm, ***: Messabstand 1,2 cm

Tabelle 4.5 zeigt die SAR-Werte von einem Tablet- und einem Laptop-PC, deren Werte über die Internetseite der FCC recherchiert wurden.

Band & Modus	Sendefrequenz in [MHz] (Bandbreite in [MHz])	Sendeleistung geleitet in [dBm]	SAR in [W/kg]
			Gemittelt 10g (1g) Körper
SCH-I905; Samsung (FCC-ID: A3LSCHI905) – Tablet-PC			
LTE (Band 13)	782 (10 MHz)	23,0	0,53 (1,05)
PCG-41312L; Sony (FCC-ID: AK8PCG41312L) – Laptop-PC			
LTE (Band 13)	782 (5 MHz)	24,0	0,04 (0,06)

Tabelle 4.5: Übersicht über SAR-Werte von einem Tablet- und einem Laptop-PC,
Messabstand jeweils 0,0 cm

4.2 Digitaler Behördenfunk (TETRA-BOS)

Bezüglich der hochfrequenten Immissionen, die von TETRA-Basisstationen generiert werden, liegen bisher noch nicht sehr viele Untersuchungen vor. Neben allgemeinen Informationen zur TETRA-Technik, wie z.B. [BAK 01, LIN 02, HAR 10], in denen meist keine oder nur wenig Informationen zur realen Expositionssituation in der Umgebung von TETRA-Basisstationen aufgeführt sind, finden sich nur einige wenige Untersuchungen, aus denen mehr als nur generelle Technikinformationen gewonnen werden können. Diese werden im Folgenden kurz aufgeführt und bewertet:

Studie des NRPB

Im Jahr 2001 erstellte eine unabhängige Beratergruppe der britischen Strahlenschutzkommission (Advisory Group on Non-ionising Radiation, AGNIR der NRPB) eine ausführliche Analyse zu potenziellen Auswirkungen von TETRA auf die Gesundheit [NRPB 2001]. Der Bericht enthält auch umfangreiche Ausführungen zu technischen Aspekten von TETRA sowie zur Modulation und Signalformen. Bezüglich der Exposition in der Umgebung von Basisstationen werden beispielhaft sechs Messwerte in verschiedenen Abständen (zwischen 11 und 42 Meter) zu einer Basisstation angegeben. Dabei wurden Feldstärkewerte zwischen 0,1 und 1,2 V/m gefunden. Details über die betrachtete Basisstation bzw. die Durchführung der Messungen (z.B. Messgeräte, Geräteeinstellungen) sind im Bericht nicht zu finden.

Untersuchungsbericht des LANUV

Wesentlich mehr Informationen zur Expositionssituation in der Umgebung von TETRA-Basisstationen liefert ein Fachbericht des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen [LANUV 09]. Nach einer allgemeinen Einführung in technische Aspekte des TETRA-Funks und seinen Basisstationen, werden im Bericht die Resultate einer Messkampagne in der Umgebung einer TETRA-BOS-Basisstation (Schulungsanlage) im städtischen Umfeld vorgestellt. Die Antenne der Basisstation (Omniantenne) ist auf einem Gebäudedach in etwa 23 Meter über Grund montiert. Neben Messungen in unmittelbarer Antennennähe wurden die Immissionen in Bodennähe in Abständen bis ca. 500 Meter um den Standort durchgeführt (teilweise mit, teilweise ohne Sichtverbindung zur TETRA-Antenne). Als Messgeräte kamen ein Breitbandmessgerät sowie zwei unterschiedliche frequenzselektive Messsysteme zum Einsatz (SRM-3000 mit isotroper Antenne und FSP-13 mit einachsigen Antennen). Neben den TETRA-Signalen wurden an einigen Punkten zum Vergleich auch die sonst vorhandenen Hochfrequenzsignale (Frequenzbereich 9 kHz - 3 GHz) mit erfasst. So weit aus dem Messbericht ersichtlich, wurden die Messungen der TETRA-Signale mit einer RBW von 30 kHz und dem Peakdetektor vorgenommen. Mittels Anwendung der Schwenkmethode wurde im jeweiligen Messvolumen der räumliche Maximalwert als Basis für den Grenzwertvergleich ermittelt. Die Basisstation war nur mit einem Frequenzkanal ausgestattet, eine Extrapolation auf eventuell bereits genehmigte weitere Kanäle erfolgte nicht.

In unmittelbarer Antennennähe konnten Feldstärkewerte bis zu etwa 11 V/m gefunden werden, an den Messpunkten in Bodennähe hingegen waren die Immissionen der TETRA-

Basisstation bereits auf maximal etwa 1,3 V/m abgeklungen. Mit zunehmender Entfernung reduzierten sich diese auf etwa 30 mV/m in 500 Meter Entfernung.

Außer der Messung in unmittelbarer Antennennähe (Dachboden) wurden keine Messungen in größeren Höhen durchgeführt (z.B. Räume in Wohnungen in oberen Stockwerken von Gebäuden, Balkone, Dachterrassen), so dass die Ergebnisse der Untersuchungen nur eingeschränkte Informationen über die typische Immission in der Umgebung einer TETRA-Basisstation liefert.

Eigene Messungen

Aufgrund der in den letzten Monaten erfolgten Inbetriebnahme erster TETRA-Basisstationen in Deutschland wurden von den Autoren dieses Berichtes ebenfalls erste Immissionsmessungen in der Umgebung von TETRA-Basisstationen durchgeführt. Beispielsweise sind in [WUS 11] die Ergebnisse einer kleinen Messkampagne in der Stadt Göppingen dokumentiert. Von einem Teil der sieben Messpunkte bestand direkte Sichtverbindung zu einer TETRA-Basisstation des neuen Behördenfunks. Die Messpunkte waren vom Standort zwischen 250 und 465 Meter entfernt. Gemessen wurde mit dem SRM-3006 (RBW = 30 kHz, Peakdetektor) und der Schwenkmethode. Die Messergebnisse wurden auf die bei der BNetzA beantragte maximale Kanalzahl extrapoliert. Es ergaben sich dabei TETRA-maximale Immissionen von etwa 0,04 bis 0,22 V/m. Die zum Vergleich ebenfalls gemessenen und auf maximale Anlagenauslastung hochgerechneten Mobilfunkfeldstärken waren an den Punkten deutlich größer (etwa zwischen 1,0 und 2,7 V/m). Ursache dafür waren mehrere GSM-Basisstationen, deren Antennen ebenfalls in der näheren Umgebung der Messpunkte betrieben werden (Entfernung zwischen 80 und 300 Meter).

Die Ergebnisse dieser Messungen spiegeln die möglichen Immissionen einer TETRA-Anlage wiederum nur eingeschränkt wieder, da die betrachteten Punkte sich alle in Bodennähe und bereits relativ weit vom Standort entfernt befanden. Zudem war die Sendeanlage deutlich weiter von den Messpunkten entfernt, als der nächste GSM-Standort.

Messungen der ComReg, Irland

Die irische Regulierungsbehörde für Telekommunikation (Commission for Communication Regulations) lässt im Rahmen eines Messprogramms seit 2003 jährlich in der Umgebung von etwa 80 Senderstandorten an jeweils typisch einem Messpunkt die vorhandenen hochfrequenten Immissionen ermitteln. Für jeden untersuchten Standort ist ein detaillierter Messbericht im Internet verfügbar [COMREG]. Der Messpunkt befindet sich dabei meist im Freien in Bodennähe. Gemessen wird sowohl mit einer Breitbandsonde als auch frequenz aufgelöst, so dass auch Aussagen über die Größe der verschiedenen am Messpunkt vorhandenen Signale möglich werden. Dabei wird der TETRA-Frequenzbereich explizit ausgewiesen. Bild 4.4 zeigt exemplarisch die frequenz aufgelöste Ergebnisdarstellung einer derartigen Messung. Bei dieser Messung brachte das TETRA-Signal nach GSM den zweitgrößten Beitrag zu Gesamtimmission.

Table of Frequency Selective Measurement Results					
Emission Type	Frequency	Measured Level (V/m)	Adjusted Level (V/m)	ICNIRP Limit (V/m)	Times below Limit [adjusted Values]
TV PAL	179.520	0.0125	0.0096	28.0	2918
TETRA	Not Disclosed	0.1372	0.2376	28.0	118
GSM	953.628	0.7734	1.5468	42.5	27
GSM	949.620	0.0050	0.0099	42.4	4264
WiFi	2475.000	0.0704	0.1062	61.0	574

Bild 4.4: Messergebnis in der Umgebung eines irischen Senderstandortes (Rosscarbery Garda Station), an dem auch eine TETRA-Anlage betrieben wird [COMREG 11]

Leider liegen nur die Einzelmessberichte und keine statistischen Auswertungen über alle Messungen vor. Zudem ist anzumerken, dass an den Messpunkten immer nur die aktuell vorhandene Immission ermittelt wurde. Die auslastungsabhängigen Signale, wie z.B. GSM, UMTS oder auch TETRA wurden nie auf maximale Leistung extrapoliert.

Funkwellenmessprojekt Baden-Württemberg

Im Rahmen des Projektes „Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg“ wurden zwischen 2001 und 2003 an 895 Punkten in Baden-Württemberg die dort vorhandenen hochfrequenten Immissionen ermittelt. Die Messpunkte befanden sich in den am dichtesten besiedelten Teilen des Bundeslandes im Freien in Bodennähe, angeordnet auf einem festen Raster von 2 x 2 km. Gemessen wurde die aktuell vorhandene Immission ohne Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung, frequenz aufgelöst mittels Spektrumanalysator und geeigneten Messantennen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 3 GHz. Inzwischen liegen die Ergebnisse des zweiten Messdurchgangs vor, der zwischen Februar und Oktober 2009 an 598 der 895 Messpunkte durchgeführt wurde [GRI 11].

In den Ergebnisdarstellungen des zweiten Messdurchgangs wurde explizit der „BOS-Funk“ als Anlagentyp spezifiziert und dessen Immissionen für jeden Messpunkt explizit ausgewiesen. Leider wird hier die Summe sowohl des alten analogen als auch des neuen digitalen BOS-Funks ermittelt. Zudem gehen die Autoren des wissenschaftlichen Endberichtes irrigerweise davon aus, dass die Abstrahlung der BOS-TETRA-Basisstationen im Frequenzbereich zwischen 440 und 470 MHz erfolgt, weshalb sie die dort gefundenen Immissionen (die jedoch durch andere Funkdienste, wie z.B. Pager, generiert werden) den BOS-Immissionen zuschreiben [GRI 10]. Somit sind die in diesem Bericht dokumentierten BOS-Immissionen sowohl für den einzelnen Punkt als auch als Mittelwert über alle Punkte nicht als Immissionen von TETRA-Signalen zu betrachten, sondern als Summenimmission verschiedener analoger und digitaler Funkdienste. Falls in einigen Jahren die Messungen ein drittes Mal wiederholt werden, sollte der Frequenzbereich 390 - 395 MHz als separater Funkdienst ausgewertet werden, wenn man die typische Immission der BOS-TETRA-Basisstationen ermitteln will.

Literaturverzeichnis

- [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.
- [BAK 01] **Schweizer Bundesamt für Kommunikation**, *Faktenblatt TETRA*, Version 1.4, Bern, (2001)
- [BDBOS] **BDBOS**, *Fortschrittsanzeiger Netzausbau*, http://www.bdbos.bund.de/cln_099/nn_421176/DE/Bundesanstalt/Projekt__Digitalfunk/Netzaufbau__Roll__out/Fortschrittsanzeiger/fortschrittsanzeiger__roll__out__node.html?__nnn=true
- [BERLIN] **Stadt Berlin**, *Digitalfunk BOS in Berlin*, <http://www.berlin.de/digitalfunk/>
- [BEMFV] **BEMFV**, *Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV)*, BGBl. Jg. 2002 Teil I Nr. 60, 27.08.2002.
- [BNETZA 10] **Bundesnetzagentur**, *LTE und Digitale Dividende*, <http://emf2.bundesnetzagentur.de/pdf/LTE-BNetzA.pdf>, Stand 14.07.2010, zuletzt besucht am 01.09.2011.
- [BNETZA 10-1] **Bundesnetzagentur**, *Übersicht über das Frequenzspektrum in den Bereichen 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz*, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/BNetzA/Presse/Pressemitteilungen/2010/100830VerlosungGraphikFrequenzspektrum_pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt besucht am 01.09.2011.
- [BNETZA 11] **Bundesnetzagentur**, *Frequenznutzungsplan (9 kHz - 275 GHz) 08/2011*, Bonn (2011).
- [BNETZA 11-1] **Bundesnetzagentur**, *Jahresbericht 2010*, Bonn (2011), S. 90.
- [BOO] R. Booher, *Modulation Fundamentals; Introduction to 3GPP LTE*, RF Lecture Series, Verigy.
- [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 06] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek, P. Schmidt**, *Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von UMTS-Sendeanlagen*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).

- [BOR 06-1] **Chr. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuscek und P. Schmidt**, *Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2006).
- [BOR 09] **Chr. Bornkessel, M. Schubert und M. Wuscek**, *Bestimmung der Exposition durch WiMAX*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Abschlussbericht, Kamp-Lintfort, (2009).
- [BOR 10] **Chr. Bornkessel und M. Schubert**, *Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen*, Messbericht zu einer Pilotstudie im Auftrag des IZMF, 08.11.2010, http://www.izmf.de/download/Studien/LTE_Studienbericht.pdf, zuletzt besucht am 02.09.2011.
- [BOR 11] **Chr. Bornkessel**, *Messung der elektromagnetischen Immissionen von LTE-Basisstationen*, EMF-Spectrum, Jg. 2(2011) Nr. 1, S. 10-15.
- [COMREG] http://www.comreg.ie/licensing_and_services/nir.554.444.html
- [COMREG 11] **Commission for Communications Regulation**, *Programme of Measurement of Non-Ionising Radiation Emissions Site Survey Report 11/52_5*; https://www.comreg.ie/_fileupload/File/NIR/2011/Quarter%202%202011/Cork%20Rosscarbery%20Garda%201152_5.pdf
- [EN 50492] **EN 50492** (DIN VDE 0848-492), *Basic Standard for the In-Situ Measurement of Electromagnetic Field Strength related to Human Exposure in the Vicinity of Base Stations*, CENELEC Standard, September 2008.
- [EN 62479] **EN 62479**, *Beurteilung der Übereinstimmung von elektronischen und elektrischen Geräten kleiner Leistung mit den Basisgrenzwerten für die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern (10 MHz bis 300 GHz) (IEC 62479:2010, modifiziert)*; Deutsche Fassung EN 62479:2010
- [ETSI 136.101] **ETSI TS 136 101 V8.7.0**, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 8.7.0 Release 8), 2009-10.
- [ETSI 136.211] **ETSI TS 136 211 V8.8.0**, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.8.0 Release 8), 2009-10.
- [ETSI 300.392] **ETSI EN 300 392-2 V2.3.2**, *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)*, 2001-03.
- [FEL 11] **R. Feliachi, A. Gati, und J. Wiart**, *Methods for measuring in-situ exposure induced by non-regular signals like WLAN and LTE*, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Rome, 2011:2593-2595.
- [FRI 11] **P. Fritschi, J.-M. Vannay, H. Lehmann, B. Mühlemann, und M. Riederer**, *EMF measurements of LTE*, COST BM 0704 Working Group

Meeting, Ljubljana, 2011.

- [GES 11] **Chr. Geßner**, *Long Term Evolution – A concise introduction to LTE and its measurements requirements*, Rohde & Schwarz GmbH&Co.KG 2011, First Edition, 2011
- [GRI 10] **Th. Gritsch, Th. Mahler**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg*, Wissenschaftlicher Endbericht, München, (2011), S. 86.
- [GRI 11] **Th. Gritsch, H. Menges und U. Ratzel**, *Großräumige Ermittlung von Funkwellen in Baden-Württemberg*, NIR 2011 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., 2011, S. 382-393.
- [HAR 10] **P. Hartl und G. Merzbach**, *Digitalfunk*, W. Kohlhammer Verlag, 2. Aufl. (2010).
- [ICNIRP 98] **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).
- [IEC 62232] **IEC 62232 Ed.1**, *Determination of RF Field Strength and SAR in the Vicinity of Radio-communication Base Stations for the Purpose of evaluating Human Exposure*, IEC Standard, February 2011.
- [IZMF 10] **Informationszentrum Mobilfunk (Hrsg.)**, *Abschätzung der Exposition der Bevölkerung durch LTE-Sendeanlagen*, Broschüre zur Pilotstudie, 2010.
- [JOS 10] **W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne., G. Vermeeren, und L. Martens**, *Assessment of general public exposure to LTE and RF sources present in an urban environment*, Bioelectromagnetics 2010; 31:576-579
- [JOS 11] **W. Joseph, L. Verloock, F. Goeminne., G. Vermeeren, und L. Martens**, *In-situ LTE exposure of general public: characterization and extrapolation*, Bioelectromagnetics, submitted
- [KAU 11] **J. Kausche und G. Mielke**, *Messung der EMVU von LTE-Signalen mit dem portablen System R&S[®]TS-EMF*, Neues 204/11, Rohde & Schwarz, 2011
- [KEL 05] **H. Keller**, *Grundlagen und Anwendung moderner Spektrumanalysatoren*, Firmenschrift Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, (2005).
- [KEL 11] **H. Keller**, *Bewertung rauschartiger Impulse moderner Kommunikationssysteme*, NIR 2011 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., 2011, S. 209-223.
- [LIN 02] **Chr. Linde**, *Alles über den neuen digitalen BOS-Funk*, Franzis' Verlag, Poing, (2002).
- [MOBILEE] *Akute Gesundheitseffekte durch Mobilfunk bei Kindern*, DMF-Studie im Auftrag des BfS, verfügbar unter <http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/epidemiologie/>

- epidemiologie_abges/epi_045.html
- [MUE 08] **K.-P. Müller und T. Kurz**, *EMF-Monitoring in Bayern 2006/07 - Messungen von elektromagnetischen Feldern (EMF) in Wohngebieten*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, (2008).
- [NAR 07] *Berücksichtigung der Messunsicherheit beim SRM-3000*, Application Note, Firma Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, (2007).
- [QUEBEB] *Querschnittsstudie zur Erfassung und Bewertung möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch die Felder von Mobilfunkbasisstationen*, DMF-Studie im Auftrag des BfS, verfügbar unter http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/epidemiologie/epidemiologie_abges/epi_020.html
- [RAU 00] **Chr. Rauscher**, *Grundlagen der Spektrumanalyse*, Rohde & Schwarz, München, (2000).
- [RIE 11] **M. Riederer und G. Dürrenberger**, *LTE: Funktechnik, Messtechnik, Regulation*, EMF-Spektrum, Jg. 2(2011) Nr. 1, S. 16-19.
- [ROB 12] **J. Robson**, *Die LTE/SAE-Test-Initiative LSTI – Begleiter auf dem Weg von der Spezifikation zur kommerziellen Einführung*, <http://www.ltemobile.de/lte-technik/ltesae-fachartikel/>
- [ROS] **Rohde & Schwarz**, *Bedienhandbuch für die Spektrumanalysatoren der Reihe FSP-3 bis FSP-40*
- [SAU 11] **M. Sauter**, *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, Vieweg+Teuber Verlag, 4. Auf. (2011).
- [SCHM 05] **G. Schmid, D. Lager, P. Preiner, R. Überbacher, G. Neubauer und S. Cecil**, *Bestimmung der Exposition bei Verwendung kabelloser Übermittlungsverfahren in Haushalt und Büro*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht BMU-2005-669, ARC Seibersdorf research GmbH, Seibersdorf (2005).
- [SICHERHEIT] <http://www.sicherheit.info/SI/cms.nsf/si.ArticlesByDocID/1116700?Open&Channel=SI-PS-TB>
- [STMI 09] **Bayerisches Staatsministerium des Inneren**, *Infobrief Digitalfunk für die BOS in Bayern*, Nr. 6 - März 2009, <http://www.stmi.bayern.de/sicherheit/digitalfunk/aktuelles/>.
- [STMI 10] **Bayerisches Staatsministerium des Inneren**, *Infobrief Digitalfunk für die BOS in Bayern*, Nr. 9 - August 2010, <http://www.stmi.bayern.de/sicherheit/digitalfunk/aktuelles/>.
- [SWM] **Stadtwerke München**, *M-Funk - digitaler Bündelfunk der Stadtwerke München*, <http://www.swm.de/dms/swm/dokumente/geschaeftskunden/m-funk/m-funk-flyer.pdf>
- [VFG 59] **Verfügung 59/2009**, *Verbindung der Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 790 bis 862 MHz sowie 1710 bis 1725 MHz und 1805 bis*

1820 MHz mit dem Verfahren zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz für den drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten sowie über die Festlegungen und Regelungen für die Durchführung des Verfahrens zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz für den drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten, Entscheidung der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 12.10.2009.

[WUS 04] **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 11] **M. Wuschek**, *Elektromagnetische Immissionen durch Mobilfunksendeanlagen*, Bericht über durchgeführte Feldstärkemessungen, Projektnummer 11/033, Regensburg, (2011).

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	Third Generation Partnership Project
AGNIR	Advisory Group on Non-ionising Radiation
AWS	Advanced Wireless Services (engl.) → von der FCC versteigertes Spektrum für 2G, 3G oder 4G (2110-2155 MHz Downlink, 1710-1755 MHz für Uplink)
BCCH	Broadcast Control Channel
BDBOS	Bundesanstalt für den Digitalfunk für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BS	Basisstation
CF	Crestfaktor
CP	Cyclic Prefix
DSL	Digital Subscriber Line
DQPSK	Quaternary Phase Shift Keying
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial (engl.) → Digitales terrestrisches Fernsehen
DwPTS	Downlink Pilot Timeslot
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (engl.) → Äquivalente isotrope Strahlungsleistung
eNodeB	evolved NodeB(engl.) → Basisstation bei LTE
EPRE	Energy per Resource Element
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (engl.) → Europäisches Institut für Fernmeldenormen
FCC	Federal Communications Commission (engl.) → amerikanische Zulassungsbehörde für Kommunikationsgeräte
FDD	Frequency Division Duplex (engl.) → Frequenzduplex
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile Communication (engl.)
GP	Guard Period
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA(+)	High Speed Packet Access (engl.)
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access

LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen
LOS	Line of Sight (engl.) → Sichtverbindung
LTE	Long Term Evolution (engl.), Mobilfunkstandard
MCCH	Main Control Channel
MIMO	Multiple Input Multiple Output (engl.) → Mehrantennentechnik
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NLOS	Non Line of Sight (engl.) → keine Sichtverbindung
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex (engl.), Mehrträger-Kodierungsverfahren
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (engl.), Mehrträger-Kodierungsverfahren
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association (engl.) → Erweiterungskarten für mobile Computer
P-CPICH	Primary Common Pilot Channel
PCS 1900	Personal Communications Service (engl.) → Frequenzband für Mobilkommunikation (1930-1990 MHz Downlink, 1850-1910 MHz für Uplink)
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PMD	Prüf- und Messdienst der Bundesnetzagentur
PSK	Phase Shift Keying
P-SS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
RMS	Root Mean Square
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (engl.) → Quadraturamplitudenmodulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (engl.) → Quadraturphasenumtastung
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RNC	Radio Network Controller
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Received Power
SAE	System Architecture Evolution

SAR	Spezifische Absorptionsrate
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access (engl.) → Mehrträger-Kodierungsverfahren
STC	Space Time Coding
S-SS	Secondary Synchronization Signal
SU-MIMO	Single-User MIMO
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex (engl.) → Zeitduplex
TDMA	Time Division Multiple Access (engl.) → Zeitmultiplex
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TETRAPOL	Terrestrial Trunked Radio Police
UE	User Equipment (engl.) → Endgerät
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (engl.) → Universelles Mobiltelekommunikationssystem
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot
VoIP	Voice over IP
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

k Erweiterungsfaktor bei Normalverteilung

B Bandbreite

B_{Sig} Bandbreite des zu messenden Signals

B_{N} Rauschbandbreite

E Elektrische Feldstärke

K Antennenfaktor