

Bestimmung der Exposition der Bevölkerung durch LTE- und TETRA BOS-Mobilfunkanlagen

Dr. Christian Bornkessel, IMST GmbH Kamp-Lintfort, Prüfzentrum

Markus Schubert, IMST GmbH Kamp-Lintfort, Prüfzentrum

Prof. Dr. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf

1 Einleitung

LTE (Long Term Evolution) ist eine neue Mobilfunktechnologie. Im Vergleich zur Vorgängertechnologie UMTS zeichnet sie sich durch höhere Datenraten und kürzere Latenzzeiten aus. Bei einer Bandbreite von 20 MHz sollen maximale Datenraten von 100 MBit/s im Downlink erreicht werden. Damit ist die Hauptanwendung der neuen Technik der mobile Breitbandzugang zu Telekommunikationsdiensten.

Bei LTE können flexible Kanalbandbreiten von 1,4 MHz bis 20 MHz genutzt werden. Im Jahr 2010 hat bei der Bundesnetzagentur eine Versteigerung von Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz für den „drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdiensten“ stattgefunden. Obwohl die Ausschreibung technologieneutral formuliert war, wird derzeit LTE in den Frequenzbereichen 800 MHz (Digitale Dividende 1), 1,8 GHz und 2,6 GHz aufgebaut und betrieben. Die aktuell verfügbaren Netze laufen im FDD-Modus; prinzipiell kann die Trennung von Up- und Downlink in den Frequenzbändern bei 2 GHz und 2,6 GHz jedoch auch mit TDD erfolgen.

Als Codierungsverfahren wird im Downlink OFDMA verwendet. Hierbei wird die gesamte Trägerbandbreite in viele Unterträger mit einem Trägerabstand von 15 kHz aufgespalten. Jeder Unterträger wird dann mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert.

Für die deutschen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wird seit einigen Jahren für ihre nichtöffentliche Kommunikation ein digitales Funknetz nach dem TETRA-Standard aufgebaut (TETRA BOS). Das Kernnetz mit seinen 64 Standorten steht derzeit bereits voll funktionsfähig zur Verfügung. Nach Angaben der BDBOS sind von den geplanten ca. 4.500 Basisstationen an rund 4.300 Standorten bereits etwa 4.000 aufgebaut. Mit Stand Oktober 2013 bedeutet dies eine Funkabdeckung von rund 87 Prozent des deutschen Territoriums.

Dem digitalen BOS-Netz steht in Deutschland der Frequenzbereich 380-385 MHz (Uplink) bzw. 390-395 MHz (Downlink) zur Verfügung. Bei einer Kanalbandbreite von 25 kHz können somit 200 Duplexkanäle genutzt werden. TETRA nutzt ähnlich wie GSM TDMA als Vielfachzugriffsverfahren, allerdings werden nur vier Zeitschlitze je Rahmen verwendet. Als Modulationsverfahren kommt $\pi/4$ -DQPSK zum Einsatz.

Zum Betrieb von LTE und TETRA BOS sind ein Netz aus Basisstationen, die eine bestimmte Fläche versorgen, sowie entsprechende Endgeräte notwendig. Da über die mit den Basisstationen verbundenen elektromagnetischen Expositionen bislang noch wenig Informationen vorlagen, hat das Bundesamt für Strahlenschutz ein Forschungsprojekt „Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken“ initiiert, in dem entsprechende messtechnische Expositionsuntersuchungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieses Projektes werden nachfolgend vorgestellt.

2 Messverfahren

Nach der in Deutschland relevanten Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) [1] müssen die Grenzwerte von ortsfesten Sendeanlagen bei höchster betrieblicher Auslastung der Sendeanlage eingehalten werden. Somit sind bei der Immissionsmessung Methodiken zur Hochrechnung der ermittelten Momentanimmersion auf den Zustand bei maximalem Sendebetrieb anzuwenden. Diese beruhen auf einer Identifizierung und Messung derjenigen Signale und Kanäle, die unabhängig vom aktuellen Verkehrsaufkommen mit konstanter Leistung gesendet werden und keinen Leistungsregelungsmechanismen unterliegen. Aus der Immission dieser Signale kann unter Kenntnis des Verhältnisses von maximaler Sendeleistung der Station zur Sendeleistung dieser Signale zuverlässig auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung extrapoliert werden.

Die Messung von LTE-Immissionen kann prinzipiell frequenzselektiv und codeselektiv erfolgen. Während die frequenzselektive Messung mit üblichen Spektrumanalysatoren durchgeführt werden kann, sind für die codeselektive Messung spezielle Messgeräte erforderlich.

Bei LTE-Basisstationen werden die Signale P-SS (Primary Synchronisation Signal), S-SS (Secondary Synchronisation Signal), RS (Reference Signal) und der Kanal PBCH (Physical Broadcast Channel) permanent mit konstanter und von der derzeitigen Verkehrslast unabhängiger Leistung gesendet. P-SS, S-SS und PBCH belegen eine Bandbreite von ca. 1 MHz in der Kanalmitte unabhängig von der Bandbreite des gesamten LTE-Signals. Mit einem Spektrumanalysator wird frequenzselektiv die Immission bei der Mittenfrequenz des LTE-Kanals mit einer Auflösebandbreite von 1 MHz gemessen. Die gemessenen Immissionen werden dann mit Hilfe der Leistungskonfiguration der LTE-Station (EPRE Einstellungen, Energy per Resource Element) und der maximalen Signalbandbreite auf die Immission bei maximaler Anlagenauslastung extrapoliert.

Mit codeselektiven Verfahren wird die Immission der LTE-Basisstation basisstations- bzw. sektorspezifisch erfasst. Damit können die Probleme von frequenzselektiven Messungen umgangen werden, die die Immissionsbeiträge verschiedener Sektoren bzw. Basisstationen (Zellen) aufgrund des Gleichwellennetzes nicht separieren können. Mit dem codeselektiven Verfahren werden die Signale P-SS, S-SS und RS jeder Zelle getrennt erfasst, da diese Signale zellspezifisch codiert sind. Die Hochrechnung erfolgt dann mit Hilfe des Verhältnisses von EPRE des gemessenen Signals zur maximal möglichen Sendeleistung der LTE-Zelle.

Es existieren derzeit zwei codeselektive EMF-Messgeräte auf dem Markt. Diese wurden innerhalb des Projektes miteinander und im Vergleich zu frequenzselektiven Verfahren unter Labor- und Feldbedingungen ausführlich getestet. Dabei wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

Code- und frequenzselektive Verfahren liefern bei gleichen Randbedingungen übereinstimmende und reproduzierbare Messergebnisse und sind daher für Immissionsmessungen an LTE-Basisstationen grundsätzlich geeignet. Während frequenzselektive Verfahren in Abhängigkeit der Konfiguration der Synchronisierungssignale potenziell die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Immission überschätzen können, haben codeselektive Verfahren vor allem bei erhöhter Verkehrsauslastung der Basisstation die Problematik einer begrenzten relativen Dynamik: Sofern am Messpunkt das Signal einer

Zelle stark dominiert, werden unter Umständen die Immissionen der anderen Zellen des gleichen Standortes oder umliegender Standorte nicht mehr erfasst.

Bei TETRA BOS-Basisstationen gibt es einen Kanal, der ständig konstant mit maximaler Leistung sendet und bei dem alle Zeitschlitze belegt sind, auch wenn gerade keine Verbindung über diesen Kanal abgewickelt wird. Dieser Kanal ist der MCCH (Main Control Channel); er dient u.a. als Referenzsignal für Zellwahl und Handover und bestimmt durch sein permanentes Vorhandensein die minimal in einer Funkzelle mögliche Immission. Mit einer frequenzselektiven Messung wird die Immission des MCCH ermittelt, wobei hier ähnlich wie bei LTE aufgrund des digitalen Modulationsverfahrens und der deswegen schwankenden Hüllkurve des Signals die Verwendung des RMS-Detektors obligatorisch ist. Als Auflöseseitenbreite sollte 30 kHz verwendet werden. Die für den MCCH gemessene Immission wird dann mit der Anzahl der maximal möglichen Kanäle pro Funkzelle linear hochgerechnet.

3 LTE- und TETRA BOS-Immissionen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen und die Analyse der Immissionen an verschiedenen LTE und TETRA BOS-Stationen vorgestellt. Bei den untersuchten Anlagenkonfigurationen wurde Wert auf eine möglichst breite Vielfalt unterschiedlicher Szenarien gelegt. Insgesamt wurde die Immission an 257 Messpunkten (LTE: 177, TETRA BOS: 80) in der Umgebung von 16 Standorten (LTE: 11, TETRA BOS: 5) untersucht. Neben nach systematischen Gesichtspunkten ausgewählten Messpunkten wurde die Immission auch an zufällig verteilten Messpunkten bestimmt.

3.1 Messergebnisse

3.1.1 LTE-Immissionen

Die größte festgestellte LTE-Immission beträgt 7,28 % vom Feldstärkegrenzwert, die geringste ist 0,002 %. Die Spannweite der Immission ist sehr groß, sie beträgt über alle Messpunkte mehr als 70 dB. Der durchschnittliche Expositionswert ist mit 1,79 % deutlich größer als der Medianwert von 0,70 % und weist auf eine unsymmetrische Verteilung der Immissionswerte hin. Dies wird aus folgendem Verteilungsdiagramm für alle LTE-Messpunkte deutlich. Die Balken zeigen an, wie viele Messpunkte in eine bestimmte Grenzwertklasse fallen. Bild 1 zeigt deutlich, dass der überwiegende Teil der Messergebnisse bei weniger als 1 % vom Feldstärkegrenzwert liegt. Zu höheren Grenzwertklassen fällt die Anzahl der zugehörigen Messpunkte sehr schnell ab.

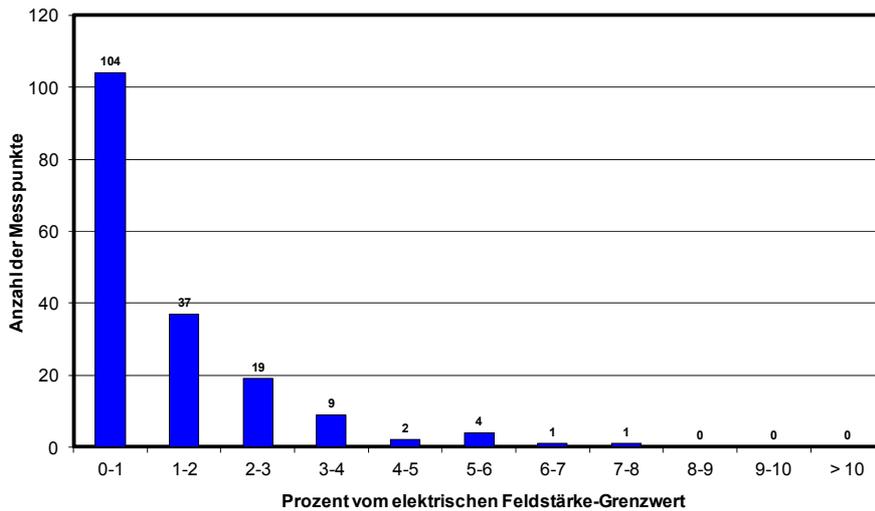


Bild 1: Verteilung der LTE-Messergebnisse in Grenzwertklassen

3.1.2 TETRA BOS-Immissionen

Die größte festgestellte TETRA BOS-Immission beträgt 4,63 % vom Feldstärkegrenzwert, die geringste ist 0,03 Prozent. Die Spannweite der Immission ist sehr groß, sie beträgt über alle Messpunkte fast 44 dB. Auch hier ist der durchschnittliche Expositionswert mit 1,45 % deutlich größer als der Medianwert von 0,46 % und weist auf eine un-symmetrische Verteilung der Immissionswerte hin. Dies wird aus folgendem Verteilungsdiagramm für alle TETRA BOS-Messpunkte deutlich. Die Balken zeigen an, wie viele Messpunkte in eine bestimmte Grenzwertklasse fallen.

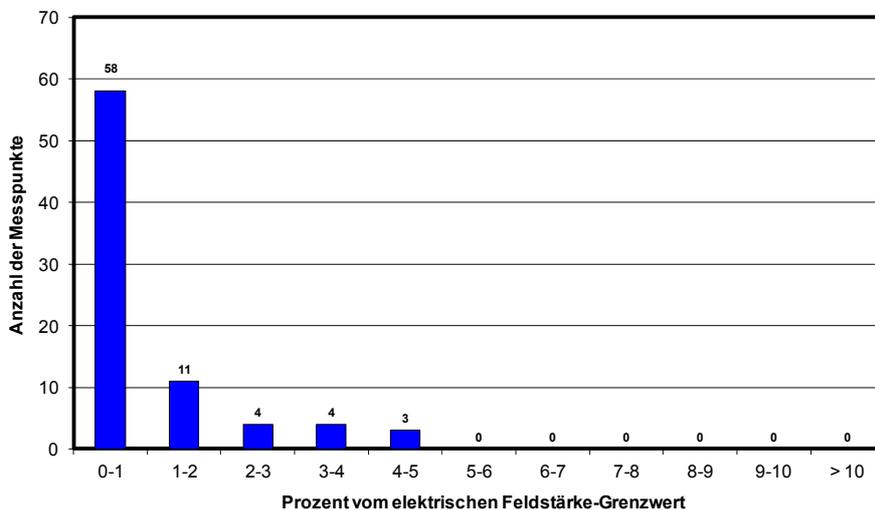


Bild 2: Verteilung der TETRA BOS-Messergebnisse in Grenzwertklassen

Bild 2 zeigt deutlich, dass der überwiegende Teil der Messergebnisse bei weniger als 1 % vom Feldstärkegrenzwert liegt. Zu höheren Grenzwertklassen fällt die Anzahl der zugehörigen Messpunkte sehr schnell ab.

3.2 Analyse der LTE- und TETRA BOS-Immissionen

Für die Größe und Verteilung der LTE- und TETRA BOS-Immissionen sind unterschiedliche Einflussfaktoren wie der (laterale) Abstand zur Sendeanlage, der relative Höhenunterschied vom Messpunkt (MP) zur Sendeanlage und die Sichtverhältnisse (freie Sicht oder Sicht durch Hindernisse verdeckt) relevant und werden daher im Folgenden untersucht. Da sich die identifizierten Gesetzmäßigkeiten von LTE und TETRA BOS-Immissionen gleichen, werden nur die Ergebnisse für die LTE-Immissionen vorgestellt.

3.2.1 Abstandsabhängigkeit

Das folgende Bild zeigt die Immission aller Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur Antenne zusammen mit deren Abstand zur LTE-Sendeanlage.

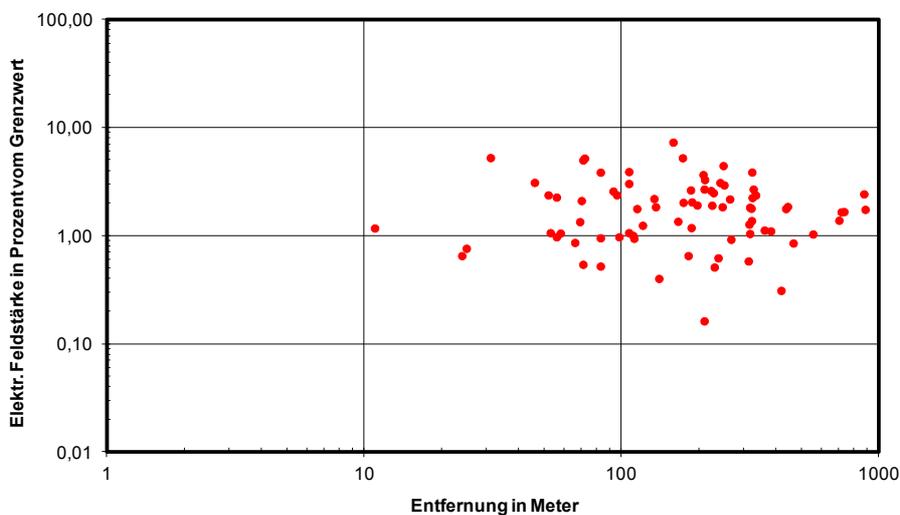


Bild 3: LTE-Immission als Funktion des lateralen Abstands für die 78 Outdoor-Messpunkte mit Sichtverbindung zur LTE-Antenne

Als Ergebnis wird deutlich, dass es im unmittelbaren Umfeld der Sendeanlage (Entfernungen bis ca. einige hundert Meter) offenbar nicht gerechtfertigt ist, den Abstand als maßgebliches Kriterium für die Beurteilung der Immissionsgröße zu verwenden. Bei geringen Abständen werden nicht die höchsten Immissionen erreicht. Die höchsten Immissionen der Messreihe finden sich vielmehr bei Abständen von um oder über 100 Meter von der Anlage. Ab etwa 150 Meter ist zwar eine gewisse Abnahme der Immission mit dem Abstand erkennbar, für eine bestimmte Entfernung beträgt die Spannweite der Immission jedoch teilweise bis zu etwa 30 dB. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in dem Umstand begründet, dass es sich bei LTE-Antennen nicht um isotrope (d.h. in alle Richtungen gleichmäßig abstrahlende) Antennen handelt, sondern um Richtantennen, die ihre Energie speziell in bestimmte Raumrichtungen verteilen. Somit befinden sich nahe an der Anlage gelegene Messpunkte oft im so genannten „Nahbereichsschatten“, wohingegen Punkte, die in Bereichen der Hauptstrahlrichtung liegen, eine höhere Immission erfahren.

3.2.2 Vertikalwinkel

In folgendem Bild ist für alle Messpunkte mit Sicht zu den LTE-Sendeantennen die Immission als Funktion des Vertikalwinkels dargestellt. Der Vertikalwinkel ist derjenige Winkel, unter dem man vom Messpunkt aus die Sendeanlage sieht. Geringe Vertikalwinkel bedeuten, dass der Messpunkt sehr weit von der Antenne entfernt ist oder sich Messpunkt und Antenne auf nahezu derselben Höhe befinden. Bei großem Vertikalwinkel besteht zwischen Messpunkt und Sendeanlage eine geringe Entfernung und ein großer Höhenunterschied.

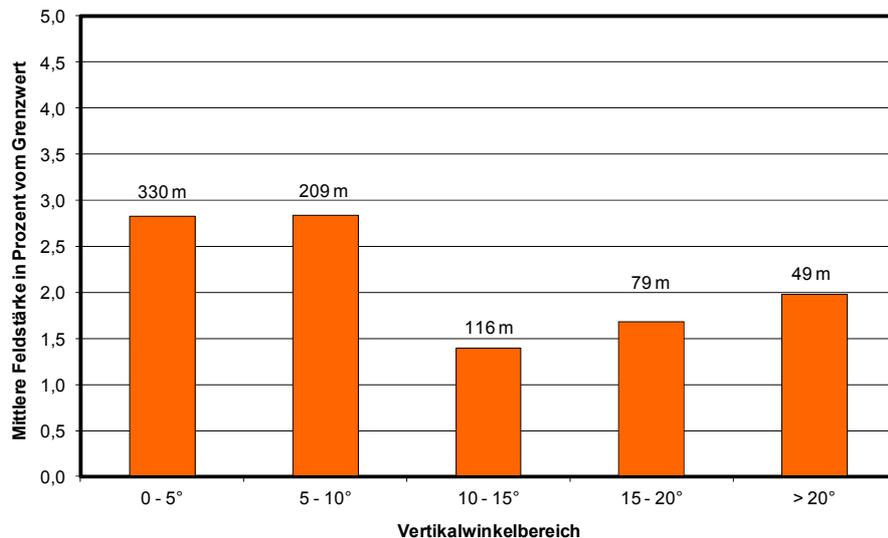


Bild 4: Immission als Funktion des Vertikalwinkels an allen Messpunkten mit Sicht. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur LTE-Sendeanlage beim jeweiligen Vertikalwinkelbereich angegeben

In Bild 4 ist die Immission für LTE jeweils *gemittelt* über verschiedene Vertikalwinkelbereiche angegeben. Über den Balken ist die mittlere Entfernung der Messpunkte zur Sendeanlage (lateraler Abstand) beim jeweiligen Vertikalwinkelbereich angegeben. Es ist zu erkennen, dass im hier betrachteten Entfernungsbereich an Messpunkten mit Vertikalwinkeln im Bereich typischer Downtiltwinkel (d.h. etwa 0 bis 8°) trotz im Mittel größerer Messpunktabstände (!) höhere Messwerte auftreten, als an Punkten mit größerem Vertikalwinkel. Damit zeigt sich, dass im Gegensatz zum Abstand der Vertikalwinkel ein wichtiger Einflussfaktor für die Immission ist.

3.2.3 Sichtverhältnisse

Im Bild 5 ist die entfernungsabhängige Immission als Funktion der Sichtverbindung zur LTE-Anlage dargestellt.

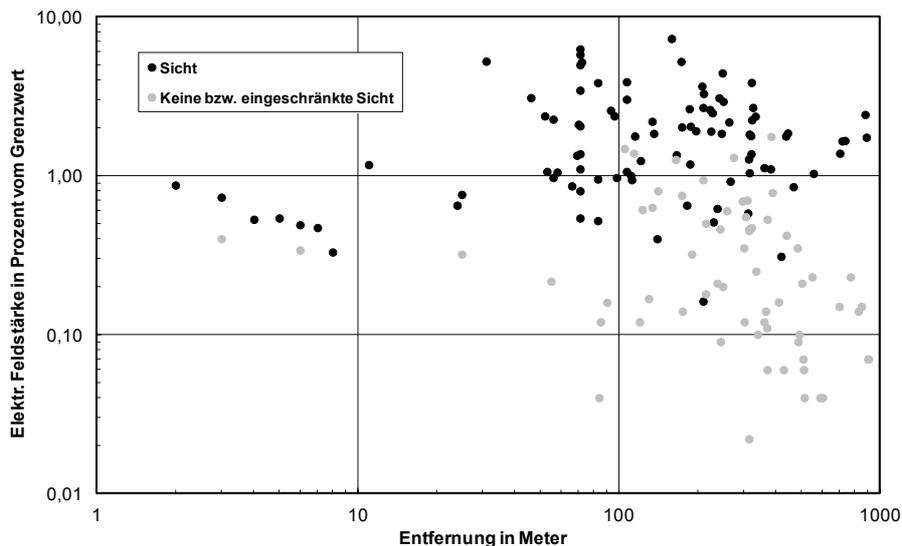


Bild 5: LTE-Immission als Funktion der Sichtverhältnisse

Durch das obige Bild wird deutlich, dass Hindernisse im Ausbreitungsweg zwischen Basisstationsantenne und Messpunkt, wie z.B. Gebäude oder auch Bäume, zu einer Abschwächung der Signale und somit zu einer Verringerung der Immission führen. Der abschattende Effekt führt bei den in Bild 5 gezeigten Messpunkten zu einem Unterschied von etwa 18,2 dB, um den die LTE-Immission bei Messpunkten mit eingeschränkter bzw. fehlender Sichtverbindung geringer ist als bei Messpunkten mit Sichtverbindung.

3.2.4 Fazit

Die Analyse der Immissionen in der Umgebung von LTE-Basisstationen hat gezeigt, dass der Abstand im unmittelbaren Umfeld der jeweiligen Anlage (bis zu einigen hundert Meter, abhängig von Montagehöhe und Downtilt) offenbar als Maß zur Abschätzung der entstehenden LTE -Immission wenig geeignet ist. Grund dafür ist, dass in diesem Entfernungsbereich die Immission einen unregelmäßigen Charakter aufweist.

Einen deutlichen Einfluss üben hingegen die Sichtverhältnisse aus: Objekte wie Gebäude, aber auch Bäume und Sträucher zwischen Messpunkt und Sendeanlage haben einen dämpfenden Einfluss, der sich erheblich in den Messergebnissen widerspiegelt.

Der Einfluss des Vertikalwinkels ist ebenfalls deutlich nachweisbar: Messpunkte, die in oder nahe der vertikalen Hauptstrahlrichtung liegen, erfahren eine größere Immission als Messpunkte außerhalb der Hauptstrahlrichtung.

Die hier dokumentierten Gesetzmäßigkeiten der Analyse von LTE-Immissionen wurden auch bei der Verteilung von TETRA BOS-Immissionen festgestellt.

3.3 Vergleich der Immissionen zu anderen Funkdiensten

LTE- und TETRA BOS-Basisstationen werden primär an schon vorhandenen Mobilfunkstandorten errichtet. Die durch die dort bereits bestehenden GSM- und/oder UMTS-Anlagen verursachten Mobilfunkimmissionen wurden bei den Messreihen mit erfasst. Hierbei hat sich gezeigt, dass sich über alle systematisch ausgewählten Messpunkte gemittelt ein Zuwachs von 37 % bei LTE und 47 % bei TETRA BOS (Median bezüglich

der Ausschöpfung des Leistungsflussdichte-Grenzwertes) bezogen auf die vom selben Standort verursachten GSM- und UMTS-Immissionen ergibt. An mehreren Szenarien wurde - zusätzlich zur LTE- bzw. TETRA BOS-Immission - auch die gesamte Hochfrequenzimmission im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz bestimmt. Im Mittel über alle Punkte ergab sich für die LTE-Immissionen leistungsbezogen ein Anteil von 22 % und für die TETRA BOS-Immissionen ein Anteil von 30 % an der gesamten grenzwertbezogenen Hochfrequenzimmission.

4 Zusammenfassung

Der Beitrag fasst die Ergebnisse eines Forschungsprojektes für das Bundesamt für Strahlenschutz zur messtechnischen Analyse von Immissionen im Umfeld von LTE- und TETRA BOS-Basisstationen zusammen.

LTE-Messungen an 102 systematisch und 75 zufällig ausgewählten Messpunkten ergaben auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte Immissionen zwischen 0,002 und 7,28 % der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV (Median 0,70 %). Die TETRA BOS-Messungen an 40 systematisch und 40 zufällig ausgewählten Messpunkten ergaben extrapolierte Immissionen zwischen 0,03 und 4,63 % des Feldstärkegrenzwertes (Median 0,46 %). LTE- und TETRA BOS-Immissionen sind von ihrer Größenordnung und ihrer örtlichen Verteilung vergleichbar zu den Immissionen durch GSM- und UMTS-Mobilfunkanlagen.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass mit den Basisstationen der neuen Mobilfunktechniken LTE und TETRA BOS eine Immissionszunahme für die Bevölkerung verbunden ist; die Gesamtimmission durch Sendeanlagen bewegt sich aber nach wie vor auf sehr geringem Niveau (Median kleiner als 2 % des Feldstärkegrenzwertes). An den untersuchten Mobilfunkanlagen ergab sich bei maximaler Anlagenauslastung im Mittel ein leistungsbezogener Zuwachs der Mobilfunkimmissionen von 37 % durch LTE bzw. 47 % durch TETRA BOS.

Die Projektergebnisse sind im Detail unter [2] dokumentiert.

5 Danksagung

Das hier beschriebene Vorhaben wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

6 Literaturhinweise

- [1] 26. BImSchV, Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [2] Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz;
http://www.emf-forschungsprogramm.de/akt_emf_forschung.html/dosi_HF_004.html